

**Рубин Талески
Драгослав Рајичиќ**

ВОВЕД ВО СВЕТОТЕХНИКАТА

Скопје, 2007 година

Рецензенти: проф. д-р Предраг Ранчиќ, Електронски факултет, Ниш
проф. д-р Миомир Костиќ, Електехнички факултет, Београд

© 2007 Рубин Талески и Драгослав Рајичиќ

Сите авторски права ги задржуваат авторите. Ни еден дел од овој учебник не смее да се репродуцира или дистрибуира, во каква и да е форма и на каков и да е начин, без претходна писмена согласност од авторите.

ПРЕДГОВОР

Светлината и нејзиното влијание врз околината и човековото живеење се изучува во повеќе научни и стручни области: медицина, психологија, архитектура, техника итн. Вообичаено е техничките аспекти на светлината и нејзините електрични извори, како и нивното искористување за реализација на практични цели, да се една од дисциплините што се изучува во рамките на студиите на некои од насоките на техничките факултети. Во основа, таквите курсеви содржат изучување на: особините на светлинските извори и придружните уреди, методите за пресметка на светлотехничките големини и техниките на проектирање на системите за осветление.

Од областа на светлотехниката многу малку книги се објавени на македонски јазик. Најголем број изданија претставуваат учебници за средни училишта, многу мал број универзитетски учебници, а не постои ниту една стручна книга чија основна намена не е да биде учебник. Оттука произлегла и главната дилема на авторите кога започнале со работата на овој труд: како да се конципира текстот, а тој да биде разбирлив и корисен како за учениците и студентите така и за професионалците што се занимаваат со светлотехниката. Одлучено било да се направи учебник, наменет првенствено за студентите по електротехника, но во исто време, да може да им послужи и на дипломираните инженери во текот на нивната работа. Трудот треба да ја покрие празнината што настанала по исцрпувањето на тиражот на учебникот од 1993 година *Електрично осветление* од Драгослав Рајичиќ.

Ваквиот пристап неминовно значи релативно голем обем на текстот, затоа што во него треба да има информации што не се неопходни за студентите. Како резултат на тоа, авторите одлучиле во оваа книга да бидат вклучени, главно, теоретските подобласти, а да бидат изоставени оние подобласти од светлотехниката што се занимаваат со проектирање на системите за електрично осветление и соодветните стандарди и препораки. Авторите сметале дека проектирањето на електричното осветление е проблем што заслужува посебно внимание и тој ќе биде обработен во посебен учебник.

Како учебник, книгата треба да им послужи на студентите на Факултетот за електротехника и информациски технологии во Скопје каде што се изучува предметот *електрично осветление*. Содржината на овој учебник, во најголема мерка, ги покрива потребите на наставната програма по тој предмет. Во таа смисла, во текстот се вклучени определен број примери со кои се илустрира изложената материја.

За професионалците што се занимаваат со проектирање на електрично осветление, книгата може да послужи како еден вид референтен прирачник во кој се опфатени неопходни информации за: пресметка и мерења на светлотехничките големини, светлинските извори, светилките и системите за осветление.

Информациите што се содржани во текстот се однесуваат на периодот кога овој текст е подготвуван за печатење. Се разбира, во светлотехниката, особено во делот што се занимава со изворите на светлина, постојано има нови сознанија. Тоа пред сè се однесува на изворите базирани на новите технологии, како што се светлечките диоди. Поради тоа, овие извори се обработени само од принципиелен аспект, без навлегување во многу детали.

Изборот на фотографиите што биле одбрани е направен пред сè водејќи сметка за суштината на информациите што се презентирани во трудот. Покрај тоа, изборот се базирал и на расположливоста на квалитетни материјали, погодни за печатење. Авторите ја користат оваа прилика да им се заблагодарат на следните носители на авторски правата што дозволиле користење на нивните материјали: Gewiss SpA, Illuminating Engineering Society of North America, Philips Electronics UK, Dissano Illuminazione SpA. и Tim Torp.

Авторите им заблагодаруваат на рецензентите проф. д-р Миомир Костиќ и проф. д-р Предраг Ранчиќ, за нивните конструктивни забелешки и коментари.

Особена благодарност авторите им изразуваат на своите семејства за нивната континуирана и безрезервна поддршка и создавање амбиент на хармонија и разбирање.

draft

СОДРЖИНА

ПРЕДГОВОР	iii
1 ВОВЕД.....	1
2 СВЕТИНА, ГЛЕДАЊЕ И БОЈА	6
2.1 Природа на светлината	6
2.2 Релативна спектрална осетливост на човечкото око.....	11
2.3 Видно поле	12
2.4 Светлина и боја.....	13
2.4.1 Колориметриски систем на бои на CIE	13
2.4.2 Температура на боја	17
2.4.3 Индекс на репродукција на боја	20
3 ОСНОВНИ СВЕЛОТЕХНИЧКИ ГОЛЕМИНИ И ПОИМИ	25
3.1 Радиометриски и фотометриски големини	25
3.2 Светлински флуks и количество светлина	25
3.3 Треперење на светлината и стробоскопски ефект	26
3.4 Светлинска ефикасност, ефикасност на зрачењето и специфично производство	32
3.5 Светлинска емисија	35
3.6 Точкаст светлински извор	35
3.7 Светлинска јачина и нејзината распределба	36
3.7.1 Просторен агол.....	36
3.7.2 Светлинска јачина	38
3.7.3 Фотометриско тело.....	40
3.7.4 Зонални флуksови и кумулативни зонални флуksови.....	43
3.8 Сјајност.....	45
3.8.1 Сјајност на површина	45
3.8.2 Униформно дифузни извори	47
3.9 Осветленост од точкасти светлински извори.....	50
3.9.1 Осветленост на површина	50
3.9.2 Осветленост во точка	53
3.9.3 Вектор на осветленост.....	55
3.9.4 Средна сферна осветленост (скалар на осветленост)	56
3.9.5 Средна цилиндрична осветленост	59

3.9.6	Средна полуцилиндрична осветленост	60
3.10	Осветленост од светлински извори со конечни димензии	62
3.10.1	Општо	62
3.10.2	Пресметка на осветленост од рамни дифузни светлечки површини	64
3.10.3	Пресметка на осветленост од светлечка отсечка.....	75
3.11	Контраст	84
3.12	Блескотење.....	86
4	СВЕЛТОТЕХНИЧКИ СВОЈСТВА НА МАТЕРИЈАЛИТЕ	91
4.1	Воведни забелешки.....	91
4.2	Одбивање на светлината	92
4.2.1	Насочено одбивање	92
4.2.2	Дифузно одбивање	100
4.2.3	Полудифузно одбивање.....	107
4.2.4	Мешано одбивање	108
4.3	Пропуштање на светлината	108
4.3.1	Насочено пропуштање.....	109
4.3.2	Дифузно пропуштање	110
4.3.3	Полудифузно пропуштање	111
4.3.4	Мешано пропуштање.....	112
4.4	Карактеристики на некои светлотехнички материјали.....	112
4.5	Повеќекратно одбивање	115
4.5.1	Повеќекратно одбивање во планпаралелна плоча од провиден материјал.....	115
4.5.2	Повеќекратно одбивање во затворени простори ограничени со сферна површина	119
4.5.3	Повеќекратно одбивање во затворени простори со произволен облик	125
5	ЕЛЕКТРИЧНИ СИЈАЛИЦИ	133
5.1	Општо за електричните сијалици	133
5.1.1	Поделба на електричните сијалици	135
5.1.2	Номинални карактеристики на електричните сијалици.....	136
5.1.3	Помошни и контролни уреди	145
5.1.4	Специфично производство	150
5.2	Сијалици со вжарено влакно.....	154

5.2.1	Општи карактеристики на сијалиците со вжарено влакно.....	154
5.2.2	Волфрамови сијалици	161
5.2.3	Халогени сијалици	166
5.3	Сијалици со празнење во гасови	171
5.3.1	Општи карактеристики на сијалиците со празнење во гасови.....	171
5.3.2	Флуоресцентни сијалици	184
5.3.3	Живини сијалици	218
5.3.4	Метал–халогени сијалици	227
5.3.5	Натриумови сијалици со висок притисок.....	237
5.3.6	Натриумови сијалици со низок притисок.....	242
5.4	Сијалици без електроди	248
5.4.1	Општи карактеристики на сијалиците без електроди	248
5.4.2	Индукциони сијалици	249
5.4.3	Микробранови (сулфурни) сијалици.....	257
5.4.4	Светлечки диоди.....	260
5.5	Енергетска ефикасност на сијалиците и контролните уреди.....	265
5.5.1	Означување на енергетската ефикасност на сијалиците	266
5.5.2	Означување на енергетската ефикасност на контролните уреди за флуоресцентни сијалици	269
6	СВЕТИЛКИ.....	272
6.1	Општо за светилките.....	272
6.2	Поделба на светилките.....	273
6.2.1	Поделба според фотометриските карактеристики.....	273
6.2.2	Поделба според условите на работа и монтажата	276
6.3	Конструктивни карактеристики на светилките	278
6.4	Оптички системи.....	283
6.4.1	Рефлектори	283
6.4.2	Рефрактори и дифузери	285
6.4.3	Заклони.....	286
6.5	Светлотехнички карактеристики	288
6.5.1	Коефициент на искористување на светилка	289
6.5.2	Распределба на светлинската јачина	290
6.5.3	Коефициент на искористување на осветлението	310
6.5.4	Сјајност на светилките.....	316

7	СИСТЕМИ НА ЕЛЕКТРИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ	319
7.1	Општо за системите за електрично осветление	319
7.2	Видови системи на електрично осветление	320
7.2.1	Системи на електрично осветление за затворени простори	320
7.2.2	Системи на електрично осветление за отворени простори	323
7.2.3	Системи со оптички влакна и светловоди	324
7.3	Одржување на системите за електрично осветление	327
7.3.1	Општи забелешки за одржувањето на системите за електрично осветление	327
7.3.2	Коефициент на одржување	331
7.3.3	Период на одржување на системите за електрично осветление	335
7.4	Користење на дневната светлина за осветление	338
7.4.1	Општо за осветление со дневна светлина	338
7.4.2	Фактор на дневна светлина	339
7.5	Управување со системите за електрично осветление	340
7.5.1	Компоненти на системите за управување	341
7.5.2	Стратегии за управување со системите на осветление	347
8	СВЕЛТОТЕХНИЧКИ МЕРЕЊА	351
8.1	Општо за светлотехничките мерења	351
8.2	Мерни инструменти	352
8.3	Мерење на светлинската јачина	354
8.4	Мерење на светлинскиот флукс	356
8.5	Мерење на осветленост	358
8.6	Мерење на сјајност	361
9	ЛИТЕРАТУРА	363
10	КРАТЕНКИ И ОЗНАКИ	370
10.1	Список на кратенки	370
10.2	Список на ознаки	372

1 ВОВЕД

Како што изминува времето сè потешко може да се замисли животот и работата на луѓето без вештачко осветление. Од една страна, на луѓето им се ставаат на располагање сè посоефицирани уреди за работа при чиешто користење е потребна поголема концентрација. А кога човекот работи визуелни се најмалку 80% од сите информации што ги прима преку своите сетила [9]. Затоа е разбирлива потребата од сè поквалитетно осветление. Од друга страна, општиот напредок овозможува покомфорен живот и работа на луѓето, што условува и проширување на барањата за подобро осветление. Така, значајната улога што денес ја има осветлението не само што во иднина нема да се намалува туку е реално да се очекува нејзиното зголемување.

Бидејќи осветлението непосредно влијае врз гледањето, а тој процес е во тесна врска со работата на мозокот, всушност осветлението индиректно битно влијае и врз централниот нервен систем што ја контролира севкупната активност на човекот. Оттаму не е тешко да се разбере дека врз *видната перформанса*¹ на работниците битно влијае како квалитетот така и квалитетот на светлината што го осветлува предметот на работа и неговата околина. Тоа укажува дека системите за осветление треба да бидат квалитетно проектирани, изведени и одржувани, со цел да одговораат на сите барања што пред нив се поставуваат. За исполнување на претходната цел се неопходни соодветно оспособени кадри, а создавањето такви кадри не е ни малку едноставна задача. Намената на овој труд е да биде едно од помошните средства во процесот на оспособување стручни кадри коишто ќе се занимаваат со решавање на светлотехнички проблеми.

Несоодветното осветление може да биде причина за појава на негативни последици кај луѓето. Последиците можат да бидат од физиолошка или психолошка природа. Физиолошките се манифестираат како пречки во гледањето. Типичен пример за тоа е кога во видното поле² ќе се јави тело што зрачи светлина со значително поголем интензитет отколку околните предмети. Овие пречки се обично привременни. Меѓутоа, доколку причината за пречките е особено интензивна и/или долготрајна, можни се и трајни оштетувања на видот. Од друга страна, психолошките последици не влијаат директно врз процесот на гледањето или пак врз видната перформанса. Нивното влијание се манифестира главно врз расположението на луѓето (психичката состојба) и има индиректно влијание врз видната перформанса. Така, на пример, телата што зрачат треперлива светлина, а се наоѓаат во видното поле, не мора да бидат непосредна причина за пречки во гледањето, но придонесуваат за појава на психички замор, а со тоа и за опаѓање на видната перформанса.

¹ Видната перформанса претставува постигнување на работникот во извршување на видните задачи. Видните задачи можат да бидат набљудување на ситни детали (на пример, читање, користење на инструменти и сл.) или пак набљудување на околината (на пример, движења и промени во непосредната околина).

² Значењето на терминот видно поле е објаснето во потпоглавјето 2.3.

Заслужува да биде истакнато дека со возраста човечкото око ги намалува своите способности за добро гледање. Процесот на влошувањето не се одвива забрзано, но започнува релативно рано, на возраст под 20 години. Се смета дека тоа е резултат на повеќе причини. Некои од нив ќе ги наведеме. Кога човекот расте и неговите очни леќи стануваат поголеми и малку пожолтуваат. Од друга страна, бидејќи рожницата и очната леќа не се од наполно хомоген материјал, во окоото на возрасен човек се јавуваат неправилности кои повлекуваат слабеење на пропуштената светлина. Тие процеси се поизразени доколку светлината е со покуса бранова должина. Покрај тоа, поради прогресивното слабеење на соодветниот мускул, со возраста се намалува и отворот на црнката, особено во услови на ноќно гледање (т.е. при мали сјајности³). Како резултат на наведеното, при константна сјајност на набљудуваните предмети, осветленоста⁴ на мрежницата на окоото (ретината) униформно опаѓа со возраста на набљудувачот. Според [4], на 60-годишна возраст таа изнесува само една третина од онаа на 20-годишна возраст.

Бидејќи егзистенцијата на современиот човек зависи и од ефикасноста на неговата активност што се одвива при вештачко осветление, важноста на таквото осветление е неспорна. Во таа смисла е и тврдењето дека „не е скапо доброто осветление туку лошото“ [21]. Според истражувањата извршени во поразвиените земји е заклучено дека инвестирање во соодветен квалитет на осветлението редовно се исплатува [9]. По правило, со подобрување на осветлението се зголемува продуктивноста на трудот на сите работници, но зголемувањето е поизразито кај повозрасните работници.

На сликата 1.1 е даден преглед на некои ефекти од подобрувањето на работното осветление. Од таа слика се гледа дека со квалитетно осветление се постигнува поголемо производство, порационално користење на материјалите, енергијата и работната сила и подобро користење и одржување на средствата за работа. Сите тие ефекти се неопходни за постигнување поголема ефикасност на трудот и претставуваат битен услов за успешно работење, што е императив за развој на материјалната основа на општеството.

Значи, сосема е неоправдано на осветлението да се гледа како на помодарство или како на фактор чиешто влијание е маргинално.

Бидејќи во разновидните услови пред осветлението се поставуваат различни барања, неопходно е да се изготвуваат светлотехнички решенија со различни карактеристики коишто секогаш треба да соодветствуваат на условите за коишто се наменети.

Светлотехниката е област на науката и техниката што се занимава со проучување на принципите и развојот на средствата за производство, просторната распределба и мерењето на оптичкото зрачење⁵. Иако за светлотехниката може да се каже дека е техничка дисциплина, сепак поради важноста што светлината го има во животот и работата на човекот, во изучувањето на ефектите од употребата на светлината се

³ Значењето на терминот сјајност е објаснето во потпоглавјето 3.8.

⁴ Значењето на терминот осветленост е објаснето во потпоглавјето 3.9.

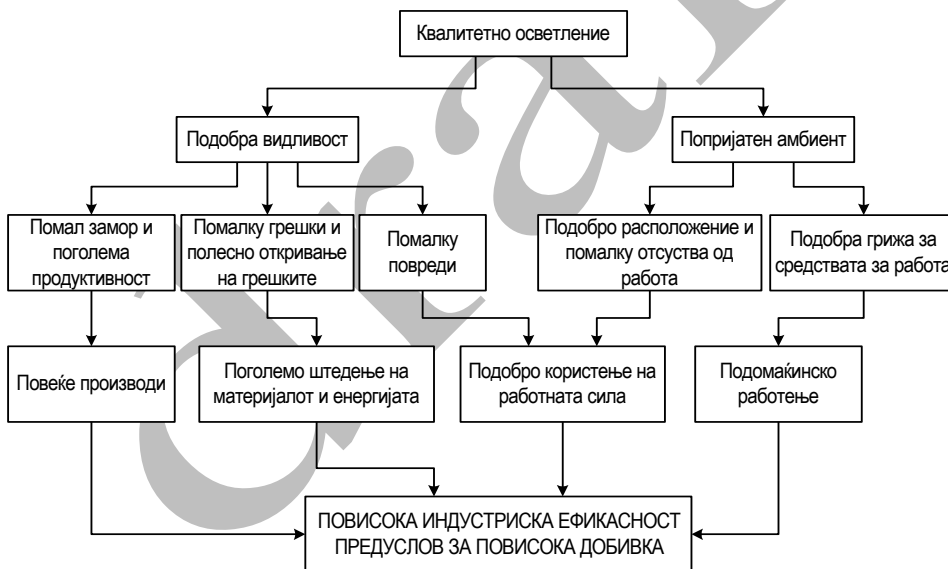
⁵ За дефиниција на оптичкото зрачење видете потпоглавје 2.1.

вклучени и други научни дисциплини, како што се: медицината, психологијата, ергономијата, и други. Со оглед на тоа што, пред сè, овој труд е наменет за студентите по електротехника, вниманието во него ќе биде насочено главно врз принципите за проектирање, одржување и користење на системите за електрично осветление.

Пред светлотехничарите најчесто се истакнува барањето нивното решение да задоволи најмалку еден од следниве услови:

- да обезбеди квалитетно и економично осветление коешто ќе овозможи ефикасно извршување на работните активности со дефинирани задачи;
- да обезбеди сигурно и безбедно одвивање на активностите во определен простор, и
- да обезбеди создавање услови за исполнување на зададените естетски критериуми.

Всушност, на определен начин, секое светлотехничко решение треба да ги задоволи трите претходно наведени услови, а во зависност од тоа кој од тие услови ќе биде доминантен, зборуваме за: работно, безбедносно или декоративно осветление. Но, во секој случај, осветлението треба да овозможи човечкото око да создаде впечаток соодветен на конкретните услови, олеснувајќи го процесот на гледањето.



Слика 1.1 Ефекти од квалитетно осветление (според [9])

Проектирањето, изведбата и експлоатацијата на системите за електрично осветление, како и многу други техничко–технолошки системи, се предмет на националните стандарди или препораки од соодветните стручни здруженија. Кај нас, за жал, единствениот стандард којшто ја обработува проблематиката на електричното осветление датира од 1962 година [27], така што критериумите и решенијата предвидени во него не соодветствуваат на современите сознанија и практиката во областа.

Поради тоа, во овој текст се користат и препораките од Меѓународната комисија за осветление (CIE). Да забележиме дека во многу држави тие препораки служат како појдовна основа за изготвување на националните стандарди.

Во работата на Техничките комитети на CIE учествуваат експерти од разни земји во светот, поради што и националните стандарди на многу земји незначително се разликуваат од препораките на CIE.

Во трудот се користат и термини коишто се релативно нови, не само во македонскиот јазик туку и во другите јазици. Тоа бил мотивот, покрај името коешто се користи во овој текст, за повеќето такви термини да се даде и соодветното име на англиски јазик.

Уредите коишто вршат конверзија на електричната енергија во светлинска ги нарекуваме *електрични сијалици* или накусо *сијалици*. Во практиката, за да може една сијалица соодветно да работи е потребно таа да биде поставена во уред преку кој ќе се обезбедува напојувањето со електрична енергија, кој ќе ја заштитува од штетните надворешни влијанија и со кој ќе се обезбеди соодветна просторна распределба на израчената светлина. Таквите уреди ќе ги нарекуваме *светилки*⁶.

Сите тела што зрачат светлина ги нарекуваме *извори на светлина* или *светлински извори*. Разликуваме два вида светлински извори: *примарни* и *секундарни*. Изворите во коишто друг вид енергија се конвертира во светлина се нарекуваат примарни. Тука, во прв ред, спаѓаат сијалиците. Телата коишто одбиваат или пропуштаат светлина што на нив паднала од други извори се нарекуваат секундарни извори.

Доколку не е поинаку нагласено, најчесто, под терминот извор на светлина ќе подразбираме сијалица или светилка во којашто е инсталирана сијалица или сијалици. Но, контекстот во којшто е употребен терминот извор на светлина недвосмислено ќе укажува на неговото соодветно значење. Така, на пример, во изразите *температурата на боја на светлинскиот извор*⁷ или *специфичното производство на светлинскиот извор*⁸, терминот *извор* е недвосмислен со оглед на тоа што температурата на боја и специфичното производство се карактеристики својствени на електричните сијалици, а не на светилките. Аналогно на тоа, во изразот *распределба на светлинската јачина на изворите* терминот *извор* се однесува на светилките, поради тоа што распределбата на светлинската јачина е карактеристика својствена на светилките. Во

⁶ Во јавноста се присутни дилеми околу употребата на терминот сијалица. Поаѓајќи од фактот дека за телата што зрачат светлина се вели дека *светат*, постојат предлози за сите такви тела да се користи терминот светилка. Во [23] постојат и терминот сијалица и терминот светилка, но помеѓу нивните значења не е направена никаква разлика. Од практични причини, во другите јазици постојат одделни термини за електричните уреди со коишто се врши конверзија на електричната енергија во светлинска и одделни термини за уредите потребни за практично функционирање на претходните уреди. Иако во практиката овие два уреда се користат заедно, сепак тие се сосема различни и добро е да се користат соодветни термини за секој од нив. Во недостиг на посоодветен предлог, во овој труд терминот сијалица ќе се користи за означување уред што врши конверзија на електричната енергија во светлинска, додека терминот светилка ќе се користи за означување уред во којшто треба да се инсталира сијалицата за да се овозможи нејзиното практично користење.

⁷ Значењето на терминот температура на боја на светлинскиот извор е објаснето во одделот 2.4.2.

⁸ Значењето на терминот специфично производство на светлинскиот извор е објаснето во потпоглавјето 3.4.

ситуациите кога употребата на терминот извор на светлина може да доведе до погрешно толкување, ќе се користат соодветните термини: сијалица, светилка или површина којашто одбива или пропушта светлина.

Во овој курс ќе се изучуваат главно макроскопските ефекти, со акцент на осветление од вештачки извори на светлина. Во второто и третото поглавје ќе бидат обработени основните поими и големини коишто се користат во светлотехниката. Покрај тоа, во третото поглавје ќе бидат изложени и методите за пресметка на некои светлотехнички големини. Во четвртото поглавје ќе бидат опишани основните светлотехнички својства на материјалите.

Електричните сијалици се обработени во петтото поглавје, додека светилките се предмет на шестото поглавје. Информациите презентирани во рамките на овие две поглавја се добиени од неколку извори: стручни книги, технички прирачници и каталози на производителите на опрема. Овие информации главно можат да се поделат во две групи: општи информации за сијалиците и светилките и нивните технички карактеристики. Настојувано е и општите информации и техничките карактеристики да соодветствуваат на состојбата во времето на пишување на овој текст. Но, со оглед на динамиката со којашто се развиваат некои типови сијалици, можно е дел од информациите за нив да бидат неактуелни во блиска иднина.

Во седмото поглавје се опишани системите на осветление, вклучувајќи го и дневното осветление како компонента на системите за осветление. Во рамките на ова поглавје ќе биде укажано на основните принципи за одржување на системите за електрично осветление.

Светлотехничките мерења се предмет на обработка во осмото поглавје.

Во деветтото поглавје е приложен список на користената и референцирана литература. Тука треба да се забележи дека дел од информациите користени при пишувањето на текстот се земени од извори од Интернет. Интернет адресите на овие извори можат да бидат невалидни во иднина, со оглед на динамиката со која што се менуваат информациите презентирани на глобалната мрежа.

На крајот е даден список на користените кратенки и ознаки.

По правило, во сите формули се користат големини изразени преку соодветните основни или изведени мерни единици од SI системот, без користење на било какви множители.

Децималните броеви, прикажани во текстот, на сликите или во формулите, се пишувани со децимална запирка. Во мал број случаи, на сликите можат да се појават броеви со децимална точка, ако тие слики биле преземени од публикации во коишто децималните броеви се запишани со децимална точка или ако тие биле генерирани со компјутерски програми во коишто презентацијата на децималните броеви е со децимална точка.

2 СВЕТЛИНА, ГЛЕДАЊЕ И БОЈА

2.1 Природа на светлината

Прашањето за природата на светлината, веројатно, го поставувале луѓето уште во најстарите времиња. Долго време не постоеле услови за формулирање научно образложен став за појавата и биле присутни мислења за коишто подоцна се покажало дека се далеку од научните. Напредокот во развојот на науката направен во втората половина на вториот милениум придонел за збогатување на сознанијата и во однос на ова прашање. Во кусиот осврт што следува ќе бидат наведени само некои од најзначајните теории.

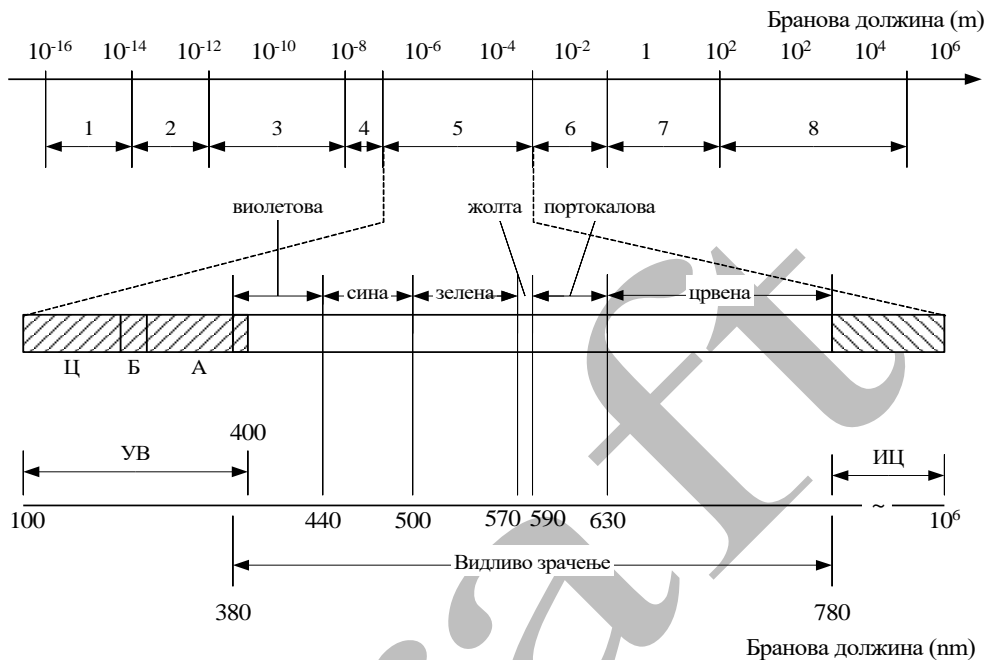
Во XVII век Њутн (Isaac Newton, 1642–1727) ја поставил теоријата којашто базира врз ставот дека светлинските извори емитураат енергија во вид на честички (корпускули) коишто се движат праволиниски. Во истиот век, Хајгенс (Christiaan Huygens, 1629–1695) ја објавил теоријата според која светлината настанува како резултат на осцилациите на молекулите на телото што свети и дека се пренесуваат низ „етерот“ во вид на бранови.

Подоцна, во XIX век, Максвел (James Clerk Maxwell, 1831–1879) ја развил теоријата според која светлинските извори емитураат енергија во вид на електромагнетни бранови. Следува модерната корпускуларна теорија на Планк (Max Planck, 1858–1947) во која се објаснува дека енергијата се емитура и апсорбира во дискретни квантуми (наречени фотони).

Во првата половина на XX век де Брољи (Louis de Broglie, 1892–1987) и Хајзенберг (Werner Heisenberg, 1901–1976) ја формулирале унифицираната теорија во којашто е направена своевидна синтеза на Максвеловата електромагнетна и Планковата квантна теорија. Првиот постулат на унифицираната теорија вели дека секоја честичка што се движи е придружена со бран чијашто бранова должина е обратно пропорционална на масата на честичката и нејзината брзина. Вториот постулат укажува дека не е можно да се дефинираат сите особини на светлината само со квантната или само со електромагнетната теорија.

Од широкиот спектар на електромагнетните зрачења само мал дел може непосредно да се регистрира со човечкото око. Тие зрачења ги нарекуваме *видливи зрачења* или *светлина* (слика 2.1). Нивните бранови должини во вакуум се во интервалот од 380 nm до 780 nm, при што зрачењата со различни бранови должини човечкото око ги забележува како светлина со различна боја.

На сликата 2.1 се означени приближните граници на брановите должини за одделните бои. Но, мора да се забележи дека границите меѓу боите не се остри, како што тоа би можело да се заклучи од сликата 2.1. Всушност, меѓу соседните бои се присутни сите преливи на тие бои.



Слика 2.1 Спектар на електромагнетни зрачења
 (1 – космички зраци; 2 – гама зраци; 3 – рентгенски зраци; 4 – ултравиолетови зраци во вакуум;
 5 – оптичко зрачење; 6 – микро и радарски бранови; 7 – ТВ бранови; 8 – радио бранови;
 УВ – ултравиолетови зраци; ИЦ – инфрацрвени зраци)

Електромагнетното зрачење со бранова должина од 100 nm до 380 nm⁹ е наречено ултравиолетово, а електромагнетното зрачење со бранова должина од 780 nm до околу 10^6 nm е наречено инфрацрвено зрачење. Ултравиолетовото, видливото и инфрацрвеното зрачење со заедничко име се нарекуваат *оптичко зрачење*.

Предмет на изучување на светлотехниката не е само видливото зрачење туку севкупниот спектар на оптичкото зрачење, поради сличноста на методите за генерирање, конверзија и примена на светлинските, ултравиолетовите и инфрацрвените зраци. И природните и вештачките извори на светлина зрачат енергија во поширок спектар отколку што е спектарот на видливото зрачење. Дури, кај некои светлински извори делот од енергијата што се конвертира директно во ултравиолетови и/или инфрацрвени зраци е значително поголем отколку делот конвертиран во светлината. Поради тоа, а со цел да се подобри ефикасноста на вештачките извори на светлина, се наметнува како неопходно да се изнајдат начини, пред сè, за претворање на енергијата на ултравиолетовите зраци во видливи.

⁹ Според [6], ултравиолетивите зраци се со бранова должина од 100 до 400 nm, додека видливата светлина е со бранова должина од 380 до 780 nm.

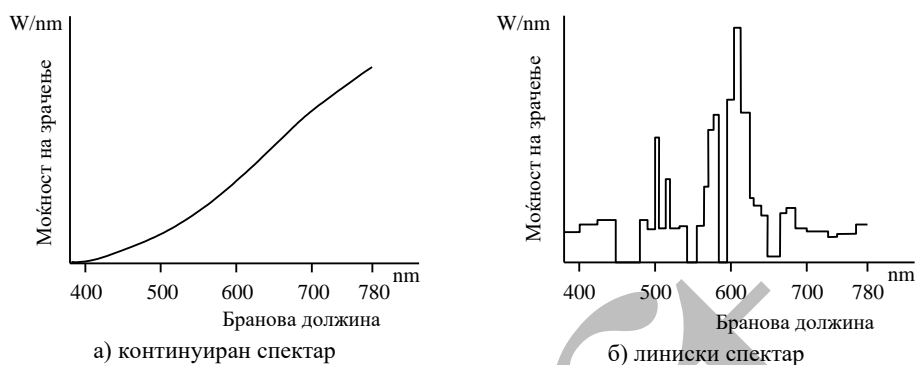
Познавајќи ги негативните ефекти што ултравиолетовите зраци ги имаат врз живите суштества и органските материи воопшто, при користењето на вештачките извори на светлина е неопходно да се води сметка зрачењето од овој дел од спектарот да биде елиминирано, или барем редуцирано. Од друга страна, ултравиолетовите и инфрацрвените зраци наоѓаат примена во многу други области, како што се: медицината, прехранбената и фармацевтската индустрија, термотехниката и др. Некои извори на ултравиолетови или инфрацрвени зраци претставуваат модификација на електричните сијалици наменети за општа употреба.

Теоретски гледано е можно еден извор да зрачи светлина само со една бранова должина, но тоа тешко може практично да се реализира. Сепак, од практични причини, изворите кај коишто најголем дел од зрачењето е во тесен опсег на бранови должини ($5\div 10$ nm) се нарекуваат *монохроматски*. Како примери на монохроматски извори на светлина може да се наведат некои светлечки диоди, ласерите и натриумовите сијалици со низок притисок.

Основна физичка големина со којашто може да се опише оптичкото зрачење е *енергија на зрачењето* Q_e . Таа е пропорционална на фреквенцијата на вибрациите на фотоните, а коефициентот на пропорционалност е Планковата константа h ($h=6,626\cdot 10^{-34}$ J·s). Меѓутоа, наместо енергијата на зрачењето, за дефиниција на светлотехничките големини и опишувањето на многу појави е погодно да се користи *моќноста на зрачењето*. Моќноста на зрачењето претставува енергија што еден извор ја емитува во единица време.

Вообичаено, спектарот на моќноста на зрачењето на еден извор се прикажува со дијаграми како на сликите 2.2.а и 2.2.б. На тие слики на ординатата е спектралната дистрибуција на моќноста на зрачењето по единица бранова должина $P'(\lambda)$, а на апсцисата е брановата должина λ . Плоштината на површината ограничена со спектралната крива на зрачење и апсцисната оска во интервалот на бранови должини $[\lambda_1, \lambda_2]$ е пропорционална на вкупната моќност на зрачењето на изворот во разгледуваниот интервал. Многу често, вкупната моќност на зрачењето се означува со Φ_e и се нарекува *флуks на зрачењето (radiant flux)*, а се пресметува со:

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P'(\lambda) \cdot d\lambda . \quad (2.1)$$



Слика 2.2 Континуиран и линиски спектар на електромагнетни зрачења

Во праксата, спектралните дистрибуции на зрачењето се познати за конечните интервали на брановата должина $\Delta\lambda$ (најчесто $5\div 10\text{ nm}$) и во тие случаи вкупната моќност на зрачењето може да се пресмета како:

$$\Phi_e = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} P'(\lambda) \cdot \Delta\lambda. \quad (2.2)$$

Како што подетално ќе биде обработено во поглавјето 4, кога светлината ќе падне на гранична површина меѓу две средини, дел од таа светлина ќе се одбие (рефлектира) од површината, дел ќе биде впиен (апсорбиран), а дел може да биде пропуштен во втората средина. Колкав дел од паднатата светлина ќе се одбие, впиен или пропушти зависи од карактеристиките на средините, но и од брановата должина на светлината. Во таа смисла, можат да се дефинираат коефициентите на одбивање, впивање и пропуштање, коишто ќе ги означуваме со грчките букви ρ , α и τ , соодветно. Овие коефициенти претставуваат односи помеѓу одбиената, впиената и пропуштената светлина, соодветно и светлината што паднала на граничната површина во единица време.

Според досегашните сознанија, во процесот на добивање светлина главна улога имаат електроните. Имено, под дејството на апсорбираната енергија некои од електроните ги напуштаат своите стабилни орбити и преминуваат во подалечни но нестабилни орбити. При повторно враќање во стабилните орбити електроните го емитураат вишокот енергија во вид на електромагнетни бранови, односно фотони. Енергијата на зрачењето, односно енергијата на фотонот, претставува разлика на енергиите што соодветствуваат на овие електронски орбити и е пропорционална на фреквенцијата на емитираниот фотон.

Во зависност од тоа која била причината електроните да ги напуштат своите стабилни орбити, разликуваме два начина за производство на светлина: термичко зрачење и луминисценција.

Во првиот случај, со зголемување на температурата на телото се зголемува кинетичка енергија на движењето на атомите и доаѓа до нивни меѓусебни судири. Како

резултат на тие судири електроните од надворешните орбити преминуваат во други орбити. При нивното враќање во првобитните орбити се зрачи енергија.

Спектралниот состав на енергијата емитирана на овој начин зависи од температурата на телото. Така, на пример, ако температурата на телото е помала од 873 К, телото емитира само инфрацрвени зраци (т.е. топлина). Со повишувањето на температурата се зголемува и процентот на емитираната енергија во останатите делови од спектарот на оптичкото зрачење. Светлинските извори коишто произведуваат светлина по пат на термичко зрачење имаат континуиран спектар на зрачењето (слика 2.2.a). Термичкото зрачење најдобро се опишува со таканареченото *идеално црно тело* (*black body radiator* или *full radiator*), скратено ИЦТ. Во праксата, спектрите на видливото зрачење на сијалиците со вжарено волфрамово влакно (обични и халогени) се многу слични на соодветниот спектар на ИЦТ.

Во вториот начин на добивање светлина, луминисценцијата, всушност се опфатени повеќе начини на добивање светлина. Од интерес за светлотехниката се следните луминисцентни појави: фотолуминисценцијата (или празнење низ гасови), флуоресценцијата, фосфоресценцијата, електролуминисценцијата и добивањето на светлина со помош на ласери. Карактеристично за изворите кај коишто светлината се добива по пат на луминисценција е тоа што спектарот на емитираната светлина не е континуиран. Некои автори овој тип на спектар го нарекуваат *линиски* (слика 2.2.б). Исто така, кај овие извори може да биде значителен процентот на енергија израчен во ултравиолетовиот дел на спектарот.

Од сите наведени луминисцентни појави за добивање светлина најголема примена кај *сијалиците за општа намена* имаат првите два начина: празнење низ гасови и флуоресценција.

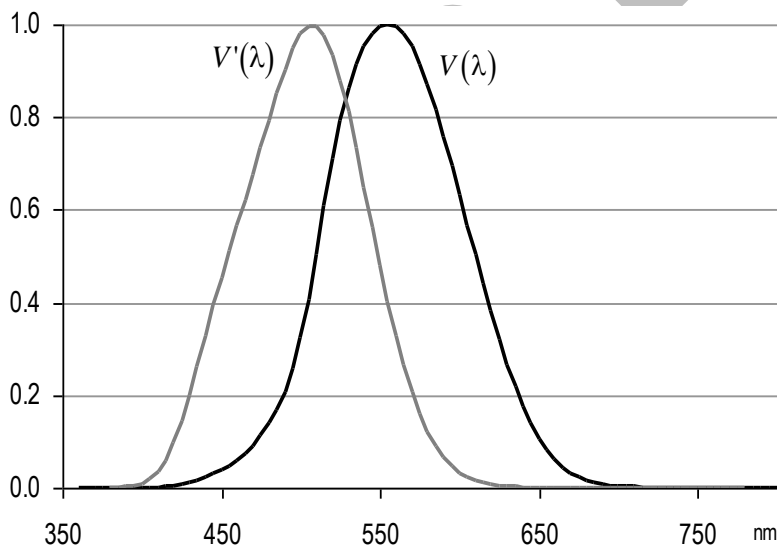
Накусо да објасниме како настанува светлина во процесот на празнење низ гасови. Во определена смеса на гасови (на пример, инертен гас и живина или натриумова пара) под дејство на електрично или електромагнетно поле доаѓа до прогресивно движење на слободните електрони и јоните и до нивни судири со атомите на гасот. При судирите брзите честички предаваат дел од својата кинетичка енергија на валентните електрони на атомите на гасот. Како резултат на примената енергија валентните електрони привремено ја напуштаат својата стационарна орбита, за по кусо време да се вратат во неа. Притоа, вишокот на енергија се ослободува во вид на електромагнетно зрачење. Спектарот на зрачењето зависи од составот на гасната смеса и во голем број случаи, покрај видлива светлина, значителен дел од енергијата се емитира во вид на ултравиолетовите зраци.

Процесот на флуоресценција се разликува од претходниот процес во начинот на екситацијата на електроните што емитираат светлина. Во овој случај енергијата, којашто придонесува електроните да ги напуштат своите стабилни орбити, е во вид на ултравиолетовите зраци. При повторното враќање на електроните во стабилните орбити се ослободува енергија со поголема бранова должина (т.е. како светлина и/или топлина). Материјалите коишто имаат вакво својство се фосфорот и некои негови соединенија. Спектралниот состав на емитираната светлина зависи од хемискиот состав на материјалите употребени во флуоресцентниот слој. По правило, флуоресценцијата не се користи како единствен процес за добивање на светлина, туку тој

е комбиниран со процесот на празнењето низ гасови. Така, на пример, кај голем број сијалици со празнење низ гасови на внатрешната страна на нивните стаклени балони се нанесуваат флуоресцентни слоеви.

2.2 Релативна спектрална осетливост на човечкото око

Човечкото око е мошне деликатен орган со карактеристични особини за кои се води сметка во светлотехниката. Неговата осетливост не е еднаква на сите бои од спектарот на светлината, а зависи и од сјајноста. Во 1924 година СИЕ ја дефинирала карактеристиката наречена *релативна осетливост на човечкото око за монохроматска светлина во услови на дневно гледање*, а во 1951 година оваа карактеристика е модифицирана. На сликата 2.3 нејзиниот график е означен со $V(\lambda)$. Покрај тоа е дефинирана и релативната осетливост на човечкото око во услови на ноќно гледање, чиј график на сликата 2.3 е означен со $V'(\lambda)$. Во услови на дневно гледање човечкото око е најосетливо на жолто–зелената светлина, со максимум кај брановата должина од 555 nm. Во услови на ноќно гледање најголемата осетливост на човечкото око е за светлина со бранова должина од 507 nm.



Слика 2.3 Релативна спектрална осетливост на човечкото око во услови на:
а) дневно гледање – $V(\lambda)$ и б) ноќно гледање – $V'(\lambda)$

Релативната спектрална осетливост на човечкото око игра голема улога во светлотехниката. Да претпоставиме дека два монохроматски извора на светлина имаат еднакви моќности на зрачењето, на пример по 1 W. Нека првиот извор зрачи светлина со бранова должина 555 nm, а вториот со бранова должина 510 nm. Според кривата $V(\lambda)$ од сликата 2.3, за светлината на првиот извор релативната осетливост на окоето ќе

биде еднаква на единица, додека за светлината на вториот извор таа ќе изнесува приближно 0,5. Според тоа, иако двата извора имаат еднакви моќности на зрачење, нема да биде еднакво надрознувањето што светлината од секој од нив ќе го предизвика на нервните завршетоци во окото. Доколку сакаме светлината од вториот извор да предизвика еднакво надрознување во човечкото око како и светлината од првиот извор, тогаш вториот извор треба да зрачи светлина со двојно поголема моќност. Овој пример укажува на причините кои условиле системот мерни единици во светлотехниката да базира врз релативната осетливост на човечкото око во услови на дневно гледање.

Чешкиот научник Пуркиње (J. E. Purkyne, 1787–1869) утврдил дека разнобојни површини, иако имаат еднакви сјајности, различно се затемнуваат при промена на нивната сјајност¹⁰ во интервалот 10–0,01 cd/m². Притоа, сините површини изгледаат посветли отколку црвените, жолтите и портокаловите. Појавата на релативно поосветлување на сината и затемнување на црвената, во споредба со белата боја, при премин од дневното кон ноќното гледање, е наречена ефект на Пуркиње. За овој ефект треба да се води сметка при проектирање на осветление во специфични услови, како што се театрите и слично.

2.3 Видно поле

Ако набљудувачот не ја движи главата и очите, тој ги гледа предметите сместени во рамките на определен просторен агол, кој се нарекува *видно поле*. За да ја добиеме претставата за границите на видното поле, ќе замислиме дека правата што се поклопува со правецот на гледањето е хоризонтална и дека на неа се сечат две меѓусебно нормални рамнини, од кои едната е хоризонтална, а другата е вертикална. Во однос на правецот на гледањето, границите на видното поле во вертикалната рамнина приближно се определени со агли од 60° над и 60° под тој правец, а во хоризонталната рамнина со агли од 75° лево и 75° десно од тој правец. Се разбира дека предметите разместени во разни делови на видното поле окото не ги гледа еднакво јасно. Најјасно се гледаат предметите што се наоѓаат на правецот на гледањето, на растојание поголемо од 20 cm (од очите на набљудувачот) и ако, притоа, видниот агол е доволно голем.

Видниот агол е агол што го зафаќаат правите повлечени од средиштето на очната леќа кон двата краја на набљудуваната отсечка. За да може окото две одделени точки да ги гледа како одделени точки, потребно е отсечката на чиешто краишта лежат тие точки окото да ја гледа со виден агол од најмалку една минута.

Способноста за разликување на растојанието помеѓу две точки различно оддалечени од очите се нарекува *длабинско гледање*. Така на пример, ако предметите се оддалечени 10 cm од очите, најмалото меѓусебно растојание што може да се забележи изнесува 0,4 mm, додека ако оддалеченоста изнесува 1 000 m, најмалото растојание што може да се разликува е 275 m. За оддалечености поголеми од 1 300 m не постои можност за длабинско разликување на растојанијата помеѓу два предмета.

¹⁰ Единицата за сјајност е дефинирана во потпоглавјето 3.8.

2.4 Светлина и боја

Светлинските зраци со различни бранови должини човечкото око ги забележува како светлина со различна боја. Притоа, забележувањето на бои не зависи од тоа дали светлината доаѓа од извор на светлина или пак таа е одбиена од телата што се наоѓаат во видното поле на набљудувачот.

Квалитетот на бојата на еден светлински извор може да се карактеризира од два аспекта [28]:

- преку *впечатокот за боја (color appearance)* и
- преку *индексот на распознавање на боите (color rendering index – CRI)*.

Впечатокот за бојата може да се квантифицира на два начина: со помош на некаков *колориметриски систем* или со *температурата на боја*. Индексот на распознавање на боите влијае врз начинот на распознавање (или разликување) на боите на предметите осветлени со определен светлински извор. Спектралниот состав на светлината емитирана од еден извор влијае и врз впечатокот за бојата и врз индексот на распознавање на боите. Можно е два извора на светлина да имаат комплетно различни спектрални состави, а да создаваат слични впечатоци за боја (т.е. да имаат приближно иста температура на бојата), а сепак да постојат битни разлики во индексот на репродукција на бојата.

Науката која што се занимава со квантификацијата на боите се нарекува *колориметрија*. Денес постојат повеќе системи за квантификација на боите. Повеќе детали за тоа може да се најдат, на пример, во [5,6]. Во рамките на овој труд ќе се задржиме на колориметрискиот систем на СИЕ. Овој колориметриски систем е применлив за дефиниција на боите како на изворите на светлина така и на предметите коишто одбиваат или пропуштаат светлина.

2.4.1 Колориметриски систем на бои на СИЕ

Според колориметрискиот систем на СИЕ бојата на еден предмет е бојата на светлината што предметот ја рефлектира или пропушта кога тој е осветлен од некој од стандардните извори на светлина. За таа цел СИЕ дефинирала стандардни услови за набљудување, т.е. *стандарден набљудувач* и *стандардни извори на светлина*. За да се направи разлика помеѓу вообичаените извори на светлина (природни и вештачки) и стандардните извори на светлина, СИЕ последните ги нарекува *стандардни илуминати*. На сликата 2.4 се прикажани спектрите на моќноста на зрачење за илуминатите A, C и D₆₅ [6].

Во 1931 година СИЕ го усвоила таканаречениот *трихроматски* адитивен систем на примарни бои за опишување на сите можни бои. Во овој систем секоја боја се опишува со три компоненти на примарни бои, означени со X, Y и Z. Дефинирани се три функции на *усогласување на бои (color matching functions)*, во зависност од брановата должина на светлината λ , и тоа: $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ (слика 2.5).

Како што може да се забележи од сликата 2.5, максималните вредности на овие функции одговараат за бранови должини на црвената, зелената и сината боја,

соодветно. Поради тоа, овој систем на означување на боите понекогаш се нарекува и RGB систем (според почетните букви на англиските термини за овие бои: Red, Green и Blue). Да забележиме дека функцијата $\bar{y}(\lambda)$ го има истиот облик како и функцијата на релативната спектрална осетливост на човечкото око $V(\lambda)$ (слика 2.3).

Вредностите на компонентите на примарните бои X , Y и Z се определуваат врз основа на измерената моќност на зрачењето на изворот (или на телото што одбива или пропушта светлина) за определена бранова должина и се скалираат со помош на функциите на усогласување на боите. Така, на пример, компонентата X се пресметува според [6]:

$$X = k \cdot \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad (2.3)$$

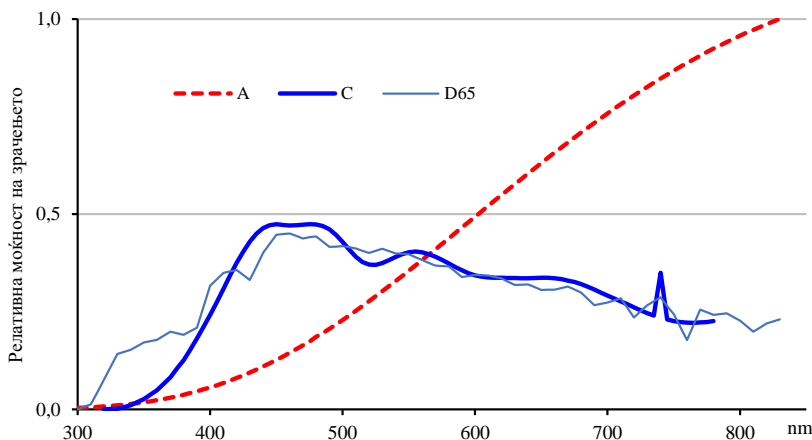
каде што

$S(\lambda)$ е спектралната функција на моќност на зрачењето за изворот на светлина;

$\rho(\lambda)$ е спектрална функција на одбивање (за изворите на светлина $\rho(\lambda) = 1$);

$\bar{x}(\lambda)$ е функцијата на усогласување на бои за компонентата X ;

k е нормализирачки фактор.



Слика 2.4 Спектрален состав на зрачењето за некои стандарни илуминати на CIE [6]

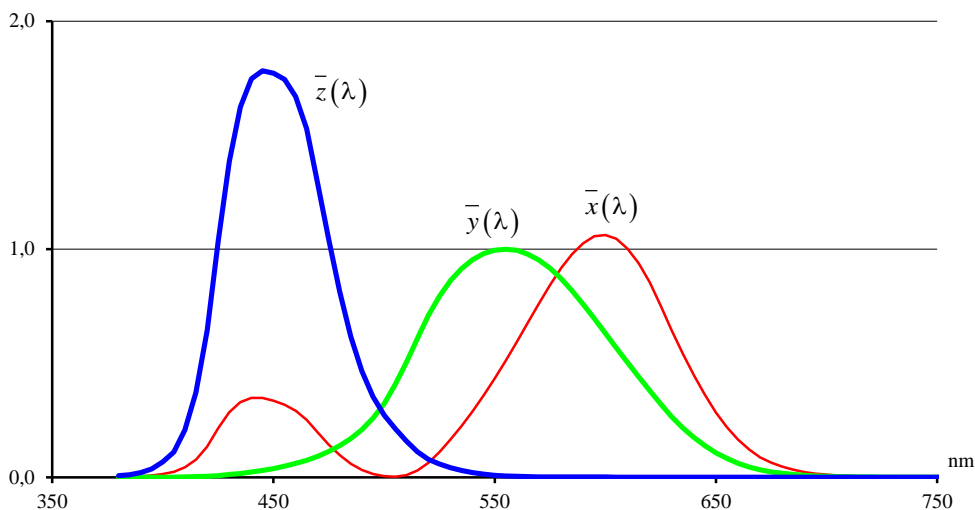
A – идеално црно тело на температура 2856 K;

C – лабораториска симулација на просечна дневна светлина;

D65 – дневна светлина при корелирана температура на боја од 6 500 K¹¹

¹¹ Значењето на терминот *корелирана температура на боја* е објаснето во одделот 2.4.2.

Ако во (2.3) наместо функцијата $\bar{x}(\lambda)$ се заменат функциите $\bar{y}(\lambda)$ или $\bar{z}(\lambda)$, ќе се добијат вредностите на компонентите Y или Z , соодветно. Факторот за нормализација најчесто се одбира така што за компонентата Y да се добие вредност 100.



Слика 2.5 Функции за усгласување на трите примарни бои од стандардниот колориметриски систем на CIE од 1931 година [6]

Врз основа на компонентите X , Y и Z се определуваат *трихроматските координати* x , y и z :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad \text{и} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}. \quad (2.4)$$

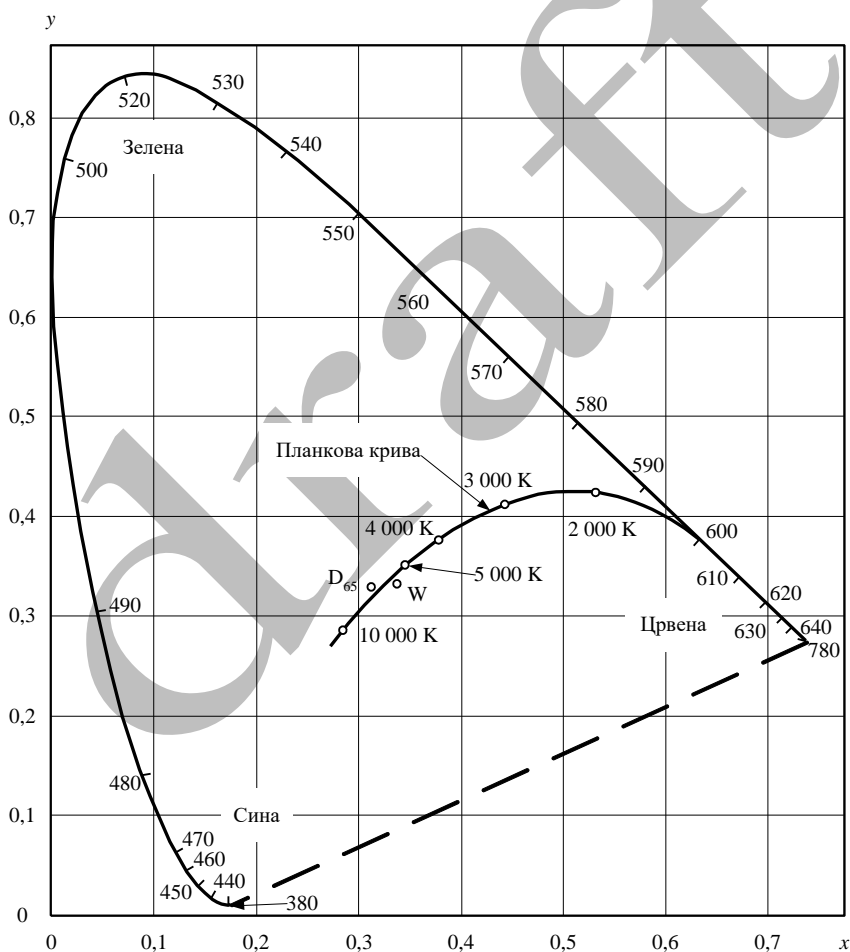
Од равенките (2.4) е очигледно дека збирот на трите трихроматски координати е еднаков на единица. Според тоа, за опишување на некоја боја се доволни само две од трите трихроматски координати. Најчесто се користат координатите x и y . Врз основа на трихроматските координати може да се нацрта *дијаграмот на бои* (или *триаголникот на бои*) прикажан на сликата 2.6.

Точките коишто одговараат на било која боја лежат на површината ограничена со *спектралната крива* (полната линија на сликата 2.6) и отсечката којашто ги поврзува крајните точки на спектралната крива (испрекинатата отсечка на сликата 2.6)¹².

¹² Всушност, сликата 2.6 би требало да биде прикажана во боја. Во неможност да се обезбеди таков приказ, неопходни се дополнителни појаснувања. Тргувајќи од десниот крај на спектралната линија и одејќи по неа се распределени сите спектрални бои, од црвената до виолетовата. Бел е само релативно мал дел (во средишниот дел на површината опфатена со спектралната крива и испрекинатата отсечка) околу точката означена со буквата W.

Покрај тоа, на сликата 2.6 се означени точките коишто одговараат на боите што ги има ИЦТ при различни температури. Кривата што ја образуваат овие точки се нарекува *Планкова крива*. Со *W* е означена таканаречената „бела точка“ на којашто одговараат трихорматски координати $x = y = z = 1/3$, а со D_{65} е означена точката што одговара на стандардниот илуминат D_{65} .

Треба да се забележи дека во 1964 година СИЕ дефинирала и дополнителен колориметриски систем. Дополнителниот колориметриски систем се разликува од основниот само во функциите на усогласување на боите и е применлив во случаите кога видниот агол е поголем од 4° , додека основниот колориметриски систем од 1931 година се применува кога видниот агол е помал од 4° .



Слика 2.6 Дијаграм на бои за стандардниот колориметриски систем на СИЕ од 1931 година [28]

Поради некои воочени проблеми при користењето на дијаграмот на бои од сликата 2.6, во 1960 година CIE го дефинирала UCS дијаграмот (*Unified Chromacity System Diagram*). Координатите u и v од овој дијаграм се пресметуваат од стандардните трихроматски координати x и y со помош на формулите:

$$u = \frac{4x}{-2x+12y+3} \quad \text{и} \quad v = \frac{6y}{-2x+12y+3} . \quad (2.5)$$

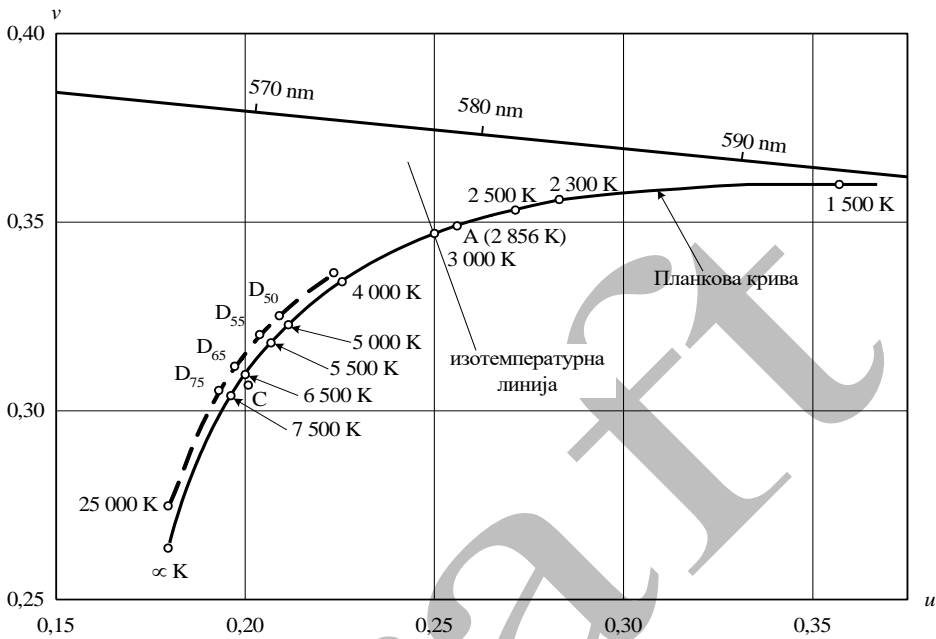
Дијаграмот UCS бил модифициран во 1976 година на тој начин што хроматските координати u' и v' се пресметуваат според формулите:

$$u' = u \quad \text{и} \quad v' = 1,5 \cdot v . \quad (2.6)$$

2.4.2 Температура на боја

Со колориметрискиот систем на бои на CIE може да се означи бојата на изворите на светлина и бојата на предметите што одбиваат или пропуштаат светлина. Покрај тоа, за означување на бојата на светлинските извори се користи и големината наречена *температура на боја*.

Под температура на боја на еден светлински извор се подразбира температурата на ИЦТ (изразена во келвини) коешто зрачи светлина со еднаква боја (исти трихроматски координати) како и светлината на набљудуваниот светлински извор. На сликата 2.7 е прикажан дел од UCS дијаграмот на бои од 1960 година во којшто е нацртана Планковата крива за температури на ИЦТ во границите од околу 1 500 K до ∞ K (теоретски случај). Точката А од сликата 2.7 одговара на трихроматските координати за бојата на стандардниот CIE илуминат А (ИЦТ со температура од 2 856 K).



Слика 2.7 Врска помеѓу бојата на светлината и корелираната температура на боја [5,6,28]

Температурата на боја на светлинските извори може да се дефинира само за оние извори коишто имаат континуиран спектар на зрачење, сличен на спектарот на ИЦТ. Таков спектар имаат сијалиците со вжарено влакно. За останатите извори на светлина, трихроматските координати дефинираат точки коишто лежат надвор од Планковата крива. На сликата 2.7 се прикажани точките дефинирани со хроматските координати за пет стандардни илуминати на СИЕ (од множеството илуминати за дневна светлина): C, D_{50} , D_{55} , D_{65} и D_{75} .

Испрекинатата крива на сликата 2.7 ги поврзува точките дефинирани со хроматските координати на множеството стандардни СИЕ илуминати за дневна светлина чијашто корелирана температура на боја¹³ е во границите од 4 000 K до 25 000 K.

Температурата на боја на еден светлински извор е големина со којашто се означува бојата на светлината на изворот, но таа големина практично ништо не кажува за спектралниот состав на светлината. Всушност, повеќето таканаречени сијалици за „дневна“ светлина имаат боја со хроматски координати многу блиску до Планковата крива (на пример, претходно спомнатите стандардни илуминати), но имаат спектар на зрачење којшто значително се разликува од спектарот на ИЦТ (видете слика 2.4).

Со цел да се дефинира температурата на боја на сијалиците коишто имаат спектрален состав на зрачењето различен од спектарот на зрачење на ИЦТ е воведен

¹³ Значењето на терминот корелирана температура на боја е објаснето во натамошниот текст на овој оддел.

терминот *корелирана* или *најблиска температура на боја* (*Correlated Color Temperature – CCT*). Корелираната температура на боја на една сијалица ја означува температурата на ИЦТ при којашто бојата на ИЦТ е најслична на бојата на светлината што ја емитура набљудуваната сијалица. За таа цел се дефинирани таканаречените *изотемпературни линии* коишто во UCS дијаграмот претставуваат нормали на Планковата крива за определена температура на боја на ИЦТ. За сите извори на светлина чиешто хроматски координати (во случајот на сликата 2.7 тоа се координатите u и v) дефинираат точки што лежат на една изотемпературна линија велиме дека имаат иста корелирана температура на боја. На сликата 2.7 е означена изотемпературната линија за температура на боја на ИЦТ од 3 000 К.

Треба да се забележи дека начинот на определување на *CCT* со помош на изотемпературните линии е теоретски концепт со релативно мал број експерименти коишто можат да го поддржат. Оваа констатација особено важи за изворите чиешто хроматски координати дефинираат точки што не се блиску до Планковата крива и се наоѓаат од внатрешната страна на кривата¹⁴.

Во натамошниот текст терминот температура на боја (*T_B* или *CCT*) ќе се користи и за опишување на температурата на боја за сијалиците со вжарено влакно и наместо терминот корелирана температура на боја за останатите сијалици.

За илустрација, во табелата 2.1 се наведени температурите на бојата за некои природни и вештачки светлински извори.

Табела 2.1 Температури на бојата за некои светлински извори

Светлински извор	Температура на бојата (К)
Парафинска свеќа	1920
Петролеумска лампа	2050
Сијалица со вжарено влакно	2650÷3370
Флуоресцентна сијалица	2700÷6500
Месечина	4150
Сонце (набљудувано над Земјината атмосфера)	6500

Во зависност од впечатокот што сијалиците наменети за внатрешно осветление го создаваат од аспект на топлината на бојата, СIE ги класифицирала овие сијалици во три групи (табела 2.2).

Според [28], сијалиците од првата група се погодни за примена во станбени простории, за специјални видни задачи или во студени климатски подрачја. Сијалиците од втората група се препорачуваат за работните простории, додека сијалиците од третата група би требало да се употребуваат во ситуациите кога нивото на осветленост е релативно големо, за специјални видни задачи или во топли климатски предели.

¹⁴ Бројот на прави коишто можат да се повлечат низ една точка којашто се наоѓа во близина на крива линија, од внатрешната страна на нејзината кривина, и притоа тие прави да бидат нормални на кривата ќе биде поголем ако е поголема закривеноста на кривата и зависи од растојанието на точката од кривата.

Способноста на човечкото око да разликува боја е релативно голема. Според [56], човечкото око е способно да ја детектира разликата во ТБ на два извора ако таа е поголема од 50 К. Поради тоа, ако во една просторија се користат различни типови сијалици тогаш се препорачува нивните температури на бојата да бидат еднакви или многу блиски.

Табела 2.2 Класификација на сијалиците според впечатокот за топлината на бојата [28]

Група	Впечаток за бојата	Температура на бојата (К)
1	топол	помала од 3 300
2	неутрален	3 300 ± 5 300
3	студен	поголема до 5 300

При проектирање на осветлението во затворени простори треба да се води сметка температурата на бојата на предвидениот извор да биде ускладена со нивото на осветленоста. Истражувањата на Круитхоф (А. А. Kruithof) од 1941 година, се однесуваат на психолошките ефекти што се постигнуваат при користење на различни комбинации на температурата на боја на употребените светлински извори и осветленоста на просторијата. Според Круитхоф, ако се користат сијалици со ниска температура на боја за постигнување високи осветлености ќе се создаде впечаток за неприродна околина и пренатрупаност со бои (*overly colorfull*). Обратната комбинација, употреба на сијалици со висока температура на боја за постигнување ниски осветлености, создава впечаток на студена и затемнета околина. Овој ефект е наречен Круитхофов ефект [6].

2.4.3 Индекс на репродукција на боја

Како што беше наведено на почетокот од потпоглавјето 2.4, една од битните карактеристики на светлината емитирана од некој светлински извор (сијалица) е наречена *индекс на распознавање (репродукција) на бојата* (ИРБ). Индексот на репродукција на боја е мерка за степенот со кој бојата на еден објект, под светлина од определен извор, се поклопува со бојата на истиот објект при употреба на референтен извор на светлина. Притоа, референтниот извор на светлина треба да има температура на боја како и изворот чиј ИРБ се определува. Индексот на репродукција на боја е големина со која се оценува способноста на изворот на светлина во усогласување на бои, односно во идентификација на идентични бои и разликување на бои што не се идентични.

Во 1965 година СIE дефинирала стандардна процедура за определување на индексот на репродукција на бојата за електричните сијалици. За таа цел се воведени осум основни примероци на различни бои, рамномерно распоредени во видливиот дел од спектарот на оптичкото зрачење. Овие примероци најчесто се нарекуваат Мунселови тест бои (според авторот на атласот на бои од коишто истите се одбрани). Покрај основните осум тест бои, СIE вовела и шест дополнителни примероци, меѓутоа, за определување на индексот на репродукција на бојата се користат само основните

тест бои. Индексот на репродукција на боја често се нарекува и *општ индекс на репродукција на бојата* и се означува со R_a .

Тука нема да навлегуваме во деталите на процедурата за определување на индексот на репродукција на бојата. Накусо, тест боите најнапред се осветлуваат со референтен извор на светлина, а потоа со тестираниот извор и притоа се определува индексот на репродукција за секоја боја одделно. Општиот индекс претставува средна вредност од осумте поединечни индекси на репродукција на бојата. За сијалиците со температура на боја до 5 000 K како референтни извори се користат извори со спектрален состав како и ИЦТ загреано на соодветната температура, а за сијалиците со температура на боја повисока од 5 000 K како референтни извори се користат стандардните CIE илуминати за дневна светлина.

Максималната вредност што општиот и поединечните индекси на репродукција на бојата може да ја добијат е 100. Сијалиците со вжарено влакно, т.е. изворите со континуиран спектар на зрачење, имаат општ индекс на репродукција на бојата еднаков на 100. Во оваа група спаѓаат и стандардните CIE илуминати за дневна светлина коишто исто така имаат континуирни спектри на зрачење.

Во табелата 2.3 се прикажани општиот индекс и поединечните индекси на репродукција на бојата за некои типови сијалици. Во таа табела се дадени и хроматските (x, y) координати и температурата на боја на сијалиците.

Како што може да се забележи од податоците прикажани во табелата 2.3, вредностите на поединечните индекси на репродукција на бојата (во табелата означени со $R_1 \div R_8$) можат да добијат и негативни вредности.

Табела 2.3 Индекси на репродукција на боите за некои типови сијалици [6]

Тип на сијалица	Хроматски координати		ТБ (К)	R_a	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8
	x	y										
Флуоресцентни сијалици												
CIE F1, дневна светлина	0,313	0,337	6 430	76	69	84	92	73	74	80	82	53
CIE F2, студено бела	0,372	0,375	4 230	64	56	77	90	57	59	67	74	33
CIE F3, бела	0,409	0,394	3 450	57	48	72	90	46	49	59	69	21
CIE F4, топло бела	0,440	0,403	2 940	51	42	70	90	38	41	54	65	11
CIE F5	0,314	0,345	6 350	72	63	80	91	67	68	75	81	48
CIE F6	0,378	0,388	4 150	59	49	72	88	51	52	60	73	27
CIE F7, широк дијапазон на бои	0,313	0,329	6 500	90	89	92	91	91	90	89	93	87
CIE F8, широк дијапазон на бои	0,346	0,359	5 000	95	97	96	91	97	96	93	96	97
CIE F9, широк дијапазон на бои	0,374	0,373	4 150	90	90	93	90	90	89	88	94	89
CIE F10, три тесни дијапазони	0,346	0,359	5 000	81	93	90	53	86	83	74	89	80
CIE F11, три тесни дијапазони	0,380	0,377	4 000	83	98	93	50	88	87	77	88	79
CIE F12, три тесни дијапазони	0,437	0,404	3 000	83	99	95	54	89	88	83	89	68
Студено бела deluxe	0,375	0,367	4 080	89	92	91	84	89	90	86	89	89
Топло бела deluxe	0,440	0,403	2 940	73	72	80	81	71	69	67	83	65
Останати сијалици												
Метал-халогена со провиден балон	0,374	0,383	4 220	67	59	84	88	63	67	84	67	21
Метал-халогена со флуоресцентна облога	0,388	0,379	3 800	70	64	88	86	66	71	89	67	25
Ксенонска	0,324	0,324	5 920	94	94	91	90	96	95	92	95	96
Живина со висок притисок и провиден балон	0,308	0,377	6 410	18	-9	32	51	7	8	8	47	-4
Живина со висок притисок и флуоресцентна облога	0,405	0,402	3 600	49	44	60	59	45	40	35	69	41
Натриумова со висок притисок	0,519	0,417	2 100	24	15	66	55	-5	14	56	37	-45
Натриумова со низок притисок	0,569	0,421	1 740	-44	-68	44	-2	-101	-67	29	-23	-165
Сулфурна [65]	0,314	0,405	6 120	76	71	83	87	67	73	83	83	63
Халогена	0,424	0,399	3 190	100	100	100	100	100	100	99	100	100

Со оглед на статистичката природа на општиот ИРБ и фактот што најголемата вредност што тој може да ја има е 100, варијацијата помеѓу поединечните индекси ќе биде помала ако општиот индекс на репродукција е поблиску до максималната вредност.

Од аспект на индексот на репродукција на бојата, споредбата на две сијалици од различен тип ќе биде коректна само ако сијалиците имаат приближно исти температури на боја (хроматски координати).

Од податоците изнесени во табелата 2.3 може да се процени и влијанието што врз индексот на репродукција на бојата го има флуоресцентната облога што се користи

кај некои од сијалиците со празнење низ гасови. Тоа влијание е најизразено кај живините сијалици со висок притисок. Кај нив значителен дел од моќноста на зрачењето е во ултравиолетовиот дел од спектарот на оптичкото зрачење, а флуоресцентната облога помага дел од ултравиолетовите зраци да се претворат во светлина и со тоа да се „збогати“ спектарот на видливото зрачење. Како резултат на тоа, живината сијалица со висок притисок и флуоресцентна облога има доста повисоки индекси на репродукција на бојата (општиот и поединечните) отколку таквата сијалица без флуоресцентна облога. За разлика од живините сијалици, метал–халогените сијалици имаат „побогат“ спектар во доменот на видливото зрачење, па поради тоа кај нив влијанието на флуоресцентната облога врз индексите на репродукција на бојата не е толку изразено.

Заложбата на CIE со еден податок да се опише способноста на сијалиците за репродукција на боите има определени недостатоци. Имено, може да се случи две сијалици да имаат еднаков општ индекс на репродукција на бојата, но нивните поединечни индекси значително да се разликуваат, а тоа значи дека одделни бои ќе бидат репродуцирани различно. Поради тоа, за сијалиците се препорачува да се приложат покрај општиот индекс и поединечните индекси на репродукција на боја за осумте тест бои и евентуално индексите за дополнителните тест бои. На тој начин може да се стекне подобра слика за способноста на сијалицата за репродукција на одделните бои.

Во зависност од големината на индексот на репродукција на бојата¹⁵, CIE ги групирала сијалиците во пет групи. Овие групи се прикажани во табелата 2.4. Во истата табела се прикажани и препорачаните полиња на примена на сијалиците со различен индекс на репродукција на бојата и препорачаните впечатоци за топлината на бојата на употребените извори.

¹⁵ Во натамошниот текст наместо терминот *генерален индекс на репродукција на бојата* ќе се користи скратениот назив *индекс на репродукција на бојата*.

Табела 2.4 Групирање на сијалиците според индексот на репродукција на боите и препорачани подрачја на примена [28]

Група	R_a	Впечатокот за бојата на сијалиците	Примена	
			Препорачана	Дозволена
1A	90÷100	Топол, неутрален, студен	Усогласување на бои, клинички испитувања, галерии за слики	
		Топол, неутрален	Станови, хотели, ресторани, продавници, канцеларии, училишта, болници	
1B	80÷89	Неутрален, студен	Печатење, боење, текстилна индустрија, индустриски работи со поголеми барања	
		Топол, неутрален, студен	Индустриски погони	Канцеларии, училишта
2 ¹⁶	60÷79	Топол, неутрален, студен	Тешка индустрија	Индустриски погони
3	40÷59			Тешка индустрија, индустриски погони со многу мали потреби за распознавање на боите
4	20÷39			

¹⁶ Групата 2 може да се подели на две подгрупи (2A и 2B), слично на поделбата направена за сијалиците од групата 1.

3 ОСНОВНИ СВЕТЛОТЕХНИЧКИ ГОЛЕМИНИ И ПОИМИ

3.1 Радиометриски и фотометриски големини

Со цел квантитативно да се опишат и физичките и психофизичките ефекти што оптичкото зрачење ги има врз човекот и живите организми воопшто, во светлотехниката се користат два вида мерни единици. Физичките ефекти на зрачењето се опишуваат со единиците за енергија и моќност и најчесто се нарекуваат *радиометриски единици*. Психофизичките ефекти се опишуваат со таканаречените *фотометриски* или *светлотехнички мерни единици*. Фотометриските единици се дефинираат врз основа на радиометриските единици, водејќи сметка за спектралната осетливост на човечкото око.

Радиометриските единици се користат за квантитативно опишување на зрачењето во ултравиолетовиот и инфрацрвениот дел од спектарот на оптичкото зрачење, а во определени ситуации и за делот од спектарот што се однесува на видливото зрачење. Фотометриските единици се користат исклучиво за видливиот дел од оптичкото зрачење, со оглед на фактот што човечкото око не ги регистрира зрачењата со другите бранови должини.

Во согласност со претходната поделба на мерните единици, големините коишто го опишуваат оптичкото зрачење се соодветно поделени на: радиометриски и фотометриски. Во продолжение на ова поглавје ќе бидат дефинирани основните фотометриски големини, како и нивните врски со радиометриските големини.

3.2 Светлински флуks и количество светлина

За реалните извори на светлина вкупната моќност на зрачењето (или флуksот на зрачењето) во определен интервал на бранови должини се определува со (2.2). Ако при пресметките се земат предвид само брановите должини во интервалот од 380 до 780 nm, со (2.2) ќе се пресмета флуksот на зрачење на изворот во видливиот дел од спектарот на оптичко зрачење. Меѓутоа, моќноста на зрачењето не кажува ништо за тоа како таа моќност ќе биде регистрирана од страна на системот за вид кај човекот. Поради тоа е воведен терминот *светлински флуks*¹⁷. Светлинскиот флуks Φ ¹⁸ на еден извор може да се пресмета ако е позната спектралната дистрибуција на моќноста на зрачењето $P'(\lambda)$ и функцијата на релативната спектрална осетливост на човечкото око $V(\lambda)$:

¹⁷ Во продолжение термините *светлински флуks* или *флуks* ќе се користат наместо *светлински флуks на изворите на светлина*.

¹⁸ Вообичаено е радиометриските и фотометриските големини да се означуваат со исти симболи, при што симболите на радиометриските единици во долниот индекс ја имаат ознаката *e*.

$$\Phi = 683 \cdot \sum_{\lambda=380}^{780} V(\lambda) \cdot P'(\lambda) \cdot \Delta\lambda . \quad (3.1)$$

Единица мерка за светлинскиот флуks е лумен (lm).

Количество светлина претставува енергија што еден извор ја зрачи во вид на светлина. Според тоа, ако со $\Phi(t)$ е изразена зависноста на светлинскиот флуks на изворот од времето t , тогаш количеството светлина Q што тој извор го зрачи во определен временски интервал T е:

$$Q = \int_T \Phi(t) \cdot dt . \quad (3.2)$$

Во случаите кога флуksот на изворот не се менува во зададениот временски интервал, за количеството светлина следува:

$$Q = \Phi \cdot T .$$

Радиометриската големина којашто одговара на количеството светлина е *енергијата на зрачење* и таа покажува колкава е енергијата на зрачење на изворот во целиот електромагнетен спектар во определен временски интервал T :

$$Q_e = \int_T \Phi_e(t) \cdot dt , \quad (3.3)$$

односно, ако моќноста на зрачењето не зависи од времето, енергијата на зрачењето може да се пресмета со:

$$Q_e = \Phi_e \cdot T .$$

Единицата мерка за количество светлина е лумен-секунда (lm · s), а единицата мерка за енергијата на зрачење е џул (J).

3.3 Треперење на светлината и стробоскопски ефект

Кај електричните сијалици светлината се добива како резултат на воспоставување струја во нив. Бидејќи најголем број од сијалиците работат на мрежа напојувана со наизменичен напон и фреквенција 50 или 60 Hz, струјата во нив е временски менлива. Следствено, флуksот што го емитура една таква сијалица (особено ако е со празнење низ гасови) е временски менлив. Како резултат на временските промени на флуksот настануваат појави наречени *бранување на светлината* и *треперење на светлината (flicker)*. Освен тоа, флуksот може да се менува и поради отстапувањето на временската промена на погонскиот напон од идеалната синусоидална промена како и поради отстапувањето на ефективната вредност на погонскиот напон од номиналниот. Овие отстапувања можат да настанат како последица на повеќе фактори, како што се: вклучувања и/или исклучувања на големи електрични извори или потрошувачи, постоење електрично блиски електролачни печки или апарати за заварување или енергетски претворувачи и слично.

Дали и во која мерка ова треперење ќе биде регистрирано од човечкото око зависи од фреквенцијата и интензитетот на промените на флуksот во определен временски интервал. Тука треба да се забележи дека треперењето кое настанува како резултат на наизменичната промена на струјата многу малку е забележливо од страна на човечкото око. Така, на пример, кај сијалиците кај коишто светлината се добива по пат на термичко зрачење (какви што се сијалиците со вжарено влакно), поради термичката инерција на усвитеното влакно¹⁹, човечкото око не може да го регистрира треперењето на светлината како последица на наизменичната струја.

Треперењето е поизразено кај сијалиците со празнење низ гасови, но и во овој случај тоа не е многу големо. Имено, треперењето е најизразено ако светлинскиот извор се наоѓа на периферијата од видното поле, додека е многу малку забележливо ако изворот се наоѓа во средината на видното поле. Ова е резултат на поголемата осетливост на периферијата од мрежницата на окото на промените на светлинскиот флуks [12,19]. Кај повеќето сијалици со празнење низ гасови се користат специјални слоеви со коишто дел од ултравиолетовото зрачење се претвора во светлина по пат на флуоресценција. Постоењето и хемискиот состав на овие слоеви може да влијае врз намалувањето на треперењето.

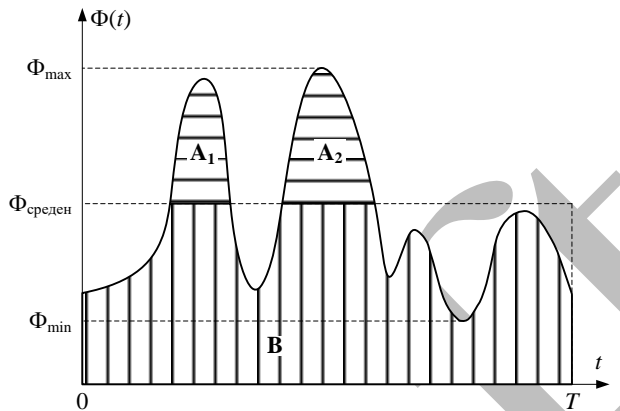
Треперењето на светлината предизвикано од не многу брзите промени на ефективната вредност на напонот и присуството на повисоките хармоници може да биде забележано од страна на човечкото око кај сите типови сијалици. Ако ефективната вредност на напонот е константна и ако вкупната хармоничка дисторзија на напонот (*THD*) е помала од 10%, треперењето на светлината кај сијалиците со вжарено влакно нема да биде забележливо, додека флукуациите на напонот со фреквенција помала од 30 Hz можат да доведат до забележително треперење. Меѓутоа, кај сијалиците со празнење низ гасови веројатноста за појава на треперење е значително поголема [55].

Со оглед на тоа што треперењето предизвикано од не многу брзите промени на ефективната вредност на напонот и присуството на повисоките хармоници се резултат на „надворешни“ фактори (надвор од системот на осветление), во продолжение на овој текст кога станува збор за треперење ќе подразбираме треперење предизвикано само од периодичната промена на флуksот.

Како квантитативна мерка за оценка на треперењето на флуksот се користи *индексот на треперењето*. За објаснување на индексот на треперењето ќе се послужиме со графикот прикажан на сликата 3.1. На сликата е прикажана временска зависност на флуksот $\Phi(t)$ во определен временски интервал T . Количеството светлина што изворот го зрачи за време T е пропорционално на плоштината на површината ограничена со кривата $\Phi(t)$, со апсцисната оска и со правите $t = 0$ и $t = T$. За временскиот интервал T можеме да дефинираме *средна вредност на флуksот*:

¹⁹ За илустрација, *временската константа на термички промени (thermal time constant)* за стандардните сијалици со вжарено влакно и номинален напон од 120 V се движи во границите од 20 до 150 ms, додека за сијалиците за номинален напон од 230 V таа константа ќе биде нешто помала. Од друга страна, за сијалиците со празнење низ гасови оваа временска константа е многу помала. На пример, за флуоресцентните сијалици таа изнесува околу 5 ms [55].

$$\Phi_{\text{среден}} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi(t) \cdot dt. \quad (3.4)$$



Слика 3.1 Дијаграм на временски менлив светлински флуks

Индексот на треперењето IT се дефинира како количник помеѓу плоштината на површината ограничена со кривата $\Phi(t)$ и правата определена со средниот флуks и плоштината на вкупната површина под кривата $\Phi(t)$, [6], т.е.:

$$IT = \frac{S_A}{S_A + S_B} = \frac{S_A}{\int_0^T \Phi(t) \cdot dt} = \frac{S_A}{\Phi_{\text{среден}} \cdot T}, \quad (3.5)$$

каде што со S_A е означена вкупната плоштина на површините A_1 и A_2 , а со S_B е означена плоштината на површината B .

Индексот на треперење е бездимензионална големина којашто може да има вредности од 0 до 1. Од изразот (3.5) и сликата 3.1 е очигледно дека индексот на треперење ќе биде еднаков на нула ако флуksот на изворот е константен во разгледуваниот интервал.

Покрај индексот на треперење, за квантитативно опишување на промените на флуksот се користи и големината *фактор на бранување* [12,19], дефинирана со равенката:

$$FB = \frac{\Phi_{\text{max}} - \Phi_{\text{min}}}{\Phi_{\text{max}} + \Phi_{\text{min}}}, \quad (3.6)$$

каде што значењата на употребените ознаки се како на сликата 3.1.

Ефектите што треперењето на светлината ги предизвикува кај луѓето се од психолошка природа. Постоенето во видното поле на светлински извори со релативно голем индекс на треперење предизвикува психички замор и нервоза. Покрај тоа, за

предметите што се движат или ротираат, а коишто се осветлени со извори кај коишто треперењето на светлината не е занемарливо, може да се стекне погрешна претстава за брзината и/или насоката на нивното движење. Оваа појава е позната под името *стробоскопски ефект*.

Кај предметите што се движат праволиниски, со релативно голема брзина, стробоскопскиот ефект може да предизвика нејасна или погрешна претстава за нивното движење. Имено, ако брзината на движење на предметите е значително поголема отколку брзината на процесирање на информациите што окоото ги пренесува до мозокот, во еден момент мозокот може да регистрира два или повеќе ликови од предметот како да се на исто место иако се однесуваат на предметот којшто се наоѓа на различни локации во просторот.

Стробоскопскиот ефект е најизразен во оние случаи кога во видното поле се наоѓаат предмети коишто ротираат. Во таквите случаи, во зависност од брзината на ротација на предметот и индексот на треперење на светлината, може да се стекне впечаток дека предметот ротира со друга брзина, или дека мирува (не ротира) или, пак, дека ротира во спротивна насока.

Со оглед на тоа што погрешната претстава за движењето и/или ротацијата на предметите може да доведе до опасни ситуации по безбедноста на корисниците на системите за електрично осветление, елиминацијата или намалувањето на стробоскопскиот ефект е од исклучителна важност во оние случаи каде што постои можност неговата појава да биде причина за несакани последици.

Постојат повеќе начини да се намали треперењето на светлината што ја создаваат електричните сијалици. Повеќе детали за практичните начини за намалувањето на треперењето на светлината (а со тоа и за намалувањето или елиминацијата на стробоскопскиот ефект) можат да се најдат во поглавјето 5. Во примерот 3.1 е прикажан еден од начините за намалување на треперењето на светлината.

Пример 3.1

Набљудуваме светилка со две идентични сијалици со празнење низ гасови. Сијалиците се напојуваат од електрична мрежа со простопериодичен напон и фреквенција $f = 50$ Hz. Да го пресметаме индексот на треперење и факторот на бранување на вкупниот флукс од двете сијалици за два случаја. Во првиот случај струите во сијалиците се во фаза, додека во вториот случај тие се фазно поместени за агол $\pi/2$.

Прв случај. Ќе претпоставиме дека временската зависност на флуксот на секоја од сијалиците може да се изрази со следнава функција²⁰:

$$\Phi'(t) = \Phi'_{\max} \cdot |\sin \omega t| = \Phi'_{\max} \cdot |\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)| = \Phi'_{\max} \cdot |\sin(2 \cdot \pi \cdot t/T)|,$$

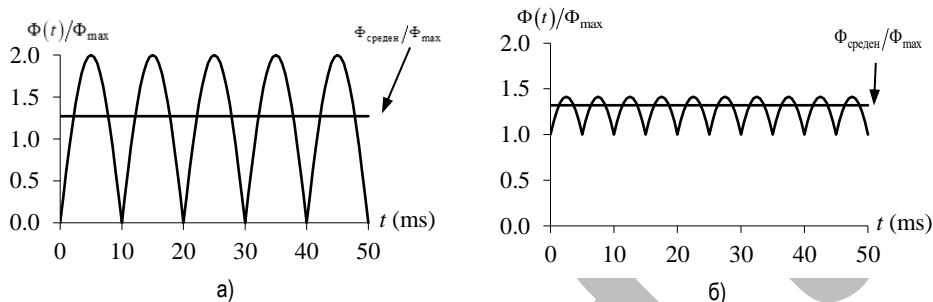
каде што со ω е означена кружната фреквенција, а T е времетраењето на еден период на простопериодичната функција.

Вкупниот флукс што го зрачат двете сијалици ќе биде изразен со функцијата:

²⁰ Кај реалните сијалици временската промена на флуксот не ја следи идеално временската промена на наизменичната струја.

$$\Phi_1(t) = 2 \cdot \Phi'(t) = 2 \cdot \Phi'_{\max} \cdot |\sin \omega t|, \quad (3.7)$$

чијшто график, во интервалот од 0 до 50 ms, е прикажан на сликата 3.2.a.



Слика 3.2 Временски промени на нормираните светлински флукусови во првиот и вториот случај од примерот 3.1

Средната вредност на флукусот од двете сигнајци (претставена со ординатата на правата паралелна со апсцисната оска на сликата 3.2.a), пресметана со (3.4), ќе биде:

$$\Phi_{\text{среден}_1} = 2 \cdot \Phi'_{\text{среден}} = \frac{4}{\pi} \cdot \Phi'_{\max}.$$

Периодот на функцијата $\Phi_1(t)$ изнесува $T_1 = T/2 = 10$ ms и за тој временски интервал ќе ги пресметаме индексот на треперење и факторот на бранување. Врз основа на (3.5) и (3.7), за индексот на треперење може да се напише²¹:

$$IT_1 = \frac{1}{\Phi_{\text{среден}_1} \cdot T_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} (2 \cdot \Phi'_{\max} \cdot \sin \omega t - \Phi_{\text{среден}_1}) \cdot dt = \frac{\omega}{2} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \sin \omega t \cdot dt - \frac{t_2 - t_1}{T_1},$$

каде што со t_1 и t_2 се означени апсцисите на пресечните точки на кривата $\Phi(t) = \Phi_1(t)$ и правата $\Phi(t) = \Phi_{\text{среден}_1}$ во интервалот $[0, T/2]$ и, не е тешко да се покаже дека, тие апсциси се определуваат со формулите:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \cdot \arcsin \frac{2}{\pi} \quad \text{и} \quad t_2 = \frac{T}{2} - t_1.$$

Така, во првиот случај, за индексот на треперење добиваме:

$$IT_1 = \frac{2}{\pi} \cdot \omega t_1 + \cos \omega t_1 - 1 = 0,2105.$$

Од (3.7) лесно се заклучува дека е: $\Phi_{\max_1} = 2 \cdot \Phi'_{\max}$ и $\Phi_{\min_1} = 0$. Со тоа, од (3.6) за факторот на бранување се добива:

²¹ Во интервалот $[t_1, t_2]$ функцијата $\sin \omega t$ има само позитивни вредности и за тој интервал важи равенството $|\sin \omega t| = \sin \omega t$. Освен тоа, во истиот интервал функцијата $\sin \omega t$ е симетрична во однос на правата $x = T/4$. Следствено, наместо да се интегрира во границите од t_1 до t_2 , можело да се интегрира во границите од t_1 до $T/4$ и добиената вредност да се помножи со два.

$$FB_1 = \frac{2 \cdot \Phi'_{\max} - 0}{2 \cdot \Phi'_{\max} + 0} = 1.$$

Втор случај. Да ги пресметаме индексот на треперење и факторот на бранување за случајот кога електричните кола на сијалиците се изведени така што струите во нив се фазно поместени за агол $\pi/2$. Претходното може да се постигне ако, на пример, во колото на една од сијалиците постои придушница, а во колото на другата (покрај придушницата) постои и кондензатор со соодветна капацитивност. Во овој случај, временската зависност на вкупниот флукс од двете сијалици е прикажана на графикот од сликата 3.2.б и може да се изрази со функцијата:

$$\Phi_2(t) = \Phi'_{\max} \cdot [|\sin \omega t| + |\sin(\omega t - \pi/2)|] = \Phi'_{\max} \cdot (|\sin \omega t| + |\cos \omega t|). \quad (3.8)$$

Лесно може да се покаже дека и во овој случај средната вредност на флуксот (претставена со ординатата на правата паралелна на апсцисната оска на сликата 3.2.б) ќе биде:

$$\Phi_{\text{среден}_2} = \frac{4}{\pi} \cdot \Phi'_{\max}.$$

Периодот на функцијата $\Phi_2(t)$ е $T_2 = T/4 = 5 \text{ ms}$ и за тој временски интервал ќе ги пресметаме индексот на треперење и факторот на бранување. При наведените услови, врз основа на равенствата (3.5) и (3.8), може да се напише²²:

$$IT_2 = \frac{1}{\Phi_{\text{среден}_2} \cdot T_2} \cdot \int_{t'_1}^{t'_2} [\Phi'_{\max} \cdot (\sin \omega t + \cos \omega t) - \Phi_{\text{среден}_2}] \cdot dt = \frac{\omega}{2} \cdot \int_{t'_1}^{t'_2} (\sin \omega t + \cos \omega t) \cdot dt - \frac{t'_2 - t'_1}{T_2},$$

каде што времињата t'_1 и t'_2 се определуваат со постапка аналогна на таа од првиот случај и притоа се добива:

$$t'_1 = \frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot \arcsin\left(\frac{16}{\pi^2} - 1\right) \text{ и } t'_2 = \frac{T}{4} - t'_1.$$

Конечно, за индексот на треперење во вториот случај се добива:

$$IT_2 = \frac{4}{\pi} \cdot \omega t'_1 + \cos \omega t'_1 - \sin \omega t'_1 - 1 = 0,0422.$$

Индексот на треперење во вториот случај е значително понизок отколку во случајот кога струите низ сијалиците не беа фазно поместени. Како резултат на тоа, веројатноста за појава на стробоскопски ефект е многу помала.

Од (3.8) не е тешко да се утврди дека е: $\Phi_{\max_2} = \sqrt{2} \cdot \Phi'_{\max}$ и $\Phi_{\min_2} = \Phi'_{\max}$. Со тоа, користејќи ја (3.6) за факторот на бранување се добива:

$$FB_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot \Phi'_{\max} - \Phi'_{\max}}{\sqrt{2} \cdot \Phi'_{\max} + \Phi'_{\max}} = 0,17157.$$

²² Во интервалот $[t'_1, t'_2]$ функциите $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ имаат само позитивни вредности поради што наместо $|\sin \omega t + \cos \omega t|$ може да се напише $\sin \omega t + \cos \omega t$. Во разгледуваниот интервал подинтегралната функција е симетрична во однос на правата $x = T/8$. Поради тоа, наместо да се интегрира во границите t'_1 до t'_2 , можело да се интегрира во границите од t'_1 до $T/8$ и добиената вредност да се помножи со два.

Според добиените резултати и факторот на бранување има многу помала вредност во случајот кога струите во сијалиците се фазно поместени за $\pi/2$ отколку во случајот кога тие струи не се фазно поместени.

Во примерот 3.1 беше илустриран само еден од начините за намалување на треперењето и стробоскопскиот ефект. Фазното поместување на струите во две соседни сијалици може да се постигне и ако сијалиците се поврзат на различни фази од трифазниот систем. Покрај тоа, стробоскопскиот ефект може да се намали ако, со помош на соодветни уреди, се зголеми фреквенцијата на наизменичната струја или нејзиниот престоериодичен облик од синусоидален се претвори во правоаголен. Да забележиме дека само со зголемувањето на фреквенцијата индексот на треперење нема да се смени, но треперењето ќе биде помалку забележливо од окото на набљудувачот.

3.4 Светлинска ефикасност, ефикасност на зрачењето и специфично производство

Светлинската ефикасност на зрачењето (luminous efficacy of radiation) претставува однос помеѓу светлинскиот флукс и вкупната моќност на зрачењето. Имајќи го предвид равенството (3.1), за светлинската ефикасност на зрачењето се добива:

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e} = \frac{\int_{380}^{780} P'(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} P'(\lambda) \cdot d\lambda}. \quad (3.9)$$

Врз основа на (3.9) може да се заклучи дека светлинската ефикасност на зрачењето ќе биде повисока доколку е помала соодветната моќност на зрачењето надвор од доменот на видливото зрачење.

Ефикасноста на зрачењето (radiant efficiency) покажува колкав дел од ангажираната моќност P на изворот (т.е. електрична моќност кај електричните сијалици) ќе биде претворена во моќност на зрачење:

$$K_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\int_0^{\infty} P'(\lambda) \cdot d\lambda}{P} = \frac{\Phi_e}{\Phi_e + \Delta P}, \quad (3.10)$$

каде што со ΔP се означени загубите на моќност во изворот. Всушност, ефикасноста на зрачењето претставува *коэффициент на полезно дејство на зрачењето*.

Единица мерка за светлинската ефикасност е лумен по ват (lm/W), додека ефикасноста на зрачењето е бездимензионална големина, секогаш помала од единица.

Поголема примена во светлотехниката има големина наречена *специфично производство на светлински извор*. Специфичното производство на еден светлински

извор (сијалица) претставува однос помеѓу светлинскиот флукс на изворот (сијалицата) и ангажираната (електрична) моќност:

$$\xi = K \cdot K_e = \frac{\Phi}{\Phi_e} \cdot \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\Phi}{P}. \quad (3.11)$$

Иако единицата мерка за специфичното производство е иста со единицата мерка за светлинската ефикасност, овие два термина не смеат да се мешаат или споредуваат. За специфичното производство може да се каже дека претставува *коэффициент на полезно дејство на една сијалица*.

Покрај температурата на боја и индексот на репродукција на боја, специфичното производство е една од позначајните карактеристики на сијалиците. Тука вреди да се наведе дека ако две сијалици од ист тип и за ист номинален напон имаат различни номинални моќности²³, по правило, сијалицата со поголема номинална моќност има поголемо специфично производство.

За илустрација на изложеното во ова потпоглавје можат да послужат пресметките на светлотехничките големини направени во примерот 3.2.

Пример 3.2

Да се пресметаат светлинската ефикасност на зрачењето, ефикасноста на зрачењето и специфичното производство на две сијалици со номинална моќност од 80 W со различни спектрални моќности на зрачењето. Сијалицата А зрачи светлина во многу тесен опсег од $555 \pm 2,5$ nm, при што вкупната моќност на зрачење на изворот во овој интервал изнесува 20 W. Сијалица В, исто така, има моќност на зрачење од 20 W, но оваа моќност е рамномерно распределена во интервалот на бранови должини од 380 до 780 nm.

Според тоа, за сијалицата А во интервалот од $555 \pm 2,5$ nm спектралната моќност на зрачењето $P'(\lambda)$ е $20/5=4$ W/nm, додека за останатите бранови должини таа е еднаква на нула. За сијалица В функцијата $P'(\lambda)$ е константна во целиот разгледуван интервал на бранови должини и нејзината вредност изнесува $20/400=0,05$ W/nm.

Земајќи $\Delta\lambda = 5$ nm и $V(\lambda)$ од сликата 2.3, со (3.1)²⁴ за светлинските флуКСови на сијалиците А и В се добива:

$$\Phi_A = 683 \cdot \sum_{\lambda=555}^{555} V(\lambda) \cdot P'(\lambda) \cdot \Delta\lambda = 683 \cdot V(555) \cdot P'(555) \cdot \Delta\lambda = 683 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 5 = 13\,660 \text{ lm} \text{ и}$$

$$\Phi_B = 683 \cdot \sum_{\lambda=380}^{780} V(\lambda) \cdot P'(\lambda) \cdot \Delta\lambda = 683 \cdot 0,05 \cdot 5 \cdot \sum_{\lambda=380}^{780} V(\lambda) = 170,75 \cdot 21,3724 = 3\,649,3 \text{ lm}.$$

Според (3.9), за светлинските ефикасности на зрачењето на сијалиците А и В следува, соодветно:

²³ Под терминот *номинална моќност* на една (електрична) сијалица се подразбира ангажираната активна електрична моќност на сијалицата кога сите услови се еднакви на номиналните. Иако номиналната моќност на една сијалица не е големина којашто директно дава информации за светлотехничките својства на сијалицата, во праксата многу почесто сијалиците се референцираат според нивната номинална моќност, отколку според нивниот номинален светлински флукс.

²⁴ Во [6] се приложени дискретните вредности на функцијата $V(\lambda)$ за вредности на $\Delta\lambda$ од 5 nm. Според тие податоци сумата на функцијата $V(\lambda)$ во интервалот 380÷780 nm е еднаква на 21,3724.

$$K_A = \frac{\Phi_A}{\Phi_{eA}} = \frac{13\,660}{20} = 683 \text{ lm/W} \quad \text{и} \quad K_B = \frac{\Phi_B}{\Phi_{eB}} = \frac{3\,649,3}{20} = 182,5 \text{ lm/W} .$$

Од добиените резултати произлегува дека светлинската ефикасност на зрачењето на сијалицата В е за 3,743 пати помала отколку на сијалицата А.

Според (3.10), за ефикасноста на зрачењето на сијалиците А и В се добива, соодветно:

$$K_{eA} = \frac{\Phi_{eA}}{P_A} = \frac{20}{80} = 0,25 \quad \text{и} \quad K_{eB} = \frac{\Phi_{eB}}{P_B} = \frac{20}{80} = 0,25 .$$

Врз основа на зададените номинални моќности на сијалиците А и В и пресметаните светлински флуковси, за нивните специфични производства пресметуваме:

$$\xi_A = \frac{\Phi_A}{P_A} = \frac{13\,660}{80} = 170,8 \approx 171 \text{ lm/W} \quad \text{и} \quad \xi_B = \frac{\Phi_B}{P_B} = \frac{3\,649,3}{80} = 45,6 \approx 46 \text{ lm/W} .$$

Иако во примерот 3.2 беа разгледувани две замислени сијалици, сепак добиените резултати можат да послужат за илустрирање на некои општи карактеристики на сијалиците.

Ако се споредат специфичните производства на двете сијалици од примерот 3.2 може да се заклучи дека сијалицата А има значително поголемо специфично производство отколку сијалицата В, иако двете сијалици имаат иста ефикасност на зрачењето $K_e = 1/4$. Тука се поставува прашањето: дали при изборот на типот на сијалицата за осветление на некој објект сијалицата А треба да има предност пред сијалицата В? За да се одговори на ова прашање е потребно да се знаат и споредат останатите карактеристики на двете сијалици.

Сијалицата В има континуиран спектар на зрачење и, според податоците наведени во одделот 2.4.3, може да се претпостави дека нејзиниот индекс на репродукција на боја е еднаков или многу блиску до 100. Од друга страна, сијалицата А е монохроматски извор на светлина (според спектарот на зрачење многу слична на натриумовата сијалица со низок притисок²⁵) и може да се претпостави дека нејзиниот индекс на репродукција на бојата е многу мал. Според тоа, сијалицата А може да има предност во однос на сијалицата В само ако индексот на репродукција на бојата не е битен за предвидените видни активности. Меѓутоа, ако за обавување на предвидените видни активности доброто распознавање на боите е неопходен предуслов, сијалицата В има предност пред сијалицата А.

Резултатите од примерот 3.2 укажуваат на една карактеристика на електричните сијалици. Имено, во многу случаи, сијалиците коишто имаат помало специфично производство имаат поголем индекс на репродукција на бојата²⁶. Притоа треба да се има предвид дека споредбата на две сијалици според претходниот критериум ќе биде коректна само доколку нивните номинални напони и нивните номинални моќности се меѓусебно еднакви.

²⁵ Кај натриумовите сијалици со низок притисок најголемиот дел од моќноста на зрачењето е со бранова должина од 589 nm.

²⁶ Повеќе детали во прилог на ова правило, како и за останатите карактеристики на електричните сијалици, може да се најдат во поглавјето 5.

3.5 Светлинска емисија

Количеството светлина што еден извор ја зрачи од единица површина се нарекува *светлинска емисија (luminous exitance)*. Единицата мерка за светлинската емисија е лумен на квадратен метар (lm/m^2).

Радиометриската големина којашто дава информација за емитираната моќност по единица површина се нарекува *емисија на зрачењето (radiant exitance)*, а нејзината единица мерка е ват на квадратен метар (W/m^2).

3.6 Точкаст светлински извор

Со цел да се поедностават процедурите за пресметка и мерења на некои фотометриски големини, во определени ситуации е погодно изворите на светлина да се третираат како предмети со многу мали димензии. Оттаму и доаѓа терминот *точкаст* или *пунктуален* светлински извор.

Ако при пресметките на светлотехничките големини еден светлински извор со конечни димензии се апроксимира со точкаст тоа условува појава на дополнителни грешки. Големината на грешките зависи од повеќе фактори, но најголемо влијание има растојанието од светлинскиот извор до површината што тој ја осветлува, односно до точката од којашто изворот се набљудува. За да може еден светлински извор со конечни димензии да се третира како точкаст, и притоа грешките во пресметките (или мерењата) да бидат во прифатливи граници, потребно е растојанието од изворот до точката од којашто тој се набљудува (или до рамнината којашто тој ја осветлува) да биде најмалку пет пати поголемо од најголемата димензија на светлите делови од изворот.

Голем број истражувања покажале дека, ако е исполнет претходниот услов, грешките при пресметките и мерењата на светлотехничките големини се во границите од најмногу $\pm 5\%$ [6]. Кога изворите се третираат како точки, методите за пресметка и мерење на светлотехничките големини во англиската терминологија се нарекуваат *Far-Field Photometry*, или во слободен превод *фотометрија на големи растојанија*.

Во ситуациите кога изворите не може да се сметаат за точки, постапките за пресметка и мерења на светлотехничките големини значително се усложнуваат. Овие методи се познати како *фотометрија на блиски растојанија* (од англискиот термин *Near-Field Photometry*).

Покрај поедноставувањето на постапките за пресметка и мерења на светлотехничките големини, воведувањето точкаст светлински извор многу помага и за поедноставно дефинирање на повеќе светлотехнички големини. Се разбира, во рамките на овој труд ќе бидат изложени и методите за пресметка на светлотехничките големини во случаите кога светлинските извори не можат да се третираат како точки.

Кога еден реален светлински извор се апроксимира со точкаст тогаш точкастиот извор се поставува во онаа точка од светлинскиот извор којашто придонесува за најреална репродукција на светлотехничките својства на изворот.

Најчесто, тоа е геометриското средиште на светлинскиот извор, а таа точка се нарекува и *оптички центар* на светлинскиот извор.

3.7 Светлинска јачина и нејзината распределба

Светлотехничката големина којашто овозможува да се стекне претстава за просторната распределба на светлинскиот флуks е *светлинската јачина*. Таа светлотехничка големина е секогаш придружена кон определен правец во просторот.

Пред да преминеме кон дефинирање на светлинската јачина ќе направиме кус осврт врз геометриската големина наречена *просторен агол*.

3.7.1 Просторен агол

Што претставува еден просторен агол може да се објасни со примерите на сликата 3.3. На сликата 3.3.a е прикажана сфера со центар во точката O и радиус R . Прикажан е и делот од четиристрана пирамида чијшто врв се поклопува со центарот на сферата и чијашто висина е поголема од радиусот на сферата. Со бочните страни на пирамидата е исечен еден дел од површината на сферата (којшто е засенчен на сликата 3.3.a.). Тој дел ќе го означиме со A , а неговата плоштина со S_A .

Просторниот агол под кој од центарот на една сфера со радиус R (слика 3.3.a) се гледа делот од нејзината површина со плоштина S_A се дефинира како количник помеѓу таа плоштина и квадратот на радиусот на сферата, т.е.

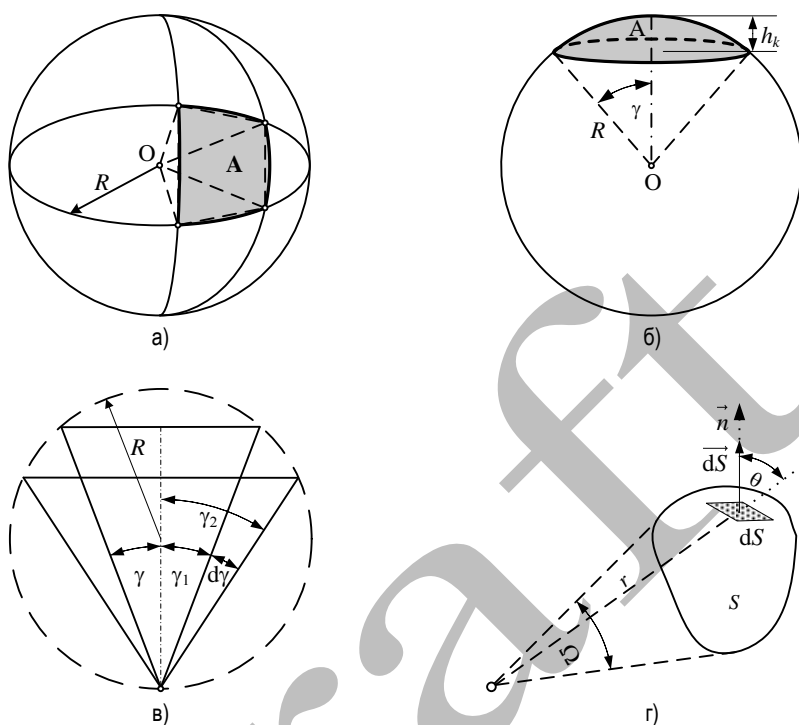
$$\Omega = \frac{S_A}{R^2}. \quad (3.12)$$

Да нагласиме дека за дефиницијата на просторниот агол не е битно дали набљудуваната пирамида е тристрана, четиристрана или повеќестрана.

Исто така, просторниот агол може да се дефинира и со помош на конус чијшто врв е во центарот на сферата и чијашто висина е поголема од радиусот на сферата (слика 3.3.b). Обвивката на конусот исечува еден дел од површината на сферата. Тој дел има облик на сферна калота и е прикажан како засенчена површина на сликата 3.3.b. Висината на калотата е $h_k = R - R \cdot \cos \gamma$, каде што со γ е означен аголот помеѓу изводницата на конусот и неговата оска²⁷. Големината на просторниот агол под кој од центарот на сферата се гледа калотата се пресметува како количник помеѓу плоштината на калотата и квадратот на радиусот на сферата:

$$\Omega = \frac{S_{\text{калота}}}{R^2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot h_k}{R^2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot (R - R \cdot \cos \gamma)}{R^2} = 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos \gamma). \quad (3.13)$$

²⁷ Аголот помеѓу изводницата на конусот и неговата оска се нарекува *полу-агол при врвот на конусот*.



Слика 3.3 Скици за дефиниција на просторен агол

Од (3.13) произлегува дека големината на просторниот агол определен со обвивката на еден конус не зависи од висината на конусот и од радиусот на замислената сфера, туку само од големината на полу-аголот при врвот на конусот.

Да забележиме дека просторниот агол може да биде определен и со обвивките на два конуса со различни полу-агли при врвот: γ_1 и γ_2 (слика 3.3.в). При тоа е неопходно врвовите на овие конуси да се наоѓаат во истата точка и нивните оски да се поклопуваат. Врз основа на (3.13) за големината на просторниот агол определен со таквите два конуса следува:

$$\Omega = \Omega_{\gamma_2} - \Omega_{\gamma_1} = 2 \cdot \pi \cdot (\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2). \quad (3.14)$$

Равенката (3.14) може да послужи и за дефиницијата на елементарниот просторен агол определен со одбивките на два конуса чиишто полу-агли при врвот се разликуваат за елементарен агол $d\gamma$. Ако се означи $\gamma_1 = \gamma$ и $\gamma_2 = \gamma + d\gamma$, врз основа на (3.14) за елементарниот просторен агол $d\Omega$ може да се напише:

$$d\Omega = 2 \cdot \pi \cdot [\cos \gamma - \cos(\gamma + d\gamma)] = 2 \cdot \pi \cdot (\cos \gamma - \cos \gamma \cdot \cos d\gamma + \sin \gamma \cdot \sin d\gamma),$$

од каде што поради $\cos d\gamma = 1$ и $\sin d\gamma = d\gamma$, за елементарниот просторен агол добиваме:

$$d\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \sin \gamma \cdot d\gamma. \quad (3.15)$$

Доколку сферната површина S не се набљудува од центарот на сферата или површината S не е сферна (слика 3.3.г), за пресметка на просторниот агол под кој таквата површина се гледа од точката T се користи:

$$\Omega = \int_S d\Omega = \int_S \frac{\cos \theta}{r^2} \cdot dS = \int_S \frac{\vec{dS} \cdot \vec{r}}{r^3}, \quad (3.16)$$

каде што r е растојание од точката на набљудувањето до елементарната површина со плоштина dS , а θ е агол помеѓу нормалата на елементарната површина и правецот определен со точката на набљудувањето и средиштето на елементарната површина.

Единицата мерка за просторен агол е *стерадијан* и се означува со sr. Еден стерадијан може да се дефинира како просторен агол под којшто од центарот на замислена сфера (слика 3.3) се гледа делот од површината на сферата чијашто плоштина е еднаква на квадратот на нејзиниот радиус.

Просторниот агол којшто се однесува на целиот простор околу една точка е:

$$\Omega = \frac{S_{\text{сфера}}}{R^2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R^2}{R^2} = 4\pi \text{ sr}.$$

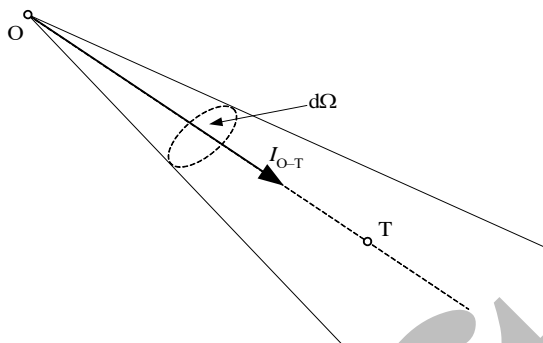
Ако замислената сфера (слика 3.3.а) ја пресечеме со рамнина којашто минува низ нејзиниот центар, целиот простор ќе биде поделен на два полупростора. Големината на просторниот агол дефиниран со еден полупростор е 2π sr.

3.7.2 Светлинска јачина

Нека набљудуваме точкаст светлински извор поставен во точката O , како на сликата 3.4. Дефинираме права во просторот којашто минува низ точката O и произволно одбраната точка T . Точката O нека претставува врв на многу мал конус чијашто оска се поклопува со правецот $O-T$. Големината на просторниот агол определен со конусот ќе ја означиме со $d\Omega$, а светлинскиот флукс што изворот го зрачи во тој просторен агол ќе го означиме со $d\Phi$. По дефиниција, светлинската јачина I_{O-T} на точкаст светлински извор поставен во точката O , во правец кон точката T , претставува количник помеѓу флуксот $d\Phi$ и просторниот агол $d\Omega$, т.е.

$$I_{O-T} = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (3.17)$$

Интензитетот на зрачењето (radiant intensity) е радиометриска големина аналогна на светлинската јачина. Интензитетот на зрачењето, како и светлинската јачина, се дефинира за определен правец. Единицата мерка за интензитетот на зрачењето е ват на стерадијан (W/sr).



Слика 3.4 Скица за дефиниција на светлинската јачина

Единицата мерка за светлинската јачина е *кандела*, а нејзината ознака е *cd*. Кандела е една од седумте основни единици на Меѓународниот систем на мерни единици (SI). Нејзината дефиниција се менувала неколку пати, а последната од 1979 година базира на интензитетот на зрачењето, со што се овозможени попрецизни мерења на фотометриските големини. Според таа дефиниција, кандела е светлинската јачина што ја има во определен правец монохроматски извор на светлина со фреквенција 540 THz ($\lambda \approx 555 \text{ nm}$ во воздух), при што интензитетот на неговото зрачење во тој правец е $1/683 \text{ W/sr}$.

Ако еден извор во сите правци зрачи светлина со иста јачина, за него велиме дека е *униформен*. Бидејќи кај таквите извори светлинската јачина не зависи од изборот на набљудуваниот правец, таа може едноставно да се пресмета како количник помеѓу флуксот Φ , што е израчен во произволен просторен агол Ω , и големината на тој просторен агол, т.е.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}. \quad (3.18)$$

Но, најчесто изворите на светлина не се униформни. Во тој случај количникот помеѓу светлинскиот флукс Φ , израчен во конечен просторен агол Ω , и големината на тој просторен агол, претставува средна светлинска јачина, т.е.

$$I_{\text{средна}} = \frac{\Phi}{\Omega}. \quad (3.19)$$

Врз основа на изразите за пресметка на светлинската јачина може да се каже дека светлинската јачина всушност претставува флукс израчен во единица просторен агол.

Врз основа на (3.18) може да се дефинира единицата за светлинскиот флукс. Лумен е светлински флукс израчен во просторниот агол од еденстерадијан од страна на светлински извор чија светлинска јачина во сите правци е еднаква на една кандела.

3.7.3 Фотометриско тело

Реалните светлински извори најчесто немаат еднакви светлински јачини во сите правци. Ако за еден точкаст светлински извор се познати светлинските јачини во сите правци, тогаш се вели дека е позната неговата *распределба на светлинската јачина*. Податоците за светлинските јачини во одделни правци можат да бидат прикажани на повеќе начини. Еден од нив се состои во тоа што од оптичкиот центар на изворот, како од полот на поларниот координатен систем, во одделни правци се повлекуваат соодветни светлински јачини (како вектори, во усвоен размер). Крајните точки на тие вектори образуваат една затворена површина, која се нарекува површина на *фотометриското тело* за набљудуваниот светлински извор.

Фотометриското тело ја содржи комплетната информација за распределбата на светлинската јачина на соодветниот извор. Почетната точка на векторите (т.е. оптичкиот центар на изворот) се нарекува *центар на фотометриското тело*. Вообичаено е за секој извор да се дефинира една референтна права којшто минува низ оптичкиот центар. Таа права се нарекува *оптичка оска* на изворот. Најчесто оптичката оска претставува некаква оска на симетрија на фотометриското тело и светилката.

Ако фотометриското тело се пресече со рамнина што минува низ оптичката оска на изворот, пресекот на површината на телото со рамнината е затворена крива. Таа крива, всушност, ја образуваат крајните точки на светлинските јачини на изворот, нанесени како вектори од оптичкиот центар во сите правци што лежат во пресечната рамнина. Поради тоа, таквите криви се нарекуваат *криви на распределба на светлинската јачина*. Познавањето на таквата крива овозможува едноставно определување на светлинската јачина во одделни правци на соодветната рамнина.

Низ оптичката оска можат да се постават бесконечно голем број рамнини. Ако пресеците на сите такви рамнини со површината на фотометриското тело се меѓусебно еднакви криви линии, за фотометриското тело велиме дека е *ротационо симетрично* и за распределбата на светлинската јачина на изворот велиме дека е *ротационо симетрична*. Во таков случај, површината на фотометриското тело може да се добие со ротација на соодветната крива на распределба на светлинската јачина околу оптичката оска на светлинскиот извор. За ротационо симетричните извори е доволно да се знае само една крива на распределба на светлинската јачина за да се има комплетна информација за фотометриското тело.

Во општ случај, распределбата на светлинската јачина на реалните извори (светилките) не мора да биде ротационо симетрична. Во таквите случаи, за да се добие што потполна информација за фотометриското тело, потребно е да се располага со што е можно поголем број криви на распределба на светлинската јачина, во разни рамнини што минуваат низ оптичката оска на изворот. Повеќе за начинот и критериумите за дефинирање на бројот и положбата на пресечните рамнини може да се најде во поглавјето 6, каде што подетално се зборува за распределбата на светлинската јачина на светилките.

Многу често, во праксата е потребно да се определи флуksот што еден извор го зрачи во определен просторен агол, врз основа на познатата распределба на светлинската јачина на изворот во тој просторен агол. Тргувајќи од (3.17), ако со $I(\Omega)$ ја

означиме функцијата на распределба на светлинската јачина на изворот во просторниот агол Ω , тогаш флуksот што изворот го зрачи во тој просторен агол може да се пресмета со:

$$\Phi = \int_{\Omega} I(\Omega) \cdot d\Omega . \quad (3.20)$$

За два извора се вели дека имаат еднакви распределби на светлинската јачина ако при поклопување на нивните оптички центри и оптички оски доаѓа до потполно поклопување на нивните фотометриски тела.

Во примерите 3.3 до 3.6 е илустрирано како се врши пресметка на флуksот на светлински извори со ротационо симетрични фотометриски тела.

Пример 3.3

Набљудуваме униформен светлински извор со светлинска јачина 500 cd. Површината на фотометриското тело на изворот е сфера со радиус којшто во усвоеното мерило е еднаков на светлинската јачина на изворот. Во овој случај, оптичка оска може да биде секоја права којашто поминува низ оптичкиот центар. Ако сферата ја пресечеме со рамнина што минува низ оптичката оска на изворот, пресечната линија е кружница. Во усвоеното мерило, радиусот на кружницата е еднаков на светлинска јачина на изворот.

Да го пресметаме вкупниот флуks што изворот го зрачи во целиот простор.

Врз основа на (3.18), знаејќи дека просторниот агол што го опфаќа целиот простор е еднаков на 4π sr, за вкупниот флуks на изворот пресметуваме:

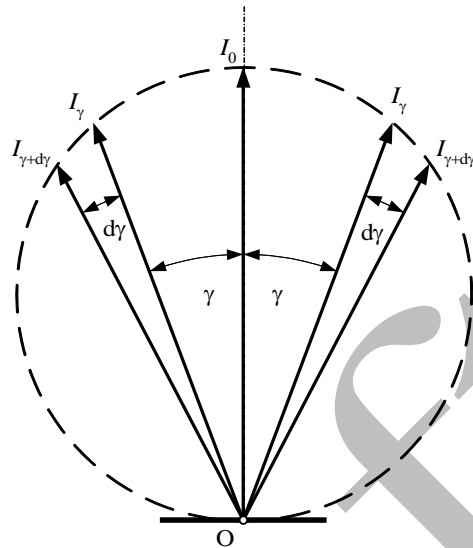
$$\Phi = I_0 \cdot \Omega = 500 \cdot 4 \cdot \pi = 2\,000 \cdot \pi = 6\,283 \text{ lm} .$$

Пример 3.4

Мал светлински извор во вид на рамна површина со занемарлива дебелина зрачи светлина само од едната страна. Изворот може да се апроксимира со точкаст, поставен во центарот на светлечката површина (слика 3.5). Оптичката оска на изворот е нормална на светлечката површина и светлинската јачина во тој правец е $I_0 = 1\,000$ cd. Светлинската јачина на изворот во правец којшто со оптичката оска зафаќа агол γ е $I_\gamma = I_0 \cdot \cos \gamma$ ²⁸. Да се определи светлинскиот флуks на изворот.

Не е тешко да се покаже дека површината на фотометриското тело и на овој извор е сфера. Но, за разлика од изворот во примерот 3.3, оптичкиот центар на овој извор не е во центарот на сферата на фотометриското тело, туку на средината на светлечката површина (точка O на сликата 3.5).

²⁸ За извори чијашто светлинска јачина ја задоволува оваа равенка се вели дека имаат распределба на светлинската јачина според Ламбертовниот закон, односно дека зрачат униформно дифузно (видете ги одделите 3.8.2, 4.2.2 и 4.3.2).



Слика 3.5 Скица за примерот 3.4

Флуksот на изворот ќе го пресметаме со помош на (3.20). За таа цел елементарниот просторен агол $d\Omega$ го дефинираме како просторен агол помеѓу два конуса чиешто врвови се во точката O и чиешто оски се поклопуваат со оптичката оска на изворот (слика 3.5). Полу-аголот при врвот на првиот конус ќе го означиме со γ , а на вториот со $\gamma + d\gamma$.

Според (3.15), елементарниот просторен агол определен со два конуса чиешто полу-агли при врвот се разликуваат за елементарен агол $d\gamma$ е $d\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \sin \gamma \cdot d\gamma$. Со тоа, подинтегралната функција од (3.20) може да се изрази како функција од аголот γ . За да се опфати целиот простор во којшто изворот зрачи светлина (т.е. просторот над рамната површина на изворот), аголот γ треба да се менува во границите од 0 до $\pi/2$. На тој начин, од (3.20), за вкупниот светлински флуks што извор во вид на рамна дифузна површина го зрачи од едната страна се добива:

$$\Phi = \pi \cdot I_0 \cdot \int_0^{\pi/2} 2 \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma = \pi \cdot I_0 \int_0^{\pi/2} \sin 2\gamma \cdot d\gamma = \frac{\pi}{2} \cdot I_0 \cdot (-\cos 2\gamma) \Big|_0^{\pi/2},$$

т.е.

$$\Phi = \pi \cdot I_0. \quad (3.21)$$

Конечно, флуksот што набљудуваниот извор го зрачи од едната страна е:

$$\Phi = I_0 \cdot \pi = 1\,000 \cdot \pi = 3142 \text{ lm}.$$

Пример 3.5

Да се пресмета флуksот што изворите од примерите 3.3 и 3.4 ги зрачат во просторот ограничен со обвивките на два конуса. Полу-аголот при врвот на првиот конус е $\gamma_1 = \pi/4$, а на вториот е $\gamma_2 = \pi/3$. Претпоставуваме дека изворите се поставени во врвовите на конусите и оските на конусите се поклопуваат со оптичките оски на изворите.

Според (3.14), просторниот агол определен со двата конуса е:

$$\Omega_{2к} = 2\pi \cdot (\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2) = 2\pi \cdot \left(\cos \frac{\pi}{4} - \cos \frac{\pi}{3} \right) = 2\pi \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{2} \right) = (\sqrt{2} - 1) \cdot \pi .$$

Бидејќи изворот од примерот 3.3 е униформен, со помош на (3.18), за флуksот што тој извор го зрачи во просторот помеѓу двата конуса се пресметува:

$$\Phi_1 = I_0 \cdot \Omega_{2к} = 500 \cdot (\sqrt{2} - 1) \cdot \pi \approx 651 \text{ lm} .$$

Изворот од примерот 3.4 не е униформен и неговиот флуks ќе го пресметаме со (3.20). Во случајов, светлинската јачина е функција само од аголот γ , а елементарниот просторен агол определен со (3.15). Така, за флуksот на изворот од примерот 3.4 добиваме:

$$\Phi_2 = \int_{\pi/4}^{\pi/3} I_0 \cdot \cos \gamma \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sin \gamma \cdot d\gamma = \pi \cdot I_0 \int_{\pi/4}^{\pi/3} \sin 2\gamma \cdot d\gamma = \frac{\pi}{2} \cdot I_0 \cdot (-\cos 2\gamma) \Big|_{\pi/4}^{\pi/3} ,$$

$$\Phi_2 = \frac{\pi}{2} \cdot I_0 \cdot \left(-\cos \frac{2\pi}{3} + \cos \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\pi \cdot I_0}{4} = 250 \cdot \pi \approx 785 \text{ lm} .$$

3.7.4 Зонални флуksови и кумулативни зонални флуksови

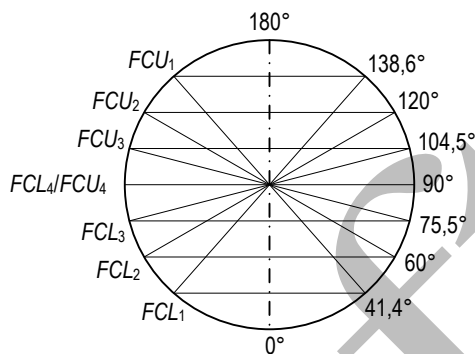
Нека кон светлинскиот извор се придружат два конуса. Притоа, врвовите на конусите нека се поклопуваат со оптичкиот центар на изворот и оските на конусите нека се поклопуваат со оптичката оска на изворот. Просторниот агол дефиниран со двата конуса се нарекува *зона*, а полу-аглие при врвовите на конусите се нарекуваат *зонални агли*. Флуksот што изворот го зрачи во една зона се нарекува *зонален флуks*. Зоналните флуksови овозможуваат на едноставен начин, и со релативно мал број податоци, да се опише фотометриското тело на извор со ротационо симетрична распределба на светлинската јачина. Така, на пример, за светилките чијашто распределба на светлинската јачина е ротационо симетрична или незначително се разликува од неа, CIE (во [31]) дефинирала четири зонални агли во долниот полупростор на фотометриското тело на еден светлински извор, и тоа: $41,4^\circ$, 60° , $75,5^\circ$ и 90° . На тие зонални агли им соодветствуваат конуси со просторни агли: $\pi/2$, π , $3\pi/2$ и 2π sr. Флуksовите израчени во конусите определени со зоналните агли се нарекуваат *кумулативни зонални флуksови*²⁹.

Европскиот стандард EN 13032³⁰ дефинира осум зонални агли со кои се опфаќа целиот простор околу светлинскиот извор. Покрај зоналните агли дефинирани од CIE, во EN 13032 се дефинирани и четири зонални агли од горниот полупростор на светилката: 180° до $138,6^\circ$, 180° до 120° , 180° до $104,5^\circ$ и 180° до 90° (слика 3.6). За да се појасни начинот на којшто тука се дефинирани зоналните агли во горниот полупростор на светилката, ќе се послужиме со пример. Зоналниот агол 180° до $138,6^\circ$ е агол со теме во оптичкиот центар на светилката, помеѓу правецот што со оптичката

²⁹ Флуksот израчен во просторниот агол дефиниран со еден зонален агол се нарекува кумулативен зонален флуks бидејќи е еднаков на сумата на зоналните флуksови на сите зони опфатени со тој просторен агол.

³⁰ Европскиот стандард EN 13032 се состои од два дела [48,49].

оска на светилката зафаќа агол 180° и правецот што со таа оска зафаќа агол $138,6^\circ$. На сликата 3.6 со FCU_i ($i=1, \dots, 4$) се означени кумулативните зонални флукови во горниот полупростор, додека со FCL_i ($i=1, \dots, 4$) се означени кумулативните флукови во долниот полупростор.



Слика 3.6 Скица за дефиниција на зоналните агли и кумулативни зонални флукови според EN 13032

Ако во просторот околу еден светлински извор се дефинира поголем број зони, при што зоналните агли се со чекор од 5° или 10° , може да се претпостави дека во рамките на секоја зона е линеарна зависноста на светлинската јачина од аголот γ . Ако за една зона е познат зоналниот флуков на светлинскиот извор, едноставно може да се пресмета средната светлинска јачина на изворот во таа зона, или ако е позната средната светлинска јачина во зоната, едноставно може да се пресмета соодветниот зонален флуков.

Пример 3.6

Да се пресмета флуковот што еден ротационо симетричен светлински извор го зрачи во зоната определена со зоналните агли од 40° и 50° . Светлинските јачини на изворот во правците што со оптичката оска зафаќаат агли од 40° и 50° се 700 cd и 600 cd , соодветно.

Бидејќи разликата помеѓу зададените зонални агли не е голема, нема да се направи значајна грешка доколку се претпостави дека во соодветната зона зависноста на светлинската јачина од аголот помеѓу избраниот правец и оптичката оска е линеарна. Во тој случај флуковот што изворот го зрачи во зоната дефинирана со дадените зонални агли ќе го пресметаме имајќи ја предвид (3.19). Средната светлинска јачина на изворот во оваа зона е:

$$I_{\text{средна}} = I_{45^\circ} = \frac{I_{40^\circ} + I_{50^\circ}}{2} = \frac{700 + 600}{2} = 650 \text{ cd},$$

а според (3.14) за просторниот агол на зоната следува:

$$\Omega = 2\pi \cdot (\cos 40^\circ - \cos 50^\circ) = 2\pi \cdot (0,76604 - 0,64279) = 0,7744 \text{ sr}.$$

Со тоа, користејќи ја (3.19), за бараниот зонален флуков пресметуваме:

$$\Phi = I_{\text{средна}} \cdot \Omega = 650 \cdot 0,7744 = 503,4 \text{ lm}.$$

3.8 Сјајност

3.8.1 Сјајност на површина

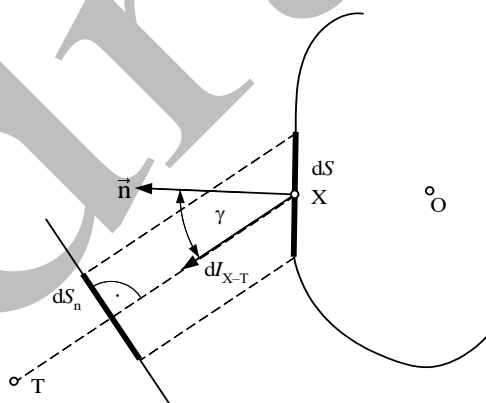
Набљудуваме светлински извор со конечни димензии чијшто оптички центар е во точката O (слика 3.7). Изворот го набљудуваме од произволно одбрана точка T . На површината од светлинскиот извор дефинираме елементарна површина со плоштина dS . Оваа елементарна површина можеме да ја сметаме за точкаст извор поставен во нејзиниот центар (точката X). Светлинската јачина на овој точкаст извор во правецот на набљудување (т.е. кон точката T) ќе ја означиме со dI_{X-T} . Аголот што го зафаќаат нормалата на елементарната светлечка површина и правецот на набљудување ќе го означиме со γ . Дефинираме рамнина којашто е нормална на правецот на набљудување и врз таа рамнина ја проектираме елементарната површина. Плоштината на проекцијата на елементарната површина е:

$$dS_n = dS \cdot \cos \gamma .$$

По дефиниција, *сјајноста (luminance)* на елемент од светлински извор во определен правец е количник помеѓу светлинската јачина на елементот во тој правец и плоштината на проекцијата на елементот врз рамнина нормална на правецот на набљудување. Вообичаено е сјајноста да се означува со L .

Според тоа, за сјајноста на елементарната површина од сликата 3.7 може да се напише:

$$L = \frac{dI_{X-T}}{dS_n} = \frac{dI_{X-T}}{dS \cdot \cos \gamma} . \quad (3.22)$$



Слика 3.7 Скица за дефиниција на сјајноста

Во општ случај, на површината од изворот од сликата 3.7 можат да се дефинираат бесконечно голем број елементарни површини. Нека на секоја од тие површини соодветствува иста плоштина на проекцијата врз рамнина нормална на правецот на набљудување, но нека тие површини зрачат кон точката T со различни

светлински јачини. Според (3.22) произлегува дека овие елементарни површини имаат различни сјајности кога се набљудуваат од точката Т.

Сјајноста на светлинскиот извор што окошто ја регистрира претставува збир од сјајностите на елементарните површини на светлинскиот извор, поделен со бројот на елементарните површини. Всушност, во овој случај зборуваме за *средна сјајност на изворот*.

Математичките постапки за пресметката на сјајноста на површините со конечни димензии се доста сложени. Поради тоа, за изворите коишто можат да се сметаат за точки, сјајноста се пресметува како количник помеѓу светлинската јачина на изворот во определен правец и плоштината на проекцијата на светлите делови од светлинскиот извор врз рамнина нормална на правецот на набљудување. Така, за светлинскиот извор од сликата 3.8, сјајноста во правецот определен со точките О и Т се пресметува според равенката:

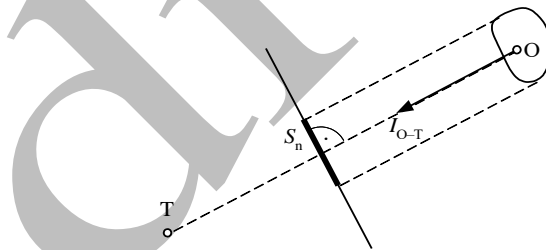
$$L = \frac{I_{O-T}}{S_n} \quad (3.23)$$

Ако делот од светлинскиот извор што емитура светлина е рамна површина со плоштина S (слика 3.8), врз основа на (3.22) може (3.23) да се напише во вид:

$$L = \frac{I_{O-T}}{S_n} = \frac{I_{O-T}}{S \cdot \cos \gamma} \quad (3.24)$$

каде што аголот γ го има истото значење како и на сликата 3.7.

Единица за сјајност е *кандела на квадратен метар* (cd/m^2). На сјајноста соодветствува радиометриска големина наречена *радијанса* (*radiance*), а нејзината единица мерка е ват настерадијан и квадратен метар ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$).



Слика 3.8 Скица за определување на сјајноста на извор што може да се смета за точкаст

Ако изворот не може да се смета за точкаст и ако сјајностите на деловите од неговата површина не се еднакви, површината на изворот може да се раздели на определен број делови (помали површини) коишто можат да се сметаат за точкасти извори и за тие делови да се пресмета сјајноста според (3.23). Средната сјајност на изворот се добива како количник помеѓу збирот на сјајностите на деловите и нивниот број.

Бидејќи плоштината на елементарната површина од сликата 3.7 е бесконечно мала, сјајноста определена со (3.22) може да се смета за сјајност во точка, во овој случај во точката X.

3.8.2 Униформно дифузни извори

Особено значење во светлотехниката имаат светлинските извори чијашто сјајност е еднаква во сите правци. За тие извори велиме дека се *униформно дифузни* или накусо *дифузни* (во англиската терминологија често се користи покусиот термин – *diffuse sources*).

Пример 3.7

Да се пресмета сјајноста во произволен правец, на светлинскиот извор од примерот 3.3, ако изворот е во вид на сфера со радиус $r = 0,1 \text{ m}$. Изворот се набљудува од растојание коешто дозволува истиот да се смета за точкаст извор.

Светлинскиот извор е во вид на сфера и неговата проекција врз рамнина што е нормална на права којашто поминува низ центарот на сферата (оптичкиот центар на изворот) е секогаш круг со радиус еднаков на радиусот на сферата. Бидејќи изворот е униформен (т.е. има еднакви светлински јачини во сите правци), според (3.23), сјајноста на изворот во сите правци ќе биде еднаква и ќе изнесува:

$$L = \frac{I}{S_n} = \frac{I}{\pi \cdot r^2} = \frac{500}{\pi \cdot 0,1^2} \approx 15\,915 \text{ cd/m}^2.$$

Пример 3.8

Да се пресмета сјајноста на изворот од примерот 3.4 во правец којшто со нормалата на светлечката површина зафаќа агол γ . Плоштината на изворот што емитира светлина е S . Растојанието од коешто го набљудуваме изворот дозволува истиот да се смета за точкаст.

Во зададениот правец светлинската јачина на изворот е $I_\gamma = I_0 \cdot \cos \gamma$, каде што со I_0 е означена светлинската јачина на изворот во правец на нормалата на светлечката површина. Со помош на (3.24) за бараната сјајност се добива:

$$L = \frac{I_{0-\Gamma}}{S_n} = \frac{I_\gamma}{S \cdot \cos \gamma} = \frac{I_0 \cdot \cos \gamma}{S \cdot \cos \gamma} = \frac{I_0}{S}.$$

Од добиениот резултат произлегува дека сјајноста на изворот е константна, односно дека не зависи од правецот на набљудување.

Врз основа на резултатите од примерите 3.7 и 3.8 може да се заклучи дека во двата случаја се работи за униформно дифузни извори. Всушност, изворот во примерот 3.7 е специјален случај. Имено, секој извор во вид на сфера којшто има еднаква светлинска јачина во сите правци (т.е. униформен извор) ќе има и еднаква сјајност во сите правци (т.е. ќе биде и униформно дифузен извор).

Од примерот 3.8 може да се заклучи дека кај сите рамни површини, коишто имаат еднаква сјајност во сите правци, распределбата на светлинската јачина е според едноставен закон, познат под името *Ламбертов закон*. Кај овие извори максималната

светлинска јачина I_0 е во правец на нормалата на површината на изворот, а светлинската јачина во правец којшто со нормалата зафаќа агол γ е $I_\gamma = I_0 \cdot \cos \gamma$.

Рамните униформно дифузни површини некои автори ги нарекуваат и *Ламбертови површини*. Површината на нивното фотометриско тело е во вид на сфера (слика 3.5), оптичкиот центар е во средината на светлечката површина и целиот флуks се зрачи во просторен агол $2\pi \text{ sr}$ (којшто соодветствува на полупросторот од светлечката страна на изворот).

Површините што одбиваат светлина според Ламбертовиот закон се од особен интерес во светлотехниката поради фактот што за најголем дел од материјалите, коишто се користат за внатрешно уредување на просториите, распределбата на светлинската јачина на одбиениот флуks е според Ламбертовиот закон или малку отстапува од таквата распределба. Всушност, од оваа претпоставка се тргнало при развивање на повеќе методи за пресметка на светлотехничките големини во затворени простории (видете, на пример, оддел 4.5.3).

Како што беше покажано во примерот 3.4, за да се пресмета вкупниот светлински флуks што го зрачи еден извор во вид на рамна униформно дифузна површина доволно е да се знае светлинска јачина на изворот во правец на нејзината нормала I_0 , бидејќи според (3.21) е $\Phi = \pi \cdot I_0$.

Ако двете страни на (3.21) се поделат со плоштината на униформно дифузната површина S ќе се добие:

$$\frac{\Phi}{S} = \pi \cdot \frac{I_0}{S},$$

каде што дробката од левата страна на равенката ја претставува светлинската емисија на светлечката површина (т.е. флуksот емитиран по единица површина), а дробката на десната страна ја претставува нејзината сјајност. Според тоа, кај рамните униформно дифузни извори светлинската емисија M е пропорционална на сјајноста L , т.е.

$$M = \pi \cdot L. \quad (3.25)$$

Пример 3.9

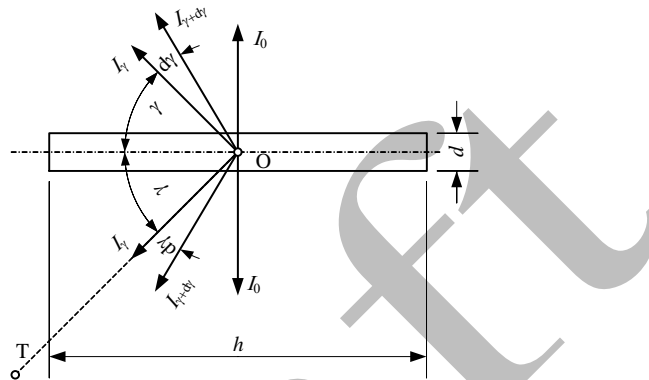
Да се пресметаат сјајностите на три сијалици во вид на прави цилиндри со кружна основа. Сјајноста на нивните обвивки е еднаква во сите правци. Основите на цилиндрите не светат. Првите две сијалици се со должина 600 mm, третата е долга 550 mm и нивните дијаметри на основите се 38, 26 и 16 mm, соодветно. Номиналниот светлински флуks на првата сијалица е 1100 lm, а на втората и третата по 1350 lm.

Најнапред да го определиме законот за распределба на светлинската јачина за светлински извор со карактеристики како и сијалиците од овој пример. Да претпоставиме дека изворот го набљудуваме од растојанија коишто овозможуваат тој да биде третиран како точкаст, поставен во тежиштето на цилиндерот, означено со O на сликата 3.9.

Во симетралната рамнина, нормална на надолжната оска на цилиндричната сијалица, светлинската јачина нека биде I_0 . Набљудувана од точките на таа рамнина, сјајноста на сијалицата ќе биде $L_0 = I_0 \cdot h^{-1} \cdot d^{-1}$. Дефинираме точка T на правата која што со надолжната оска на цилиндричната сијалица зафаќа агол γ . Во правецот кон точката T изворот има светлинска јачина

I_{O-T} . Бидејќи плоштината на проекцијата на цилиндерот врз рамнина нормална на правецот $O-T$ е $h \cdot d \cdot \cos(\pi/2 - \gamma)$, сјајноста на сијалицата во тој правец ќе биде:

$$L_{O-T} = \frac{I_{O-T}}{h \cdot d \cdot \sin \gamma}. \quad (3.26)$$



Слика 3.9 Скица на цилиндер со униформно дифузна обвивка

Од условот за еднаква сјајност на обвивката на цилиндричната сијалица во сите правци произлегува дека светлинската јачина на сијалицата во правец којшто со оската на цилиндерот зафаќа агол γ е:

$$I_{O-T} = I_\gamma = I_0 \cdot \sin \gamma. \quad (3.27)$$

Да забележиме дека за секој агол γ векторите на светлинската јачина дефинираат обвивка на конус со врв во средиштето на светлечкиот цилиндер (точката O на сликата 3.9), при што оската на конусот се поклопува со надолжната оска на цилиндерот, а полу-аголот при врвот на конусот е γ . Покрај овој конус дефинираме уште еден конус со полу-агол при врвот $\gamma + d\gamma$. Елементарниот просторен агол определен со двата конуса ќе го означиме со $d\Omega$. Флуксот што сијалицата го зрачи во овој елементарен просторен агол ќе биде:

$$d\Phi = I_\gamma \cdot d\Omega = I_0 \cdot \sin \gamma \cdot d\Omega. \quad (3.28)$$

Врз основа на (3.15), равенката (3.28) може да се напише во вид:

$$d\Phi = 2 \cdot \pi \cdot I_0 \cdot \sin^2 \gamma \cdot d\gamma. \quad (3.29)$$

Од (3.29), интегрирајќи по променливата γ во границите од 0 до π , за вкупниот флуks што овој извор го зрачи во целиот простор добиваме:

$$\Phi = 2 \cdot \pi \cdot I_0 \cdot \int_0^\pi \sin^2 \gamma \cdot d\gamma = \pi \cdot I_0 \cdot \int_0^\pi (1 - \cos 2\gamma) \cdot d\gamma = \pi \cdot I_0 \cdot \left(\pi - \frac{1}{2} \cdot \sin 2\gamma \Big|_0^\pi \right),$$

т.е.

$$\Phi = \pi^2 \cdot I_0. \quad (3.30)$$

Равенката (3.30) ја дава врската помеѓу флуksот што во целиот простор го зрачи светлински извор во вид на цилиндер чијашто обвивка има еднаква сјајност во сите правци.

Според тоа, за бараните сјајности на сијалиците може да се пресмета:

$$L_1 = \frac{I_{0_1}}{S_1} = \frac{\Phi_1/\pi^2}{d_1 \cdot h_1} = \frac{1100}{\pi^2 \cdot 0,038 \cdot 0,6} = 4\,888 \text{ cd/m}^2, \quad L_2 = \frac{\Phi_2/\pi^2}{d_2 \cdot h_2} = \frac{1350}{\pi^2 \cdot 0,026 \cdot 0,6} = 8\,768 \text{ cd/m}^2 \text{ и}$$

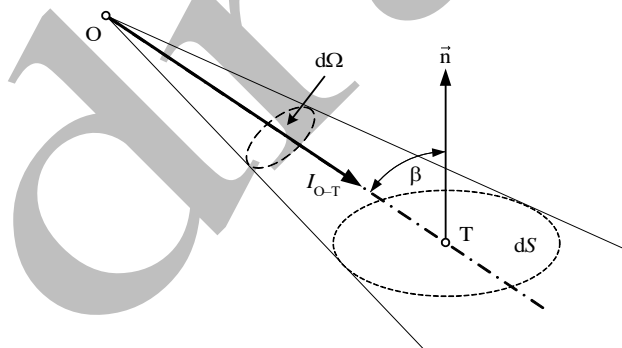
$$L_3 = \frac{\Phi_3/\pi^2}{d_3 \cdot h_3} = \frac{1350}{\pi^2 \cdot 0,016 \cdot 0,55} = 15\,544 \text{ cd/m}^2.$$

3.9 Осветленост од точкasti светлински извори

3.9.1 Осветленост на површина

Точкаст светлински извор, поставен во точката O , нека осветлува елементарна површина со центар во T и плоштина dS (слика 3.10). Делот од флуksот на изворот што паѓа врз елементарната површина ќе го означиме со $d\Phi$. Всушност, $d\Phi$ е флуksот што изворот го зрачи во просторниот агол под којшто од точката O се гледа елементарната површина. По дефиниција, *осветленоста* (*illuminance* или *flux density*) претставува густина на светлинскиот флуks на осветлуваната површина. Осветленоста најчесто се означува со E . Според тоа, во случајот прикажан на сликата 3.10, за осветленоста на елементарната површина со центар во точката T може да се напише:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (3.31)$$



Слика 3.10 Скица за дефиниција на осветленост на површина

Единица за осветленост е *луks*, којашто се означува со lx . Луks е осветленост на површина со плоштина еден квадратен метар кога на неа паѓа рамномерно распределен светлински флуks од еден лумен.

Ако се споредат дефинициите за светлинска емисија и осветленост може да се заклучи дека овие две големини имаат единици со иста димензија: lm/m^2 . Бидејќи израчениот флуks по единица светлечка површина (т.е. светлинска емисија) е битно

различна светлотехничка големина од паднатиот флуks по единица површина (т.е. осветленост), за овие големина се користат единици со различни називи.

Радиометриската големина којашто одговара на осветленоста се нарекува *ирадијанса (irradiance)*, а нејзината единица е ват на квадратен метар (W/m^2).

За површините со конечни димензии, средната осветленост се дефинира како количник помеѓу вкупниот флуks Φ што паѓа на површината и плоштината S на таа површина:

$$E_{\text{средна}} = \frac{\Phi}{S}. \quad (3.32)$$

Кога се работи за поголеми површини, најчесто под осветленоста на површината се подразбира *средна осветленост*. Во согласност со тоа, кога во натамошниот текст ќе се зборува за осветленост на некоја површина со конечни димензии ќе се подразбира *средна осветленост на површината*, независно дали тоа ќе биде нагласено или не.

До равенката за определување средна осветленост на површината со конечна плоштина S , на којашто паѓа вкупен флуks Φ , може да се дојде и на поинаков начин. Конечната површина ја делиме на m делови, секој со плоштина ΔS . Притоа, димензиите на деловите се мали во однос на растојанието до изворот. За да се пресмета осветленоста на делот j потребно е да се познава флуksот $\Delta\Phi_j$ што паѓа на тој дел. Во општ случај, на секој дел не паѓа ист флуks, поради што и осветленостите на деловите нема да бидат еднакви. Средната осветленост на површината се пресметува како средна вредност на осветленостите на сите нејзини делови:

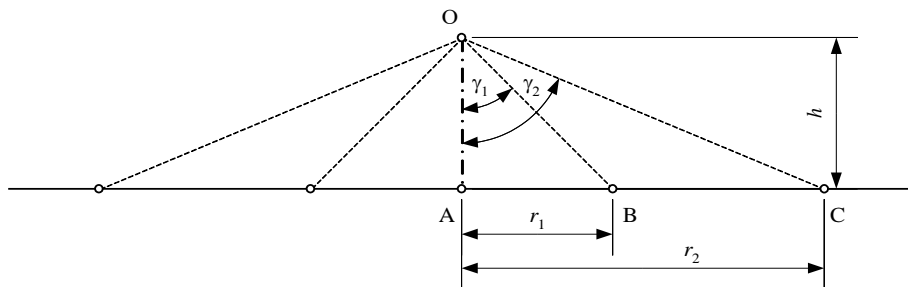
$$E_{\text{средна}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m E_j = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{\Delta\Phi_j}{\Delta S} = \frac{1}{m \cdot \Delta S} \cdot \sum_{j=1}^m \Delta\Phi_j. \quad (3.33)$$

Пример 3.10

Униформен светлински извор во вид на сфера со дијаметар 0,2 m осветлува хоризонтална рамнина (слика 3.11) и е поставен на висина 2 m над неа. Флуksот што изворот го зрачи во целиот простор изнесува $\Phi = 1\,600 \text{ lm}$. На осветлуваната површина се набљудуваат два круга. Центрите на круговите се во точката А којашто се поклопува со проекцијата на средиштето на изворот врз осветлуваната рамнина. Радиусот на првиот круг е $r_1 = 2 \text{ m}$, а на вториот е $r_2 = 2 \cdot \sqrt{2} \text{ m}$. Да се пресметаат средните осветлености на двата круга и средната осветленост на кружниот прстен помеѓу двете кружници.

Бидејќи најмалото растојание помеѓу изворот и осветлуваната површина е 10 пати поголемо од дијаметарот на изворот (т.е. повеќе од пет пати), при натамошните разгледувања изворот може да се смета за точкаст.

За да може да се пресмета средната осветленост на секоја од набљудуваните површини, според (3.32), е потребно да се знае флуksот што паѓа на секоја од нив. Бидејќи изворот е униформен, флуksот што паѓа на една површина е пропорционален на просторниот агол под којшто таа површина се гледа од оптичкиот центар на изворот, при што коефициентот на пропорционалност е еднаков на светлинската јачина на изворот.



Слика 3.11 Скица за примерот 3.10

Набљудуваните кругови можат да се сметаат за основи на конуси чиешто врвови се во оптичкиот центар на изворот (точката O) и висина им е $h = 2$ m. Просторните агли под коишто од точката O се гледаат првиот и вториот круг ќе ги означиме со Ω_1 и Ω_2 , соодветно. Големините на овие просторни агли ќе ги пресметаме со (3.13). За таа цел е потребно да ги знаеме косинусите на полу-аглите при врвовите на конусите. Имајќи ја предвид сликата 3.11 пресметуваме:

$$\cos \gamma_1 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + r_1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad \cos \gamma_2 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + r_2^2}} = \frac{1}{\sqrt{3}},$$

врс основа на што за просторните агли Ω_1 и Ω_2 добиваме:

$$\Omega_1 = 2\pi \cdot (1 - \cos \gamma_1) = 2\pi \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = (2 - \sqrt{2}) \cdot \pi \text{ sr} \quad \text{и}$$

$$\Omega_2 = 2\pi \cdot (1 - \cos \gamma_2) = 2\pi \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) = \frac{2}{3} \cdot (3 - \sqrt{3}) \cdot \pi \text{ sr}.$$

За просторниот агол под којшто се гледа кружниот прстен следува:

$$\Omega_{\text{прстен}} = \Omega_2 - \Omega_1 = \frac{2}{3} \cdot (3 - \sqrt{3}) \cdot \pi - (2 - \sqrt{2}) \cdot \pi = \left(\sqrt{2} - \frac{2}{3} \cdot \sqrt{3}\right) \cdot \pi \text{ sr}.$$

Со Φ_1 , Φ_2 и $\Phi_{\text{прстен}}$ ќе ги означиме флуковите што паѓаат на првиот круг, вториот круг и кружниот прстен, соодветно. Бидејќи изворот е униформен, врс основа на (3.18) може да се напише:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} = \frac{\Phi_1}{\Omega_1} = \frac{\Phi_2}{\Omega_2} = \frac{\Phi_{\text{прстен}}}{\Omega_{\text{прстен}}},$$

од каде што следува:

$$\Phi_1 = \frac{\Omega_1}{4\pi} \cdot \Phi, \quad \Phi_2 = \frac{\Omega_2}{4\pi} \cdot \Phi \quad \text{и} \quad \Phi_{\text{прстен}} = \frac{\Omega_{\text{прстен}}}{4\pi} \cdot \Phi.$$

Натаму, со помош на (3.32), за бараните средни осветлености се добива:

$$E_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{\Omega_1 \cdot \Phi}{r_1^2} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{(2 - \sqrt{2}) \cdot \pi \cdot 1600}{2^2} = 18,65 \text{ lx},$$

$$E_2 = \frac{\Phi_2}{S_2} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{\Omega_2 \cdot \Phi}{r_2^2} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{2 \cdot (3 - \sqrt{3}) \cdot \pi \cdot 1600}{3 \cdot (2\sqrt{2})^2} = 13,45 \text{ lx и}$$

$$E_{\text{прстен}} = \frac{\Phi_{\text{прстен}}}{S_{\text{прстен}}} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{\Omega_{\text{прстен}} \cdot \Phi}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{\left(\sqrt{2} - \frac{2}{3} \cdot \sqrt{3}\right) \cdot \pi \cdot 1600}{(2\sqrt{2})^2 - 2^2} = 8,26 \text{ lx .}$$

Бидејќи кругот со радиус r_1 и кружниот појас имаат еднакви плоштини, осветленоста на кругот со радиус r_2 може да се определи и со помош на (3.33). Така се добива:

$$E_2 = \frac{1}{2} \cdot (E_1 + E_{\text{прстен}}) = \frac{1}{2} \cdot (18,65 + 8,26) = 13,45 \text{ lx .}$$

Ако една површина е едновременно осветлена од повеќе извори, вкупниот флукс што паѓа на површината е еднаков на збирот на флуковите што на таа површина паѓаат од одделни извори. Според тоа, осветленоста на една површина со плоштина S , којашто е едновременно осветлена од n светлински извори, се пресметува како збир од осветленостите на површината од одделните извори, т.е.

$$E_{\text{средна}} = \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i}{S} = \sum_{i=1}^n E_i . \quad (3.34)$$

Да забележиме дека претходното правило важи само за изворите коишто ја осветлуваат истата страна на осветлуваната рамнина.

3.9.2 Осветленост во точка

Сметајќи дека елементарната површина од сликата 3.10 е со бесконечно мала плоштина, нејзината осветленост воедно претставува и осветленост во точката Т.

За да се пресмета осветленоста во точката Т, од точкастиот извор во О, корисно е (3.31) да се трансформира во облик поподобен за користење. Од дефиниционата равенка за светлинската јачина (3.17) следува:

$$d\Phi = I_{O-T} \cdot d\Omega, \quad (3.35)$$

а врз основа на дефиницијата за просторен агол и сликата 3.10 следува:

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos\beta}{OT^2}, \quad (3.36)$$

каде што β е агол помеѓу нормалата на осветлуваната површина и правецот на кој лежат точкастиот светлински извор и набљудуваната точка Т (т.е. правецот О–Т). Изразот $dS \cdot \cos\beta$ претставува плоштина на проекцијата на површината со плоштина dS врз рамнината нормална на правецот О–Т.

Со помош на (3.35) и (3.36), равенката (3.31) може да се трансформира во облик:

$$E_T = \frac{I_{O-T} \cdot \cos \beta}{O_T^2}. \quad (3.37)$$

Од (3.37) произлегува дека осветленоста во една точка, којашто е осветлена од точкаст светлински извор, е:

- директно пропорционална на светлинската јачина на изворот во правец кон точката;
- директно пропорционална на косинусот на аголот што кај точката го зафаќаат нормалата на рамнината во којашто лежи точката и правецот определен со изворот и точката;
- обратно пропорционална на квадратот на растојанието помеѓу изворот и точката.

Врз основа на (3.34) и (3.37), осветленоста во точката Т, од n точкасти извори, може да се пресмета како сума на осветленостите од секој од изворите одделно, т.е.

$$E_T = \sum_{i=1}^n \frac{I_{O_i-T} \cdot \cos \beta_i}{O_i T^2}. \quad (3.38)$$

Да забележиме дека осветленоста во точка е големина којашто е *секогаш* придружена кон рамнината во којашто лежи точката. Така, на пример, ако рамнината во којашто лежи точката е хоризонтална, велиме дека осветленоста во точката е *хоризонтална осветленост*. Аналогно, ако рамнината во којашто лежи точката е вертикална, за осветленоста во точката велиме дека е *вертикална осветленост*.

Во многу случаи е потребно да се пресмета осветленост во точка којашто не припаѓа на ниту една материјална рамнина. Во таков случај се замислува рамнина (најчесто хоризонтална, вертикална или нормална на правецот помеѓу изворот и точката) којашто минува низ набљудуваната точка и за тие околности се пресметува осветленоста.

Да го разгледаме случајот кога точкаст светлински извор осветлува површина со конечни димензии. Во претходниот оддел беше покажано како со помош на (3.33) може на релативно едноставен начин да се пресмета средната осветленост на една таква површина. Но, средната осветленост на таква површина може да се пресмета и со помош на (3.37). За таа цел, површината се разделува на помали компонентни површини, при што димензиите на секоја од компонентните површини се мали во споредба со растојанието од изворот до средиштето на компонентната површина. Вообичаено е сите компонентни површини да имаат еднакви плоштини ΔS . Со помош на (3.37) може да се пресмета осветленоста во средиштето на секоја компонентна површина. Со оглед на релативно малите димензии на компонентните површини, може со задоволителна точност да се претпостави дека сите точки од една компонентна површина имаат еднакви осветлености, односно дека средната осветленост на секоја компонентна површина е еднаква на осветленоста во нејзиното средиште. Според тоа, ако бројот на компонентните површини е m и ако со T_j го означиме центарот на j -тата компонентна површина, врз основа на (3.33), за средната осветленост на целата површина (од точкаст извор поставен во точката О) може да се напише:

$$E_{\text{средна}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m E_j = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{I_{O-T_j} \cdot \cos \beta_j}{\overline{OT_j}^2}, \quad (3.39)$$

каде што со I_{O-T_j} е означена светлинската јачина на изворот во правец кон точката T_j , а со E_j е означена осветленоста во точката T_j .

Доколку големината на компонентните површини е релативно мала (т.е. доколку бројот на точките во коишто се пресметува осветленост е релативно голем) тогаш вредноста на средната осветленост на разгледуваната површина, пресметана со помош на (3.39), многу малку ќе се разликува од соодветната вредност пресметана со помош на (3.32) или (3.33). Всушност, врз основа на (3.39) се развиени повеќе методи за пресметка на осветленост коишто се применуваат при проектирањето на системите за осветление.

Еден од критериумите за квалитет на осветлението е *рамномерноста на осветленоста*. Рамномерноста на осветленоста се дефинира како однос помеѓу најмалата осветленост во некоја од точките на осветлуваната површина и средната осветленост на површината, т.е.

$$U_E = \frac{E_{\text{најмала}}}{E_{\text{средна}}}. \quad (3.40)$$

Во некои случаи, како параметри за оценка на квалитетот на осветлението можат да се користат односот на најголемата осветленост и средната осветленост на површината и/или односот на најмалата и најголемата осветленост на површината.

Пресметката на средната осветленост на една површина со помош на (3.39) спаѓа меѓу најпрактичните.

3.9.3 Вектор на осветленост

Точкаст светлински извор е поставен во точката О (слика 3.12). Точката Т не припаѓа на ниту една материјална рамнина. Познати се светлинската јачина I_{O-T} и растојанието помеѓу изворот и точката Т. Осветленоста во точката Т во однос на замислена хоризонтална рамнината којашто минува низ точката Т, според (3.37), е:

$$E_{\text{хор.}} = \frac{I_{O-T} \cdot \cos \beta}{\overline{OT}^2}, \quad (3.41)$$

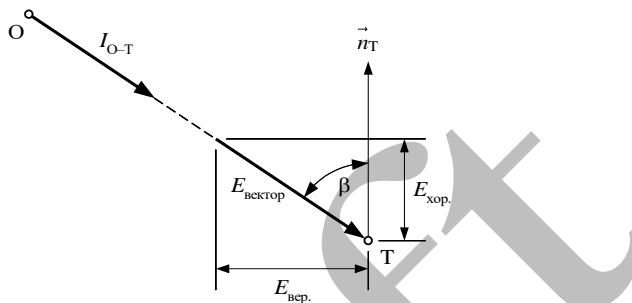
додека осветленоста во однос на замислената вертикална рамнина којашто минува низ точката Т и е нормална на вертикалната рамнина во којашто лежат точките О и Т е:

$$E_{\text{верт.}} = \frac{I_{O-T} \cdot \cos(\pi/2 - \beta)}{\overline{OT}^2} = \frac{I_{O-T} \cdot \sin \beta}{\overline{OT}^2}. \quad (3.42)$$

Хоризонталната и вертикалната осветленост во точката Т (за вака дефинираната вертикална рамнина) можат да се сметаат како компоненти од *векторот на*

осветленоста ($E_{\text{вектор}}$ на сликата 3.12), при што интензитетот (модулот) на векторот на осветленоста е:

$$|E_{\text{вектор}}| = \frac{I_{\text{O-T}}}{\text{OT}^2}. \quad (3.43)$$



Слика 3.12 Скица за дефиниција на векторот на осветленоста

Векторот на осветленост во една точка, којашто е осветлена од повеќе светлински извори, претставува резултантен вектор којшто се добива како збир на векторите на осветленоста од поедините извори. Според тоа, можно е векторот на осветленоста во една точка, којашто е осветлена од повеќе извори, да има модул еднаков на нула. На пример, ако една точка е осветлена од два извора на коишто во точката им соодветствуваат вектори на осветленоста со еднакви модули но со спротивни насоки, тогаш резултантниот вектор на осветленоста во точката ќе биде еднаков на нула.

Да забележиме дека векторот на осветленост во една точка, за разлика од осветленоста во точката, не е придружен кон ниту една рамнина, иако, математички гледано, неговиот интензитет е еднаков на осветленоста во точката сметајќи дека таа припаѓа на рамнината нормална на правата на којашто лежат изворот и точката.

3.9.4 Средна сферна осветленост (скалар на осветленост)

Средната сферна осветленост во една точка се дефинира како средна осветленост на површината на многу мала сфера со центар во таа точка. Нека до малата сфера доаѓа светлина од повеќе извори и од повеќе правци. Ако со Φ го означиме вкупниот флукс што паѓа на сферата, а со d го означиме нејзиниот дијаметар, тогаш за средната сферна осветленост може да се напише:

$$E_{\text{сферна}} = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\pi \cdot d^2}. \quad (3.44)$$

Најнапред, да ја пресметаме средната сферна осветленост во точката Т ако таа е осветлена само од еден точкаст светлински извор поставен во точката О (слика 3.13). Флуксот што ќе падне на површината на малата сфера е приближно еднаков со флуксот што би паднал на нејзиниот главен круг којшто е нормален на правецот О–Т. Бидејќи

е мал просторниот агол под којшто малата сфера се гледа од точката O , може да се претпостави дека светлинската јачина на изворот во тој просторен агол е константна, односно дека осветленоста во сите точки на наведениот главен круг е еднаква на осветленоста во точката T . Според тоа, за флуксот што паѓа на главниот круг може да се напише:

$$\Phi = E_{\text{круг}} \cdot S_{\text{круг}} = \frac{I_{O-T}}{OT^2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (3.45)$$

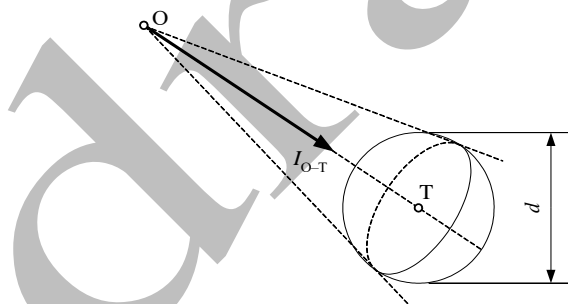
Врз основа на равенките (3.44) и (3.45) следува дека во случајот кога точката T е осветлена само од еден точкест светлински извор нејзината средна сферна осветленост се определува со равенката:

$$E_{\text{сферна}_T} = \frac{I_{O-T}}{4 \cdot OT^2}, \quad (3.46)$$

од којшто се гледа дека средната сферна осветленост не зависи од димензиите на малата сфера околу набљудуваната точка.

Доколку точката T е осветлена од n точкести извори, поставени во точките O_1, O_2, \dots, O_n , резултантната средна сферна осветленост во точката T е еднаква на сумата на средните сферни осветлености од одделни извори, т.е. може да се напише:

$$E_{\text{сферна}_T} = \sum_{i=1}^n \frac{I_{O_i-T}}{4 \cdot O_i T^2}. \quad (3.47)$$



Слика 3.13 Скица за дефиниција на средната сферна осветленост

Може да се покаже дека средната сферна осветленост е пропорционална на волуменската густина на светлинската енергија [8]. Таа ја определува општата заситеност на просторот со светлина (во набљудуваната точка) и е пропорционална на средната сјајност на околната средина. Поради мошне големата брзина на светлината, во практичните случаи волуменската густина на светлинската енергија е многу мала. Така, на пример, на површината на нашата планета, во просторот изложен на директно сончево зрачење, волуменската густина на светлинска енергија е од ред на големина $10^{-4} \text{ lm}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ [8]. Сосема е разбирливо дека при вештачко осветление таа енергија,

најчесто, е уште помала. Затоа, поподобно е наместо волуменската густина на светлинската енергија да се користи средната сферна осветленост.

Заслужува да биде нагласено дека средната сферна осветленост, како скаларна големина, не зависи од насоката од која доаѓаат светлинските зраци. Поради тоа, многу често, средната сферна осветленост се нарекува и *скалар на осветленоста*.

Векторот на осветленоста и скаларот на осветленоста можат да послужат за оценка на постоењето на сенките. За илустрација на претходното ќе се послужиме со примерот 3.11.

Пример 3.11

Набљудуваме сфера со радиус R чијшто центар е во точката A . На површината на сферата се поставени $2n$ светлински извори. Светлинските извори се распределени по површината на сферата така што постојат n чифтови извори. Изворите од еден чифт се поставени во крајните точки на еден дијаметар на сферата. Во правец кон центарот на сферата, секој од изворите зрачи светлина со еднаква светлинска јачина I . Да се пресметаат векторот на осветленоста и средната сферна осветленост во точката A за два случаја: 1) кога точката A е осветлена од сите извори и 2) кога точката A е осветлена само од еден произволно одбран извор.

Во првиот случај, векторот на осветленоста претставува збир на векторите на осветленоста од секој извор одделно. Да ги пресметаме векторите на осветленоста од два извора коишто образуваат еден чифт. Интензитетите на векторите на осветленоста од овие извори ќе бидат меѓусебно еднакви и ќе изнесуваат I/R^2 . Но, со оглед на фактот што овие два вектора имаат спротивни насоки, нивната сума ќе биде еднаква на нула. Бидејќи од секој чифт извори векторот на осветленоста во точката A е еднаков на нула, во таа точка ќе биде еднаков на нула и векторот на осветленоста од сите извори.

Средната сферна осветленост во точката A , кога таа е осветлена од сите извори, е:

$$E_{\text{сферна } A} = \sum_{i=1}^{2n} \frac{I}{4 \cdot R^2} = \frac{I}{4 \cdot R^2} \cdot 2n = \frac{n}{2} \cdot \frac{I}{R^2}.$$

Во вториот случај, кога точката A е осветлена само од еден произволно одбран извор, интензитетот на векторот на осветленоста и средната сферна осветленост ќе бидат, соодветно:

$$E_{\text{вектор } A} = \frac{I}{R^2} \quad \text{и} \quad E_{\text{сферна } A} = \frac{I}{4 \cdot R^2}.$$

Во првиот случај од примерот 3.11 односот помеѓу векторот на осветленоста и скаларот на осветленоста е еднаков на нула, додека во вториот случај тој однос е еднаков на четири. Всушност тоа се граничните вредности што овој однос може да ги има за било која точка во просторот. Од искуството е познато дека ако еден предмет е осветлен со голем број извори рамномерно распоредени околу него, таквиот систем на осветление нема да создава сенки. Спротивно на тоа, ако истиот предмет е осветлен само со еден точкаст извор, ќе постои една сенка со остри граници. Со оглед на тоа што постоењето на сенките има големо влијание при создавање тридимензионална претстава за предметите, за постоењето на сенките и за нивниот интензитет треба да се води сметка при проектирањето на системите за осветление.

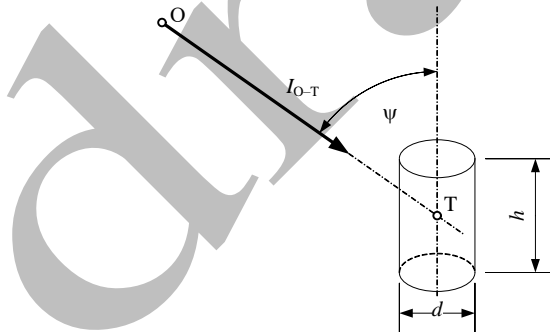
3.9.5 Средна цилиндрична осветленост

Средната цилиндрична осветленост во една точка се дефинира како средна осветленост на обвивката на мал вертикален цилиндер со средиште во таа точка. Притоа, висината на цилиндерот и дијаметарот на неговата основа се многу мали во споредба со димензиите на осветлуваниот простор.

Да ја определеме средната цилиндрична осветленост од еден точкаст светлински извор. Нека изворот е во точката O и неговата светлинска јачина во правецот на којшто се наоѓа набљудуваната точка T нека е I_{O-T} (слика 3.14). Околу точката T замислуваме мал прав цилиндер со: дијаметар на основата d , висина h и вертикална надолжна оска. Замислуваме две рамнини што ја содржат надолжната оска на цилиндерот. На првата лежи точката O . Втората е нормална на првата и го сече цилиндерот. Пресекот е правоаголник со димензии $d \times h$. Со оглед на малите димензии на правоаголникот, може со прифатлива точност да се претпостави дека средната осветленост на површината на правоаголникот е еднаква на вертикалната осветленост во точката T , сметана како точка од рамнината на правоаголникот. Во тие услови, флуксот што паѓа на обвивката на цилиндерот е еднаков со флуксот што би паднал на правоаголникот и може да се пресмета како производ на средната осветленост на правоаголникот и неговата плоштина, т.е.

$$\Phi_{\text{обвивка на цил.}} = E_T \cdot S_{\text{правоаголник}} = \frac{I_{O-T} \cdot \cos(90^\circ - \psi)}{OT^2} \cdot d \cdot h = \frac{I_{O-T} \cdot d \cdot h}{OT^2} \cdot \sin \psi,$$

каде што со ψ е означен аголот помеѓу правата $O-T$ и вертикалата.



Слика 3.14 Скица за дефиниција на средната цилиндрична осветленост

Во согласност со дефиницијата, средната цилиндрична осветленост во точката T , од точкастиот светлински извор поставен во точката O , ќе се пресмета како количник помеѓу флуксот што паѓа на обвивката на малиот замислен цилиндер и плоштината на таа обвивка, т.е.

$$E_{\text{цил.Т}} = \frac{\Phi_{\text{обвивка на цил.}}}{S_{\text{обвивка на цил.}}} = \frac{I_{O-T} \cdot d \cdot h \cdot \sin \psi}{OT^2} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d \cdot h} = \frac{I_{O-T}}{\pi \cdot OT^2} \cdot \sin \psi. \quad (3.48)$$

Доколку точката Т е осветлена од n точкasti извори, поставени во точките O_1, O_2, \dots, O_n , резултантната средна цилиндрична осветленост во точката Т е еднаква на сумата на средните цилиндрични осветлености од одделни извори, т.е. може да се напише:

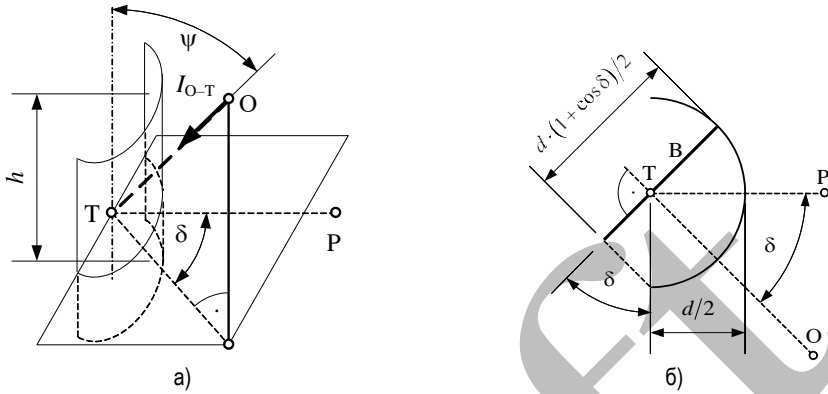
$$E_{\text{цил.Т}} = \sum_{i=1}^n \frac{I_{O_i-T}}{\pi \cdot O_i T^2} \cdot \sin \psi_i.$$

Средната цилиндрична осветленост може да послужи како оценка на заситеност на просторот со светлина во услови кога предност му се дава на хоризонталниот правец на набљудување. Таков случај имаме кај музеи, предавални, театри, фоајеа и слични простории.

3.9.6 Средна полуцилиндрична осветленост

Нека од точката Р се набљудува точката Т (3.15.а). Замислуваме мал вертикален полуцилиндр така што точката Т да биде на средината на надолжната оска на цилиндерот чиј дел е вертикалниот полуцилиндр. Притоа, положбата на вертикалниот полуцилиндр се избира така што вертикалната рамнина низ точката Р да биде рамнина на симетрија на вертикалниот полуцилиндр. Средната полуцилиндрична осветленост во точката Т, набљудувана од точката Р, се дефинира како средна осветленост на површината на обвивката на мал вертикален полуцилиндр, поставен на опишаниот начин.

Да ја определеме средната полуцилиндрична осветленост што точкаст светлински извор поставен во точката О ја создава во точката Т, набљудувана од точката Р (слика 3.15.а). Поставуваме две вертикални рамнини. Едната е низ точките О и Т, а другата низ точките Р и Т. Пресекот на овие две вертикални рамнини е оската на мал вертикален цилиндер со средиште во точката Т. Аголот помеѓу тие две рамнини го означуваме со δ . Со рамнина која минува низ оската на цилиндерот и е нормална на вертикалната рамнина што минува низ точките Р и Т, го разделуваме вертикалниот цилиндер на два полуцилиндра. Меродавен за натамошни пресметки е оној од полуцилиндриците кој е поблиску до точката Р.



Слика 3.15 Скица за дефиниција на полуцилиндричната осветленост

Меродавниот полуцилиндер го проектираме врз вертикална рамнина што е нормална на рамнина што минува низ точките О и Т. Проекцијата претставува правоаголник со висина h и основа $d \cdot (1 + \cos \delta) / 2$. Овој правоаголник ќе го означиме со В, а неговата плоштина со S_B (слика 3.15.б). Флуксот што паѓа на правоаголникот В е еднаков на флуксот што паѓа на обвивката на полуцилиндерот. Со оглед на малите димензии на полуцилиндерот, средната осветленост на површината на правоаголникот В може да се смета дека е еднаква на осветленоста во точката Т, сметана како точка од рамнината на правоаголникот. Според тоа, флуксот што паѓа на обвивката од полуцилиндерот е:

$$\Phi_{\text{пол.цил.}} = E_T \cdot S_B = \frac{I_{O-T} \cdot \cos(90^\circ - \psi)}{OT^2} \cdot \frac{d \cdot h \cdot (1 + \cos \delta)}{2} = \frac{I_{O-T} \cdot d \cdot h \cdot (1 + \cos \delta)}{2 \cdot OT^2} \cdot \sin \psi.$$

Плоштината на обвивката на полуцилиндерот е $\pi \cdot d \cdot h / 2$.

Делејќи го флуксот што паѓа на обвивката на полуцилиндерот со нејзината плоштина, за средната полуцилиндрична осветленост во точката Т се добива:

$$E_{\text{полуцил.Т}} = \frac{I_{O-T}}{\pi \cdot OT^2} \cdot \sin \psi \cdot (1 + \cos \delta) = E_{\text{цил.}} \cdot (1 + \cos \delta) = \frac{E_{\text{верт.}}}{\pi} \cdot (1 + \cos \delta), \quad (3.49)$$

каде што со $E_{\text{верт.}}$ е означена осветленоста на точката Т, сметана како точка на површината на правоаголникот В.

Врз основа на (3.49) може да се заклучи дека полуцилиндричната осветленост ќе има максимална вредност ако точката на набљудување Р и светлинскиот извор О лежат во иста вертикална рамнина ($\delta = 0$). Ако аголот δ е еднаков на 90° средната полуцилиндрична осветленост ќе биде еднаква на средната цилиндрична осветленост,

додека најмалата вредност на средната полуцилиндрична осветленост ќе биде еднаква на нула и таа се јавува во случаите кога аголот δ е еднаков на 180° .

Односот на вертикалната осветленост и полуцилиндричната осветленост во определена точка од просторот, дефиниран со (3.49), може да послужи како мерка за можност за распознавање на ликови при осветление на надворешни простори.

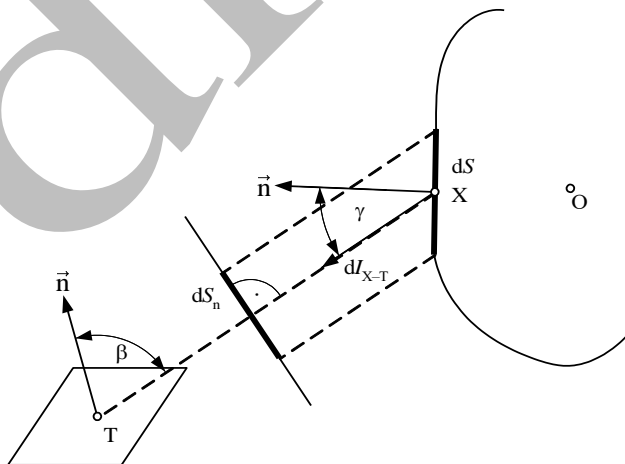
Средната полуцилиндрична осветленост во една точка, осветлена од повеќе точкести извори, се пресметува како аритметичка сума на средните полуцилиндрични осветлености што им соодветствуваат на одделни извори.

3.10 Осветленост од светлински извори со конечни димензии

3.10.1 Општо

Во претходното потпоглавје беа прикажани начините за пресметка на осветленоста кога изворите можат да се сметаат за точкести. Во праксата постојат голем број случаи кога претходната претпоставка не е исполнета. Во таквите случаи, површината на светлинскиот извор се дели на елементарни површини чиешто димензии дозволуваат секоја од нив да може да се смета како точкест извор (во однос на растојанието до набљудуваната точка). Да ја пресметаме осветленоста во точката T што ја создава изворот со оптички центар во точката O (слика 3.16), којшто не може да се смета за точкест. На површината на изворот набљудуваме една елементарна површина со средиште во точката X , плоштина dS и сјајност L . Претпоставуваме дека точката T лежи на рамнината чија што нормала зафаќа агол β со правецот $X-T$. Врз основа на (3.22), за светлинската јачина на елементарната површина на светлинскиот извор во правец кон точката T , може да се напише:

$$dI_{X-T} = L \cdot dS_n \cdot \cos^3 \gamma \quad (3.50)$$



Слика 3.16 Скица за пресметка на осветленост во точка од извор со конечни димензии

Од (3.37) и (3.50), за осветленоста во точката Т од елементарната светлечка површина со центар во точката Х се добива:

$$dE_T = L \cdot \cos \beta \cdot \frac{dS_n}{XT^2}. \quad (3.51)$$

Според (3.16), просторниот агол под кој од точката Т се гледа елементарната светлечка површина, со центар во точката Х, е еднаков на:

$$d\Omega = \frac{dS_n}{XT^2}. \quad (3.52)$$

Врз основа на (3.51) и (3.52), за осветленоста во точката Т од множеството елементарни површини на светлинскиот извор следува:

$$E_T = \int_S L \cdot \cos \beta \cdot d\Omega, \quad (3.53)$$

каде што доменот на интеграција S претставува делот од површината на изворот што е видлив од точката во која што се пресметува осветленоста. Да забележиме дека ако изворот е униформно дифузен, (3.53) го добива обликот:

$$E_T = L \cdot \int_S \cos \beta \cdot d\Omega. \quad (3.54)$$

Доколку повеќе извори, коишто не можат да се сметаат за точки, ја осветлуваат точката Т, за пресметката на осветленоста може да се користи (3.53), односно (3.54), при што доменот на интеграцијата треба да ги опфати површините на сите извори (примарни и секундарни) од коишто светлината доаѓа до точката Т.

На сличен начин се доаѓа до изразите за векторот на осветленост, средната сферна, средната цилиндрична и средната полуцилиндрична осветленост во набљудуваната точка, осветлена од извори коишто не можат да се сметаат за точки:

$$\begin{aligned} |E_{\text{вектор}_T}| &= \int_S L \cdot d\Omega; & E_{\text{сферна}_T} &= \frac{1}{4} \cdot \int_S L \cdot d\Omega; & E_{\text{цил}_T} &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_S L \cdot \sin \psi \cdot d\Omega & \text{ и} \\ E_{\text{полуцил}_T} &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_S L \cdot \sin \psi \cdot (1 + \cos \delta) \cdot d\Omega. \end{aligned} \quad (3.55)$$

Аглите ψ и δ од (3.55) се дефинирани на сликите 3.14 и 3.15.

Ако деловите на површината на еден извор, видливи од набљудуваната точка, имаат еднакви сјајности, формулите (3.55) можат да се поедностават:

$$\begin{aligned} |E_{\text{вектор}_T}| &= L \cdot \Omega; & E_{\text{сферна}_T} &= \frac{1}{4} \cdot L \cdot \Omega; & E_{\text{цил}_T} &= \frac{L}{\pi} \cdot \int_S \sin \psi \cdot d\Omega & \text{ и} \\ E_{\text{полуцил}_T} &= \frac{L}{\pi} \cdot \int_S \sin \psi \cdot (1 + \cos \delta) \cdot d\Omega, \end{aligned} \quad (3.56)$$

каде што со Ω е означен просторниот агол под којшто изворот се гледа од точката Т.

Пресметката на осветленоста со помош на (3.53) и (3.55), односно (3.54) и (3.56), важи како за случаите кога светлинските извори се светилки така и во случаите кога изворите претставуваат површини коишто одбиваат или пропуштаат светлина. На тој начин, при пресметките на осветленост во затворени простори, може да се пресмета влијанието на граничните површини врз осветленоста.

3.10.2 Пресметка на осветленост од рамни дифузни светлечки површини

Често се користат светлински извори во вид на рамни светлечки површини коишто во сите правци имаат еднакви сјајности. Во тие случаи формулите (3.54) и (3.56) можат значително да се упростат.

Набљудуваме дифузна светлечка површина во вид на триаголник ABC со произволно долги страници (слика 3.17.a).

Рамнината на триаголникот е паралелна со осветлуваната рамнина и е на растојание h од неа. Да ја пресметаме осветленоста во точката T којашто е пресечна точка на нормалата на триаголникот во неговото теме C и осветлуваната рамнина. На површината од триаголникот дефинираме елементарна површина со центар во точката X којашто се наоѓа на растојание x од темето C и претставува дел од елементарниот аголен сегмент со должина r и агол на отворот $d\xi$. Осветленоста во точката T од елементарната површина е:

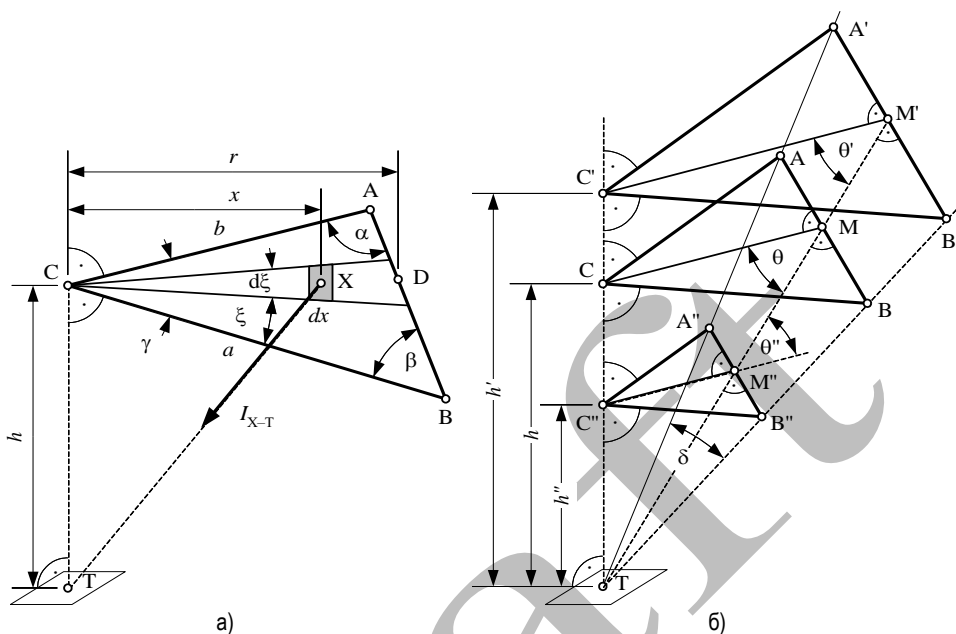
$$dE_T = \frac{I_{X-T}}{XT^2} \cdot \cos(\angle CTX) = \frac{I_{X-T}}{h^2 + x^2} \cdot \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}}. \quad (3.57)$$

Со оглед на тоа што површината зрачи според Ламбертовиот закон, за светлинската јачина на елементарната површина во правец кон точката T може да се напише:

$$I_{X-T} = L \cdot dS \cdot \cos(\angle CTX) = \frac{L \cdot dS \cdot h}{\sqrt{h^2 + x^2}}, \quad (3.58)$$

каде што со dS е означена плоштината на елементарната површина и таа е:

$$dS = dx \cdot x \cdot d\xi. \quad (3.59)$$



Слика 3.17 Скица за пресметката на осветленост во точка од униформно дифузен триаголник којшто е паралелен на осветлуваната рамнина

Врз основа на (3.58) и (3.59), равенката (3.57) може да се напише во обликот:

$$dE_T = L \cdot h^2 \cdot \frac{x}{(x^2 + h^2)^2} \cdot dx \cdot d\xi. \quad (3.60)$$

Осветленоста во точката Т од сите елементи на триаголникот ќе ја пресметаме ако десната страна од (3.60) ја интегрираме по x во границите од 0 до r и по аголот ξ во границите од 0 до γ , т.е.

$$E_T = \frac{L \cdot h^2}{2} \cdot \int_0^\gamma \int_0^r \frac{2 \cdot x}{(x^2 + h^2)^2} \cdot dx \cdot d\xi = \frac{L}{2} \cdot \int_0^\gamma \frac{r^2}{r^2 + h^2} \cdot d\xi. \quad (3.61)$$

Од синусната теорема за триаголникот ACD се добива:

$$r^2 = \left(\frac{\overline{AC} \cdot \sin \alpha}{\sin(\beta + \xi)} \right)^2 = \frac{b^2 \cdot \sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta + \xi)} = b^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot [1 + \text{ctg}^2(\beta + \xi)]. \quad (3.62)$$

Од (3.61) и (3.62), по средувањето, се добива:

$$E_T = \frac{L}{2} \cdot b \cdot \sin \alpha \cdot \int_0^\gamma \frac{b \cdot \sin \alpha / \sin^2 (\beta + \xi)}{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot [1 + \operatorname{ctg}^2 (\beta + \xi)]} \cdot d\xi. \quad (3.63)$$

Интегралот од (3.63) ќе го решиме со воведување на смената:

$$y = b \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} (\beta + \xi),$$

при што интеграцијата ќе се изведува во границите од $y_1 = b \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta$ до $y_2 = b \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} (\beta + \gamma)$.

Бидејќи е:

$$dy = \frac{-b \cdot \sin \alpha}{\sin^2 (\beta + \xi)} \cdot d\xi,$$

решението на интегралот од (3.63) ќе биде:

$$\begin{aligned} \int_{y_1}^{y_2} \frac{-dy}{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha + y^2} &= -\frac{1}{\sqrt{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{y}{\sqrt{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right) \Big|_{y_1}^{y_2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \cdot \left[\operatorname{arctg} \frac{b \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta}{\sqrt{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha}} - \operatorname{arctg} \frac{b \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} (\beta + \gamma)}{\sqrt{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right]. \end{aligned}$$

Според тоа, за осветленоста во точката Т се добива:

$$E_T = \frac{L \cdot b \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \sqrt{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \cdot \left[\operatorname{arctg} \frac{b \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta}{\sqrt{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha}} - \operatorname{arctg} \frac{b \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} (\beta + \gamma)}{\sqrt{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right]. \quad (3.64)$$

Од (3.64) е очигледно дека осветленоста во точката Т е директно пропорционална на сјајноста на изворот и зависи од меѓусебната положба на изворот и точката Т.

Равенката (3.64) може да се поедностави на следниот начин. Низ правата на која лежи отсечката \overline{CT} (слика 3.17.6) поставуваме рамнина нормална на правата на која лежи отсечката \overline{AB} и нивната пресечна точка ја означуваме со М. Значи, триаголниците АСМ, ВСМ, АМТ и ВМТ се правоаголници и користејќи ги ознаките од сликите 3.17.а и 3.17.6, можат да се напишат следниве равенства:

$$b \cdot \sin \alpha = \overline{CM}, \quad \operatorname{ctg} \beta = \frac{\overline{BM}}{\overline{CM}}, \quad -\operatorname{ctg} (\beta + \gamma) = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\overline{AM}}{\overline{CM}} \quad \text{и}$$

$$\overline{TM} = \sqrt{h^2 + \overline{CM}^2} = \sqrt{h^2 + b^2 \cdot \sin^2 \alpha},$$

по чијашто замена во (3.64), за осветленоста во точката Т се добива:

$$E_T = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{\overline{CM}}{\overline{TM}} \cdot \left(\arctg \frac{\overline{BM}}{\overline{TM}} + \arctg \frac{\overline{AM}}{\overline{TM}} \right) = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \delta \cdot \cos \theta, \quad (3.65)$$

каде што аголот δ се изразува во радијани.

Од (3.65) се гледа дека осветленоста во точката Т е директно пропорционална на сјајноста на површината и зависи од аглиите δ и θ . На сликата 3.17.6, покрај триаголникот АВС, се нацртани триаголниците А'В'С' и А"В"С" чиешто површини се паралелни на површината на триаголникот АВС, а нивните темиња лежат на правите коишто поминуваат низ точката Т и темињата на триаголникот АВС. Бидејќи аглиите θ , θ' и θ'' имаат паралелни краци, тие се меѓусебно еднакви. Поради тоа, осветленостите што триаголниците прикажани на сликата 3.17.6 ги создаваат во точката Т ќе бидат еднакви доколку се еднакви сјајностите на нивните површини.

Триаголниците АВС, А'В'С' и А"В"С" (прикажани на сликата 3.17.6) се гледаат од точката Т под ист просторен агол. Според тоа, може да се заклучи дека сите триаголници со сјајност L , коишто ги исполнуваат условите од сликата 3.17.6 (паралелни на осветлуваната рамнина, зафаќаат еднакви просторни аголи во однос на точката Т и едно од нивните темиња лежи на нормалата на осветлуваната рамнина во точката Т), ќе создаваат еднакви осветлености во точката Т.

Лесно може да се покаже дека триаголниците од сликата 3.17.6 и не мора да го исполнуваат условот за паралелност со осветлуваната рамнина. За ова да го докажеме ќе претпоставиме дека триаголникот А'В'С' (од сликата 3.17.6) не е паралелен на триаголникот АВС и осветлуваната рамнина. Овој случај е прикажан на сликата 3.18. Триаголниците АВС и А'В'С' се униформно дифузни површини со еднакви сјајности. На површините на двата триаголника дефинираме елементарни површини. Нека елементарната површина со плоштина dS (прв елемент) од триаголникот АВС и елементарната површина со плоштина dS' (втор елемент) од триаголникот А'В'С' се гледаат од точката Т под ист елементарен просторен агол. Средиштето на првиот елемент е во точката X, а на вториот во X', при што точките X, X' и Т лежат на иста права. Плоштината на проекцијата на првиот елемент врз рамнина нормална на правецот X–Т е dS_n , а на вториот е dS'_n .

Од (3.52) за елементарните просторни агли под коишто од точката Т се набљудуваат првиот и вториот елемент можеме да напишеме:

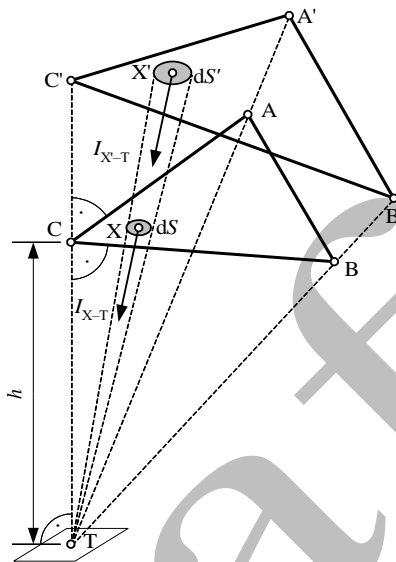
$$d\Omega = \frac{dS_n}{XT^2} \quad \text{и} \quad d\Omega' = \frac{dS'_n}{X'T^2}. \quad (3.66)$$

Врз основа на (3.51) и (3.66), осветленостите во точката Т од првиот и вториот елемент се:

$$dE_T = \frac{L \cdot dS_n \cdot \cos(\angle CTX)}{XT^2} = L \cdot \cos(\angle CTX) \cdot d\Omega \quad (3.67)$$

и

$$dE'_T = \frac{L \cdot dS'_n \cdot \cos(\angle C'TX')}{\overline{X'T}^2} = L \cdot \cos(\angle C'TX') \cdot d\Omega' . \quad (3.68)$$



Слика 3.18 Скица за пресметката на осветленост во точка од униформно дифузен триаголник којшто не е паралелен со осветлуваната рамнина

Бидејќи просторните агли $d\Omega$ и $d\Omega'$ се еднакви, а еднакви се и аглите $\angle C'TX$ и $\angle C'TX'$, од (3.67) и (3.68) произлегува дека еднакви ќе бидат и осветленостите dE_T и dE'_T , т.е. при еднакви сјајности, првиот и вториот елемент создаваат еднакви осветлености во точката T.

Заклучокот за осветленостите од елементите на униформно дифузни рамни светлечки површини може да се прошири и на површини со конечни димензии. Врз основа на (3.67) и (3.68), за осветленостите што триаголниците ABC и A'B'C' ги создаваат во точката T може да се напише:

$$E_T = \int_{\Omega} L \cdot \cos(\angle C'TX) \cdot d\Omega \quad (3.69)$$

и

$$E'_T = \int_{\Omega} L \cdot \cos(\angle C'TX') \cdot d\Omega , \quad (3.70)$$

каде што со Ω е означен просторниот агол под којшто од точката T се гледаат триаголниците ABC и A'B'C'. Бидејќи подинтегралните функции од (3.69) и (3.70) се еднакви, еднакви ќе бидат и осветленостите што двата триаголника ги создаваат во точката T.

Равенката (3.65) може да се искористи и за случајот кога не е исполнет условот едно од темињата на триаголникот да лежи на нормалата на осветлуваната површина во точката Т.

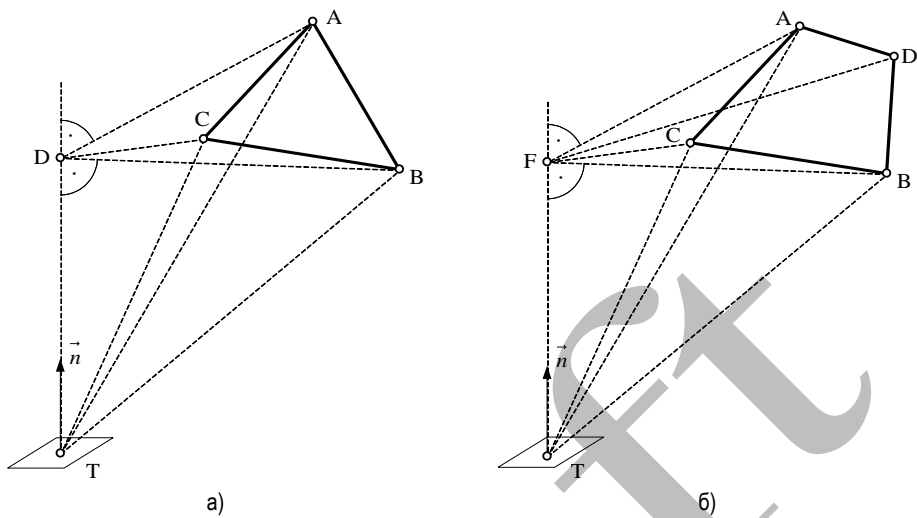
Да го разгледаме случајот кога претходниот услов не е исполнет (слика 3.19.а). Заради поедноставување на објаснувањето ќе претпоставиме дека рамнината на којашто и припаѓа триаголникот ABC е паралелна на осветлуваната. Нормалата на осветлуваната површина во точката Т ја пробива рамнината во којашто лежи светлечкиот триаголник во точката D. Осветленоста на точката Т ќе ја пресметаме со суперпозиција на осветленостите што во точката Т би ги создале замислените светлечки триаголници DAB, DAC и DBC, чишто сјајности се еднакви на сјајноста на триаголникот ABC. Притоа, осветленостите од триаголниците DAC и DBC се земаат со негативен предзнак, т.е.

$$E_T = E_{T(ABC)} = E_{T(DAB)} - E_{T(DAC)} - E_{T(DBC)}. \quad (3.71)$$

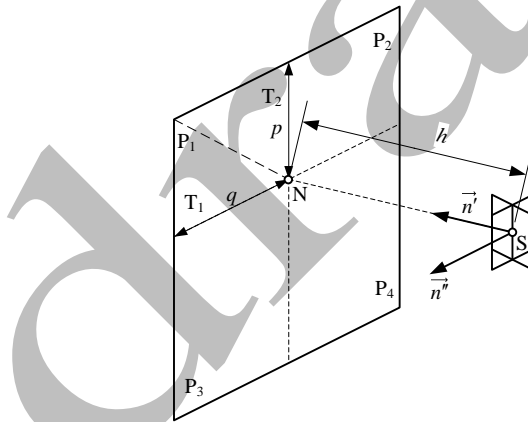
Принципот на суперпозиција може да се примени и за пресметка на осветленост во точка ако таа е осветлена со светлечка површина во облик на многуаголник. Претходното ќе го илустрираме со случајот кога светлечката површина е во вид на четириаголник и е поставена паралелно на осветлуваната рамнина во којашто се набљудува точката Т (слика 3.19.б). За да ја пресметаме осветленоста во точката Т, четириаголникот ABCD ќе го поделиме на два триаголника: ABC и ABD. Врз основа на (3.71), за осветленоста во точката Т може да се напише:

$$\begin{aligned} E_T &= E_{T(ABCD)} = E_{T(ABC)} + E_{T(ABD)} \\ &= E_{T(FAB)} - E_{T(FAC)} - E_{T(FBC)} + E_{T(FAD)} + E_{T(FBD)} - E_{T(FAB)} \\ &= E_{T(FAD)} + E_{T(FBD)} - E_{T(FAC)} - E_{T(FBC)}. \end{aligned}$$

Во праксата често треба да се пресмета осветленост во точки од рамнина којашто е паралелна или нормална на униформно дифузна светлечка површина во вид на правоаголник со сјајност L (слика 3.20). Точката на осветлуваната рамнина во којашто треба да се пресмета осветленоста е означена со S, а нејзината проекција врз светлечката површина е означена со N. Низ точката N повлекуваме две заемно нормални прави коишто се паралелни со страните на светлечкиот правоаголник. Овие прави го делат правоаголникот на четири помали правоаголници, коишто на сликата 3.20 се означени со P₁, P₂, P₃ и P₄.



Слика 3.19 Скица за пресметка на осветленост од рамни униформно дифузни површини поставени произволно во однос на точката T



Слика 3.20 Скица за пресметка на осветленост во точка од униформно дифузен правоаголник

Во првиот случај, кога осветлуваната рамнина е паралелна на светлечката површина, осветленоста во точката S се пресметува со суперпозиција на осветленостите од четирите правоаголници. Во вториот случај, кога осветлуваната рамнина е нормална на светлечката површина, правоаголниците P_2 и P_4 се наоѓаат зад осветлуваната рамнина, поради што осветленоста во точката S ќе се пресмета сметајќи само со правоаголниците P_1 и P_3 .

Осветленоста што правоаголникот P_1 ја создава во точката S можеме да ја пресметаме ако овој правоаголник го поделиме на правоаголните триаголници T_1 и T_2 . На сличен начин можат да се поделат и останатите правоаголници.

Врз основа на ознаките од сликата 3.20 и равенката (3.64), односно (3.65), во случајот кога осветлуваната површина е паралелна со светлечката површина, светлечкиот правоаголник P_1 (односно светлечките триаголници T_1 и T_2) создава во точката S осветленост:

$$E'_{S(P_1)} = \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{q}{\sqrt{q^2 + h^2}} \cdot \arctg \frac{p}{\sqrt{q^2 + h^2}} + \frac{p}{\sqrt{p^2 + h^2}} \cdot \arctg \frac{q}{\sqrt{p^2 + h^2}} \right).$$

Со аналогна постапка може да се покаже дека во случајот кога осветлуваната површина е нормална на светлечкиот правоаголник, за осветленоста во точката S се добива:

$$E''_{S(P_1)} = \frac{L}{2} \cdot \left(\arctg \frac{p}{h} - \frac{h}{\sqrt{q^2 + h^2}} \cdot \arctg \frac{p}{\sqrt{q^2 + h^2}} \right).$$

Осветленостите од останатите светлечки правоаголници од сликата 3.20 можат да се пресметаат на аналоген начин како и за правоаголникот P_1 .

На крајот, да го разгледаме случајот кога светлечката површина е униформно дифузен диск со сјајност L . Пресметката на осветленост во определена точка се изведува на сличен начин како и во случајот на светлечки триаголник. Нека светлечкиот диск со радиус R е поставен паралелно на рамнината што ја осветлува и на растојание h од неа, како што е прикажано на сликата 3.21.a. Да ја пресметаме осветленоста во точката T којашто е пресечна точка на нормалата на дискот во неговиот центар и осветлуваната рамнина.

Дискот ќе го разделиме на елементарни кружни исечоци. Еден таков исечок (исечокот AOB) е прикажан на сликата 3.21.a. Сметајќи го елементарниот кружен исечок за триаголник, осветленоста што тој ја создава во точката T ќе ја пресметаме со (3.65). Така добиваме:

$$dE_T = \frac{L}{2} \cdot \cos \theta \cdot d\delta.$$

Бидејќи е:

$$\cos \theta = \frac{R}{\sqrt{h^2 + R^2}} \quad \text{и} \quad d\delta = \frac{dl}{\sqrt{h^2 + R^2}},$$

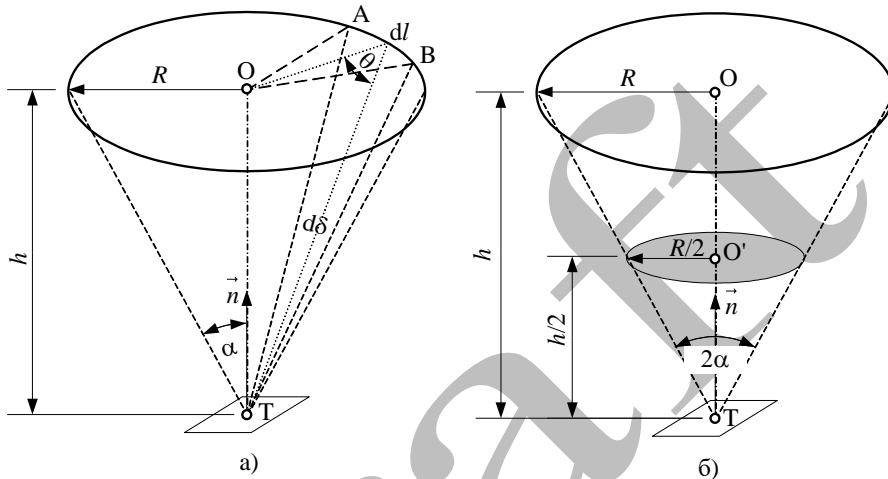
за осветленоста на точката T од целиот диск следува:

$$E_T = \frac{L}{2} \cdot \frac{R}{h^2 + R^2} \cdot \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\pi \cdot L \cdot R^2}{h^2 + R^2}, \quad (3.72)$$

т.е.

$$E_T = \frac{\pi \cdot L}{1 + \left(\frac{h}{R}\right)^2} = \frac{\pi \cdot L}{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha} = \pi \cdot L \cdot \sin^2 \alpha, \quad (3.73)$$

каде што со 2α е означен аголот под којшто од точката Т се гледа дијаметарот на дискот.



Слика 3.21 Скица за пресметка на осветленост во точка од униформно дифузен диск

Како што може да се констатира од (3.73), осветленоста во набљудуваната точка Т е пропорционална на сјајноста на светлечката површина и зависи од односот h/R . Од таа равенка лесно може да се утврди колкав треба да биде радиусот на дискот ако неговото растојание од точката Т се смени, а при тоа осветленоста во точката Т да не се смени. За илустрација, ако се со еднакви сјајности, дискот со радиус $R/2$ и на растојание $h/2$ (прикажан како засенчена површина на сликата 3.21.б) создава еднаква осветленост како и дискот со радиус R и на растојание h , бидејќи кај двата диска се еднакви односите помеѓу висината над осветлуваната рамнина и радиусот на дискот.

Претходната констатација може да се формулира и поинаку. Имено, од (3.73) произлегува дека осветленоста во точката Т е пропорционална на сјајноста на дискот и квадратот на синусот од полу-аголот при врвот на конусот чиешто теме е во Т и чијашто основа е дискот. Всушност, сите кружни светлечки површини со еднакви сјајности ќе создаваат во точката Т еднакви осветлености доколку претставуваат основи на прави конуси со врв во точката Т, при што оските на конусите се поклопуваат и нивните агли при врвовите се еднакви.

Натаму, со аналогно расудување не е тешко да се покаже дека, независно од нивниот облик, големина и меѓусебна положба, сите рамни униформно дифузни површини со еднакви сјајности ќе создаваат еднакви осветлености во една точка доколку од таа точка сите тие површини се гледаат под ист просторен агол.

Освен тоа, во [8] е покажано дека за пресметка на осветленост во произволна точка Т, која лежи во рамнина паралелна на униформно дифузен диск, може да се користи равенка формално еднаква на (3.73). Во таа равенка со α е означена половина од аголот под кој од точката Т се гледа дијаметарот на дискот, што лежи во истата симетрална рамнина на дискот како и точката Т (како што е прикажано на сликата 3.22).

Пример 3.12

Униформно дифузен диск е со радиус $R = 1,6$ m. Точката Т се наоѓа во пресекот на рамнина паралелна на рамнината на дискот и нормалата на дискот во неговиот центар (како на сликата 3.21.а). Растојанието од точката Т до центарот на дискот е $h = 1,2$ m. Колкава грешка се прави ако при пресметка на осветленоста во точката Т дискот се смета за точкаст извор? Колкав треба да е односот h/R за осветленоста што се добива сметајќи го дискот за точкаст извор се разликува за најмногу еден процент од осветленоста добиена не сметајќи го дискот за точкаст извор?

Најнапред да ја пресметаме осветленоста во точката Т ако униформно дифузниот диск се смета за точкаст извор поставен на местото на центарот на дискот. Врз основа на дефиницијата за сјајност, светлинската јачина во правец на нормалата на површината на дискот е:

$$I_0 = \pi \cdot L \cdot R^2 .$$

Во тој случај, според (3.37), за осветленоста во точката Т следува:

$$E'_T = \frac{I_0}{h^2} = \frac{\pi \cdot L \cdot R^2}{h^2} .$$

Но, ако униформно дифузниот диск не се смета за точкаст извор, со помош на (3.72), за осветленоста на точката Т се добива:

$$E_T = \frac{\pi \cdot L \cdot R^2}{h^2 + R^2} ,$$

што може да се смета за точна вредност на осветленоста во точката Т.

Според тоа, кога при пресметка на осветленост во точката Т униформно дифузниот диск се смета за точкаст извор се прави релативна грешка:

$$\frac{E'_T - E_T}{E_T} = \left(\frac{R}{h} \right)^2 = \left(\frac{0,8}{1,2} \right)^2 = 0,44 .$$

Добиениот резултат укажува дека грешката не е мала.

Релативната грешка нема да биде поголема од 1% доколку растојанието h ја задоволува релацијата:

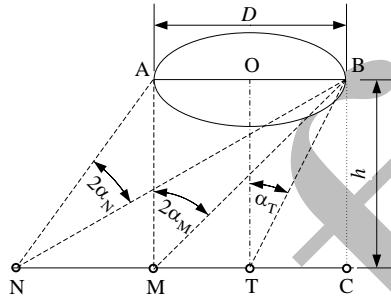
$$\left(\frac{R}{h} \right)^2 \leq 0,01 ,$$

од која што следува $h \geq 10 \cdot R$, т.е. $h \geq 5 \cdot D$, каде со D е означен дијаметарот на дискот.

Може да се констатира дека ваквиот резултат е во согласност со изнесеното во потпоглавјето 3.6.

Пример 3.13

Униформно дифузен диск е со дијаметар $D = 2$ m и сјајност $L = 1000$ cd/m². Осветлуваната рамнина е паралелна на рамнината на дискот. Растојанието помеѓу овие две рамнини е $h = 2,5$ m. Проекцијата на центарот на дискот врз осветлуваната рамнина е означена со Т. Точките М и N се на осветлуваната рамнина. Тие лежат на истата права на која лежи и точката Т (слика 3.22), при што е: $\overline{MT} = 1$ m и $\overline{NT} = 2,5$ m. Да се пресмета осветленоста во точките М, N и Т. При пресметките да се занемари светлина одбиена од осветлуваната рамнина.



Слика 3.22 Скица за примерот 3.13

Осветленоста во точката Т може да се пресмета со директна примена на (3.72). Така се добива:

$$E_T = \frac{\pi \cdot L \cdot (D/2)^2}{h^2 + (D/2)^2} = \frac{\pi \cdot 1000 \cdot 1^2}{2,5^2 + 1^2} = 433 \text{ lx}.$$

Како што е наведено на крајот од одделот 3.10.2, осветленоста во точката М може да се пресмета со помош на (3.73), при што со 2α е означен аголот под кој од точката М се гледа дијаметарот на дискот. Тоа е оној дијаметар што лежи во истата симетрална рамнина на дискот во која лежи и точката М.

Во конкретниов случај, за да може да се примени (3.73) треба да се определи $\sin^2 \alpha_M$. Од правоаголниот триаголник АМВ (слика 3.22) е:

$$\cos 2\alpha_M = \frac{h}{\sqrt{h^2 + D^2}}$$

и следува:

$$\sin^2 \alpha_M = \frac{1 - \cos 2\alpha_M}{2} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + D^2}} \right).$$

Применувајќи ја (3.73), за осветленоста во точката М добиваме:

$$E_M = \pi \cdot L \cdot \sin^2 \alpha_M = \frac{\pi \cdot L}{2} \cdot \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + D^2}} \right) = \frac{\pi \cdot 1000}{2} \cdot \left(1 - \frac{2,5}{\sqrt{2,5^2 + 2^2}} \right) = 344 \text{ lx}.$$

Аналогно, важи и за точката N. Во овој случај, за определување на аголот $2\alpha_N$ ќе го искористиме равенството:

$$2\alpha_N = \angle ANM - \angle BNC = \arctg \frac{h}{MN} - \arctg \frac{h}{MN + D} .$$

Бидејќи е $\overline{MN} = \overline{NT} - \overline{MT}$ следува:

$$2\alpha_N = \arctg \frac{h}{\overline{NT} - \overline{MT}} - \arctg \frac{h}{\overline{NT} - \overline{MT} + D} = \arctg \frac{2,5}{2,5 - 1} - \arctg \frac{2,5}{2,5 - 1 + 2} = 0,410127 \text{ rad} .$$

Со тоа, применувајќи ја (3.73), за осветленост во точката N се добива:

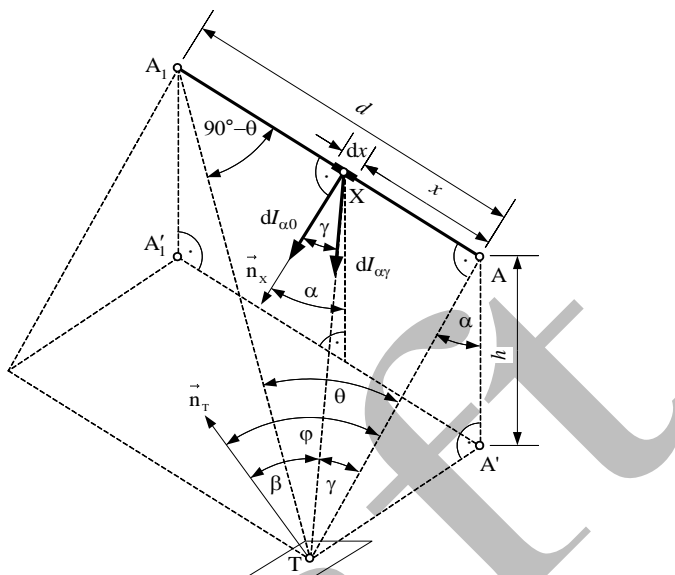
$$E_N = \pi \cdot L \cdot \sin^2 \alpha_N = \pi \cdot 1000 \cdot \sin^2 \left(\frac{0,410127}{2} \right) = 130 \text{ lx} .$$

3.10.3 Пресметка на осветленост од светлечка отсечка

Ако должината на светлинскиот извор е многу поголема од неговите напречни димензии, тој се нарекува *линиски извор*. Кога линискиот извор е прав и со конечна должина, за него се вели дека е во вид на *светлечка отсечка*. Во овој оддел ќе биде изложена постапката за пресметување на осветленоста што во една точка ја создава светлински извор во вид на светлечка отсечка. Притоа растојанието од точката до светлечката отсечка не е многу поголемо од должината на светлечката отсечка.

На сликата 3.23 е прикажана една светлечка отсечка. Крајните точки на светлечката отсечка се означени со A и A₁. Отсечката осветлува произволно поставена рамнина. Потребно е да ја пресметаме осветленоста во точката T од осветлуваната рамнина којашто, заедно со една од крајните точки на отсечката (на сликата 3.23 тоа е точката A), лежи во рамнина нормална на светлечката отсечка.

Изворот во вид на светлечка отсечка не мора да има еднаква распределба на светлинската јачина во сите рамнини што ја содржат отсечката. Една од тие рамнини, којашто ја карактеризира просторната ориентација на изворот (т.е. светилката), се нарекува *рамнина на насочувањето*. На сликата 3.23 рамнината на насочувањето е определена со точките A, A₁ и A'. Најчесто, тоа е рамнината во која светлинската јачина е најголема или пак рамнината во којашто лежи оптичката оска на изворот. За поедноставно дефинирање на положбата на точката T во однос на светлечката отсечка ќе ја дефинираме *помошната рамнина*. Тоа е рамнината што минува низ набљудуваната точка, паралелна е на светлечката отсечка и е нормална на рамнината на насочување. На сликата 3.23 помошната рамнина е определена со точките T, A' и A₁'.



Слика 3.23 Скица за пресметка на осветленост во точка од извор во вид на светлечка отсечка

Меѓусебната положба на точката Т и светлечката отсечка е еднозначно определена ако се познаваат висината h на отсечката над помошната рамнина и аголот α што со рамнината на насочување го зафаќа рамнината дефинирана со светлечката отсечка и точката Т.

Најнапред ќе ја определеме осветленоста што во точката Т ја создава елементот од светлечката отсечка со центар во точката Х и должина dx . Во рамнината ТАА₁, правецот на кој лежат Т и Х зафаќа агол γ со нормалата на светлечката отсечка. Од друга страна, во однос на рамнината на насочувањето, положбата на рамнината ТАА₁ е определена со аголот α . Поради тоа е вообичаено да се зема дека правецот Х–Т е определен со аглие α и γ . Во тој правец светлинскиот извор со елементарна должина ќе зрачи со светлинска јачина којашто ќе ја означуваме $dI_{\alpha\gamma}$. Нормалата на осветлуваната површина со правецот Х–Т зафаќа агол β . Според тоа, елементот dx во точката Т создава осветленост:

$$dE_T = \frac{dI_{\alpha\gamma} \cdot \cos \beta}{XT^2} = \frac{I'_{\alpha\gamma} \cdot \cos \beta}{XT^2} \cdot dx, \quad (3.74)$$

каде што со $I'_{\alpha\gamma}$ е означена светлинската јачина на светлечката отсечка по единица должина во правецот дефиниран со аглие α и γ .

Кај реалните извори на светлина во облик на светлечка отсечка со задоволителна точност може да се земе дека светлинската јачина на отсечката по единица должина во било кој правец е константна по целата должина на отсечката и може да се определи со формулата:

$$I'_{\alpha\gamma} = \frac{I_{\alpha\gamma}}{d}, \quad (3.75)$$

каде што $I_{\alpha\gamma}$ е светлинската јачина на светлечката отсечка во правец определен со аглиите α и γ (во случајот кога истата се набљудува од растојанија коишто дозволуваат таа да се смета за точкест извор), а d е должината на светлечката отсечка.

Користејќи ги геометриските односи, равенката (3.74) може да се трансформира во поинаков облик. Од правоаголните триаголници АТА' и АХТ следува:

$$\overline{ХТ} = \frac{\overline{АТ}}{\cos \gamma} = \frac{h}{\cos \alpha \cdot \cos \gamma} \quad \text{и} \quad x = \overline{АТ} \cdot \operatorname{tg} \gamma = \frac{h}{\cos \alpha} \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (3.76)$$

Бидејќи е:

$$dx = \frac{h \cdot d\gamma}{\cos \alpha \cdot \cos^2 \gamma},$$

имајќи ги предвид (3.76), равенката (3.74) може да се напише во вид:

$$dE_T = \frac{I'_{\alpha\gamma}}{h} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot d\gamma. \quad (3.77)$$

Со соодветна интеграција на двете страни на равенката (3.77), за осветленоста во точката Т од целата светлечка отсечка се добива:

$$E_T = \frac{\cos \alpha}{h} \cdot \int_0^\theta I'_{\alpha\gamma} \cdot \cos \beta \cdot d\gamma, \quad (3.78)$$

каде што со θ е означен аголот под кој од точката Т се гледа светлечката отсечка.

За да може да се пресмета осветленоста во точката Т со помош на (3.78) е потребно да се познава математичкиот закон за распределба на светлинската јачина по единица должина на светлечката отсечка, како функција од аглиите α и γ . За практичните извори во вид на светлечка отсечка, со прифатлива точност, важи релацијата [8]:

$$I'_{\alpha\gamma} = I'_{\alpha 0} \cdot \cos^s \gamma, \quad (3.79)$$

каде што со $I'_{\alpha 0}$ е означена светлинската јачина по единица должина во рамнина којашто со рамнината на насочувањето зафаќа агол α и во правец нормален на светлечката отсечка ($\gamma = 0$), а s е рационален број помеѓу 1 и 4.

Ако се искористи (3.79), равенката (3.78) може да се напише во следниов облик:

$$E_T = \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos \alpha \cdot \int_0^\theta \cos \beta \cdot \cos^s \gamma \cdot d\gamma. \quad (3.80)$$

Во праксата се најчесто од интерес две заемни положби на осветлуваната рамнина и светлечката отсечка. Во првиот случај светлечката отсечка е паралелна на осветлуваната рамнина, додека во вториот случај таа е нормална на осветлуваната рамнина. За овие две карактеристични положби равенката (3.80) може значително да се поедностави.

Најнапред, да го разгледаме случајот кога светлечката отсечка е паралелна на осветлуваната рамнина. На сликата 3.24 е прикажан само делот од светлечката отсечка AA_1 помеѓу точките A и X . Низ светлечката отсечка е поставена рамнина паралелна на осветлуваната рамнина. Таа рамнина и нормалата на осветлуваната рамнина во точката T се сечат во точката T_1 . Од правоаголните триаголници ATT_1 , XTT_1 и XAT следува:

$$\cos \varphi = \frac{\overline{TT_1}}{\overline{AT}}, \quad \cos \beta = \frac{\overline{TT_1}}{\overline{XT}} \quad \text{и} \quad \cos \gamma = \frac{\overline{AT}}{\overline{XT}},$$

врз основа на што за косинусот од аголот β може да се напише:

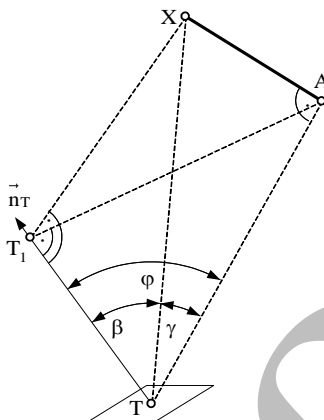
$$\cos \beta = \cos \gamma \cdot \cos \varphi. \quad (3.81)$$

Бидејќи аголот φ не зависи од аголот γ , уважувајќи ја (3.81), равенката (3.80) може да се напише во вид:

$$E_T = \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \int_0^{\theta} \cos^{s+1} \gamma \cdot d\gamma. \quad (3.82)$$

Кога осветлуваната рамнина е нормална на светлечката отсечка, нормалата на таа рамнина во точката T ќе биде паралелна на светлечката отсечка. Во овој случај аголите β и γ лежат во иста рамнина, при што е $\beta + \gamma = \pi/2$. Во овој случај, од (3.80), за осветленоста во точката T се добива:

$$E_T = \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos \alpha \cdot \int_0^{\theta} \sin \gamma \cdot \cos^s \gamma \cdot d\gamma. \quad (3.83)$$



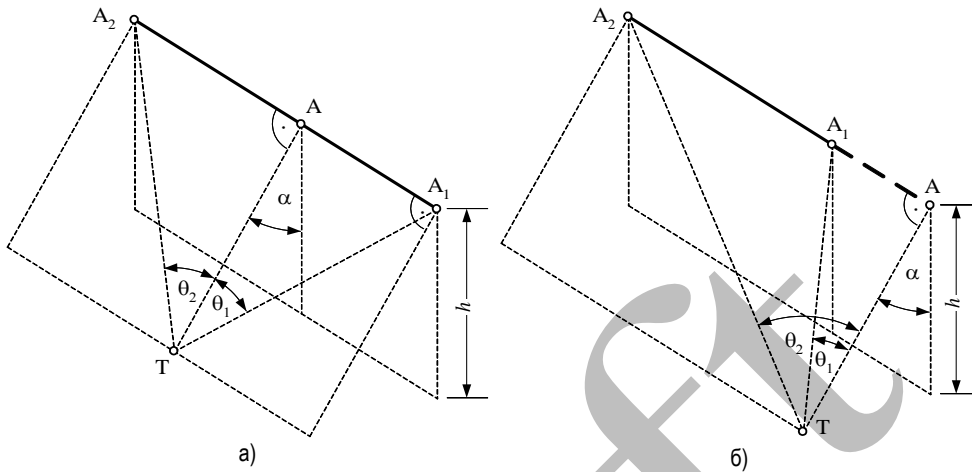
Слика 3.24 Случај кога светлечката отсечка е паралелна со осветлуваната рамнина

При изведувањето на (3.80) беше претпоставено дека точката Т и една од крајните точки на светлечката отсечка лежат во рамнина нормална на светлечката отсечка. Во случајот прикажан на сликата 3.23 тоа беше точката А. Да го разгледаме случајот кога претходната претпоставка не е исполнета. За таа цел ги набљудуваме светлечката отсечка $\overline{A_1A_2}$ и точката Т во којашто треба да се пресмета осветленоста (слики 3.25.a и 3.25.б). Во точката Т поставуваме рамнина нормална на правата на која лежи светлечката отсечка и нивната пресечна точка ја означуваме со А. Точката А може:

- да припаѓа на светлечката отсечка (слика 3.25.a), или
- да не припаѓа на светлечката отсечка (слика 3.25.б).

Во случајот од сликата 3.25.a осветленоста во точката Т се пресметува како сума на осветленостите што во точката Т ја создаваат светлечките отсечки $\overline{AA_1}$ и $\overline{AA_2}$, т.е.

$$E_T = E_{T(A_1A_2)} = E_{T(AA_1)} + E_{T(AA_2)} = \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos \alpha \cdot \left[\int_0^{\theta_1} \cos \beta \cdot \cos^s \gamma \cdot d\gamma + \int_0^{\theta_2} \cos \beta \cdot \cos^s \gamma \cdot d\gamma \right]. \quad (3.84)$$



Слика 3.25 Можни взаемни положби на осветлуваната точка и светлечката отсечка

Во случајот прикажан на сликата 3.25.б се замислуваат две фиктивни светлечки отсечки $\overline{AA_1}$ и $\overline{AA_2}$, со исти карактеристики како и отсечката $\overline{A_1A_2}$. И во овој случај осветленоста во точката Т се пресметува со суперпозиција на осветленостите од отсечките $\overline{AA_1}$ и $\overline{AA_2}$, при што придонесот на отсечката $\overline{AA_1}$ во сумата се зема со негативен предзнак. Така, користејќи ја (3.80), добиваме:

$$E_T = E_{T(A_1A_2)} = E_{T(AA_2)} - E_{T(AA_1)} = \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos \alpha \cdot \left[\int_0^{\theta_2} \cos \beta \cdot \cos^s \gamma \cdot d\gamma - \int_0^{\theta_1} \cos \beta \cdot \cos^s \gamma \cdot d\gamma \right],$$

т.е.

$$E_T = \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos \alpha \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \beta \cdot \cos^s \gamma \cdot d\gamma. \quad (3.85)$$

Всушност, равенката (3.80) може да се смета за специјален случај на (3.85) ако $\theta_1 = 0$.

Во праксата многу често светилките во вид на светлечки отсечки се поставуваат во праволиниски низи. Тогаш, аналогно на претходните случаи, осветленоста во некоја точка Т се пресметува по пат на суперпозиција на осветленостите од одделните светилки. Со оглед на тоа што бројот на светилки во една низа може да биде релативно голем, а со цел пресметките да се поедностават, во определени ситуации е прифатливо множеството светилки да се смета како една светлечка отсечка [1]. Тоа може да се направи во случаите кога сите светилки во низата се од ист тип и кога растојанието помеѓу средиштата на две соседни светилки од низата е помало од $2 \cdot h/3$, каде со h е означено растојанието од низата до рамнината во чиешто точки треба да

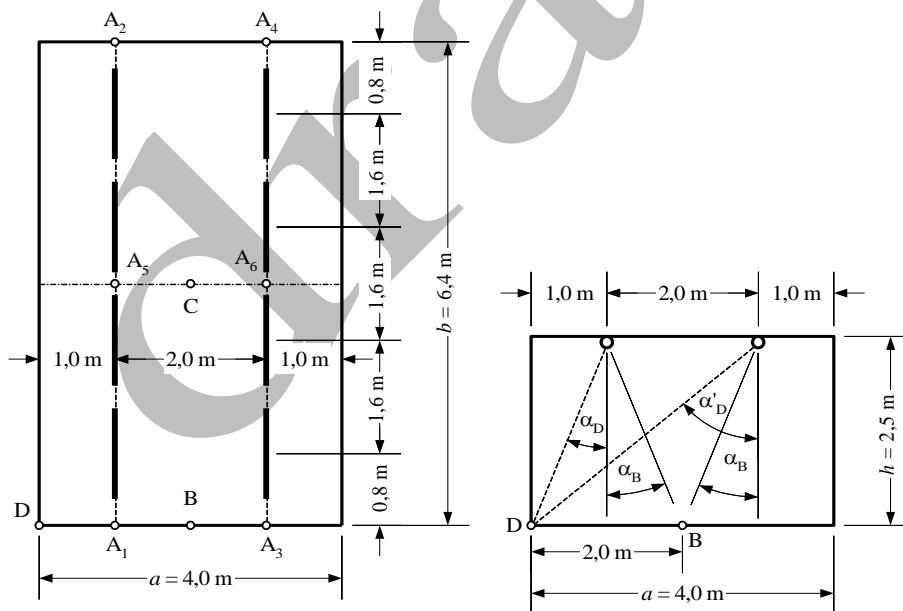
се пресмета осветленоста. Притоа, светлинската јачина по единица должина на низата се пресметува со формулата:

$$I'_{\alpha 0_{\text{низа}}} = I'_{\alpha 0_{\text{свет.}}} \cdot \frac{n \cdot l_{\text{свет.}}}{l_{\text{низа}}}, \quad (3.86)$$

каде што $I'_{\alpha 0_{\text{свет.}}}$ е светлинската јачина по единица должина (за реалните светилки) во правец нормален на светлечката отсечка и во рамнина којашто со рамнината на насочувањето на светилката зафаќа агол α , n е бројот на светилките во низата, $l_{\text{свет.}}$ е должината на секоја светилка и $l_{\text{низа}}$ е вкупната должина на низата.

Пример 3.14

Осум светилки во вид на прави цилиндри, секоја со должина 1,2 m и дијаметар 26 mm, осветлуваат просторија во вид на правоаголен паралелепипед (квадар) со основа $a \times b$ и висина h . Светилките се рамномерно распоредени во две низи поставени на плафонот од просторијата (слика 3.26). Основите на цилиндричните светилки не светат, а сјајноста на нивните обвивки е еднаква во сите правци. Познато е дека вкупниот флуке на секоја од светилките изнесува 3 350 lm. Да се пресметаат хоризонталните осветлености во точките B, C и D од подот на просторијата и вертикалната осветленост во точката B, сметајќи дека точката B припаѓа на рамнината од вертикалниот сид. При пресметките да се смета дека одбиената светлина од граничните површини на просторијата не влијае врз осветленостите во наведените точки.



Слика 3.26 Скица за примерот 3.14

Светилките можат да се сметаат како светлечки отсечки бидејќи нивната должина е значително поголема отколку нивниот дијаметар. Од растојанијата наведени на сликата 3.26 може да се заклучи дека растојанието помеѓу средиштата на две соседни светилки во една низа е помало од $h \cdot \frac{2}{3}$, каде што h е најмалото растојание помеѓу низите и осветлуваните точки. Поради тоа, можеме да сметаме дека просторијата наместо со двете низи од светилки е осветлена со две фиктивни светлечки отсечки: првата со крајните точки A_1 и A_2 , и втората со крајните точки A_3 и A_4 (слика 3.26).

Бараните осветлености во точките В, С и D ќе ги пресметаме по пат на суперпозиција на осветленостите од двете фиктивни светлечки отсечки. Точките В и D и по една од крајните точки на двете фиктивни отсечки лежат во иста рамнина којашто е нормална на отсечките. Поради тоа, врз основа на (3.82), за хоризонталната осветленост во точката В може да се напише:

$$E_B = E_{B(A_1A_2)} + E_{B(A_3A_4)} = 2 \cdot E_{B(A_1A_2)} = 2 \cdot \frac{I'_{\alpha 0}}{h_{\text{ном.}}} \cdot \cos \alpha_B \cdot \cos \varphi_B \cdot \int_0^{\theta_B} \cos^{s+1} \gamma \cdot d\gamma, \quad (3.87)$$

каде што $I'_{\alpha 0}$ е светлинската јачина по единица должина на фиктивните светлечки отсечки и таа е еднаква за двете отсечки, $h_{\text{ном.}}$ е растојанието на светлечките низи од помошната рамнина (во овој случај тоа растојание е еднакво на висината на просторијата h), а θ_B е аголот под кој од точката В се гледа отсечката A_1A_2 , односно отсечката A_3A_4 .

Во (3.87) е искористен фактот дека точката В е симетрично поставена во однос на двете светлечки отсечки, а отсечките имаат ротационо-симетрична распределба на светлинската јачина во однос на нивните надолжни оски, поради што е доволно да се пресмета влијанието на само една од светлечките отсечки.

Од (3.82) за хоризонталната осветленост во точката D следува:

$$E_D = E_{D(A_1A_2)} + E_{D(A_3A_4)} = \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \left(\cos \alpha_D \cdot \cos \varphi_D \cdot \int_0^{\theta_D} \cos^{s+1} \gamma \cdot d\gamma + \cos \alpha'_D \cdot \cos \varphi'_D \cdot \int_0^{\theta'_D} \cos^{s+1} \gamma \cdot d\gamma \right). \quad (3.88)$$

Точката С лежи во напречната симетрална рамнина на двете светлечки отсечки. Поради симетријата (слично како и во случајот со точката В), користејќи ја (3.82), за хоризонталната осветленост во точката С може да се напише:

$$E_C = 2 \cdot E_{C(A_1A_2)} = 2 \cdot \left(2 \cdot E_{C(A_1A_3)} \right) = 4 \cdot E_{C(A_1A_3)} = 4 \cdot \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos \alpha_C \cdot \cos \varphi_C \cdot \int_0^{\theta_C} \cos^{s+1} \gamma \cdot d\gamma. \quad (3.89)$$

За вертикалната осветленост во точката В, сметана како точка од рамнината на вертикалниот сид, со помош на (3.83) се добива:

$$E_{B_{\text{верт.}}} = 2 \cdot E_{B(A_1A_2)_{\text{верт.}}} = 2 \cdot \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos \alpha_B \cdot \int_0^{\theta_B} \sin \gamma \cdot \cos^s \gamma \cdot d\gamma. \quad (3.90)$$

Бидејќи осветлуваната рамнина (подот) е нормална на рамнината на насочување, аглите α и φ (слика 3.23) ќе бидат еднакви. Врз основа на растојанијата и ознаките од сликата 3.26, може да се пресмета:

$$\cos \alpha_B = \frac{h}{A_1B} = \frac{2,5}{\sqrt{2,5^2 + 1^2}} = 0,92848, \quad \cos \alpha_C = \cos \alpha_B, \quad \cos \alpha_D = \cos \alpha_B \quad \text{и}$$

$$\cos \alpha'_D = \frac{h}{A_3 D} = \frac{2,5}{\sqrt{2,5^2 + 3^2}} = 0,64018.$$

Врз основа на ознаките и растојанијата од сликата 3.23, аглиите (изразени во радијани) под коишто од точките В, С и D се гледаат светлечките отсечки или нивните делови се:

$$\theta_B = \arctg \frac{A_1 A_2}{A_1 B} = \arctg \frac{6,4}{\sqrt{2,5^2 + 1^2}} = 1,17256 \text{ rad}, \quad \theta_D = \arctg \frac{A_1 A_2}{A_1 D} = \theta_B,$$

$$\theta'_D = \arctg \frac{A_3 A_4}{A_3 D} = \arctg \frac{6,4}{\sqrt{2,5^2 + 3^2}} = 1,02293 \text{ rad} \quad \text{и}$$

$$\theta_C = \arctg \frac{A_1 A_5}{A_5 C} = \arctg \frac{3,2}{\sqrt{2,5^2 + 1^2}} = 0,87130 \text{ rad}.$$

Светлински извор во вид на долг цилиндер, чијашто сјајност е еднаква во сите правци, има најголема светлинска јачина во правците коишто со надолжната оска на цилиндерот зафаќаат прав агол (видете пример 3.9 на страна 48). Бидејќи максималната светлинска јачина во сите рамнини коишто ја содржат оската на цилиндерот е еднаква, сосема е соседно која од тие рамнини ќе ја прогласиме за рамнина на насочување. Нека, во овој случај, за рамнина на насочување ја земеме вертикалната рамнина којашто поминува низ светлечката отсечка.

Врз основа на (3.86), (3.75) и (3.30), за фиктивната светлечка отсечка со којашто ја симулираме низата светилки, во правец нормален на надолжната оска светлинската јачина по единица должина е:

$$I'_{\alpha 0} = I'_{\alpha 0, \text{свет.}} \cdot \frac{n \cdot l_{\text{свет.}}}{l_{\text{низа}}} = \frac{I_0}{l_{\text{свет.}}} \cdot \frac{n \cdot l_{\text{свет.}}}{l_{\text{низа}}} = \frac{\Phi_{\text{свет.}}}{\pi^2} \cdot \frac{n}{l_{\text{низа}}} = \frac{3 \, 350}{\pi^2} \cdot \frac{4}{6,4} = 212,1 \text{ cd/m}.$$

Врз основа на (3.27), светлинската јачина во правец којшто со оската на цилиндерот зафаќа агол $\pi/2 - \gamma$ е:

$$I'_{\alpha \gamma} = I'_{\alpha 0} \cdot \sin(\pi/2 - \gamma) = I'_{\alpha 0} \cdot \cos \gamma,$$

што споредено со (3.79) упатува на заклучок дека во случајов во (3.82) и (3.83) треба да се земе $s = 1$. При тие услови, решението на интегралот од десните страни на (3.87), (3.88) и (3.89) е:

$$\int_0^{\theta} \cos^{s+1} \gamma \cdot d\gamma = \int_0^{\theta} \cos^2 \gamma \cdot d\gamma = \frac{1}{2} \int_0^{\theta} (1 + \cos 2\gamma) \cdot d\gamma = \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \cdot \sin 2\gamma \Big|_0^{\theta} = \frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4},$$

каде што аголот θ треба да биде изразен во радијани, а решението на интегралот од десната страна на (3.90) е:

$$\int_0^{\theta} \sin \gamma \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma = \frac{1}{2} \int_0^{\theta} \sin 2\gamma \cdot d\gamma = \frac{1}{4} \cdot (-\cos 2\gamma) \Big|_0^{\theta} = \frac{1 - \cos 2\theta}{4} = \frac{\sin^2 \theta}{2}.$$

Конечно, за бараните осветлености пресметуваме:

$$E_B = 2 \cdot \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos^2 \alpha_B \cdot \left(\frac{\theta_B}{2} + \frac{\sin 2\theta_B}{4} \right) = \frac{2 \cdot 212,1}{2,5} \cdot 0,92848^2 \cdot \left(\frac{1,17256}{2} + \frac{\sin 2,34512}{4} \right) = 111,9 \text{ lx},$$

$$E_D = \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos^2 \alpha_D \cdot \left(\frac{\theta_D}{2} + \frac{\sin 2\theta_D}{4} \right) + \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos^2 \alpha'_D \cdot \left(\frac{\theta'_D}{2} + \frac{\sin 2\theta'_D}{4} \right),$$

т.е.

$$E_D = \frac{E_B}{2} + \frac{212,1}{2,5} \cdot 0,64018^2 \cdot \left(\frac{1,02293}{2} + \frac{\sin 2,04586}{4} \right) = 55,95 + 25,51 = 81,5 \text{ lx},$$

$$E_C = 4 \cdot \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos^2 \alpha_C \cdot \left(\frac{\theta_C}{2} + \frac{\sin 2\theta_C}{4} \right) = \frac{4 \cdot 212,1}{2,5} \cdot 0,92848^2 \cdot \left(\frac{0,87130}{2} + \frac{\sin 1,74260}{4} \right) = 199,5 \text{ lx}$$

и

$$E_{B_{\text{впр.}}} = 2 \cdot \frac{I'_{\alpha 0}}{h} \cdot \cos \alpha_B \cdot \frac{\sin^2 \theta_B}{2} = 2 \cdot \frac{212,1}{2,5} \cdot 0,92848 \cdot \sin^2 1,17256 = 133,9 \text{ lx}.$$

3.11 Контраст

На сликите 3.27.а и 3.27.б е прикажан еден ист текст со различна зацрнетост на буквите напишани на бела заднина. Заднината на двете слики (белата хартија) има еднаква сјајност, додека сјајноста на буквите на сликата 3.27.а е поголема од сјајноста на буквите на сликата 3.27.б. Текстот прикажан на сликата 3.27.б е значително полесен за читање отколку текстот прикажан на сликата 3.27.а. Причината за тоа е во фактот што разликата помеѓу сјајностите на заднината и набљудуваните објекти (буквите) е поголема на сликата 3.27.б.

<p>Врз основа на изразот (3.75) мож Т е пропорционална на сјајноста на растојанието на точката до триаголникот паралелен на триаголникот на правите дефинирани со точката Т и θ ќе бидат еднакви на соодветните агли θ го исполнуваат претходниот услов во просторни агли. Всушност, било кој триаголник дефинирани со точката Т и темиња просторен агол во однос на точката Т кај триаголникот А'В'С' од сликата 3.15.б.</p> <p>Според тоа, осветленоста во точ сјајност L ќе биде еднаква на осветленостата сјајност.</p> <p style="text-align: center;">а)</p>	<p>Врз основа на изразот (3.75) мож Т е пропорционална на сјајноста на растојанието на точката до триаголникот паралелен на триаголникот на правите дефинирани со точката Т и θ ќе бидат еднакви на соодветните агли θ го исполнуваат претходниот услов во просторни агли. Всушност, било кој триаголник дефинирани со точката Т и темиња просторен агол во однос на точката Т кај триаголникот А'В'С' од сликата 3.15.б.</p> <p>Според тоа, осветленоста во точ сјајност L ќе биде еднаква на осветленостата сјајност.</p> <p style="text-align: center;">б)</p>
---	---

Слика 3.27 Контраст на сјајноста

За квантитативна оценка на субјективното чувство за разлика на сјајностите на две подрачја од видното поле, што се гледаат едновременно или непосредно едно по

друго, воведен е поимот *контраст на сјајноста*. Тој најчесто се означува со L_c и е дефиниран со равенството:

$$L_c = \frac{|L_{\text{заднина}} - L_{\text{предмет}}|}{L_{\text{заднина}}}, \quad (3.91)$$

каде што со $L_{\text{заднина}}$ и $L_{\text{предмет}}$ се означени сјајноста на заднината и сјајноста на набљудуваниот предмет, соодветно.

Покрај дефиницијата искажана со (3.91), во литературата можат да се сретнат и други дефиниции на контрастот на сјајноста. Еден таков пример е:

$$L_c = 2 \cdot \frac{|L_{\text{заднина}} - L_{\text{предмет}}|}{L_{\text{заднина}} + L_{\text{предмет}}}. \quad (3.92)$$

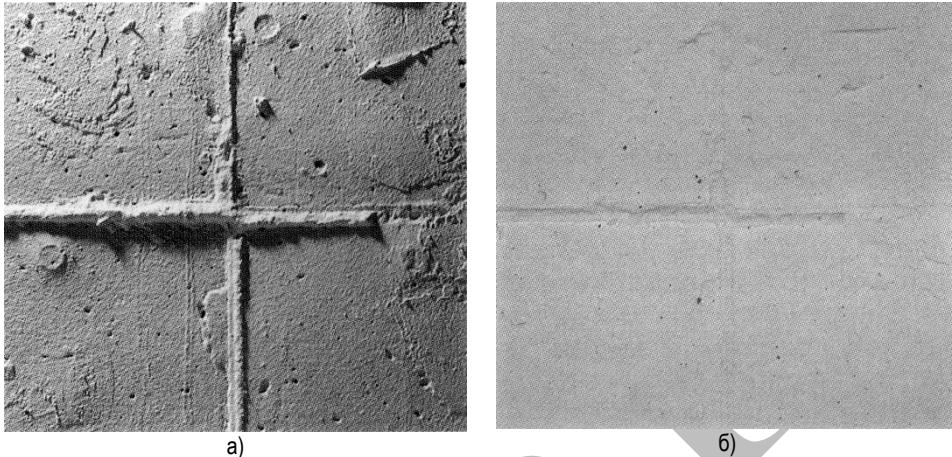
Ако контрастот на сјајноста е премногу низок, набљудуваниот предмет може да не биде видлив. Од равенката (3.91) произлегува генералното правило дека еднаквите пропорционални разлики на сјајноста на набљудуваниот предмет и заднината ќе бидат еднакво забележани од човечкото око (*Веберов закон*). Веберовиот закон не важи за условите со многу мали сјајности на заднината, во спротивно би можеле да гледаме во темнина [5].

Најмалата разлика на сјајностите на набљудуваниот предмет и заднината, со која се постигнува задоволително разликување на предметот, се нарекува *граничен контраст на сјајноста (threshold contrast)* и зависи од нивото на сјајност на заднината. Меѓутоа, граничниот контраст на сјајноста зависи и од големината на набљудуваниот предмет [5]. Така, на пример, ако набљудуваниот предмет се гледа под виден агол помал од $6'$ (под таков агол се гледа предмет со големина од 0,5 mm на растојание од 300 mm од окото), за да се постигне задоволително ниво на разликување на предметите, граничниот контраст на сјајноста за определено растојание треба да биде обратно пропорционален на просторниот агол под кој се гледа предметот (*Риков закон*). За случаите кога видниот агол е поголем, граничниот контраст на сјајноста треба да биде обратно пропорционален на квадратниот корен на просторниот агол (*Пајперов закон*).

Контраст на сјајноста влијае и врз тродимензионалната претстава за објектите. На сликите 3.28.а и 3.28.б се прикажани фотографии на две нерамни гипсани површини осветлени на различни начини. Од сенките на нерамнините од површината, присутни на сликата 3.28.а, може да се заклучи дека најголем дел од светлината доаѓа од просторот над горниот лев агол на површината. Од друга страна, во случајот прикажан на сликата 3.28.б не се присутни сенки и поради тоа нерамнините на површината многу тешко се забележуваат. Тоа е последица на начинот на којшто површината е осветлена. Всушност, во овој случај површина е осветлена со таканаречена *дифузна светлина*, т.е. флуksот што паѓа на површината доаѓа од повеќе страни.

Ако се потсетиме на примерот 3.11 можеме да заклучиме дека односот на векторот и скаларот на осветленоста во точките од површината од сликата 3.28.а е значително поголем отколку соодветниот однос за површината од сликата 3.28.б. Како

резултат на тоа, на фотографијата од сликата 3.28.а постојат делови од површината со релативно голема разлика на сјајностите, т.е. релативно голем контраст на сјајноста, додека тоа не е случај со површината од сликата 3.28.б.



Слика 3.28 Влијание на односот вектор/скалар на осветленоста врз контрастот на сјајноста [71]

3.12 Блескотење

Блескотење настапува кога во видното поле се наоѓа некој предмет со многу поголема сјајност од сјајноста на останатите делови на видното поле. Блескотењето е појава што ја намалува способноста на окото за јасно гледање и создава помали или поголеми тешкотии при гледањето. Покрај тоа, свртувајќи го постојано вниманието врз себе, блескотењето создава чувство за пречење и замор во сите ситуации кога човекот се занимава со активност (работа) што бара концентрација.

Дали една светла површина ќе создаде ефект на блескотење не зависи само од нејзината сјајност, туку и од сјајноста на нејзината поблиска и подалечна околина. Доколку сјајноста на околината е поголема дотолку е потребно и сјајноста на светлечката површина да биде поголема, за да предизвика блескотење и обратно. Така, на пример, ако сјајноста на околината е помала од 10^{-4} cd/m² (што се јавува во услови на ноќ без месечина), блескотење предизвикува секоја површина со сјајност поголема од 200 cd/m², додека во услови кога сјајноста на околината е околу 10 cd/m² (што приближно соодветствува на вештачко осветление во работни простории), блескотење предизвикува секоја површина со сјајност поголема од 7 500 cd/m². Во оваа смисла илустративен е и примерот со автомобилските фарови. Денџе, кога заднината е светла, тие не создаваат силно блескотење, додека ноќе (при темна заднина) тие предизвикуваат силно блескотење, наречено заслепување. Покрај кажаното, треба да се забележи дека, независно од сјајноста на околината, предметите чија сјајност е поголема од 200 kcd/m² секогаш предизвикуваат блескотење.

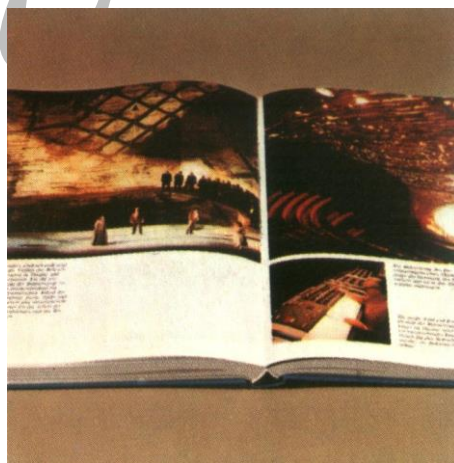
Според условите за појава на блескотење разликуваме: *истовремено* и *дополнително* блескотење. Ако површината (најчесто на некој светлински извор) која предизвикува блескотење се наоѓа во видното поле, блескотењето се нарекува истовремено. Ако блескотењето се јавува по изнесувањето на светлинскиот извор (примарен или секундарен) од видното поле, таквото блескотење се нарекува дополнително.

Во зависност од причините за појава на блескотењето разликуваме директно и рефлексно блескотење. Директното блескотење се јавува кога во видното поле се јавуваат светилки чиешто светли делови во правецот на набљудување имаат многу поголема сјајност од сјајноста на околината.

Рефлексното блескотење се јавува кога во видното поле постојат површини коишто имаат висок коефициент на одбивање и одбиваат насочено или полудифузно³¹. На сликите 3.29.а и 3.29.б се прикажани фотографии на еден ист предмет (отворена книга чиешто листови се изработени од мазна хартија) осветлен на два различни начини. На сликата 3.29.а определени делови од прикажаните страници на книгата имаат релативно голема сјајност и поради тоа не е можно добро да се распознае содржината на страниците. Причина за тоа е што голем дел од светлината што паѓа на овие делови од книгата се одбива во насока на гледањето. На сликата 3.29.б е прикажан истиот предмет, но положбата на изворите на светлина во однос на предметот е таква што најголем дел од одбиената светлина не е во насока кон очите на набљудувачот. Да забележиме дека блескотењето немаше да се јави ако хартијата не беше мазна.



а)



б)

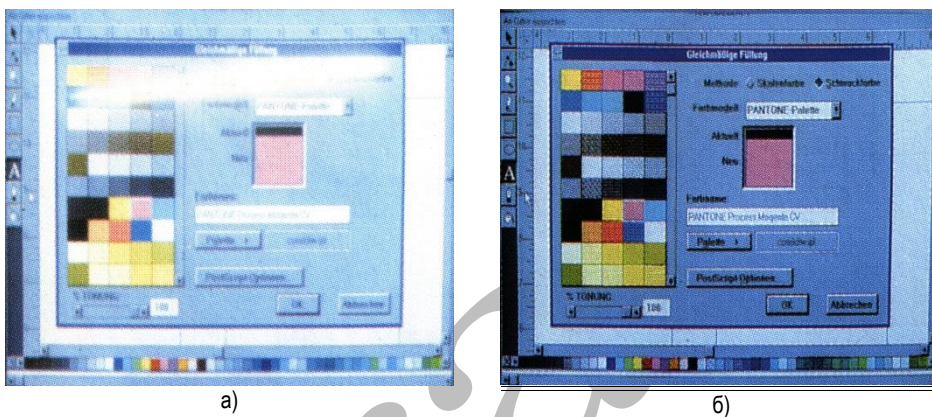
Слика 3.29 Пример на рефлексно блескотење [70]

Многу чест случај на рефлексно блескотење се јавува на екраните од компјутерските монитори. Пример на рефлексно блескотење од екран на компјутерски

³¹ Повеќе детали за распределбата на светлината при одбивањето на светлината може да се најдат во поглавјето 4.

монитор е прикажан на сликата 3.30.а, додека на слика 3.30.б е прикажан истиот објект, осветлен на поинаков начин, така што блескотењето не е забележливо.

Со оглед на последиците што ги предизвикува блескотењето, разликуваме: физиолошко блескотење (*disability glare*) и психолошко блескотење (*discomfort glare*). Физиолошкото блескотење предизвикува намалување на видната способност. Тоа намалување обично е привремено, но во случаи на исклучително силни блескотења, особено ако тие не се краткотрајни, можни се и трајни оштетувања на видот. Примери на физиолошко блескотење (неможност доволно добро да се распознае набљудуваниот објект) се прикажани на сликите 3.29.а. и 3.30.а.



Слика 3.30 Пример на рефлексно блескотење од екран на компјутерски монитор [101]

Психолошкото блескотење се јавува, пред сè, во случаите кога набљудувачот подолго време престојува во просторија во која постои ефект на блескотење (кое и не мора да биде многу силно). Тоа се манифестира како субјективно чувство на замор, нервоза и неудобност, но тоа не мора да повлекува намалување на видната способност.

Во осветлението на работни простории, предавални, концертни сали, театарски сали, кино-сали и други слични објекти, треба внимателно да се одбегнат сите можности за појава на блескотење, бидејќи во тие простории секое блескотење се смета за штетно. Притоа треба да се внимава на фактот дека причината за појава на блескотење, покрај несоодветни светилки или нивното несоодветно поставување, може да биде и распределбата на светлинската јачина на површините од коишто се одбива светлината.

Меѓутоа, во простории за разонода и забава (диско клубови, барови и сл.), во соодветна мерка, блескотењето намерно се предвидува. Во овие простории не се работи, туку се забавува и од осветлението не се бара да создаде оптимални услови за гледање, туку да создаде атмосфера за добро и весело расположение. За постигнување на таа цел може да послужи и соодветно блескотење, бидејќи тоа предизвикува посилено надразнување на мрежницата на окото, што условува човекот да се доведе во состојба на поголема живост и развеселеност.

Независно од причините за појавата на блескотењето и/или ефектите што блескотењето ги создава кај луѓето, во случаите кога тоа претставува непожелна појава треба да се елиминира или сведе во прифатливи рамки. Искуствата покажале дека во затворените простори појавата на психолошко блескотење е почеста отколку физиолошкото блескотење. Но, не се ретки ситуациите кога релативно големи сјајни површини, на пример прозорци во релативно слабо осветлени простории или рефлекторски светилки (т.е. светилки чијшто флуks се зрачи во релативно мал просторен агол) можат да создадат физиолошко блескотење. Меѓутоа, кај системите за надворешно осветление физиолошкото блескотење е поизразено [46].

Во рамките на ова потпоглавје ќе ги наведеме само генералните забелешки и насоки за намалување на блескотењето. Директното блескотење може да се елиминира, или значително да се намали, ако во системот за осветление се спроведе една или повеќе од следните мерки:

- користење на извори со помала сјајност или користење на извори чијашто сјајност е ограничена во вообичаените правци на гледање;
- соодветна ориентација на изворите во просторот и
- поставување на изворите надвор од видното поле или зад соодветни закони.

За намалување на рефлексното блескотење може да се преземе некоја од следниве мерки:

- распоредување на изворите и/или одбивните површини така што одбиената светлина да не предизвикува блескотење, т.е. правецот на насочено³² одбиената светлина да не се поклопува со вообичаените правци на набљудување (слики 3.29.б и 3.30.б);
- користење на одбивни површини што не одбиваат насочено (на пример, матирани површини);
- користење на извори со помала сјајност.

Чувството на непријатност, пречење и замор, кое потекнува од блескотењето, тешко може бројно да се изрази. Затоа, во минатото, оценките за степенот на блескотењето биле главно квалитативни. Покрај тоа, констатирано е дека светлината со помала бранова должина (сината и виолетовата) во поголема мерка предизвикува блескотење одошто светлината со поголема бранова должина (портокаловата и црвената).

Во последните тринаесет години стручната јавност интензивно се занимава со проблемот на дефинирање прифатливи методи за квантитативна оценка на блескотењето. Како резултат на тоа CIE дефинирала три методологии за квантитативна оценка на блескотењето. Во системите за внатрешно осветление се користи методот *UGR (Unified Glare Rating)* [42]. Кај системите наменети за осветление на отворени простори (спортски објекти и отворени работни простори) прифатен е *GR* методот (*Glare Rating*) [40,43], додека за осветление на сообраќајници за оценка на блескотењето се користи факторот *TI (Threshold Increment)* [30,41].

³² Насоченото одбивање е обработено во потпоглавјето 4.2.

draft

4 СВЕЛТОТЕХНИЧКИ СВОЈСТВА НА МАТЕРИЈАЛИТЕ

4.1 Воведни забелешки

Ако простирајќи се низ една оптичка средина светлината падне на гранична површина помеѓу таа и друга средина ќе дојде до нејзиното разделување. Еден дел од светлината ќе биде одбиен од граничната површина, друг дел ќе биде впиен (всушност претворен во топлина), а трет дел може да биде пропуштен во втората средина³³. Ако со Φ го означиме светлинскиот флукс што паднал на граничната површина, а со Φ_ρ , Φ_α и Φ_τ ги означиме флуксозите на одбиениот (рефлектираниот), впиениот (апсорбираниот) и пропуштениот дел, соодветно, врз основа на законот за зачувување на енергијата можеме да напишеме:

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau. \quad (4.1)$$

Ако равенката (4.1) ја поделиме со флуксот што паѓа на граничната површина, се добива:

$$1 = \frac{\Phi_\rho}{\Phi} + \frac{\Phi_\alpha}{\Phi} + \frac{\Phi_\tau}{\Phi} = \rho + \alpha + \tau, \quad (4.2)$$

каде што со ρ , α и τ се означени коефициентите на одбивање, впивање и пропуштање, соодветно. Наместо во релативни единици, овие коефициенти често се изразуваат во проценти од флуксот што паднал на граничната површина.

Да забележиме дека во случаите кога втората средина не пропушта светлина коефициентот на пропуштање е еднаков на нула.

Во рамките на ова поглавје подетално ќе ги разгледаме одбивањето и пропуштањето на светлината бидејќи тие, во голема мерка, влијаат врз светлотехничките карактеристики на светилките и, воопшто, врз карактеристиките на светлотехничките решенија. Во потпоглавјето 4.4 ќе бидат прикажани коефициентите на одбивање, пропуштање и впивање за најчесто користените материјали во светлотехниката. На крајот, во потпоглавјето 4.5 е објаснето повеќекратното одбивање на светлината и некои постапки за пресметка на светлотехничките големини во тој случај.

³³ Покрај наведените можат да се јават и други појави, како што се, на пример, поларизација и интерференција. Со оглед на тоа што овие појави немаат примена во светлотехниката, во рамките на овој текст, тие нема да бидат обработувани.

4.2 Одбивање на светлината

Коефициентот на одбивање на светлината е дефиниран како однос помеѓу флуksот што се одбива од граничната површина помеѓу две средини и флуksот што на неа паѓа:

$$\rho = \frac{\Phi_p}{\Phi} . \quad (4.3)$$

Коефициентот на одбивање зависи од карактеристиките на материјалот од чијашто површина се одбива светлината, но зависи и од спектарот на упадната светлина (видете равенка (2.3) во потпоглавјето 2.4). Всушност, впечатокот за бојата на еден предмет се добива токму поради тоа што предметот има релативно голем коефициент на одбивање за светлина со брановата должина која што одговара на бојата на предметот. Со цел одбивните својства на материјалите да се опишат само со еден податок, усвоено е големината на коефициентот на одбивање да се определува при светлина што ја создава референтен светлински извор со спектрална карактеристика како и идеалното црно тело, загреано на температура од 5 000 K (видете слика 2.6).

Покрај големината на коефициентот на одбивање, врз светлотехничките карактеристики на некој материјал големо влијание има начинот на којшто е распределен флуksот на одбиената светлина.

Во зависност од тоа каква е просторната распределба на одбиениот флуks разликуваме: *насочено, дифузно, полудифузно и мешано одбивање*. Мешаното одбивање претставува комбинација на, најчесто, два типа од претходните одбивања: *насочено–дифузно, насочено–полудифузно и дифузно–полудифузно*. На сликата 4.1 се прикажани распределбите на флуksот на одбиената светлина за наведените начини на одбивање.

Да забележиме дека насоченото и дифузното одбивање претставуваат идеални начини на одбивање, карактеристики што во праксата ги нема ниту едно реално тело. Всушност, одбивањето на реалните тела најчесто е или полудифузно или насочено–дифузно. Мешаното одбивање од типот насочено–дифузно може да се опише со суперпозиција на насочено и дифузно одбивање и токму поради тоа е вообичаено кога се декларира коефициентот на одбивање на некој материјал, всушност, да се прикажуваат неговите компоненти на насоченото и дифузното одбивање.

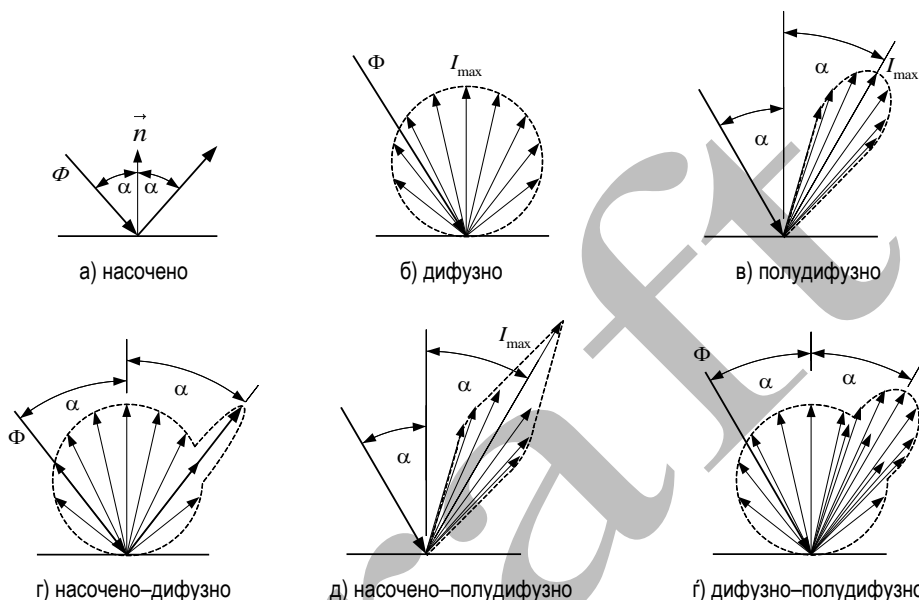
4.2.1 Насочено одбивање

Насоченото одбивање, често нарекувано *огледално одбивање (specular reflection)*, ги има следните особини:

- светлинскиот зрак³⁴ пред одбивањето, нормалата на одбивната површина и одбиениот светлински зрак лежат во иста рамнина;

³⁴ Под поимот *светлински зрак* овде подразбираме светлински флуks распределен во многу мал просторен агол.

- аголот што со нормалата на одбивната површина го зафаќа зракот пред одбивањето е еднаков со аголот што со таа нормала го зафаќа одбиениот зрак.



Слика 4.1 Видови одбивање од рамни површини според просторната распределба на одбиениот флуks

Значи, битна особина на насоченото одбивање, по која таквото одбивање се разликува од другите видови, е дека правецот на одбиениот зрак е директно зависен од правецот по кој зракот паѓа на одбивната површина. Површините што се одликуваат со насочено одбивање се нарекуваат огледални површини или покусо огледала.

Нека набљудуваме релативно мал светлински извор чијшто центар е во точката O . Изворот е на доволно големо растојание од набљудуваната површина за да може да биде третиран како точкаст извор. Дел од флуksот на светлинскиот извор паѓа врз набљудуваната површина којашто одбива насочено (слика 4.2). Набљудувачот поставен во точката N го гледа ликот на изворот којшто се наоѓа во точката O' . Проекцијата на изворот врз рамнина нормална на правецот $O-X$ нека е со плоштина ΔS и таа е еднаква со плоштината на проекцијата на ликот на изворот врз рамнина нормална врз правецот $O'-X$. Кај рамните огледални површини³⁵ обликот и големината на просторниот агол, во кој е опфатен светлинскиот флуks пред одбивањето, е еднаков на обликот и големината на просторниот агол во кој е распределен одбиениот флуks. Поради тоа, во случај на насочено одбивање може да се напише:

³⁵ Во општ случај, површината што одбива не мора да биде рамна. Доволно е делот од површината со центар во точката X да се одбере така што тој дел да биде рамен.

$$\rho = \frac{\Phi_p}{\Phi} = \frac{I_p \cdot \Delta\Omega}{I \cdot \Delta\Omega} = \frac{I_p}{I} = \frac{L_p \cdot \Delta S}{L \cdot \Delta S} = \frac{L_p}{L}, \quad (4.4)$$

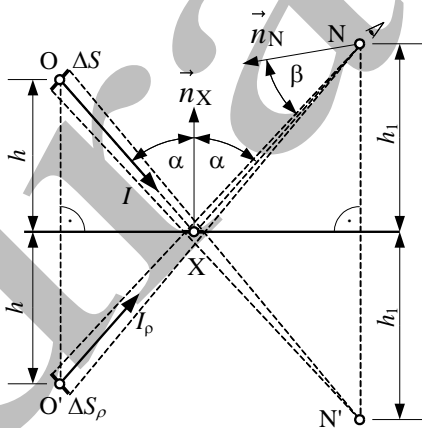
каде што со I и L се означени светлинската јачина и сјајноста на изворот во правец кон точката X , а соодветните големини на ликот на изворот во правец кон точката N во долниот индекс го имаат симболот ρ .

Од (4.4) следува дека при насоченото одбивање односот помеѓу светлинската јачина по одбивањето и светлинската јачина пред одбивањето е еднаков на коефициентот на одбивање на површината од која светлината се одбива насочено. На истата вредност е еднаков и односот помеѓу сјајноста на ликот на светлинскиот извор и сјајноста на самиот извор. Според тоа, ако сјајноста на изворот во правецот $O-X$ е релативно голема и ако коефициентот на одбивање од набљудуваната површина е релативно голем, ликот може да предизвика *рефлексно блескотење*.

Осветленоста што одбиената светлина ја создава во точката N ќе биде:

$$E_N = \frac{I_p \cdot \cos \beta}{ON^2},$$

каде што со β е означен аголот помеѓу нормалата на осветлуваната површина во точката N и правецот $O'-N$ (слика 4.2).



Слика 4.2 Насочено одбивање од рамна површина

Насоченото одбивање настанува од мазни (полирани) површини, најчесто метални, чишто нерамнини се многу помали отколку брановата должина на паднатата светлина. Од комерцијално расположливите материјали, најголем коефициент на насочено одбивање имаат полираното сребро и високо квалитетниот (подобен) алуминиум (*enhanced aluminium*). Коефициентот на одбивање кај овие материјали може да достигне и до 99%, при што коефициентот на насочено одбивање е околу 95÷96%.

Во практиката, огледалата од полирано сребро ретко се применуваат бидејќи под атмосферски влијанија сребрената површина брзо ги губи своите одлични одбивни својства. Во тој поглед хромот е многу попостојан, но, за жал, неговиот коефициент на одбивањето е помал.

При изработка на разни уреди често се користат стаклени огледала со сребрен слој. Кај овие огледала сребрениот слој се нанесува од едната страна на стаклена плоча (калота, параболоид). Нанесувањето се изведува по хемиски пат, а потоа, по пат на галванопластика, сребрениот слој се прекрива со бакарен слој кој треба да го заштитува сребрениот слој од атмосферски влијанија и од механички повреди. На крајот, бакарниот слој се прекрива со слој од постојана боја или лак.

Вториот начин за примена на среброто при изработка на огледални површини се состои во тоа што тенок сребрен филм се нанесува на метална или пластична површина, а врз сребрениот филм се нанесува заштитен провиден филм од соодветен материјал којшто има функција да го заштити среброто од атмосферски влијанија.

Покрај полираните метални површини, насочено одбиваат и мазните стаклени површини или други слични провидни материјали, коишто воедно и ја пропуштаат светлината. За разлика од металните површини, кај стаклените површини коефициентот на одбивање зависи од аголот на упадниот зрак во однос на нормалата на површината и од физичките својства на материјалот³⁶.

Од физиката е познат Шнеловиот закон којшто ја дава зависноста помеѓу брзината на светлината во провидни материјали и брзината на светлината во воздух. За промена на брзината на светлината при премин од воздух, на пример, во стакло, Шнеловиот закон е даден со следната равенка:

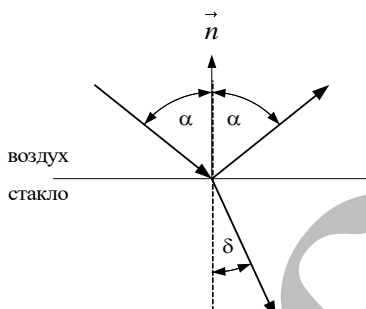
$$\frac{n_{\text{стакло}}}{n_{\text{воздух}}} \approx n_{\text{стакло}} = \frac{v_{\text{воздух}}}{v_{\text{стакло}}} = \frac{\sin \alpha}{\sin \delta}, \quad (4.5)$$

каде што со n и v се означени индексот на прекршување и брзината на светлината во соодветниот медиум, а со α и δ се означени упадниот агол (во воздухот) и аголот на прекршување (во стаклото), соодветно (слика 4.3). Со оглед на тоа што брзината на светлината во воздух многу малку се разликува од брзината на светлината во вакуум, индексот на прекршување во воздух се смета дека е еднаков на единица.

И во случајот на насочено одбивање од стаклените површини, аголот што со нормалата на одбивната површина го зафаќа одбиениот зрак е еднаков на аголот што со истата нормала го зафаќа упадниот зрак, а големината на коефициентот на одбивањето се пресметува според Френеловата формула:

³⁶ Коефициентот на одбивање на стаклото зависи и од тоа дали светлината пред одбивањето била поларизирана и од рамнината на поларизација. Поларизацијата на упадната светлина има влијание за упадни агли поголеми од 30° [6]. Со оглед на тоа што изворите кои се користат во светлотехниката произведуваат светлина којашто, најчесто, е неполаризирана, во натамошниот текст ќе сметаме дека упадната светлина е неполаризирана.

$$\rho = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sin^2(\alpha - \delta)}{\sin^2(\alpha + \delta)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \delta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \delta)} \right]. \quad (4.6)$$



Слика 4.3 Одбивање и прекршување на светлината на граничната површина помеѓу воздух и стакло

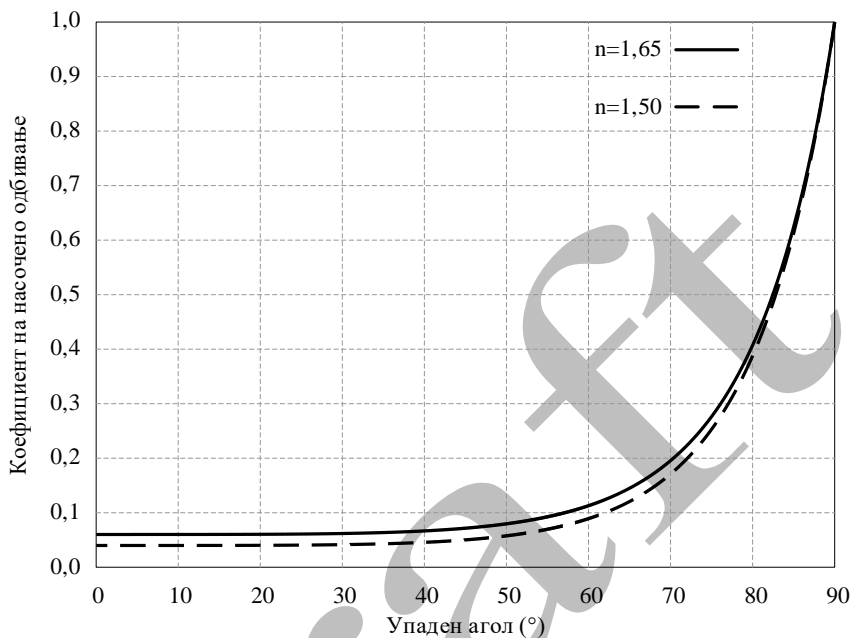
Да забележиме дека коефициентот на насочено одбивање од стаклените површини зависи од индексот на прекршување којшто за најголем број стакла (и слични материјали коишто се користат во светлотехниката) се движи во границите $1,5 \div 1,65$. На сликата 4.4 е прикажано како коефициентот на насочено одбивање од стаклена површина зависи од упадниот агол и индексот на прекршување. Како што може да се забележи од графикот на сликата 4.4, релативно малите промени на индексот на прекршување малку влијаат врз големината на коефициентот на одбивање. Покрај тоа, при промена на упадниот агол од нула до 60° коефициентот на одбивање малку се менува. Но, при натамошното зголемување на упадниот агол доаѓа до значително зголемување на градиентот на порастот на коефициентот на одбивање.

За одбивањето од рамни стаклени површини се карактеристични две вредности на упадниот агол α . Првата карактеристична вредност на упадниот агол е еднаква на нула. Во овој случај, според (4.5), аголот на прекршување исто така ќе биде еднаков на нула, а големината на коефициентот на одбивање може да се определи по пат на барање гранична вредност на десната страна на (4.6), кога $\alpha \rightarrow 0$ и $\delta \rightarrow 0$, при што се добива:

$$\rho = \lim_{\substack{\alpha \rightarrow 0 \\ \delta \rightarrow 0}} \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sin^2(\alpha - \delta)}{\sin^2(\alpha + \delta)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \delta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \delta)} \right] = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(1 - \frac{2}{n+1} \right)^2. \quad (4.7)$$

Втората карактеристична вредност на упадниот агол е 90° (т.е. кога упадниот зрак е паралелен со стаклената површина). Во тој случај, коефициентот на рефлексија е еднаков на единица. Тоа значи дека во настанатите околности светлината воопшто нема да навлезе во стаклото иако, математички гледано, од Шнеловата формула (4.5) за аголот на прекршување δ се добива вредност којашто не е еднаква на 90° . Во овој случај се вели дека настанала *тотална рефлексија*, а најмалиот упаден агол за којшто се јавува тоталната рефлексија се нарекува *агол на тоталната рефлексија*. Според

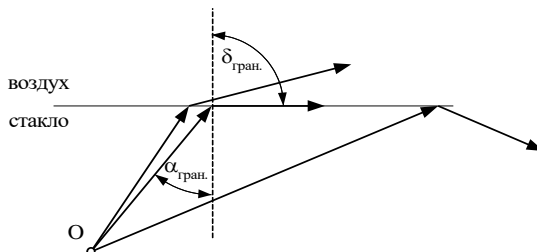
тоа, при одбивање на светлината од граничната површина помеѓу воздух и стакло аголот на тотална рефлексија е еднаков на 90° .



Слика 4.4 Зависност на коефициент на насочено одбивање од стаклена површина од упадниот агол и индексот на прекршување на стаклото

Кога одбивањето на светлината настанува на граничната површина стакло–воздух (т.е. кога упадниот зрак на светлината е во стаклото), граничната вредност на упадниот агол за којшто настанува тотална рефлексија зависи од индексот на прекршување на стаклото и таа може да се определи од (4.5), сметајќи дека при тоталната рефлексија во стаклото, аголот на прекршување во воздухот треба да биде еднаков на 90° (слика 4.5), т.е.

$$\alpha_{\text{Гран.}} = \arcsin \frac{\sin \delta_{\text{гран.}}}{n_{\text{стакло}}} = \arcsin \frac{\sin 90^\circ}{n_{\text{стакло}}} = \arcsin \frac{1}{n_{\text{стакло}}} . \quad (4.8)$$



Слика 4.5 Скица за дефиниција на аголот на тотална рефлексija

За сите вредности на упадниот агол на светлината во стаклото поголеми од вредноста на $\alpha_{\text{гран.}}$, определена со (4.8), светлината нема да се прекрши и да го напушти стаклото.

Тоталната рефлексija на светлината веќе подолго време се користи кај оптичките влакна за дигитален пренос на информации. Во последниве години оваа појава наоѓа примена и во светлотехниката за дистрибуција на светлината со помош на оптички влакна или светловоди. Повеќе детали за ова можат да се најдат во поглавјето б каде што се обработени светилките.

Да забележиме дека кај рамните планпаралелни плочи од провидни материјали, со својства слични на стаклото, се јавува и ефектот на повеќекратно одбивање. Оваа појава е детално објаснета во поглавјето 4.3.

Пример 4.1

Униформен светлински извор во вид на сфера со дијаметар $d = 0,2$ m и центар во О осветлува вертикална рамнина и е поставен на растојание $a = 3,5$ m од неа (слика 4.6). Флуксот што изворот го зрачи во целиот простор е $\Phi = 12\,566$ lm. Рамна огледална површина во вид на круг со дијаметар $d_1 = 5$ m и центар во точката Y е паралелна на осветлуваната рамна површина. Потребно е да се пресмета осветленоста во точката T од осветлуваната површина и сјајноста на изворот и неговиот лик, набљудувани од точката T. Точките О, Y и T припаѓаат на вертикална рамнина којашто е нормална на осветлуваната рамнина. Точките T и Y лежат на права што е нормална на осветлуваната рамнина и огледалото. Познати се и останатите растојанија коишто ги дефинираат меѓусебните положби на изворот, огледалото и точката T: $b = 2$ m и $a_1 = 1,5$ m. Осветлуваната рамнина не одбива светлина, а коефициентот на насочено одбивање на огледалото изнесува 0,9.

$$E_T = \frac{1000 \cdot 3,5}{\sqrt{(3,5^2 + 2^2)^3}} + \frac{0,9 \cdot 1000 \cdot (3,5 + 2 \cdot 1,5)}{\sqrt{[(3,5 + 2 \cdot 1,5)^2 + 2^2]^3}},$$

т.е.

$$E_T = E_{T(\text{дир.})} + E_{T(\text{инд.})} = \frac{3500}{65,506} + \frac{0,9 \cdot 6500}{314,534} \approx 53,4 + 18,6 = 72 \text{ lx}.$$

Сјајностите на изворот и неговиот лик ќе бидат:

$$L_{\text{извор}} = \frac{I}{\pi \cdot (d/2)^2} = \frac{1000}{\pi \cdot 0,1^2} \approx 31\,831 \text{ cd/m}^2 \text{ и}$$

$$L_{\text{лик}} = \rho \cdot L_{\text{извор}} = 0,9 \cdot 31\,831 \approx 28\,648 \text{ cd/m}^2.$$

Во примеров условите беа такви што овозможуваат светлинскиот извор да се смета за точкаст. Следствено, ниту осветленоста во точката Т ниту сјајноста на ликот на изворот не зависат од димензиите на огледалото.

4.2.2 Дифузно одбивање

Дифузното одбивање се јавува кај материјалите чишто површини се матирани, односно имаат нерамнини коишто се значително поголеми од брановата должина на светлината. Флуксот на одбиената светлина се распределува во просторен агол од 2π стерадијани, независно од големината на аголот под кој светлината паднала на одбивната површина. Сјајноста на површините коишто одбиваат идеално дифузно е еднаква во сите правци. Кај рамни површини што одбиваат дифузно, распределбата на светлинската јачина на одбиената светлина е според Ламбертовиот закон (слика 4.1.б).

Да ја пресметаме сјајноста на една мала површина, со плоштина ΔS , којашто одбива дифузно. Ако броителот и именителот од десната страна на равенката (4.3) ги поделиме со ΔS , уважувајќи ги равенките (3.25) и (3.32), се добива:

$$\rho = \frac{\Phi_p}{\Phi} = \frac{\Phi_p / \Delta S}{\Phi / \Delta S} = \frac{M}{E} = \frac{\pi \cdot L_p}{E}, \quad (4.9)$$

односно:

$$L_p = \frac{\rho}{\pi} \cdot E, \quad (4.10)$$

каде што со L_p е означена сјајноста на површината што одбива дифузно, додека со M и E се означени светлинската емисија и осветленоста на одбивната површина, соодветно.

Независно од големината на коефициентот на одбивање, во случај на дифузно одбивање не се создаваат ликови од светлинските извори и поради тоа кај овие материјали е намалена можноста за појава на рефлексно блескотење.

Иако во праксата не постојат материјали коишто одбиваат идеално дифузно, за голем број материјали коишто се користат во светлотехниката или за внатрешно уредување на просториите, со релативно голема точност, може да се каже дека одбиваат дифузно. На пример, дифузно одбиваат следните материјали: магнезиум оксид, бариум оксид, алабастер (ситнозрнест гипс), акрилни и минерални мат бои за сидови, текстилни материјали, немазна хартија, опален акрил итн.

Пример 4.2

Да се реши примерот 4.1 ако огледалото се замени со рамна површина што одбива дифузно и има исти димензии како и огледалото. Коэффициентот на дифузно одбивање на одбивната површина е 0,9.

И во овој случај осветленоста во точката Т ќе ја добиеме како збир на директната и индиректната компонента:

$$E_T = E_{T(\text{дир.})} + E_{T(\text{инд.})}$$

Големината на директната компонента е како во примерот 4.1.

Димензиите на одбивната површина не дозволуваат истата, во однос на точката Т, да се смета за точкаст извор. Одбивната површина не е рамномерно осветлена од изворот О и како резултат на тоа сјајноста на нејзините одделни делови не е еднаква. Поради тоа, за пресметка на индиректната компонента на осветленоста во точката Т не може да се примени равенката (3.73).

Индиректната компонента на осветленоста во точката Т ќе ја пресметаме со помош на нумеричка постапка и со примена на принципот на суперпозиција. За таа цел одбивната површина ја разделуваме на k еднакви компонентни површини, секоја со квадратен облик, должина на страницата Δx и плоштина ΔS . Притоа избираме Δx да биде доволно мало за осветленоста во средиштето на компонентната површина да биде приближно еднаква на нејзината средна осветленост. Растојанието од која и да е точка на одбивната површина до центарот на светлинскиот извор е најмалку 7,5 пати поголемо од дијаметарот на изворот. Поради тоа, при пресметка на осветленоста E_i , во точката X_i , која претставува средиште на компонентната површина i , светлинскиот извор можеме да го сметаме за точкаст и да ја применуваме (3.37). Така добиваме:

$$E_i = \frac{I \cdot \cos \beta_i}{OX_i^2} = \frac{I \cdot \cos^3 \beta_i}{a_i^2}, \quad (4.11)$$

каде со β_i е означен аголот што го зафаќа нормалата на компонентната површина i со правата определена со точките X_i и О.

Според (4.10), сјајноста на компонентната површина i ќе биде:

$$L_i = \frac{\rho}{\pi} \cdot E_i$$

Бидејќи компонентните површини зрачат светлина според Ламбертовиот закон, за светлинската јачина во правец на нормалата на компонентната површина i може да се напише:

$$I_{0i} = L_i \cdot \Delta S = \frac{\rho}{\pi} \cdot E_i \cdot \Delta S$$

Применувајќи го принципот на суперпозиција, индиректната компонента на осветленоста во точката Т може да се пресмета како сума од осветлености што во таа точка ги создаваат

компонентните површини (коишто, во однос на точката Т, може да се сметаат за точкasti извори). Така се добива:

$$E_{\text{инд.}} = \sum_{i=1}^k \frac{I_{0i} \cdot \cos \gamma_{T-X_i} \cdot \cos \beta_{T-X_i}}{TX_i^2} = \sum_{i=1}^k \frac{D}{\pi} \cdot E_i \cdot \Delta S \cdot \frac{\cos^4 \beta_{T-X_i}}{TY^2}, \quad (4.12)$$

каде што γ_{T-X_i} е агол што го зафаќа правата што поминува низ точките Т и X_i и нормалата во точката X_i , β_{T-X_i} е агол што го зафаќа правата што поминува низ точките Т и X_i и нормалата во точката Т, а k е бројот на елементарни површини со плоштина ΔS .

За да се постигне прифатлива точност при пресметката на $E_{\text{инд.}}$ со помош на (4.12), плоштината на компонентните површини треба да биде релативно мала. Ако се земе дека страницата Δx на компонентните површини е еднаква на 0,1 m, кружната одбивна површина може да се апроксимира со 1 949 компонентни површини со плоштина од 0,01 m². Се разбира, не е практично големиот број пресметки во (4.12) да се изврши рачно. За таа цел е направена следната процедура во MATLAB, именувана **primer_dif_odbivanje**.

```
function primer_dif_odbivanje(I,ro,n,D,xo,yo,zo,xt,yt,zt)
format ('short');
R = D/2;
dx = D / n; dS = dx * dx;
k = 0; Eav = 0; Eind = 0;
x = -R - dx;
for i = 1:n
    x = x + dx;
    y = -R - dx;
    for j = 1:n
        y = y + dx;
        xy = sqrt(x^2 + y^2);
        if xy <= R
            k = k + 1;
            xyo = sqrt((x - xo)^2 + (y - yo)^2);
            beta = atan(xyo/zo);
            Ei = I * cos(beta)^3 / zo^2;
            Eav = Eav + Ei;
            beta = atan(xy/zt);
            Eind = Eind + dS * (ro / pi) * Ei * cos(beta)^4 / zt^2;
        end
    end
end
Eav = Eav / k; Lav = Eav * ro / pi;
s = sprintf(' k=%6d;', k);
s=[s, sprintf(' dx=%7.4f m; dS=%7.4f m^2; D=%5.2f m\n', dx, dS, D)];
s = [s, sprintf(' I=%5.1f cd, ro=%5.2f\n', I, ro)];
s = [s, sprintf(' O(%5.2f,%5.2f,%5.2f)\n', xo, yo, zo)];
s = [s, sprintf(' T(%5.2f,%5.2f,%5.2f)\n', xt, yt, zt)];
s = [s, sprintf(' Esr=%5.1f lx\n', Eav)];
s = [s, sprintf(' %5.3f%%\n', 100*(k*dS-D^2*pi/4)/(D^2*pi/ 4))];
xy = sqrt((xo - xt)^2 + (yo - yt)^2);
beta = atan (xy / abs(zo - zt));
```

```

Edir = I * cos(beta)^3 / (zo - zt)^2;
s = [s, sprintf(' Et=%5.1f lx\n', Edir + Eind)];
s = [s, sprintf(' Edir=%5.1f lx Eind=%5.1f lx', Edir, Eind)];
disp(s);

```

Во продолжение се прикажани резултатите од пресметките направени со MATLAB:

```

>> primer_dif_odbivanje(1000,0.9,50,5,2,0,1.5,0,0,5);
k= 1949; dx= 0.1000 m; dS= 0.0100 m^2; D= 5.00 m
I=1000.0 cd, ro= 0.90
O( 2.00, 0.00, 1.50)
T( 0.00, 0.00, 5.00)
Esr=107.5 lx -0.738%
Et= 72.7 lx Edir= 53.4 lx Eind= 19.3 lx
>>

```

Според тоа, за осветленоста во точката Т добиваме:

$$E_T = E_{\text{диф}} + E_{\text{инд}} = 53,4 + 19,3 = 72,7 \text{ lx} .$$

Средната осветленост $E_{\text{ср}}$ на дифузната површина (т.е. на $k = 1949$ компонентни површини) се пресметува од следниот израз:

$$E_{\text{ср}} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{I \cdot \cos^3 \beta_i}{d_i^2} = \frac{1000}{1,5^2 \cdot 1949} \cdot \sum_{i=1}^{1949} \cos^3 \beta_i = 107,8 \text{ lx} ,$$

каде што ознаките го имаат истото значење како и во изразот (4.11).

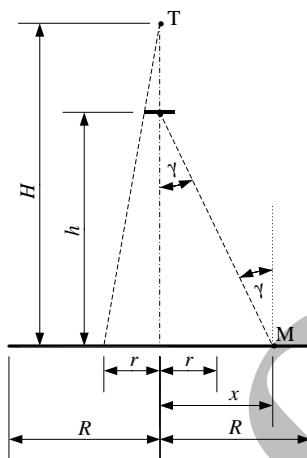
Според тоа, за средната сјајност на дифузната површина се добива:

$$L_{\text{ср}} = \frac{\rho}{\pi} \cdot E_{\text{ср}} = \frac{0,9}{\pi} \cdot 107,8 = 30,9 \text{ cd/m}^2 .$$

Како што може да се забележи, индиректната компонента на осветленоста во точката Т за овој случај е незначително поголема отколку соодветната компонента кога одбивната површина одбиваше насочено. Но, во овој случај, сјајноста на одбивната површина е многу пати помала, со што се елиминира рефлексното блескотење коешто беше присутно во примерот 4.1.

Пример 4.3

Униформно дифузен диск зрачи светлина само од едната страна и осветлува рамна кружна плоча. Дијаметарот на дискот е $d = 150 \text{ mm}$, а неговата дебелина може да се занемари. Вкупниот светлински флуks на дискот е 1200 lm . Кружната плоча има радиус $R = 5 \text{ m}$ и одбива дифузно со коефициент на одбивање $\rho = 0,9$. Оската на симетрија на дискот, што е нормална на неговата површина, е нормална и на кружната плоча и ја пробива во нејзиниот центар (слика 4.7). Растојанието од центарот на дискот до центарот на кружната плоча е $h = 0,8 \text{ m}$. Точката Т се наоѓа на правата определена со центрите на дискот и на кружната плоча. Растојанието од кружната плоча до точката Т е $H = 2 \text{ m}$. Да се пресмета осветленоста во точката Т. При пресметката да се земе дека точката Т лежи во рамнина паралелна на кружната плоча и да се занемари одбивната светлина од дискот.



Слика 4.7 Скица за примерот 4.3

Растојанието од центарот на дискот до која и да е точка од осветлуваната кружна плоча е повеќе од пет пати поголемо од дијаметарот на дискот. Поради тоа, при пресметка на осветленоста на точките од кружната плоча, може дискот да се смета за точкаст светлински извор.

Бидејќи дискот зрачи само од страната свртена кон кружната плоча, до точката Т може да дојде само светлина одбиена од кружната плоча. Попрецизно, до точката Т ќе доаѓа светлина одбиена од делот на кружната плоча што е во вид на кружен прстен, со надворешен радиус R и внатрешен радиус r . Тој дел од кружната плоча ќе го нарекуваме *меродавен кружен прстен*.

За определување на големината на внатрешниот радиус на меродавниот кружен прстен ќе ја искористиме сличноста на два правоаголни триаголника. Правоаголниот триаголник со катетите $H-h$ и $d/2$ и правоаголниот триаголник со катетите H и r имаат заеднички агол кај точката Т (слика 4.7). Значи, овие два правоаголни триаголника се слични и од пропорционалноста на соодветните катети следува:

$$r = \frac{d \cdot H}{2 \cdot (H - h)} = \frac{0,15 \cdot 2}{2 \cdot (2 - 0,8)} = 0,125 \text{ m}.$$

Во примерот 3.4 е покажано дека флуксот $\Phi_{\text{диск}}$, што го зрачи од едната страна униформно дифузен диск, е право пропорционален на неговата максимална светлинска јачина I_0 , при што коефициентот на пропорционалноста е π . Врз основа на тоа, за максималната светлинска јачина (чиј правец е нормален на површината на дискот), може да се пресмета:

$$I_0 = \frac{\Phi_{\text{диск}}}{\pi} = \frac{1200}{\pi} = 381,972 \text{ cd}.$$

Освен тоа, во услови кога еден униформно дифузен диск може да се смета за точкаст светлински извор, светлинската јачина во правец што со нормалата во неговиот центар зафаќа агол γ е $I_\gamma = I_0 \cdot \cos \gamma$.

Нека точката М (слика 4.7) е на меродавниот кружен прстен, на растојание x од центарот на кружната плоча. На таа точка соодветствува агол γ за кој е $\cos \gamma = h / \sqrt{h^2 + x^2}$. Така, врз основа на (3.37), за осветленост во точката М се добива:

$$E_M = \frac{I_\gamma}{h^2 + x^2} \cdot \cos \gamma = \frac{I_0 \cdot \cos \gamma}{h^2 + x^2} \cdot \cos \gamma = I_0 \cdot h^2 \cdot \frac{1}{(h^2 + x^2)^2}.$$

Кружната плоча одбива дифузно и според (4.10) за сјајноста на нејзината точка М следува:

$$L_M = \frac{\rho}{\pi} \cdot E_M = \frac{\rho}{\pi} \cdot I_0 \cdot h^2 \cdot \frac{1}{(h^2 + x^2)^2}.$$

При решавањето на примеров треба да се има увид во распределбата на сјајноста на точките од кружниот прстен. Лесно се покажува дека функцијата $L_M(x)$ нема екстрими и дека опаѓа со зголемувањето на x . Според тоа, најголема е сјајноста на точките од внатрешниот раб на меродавниот кружен прстен, а најмала на точките од надворешниот раб на меродавниот кружен прстен. Користејќи ја функцијата $L_M(x)$, за односот на тие сјајности се добива:

$$\frac{L_{x=r}}{L_{x=R}} = \left(\frac{h^2 + R^2}{h^2 + r^2} \right)^2 = \left(\frac{0,8^2 + 5^2}{0,8^2 + 0,125^2} \right)^2 = 1529,4.$$

Значи, постои голема разлика помеѓу сјајностите на одделни делови на меродавниот кружен прстен. Затоа, при решавањето на примеров не би било коректно да се смета дека сите точки од тој прстен се со приближно еднакви сјајности.

Поради симетрија на проблемот, еднакви сјајности имаат точките од меродавниот кружен прстен што лежат на кружница чиј центар е во центарот на меродавниот кружен прстен. Имајќи го тоа предвид, ќе замислиме елементарен кружен прстен чиј внатрешен радиус е x , а надворешен $x+dx$. Елементарниот кружен прстен одбива светлина дифузно и сјајноста на неговите точки е определена со $L_M(x)$.

Осветленоста во точката Т, од светлина одбиена од елементарниот кружен прстен, може да се определи со примена на (3.72). Таа осветленост ќе ја пресметаме како разлика помеѓу осветленоста од светлина одбиена од кружна плоча со радиус $x+dx$ и осветленоста од светлина одбиена од кружна плоча со радиус x . Притоа, сметаме дека двете кружни плочи лежат во рамнината на меродавниот кружен прстен, дека центрите на плочите се поклопуваат со центарот на меродавниот кружен прстен, дека плочите одбиваат дифузно и дека сјајностите им се еднакви. Според тоа, за осветленоста на точката Т од светлината одбиена од елементарниот кружен прстен може да се напише:

$$\begin{aligned} dE_T &= \pi \cdot L \cdot \left[\frac{(x+dx)^2}{H^2 + (x+dx)^2} - \frac{x^2}{H^2 + x^2} \right] \\ &= \pi \cdot L \cdot \left\{ \frac{(x^2 + 2 \cdot x \cdot dx + dx \cdot dx) \cdot (H^2 + x^2) - x^2 \cdot (H^2 + x^2 + 2 \cdot x \cdot dx + dx \cdot dx)}{[H^2 + (x+dx)^2] \cdot (H^2 + x^2)} \right\} \\ &= \pi \cdot L \cdot H^2 \cdot \frac{2 \cdot x \cdot dx}{(H^2 + x^2)^2}, \end{aligned}$$

при што е земено дека е $\left[H^2 + (x + dx)^2 \right] \cdot (H^2 + x^2) = (H^2 + x^2)^2$ и $dx \cdot dx = 0$ и од каде по заменување на изразот за сјајноста $L_M(x)$ следува:

$$dE_T = \rho \cdot I_0 \cdot h^2 \cdot H^2 \cdot \frac{2 \cdot x \cdot dx}{(h^2 + x^2)^2 \cdot (H^2 + x^2)^2}.$$

За да се добие осветленоста во точката Т од светлина одбиена од сите делови на меродавниот кружен прстен треба равенката за dE_T да се интегрира во границите од r до R , т.е.:

$$E_T = \rho \cdot I_0 \cdot h^2 \cdot H^2 \cdot \int_r^R \frac{2 \cdot x \cdot dx}{(h^2 + x^2)^2 \cdot (H^2 + x^2)^2}.$$

За решавање на интегралот од оваа равенка, најнапред, ќе ја употребиме смената $h^2 + x^2 = \xi$, по што се добива:

$$E_T = \rho \cdot I_0 \cdot h^2 \cdot H^2 \cdot \int_{h^2+r^2}^{h^2+R^2} \frac{d\xi}{\xi^2 \cdot (H^2 - h^2 + \xi)^2}. \quad (4.13)$$

Ако означиме:

$$q = H^2 - h^2,$$

применувајќи го познатиот метод на неопределени коефициенти, може подинтегралната функција од равенката (4.13) да се претстави како сума на елементарни рационални функции, на следниов начин:

$$\frac{1}{\xi^2 \cdot (q + \xi)^2} = \frac{1}{q^2} \cdot \left[-\frac{2}{q \cdot \xi} + \frac{1}{\xi^2} + \frac{2}{q \cdot (q + \xi)} + \frac{1}{(q + \xi)^2} \right].$$

Имајќи го тоа предвид, по интеграцијата на равенката (4.13), се добива:

$$E_T = \frac{\rho \cdot I_0 \cdot h^2 \cdot H^2}{q^2} \cdot \left(-\frac{1}{\xi} - \frac{1}{q + \xi} + \frac{2}{q} \cdot \ln \frac{q + \xi}{\xi} \right) \Big|_{h^2+r^2}^{h^2+R^2},$$

што по средувањето може да се напише во вид:

$$E_T = \frac{\rho \cdot I_0 \cdot h^2 \cdot H^2}{(H^2 - h^2)^2} \cdot \left[\frac{1}{h^2 + r^2} + \frac{1}{H^2 + r^2} - \frac{1}{h^2 + R^2} - \frac{1}{H^2 + R^2} + \frac{2}{H^2 - h^2} \cdot \ln \frac{(h^2 + r^2) \cdot (H^2 + R^2)}{(h^2 + R^2) \cdot (H^2 + r^2)} \right].$$

Кога во добиениот израз за E_T се заменат познатите вредности на големините, за осветленоста во точката Т се добива $E_T = 54,2 \text{ lx}$.

Сега да го решиме овој пример без аналитичко определување на интегралот од (4.13).

Меродавниот кружен прстен го разделуваме на n компонентни кружни прстени, така што ширината на секој од нив е $\Delta x = (R - r)/n$. Притоа, ќе сметаме дека сите точки од еден компонентен кружен прстен имаат сјајност еднаква на неговата средна сјајност.

Внатрешниот радиус на i -тиот компонентен кружен прстен ќе го означиме со x_i , а надворешниот со $x_{i+1} = x_i + \Delta x$. Од центарот на дискот тие радиуси се гледаат под агли: $\gamma_i = \arctg(x_i/h)$ и $\gamma_{i+1} = \arctg(x_{i+1}/h)$.

Користејќи го резултатот од примерот 3.4, за светлинскиот флукс што паѓа на i -тиот компонентен кружен прстен може да се напише:

$$\Phi_{\text{комп.прстен},i} = 2 \cdot \pi \cdot I_0 \cdot \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} \sin \gamma \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma = \frac{\pi \cdot I_0}{2} \cdot (-\cos 2\gamma) \Big|_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} = \frac{\pi \cdot I_0}{2} \cdot (\cos 2\gamma_i - \cos 2\gamma_{i+1}).$$

Средната осветленост на i -тиот компонентен кружен прстен се добива како количник помеѓу флуксот што паѓа на тој компонентен кружен прстен и неговата плоштина, т.е.:

$$E_{\text{ср.комп.прстен},i} = \frac{\Phi_{\text{комп.прстен},i}}{S_{\text{комп.прстен},i}} = \frac{\Phi_{\text{комп.прстен},i}}{\pi \cdot (x_{i+1}^2 - x_i^2)} = \frac{I_0}{2 \cdot (x_{i+1}^2 - x_i^2)} \cdot (\cos 2\gamma_i - \cos 2\gamma_{i+1}).$$

Натаму, бидејќи компонентните кружни прстени одбиваат дифузно, според (4.10), средната сјајност на i -тиот компонентен кружен прстен ќе биде:

$$L_{\text{ср.комп.прстен},i} = \frac{\rho}{\pi} \cdot E_{\text{ср.комп.прстен},i} = \frac{\rho \cdot I_0}{2 \cdot \pi \cdot (x_{i+1}^2 - x_i^2)} \cdot (\cos 2\gamma_i - \cos 2\gamma_{i+1}).$$

Потоа, со помош на (3.72), за осветленоста во точката Т од i -тиот компонентен кружен прстен може да се напише:

$$\Delta E_{T,i} = \pi \cdot L_{\text{ср.комп.прстен},i} \cdot \left(\frac{x_{i+1}^2}{x_{i+1}^2 + H^2} - \frac{x_i^2}{x_i^2 + H^2} \right) = \frac{\rho \cdot \Phi_{\text{диск}} \cdot H^2}{2 \cdot \pi \cdot (x_{i+1}^2 + H^2) \cdot (x_i^2 + H^2)} \cdot (\cos 2\gamma_i - \cos 2\gamma_{i+1}).$$

Според тоа, осветленоста во точката Т од сите компонентни кружни прстени ќе биде:

$$E_T = \sum_1^n \Delta E_{T,i} = \frac{\rho \cdot \Phi_{\text{диск}} \cdot H^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_1^n \frac{1}{(x_{i+1}^2 + H^2) \cdot (x_i^2 + H^2)} \cdot (\cos 2\gamma_i - \cos 2\gamma_{i+1}). \quad (4.14)$$

Со познатите вредности на големините и за различни броеви на компонентни кружни прстени (n), со помош на (4.14) се пресметани вредности за осветленоста на точката Т прикажани во табелата 4.1. Притоа е земено $x_1 = r$.

Табела 4.1 Пресметани осветлености во точката Т за различни броеви на компонентни кружни прстени

Број на компонентни кружни прстени	Осветленост во точката Т (lx)
1	11,2
2	29,0
5	49,3
15	53,6
60	54,2

Резултатите од табелата 4.1 укажуваат дека, во разгледуваниот случај, се добива неприфатлив резултат кога се земе дека сите точки од меродавниот кружен прстен имаат сјајност еднаква на неговата средна сјајност. Но тоа не значи дека во случаите со помала разлика помеѓу најмалата и најголемата сјајност таквото упростување не може да доведе до прифатлив резултат.

4.2.3 Полудифузно одбивање

Кај полудифузното одбивање флуksот на одбиената светлина е распределен во просторен агол којшто е значително помал од 2π стерадијани, како што тоа е прикажано на сликата 4.1.в. Најголемата светлинска јачина на одбиената светлина е во правецот што се поклопува со правецот карактеристичен за насочено одбивање. Површините што одбиваат полудифузно создаваат нејасни ликови со релативно мала сјајност. Јасноста на ликовите зависи од просторниот агол во којшто се зрачи одбиената светлина. На помалите вредности на овој агол им одговараат помалку нејасни ликови, додека на поголемите вредности им одговараат повеќе нејасни ликови.

Полудифузно одбивање се јавува кај матирани метални површини, лакирани површини, мазна хартија (слика 3.29.а), порцелан, емајл и сл.

4.2.4 Мешано одбивање

Мешано одбивање се нарекува одбивањето кај коешто распределбата на одбиената светлина, во најголем број случаи, може да се претстави како суперпозиција на распределбите во претходните три начини на одбивање, како што е прикажано на сликите 4.1.г и 4.1.ѓ. Во овој случај светлинската јачина на одбиената светлина има два максимума: еден во правец на нормалата на одбивната површина и друг во правец во кој би се одбила светлината во случај на насоченото одбивање. Кај површините што одбиваат мешано односот помеѓу флуksот на двете компоненти зависи од големината на аголот под кој светлината паѓа на одбивната површина, од измазнетоста на одбивната површина и од светлотехничките особини на материјалот од кој светлината се одбива. Во поглед на ликовите што се создаваат по одбивањето од површините што одбиваат мешано, може да се рече дека тие уште повеќе се деформирани отколку кај полудифузното одбивање и нивната сјајност е уште помала.

Во материјалите што одбиваат мешано спаѓаат: млечното стакло, мермерот, порцуланскиот емајл и др.

4.3 Пропуштање на светлината

Односот помеѓу светлинскиот флуks Φ_τ што преминува во друга средина и светлинскиот флуks Φ што паѓа на граничната површина меѓу две средини, се нарекува коефициент на пропуштање. Тој коефициент се означува со τ и за него важи:

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi} . \quad (4.15)$$

Аналогно на одбивањето, и пропуштањето на светлината може да се јави како: насочено, дифузно, полудифузно и мешано.

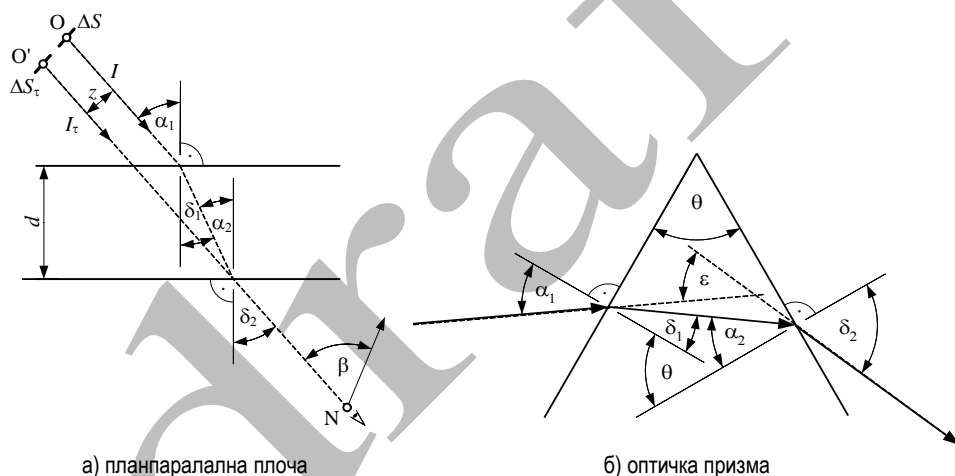
4.3.1 Насочено пропуштање

Насоченото пропуштање е такво пропуштање при кое светлината, минувајќи низ друга средина, ја задржува големината и обликот на просторниот агол во кој била распределена пред пропуштањето. Примери за таквото пропуштање се прикажани на сликите 4.8.а и 4.8.б.

Во случај кога светлината минува низ планпаралелна плоча од провиден материјал (слика 4.8.а), пропуштените светлински зраци го имаат истиот правец како и пред пропуштањето, само се поместени паралелно. Големината на паралелното поместување може да се пресмета на следниов начин:

$$z = \frac{d \cdot \sin(\alpha_1 - \delta_1)}{\cos \delta_1} = d \cdot \sin \alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}} \right), \quad (4.16)$$

каде што n е индексот на прекршување на материјалот од којшто е направена плочата.



Слика 4.8 Насочено пропуштање

Од равенката (4.16) се гледа дека големината на поместувањето зависи од аголот под кој паѓаат светлинските зраци на плочата, од индексот на прекршувањето на употребениот материјал и од дебелината на плочата. Најчесто, ова поместување не е големо и може да се занемари. Така, на пример, ако е $d = 3 \text{ mm}$, $n = 1,5$ и $\alpha_1 = 45^\circ$, од равенката (4.16) ќе се добие $z = 0,987 \text{ mm}$.

Низ плочата, која има особина насочено да пропушта светлина, се гледа недеформиран лик на светлинскиот извор (предметот на набљудување). Во случај на пропуштање низ планпаралелна плоча е:

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi} = \frac{I_\tau \cdot \Delta\Omega_\tau}{I \cdot \Delta\Omega} = \frac{I_\tau}{I} = \frac{L_\tau \cdot \Delta S_\tau}{L \cdot \Delta S} = \frac{L_\tau}{L}, \quad (4.17)$$

при што употребените ознаки се аналогни на тие во равенката (4.4). Од равенката (4.17) може да сезаклучи дека сјајноста и Слкот на изворот, што се гледа низ планпаралелна плоча, е еднаква на производот на коефициентот на пропуштањето на плочата и сјајноста на изворот, набљудуван во истиот правец при непостоење на плочата. Аналогна релација важи и за светлинските јачини.

И во случај на насочено пропуштање осветленоста може да се пресмета со формулата (3.37), која за овој случај може да се напише во вид:

$$E_N = \frac{I_\tau \cdot \cos\beta}{ON^2}, \quad (4.18)$$

каде што со I_τ е означена светлинската јачина на пропуштената светлина, а β е аголот што го зафаќаат правецот $O'N$ и нормалата на осветлуваната површина во точката N .

Во множеството материјали што пропуштаат насочено во прв ред спаѓаат безбојните и слабо обоените стакла.

Значителна промена на правецот на светлинските зраци може да се постигне со нивното пропуштање низ провидна средина ограничена со две непаралелни површини (т.н. оптичка призма, претставена на сликата 4.8.б). Како што се гледа од сликата 4.8.б, промената на правецот на простирањето на светлината е за агол ε (наречен агол на девијацијата), кој е еднаков на:

$$\varepsilon = (\alpha_1 - \delta_1) + (\delta_2 - \alpha_2).$$

Бидејќи аголот на призмата е $\theta = \delta_1 + \alpha_2$, за аголот на девијацијата може да се напише:

$$\varepsilon = \alpha_1 + \delta_2 - \theta. \quad (4.19)$$

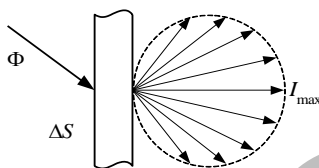
Ако имаме предвид дека аголот на прекршување δ_2 од (4.19) зависи од индексот на прекршување на материјалот од којшто е направена оптичката призма, со соодветен избор на α_1 , n и θ може да се постигне саканата промена на правецот на простирањето на светлинските зраци за агол ε .

4.3.2 Дифузно пропуштање

При дифузното пропуштање распределбата на светлинската јачина на пропуштената светлина е според Ламбертовиот закон. Фотометриското тело на пропуштената светлина е во вид на сфера (слика 4.9), при што најголемата светлинска јачина се јавува во правец на нормалата на површината што пропушта дифузно. Упадниот флукс може да се изрази како производ на осветленоста E на површината на којашто флуксот паѓа и плоштината ΔS на таа површина. Од друга страна, според (3.21), флуксот на пропуштената светлина е пропорционален на максималната светлинска јачина. Со тоа, (4.15) може да се напише во обликот:

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi} = \frac{\pi \cdot I_{\max}}{E \cdot \Delta S} = \frac{\pi \cdot L_\tau}{E} = \frac{M_\tau}{E}, \quad (4.20)$$

каде што со L_τ и M_τ се означени сјајноста и светлинската емисија на граничната површина од страната на пропуштената светлина.



Слика 4.9 Дифузно пропуштање

Од (4.20) за сјајноста на површината што дифузно ја пропушта светлината следува:

$$L_\tau = \frac{\tau}{\pi} \cdot E. \quad (4.21)$$

Равенката (4.21) укажува дека сјајноста на граничната површина што ја пропушта светлината е директно пропорционална на осветленоста на приемната површина на телото, при што факторот на пропорционалност е τ/π .

Меѓу материјалите што дифузно пропуштаат светлина спаѓаат разни опални стакла (млечни стакла). Тие стакла се состојат од еднородна маса на провидно стакло во која се наоѓаат провидни честички од материјал со друг индекс на прекршување. Поради тоа, минувајќи низ опалното стакло, светлината многукратно го менува својот правец и како резултат на тоа пропуштената светлина е дифузна. Оваа дифузија ќе биде дотолку посовршена колку што се поситни и побројни внесените честички. За да не дојде до насочено пропуштање кај опалните стакла, потребно е тие да имаат голема концентрација на многу ситни честички, но тоа неминовно влијае врз намалувањето на коефициентот на пропуштањето. Една од честите примени на материјалите што пропуштаат дифузно е при изработката на светилки чијашто сјајност не треба да биде голема, дури и кога во нив се поставуваат сијалици со голема сјајност.

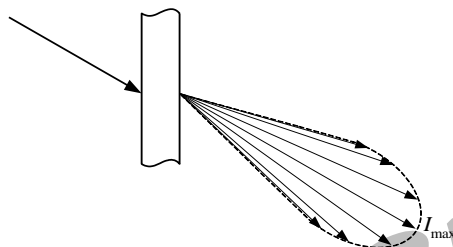
4.3.3 Полуифузно пропуштање

Полуифузното пропуштање се одликува со распределба на пропуштениот светлински флуks во поголем просторен агол, во споредба со просторниот агол во кој бил распределен пред пропуштањето (слика 4.10). Притоа, максималната светлинска јачина е во истиот правец како и кога пропуштањето би било насочено.

Меѓу материјалите што пропуштаат полуифузно најпознати се матираните стакла. Матирањето се изведува механички или хемиски. Обично се матира само едната површина на стаклото. Постигнатите коефициенти на пропуштањето зависат од начинот на матирањето и најчесто изнесуваат од 0,7 до 0,9.

Материјалите што пропуштаат полуифузно се користат за слични намени како и материјалите што пропуштаат дифузно. Во тој поглед тие ги немаат особините

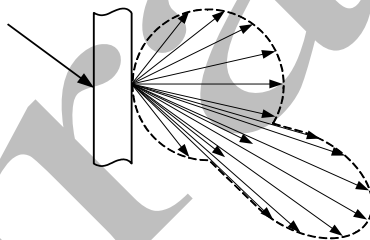
на опалните стакла, но од нив се поевтини и имаат поголем коефициент на пропуштање. Тоа е причината што овие материјали имаат широка примена.



Слика 4.10 Полудифузно пропуштање

4.3.4 Мешано пропуштање

Мешано пропуштање имаме во случај кога едниот дел од пропуштениот флуks има особини на дифузно пропуштен флуks, а другиот дел има особини на полудифузно пропуштен флуks, како што е прикажано на сликата 4.11. Од таа слика се гледа дека светлинската јачина на пропуштената светлина има два максимума. Еден во правец на нормалата на излезната површина и друг во правецот по кој би се простирила светлината во случај на насочено пропуштање.



Слика 4.11 Мешано пропуштање

4.4 Карактеристики на некои светлотехнички материјали

Во табелата 4.2 се прикажани коефициентите на одбивањето, пропуштањето и впивањето на некои материјали коишто имаат примена во светлотехниката. Податоците изнесени во табелата 4.2 се земени од повеќе извори и прикажаните вредности за коефициентите на одбивање, пропуштање или впивање претставуваат најголеми вредности кај материјалите со комерцијална примена. Токму поради тоа кај некои материјали збирот на трите коефициенти (изразен во проценти) може да биде поголем од 100.

Светлината што материјалот ќе ја впиe во себе се претвора во топлина што се манифестира со зголемување на неговата температура. Со оглед на тоа што енергијата апсорбирана во материјалите нема практична употреба и има третман на загуби, во

светлотехниката се тежнее да се користат материјали со мали коефициенти на впивање.

Табела 4.2 Светлотехнички карактеристики на некои материјали [5,22,76]

Материјал	Коефициенти на одбивање, пропуштање и впивање (%)				Индекс на прекршување
	насочено одбивање ³⁷	дифузно одбивање ³⁷	пропуштање ³⁷	впивање	
Тенок подобрен алуминиум	95,0	4,0			
Анодизиран алуминиум	88,0	6,0			
Супер чист алуминиум	80,0	0,0			
Полирано сребро	95,0	1,4			
Алумининизирано стакло или пластика	94,0	0,0			
Хром	65,0	0,0			
Полиран некородиращки челик	60,0	0,0			
Бела лак боја	5,0	до 75,0		над 20,0	
Кварцно безбојно стакло (3 mm)	8,0	0,0	92,0	до 3,0	1,62
Обично безбојно стакло (3 mm)	8,0	0,0	92,0	до 3,0	1,52
Провидна акрилна пластика (3 mm)	8,0	0,0	92,0		1,49
Опална акрилна пластика (3 mm)	4,0	10,0÷15,0	50,0÷80,0		
Полистирен (3 mm)	8,0	0,0	90,0	2,0	1,60
PVC (3 mm)	8,0	0,0	80,0	12,0	1,52
Поликарбонат (3 mm)	8,0	0,0	88,0	4,0	1,58
Матирано стакло (механички)		12,0÷15,0	72,0÷85,0 ³⁸	3,0÷8,0	
Матирано стакло (хемиски)		9,0÷13,0	75,0÷89,0 ³⁸	2,0÷12,0	
Млечно стакло (густо)		30,0÷76,0	10,0÷66,0 ³⁸	4,0÷28,0	
Млечно стакло (добро пропусно)		40,0÷50,0	45,0÷55,0 ³⁸	4,0÷6,0	
Магнезиум оксид	0,0	96,0			
Бариум оксид	0,0	95,0			
Алабастер	0,0	92,0			
Бела акрилна боја	0,0	80,0			

³⁷ Коефициентите на одбивање и пропуштање за материјалите коишто пропуштаат светлина во себе го имаат вклучено ефектот на повеќекратно одбивање. Во случаите на насочено одбивање и пропуштање тие се определени за случај кога упадниот агол е еднаков на нула.

³⁸ Дифузно и полудифузно

Зависноста на коефициентите на одбивањето и пропуштањето од спектралниот состав на упадната светлина е искористена за изработка на филтри со чија помош се постигнуваат определени ефекти.

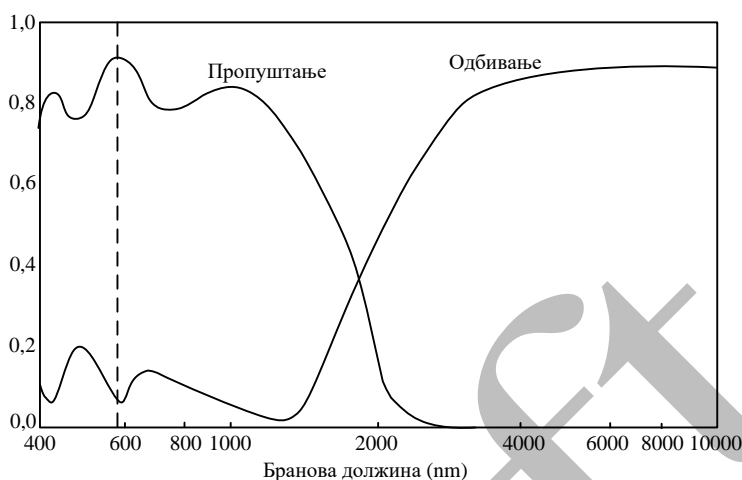
По правило, материјалите имаат поголем коефициент на впивање за зрачењата со помали бранови должини. Како пример ќе го наведеме обичното стакло за прозорци. Тоа добро ја пропушта видливата светлина, но многу слабо ги пропушта ултравиолетовите зраци. Од друга страна, коефициентот на впивање на ултравиолетовите зраци за кварцното стакло е значително помал отколку соодветниот коефициент за обичното стакло.

Поради поголемата издржливост на високи температури, кварцното стакло има голема примена за изработка на стаклените балони за некои видови сијалици. Покрај светлина, сите примарни светлински извори произведуваат топлина и ултравиолетови зраци, а ултравиолетовите зраци имаат негативен ефект врз многу материјали и живите суштества. Поради тоа, кога како материјал за изработка на стаклените балони се користи кварцно стакло, е потребно со дополнителни мерки да се намали ултравиолетовото зрачење. Тоа се прави со поставување на ултравиолетови филтри коишто се изработуваат од провидни материјали со многу голем коефициент на впивање за ултравиолетовите зраци.

Во седумдесетите години од XX век на пазарот се појавуваат *дихроик* (*dichroic*) рефлексивни материјали или дихроик филтри. Овие материјали ја одбиваат светлината и за зраците од видливиот дел од спектарот на оптичкото зрачење имаат многу пати поголем коефициент на одбивање отколку соодветниот коефициент за инфрацрвените зраци, но и поголем коефициент на пропуштање на топлинските зраци отколку за светлината. Со помош на дихроик материјалите може да се постигне таканаречен „студен“ сноп на светлина, така што осветлените предмети се изложени на многу слабо инфрацрвено зрачење.

Постојат материјали коишто создаваат спротивен ефект од ефектот на дихроик филтрите. Имено со соодветна технолошка постапка може да се добие материјал којшто пропушта светлина и чијшто коефициент на одбивање за инфрацрвените зраци е многу пати поголем отколку коефициентот на одбивање за видливата светлина. Овие материјали се наречени *IRC филтри*. Кај некои видови сијалици на внатрешната страна на стаклените балони се нанесуваат IRC филтри коишто ја пропуштаат светлината, а топлината ја одбиваат кон изворот на светлината (вжарено волфрамово влакно или стаклен сад во којшто се одвива празнење низ гасови). На тој начин се постигнува намалување на загубите на топлина, а со тоа и повисока енергетска ефикасност на сијалицата.

Индиум оксидот е еден од материјалите коишто се користат за изработка на IRC филтри. На сликата 4.12 се прикажани коефициентите на пропуштање и одбивање на индиум оксидот во зависност од брановата должина на оптичкото зрачење.



Слика 4.12 Зависност на коефициентите на пропуштање и одбивање на индиум оксидот од брановата должина на оптичкото зрачење [5]

4.5 Повеќекратно одбивање

Појавата на повеќекратно одбивање на светлината се јавува во сите случаи кога медиумот во којшто се простираат светлинските бранови е ограничен со конечни површини коишто ја одбиваат светлината. Најнапред ќе разгледаме два карактеристични случаја врз основа на коишто можат да се изведат општи заклучоци. Првиот случај е повеќекратното одбивање кај планпаралелна плоча од провиден материјал, додека вториот случај е повеќекратно одбивање во затворена сфера.

4.5.1 Повеќекратно одбивање во планпаралелна плоча од провиден материјал

Набљудуваме планпаралелна плоча од стакло којашто ја одбива и пропушта светлината. Ќе го разгледаме случајот кога и одбивањето и пропуштањето се насочени, иако заклучоците важат и за останатите начини на пропуштање и одбивање. На плочата паѓа светлински флуks Φ_0 (слика 4.13). Коефициентот на насочено одбивање се пресметува со Френеловата формула (4.6).

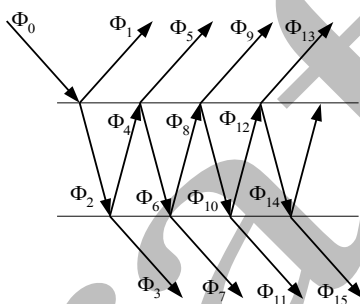
Делот од упадниот флуks Φ_0 што ќе се одбие од граничната површина помеѓу воздухот и стаклото ќе го означиме со Φ_1 и тој е $\Phi_1 = \rho \cdot \Phi_0$. Остатокот од упадниот флуks делумно ќе се впиe во стаклото, а другиот дел минувајќи низ стаклото ќе дојде до граничната површина стакло–воздух. На таа гранична површина ќе пристигне флуksот $\Phi_2 = \tau \cdot \Phi_0$.

На граничната површина стакло–воздух настануваат аналогни процеси како и на граничната површина воздух–стакло. Плочата ќе ја напушти флуksот Φ_3 којшто е:

$$\Phi_3 = \tau \cdot \Phi_2 = \tau^2 \cdot \Phi_0,$$

додека флуksот одбиен од граничната површина стакло–воздух ќе остане во стаклото (на сликата 4.13 овој флуks е означен со Φ_4) и ќе падне на другата гранична површина стакло–воздух. Да забележиме дека од (4.6) произлегува дека коефициентот на одбивање од граничната површина стакло–воздух е еднаков на коефициентот на одбивање од граничната површина воздух–стакло. Значи, флуksот Φ_4 е:

$$\Phi_4 = \rho \cdot \Phi_2 = \rho \cdot \tau \cdot \Phi_0.$$



Слика 4.13 Скица за повеќекратно одбивање во планпаралелна плоча од провиден материјал

Процесот на повеќекратно одбивање продолжува со бесконечно многу одбивања и пропуштања на граничните површини на планпаралелна плоча. Освен првите четири компоненти на флуksот, на сликата 4.13 се прикажани уште неколку компоненти од одбиениот и пропуштениот флуks. За нив може да се напише:

$$\Phi_5 = \tau \cdot \Phi_4 = \rho \cdot \tau^2 \cdot \Phi_0, \quad \Phi_6 = \rho \cdot \Phi_4 = \rho^2 \cdot \tau \cdot \Phi_0, \quad \Phi_7 = \tau \cdot \Phi_6 = \rho^2 \cdot \tau^2 \cdot \Phi_0,$$

$$\Phi_8 = \rho \cdot \Phi_6 = \rho^3 \cdot \tau \cdot \Phi_0, \quad \Phi_9 = \tau \cdot \Phi_8 = \rho^3 \cdot \tau^2 \cdot \Phi_0 \text{ итн.}$$

Врз основа на овие формули не е тешко да се определат и формулите за пресметка на другите компоненти на одбиениот и пропуштениот флуks. Вкупниот флуks што ќе биде одбиен од стаклената планпаралелна плоча ќе се добие како сума на сите соодветни компоненти,³⁹ т.е.

$$\Phi_{\text{одбиен}} = \Phi_1 + \Phi_5 + \Phi_9 + \Phi_{13} + \dots = \Phi_0 \cdot \left[\rho + \rho \cdot \tau^2 \cdot (1 + \rho^2 + \rho^4 + \dots) \right], \quad (4.22)$$

додека за вкупниот флуks пропуштен низ планпаралелната плоча може да се напише:

³⁹ Всушност одбиените компоненти на флуksот не се јавуваат едновременно, т.е. одделните компоненти на одбиениот флуks соодветствуваат на упадни флуksови од различни моменти на време. Аналогната забелешка важи и за компонентите на пропуштениот флуks.

$$\Phi_{\text{пропуштен}} = \Phi_3 + \Phi_7 + \Phi_{11} + \Phi_{15} + \dots = \Phi_0 \cdot \tau^2 \cdot (1 + \rho^2 + \rho^4 + \rho^6 + \dots). \quad (4.23)$$

Од равенките (4.22) и (4.23) можат да се добијат коефициентите на одбивање и пропуштање за планпаралелната плоча, со уважување на ефектот на повеќекратно одбивање. Така, со делење на равенката (4.22) со Φ_0 , за коефициентот на повеќекратно одбивање од плочата се добива:

$$\rho_{\text{пов.}} = \frac{\Phi_{\text{одбиен}}}{\Phi_0} = \rho + \rho \cdot \tau^2 \cdot (1 + \rho^2 + \rho^4 + \rho^6 + \dots). \quad (4.24)$$

Бидејќи е секогаш $\rho^2 < 1$, сумата на бесконечниот геометриски ред од (4.24) е конечна, т.е.

$$1 + \rho^2 + \rho^4 + \rho^6 + \dots = \frac{1}{1 - \rho^2}. \quad (4.25)$$

Според тоа, од (4.24) и (4.25) следува:

$$\rho_{\text{пов.}} = \rho \cdot \left(1 + \frac{\tau^2}{1 - \rho^2} \right). \quad (4.26)$$

Како што може да се види од (4.26), при уважување на повеќекратното одбивање од граничните површини на планпаралелната плоча, коефициентот на повеќекратно одбивање е поголем отколку коефициентот на одбивање пресметан со Френеловата формула.

Да забележиме дека коефициентот на впивање за провидните стакла е релативно мал (според податоците од табелата 4.2 тој не е поголем од 3%) и поради тоа често се занемарува. Во тој случај е $\tau = 1 - \rho$ и равенката (4.26) го добива обликот:

$$\rho_{\text{пов.}} = \rho \cdot \left[1 + \frac{(1 - \rho)^2}{1 - \rho^2} \right] = \frac{2 \cdot \rho}{1 + \rho}. \quad (4.27)$$

На сличен начин, уважувајќи го повеќекратното одбивање од граничните површини на планпаралелната плоча, ако равенката (4.23) се подели со Φ_0 , за коефициентот на повеќекратно пропуштање низ плочата, се добива:

$$\tau_{\text{пов.}} = \frac{\Phi_{\text{пропуштен}}}{\Phi_0} = \tau^2 \cdot (1 + \rho^2 + \rho^4 + \rho^6 + \dots), \quad (4.28)$$

од каде што, имајќи ја предвид (4.25), следува:

$$\tau_{\text{пов.}} = \frac{\tau^2}{1 - \rho^2}. \quad (4.29)$$

За случаите кога коефициентот на впивање може да се занемари, од (4.29) за коефициентот на повеќекратно пропуштање низ планпаралелната плоча може да се напише:

$$\tau_{\text{пов.}} = \frac{(1-\rho)^2}{1-\rho^2} = \frac{1-\rho}{1+\rho} = 1-\rho_{\text{пов.}} \quad (4.30)$$

Пример 4.4

Врз планпаралелна плоча од стакло со индекс на прекршување 1,5 паѓа светлински флуks Φ . Да се пресметаат коефициентите на одбивање од стаклената плоча и пропуштање низ стаклото со и без уважување на ефектот на повеќекратно одбивање, за пет вредности на упадниот агол на светлинските зраци: 0° , 45° , 60° , 75° и 85° . Да се претпостави дека впирањето на светлината во стаклото може да се занемари.

Да го разгледаме случајот кога упадниот агол е еднаков на 0° . Од (4.5) произлегува дека, во тој случај, аголот на прекршување е $\delta=0^\circ$. Коефициентот на одбивање од граничната површина воздух–стакло (и од граничната површина стакло–воздух), пресметан со помош на (4.7) е:

$$\rho = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(\frac{1,5-1}{1,5+1} \right)^2 = 0,04$$

и воедно тоа ќе биде коефициентот на одбивање од стаклената плоча во случајот кога се занемарува ефектот на повеќекратно одбивање. Бидејќи коефициентот на впирање може да се занемари, коефициентот на пропуштање е $\tau = 1-\rho$ и за флуksот што ќе помине низ стаклената плоча се добива:

$$\Phi'_{\text{пропуштен}} = (1-\rho)^2 \cdot \Phi,$$

од каде што, при занемарување на повеќекратното одбивање, за односот помеѓу флуksот пропуштен низ плочата и флуksот што на неа паднал, следува:

$$\tau' = (1-\rho)^2 = (1-0,04)^2 = 0,9216.$$

Да забележиме дека е $\rho + \tau' < 1$ иако впирањето во стаклото го занемаривме. Но, со неуважувањето на повеќекратното одбивање претпоставуваме дека делот од флуksот што ќе се одбие на втората гранична површина (на сликата 4.13 означен со Φ_4) е „заробен“ во плочата, така што тој има третман на загуби (впирање).

Ако не се занемари ефектот на повеќекратното одбивање, според (4.27), за коефициентот на повеќекратно одбивање од плочата следува:

$$\rho_{\text{пов.}} = \frac{2 \cdot \rho}{1+\rho} = \frac{2 \cdot 0,04}{1,04} \approx 0,07692,$$

а врз основа на (4.30), за коефициентот на повеќекратно пропуштање низ плочата се добива:

$$\tau_{\text{пов.}} = \frac{1-\rho}{1+\rho} = \frac{0,96}{1,04} \approx 0,92308.$$

Со истата постапка се пресметуваат коефициентите и за останатите упадни агли. Резултатите од пресметките се прикажани во табелата 4.4.

Табела 4.3 Коефициенти на одбивање и пропуштање на планпаралелната плоча за разни упадни агли ($n=1,5$)

Упаден агол α	Агол на прекршување δ	Без повеќекратно одбивање		Со повеќекратно одбивање	
		ρ	τ'	$\rho_{\text{пов.}}$	$\tau_{\text{пов.}}$
0°	0,0°	0,04000	0,92160	0,07692	0,92308
45°	28,1°	0,05024	0,90204	0,09567	0,90433
60°	35,3°	0,08919	0,82958	0,16377	0,83623
75°	40,1°	0,17104	0,55792	0,29212	0,70788
85°	41,6°	0,61280	0,14992	0,75992	0,24008

Како што може да се забележи од податоците изложени во табелата 4.3, ефектот на повеќекратно одбивање влијае врз зголемување како на вкупниот флукс одбиен од плочата така и на вкупниот флукс пропуштен низ плочата.

Кога ќе стане збор за коефициентите на пропуштање и одбивање на материјалите коишто пропуштаат светлина, ако поинаку не биде кажано, во натамошниот текст ќе се подразбира дека се однесуваат за случајот кога повеќекратното одбивање не е занемарено.

4.5.2 Повеќекратно одбивање во затворени простори ограничени со сферна површина

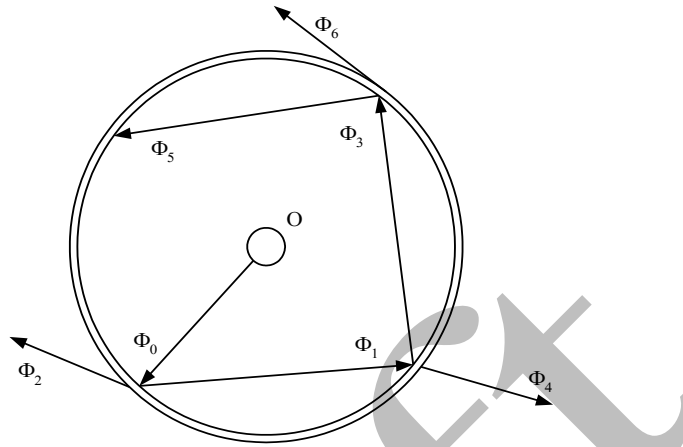
Набљудуваме сфера од стакло што пропушта светлина, при што дебелината на стаклото е многу помала од дијаметарот на сферата. Познати се коефициентите на одбивање и пропуштање за материјалот од којшто е изработена сферата, ρ и τ , соодветно. Во центарот на сферата е поставен светлински извор чијшто флукс, израчен во целиот простор, изнесува Φ_0 . Ќе претпоставиме дека изворот не впира светлина.

Флуксот што изворот го зрачи во просторот целосно ќе падне на внатрешната површина на сферата. Дел од тој флукс, на сликата 4.14 означен со Φ_1 , ќе се одбие од површината на сферата, при што е:

$$\Phi_1 = \rho \cdot \Phi_0. \quad (4.31)$$

Делот од флуксот што ќе помине низ стаклото и ќе ја напушти сферата е пропуштениот флукс означен со Φ_2 и тој изнесува:

$$\Phi_2 = \tau \cdot \Phi_0. \quad (4.32)$$



Слика 4.14 Скица на повеќекратно одбивање во сфера од материјал што пропушта светлина

Одбиениот флуks Φ_1 целосно ќе падне на внатрешната површина од сферата и тој, како и флуksот Φ_0 , делумно ќе се одбие како флуks Φ_3 и делумно ќе биде пропуштен низ стаклото како флуks Φ_4 . Овој процес на одбивање и пропуштање ќе продолжи до бесконечност. Така, на внатрешната површина на сферата ќе падне вкупен флуks којшто може да се пресмета како збир на директниот и одбиените флуkсови:

$$\Phi_{\text{внатр.}} = \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_3 + \Phi_5 + \dots = \Phi_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_{2i-1}, \quad (4.33)$$

додека вкупниот флуks што ќе ја напушти сферата претставува збир на пропуштените флуkсови:

$$\Phi_{\text{пропуштен}} = \Phi_2 + \Phi_4 + \Phi_6 + \dots = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_{2i}. \quad (4.34)$$

Уважувајќи ги равенките (4.31) и (4.32), равенките (4.33) и (4.34) можеме да ги напишеме на следниот начин:

$$\Phi_{\text{внатр.}} = \Phi_0 \cdot (1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots) \quad \text{и} \quad (4.35)$$

$$\Phi_{\text{пропуштен}} = \tau \cdot \Phi_0 \cdot (1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots) = \tau \cdot \Phi_{\text{внатр.}}. \quad (4.36)$$

Бидејќи е $0 < \rho < 1$, равенките (4.35) и (4.36) можат да се напишат во вид:

$$\Phi_{\text{внатр.}} = \Phi_0 \cdot \frac{1}{1 - \rho}, \quad (4.37)$$

$$\Phi_{\text{пропуштен}} = \Phi_0 \cdot \frac{\tau}{1 - \rho}, \quad (4.38)$$

а за коефициентите на повеќекратно одбивање и пропуштање се добива:

$$\rho_{\text{пов.}} = \frac{\Phi_{\text{внатр.}}}{\Phi_0} = (1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots) = \frac{1}{1 - \rho}, \quad (4.39)$$

$$\tau_{\text{пов.}} = \frac{\Phi_{\text{пропуштен}}}{\Phi_0} = \tau \cdot (1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots) = \frac{\tau}{1 - \rho} = \frac{\tau}{\alpha + \tau}. \quad (4.40)$$

Коефициентот на повеќекратно пропуштање низ сферата често се нарекува и *коефициент на искористување* и, најчесто, се означува со η . Коефициентот на искористување на сферата може да има вредност еднаква на единица само ако коефициентот на впивање во стаклото е еднаков на нула, односно ако нема загуби на светлина во стаклото. Со оглед на тоа што во реалноста тоа не е случај, флуksот што ќе ја напушти сферата секогаш ќе биде помал отколку флуksот на изворот во неа.

Од равенката (4.39) може да се заклучи дека коефициентот на повеќекратно одбивање во сферата е поголем од единица, т.е. дека вкупниот флуks што ќе падне на внатрешната површина од сферата ќе биде поголем од флуksот на изворот. Меѓутоа, не станува збор за *перпетуум мобиле*. Компонентите на флуksот во сумата од десната страна на равенката (4.33) не се однесуваат на ист момент на време. Имено, ако разгледуваме само еден бесконечно мал временски интервал dt , на површината на сферата ќе падне флуksот од изворот што е произведен во тој временски интервал (флуksот Φ_0), додека останатите флуksови (Φ_1 , Φ_3 , Φ_5 и тн.) биле произведени во изворот претходно. Всушност, во разгледуваниот временски интервал во изворот се произведува количество светлина $dQ_0 = \Phi_0 \cdot dt$ и дел од тоа ќе биде одбиен, дел ќе биде пропуштен, а дел ќе биде впиен во стаклото.

Освен тоа, да забележиме дека во реалноста флуksот што ќе падне на внатрешната површина на сферата ќе биде помал отколку флуksот пресметан со равенката (4.33) поради загубите (впивањето) на светлината во сијалицата и соодветните елементи за нејзино прицвртување и напојување со електрична енергија.

Во претходното излагање не беше земен предвид начинот на одбивање од внатрешната површина на сферата и начинот на пропуштање низ нејзините сидови. Ако стаклото е провидно и безбојно (т.е. одбива и пропушта насочено), ликот на изворот, гледан надвор од сферата ќе биде јасен, а распределбата на светлинската јачина на флуksот надвор од сферата ќе има облик како и во сферата. Ако стаклото е матирано (т.е. ако стаклото пропушта полудифузно) ликот на изворот ќе биде нејасен, додека ако стаклото е од материјал којшто пропушта дифузно (млечно/опално стакло и сл.) надвор од сферата нема да може да се забележи никаков лик на изворот. За илустрација на некои од наведените ефекти може да послужи примерот 4.5.

Пример 4.5

Набљудуваме електрична сијалица во вид на топка со дијаметар $d = 0,05$ m. Сијалицата зрачи рамномерно распределен флуks од $\Phi_0 = 1\,000$ lm и е поставена во центарот на сфера од стакло со дијаметар $D = 0,4$ m. Дебелината на стаклото е многу мала во споредба со дијаметарот на сферата. Во зависност од карактеристиките на стаклото, разликуваме два случаја. Во првиот

случај стаклото е безбојно со просечни коефициенти на одбивање и пропуштање 15% и 80%, соодветно. За тој случај да се пресмета сјајноста на ликот на сијалицата. Во вториот случај сферата е изработена од млечно стакло коешто пропушта дифузно и чиешто коефициенти на одбивање и пропуштање се 50% и 40%, соодветно. За тој случај да се пресмета сјајноста на надворешната површина на сферата. Да се смета дека во двата случаја растојанието на набљудувачот од центарот на сферата е најмалку 3 m. При пресметките да се уважи ефектот на повеќекратно одбивање во сферата и да се занемари апсорпцијата на светлината во сијалицата.

Според дефиницијата, сјајноста на сијалицата во набљудуваниот правец се пресметува како количник помеѓу светлинската јачина на сијалицата во тој правец и плоштината на проекцијата на сијалицата врз рамнина нормална на набљудуваниот правец. Во овој пример, сијалицата има две важни одлики. Прво, сијалицата е униформен извор, а тоа значи дека нејзината светлинска јачина (I_0) е еднаква во сите правци. Второ, бидејќи сијалицата има облик на топка, плоштината на проекцијата на сијалицата врз рамнина нормална на набљудуваниот правец не зависи од изборот на правецот. Ако таа плоштина ја означиме со $S_{\text{сијалица} \perp}$, за сјајноста на сијалицата, во кој и да е правец, пресметуваме:

$$L_{\text{сијалица}} = \frac{I_0}{S_{\text{сијалица} \perp}} = \frac{\Phi_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\pi \cdot (0,05/2)^2} = \frac{1\,000}{4 \cdot \pi^2 \cdot 0,025^2} \approx 40\,528 \text{ cd/m}^2.$$

Од добиениот резултат може да се заклучи дека сјајноста на сијалицата е голема и дека може да дојде до директно блескотење доколку сијалицата се најде во видното поле на набљудувачот.

Во првиот случај, кога стаклото е провидно, според (4.38), за флуксот што ќе излезе од сферата се добива:

$$\Phi'_{\text{сфера}} = \Phi_0 \cdot \frac{\tau}{1-\rho} = 1\,000 \cdot \frac{0,8}{1-0,15} \approx 941 \text{ lm}.$$

Бидејќи во овој случај стаклото пропушта насочено, флуксот што ќе ја напушти сферата исто така ќе биде рамномерно распределен во просторот. Според тоа, за сјајноста на сијалицата набљудувана преку провидната сфера, во кој и да е правец, пресметуваме:

$$L'_{\text{сијалица}} = \frac{I'_{\text{сфера}}}{S_{\text{сијалица} \perp}} = \frac{\Phi'_{\text{сфера}}}{4\pi} \cdot \frac{1}{S_{\text{сијалица} \perp}} = \frac{\Phi_0}{4\pi} \cdot \frac{\tau}{1-\rho} \cdot \frac{1}{S_{\text{сијалица} \perp}} = \frac{I_0}{S_{\text{сијалица} \perp}} \cdot \frac{\tau}{1-\rho} = L_{\text{сијалица}} \cdot \frac{\tau}{1-\rho},$$

од каде што следува:

$$L'_{\text{сијалица}} = 40\,528 \cdot \frac{0,8}{1-0,15} = 38\,144 \text{ cd/m}^2.$$

Овој резултат покажува дека со поставување на сијалицата во сфера од провидно стакло набљудувачот ќе го гледа нејзиниот лик чија сјајност не е многу помала од сјајноста на сијалицата. Да забележиме дека, ако не беше уважен ефектот на повеќекратно одбивање во сферата, сјајноста на сијалицата, пресметана според (4.17), ќе беше:

$$L'_{\text{сијалица}} = \tau \cdot L_{\text{сијалица}} = 0,8 \cdot 40\,528 \approx 32\,422 \text{ cd/m}^2.$$

Во вториот случај, кога сферата е изработена од млечно стакло, според (4.38), флуксот што ќе ја напушти сферата е:

$$\Phi''_{\text{сфера}} = \Phi_0 \cdot \frac{\tau}{1-\rho} = 1\,000 \cdot \frac{0,4}{1-0,5} = 800 \text{ lm}.$$

Флуksот што го зрачи сферата од млечно стакло ќе биде рамномерно распределен и светлинската јачина ќе биде еднаква во сите правци ($I_{\text{сфера}}$). Да забележиме дека плоштината на проекцијата на сферата врз рамнина нормална на правецот на нејзиното набљудување е еднаква за сите правци на набљудување. Ако таа плоштина ја означиме со $S_{\text{сфера} \perp}$, за сјајноста на сферата, во кој и да е правец, следува:

$$L''_{\text{сфера}} = \frac{I_{\text{сфера}}}{S_{\text{сфера} \perp}} = \frac{\Phi''_{\text{сфера}}}{4 \cdot \pi^2 \cdot 0,2^2} = \frac{800}{4 \cdot \pi^2 \cdot 0,2^2} \approx 507 \text{ cd/m}^2.$$

Како што се гледа од добиениот резултат, во вториот случај сјајноста на сферата е многу пати помала отколку сјајноста на изворот, но и флуksот што ќе ја напушти сферата е исто така помал отколку во случајот кога сферата беше изработена од провидно стакло. Со тоа е илустрирано зошто често се практикува сијалиците со големи сјајности да се поставуваат во светилки чиешто површина ја пропуштаат светлината дифузно или полудифузно.

Да забележиме дека сјајноста на сферата од млечно стакло може да се пресмета и на поинаков начин. Имено, според равенката (4.21) сјајноста на сферата е пропорционална на осветленоста на нејзината внатрешна површина. Средната осветленост на внатрешната површина од сферата ќе се определи како количник помеѓу флуksот што ќе падне на внатрешната површина, пресметан според равенката (4.37), и плоштината на сферата. Така се добива:

$$L''_{\text{сфера}} = \frac{\tau}{\pi} \cdot E_{\text{внатр.}} = \frac{\tau}{\pi} \cdot \frac{\Phi_{\text{внатр.}}}{S_{\text{сфера}}} = \frac{\tau \cdot \Phi_0}{\pi \cdot (1 - \rho) \cdot S_{\text{сфера}}} = \frac{0,4 \cdot 1000}{\pi^2 \cdot (1 - 0,5) \cdot 0,4^2} \approx 507 \text{ cd/m}^2.$$

Ефектот на повеќекратно одбивање ќе се јави во секој случај кога изворите на светлина (светилките) се поставени во простор ограничен со површини со конечни димензии. Како пример можат да се наведат системите за осветление на внатрешни простори. Се разбира, во реалноста просториите не се во вид на сфера, но заклучоците што овде беа презентирани можат да помогнат при формулирање на проблемот на повеќекратно одбивање и кај останатите облици на затворени простори. Во таа смисла, да го разгледаме случајот на повеќекратно одбивање од отворена вдлабена површина, каква што е прикажана на сликата 4.15.

Набљудуваме вдлабена површина со плоштина S и плоштина на нејзиниот отвор S_0 . Вдлабената површина одбива светлина, при што коефициентот на одбивањето е ρ . Едниот дел од флуksот одбиен од вдлабената површина излегува низ отворот, а другиот дел повторно паѓа на вдлабената површина. Во таквите услови не е едноставно да се одговори на прашањето: колкав флуks $\Phi_{\text{излезен}}$ излегува низ отворот на вдлабената површина ако низ тој отвор на вдлабената површина паѓа флуksот Φ_0 и ако се знае дека при еднократно одбивање од вдлабената површина делот што не излегува низ отворот (и повторно паѓа на таа површина) се добива како производ на коефициентот q и одбиениот флуks?

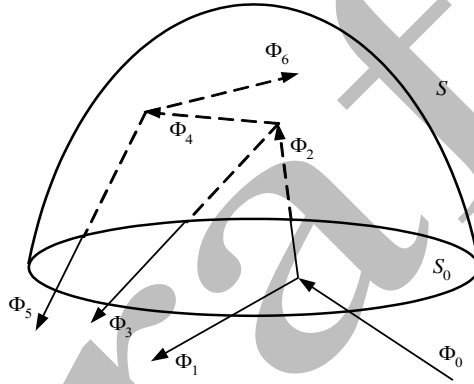
До одговорот на поставеното прашање може да се дојде преку соодветна анализа. Ако земеме дека е $p = 1 - q$, по првото одбивање од вдлабената површина низ отворот излегува флуksот $\Phi_1 = p \cdot \rho \cdot \Phi_0$, а флуksот $\Phi_2 = \rho \cdot q \cdot \Phi_0$ повторно паѓа на вдлабената површина. По второто одбивање, низ отворот излегува флуksот

$\Phi_3 = \rho \cdot \rho \cdot \Phi_2$, а флуksот $\Phi_4 = \rho \cdot q \cdot \Phi_2$ повторно паѓа на вдлабената површина. По третото одбивање, низ отворот излегува флуksот $\Phi_5 = \rho \cdot \rho \cdot \Phi_4$, а флуksот $\Phi_6 = \rho \cdot q \cdot \Phi_4$ повторно паѓа на вдлабената површина, итн. Сумирајќи ги флуksовите што излегуваат низ отворот, добиваме:

$$\Phi_{\text{излезен}} = \Phi_1 + \Phi_3 + \Phi_5 + \dots = \rho \cdot \rho \cdot \Phi_0 \cdot (1 + \rho \cdot q + \rho^2 \cdot q^2 + \dots),$$

каде што е $0 < \rho \cdot q < 1$ и сумата на бесконечниот геометриски ред ќе биде конечна, така што следува:

$$\Phi_{\text{излезен}} = \frac{\rho \cdot \rho}{1 - \rho \cdot q} \cdot \Phi_0 = \frac{(1 - q) \cdot \rho}{1 - \rho \cdot q} \cdot \Phi_0. \quad (4.41)$$



Слика 4.15 Скица на повеќекратно одбивање во отворена вдлабена површина

Сумирајќи ги флуksовите што паѓаат на вдлабената површина, добиваме:

$$\Phi_{\text{внатр.}} = \Phi_2 + \Phi_4 + \Phi_6 + \dots = \Phi_0 \cdot (1 + \rho \cdot q + \rho^2 \cdot q^2 + \dots) = \frac{1}{1 - \rho \cdot q} \cdot \Phi_0. \quad (4.42)$$

Односот помеѓу вкупниот флуks што при повеќекратно одбивање паѓа на вдлабена површина и флуksот што доаѓа однадвор се нарекува коефициент на повеќекратното одбивање. За тој коефициент може да се напише:

$$\rho_{\text{пов.}} = \frac{\Phi_{\text{внатр.}}}{\Phi_0} = \frac{1}{1 - \rho \cdot q}. \quad (4.43)$$

Од равенката (4.43) може да се заклучи дека вредноста на коефициентот на повеќекратното одбивање е поголема од единица, дека на поголемо q му соодветствува поголемо $\rho_{\text{пов.}}$ и дека во случаите кога се јавува повеќекратно одбивање осветленоста на одбивната површина е поголема, но поголеми се и загубите на светлината во системот.

4.5.3 Повеќекратно одбивање во затворени простори со произволен облик

Повеќекратното одбивање во простор ограничен со сфера во праксата се јавува само кај некои типови светилки, додека многу почесто просторот во којшто се јавува повеќекратното одбивање има облик на паралелопипед или сличен на него. При тоа, најчесто, е потребно да се пресметаат вкупните флуковски што паѓаат на секоја од граничните површини. Потоа, познавајќи ги тие флуковски можат да се определат средните осветлености и сјајности на граничните површини.

Да претпоставиме дека страниците на паралелопипедот не пропуштаат светлина и дека неговите внатрешни површини дифузно ја одбиваат светлината. Нека светлинскиот извор, којшто е поставен во точката O , е светилка за којашто е позната распределбата на светлинската јачина и е познат вкупниот флукс Φ_0 што таа го зрачи. Флуксот што ќе падне на внатрешните површини на паралелопипедот ќе го означиме со Φ . Тој флукс може да се претстави како сума од две компоненти:

$$\Phi = \Phi_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_{\text{одб}_k} = \Phi_0 + \Phi' = \Phi' + \Phi'' . \quad (4.44)$$

Флуксот Φ' се нарекува *директна компонента на флуксот* Φ и тој е еднаков на флуксот што би паднал на внатрешните површини на паралелопипедот кога не би постоело одбивање од тие површини. Аналогно, флуксот Φ'' се нарекува *индиректна компонента на флуксот* Φ и тој е резултат на повеќекратното одбивање од внатрешните површини на паралелопипедот.

Внатрешните површини на паралелопипедот можат да се поделат на n релативно мали површини со плоштини ΔS_i , $i = 1, \dots, n$. Овие површини ќе ги наречеме парцијални површини. За секоја парцијална површина може да се напише равенка од обликот (4.44), така што за парцијалната површина i следува:

$$\Phi_i = \Phi'_i + \Phi''_i . \quad (4.45)$$

Директната компонента Φ'_i на флуксот Φ_i од (4.45) се пресметува релативно лесно. Тоа може да се направи на два начина. Првиот начин е да се пресмета флуксот што светилката поставена во точката O го зрачи во просторниот агол под којшто од точката O се гледа парцијалната површина i . Многу почесто овој флукс се пресметува како производ помеѓу средната осветленост на парцијалната површина i (без уважување на флуксот што на неа паѓа по одбивање од други парцијални површини) и нејзината плоштина. Имено, обликот и димензиите на парцијалната површина најчесто се избираат така што може да се смета дека осветленоста во нејзиниот центар е приближно еднаква на средната осветленост на парцијалната површина. Бидејќи распределбата на светлинската јачина на светилката е позната, осветленоста во центрите на парцијалните површини може да се пресмета со некоја од постапките објаснети во потпоглавјата 3.9 или 3.10.

Индиректната компонента Φ''_i , на флуксот Φ_i од (4.45), може да се претстави како сума од флуковските што ќе паднат на парцијалната површина i по одбивање од другите парцијални површини, т.е.

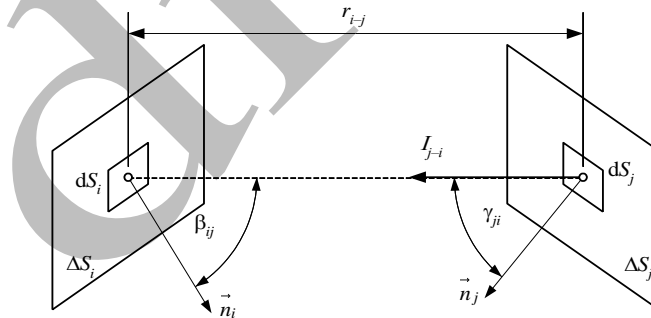
$$\Phi_i'' = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Phi_{ij}, \quad (4.46)$$

каде што со Φ_{ij} е означен оној дел од флуksот одбиен од парцијалната површина j што ќе падне на парцијалната површина i .

Проблемот на пресметка на индиректната компонента на флуksот од (4.44) се јавува при пресметка на внатрешното осветление. Бидејќи материјалите коишто се користат за внатрешно уредување на просториите, во најголем број случаи одбиваат дифузно, пресметките на индиректните компоненти на флуksот можат да се поедностават ако се искористи особината дека светлинската емисија на таквите површини е пропорционална на нивната сјајност. За таа цел е погодно да се воведат *коэффициенти на меѓусебна размена*. Нека набљудуваме две произволно избрани парцијални површини i и j со плоштини ΔS_i и ΔS_j , соодветно (прикажани на сликата 4.16). Претпоставуваме дека површините одбиваат дифузно. На парцијалните површини i и j дефинираме елементарни површини со плоштини dS_i и dS_j , соодветно. Осветленоста што елементарната површина со плоштина dS_j ја создава во центарот на елементарната површина со плоштина dS_i , според равенките (3.31) и (3.37), ќе биде:

$$E_{ij} = \frac{d\Phi_{ij}}{dS_i} = \frac{I_{j-i} \cdot \cos \beta_{ij}}{r_{i-j}^2} = \frac{L_j \cdot dS_j \cdot \cos \gamma_{ji} \cdot \cos \beta_{ij}}{r_{i-j}^2}, \quad (4.47)$$

каде што со $d\Phi_{ij}$ е означен делот од флуksот одбиен од елементарната површина со плоштина dS_j којшто ќе падне на елементарната површина со плоштина dS_i , а со L_j е означена сјајноста на парцијалната површина j . Значењата на другите ознаки се како на сликата 4.16.



Слика 4.16 Скица за дефиниција на коэффициентите на меѓусебна размена

Со оглед на тоа што површините одбиваат дифузно, ако со M_j се означи светлинската емисија од парцијалната површина j , користејќи ја (3.25), по средувањето на (4.47), за флуksот $d\Phi_{ij}$ се добива:

$$d\Phi_{ij} = M_j \cdot \frac{\cos \gamma_{ji} \cdot \cos \beta_{ij}}{\pi \cdot r_{i-j}^2} \cdot dS_i \cdot dS_j \quad (4.48)$$

Флуксот што од парцијалната површина j ќе падне врз парцијалната површина i ќе се добие со интеграција на равенката (4.48) по двете парцијални површини, т.е.

$$\Phi_{ij} = M_j \cdot \int_{\Delta S_i} \int_{\Delta S_j} \frac{\cos \gamma_{ji} \cdot \cos \beta_{ij}}{\pi \cdot r_{i-j}^2} \cdot dS_i \cdot dS_j = M_j \cdot g_{ji}, \quad (4.49)$$

каде што со g_{ji} е означен коефициентот на меѓусебна размена на парцијалните површини i и j .

Како што може да се забележи од равенката (4.49), кога набљудуваните површини одбиваат дифузно, коефициентот на меѓусебна размена зависи само од димензиите на парцијалните површини i и j и од нивната меѓусебна положба. При тоа, не е тешко да се покаже дека е $g_{ij} = g_{ji}$. Коефициентот на меѓусебна размена помеѓу две парцијални површини коишто припаѓаат на иста рамнина ќе биде еднаков на нула, т.е. $g_{ii} = 0$, поради тоа што ниту еден дел од флуксот што се зрачи од едната површина нема да падне на другата површина.

При изведувањето на равенката (4.49) беше претпоставено дека сите елементи на парцијалната површина j имаат еднакви светлински емисии. Бидејќи светлинската емисија на една дифузна површина е пропорционална на нејзината осветленост, наведената претпоставка значи дека паднатиот флуks е рамномерно распределен по парцијалната површина j . Јасно е дека оваа претпоставка тешко може да биде исполнета доколку парцијалните површини i и j се со релативно големи димензии. Но, ако димензиите на парцијалните површини i и j се одберат така што тие да бидат конечни, но значително помали отколку нивното меѓусебно растојание r_{i-j} , за таков пар парцијални површини равенката (4.48) може да се напише во обликот:

$$\Phi_{ij} = M_j \cdot \frac{\cos \gamma_{ji} \cdot \cos \beta_{ij}}{\pi \cdot r_{i-j}^2} \cdot \Delta S_i \cdot \Delta S_j \quad (4.50)$$

Ако со Φ_j се означи вкупниот флуks што рамномерно распределен ќе падне на парцијалната површина j и имајќи предвид дека светлинската емисија на таа површина е пропорционална на нејзината осветленост, за флуксот Φ_{ij} следува:

$$\Phi_{ij} = \rho_j \cdot E_j \cdot \frac{\cos \gamma_{ji} \cdot \cos \beta_{ij}}{\pi \cdot r_{i-j}^2} \cdot \Delta S_i \cdot \Delta S_j = \rho_j \cdot \frac{\Phi_j}{\Delta S_j} \cdot \frac{\cos \gamma_{ji} \cdot \cos \beta_{ij}}{\pi \cdot r_{i-j}^2} \cdot \Delta S_i \cdot \Delta S_j \quad (4.51)$$

т.е.

$$\Phi_{ij} = \frac{\Delta S_i}{\pi} \cdot \frac{\cos \gamma_{ji} \cdot \cos \beta_{ij}}{r_{i-j}^2} \cdot \rho_j \cdot \Phi_j \quad (4.52)$$

Врз основа на (4.46) и (4.52), од равенката (4.45) за вкупните флуковски што ќе паднат на секоја од парцијалните површини, може да се напише следниот систем линеарни равенки:

$$\Phi_i = \Phi'_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Phi_{ij} = \Phi'_i + \frac{\Delta S_i}{\pi} \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n g'_{ji} \cdot \rho_j \cdot \Phi_j, \quad i=1, \dots, n, \quad (4.53)$$

при што коефициентите g'_{ji} се определуваат со формулата:

$$g'_{ji} = \frac{\cos \gamma_{ji} \cdot \cos \beta_{ij}}{r_{i-j}^2}. \quad (4.54)$$

Коефициентите g'_{ji} ги имаат истите својства како и коефициентите на меѓусебна размена, т.е. $g'_{ji} = g'_{ij}$ и $g'_{ii} = 0$. Поради тоа, системот линеарни равенки (4.53) може да се напише во поинаков облик:

$$\Phi_i - \frac{1}{\pi} \cdot \Delta S_i \cdot \sum_{j=1}^n g'_{ij} \cdot \rho_j \cdot \Phi_j = \Phi'_i, \quad i=1, \dots, n, \quad (4.55)$$

или во матрична форма:

$$\left(C - \frac{1}{\pi} \cdot S \cdot G' \cdot R \right) \cdot F = A \cdot F = F', \quad (4.56)$$

каде што C е единична матрица со димензии $n \times n$, $R = \text{diag}\{\rho_i\}$ ($i=1, \dots, n$), $S = \text{diag}\{\Delta S_i\}$ ($i=1, \dots, n$), F е вектор колона со димензија $n \times 1$ на непознатите флуковски Φ_i , F' е вектор колона со димензија $n \times 1$ на познатите директни компоненти на флуковските Φ'_i и G' е симетрична квадратната матрица со димензии $n \times n$, чиешто елементи од главната дијагонала се еднакви на нула, а вондијагоналните елементи се определуваат со равенката (4.54).

Во општ случај, матрицата A од системот равенки (4.56), за разлика од матрицата G' , не е симетрична и елементите од нејзината главна дијагонала се ненулти. Таа може да биде симетрична само ако сите парцијални површини имаат еднакви плоштини.

Со решавање на системот равенки (4.56) ќе се пресметаат вкупните флуковски коишто паѓаат на секоја од парцијалните површини. Вкупниот флукс што ќе падне на внатрешните површини на паралелопипедот ќе биде:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \Phi_i. \quad (4.57)$$

Да забележиме дека системот равенки (4.56) важи за било кој простор ограничен со n површини со конечни димензии и во којшто постојат повеќе светилки. Имено, ако наместо една светилка просторијата ја осветлуваат повеќе светилки,

директната компонента на флуksот F' ќе се пресмета по пат на суперпозиција на директните компоненти на флуksовите од сите светилки. Исто така, со решавање соодветен систем равенки можат да се решат проблеми на пресметка на повеќекратно одбивање од делумно затворени простори, како што е, на пример, површината прикажана на сликата 4.15. Во таквите случаи, за парцијалните површини коишто ќе произлезат од површината на отворот, може да се земе дека коефициентите на рефлексција се еднакви на нула или пак за тие парцијални површини да не се пишуваат равенки од типот (4.55), со што значително може да се намали бројот на равенките во системот. Практично, постапката може да се употреби и при пресметката на осветленостите на површините на отворени простори, во случаите кога не може да се занемари влијанието на објектите од непосредната околина.

Кога набљудуваниот простор е ограничен со паралелопипед, каков што е најчесто обликот на просторите, за да може со помош на системот равенки (4.55) да се пресмета флуksот што ќе падне на секоја од шесте гранични површини потребно е секоја од нив да се подели на соодветен број парцијални површини. Практично е секоја од парцијалните површини да биде во вид на квадрат со димензии коишто ги задоволуваат претпоставките употребени при изведување на равенката (4.55). Со оглед на тоа што релативно голем број парцијални површини ќе припаѓаат на иста рамнина, ќе бидат еднакви на нула релативно голем број вондијагонални елементи од матрицата G' .

Наведените особини на матрицата G' можат да се искористат за поедноставување на пресметките на нејзините елементи. Меѓутоа, иако постапката за решавање на проблемот е доста едноставна, во праксата таа може да бара големо време за пресметка. Така, на пример, ако треба да се пресмета флуksот што ќе падне на ѕидовите, плафонот и подот од просторија со должина 20 m, ширина 10 m и висина 4 m и притоа се одбере секоја од парцијалните површини да биде во вид на квадрат со страница 0,5 m, бројот на парцијалните површини ќе биде $n = 2560$. Очигледно е дека систем линеарни равенки со толку голем број непознати може да се реши само со помош на компјутер. Но, и во тој случај, бидејќи бројот на математички операции за решавање на систем линеарни равенки е директно пропорционален на третиот степен од бројот на непознатите, јасно е дека нема да биде кусо времето потребно за решавање на системот равенки (4.56).

Постапката за решавање на системот равенки (4.56) може да се поедностави и забрза на повеќе начини. Пример за тоа се методите прикажани во [67,68,69]. Примената на таквите методи овозможува времето потребно за решавање на проблемот да се намали за повеќе од десет пати, при што грешките коишто се резултат на апроксимациите се во прифатливи граници и се помали од 10%.

Во рамките на ова поглавје ќе биде прикажан еден многу практичен и едноставен итеративен начин за решавање на системот равенки (4.56) [67]. Постапката ќе ја објасниме на примерот со затворениот простор во вид на паралелопипед.

Нека со $\Phi(0)_i$ се означи флуksот што до парцијалната површина i доаѓа директно од изворите. Во чекорот k од процесот на повеќекратното одбивање флуksот што на парцијалната површина i паѓа по одбивањето од другите парцијални површини

нека е $\Phi(k)_i$. Така, за флуksот што во чекорот k од парцијалната површина j паѓа на парцијалната површина i , може да се напише:

$$\Phi(k)_{ij} = \frac{\Delta S_i}{\pi} \cdot g'_{ji} \cdot \rho_j \cdot \Phi(k-1)_j,$$

од каде што за флуksот што во чекорот k од сите парцијални површини паѓа на парцијалната површина i следува:

$$\Phi(k)_i = \frac{\Delta S_i}{\pi} \cdot \sum_{j=1}^n g'_{ji} \cdot \rho_j \cdot \Phi(k-1)_j. \quad (4.58)$$

По бесконечниот број чекори на повеќекратно одбивање, за вкупниот флуks што паѓа на парцијалната површина i може да се напише:

$$\Phi_i = \Phi(0)_i + \sum_{k=1}^{\infty} \Phi(k)_i, \quad i=1, \dots, n. \quad (4.59)$$

Сумата на бесконечниот ред од десната страна на (4.59) е конечна бидејќи производот $g'_{ji} \cdot \rho_j$ во практичните случаи е помал од единица, а за $k > 1$ се јавуваат неговите повисоки степени.

Ако се искористат ознаките на матриците и векторите од (4.56), матричниот облик на равенките (4.59) ќе биде:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}(0) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\pi} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{G}' \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{F}(k-1), \quad (4.60)$$

каде што $\mathbf{F}(k)$ е вектор колона со димензија n чиешто елементи се пресметуваат според равенката (4.58).

Флуksот што ќе падне на парцијалните површини, со задоволителна точност може да се пресмета ако при пресметка на сумата на редот од (4.60) се земат конечен број членови l :

$$\mathbf{F} \approx \mathbf{F}(0) + \sum_{k=1}^l \frac{1}{\pi} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{G}' \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{F}(k-1) = \mathbf{F}(0) + \sum_{k=1}^l \mathbf{D} \cdot \mathbf{F}(k-1), \quad (4.61)$$

каде што е:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{\pi} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{G}' \cdot \mathbf{R}.$$

Да забележиме дека елементите од матрицата \mathbf{D} зависат од изборот на димензиите на парцијалните површини, од заемните положби на тие површини и од нивните одбивни својства. Поради тоа е доволно елементите на матрицата \mathbf{D} да се пресметаат само еднаш, и тоа пред почетокот на итеративната постапка.

Потребниот број членови l од сумата во (4.61), со којшто се обезбедува прифатлива точност, пред сè, зависи од големината на коефициентите на одбивање од

граничните површини. За поголеми вредности на овие коефициенти е потребен поголем број l за да се постигне потребното ниво на точност и обратно. Наместо однапред да се дефинира бројот l , погодно е итеративната постапка да се прекине во итерацијата l во која е исполнет условот:

$$\max \left\{ \Phi(l)_i / \sum_{k=0}^l \Phi(k)_i \right\} < \varepsilon, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.62)$$

каде што ε е усвоен позитивен број помал од единица. Поинаку речено, итеративниот процес ќе заврши во итерацијата l ако релативниот придонес на компонентата $\Phi(l)_i$ за секоја парцијална површина i , е помал од однапред зададеното отстапување ε . Со соодветен избор на ε може да се постигне задоволителна точност и, воедно, пресметките да се изведат за релативно кусо време.

Ако се познати флуковите коишто ќе паднат на парцијалните површини, можно е да се пресмета осветленоста во било која точка од граничните површини на просторијата. Имено, средните осветлености на граничните површини ќе се пресметаат со помош на (3.33). На пример, за граничната површина A_1 средната осветленост ќе биде:

$$E_{A_1} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m E_j = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{\Delta\Phi_j}{\Delta S_j}, \quad (4.63)$$

каде што со m е означен бројот на парцијални површини на коишто била поделена површината A_1 . Да забележиме дека, покрај средната осветленост, можно е да се определи и рамномерноста на осветленоста за секоја гранична површина. Рамномерноста на осветленоста за површината A_1 е:

$$U_{A_1} = \frac{\min_{j=1, \dots, m} \{E_j\}}{E_{A_1}}. \quad (4.64)$$

Ако е потребно да се пресмета осветленоста во точка од затворениот простор којашто не лежи на ни една од граничните површини, тогаш парцијалните површини (на коишто се изделени површините што го ограничуваат просторот) можат да се сметаат како фиктивни (секундарни) светлински извори чијашто распределба на светлинската јачина е според Ламбертовиот закон. Осветленоста во било која точка во просторијата ќе се пресмета земајќи дека неа ја создаваат сите примарни и секундарни извори во разгледуваната просторија.

Постапката за пресметка на флуковите F може дополнително да се воопшти уважувајќи го и постоењето на предмети во просторијата. Површините на овие предмети исто така треба да се разделат на парцијални површини коишто ќе имаат ист третман како и парцијалните површини дефинирани на граничните површини на просторијата. Се разбира дека, во овој случај, постапката за пресметка на матрицата G' ќе биде значително посложена, со оглед на тоа што треба да се води сметка за

видливоста помеѓу секој чифт парцијални површини. Освен тоа и димензијата на матрицата \mathbf{G}' ќе биде многу поголема.

На крајот да забележиме дека изложената постапка за пресметка на флуковите \mathbf{F} може да се примени и кога во просторијата постојат површини коишто одбиваат насочено. Во таквите случаи се потребни соодветни дополнувања [4].

draft

5 ЕЛЕКТРИЧНИ СИЈАЛИЦИ

5.1 Општо за електричните сијалици

Од вештачките извори на светлина, денес, во светлотехничката пракса најмногу се користат тие што електричната енергија ја претвораат во светлинска. Тие извори се нарекуваат *електрични светлински извори* или *електрични сијалици*.

Електричните сијалици⁴⁰, во разни форми, се присутни скоро два века. Во 1802 година, како предавач на Кралскиот институт во Лондон, Хамфри Дејви (Humphry Davy, 1778–1829) ја демонстрирал првата сијалица со *вжарено метално влакно* (лента од платина). Подоцна, во 1809 година, демонстрирал електролачна сијалица, напојувана од батерија со 2 000 ќелии. Овој пронајдок претставувал основа за натамошниот развој на електролачните сијалици, коишто влегуваат во комерцијална употреба триесетина години по нивната прва јавна демонстрација [109,111].

Во годините што следат голем број пронаоѓачи работат на усовршување на сијалиците со вжарено влакно. Главно биле користени влакна (жици) од платина во стаклени балони од коишто делумно бил извлечен воздухот. Првата комерцијална примена на сијалиците со вжарено влакно е во 1840 година кога англискиот пронаоѓач Гроув (Grove) искористил сијалици со вжарено влакно за осветление на еден театар. Но, цената за работа на системот на осветление била многу висока, „неколку стотини фунти стерлинзи за еден киловатчас“ [111]. Токму поради високите трошоци за производство и за експлоатација на системите за осветление со електрични сијалици, како и технолошките проблеми во производството, требало да поминат скоро 80 години од првата демонстрација до појавата на првата комерцијално прифатлива сијалица со вжарено влакно.

Во 1878 година англискиот пронаоѓач Џозеф Свон (Joseph Wilson Swan, 1828–1914) изработил сијалица со јагленосано влакно (*carbon filament*) со стаклен балон без воздух. Само една година подоцна, во 1879 година, Томас Едисон (Thomas Alva Edison, 1847–1931) конструирал сијалица со слични карактеристики.

Едисон е општо признат како пронаоѓач на сијалиците со вжарено влакно, иако првиот патент за заштита на производот го добил Свон. Има повеќе причини зошто заслугите за пронајдокот на првата електрична сијалица му се припишуваат само на Едисон. Најнапред, за разлика од неговите претходници, Едисон произвел сијалица којашто била поевтина и траела подолго. Втората причина е тоа што Едисон нудел комплетни системи за осветление, од генератор до сијалица. Освен тоа, тој бил првиот којшто реализирал комплетни системи за осветление во брод (во 1880 година) и за градска улица (во 1882 година).

⁴⁰ Во натамошниот текст најчесто ќе се користи скратениот термин *сијалица*.



Слика 5.1 Сијалици со јагленосано влакно (приближно 1890 година)

Интересно е да се каже дека влакната во сијалиците коишто биле во употреба до крајот на првата деценија од XX век биле, главно, јагленосани влакна од дрво, бамбус, свила и слични материјали базирани на целулоза и имале специфично производство од околу 3 lm/W [6]. Платината била напуштена поради нејзината релативно висока цена, но и поради тоа што влакната од платина, на определена температура омекнувале и ги губеле потребните својства.

Биле правени напори да се изработат сијалици со влакна од иридиум, осмиум и тантал. Специфичните производства на овие сијалици достигнувале вредност и до 6 lm/W . Во 1903 година се појавиле првите сијалици со влакна изработени од волфрам, материјал којшто и денес се користи за изработка на влакната кај сите сијалици со вжарено влакно. Во децениите што следат се јавуваат многу други пронајдоци коишто ја подобриле конструкцијата и ефикасноста на сијалиците со вжарено влакно.

Помеѓу двете Светски војни се јавуваат и првите сијалици со празнење низ гасови: неонските сијалици (најчесто користени за светлечки натписи и декорација), живините сијалиците со висок притисок, флуоресцентните сијалици (во прво време нарекувани и живини сијалици со низок притисок) и натриумовите сијалици со низок притисок.

Последните четири децении од XX век се карактеристични по многу динамичниот развој на сијалиците, како во смисла на појавата на нови типови (халогени сијалици, натриумови сијалици со висок притисок, метал–халогени сијалици, индукциони сијалици, микробранови сијалици, светлечки диоди, полупроводнички панели итн.) така и во насока на усовршување на претходно познатите типови (главно флуоресцентните сијалици).

Користењето на сијалиците во секојдневниот живот е многукратно. Се разбира, нивната најголема примена е во системите за (електрично) осветление, но воопшто не се за занемарување и останатите апликации. Практично, скоро секој електричен уред во себе содржи некаква електрична сијалица, било да станува збор за сијалици наменети за сигнализација или пак за сијалици наменти за производство на светлина потребна во некој техничко–технолошки систем.

Покрај тоа, електрични извори слични на сијалиците наоѓаат примена и во многу други апликации коишто и не мора да бидат стриктно поврзани со производството на видливо зрачење. Така, на пример, електрични извори за ултравиолетови

зраци се користат за контрола на квалитет во индустријата и за дезинфекција во медицината, фармацевтската, прехранбената индустрија итн. Електрични извори за инфрацрвени зраци се користат во медицината, индустријата, во живинарските фарми итн.

Во рамките на овој труд ќе бидат обработени само оние сијалици коишто се наменети за примена во системите за осветление, или таканаречени *сијалици за општа намена*. Сијалиците за *специјални намени* нема да бидат обработувани, туку само споменати при обработката на поедините типови сијалици. Исклучок од тоа претставуваат светлечките диоди. Имено, до крајот на XX век светлечките диоди имале примена во системите за сигнализација. Но, последниве години технологијата за производство на светлина од светлечките диоди се развива многу динамично. Како резултат на тој развој веќе се произведуваат светлечките диоди кои со своите карактеристики сè повеќе се доближуваат до сијалиците за општа намена.

Карактеристиките на електричните сијалици и помошната опрема ќе бидат илустрирани со податоци од производните и техничките публикации од некои светски производители. Со оглед на ограничениот простор, тука нема да бидат презентирани детални податоци, туку само податоците коишто ги покажуваат специфичностите на поедините сијалици и помошната опрема.

5.1.1 Поделба на електричните сијалици

Во зависност од критериумите кои се користат при нивната поделба, сијалиците можат да се поделат во неколку групи. Во рамките на овој труд ќе се разликуваат три групи.

Првата група ја сочинуваат сијалиците со вжарено влакно кај коишто светлината се добива по пат на усвитување на метално влакно.

Во втората група спаѓаат сијалиците кај коишто светлината се добива по пат на електрично празнење во гасови и флуоресценција.

Сијалиците од третата група ќе ги нарекуваме *сијалици без електроди*. Самото име на групата укажува дека во оваа група се вклучени сите оние сијалици кај коишто не постојат ниту електроди (како кај сијалиците со празнење во гасови), ниту пак елементи слични на волфрамовото влакно (како кај сијалиците со вжарено влакно). Светлината кај овие сијалици се добива на различни начини, а во оваа група спаѓаат: *индукциони сијалици* (празнење во гасови и флуоресценција)⁴¹, *микробранови* или *сулфурни сијалици* (термичко зрачење), *светлечки диоди* (електролуминисценција) и *електролуминисцентни панели* (електролуминисценција).

Многу често, сијалиците од првите две групи се нарекуваат *сијалици со електроди*, иако, формално гледано, кај сијалиците со вжарено влакно не постојат електроди во класичната смисла на зборот.

Комерцијално расположливите сијалици се распоредени по наведените групи на следниов начин:

⁴¹ Термините во заградите го означуваат начинот на добивање на светлината.

- I) Сијалици со вжарено (метално) влакно (СВВ) (*incandescent lamps*)⁴²
 - волфрамови сијалици (ВС) (*incandescent lamps, tungsten filament lamps* или *General Lighting Service Lamps – GLS Lamps* кога се наменети за општа намена) и
 - халогени сијалици (ХС) (*halogen lamps* или почесто *tungsten halogen lamps*);
- II) Сијалици со празнење во гасови (СПГ) (*discharge lamps*)
 - флуоресцентни сијалици (ФС) (*fluorescent lamps*),
 - натриумови сијалици со низок притисок (НСНП) (*low-pressure sodium lamps*),
 - живини сијалици со висок притисок (ЖС) (*high-pressure mercury vapour lamps* или *mercury lamps*),
 - метал-халогени сијалици (МХС) (*metal halide lamps*),
 - натриумови сијалици со висок притисок (НСВП) (*high-pressure sodium discharge lamps*).
- III) Сијалици без електроди (*electrodeless lamps*)
 - индукциони сијалици (ИС) (*induction lamps*),
 - микробранови или сулфурни сијалици (МБС) (*microwave lamps* или *sulphur lamps*),
 - светлечки диоди (СД) (*Light Emitting Diodes – LED*) и
 - електролуминисцентни панели (ЕЛП) (*electroluminescence panels*).

Да забележиме дека се можни и други поделби на сијалиците како и дека некои сијалици можат да припаѓаат и во две групи.

Терминот *волфрамови сијалици* би можел да се искористи за именување на првата група сијалици бидејќи кај сите сијалици од оваа група светлината се добива од вжарено влакно изработено од волфрам.⁴³ Но, со оглед на тоа што за халогените сијалици постои општо прифатен термин, може да се смета дека е оправдана употребата на терминот *волфрамови сијалици* само за првата подгрупа од првата група сијалици. Инаку, за оваа подгрупа сијалици и кај нас во употреба може да се сретнат и некои други термини, како, на пример: *инкандесцентни сијалици*, *обични сијалици* (аналогно на англискиот термин *General Lighting Service Lamps*) или *сијалици со метално влакно*.

5.1.2 Номинални карактеристики на електричните сијалици

Електричните сијалици се опишуваат со своите номинални електрични карактеристики (номинален напон, номинална струја, номинална моќност и номинален фактор на моќност) и следниве номинални светлотехнички карактеристики: светлински флукс, температура на боја и индекс на репродукција на бојата. Покрај тоа, за сијалиците се дефинираат номиналниот животен век, времето на палење и времето на повторно палење.

⁴² Термините во заградите се најчесто употребуваните англиски термини.

⁴³ Волфрамово влакно постои и кај флуоресцентните сијалици. Видете оддел 5.3.2.

Номинални електрични карактеристики

Во најголем број случаи сијалиците за општа намена се произведуваат како монофазни потрошувачи предвидени за приклучок на нисконапонски електроенергетски мрежи со номинален фазен напон $220\div 240\text{ V}^{44}$ и фреквенција 50 Hz (120 V и 60 Hz во САД и некои други земји). Некои халогени сијалици и светлечки диоди се конструирани за работа при мали номинални напони⁴⁵. Во натамошниот текст, висината на номиналниот напон на сијалиците нема да биде посебно нагласувана ако изнесува 230 V .

Номиналната моќност за една електрична сијалица се дефинира како активна моќност што ја ангажира сијалицата во номинални услови на работа, а може да се пресмета како производ на ефективната вредност на струјата во сијалицата, ефективната вредност на напонот на краевите на сијалицата и факторот на моќност. Во општ случај, номиналната моќност на сијалицата не мора да биде еднаква на моќноста што се презема од мрежата. Номиналната моќност на сијалицата најчесто е и *називна моќност*, т.е. моќноста според која производителите ги референцираат сијалиците и којашто, најчесто, е во состав на комерцијалното име на сијалицата. Во ретки случаи, називната моќност не е еднаква на номиналната моќност.

За некои типови сијалици карактеристичен е и податокот за *струјата на пуштање*, којашто во општ случај е поголема отколку номиналната струја на сијалицата.

Номинални светлотехнички карактеристики

Светлотехничките големини беа објаснети во поглавјата 2 и 3. Тука треба да наведеме дека светлотехничките карактеристики на сијалиците се променливи во текот на нивната експлоатација.

После извесен период на експлоатација, кај сите сијалици светлинскиот флукс ќе биде помал отколку *номиналниот светлински флукс*. Номиналниот флукс на сијалиците секогаш се дефинира за определени (номинални) услови на работа. Номиналните услови на работа се различни за секој тип на сијалица одделно и тие се: погонскиот напон, температурата на амбиентот и положбата на работа.

Кај сијалиците со вжарено влакно номиналниот флукс на една сијалица се дефинира како флуксот што сијалицата ќе го има (при номинални работни услови) во моментот на нејзиното прво вклучување. Кај останатите сијалици номиналниот флукс се дефинира како флуксот што сијалицата ќе го има (при номинални работни услови) после првите 100 часа работа.

Причините за намалување на флуксот се различни. Кај сијалиците со вжарено влакно најголемо влијание врз намалувањето на флуксот има испарувањето на волфрамот од влакното, додека кај сијалиците со празнење низ гасови намалувањето на флуксот е резултат на повеќе фактори.

⁴⁴ Мрежите и инсталациите се од низок напон ако нивниот номинален напон е понизок од 1000 V . Во повеќето европски земји номиналниот фазен напон на нисконапонските електроенергетски мрежи е стандардизиран на 230 V .

⁴⁵ За приклучок на мрежи и инсталации со номинален напон понизок од 50 V .

Податокот којшто, за определен тип на сијалица, покажува колкав ќе биде нејзиниот флукс после определен период на работа во овој труд ќе го нарекуваме *коэффициент на стареење на светлинскиот извор* или покусо *коэффициент на стареење*. Во англиската терминологија најчесто се користат термините *Lamp Lumen Maintenance Factor – LLMF* или *Lamp Lumen Depreciation Factor – LLDF*. Сосема е разбирливо дека стареењето на светлинските извори не може да се опише само со еден нумерички податок туку тој податок производителите на сијалици го даваат во вид на дијаграми, а многу поретко во вид на табели. На овие дијаграми се прикажуваат *кривите на стареење* во функција од времето на работа на сијалиците. Примери на овие дијаграми може да се најдат во одделите на овој труд каде што детално се обработени одделните типови сијалици. Кривите на стареење најчесто се прикажуваат како нормирани дијаграми во однос на номиналниот флукс за сијалиците, а можат да бидат изразени во проценти или релативни единици.

Со исклучок на некои метал–халогени сијалици, може да се смета дека промената на останатите светлотехнички карактеристики на сијалиците во текот на експлоатацијата е занемарлива.

Покрај називната моќност, во ознаките на сијалиците, производителите најчесто користат и соодветни знаци за означување на температурата на боја и индексот на репродукција на боја (ИРБ)⁴⁶. Ова е особено важно за оние типови сијалици кај коишто при еднакви номинални моќности и останати конструктивни карактеристики, постојат повеќе варијанти од аспект на ТБ и ИРБ. За означување на сијалиците во поглед на ТБ и ИРБ се користи општо прифатен модел. Според тој модел, во комерцијалната ознака на сијалицата, стои трицифрен број, одвоен од останатите знаци, со тире или со коса црта. Првата цифра од овој број е еднаква со првата цифра од ИРБ на сијалицата, R_a . Втората и третата цифра се еднакви со првите две цифри од ТБ на сијалицата, кога таа е изразена во келвини. Така, на пример, ако ИРБ на сијалицата е 85 (или група 1В), а нејзината ТБ е 6 500 К, соодветната ознака ќе биде /865 или –865. Засега овој начин на означување се користи само за некои типови сијалици⁴⁷ и во праксата се среќаваат ознаки чијашто прва цифра е 7, 8 или 9.

Меѓу светлотехничките карактеристиките на сијалиците можат да се вбројат и *времето на палење* и *времето на повторно палење*. Времето на палење е дефинирано како време што треба да помине од вклучувањето на колото на една сијалица на напон еднаков на номиналниот до постигнување, најчесто, 80% од нејзиниот номинален флукс. За СВВ, ФС и СД ова време е многу кусо и за нив тоа не се дефинира. Времето на повторно палење е дефинирано како време што е потребно да помине по краткотраен прекин во напојувањето за флуксот на сијалицата да го достигне нивото

⁴⁶ Со техничката спецификација IEC TS 61231 [47] е дефиниран меѓународниот систем за означување на сијалиците (*ILCOS – International Lamp Coding System*). Ознаките, главно, се однесуваат на конструктивните карактеристики на сијалиците и нивната асоцијација со имињата на сијалиците, многу често, и не постои. Поради тоа, во овој труд, ќе користиме кратенки за сијалиците што се базирани на нивните имиња на македонски јазик, проширени со дополнителни ознаки за конструктивните и фотометриски карактеристики.

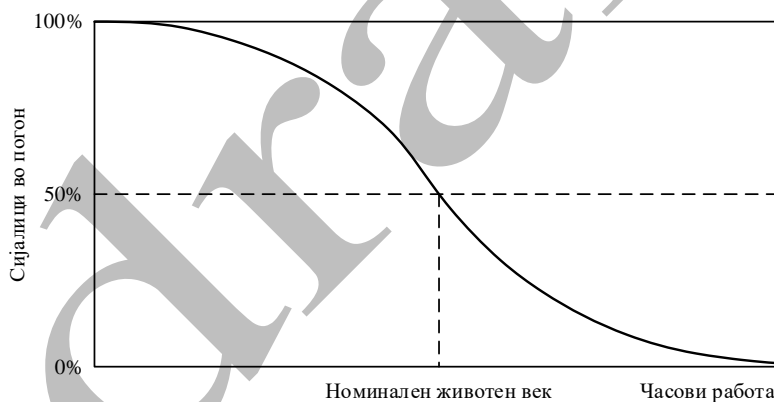
⁴⁷ Тоа најчесто се поновите производи од следните типови сијалици: флуоресцентни, метал–халогени и индукциони.

со коешто е дефинирано времето на палење за таа сијалица. Ова време се дефинира само за оние сијалици за коишто е дефинирано време на палење. Во општ случај, времето на повторно палење не мора да биде еднакво со времето на палење.

Животен век

Животниот век е статистички податок којшто за определен тип сијалица покажува колкав е очекуваниот број часови работа во стандардизирани услови. Покрај терминот животен век, ќе се користи и терминот *трајност* којшто, во овој труд, има исто значење.

Денес, за најголем број сијалици, податокот за животниот век на сијалиците се определува на следниот начин. Множество од релативно голем број сијалици од ист тип едновременно се пуштаат во работа во стандардизирани услови. Времето од пуштањето во работа до моментот кога 50% од сијалиците ќе бидат прегорени (или 50% од примероците сè уште ќе бидат во погон) се прогласува за *номинален* животен век. Токму поради тоа, животниот век дефиниран на овој начин понекогаш се нарекува животен век со 50% „преживување“. На сликата 5.2 е прикажана типичната зависност помеѓу бројот на непрегорени сијалици и времето на експлоатација за голема група сијалици од ист тип. Кривата линија од дијаграмот прикажан на сликата 5.2 се нарекува *крива на преживување*.



Слика 5.2 Типична крива на преживување

Со оглед на статистичкиот карактер на овој податок, сосема е јасно дека не треба да се очекува сите сијалици што имаат еднаков номинален животен век да работат еднакво долго пред да прегорат.

Животниот век на сијалицата зависи од условите во коишто таа работи, како што се: погонски напон, број на вклучувања и исклучувања и сл. Овие фактори различно влијаат врз различните типови сијалици, па поради тоа стандардизираниите услови на работа на сијалиците зависат од типот на сијалицата. За сијалиците со жарено влакно, со оглед на тоа што честото вклучување и исклучување малку влијае

врз нивниот животен век, стандардизираните услови претпоставуваат работа на сијалиците без прекин. Од друга страна, кај сијалиците со празнење низ часови честите вклучувања и исклучувања, како и периодот на работа после секое вклучување, имаат големо влијание врз животниот век. За флуоресцентните сијалици, коишто се користат во ситуации кога бројот на вклучувања и исклучувања (интермитенција на работа) е релативно голем, номиналниот животен век се определува во услови кога сијалиците непрекинато работат со следниот циклус: 2:45 h вклучени и 15 min мирување.⁴⁸

За останатите сијалици со празнење низ часови (живини, метал-халогени и натриумови), коишто најчесто се користат така што работат релативно долго после секои вклучување, животниот век се определува во услови кога сијалиците континуирано се подложени на следниот циклус на работа: 11 h вклучени и 1 h мирување [50].

Интермитенцијата на работа на сијалиците без електроди малку влијае врз нивниот животен век, а со оглед на тоа што тие на пазарот се присутни релативно кусо време, за нив сè уште не постојат општо прифатени дефиниции за животносниот век, како и стандардизирани услови на работа [58].

Животниот век на сијалиците е карактеристика којашто најмногу зависи од типот на сијалицата. Така, на пример, кај некои халогени сијалици за специјална намена тој може да изнесува неколку десетини часови, додека кај индукционите сијалици и светлечките диоди тој достигнува и до 100 000 h⁴⁹.

Да забележиме дека животниот век на сијалиците во суштина е економска категорија. Како пример ќе ги наведеме волфрамовите сијалици за општа намена. Вообичаено, овие сијалици имаат животен век од 1 000 h. Но, животниот век не е ограничен од техничко-технолошки фактори, туку од економски фактори. Имено, степенот на развој на денешната технологија за производство на СВВ овозможува производство на сијалици со животен век од неколку десетици илјади часови. Се разбира таквите сијалици би имале многу висока цена и значително помало специфично производство отколку соодветните сијалици со покус животен век.

Тука се поставува прашањето колкав треба да биде животниот век на една сијалица за нејзината цена да биде прифатлива за крајните корисници. Голем број анализи и истражувања покажале дека производните трошоци за ВС со животен век од 1 000 h овозможуваат најприфатлива малопродажна цена на сијалиците [5].

Податокот којшто покажува колкав процент од сијалиците ќе биде во погон после определен период на експлоатација (или која е веројатноста една сијалица да биде во погон после определен период на експлоатација) овде ќе го нарекуваме

⁴⁸ Така е според ИЕС 81 [82]. Од друга страна, во САД е вообичаено животниот век на флуоресцентните сијалици да се определува за интермитенција кога после секои 3 h работа постои и период на мирување од 20 min [81]. Со оглед на релативно малите разлики помеѓу овие две интермитенции, многу често се вели дека стандардните услови на работа на флуоресцентните сијалици се со три часа работа по секое вклучување. Во натамошниот текст, ако поинаку не е нагласено, под поимот 3 часа работа ќе се подразбира интермитенција со 2:45 h работа и 15 min мирување.

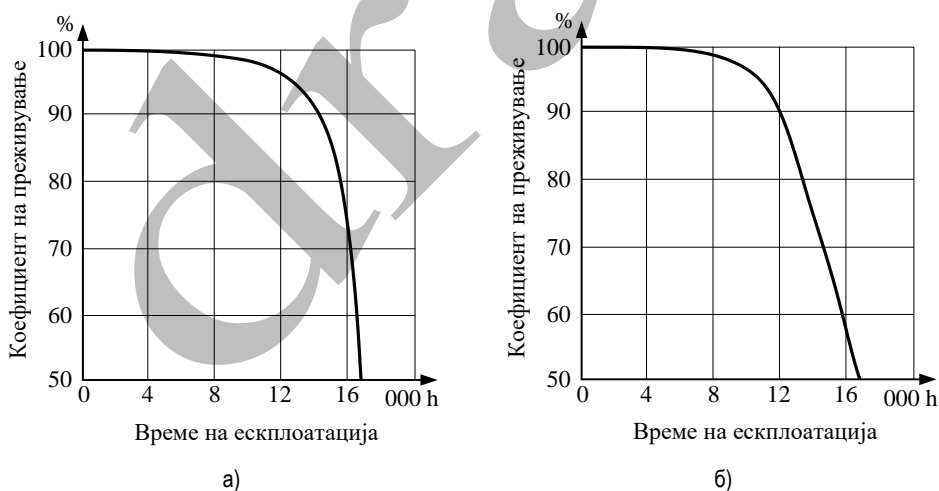
⁴⁹ За сијалиците чијшто животен век е релативно долг (неколку десетици илјади часови) тој се определува со статистички постапки врз основа на бројот на сијалици во погон после определен период, значително покус од нивниот животниот век, а номиналниот животен век се пресметува со помош на екстраполација.

коэффициент на преживување (*Lamp Survival Factor – LSF*). Коэффициентите на преживување се определуваат од кривите на преживување.

Да забележиме дека животниот век на сијалиците може да биде дефиниран и на поинаков начин. За животен век на една сијалица може да се прогласи оној период на експлоатација на сијалицата по којшто нејзиниот флукс ќе опадне до некоја прифатлива вредност од номиналниот флукс. Во овој случај, животниот век едноставно се определува од соодветниот дијаграм на стареење и тој може значително да се разликува од животниот век дефиниран како 50% преживување.

Колкава ќе биде прифатливата вредност на флуксот на сијалицата за определување на животниот век зависи од многу фактори и таа не може однапред да биде дефинирана за сите случаи. Тука предвид, пред сè, треба да се земат голем број економски фактори. Поради тоа, животниот век определен на овој начин се нарекува и *економски животен век*. Повеќе детали за економскиот животен век на сијалиците може да се најдат во поглавјето 7.

Многу често се случува животниот век на две сијалици да биде ист, но нивните криви на преживување да се разликуваат значително. На сликата 5.3 е прикажан пример на две криви на преживување за коишто по 17 000 h бројот на сијалици во погон е 50%. Но, ако се споредат коэффициентите на преживување по 12 000 h работа, се гледа дека во случајот прикажан на сликата 5.3.а сијалиците ќе имаат коэффициент на преживување околу 97%, додека соодветниот коэффициент за сијалиците од сликата 5.3.б ќе биде 90%.



Слика 5.3 Криви на преживување за ФС со еднаков животен век и различни криви на преживување

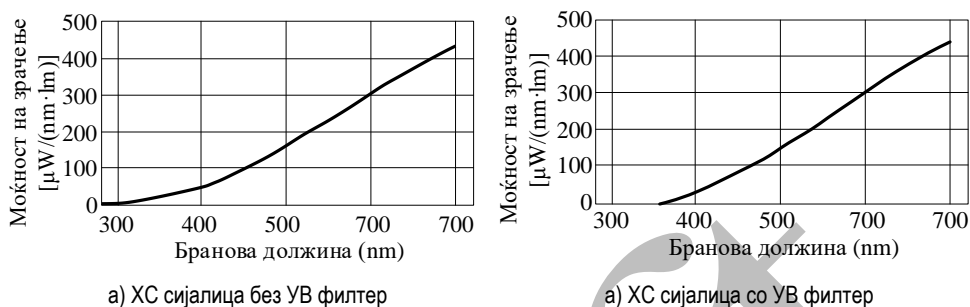
Останати карактеристики

Електричните сијалици се изработуваат со стаклени балони во голем број облици и димензии. Во зависност од температурата што се создава во стаклениот балон, стаклото од коешто се изработуваат овие балони е обично, тврдо стакло, кварцно или „керамичко“ стакло. Керамичкото стакло се изработува од синтеруван алуминиум оксид (*PolyCrystallineAlumina* – PCA) и иако не е провидно, има многу висок коефициент на пропуштање на светлината (поголем од 90%), а неговата температура на топење е околу 2 050 °C.

Притисокот во балонот може да биде доста понизок од атмосферскиот или многу повисок. Некои сијалици, особено тие што имаат релативно висок притисок во балонот и/или многу високи температури, се произведуваат со два балона: внатрешен и надворешен. Внатрешниот балон, во којшто се одвива процесот на добивање светлина, често се нарекува *горилник* или *бронер*. Надворешниот балон има повеќе функции. Кај некои сијалици на него се нанесуваат флуоресцентни слоеви за дополнително производство на светлина по пат на фосфоресценција. Покрај тоа, тој може да служи за заштита на внатрешниот балон од надворешни влијанија, како и заштита на корисниците од несаканите последици, како што се високата температура и/или ултравиолетовите (УВ) зраци, коишто, во помала или поголема мерка, се неминовно присутни кај сите типови сијалици.

Сијалиците коишто се изработени со еден стаклен балон и имаат релативно висока температура на балонот и/или повисок притисок од атмосферскиот, треба да се поставуваат во светилки со коишто се обезбедува соодветна заштита како на сијалицата така и на корисниците на осветлението.

Бидејќи ултравиолетовите зраци се штетни за живите суштества и органските материи, кај сите сијалици за општа намена е потребно да се елиминира или сведе на минимум зрачењето од тој домен. За таа цел се користат соодветни филтри. На сликата 5.4.а е прикажан спектралниот состав на зрачењето на една ХС без УВ филтер. Заштитата од УВ зраци кај сијалиците коишто имаат балони од обично стакло ја врши самото стакло коешто ги впира УВ зраците. Во останатите случаи, кога стаклените балони се изработени од кварцно стакло, се додаваат соодветни УВ филтри. На пример, на сликата 5.4.б е прикажан ефектот што УВ филтри го имаат врз спектралниот состав на зрачењето кај ХС.



Слика 5.4 Спектрален состав на зрачењето кај ХС со моќност 50 W (12 V) без и со УВ филтер [85]

Некои сијалици се изработуваат како рефлекторски сијалици. Тие се прават на тој начин што на внатрешната страна на стаклениот балон се нанесува огледален слој којшто овозможува насочување на светлината во определен просторен агол, т.е. соодветно обликување на фотометриското тело. Оваа функција, по правило, ја имаат светилките (видете поглавје 6). Наведената особина на рефлекторските сијалици овозможува тие да се користат во голем број поедноставни светилки.

Во најголем број случаи рефлекторските сијалици имаат ротационо–симетрична распределба на светлинската јачина и за нив производителите, наместо податоците за номиналниот флукс, ги даваат податоци за максималната светлинска јачина (во правецот на оптичката оска) и крива за распределбата на светлинската јачина, слично како и за светилките. За рефлекторските сијалици е вообичаено во номиналните податоци да спаѓа и вредноста на аголот, во однос на оптичката оска, за којшто светлинската јачина е двојно помала од максималната.

Електричните сијалици се поврзуваат со електричната инсталација преку соодветни приклучни елементи (држачи), популарно наречени „фасонки“, коишто воедно служат и за механичко прицврстување на сијалицата. Елементите од сијалиците, коишто го остваруваат електричниот контакт со држачот, овде ќе ги нарекуваме *приклучни капи*. Обликот и димензиите на држачите и приклучните капи се стандардизирани со соодветни меѓународни стандарди.⁵⁰

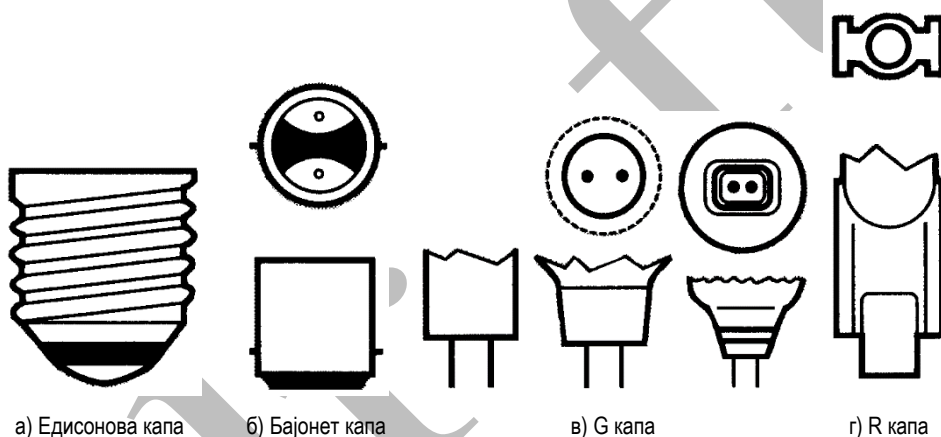
Сијалиците за општа намена се произведуваат со голем број приклучни капи. Овде ќе ги наведеме само најчесто користените, што се прикажани на сликата 5.5. *Едисоновата капа* (или *Едисонов навој*) прикажана на сликата 5.5.а се користи кај најголем број типови сијалици и, најчесто, се јавува со три номинални дијаметри: 14, 27 и 40 mm, означени со E14, E27 и E40, соодветно. Алтернатива на Едисоновата капа е таканаречената „бајонет“ капа (слика 5.5.б), погодна за случаите кога, поради вибрации, постои можност сијалицата да се одврти од држачот.

⁵⁰ Најголем број од приклучните елементи се дефинирани со соодветни IEC (*International Electrotechnical Commission*) стандарди.

Вториот тип на приклучна капа, исто така многу чест, е од типот G. Тука постојат многу подваријанти, во зависност од обликот на електричните контакти и димензиите. Некои од нив се прикажани на сликата 5.5.в.

Некои од сијалиците во вид на цевка, со приклучок од двата краја, имаат таканаречени R капи. За тој случај, облиците на контактите на држачот и сијалицата се прикажани на сликата 5.5.г.

Како што беше споменато претходно, животниот век на сијалиците се дефинира за стандардизирани услови на работа. Стандардизираниите услови се различни за секој тип сијалица, а најчесто се однесуваат на: ограничени отстапувања на погонскиот напон од номиналниот, определена температура на околината, соодветна положба на работа, определена интермитенција на работата (времетраење на работа по секое влучување) и сл.



а) Едисонова капа

б) Бајонет капа

в) G капа

г) R капа

Слика 5.5 Некои типови приклучни капи за сијалиците за општа намена [91]
(димензиите не се пропорционална на вистинските димензии)

Отстапувањата на некои од погонските услови од стандардизираниите можат, во помала или поголема мерка, да го скусат или продолжат животниот век на сијалиците.

Дозволената положба на работа за најголем број сијалици е произволна. Најчесто, ограничувања во поглед на положбата на работа постојат за сијалиците со стаклен балон во вид на цевка со должина на цевката значително поголема од нивниот дијаметар, но не се ретки случаите кога има отстапување од ова правило.⁵¹ При изборот на положбата на работа на одделните сијалици треба да се следат соодветните препораки на производителите.

⁵¹ За сите флуоресцентни сијалици во вид на цевка е дозволена произволна положба на работа.

5.1.3 Помошни и контролни уреди

Во Европа, по правило, системите за електрично осветление се напојуваат од нисконапонските електроенергетски мрежи со номинален фазен напон 230 V. Од сите типови сијалици за општа намена само ВС и некои ХС можат да работат на тие мрежи без какви и да е помошни уреди.

ХС за мали напони на мрежата се приклучуваат преку соодветни трансформатори за снижување на напонот. Кај СПГ електричниот лак има инверзна $U-I$ (волт–амперна) карактеристика и поради тоа е неопходен уред којшто, меѓу другото, треба да ја ограничи струјата во колото на сијалицата. Покрај тоа, за некои СПГ се потребни уреди наречени *стартери* или *игнители* коишто се потребни во процесот на запалување на сијалицата.

Кај сијалиците без електроди се користат соодветни електронски склопови за зголемување на фреквенцијата на наизменичната струја и/или за конверзија на наизменичната струја во еднонасочна.

Помошните уреди коишто се неопходни за функционирање на сијалиците (освен стартерите и игнитите) во овој труд ќе ги нарекуваме со еден заеднички термин *контролни уреди* (*control gear*), или накусо КУ. Се разбира, во случаите кога се зборува за точно определен уред ќе се користи соодветниот термин (трансформатор, придушница и сл.).

Контролните уреди по својата конструкција можат да бидат направени од пасивни елементи (трансформатори, електромагнетни придушници и сл.) или од полупроводнички елементи („електронски трансформатори“, „електронски придушници“ и сл.). Првите ќе ги нарекуваме *класични* или *конвенционални КУ* (ККУ), додека вторите *електронски КУ* (ЕКУ), слично како и во англискиот јазик – *Conventional Control Gear (CCG)* и *Electronic Control Gear (ECG)*. За најголем број од СПГ на пазарот се присутни КУ од двата типа (ККУ и ЕКУ), додека за сијалиците без електроди постојат само ЕКУ. Да забележиме дека за сијалиците, за коишто се неопходни стартери или игнители, ЕКУ во себе ги вклучуваат и функциите на овие помошни елементи.

По правило, контролните уреди и останатите помошни уреди се елементи коишто се одвоени од сијалиците. Исклучок се таканаречените *интегрирани компактни* ФС и *компактни* ИС кај коишто ЕКУ се интегрирани во еден уред, заедно со сијалицата.

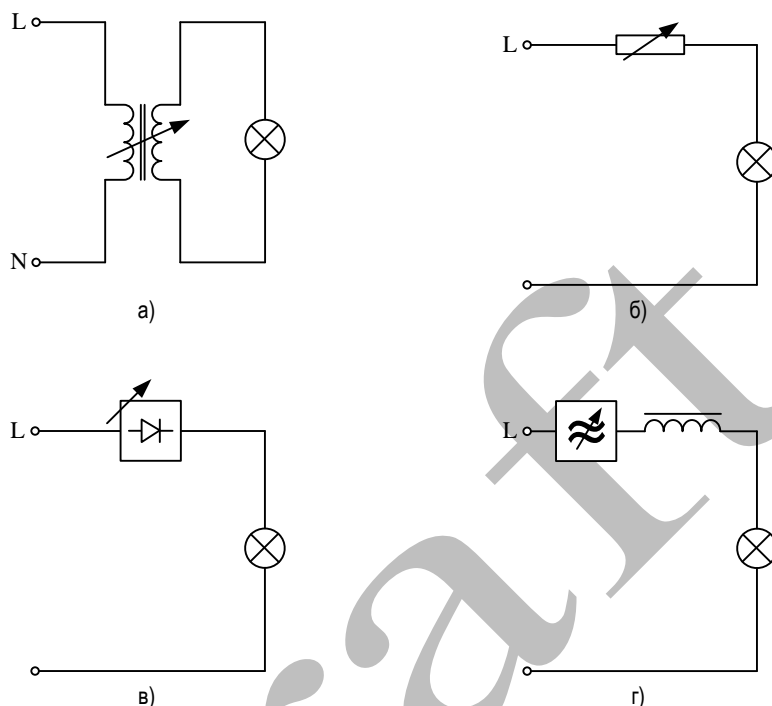
Функциите што еден КУ треба да ги обавува зависат од типот на сијалицата и за секој тип на сијалица тие ќе бидат дискутирани подетално. Покрај основните функции што еден ЕКУ ги има, во зависност од типот на сијалицата за којшто е наменет, тој овозможува една или повеќе од следните функции: стабилизација на напонот на сијалицата и оптимални услови за палење кај СПГ (што значително може да го продолжи животниот век на сијалицата), елиминација на стробоскопскиот ефект, смалување на загубите во контролните уреди, подобрување на коефициентот на стареење, подобрување на специфичното производство на сијалицата и корекција на факторот на моќност.

Во категоријата на помошни уреди можат да се вбројат и некои други елементи коишто не се неопходни за функционирањето на сијалиците, како на пример: кондензаторите за компензација на реактивната моќност, уредите за регулација на флуksот, разните контролно–управувачки елементи во системите за управување со електричното осветление итн.

Компензацијата на реактивна моќност во системите за осветление не смее да се запостави во случаите кога се користат ККУ (како што се електромагнетните придрушници или трансформаторите) бидејќи факторот на моќност во таквите случаи може да достигне вредност и помала од 0,5 – индуктивен. Компензацијата може да се изведе поединечно (за секоја сијалица одделно) или групно (за повеќе сијалици во една светилка или за повеќе светилки што припаѓаат на едно струјно коло).

Регулацијата на флуksот на сијалиците се врши со промена на ефективната вредност на струјата во сијалицата. Во основа постојат четири начини на регулација на флуksот. Нивните принципиелни шеми се прикажани на сликата 5.6. Регулацијата со помош на регулационен трансформатор (слика 5.6.а), иако има предности и може да се користи за голем број типови сијалици, нема практична примена поради високата цена на регулационите трансформатори и нивните релативно големи димензии. Регулацијата со помош на променлив индуктивитет (слика 5.6.б) има ограничена примена. Отпорник со менлива отпорност (слика 5.6.б) не се користи поради тоа што во отпорникот би се создавале значителни загуби на моќност.

Најпопуларен начин за регулација на флуksот е со тиристорски (т.е. електронски) уред (слика 5.6.в). Во електронскиот уред, со регулација на напонот на портите на двата антипаралелно поврзани тиристора, се менува ефективната вредност на струјата (со пропуштање само во определени делови од периодата). Уредите базирани на овој принцип се многу едноставни и имаат прифатлива цена, но се причина за појава на повисоки хармоници. Регулацијата на флуksот со промена на фреквенцијата (слика 5.6.г) е постапка што се користи кај ЕКУ.



Слика 5.6 Принципиелни шеми за основните начини за промена на флуksот кај сијалиците

Да забележиме дека сите наведени начини за регулација на флуksот не можат да се применат кај сите типови сијалици и дека кај некои типови сијалици практично не е можна регулација на флуksот поради негативните ефекти што работата со помал флуks (т.е. струја) ги има врз перформансите на сијалиците. Тука треба да се каже дека во струјните кола, во коишто регулацијата на флуksот се прави со тиристорски уреди (слика 5.6.в), кондензаторите (што се користат за компензација на реактивната моќност) треба да бидат поставени пред уредот за регулација, т.е. од страната на напојувањето.

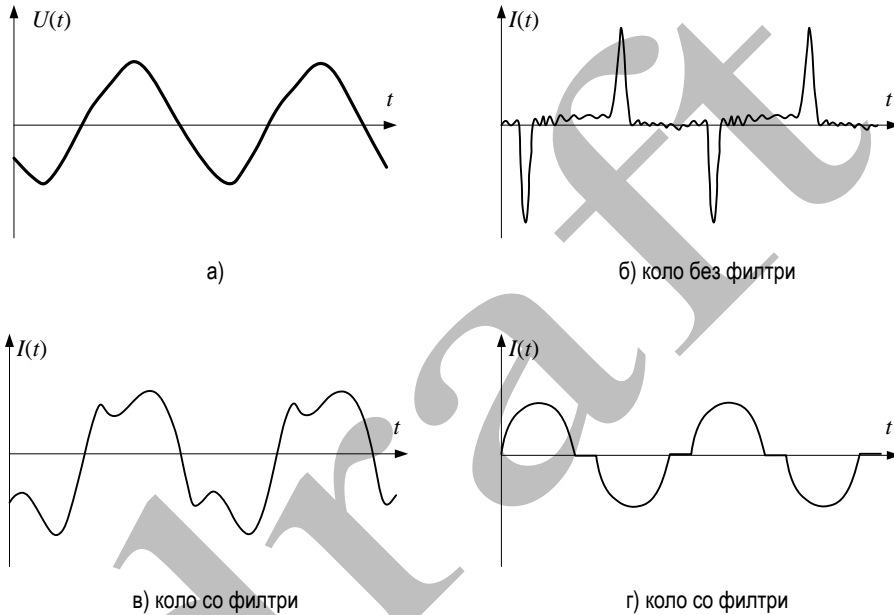
Можностите за регулација на флуksот подетално ќе бидат обработени за секој тип на сијалица одделно. Системите за управување со осветлението подетално се обработени во поглавјето 7.

По правило, животниот век на контролните и помошните уреди, со мали исклучоци, е значително подолг отколку животниот век на сијалиците за коишто овие уреди се наменети.

Електронски елементи во струјните кола на сијалиците се причинители за појава на хармоници од повисок ред. Со голем број национални и меѓународни стандарди, но и со прописите на некои електродистрибутивни компании, се ограничува присуството на повисоките хармоници. Поради тоа, во помошните уреди, коишто

создаваат повисоки хармоници, се вградуваат филтри коишто ги ограничуваат ефективните вредности на струите на повисоките хармоници.

На сликата 5.7.а и 5.7.б се прикажани временските зависности на мрежниот напон и струјата во колото во коешто се присутни повисоките хармоници. На сликите 5.7.в и 5.7.г, соодветно се прикажани временските зависности на струјата во кола во случаите кога постојат филтри за ограничување на повисоките хармоници.



Слика 5.7 Временска зависност на мрежниот напон и струјата во колото на една сијалица во кое се присутни повисоки хармоници

Во случај на постоење на повисоки хармоници, факторот на моќност се пресметува според следниот израз⁵²:

$$PF = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + THD_I^2}},$$

каде што со ϕ_1 е означена фазната разлика помеѓу првите хармоници на струјата I и напонот U во колото, P е активната моќност на колото, а THD_I е вкупна хармоничка дисторзија на струјата во колото.

Вкупната хармоничка дисторзија е различно дефинирана од страна на IEEE и ИЕС. Изразот за пресметка на THD_I според IEEE е:

⁵² Во техничката литература за ознака на факторот на моќност најчесто се користи грчката буква λ . Со оглед што во овој труд таа буква се користи за означување на брановата должина на електромагнетните бранови, за факторот на моќност ќе се користи ознаката PF .

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \cdot \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}, \quad (5.1)$$

додека THD_I според IEC и ANSI се пресметува со формулата:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2}}, \quad (5.2)$$

каде што со I_i е означена ефективната вредност на струјата на i -тиот хармоник, при што, во пракса, сумите од (5.1) и (5.2) се пресметуваат до 39. хармоник. Вообичаено, производителите на КУ ја користат дефиниција од IEEE. THD_I е бездимензионална големина и често се изразува во проценти.

Во фазните спроводници на трифазните системи струите од третиот хармоник се во фаза, поради што резултантната струја во неутралниот спроводник нема да биде нула дури и во случаи на идеално симетрични оптоварувања. Истото важи и за струите од деветтиот, петнаесеттиот итн. хармоник, но со оглед на тоа што тие имаат значително помали ефективни вредности, нивното влијание врз струјата во неутралниот спроводник е помало. Покрај тоа, присуството на струи од повисоките хармоници предизвикува и хармонична дисторзија на мрежниот напон.

За илустрација, за сијалиците со номинална моќност поголема од 25 W, во табелата 5.1, се прикажани дозволените ефективни вредности на струите од повисоките хармоници според важечките прописи во Европската Унија [82]. Вредностите на вкупната хармоничка дисторзија прикажани во табелата 5.1 се пресметани ако ефективните вредности на струите од повисоките хармоници се еднакви на максимално дозволените. За споредба, во САД најголемата дозволена вредност на THD_I , за опремата што се користи во светлотехниката, според ANSI е 32%. Од друга страна, прописите коишто ја регулираат примената на опрема во зградите на федералната администрација на САД и прописите на некои електродистрибутивни компании во САД дозволуваат примена на електрични уреди со THD_I помала од 20% [81].

Вкупната хармонична дисторзија на електричните сијалици, заедно со помошната опрема, зависи од конструкцијата на сијалиците и од КУ. Така, на пример, според резултатите презентирани во [78], THD_I се движи од 1% за волфрамовите сијалици до 150% за некои флуоресцентни сијалици со ЕКУ без соодветни филтри и со релативно низок фактор на моќност. По правило, за електричните кола на сијалиците што работат со ККУ и кај коишто постои компензација на реактивната моќност, THD_I е помала од 20%, додека соодветните кола со ЕКУ, ако имаат филтри за елиминација на повисоките хармоници, можат да имаат THD_I пониски и од 10%. Тука треба да се каже дека дополнителните трошоци за ЕКУ, со коишто се ограничуваат повисоките хармоници и подобрува факторот на моќност, можат да достигнат и до 15% од крајната цена на ЕКУ [78].

Од податоците изложени во табелата 5.1 произлегува дека во еден систем за електрично осветление, напојуван преку три фазни и неутрален спроводник и каде што присуството на повисоките хармоници е во пропишаните рамки, при урамнотежено оптоварување на фазите, струјата во неутралниот спроводник може да достигне вредност што е споредлива со струјата во фазните спроводници. Поради тоа, пресекот на неутралниот спроводник од каблите (или инсталационите спроводници за напојување на таквите системи) не смее да биде помал од пресекот на фазните спроводници.

Табела 5.1 Дозволени ефективни вредности на струите од повисоките хармоници [82]

Хармоник	Ефективна вредност на струјата во проценти во однос на ефективната вредност на основниот хармоник
2	20
3	$30 \times PF$
5	10
7	7
9	5
11 до 39	3
<i>THD</i> (IEEE)	34,8 %
<i>THD</i> (IEC/ANSI)	32,9 %

5.1.4 Специфично производство

Кај контролните уреди, како и кај сите останати електрични уреди, се јавуваат загуби на електрична моќност. Многу често овие загуби се изразуваат во проценти од номиналната моќност на сијалицата за којашто е предвиден контролниот уред. Големината на загубите зависи од многу фактори. Кај ККУ најголемо влијание има квалитетот на трансформаторските лимови за изработка на магнетните кола. Дека загубите во КУ не смеат да се игнорираат покажува и фактот што, на пример, кај некои ФС со релативно мали моќности, процентуалната загуба на моќност во ККУ може да достигне и до 50% од номиналната моќност на сијалицата [98].

Во споредба со ККУ, електронските КУ, наменети за ист тип на сијалица, имаат значително помали загуби. Загубите во ЕКУ можат да бидат помали дури и за 50% од загубите кај соодветните ККУ.

Загубите во КУ се неизбежни и за изборот на КУ треба да се води сметка при проектирањето на електричното осветление, особено во случаите на големи објекти каде што во системот за осветление може да има неколку илјади сијалици.

Со оглед на тоа што за најголем број сијалици КУ се неопходни елементи, коректно би било специфичното производство за тие сијалици да биде прикажано земајќи ги предвид и загубите во КУ, т.е. да се оперира со:

$$\xi_{\text{сијалица+КУ}} = \frac{\Phi_{\text{сијалица}}}{P_{\text{сијалица}} + \Delta P_{\text{КУ}}} \quad (5.3)$$

Меѓутоа, бидејќи во голем број случаи една сијалица може да се користи со два или повеќе типови КУ, производителите не го вклучуваат влијанието на КУ во податоците за специфичното производство на сијалиците. Таквата пракса ќе биде следена и во овој труд, при што, во сите случаи каде е можно, ќе бидат презентирани и податоци за специфичното производство со вклучени загуби во КУ.

Специфичното производство е една од позначајните карактеристики на сијалиците и тоа зависи од конструктивните карактеристики на сијалиците. По правило, сијалиците од ист тип (со приближно исти температури на боја и индекси на репродукција на боја) имаат поголемо специфично производство ако имаат поголема номинална моќност. На сликите 5.8.а до 5.8.д е прикажана зависноста на специфичното производство од номиналната моќност за четири типа сијалици. Кривите линии прикажани на сликите 5.8 претставуваат логаритамска зависност на специфичното производство ξ во функција од номиналната моќност на сијалиците P :

$$\xi = a + b \cdot \ln P,$$

каде што коефициентите a и b се пресметани со помош на постапката од нумеричката математика за минимална сума на квадратите на отстапувањата на функцијата од измерените вредности. Слични криви се добиваат и ако зависноста не е логаритамска, туку во форма на полином од втор степен.

Постојана е заложбата на производителите на сијалици за зголемување на специфичното производство. Но, поголемото специфично производство, по правило, значи и полош индекс на репродукција на бојата. На сликата 5.9 е прикажана врската помеѓу индексот на репродукција на бојата и специфичното производство за некои типови сијалици. Одбраните претставници имаат моќност од 80 W и температура на боја од околу 3 000 K. За оние типови сијалици коишто не се произведуваат за таа номинална моќност или температура на боја, се земени најблиските претставници. Податоците за одбраните сијалици се прикажани во табелата 5.2.

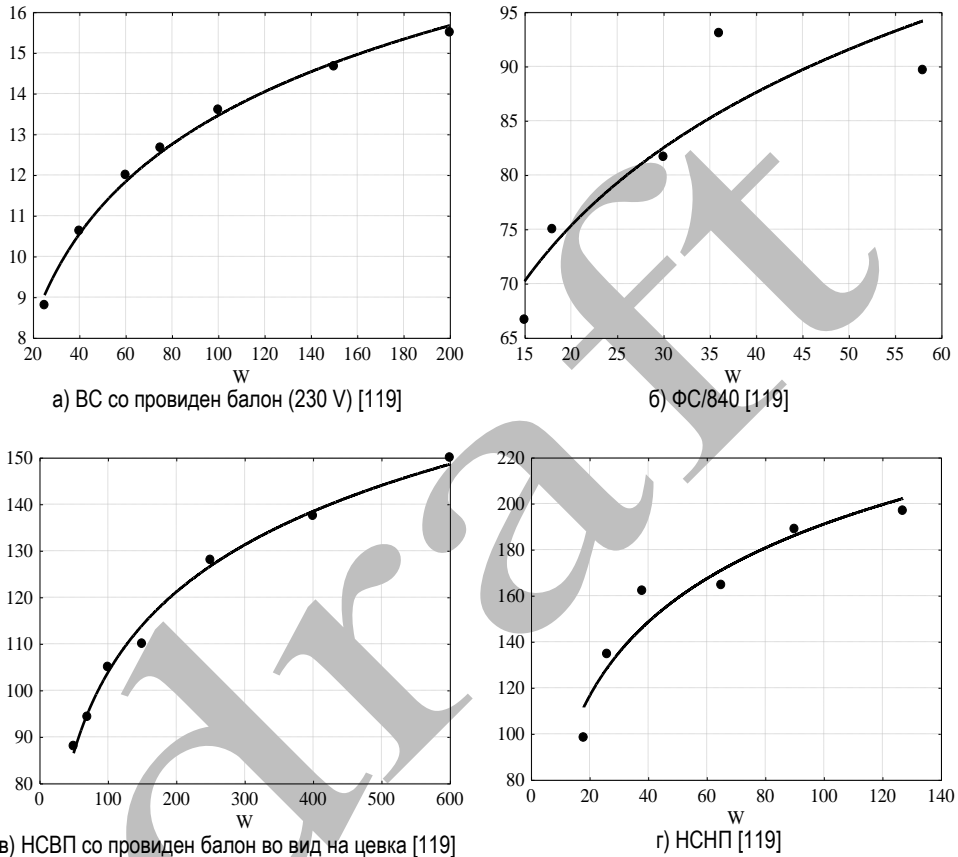
Од податоците прикажани во табелата 5.2 е очигледно дека НСНП има најголемо специфично производство и најмал индекс на репродукција на бојата. Од друга страна, сијалиците со вжарено влакно (BC и XC) имаат најмало специфично производство и најголем индекс на репродукција на бојата. Испрекинатата линија од сликата 5.9 ги поврзува точките од дијаграмот за овие два типа сијалици, додека полната линија ја покажува линеарната зависност на R_a и ξ :

$$R_a = c + d \cdot \xi,$$

каде што коефициентите c и d се определени со постапката за најмала сума на квадратите на отстапувањата.

Од дијаграмот на сликата 5.9 е јасно дека, од аспект на специфичното производство и индексот на репродукција на бојата, „идеална“ би била сијалицата за којашто пресекот на апсцисата и ординатата во $(R_a; \xi)$ дијаграмот би се наоѓал во горниот десен агол од дијаграмот. Но, според податоците изнесени во одделот 2.4.3 и потпоглавјето 3.4 (пример 3.2) ова не е практично изводливо. Имено, за една сијалица да има индекс на репродукција на боја блиску до 100, нејзиниот спектар на зрачење

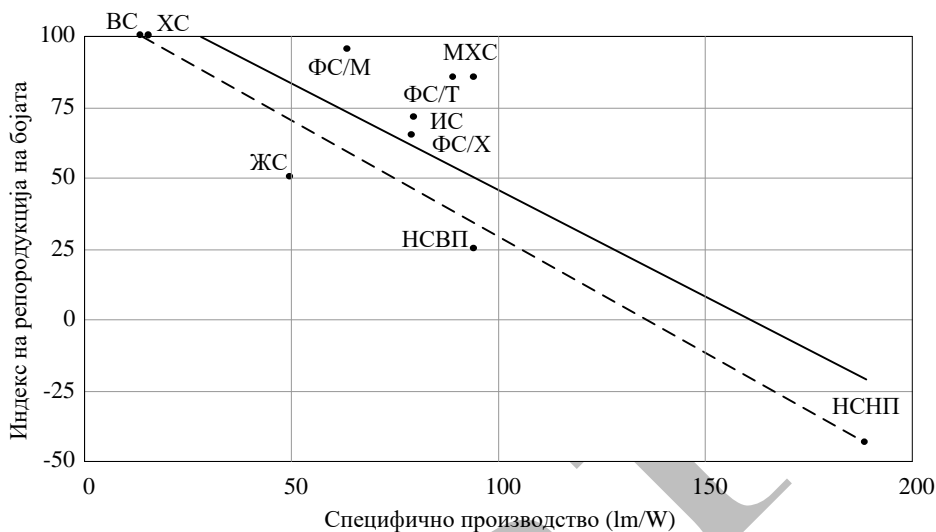
треба да ги содржи скоро сите бранови должини на светлината. Од друга страна, светлинската ефикасност на сијалиците ќе биде поголема ако најголем дел од зрачењето е во тесен опсег на бранови должини, во близината на максимумот на кривата на спектрална осетливост на човечкото око (слика 2.3).



Слика 5.8 Зависност на специфичното производство од номиналната моќност за некои типови сијалици

Според податоците прикажани на сликата 5.9, од комерцијално расположливите сијалици, некои МХС и ФС со трифосфорен флуоресцентен слој имаат „најдобар“ сооднос на специфичното производство и индексот на репродукција на бојата.

Да забележиме дека високото специфично производство на една сијалица не мора секогаш да резултира и со висока енергетска ефикасност на еден систем за осветление. Имено, енергетската ефикасност на еден систем за осветление зависи и од други фактори, меѓу кои еден од позначајните е коефициентот на искористување на светилките (видете поглавје б).



Слика 5.9 Зависност на индексот на репродукција на бојата од специфичното производство за сијалиците прикажани во табелата 5.2

Табела 5.2 Номинални податоци за сијалиците од сликата 5.9 [119,91]

Тип на сијалица	Комерцијална ознака	P (W)	ξ (lm/W)	R_a	CCT^{53} (K)
Натриумова со низок притисок (НСНП)	Osram SOX-E	90	189	-44	-
Натриумова со висок притисок (НСВП) со провиден балон во вид на цевка	Philips SON-T Plus	70	94	25	1 950
Метал-халогена (МХС) со керамички брелер и провиден балон	Philips CDM-T/830	70	94	85	3 000
Флуоресцентна со трифосфорен слој (ФС/Т)	Philips 'TL'D 58/830	58	90	85	3 000
Индукциона сијалица (ИС)	Philips QL 85W/830	85	71 ⁵⁴	80	3 000
Флуоресцентна со халофосфатен слој (ФС/Х)	Philips 'TL'D 58/29	58	79	65	3 000
Флуоресцентна со мултифосфорен слој (ФС/М)	Philips 'TL'D 58/930	58	64	95	3 000
Живина со висок притисок (ЖС)	Osram HQL de luxe	80	50	50	3 200
Халогена (ХС)	Osram Halolux Ceram	75	15	100	2 900
Волфрамова (ВС)	Osram Super E SIL 75	75	14	100	~2 700

⁵³ CCT е дефинирана во одделот 2.4.2.

⁵⁴ Специфичното производство е за системот сијалица и контролен уред.

5.2 Сијалици со вжарено влакно

5.2.1 Општи карактеристики на сијалиците со вжарено влакно

Кај СВВ светлината се добива по пат на затоплување на метално влакно на температура повисока од 2 000 К. Спектарот на емитираната светлина е континуиран и најголем дел од моќноста на зрачењето е во инфрацрвениот дел од спектарот на оптичкото зрачење. Зрачењето од реалните тела загреани на температура поголема од апсолутната нула наједноставно се опишува со зрачењето што ИЦТ го има кога е загреано на истата температура. Спектралниот состав на моќноста на зрачењето на ИЦТ по единица површина (спектрален состав на емисијата на зрачењето) може да се опише со следниот математички закон [5]:

$$M_e(\lambda) = 3,7418 \cdot 10^{-25} \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{0,014388}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1},$$

каде што брановата должина λ се изразува во метри, а температурата T во келвини, при што спектралната емисија на зрачењето се добива во $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$.

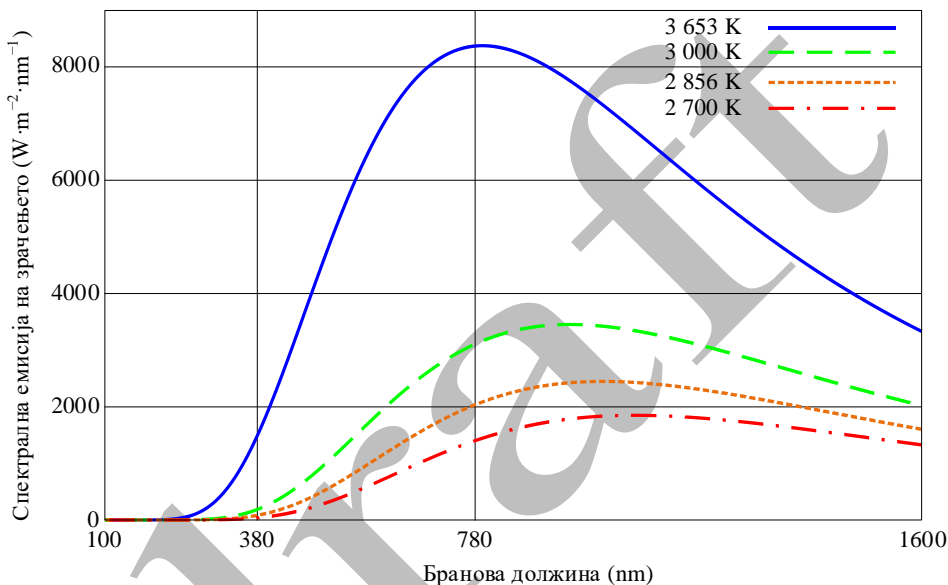
За дел од спектарот на оптичкото зрачење на сликата 5.10 се прикажани спектралните емисии на зрачењето на ИЦТ при четири температури. Како што може да се забележи од сликата 5.10, интензитетот на зрачењето во видливиот дел од спектарот ќе биде поголем ако температурата е повисока, а со тоа, за иста ангажирана електрична моќност ќе биде повисоко и специфичното производство. Но, многу мал број материјали можат да издржат температури какви што се прикажани на сликата 5.10. Од металите, волфрамот има највисока температура на топење (3 653 К), релативно голема механичка цврстина и релативно бавно испарување при високите температури. Токму поради овие својства волфрамот се користи за изработка на влакната кај СВВ. За подобрување на механичките својства на волфрамот му се додава и торниум оксид.

Иако температурата на топење на волфрамот е релативно висока, работната температура на влакното кај СВВ е значително пониска. Така, на пример, температурата на влакното кај ВС е околу 2 700 К, додека кај ХС таа е околу 3 000 К. Кај некои специјални ХС температурата може да достигне и до 3 400 К. Повисоката температура на влакното придонесува за поголемо специфично производство, но и за намалување на трајноста. Имено, испарувањето на волфрамот на повисоки температури е значително поинтензивно,⁵⁵ поради што доаѓа до истенчување на волфрамовото влакно и, неминовно, до негово прекинување. Всушност, трајноста на СВВ зависи од трајноста на самото влакно.

За да се спречи оксидацијата на усвитеното влакно, кај првите сијалици воздухот бил извлекуван од стаклениот балон. Покрај тоа, вакуумот овозможува и

⁵⁵ Степенот на испарување на волфрамот експоненцијално расте со порастот на неговата температура [5].

намалено одведување на топлината од влакното по пат на конвекција и кондукција.⁵⁶ Подоцна, во текот на развојот на СВВ, било установено дека во стаклениот балон можат да се користат инертни гасови коишто имаат релативно мала термичка спроводливост, а коишто воедно ги намалуваат и испарувањата на волфрамовото влакно.⁵⁷ Покрај тоа, кај ХС се додаваат некои халогени елементи, најчесто јод и бром.



Слика 5.10 Спектрална емисија на зрачењето за ИЦТ при разни температури

Употребата на инертните гасови е оправдана (и се практикува) кај сијалиците со поголеми номинални моќности бидејќи, колку и да е мала термичката спроводливост на инертните гасови, тие сепак ја одведуваат топлината од влакното и со тоа ја намалуваат ефикасноста (т.е. специфичното производство) на сијалицата.

Од инертните гасови најчесто се користат аргон и криптон. Поради особината на аргонот лесно да се јонизира (што може да доведе до електрични празнења во гасот на сијалицата), на аргонот најчесто му се додава азот. Криптонот има многу подобри својства (помала термичка спроводливост и овозможува помало испарување на волфрамот) отколку аргонот во комбинација со азот. Така, температурата на волфрамовото влакно кај ВС со атмосфера на криптон може да биде повисока, а како резултат на тоа овие сијалици имаат поголемо специфично производство или скоро

⁵⁶ Специфичното производство што жица од волфрам (загреана на температурата на топење) може да го постигне во услови кога не постојат загуби на топлината по пат на кондукција и конвекција, изнесува 53 lm/W. Како што може да се види од натамошниот текст, СВВ имаат значително помало специфично производство.

⁵⁷ Испарените волфрамови атоми се судираат со атомите од инертниот гас поради што релативно голем број од нив се враќаат на влакното [5].

двојно поголема трајност за исто специфично производство во споредба со сијалиците исполнети со аргон. Но, нивната цена е повисока поради повисоката цена на криптонот. Во некои случаи, како инертен гас се користи и ксенонот којшто има подбри својства и од криптонот, но и многу повисока цена.

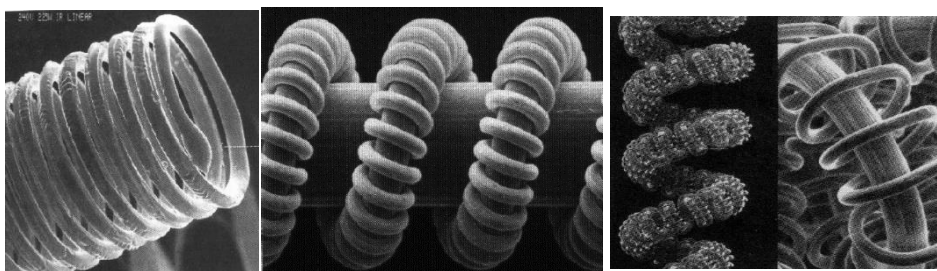
Големината на стаклениот балон кај СВВ е определена од два меѓусебно спротивставени фактора. Со цел да се добие помала (компактна) сијалица се тежнее балонот да биде што е можно помал. Но, изработката на сијалиците со помали стаклени балони претставува проблем поради тоа што стаклото ќе биде многу поблиску до усвитеното влакно и ќе биде изложено на релативно високи температури. Овој проблем делумно може да се надмине со користење на кварцно стакло коешто има значително поголема отпорност на високи температури отколку обичното стакло. Но и помал коефициент на впивање на УВ зраци.

Вториот, многу позначен фактор, којшто условува поголеми димензии на стаклениот балон е испарувањето на волфрамот. Имено, во текот на работата на една СВВ најголем дел од испарениот волфрам ќе се наталожи на внатрешната страна од стаклениот балон. Дебелината на наталожениот волфрамов слој е релативно мала ако балонот е со релативно големи димензии, но во секој случај доволно голема да влијае врз намалувањето на флуksот во текот на експлоатацијата на СВВ. Кај СВВ чијашто примена наложува многу мали димензии на балонот (на пример, автомобилските сијалици), дебелината на наталожениот волфрамов слој е многу поголема и, како резултат на тоа, кај ваквите сијалици почесто доаѓа до зацрнување на стаклениот балон.

Од досегашното излагање е очигледно дека најголемите проблеми кај СВВ сврзани со трајноста, специфичното производство и стареењето на сијалиците произлегуваат од волфрамовото влакно. Денес волфрамовите влакна се изработуваат како спирални влакна, при што спиралата може да биде единична, двојна или, поретко, тројна (слики 5.11.а, б и в).

Влакната во вид на спирала од тенка волфрамова жица имаат неколку предности. Прво, должината на влакното⁵⁸ е значително помала отколку должината на волфрамовата жица, со што се намалуваат можностите за нејзино кинење од механички потреси. Второ, ефективната површина од којашто топлината може да се пренесе на околината (загуби од кондукција и конвекција) е значително смалена. И, трето, истенчувањето на жицата поради испарувањето на волфрамот од површините на жицата внатре во спиралата е намалено поради фактот што е многу поголема веројатноста испарените волфрамови атоми да се вратат на соседните навивки од спиралата.

⁵⁸ Во натамошниот текст терминот *волфрамово влакно* ќе го користиме наместо терминот *спирала од волфрамова жица*.



а) единична спирала [5]

б) двојна спирала [84]

в) тројна спирала [5]

Слика 5.11 Форми на волфрамовото влакно кај сијалиците со жарено влакно

Поради претходните две причини, волфрамовите влакна изработени во вид на спирала можат да работат на повисоки температури, без намалување на нивната трајност. Тројната спирала има најдобри својства во овој поглед, но нејзиното производство е релативно скапо, и поради тоа влакната во вид на тројна спирала, главно, се користат за сијалици за специјални намени.

На сликата 5.11.б е прикажан изгледот на двојна спирала од волфрамова жица во една од меѓуфазите на производниот процес. Единичната спирала се изработува на тој начин што волфрамовата жица, најнапред, се намотува на значително подебела жица од молибден. Потоа, така добиената единична спирала се намотува на друга жица од молибден. На крајот, жиците од молибден се отстрануваат со разложување во киселини [84].

Дебелината на волфрамовата жица, од којашто се изработуваат влакната кај СВВ, не е еднаква за сите сијалици, а зависи, пред сè, од номиналниот напон и номиналната моќност на сијалицата. Така, на пример, за сијалица со моќност од 25 W, дијаметарот на волфрамовата жица е $15 \pm 4 \mu\text{m}$ [95]. Дијаметарот на жицата не смее значително да варира по нејзината должина поради тоа што на местата каде што истиот е помал, отпорноста ќе биде поголема. Бидејќи струјата во жицата е иста, температурата на местата со помал дијаметар (*локална температура*) ќе биде повисока. Поради тоа ваквите точки се нарекуваат *жешки точки* (*hot spots*). Како резултат на повишената температура, испарувањето на волфрамот од жешките точки е поинтензивно, поради што доаѓа до натамошно истенчување на жицата, односно до нејзино конечно топење (прекинување). Да забележиме дека жешките точки се јавуваат и поради нееднакви растојанија помеѓу соседните навивки од спиралите. На местатата каде што растојанието помеѓу соседните навивки од спиралата е помало отколку предвиденото, локалната температура на спиралата е повисока отколку температурата на останатите делови како резултат на таканаречената „заробена“ термичка радијација [5]. На сликата 5.11.а е прикажан дел од прегорена единична спирала, прекината во жешка точка.

Прегорувањето на волфрамовото влакно во жешките точки настанува, најчесто, во моментот на вклучување на сијалиците. Причината за тоа е што струјата на пуштање кај СВВ е значително поголема отколку номиналната струја. За илустрација,

односот на струјата на пуштање и номиналната струја кај ВС е 12 до 14, додека кај ХС тој однос е од 16 до 20. Времетраењето на струјниот удар е $0,1 \div 1,0$ ms, додека времето потребно за опаѓање на струјата до нејзината номинална вредност се движи во границите од 50 ms до 230 ms.⁵⁹

„Термичките шокови“⁶⁰ на коишто е изложено волфрамовото влакно при вклучување и исклучување на сијалиците можат да влијаат врз трајноста на сијалиците, но тоа влијание е помалку значајно во споредба со влијанието што врз трајноста го имаат останатите фактори. Според тоа, бројот на вклучувања и исклучувања кај СВВ практично не влијае врз трајноста, што не е случај кај сијалиците со празнење низ гасови⁶¹. Вообичаено, ВС за општа намена се изработуваат со номинален животен век од 1 000 h, додека трајноста на ХС за општа намена е поголема и најчесто изнесува $2\,000 \div 4\,000$ h. Специјалните видови сијалици од двата типа можат да имаат трајности значително различни отколку претходно наведените. Така, на пример, некои ХС наменети за фото–опрема може да имаат трајност од само 15 h, додека некои специјални ВС (за тешки услови на работа) имаат трајност од 2 000 h.

Отстапувањето на погонскиот напон од номиналниот кај СВВ има големо влијание врз трајноста на сијалиците. Причината за тоа е што температурата на влакното е зависна од напонот на сијалицата и, при напон повисок од номиналниот, степенот на испарување на волфрамот од жешките точки е поголем, со што се намалува трајноста. Обратно, кога погонскиот напон е понизок од номиналниот, трајноста се зголемува.

Врската помеѓу животниот век и флуksот на СВВ, од една страна, и погонскиот напон, од друга страна, може да се изрази со следните математички закони:

$$V = V_{\text{НОМ.}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ.}}}{U} \right)^{\nu} \quad \text{и} \quad \Phi = \Phi_{\text{НОМ.}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ.}}} \right)^f, \quad (5.4)$$

каде што со Φ , U и V се означени флуksот на сијалицата, погонскиот напон и животниот век, соодветно. Кај ВС вредноста на експонентот ν (кога погонскиот напон е $U_{\text{НОМ.}} \pm 10\%$) е во границите од 11,8 до 14,5, додека вредноста на експонентот f се движи во границите од 3,30 до 4,00 [5,6]. Да забележиме дека експонентите од (5.4) за ХС малку се разликуваат од соодветните за ВС.

На сликата 5.12 се графички прикажани зависностите на трајноста и флуksот од погонскиот напон за СВВ $\nu = 13,15$ и $f = 3,65$. Од дијаграмите прикажани на сликата 5.12 јасно се гледа дека повишувањето на погонскиот напон за само 5% ќе ја намали трајноста на сијалицата за 50%, а при тоа флуksот ќе се зголеми само за околу 20%.

⁵⁹ Податоците се однесуваат за ВС за номинални моќности од 25 до 2000 W и номинален напон 120 V [6].

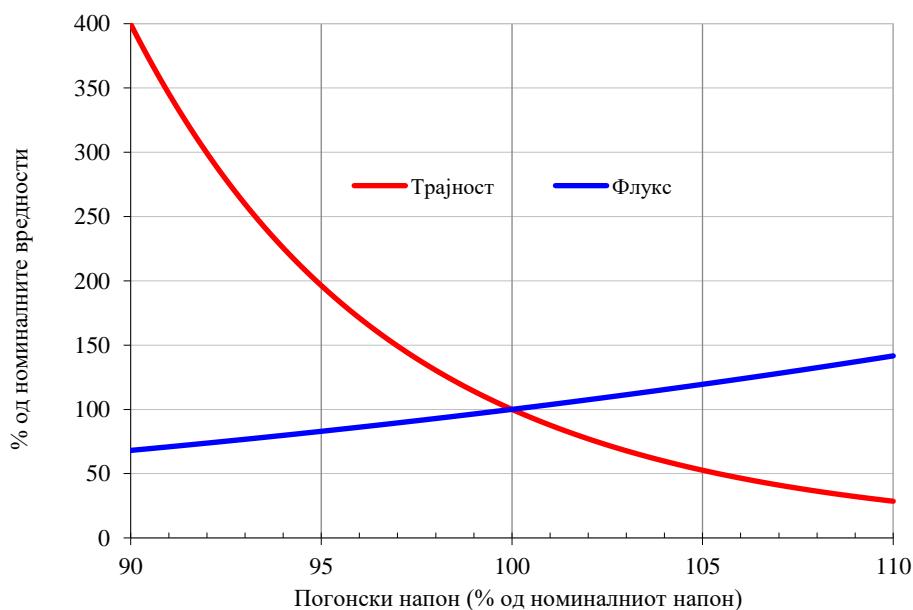
⁶⁰ Под тој термин се подразбираат брзи промени на температурата на влакното. За илустрација, за ВС со номинални моќности од 6 до 1 000 W (120 V) времето потребно за загревање на влакното до моментот кога флуksот достигнува 90% од номиналната вредност се движи во границите од 4 до 670 ms, додека времето потребно за ладење на влакното до моментот кога флуksот на сијалицата достигнува 10% од номиналната вредност се движат во границите од 1 до 300 ms [6].

⁶¹ Во литературата постојат спротивни информации во поглед на влијанието на бројот на вклучувања и исклучувања врз трајноста, особено, за ХС [82, **Error! Reference source not found.**].

Обратно, ако погонскиот напон е за 5% помал од номиналниот напон, трајноста се зголемува за два пати, а флуksот ќе опадне за околу 20%.

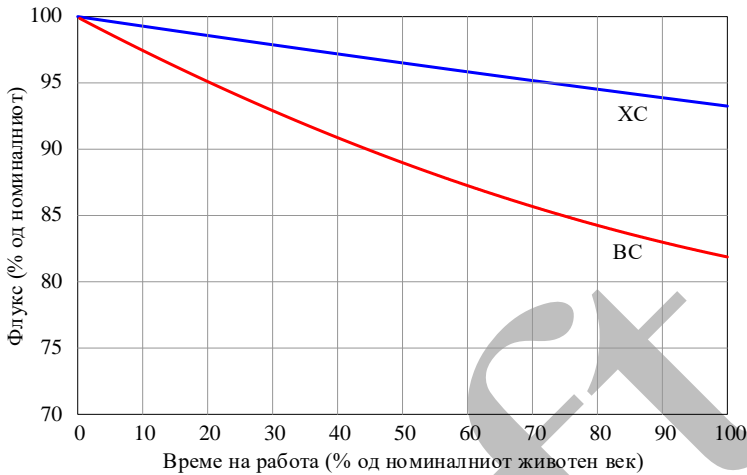
Флуksот кај СВВ може едноставно да се регулира со менување на ефективната вредност на струјата во сијалиците. Денес, тоа се прави со релативно едноставни и евтини електронски уреди коишто овозможуваат менување на флуksот во границите од 0 до 100% од номиналниот флуks. Да забележиме дека кај ХС постојат определни ограничувања во поглед на степенот и можностите за регулација. За повеќе детали видете во одделот 5.2.3.

Како што претходно беше кажано, флуksот на сијалиците опаѓа во текот на експлоатацијата. Опаѓањето на флуksот кај СВВ е резултат на намалениот коефициент на пропуштање на стаклените балони поради нафаќање на испарениот волфрам, но и поради намалување на струјата во сијалицата како резултат на смалувањето на дијаметарот на волфрамовата жица поради испарувањето. Коефициентите на стареење за ВС и ХС не се еднакви, при што ХС сијалици имаат помали испарувања на волфрамот и коефициентот на стареење кај нив е повисок (слика 5.13).



Слика 5.12 Зависност на трајноста и флуksот од погонскиот напон кај сијалиците со вжарено влакно

Флуksот што ВС го имаат на крајот од номиналниот животен век (1 000 h) е помал од номиналниот за околу 18%. Од друга страна, ХС на крајот од својот номинален животен век (2 000÷4 000 h) имаат флуks помал од номиналниот само за околу 7%.



Слика 5.13 Криви на стареење за сијалиците со вжарено влакно [6]

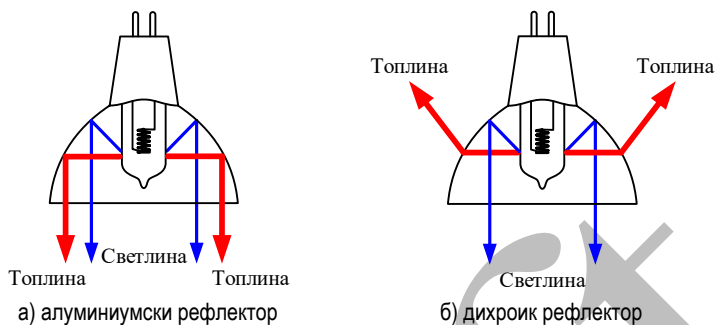
Да забележиме дека претходните законитости, сврзани со трајноста на сијалиците и стареењето, се општи карактеристики на СВВ. Кај некои СВВ за општа намена, со определени конструктивни модификации, карактеристиките можат да се разликуваат од соодветните прикажани на сликите 5.12 и 5.13.

Како и кај сите типови сијалици, специфичното производство на СВВ зависи од номиналната моќност на сијалицата. По правило, сијалиците со поголема номинална моќност имаат поголемо специфично производство. На сликата 5.8.a е прикажана зависноста на специфичното производство на BC од нивната номинална моќност.

Покрај тоа, специфичното производство кај СВВ зависи и од големината на номиналниот напон. При тоа важи правилото според кое, од две сијалици со исти конструктивни карактеристики и еднакви номинални моќности, поголем флуks (а со тоа и поголемо специфично производство) ќе има сијалицата предвидена за понизок номинален напон. Причината за ова лежи во фактот што сијалиците за понизок напон, при иста должина на волфрамовата жица, треба да имаат поголем дијаметар (т.е., помала отпорност за иста моќност) од сијалиците за повисок напон. Поголемиот дијаметар на волфрамовата жица овозможува, при иста трајност, работа на повисока температура.

Рефлекторските сијалици се изработуваат со два типа рефлектори: алуминиумски и дихроик (видете попоглавје 4.4). Алуминиумските рефлектори ја одбиваат и светлината и инфрацрвените зраци, така што сијалицата, зрачи и светлина и топлина во истиот просторен агол (слика 5.14.a). Кај дихроик рефлекторите околу 66% од топлината и дел од светлината со поголема бранова должина (црвена боја) се пропушта низ дихроик рефлекторот којшто е нанесен на стаклена подлога (слика 5.14.б). На тој начин се обезбедува таканаречен „студен светлински сноп“ (*cool beam*) и нешто повисока температура на бојата (околу 3 200 K), поради што овие рефлектори се

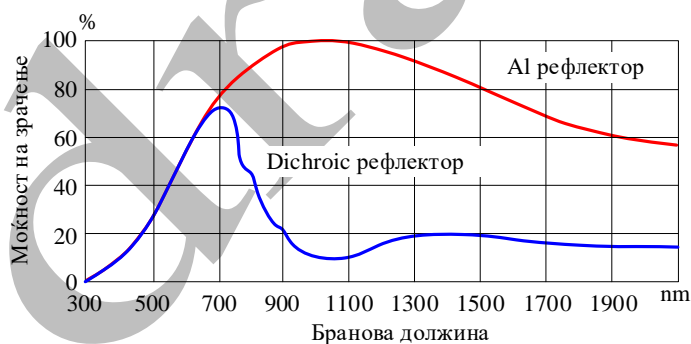
погодни за осветление на предмети осетливи на релативно високи температури (прехрамбени производи, филмска лента, уметнички слики и сл.).



Слика 5.14 Шематски приказ на ефектите од алуминиумски и дихроик рефлектор

При употребата на рефлекторските сијалици со дихроик рефлектори треба да се води сметка за топлината што сијалицата ја оддава од задната страна на рефлекторот, особено кога тие се вградени во спуштени плафони, елементи од намештај и сл.

За илустрација на влијанието на дихроик рефлекторите врз спектарот на зрачењето кај ХС, на сликата 5.15 е прикажан спектарот на зрачење на одбиената светлина од алуминиумски и дихроик рефлектор.



Слика 5.15 Спектрален состав на зрачењето на ХС со алуминиумски и дихроик рефлектор [86]

5.2.2 Волфрамови сијалици

Стаклените балони на ВС за општа намена се изработуваат во голем број форми и димензии. На сликата 5.16 се прикажани најчесто користените форми на стаклените балони. Димензиите на стаклените балони зависат од моќноста на сијалиците, а тие најчесто се изработуваат за номинални моќности од 15 до 500 W.

Стаклото од коешто е изработен балонот е обично и поради тоа, кај овие сијалици ултравиолетовите зраци се впиваат во него и не се неопходни дополнителни филтри.

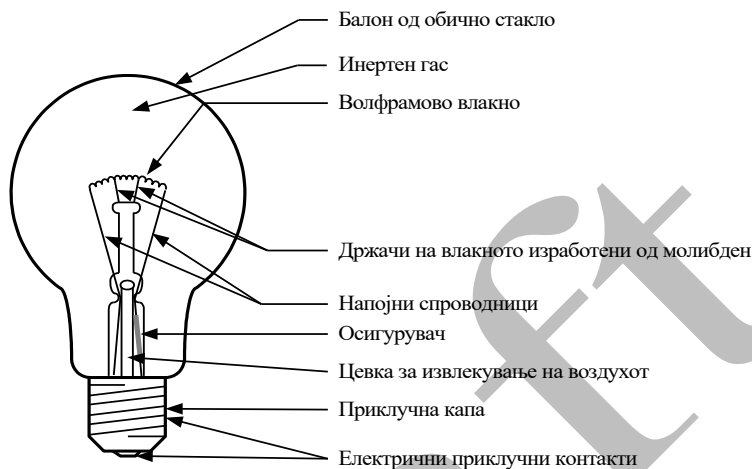


Слика 5.16 Најчести облици на стаклените балони кај ВС за општа намена (сијалиците не се прикажани во вистинските пропорции)

Стаклените балони за ВС со моќности помали од 25 W се вакуумизирани, додека за поголемите моќности тие се исполнети со инертен гас или смеса од инертни гасови. Балонот може да биде од бистро, матирано, опално или инколизирано стакло, обоено со боја или метализирано⁶².

⁶² Надворешната површина на балонот е мазна за да се намали нафаќањето на прашина и други нечистотии. Кај инколизираниите балони внатрешната страна на балонот е прекриена со тенок слој на силициум. Обоените стакла се бојат од внатрешната страна исто како што се нанесува металниот слој кај рефлекторските сијалици.

Најчесто користениот облик на стаклениот балон е во форма на круша изработен од бистро стакло. Некои од поважните конструктивни делови на ВС со балон во облик на круша се прикажани на сликата 5.17.



Слика 5.17 Конструкција на ВС со балон во вид на круша и со Едисонова приклучна капа

Приклучната капа на ВС е најчесто во форма на Едисонов навој или во форма на бајонет. ВС со моќности до 60 W се изработуваат со приклучна капа E14 или E27, за моќности до 200 W капата е E27, додека за поголемите моќности капата е E40.

Некои земји со своите национални стандарди пропишуваат ВС за општа намена да имаат и осигурувач (прикажан на сликата 5.17). Улогата на овој осигурувач е да ја прекине струјата на куса врска којашто може да се јави при прегорување на волфрамовото влакно. Имено, поради високата вредност на почетната струја може да дојде до комплетно топење на влакното и да настане електричен лак помеѓу напојните спроводници во стаклениот балон. Осигурувачот е со карактеристики коишто овозможуваат тој порано да реагира во однос на соодветните осигурувачи во напојната инсталација.

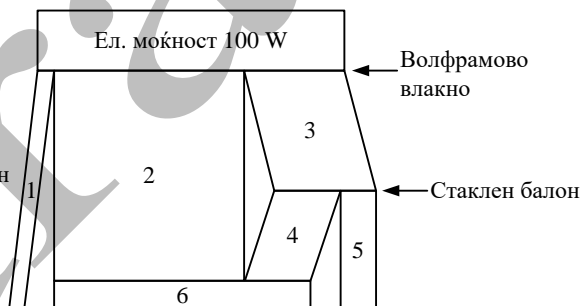
Во табелата 5.3 се прикажани номиналните флуковси и специфичното производство во зависност од моќноста на сијалицата и видот на спиралата за два номинални напона. Ако балонот на сијалицата е исполнет со криптон, флуксот (т.е. специфичното производство) може да биде поголем помеѓу 7 и 20% од соодветниот флукс на сијалицата исполнета со аргон и азот [6]. Ако стаклениот балон е изработен од опално стакло, флуксот е помал за околу 5% [91].

Табела 5.3 Номинален флуks и специфично производство за BC за општа намена со балон во вид на круша (бистро или матирано стакло) исполнет со аргон и азот [5]

Номинална моќност	Номинален флуks и специфично производство (трајност од 1 000 h)					
	Двојна спирала и номинален напон 110 V		Двојна спирала и номинален напон 230 V		Единична спирала и номинален напон 230 V	
W	lm	lm/W	lm	lm/W	lm	lm/W
25	–	–	230	9,2	220	8,8
40	500	12,5	415	10,4	345	8,6
60	840	14,0	710	11,8	620	10,3
100	1 580	15,8	1 360	13,6	1 240	12,4
150	2 420	16,1	2 160	14,4	2 060	13,7
200	3 410	17,1	3 040	15,2	2 900	14,5

На сликата 5.18 е прикажан билансот на моќности за стандардна BC со номинална моќност од 100 W. Како што може да се забележи од сликата 5.18, најголем дел од електричната моќност преземена од BC се претвора во топлина (95%), додека само 5% од моќноста се зрачи во видливиот дел од оптичкото зрачење. Од топлинската енергија најголем дел од моќноста се оддава во вид на ИЦ зрачење (83% од моќноста на сијалицата), додека преостанатиот дел од топлината се предава на околината во вид на топлински загуби по пат на конвекција и кондукција.

1. Видлива светлина 5 W
2. ИЦ зрачење од влакното 61 W
3. Загуби поради конвекција и кондукција од влакното до стаклениот балон 34 W
4. ИЦ зрачење од стаклениот балон 22 W
5. Вкупни загуби од конвекција и кондукција 12 W
6. Вкупно ИЦ зрачење 83 W



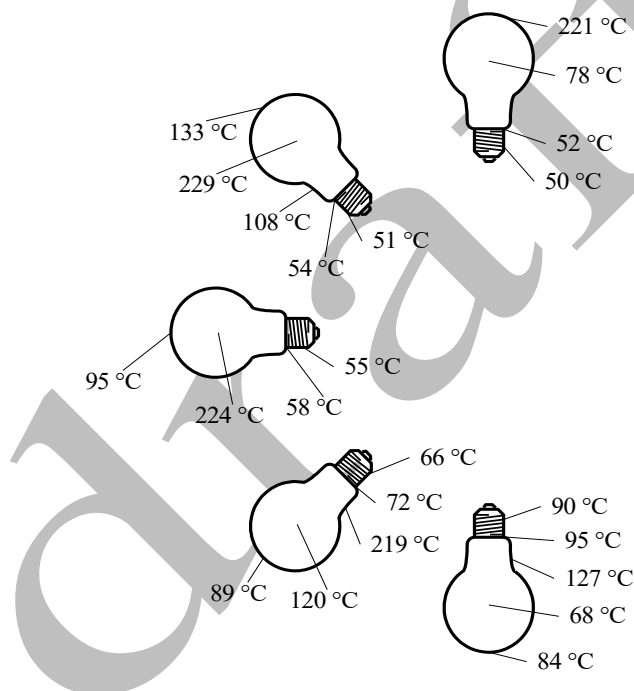
Слика 5.18 Биланс на моќности за BC со номинална моќност од 100 W [84]

Сјајноста на вжареното влакно кај BC е многу голема. За сијалиците со специфично производство од околу 20 lm/W достигнува и до 12 000 000 cd/m² [6]. Поради тоа, сијалиците со бистар балон се погодни за примена во светилки кај коишто проблемот со големи сјајности е решен на соодветен начин. Во табелата 5.4 се прикажани сјајностите на BC во зависност од видот на стаклото од коешто е изработен балонот.

Табела 5.4 Сјајност за некои ВС за општа намена со номинални моќности од 40 до 100 W [95]

Вид на балонот	Сјајност (cd/m ²)
Бистар балон	4 500 000÷6 000 000
Матиран балон	1 000 000÷3 000 000
Инколизиран балон	15 000÷22 000

За најголем број ВС производителите препорачуваат произволна положба на работа, но треба да се има предвид дека температурата на деловите од една сијалица ќе зависи од нејзината положба. За различни положби на работа, на сликата 5.19 се прикажани температурите во одделни точки од надворешната површина на една ВС со моќност од 100 W, при амбиентна температура од 25 °C.



Слика 5.19 Температури на деловите од ВС со моќност 100 W при различни положби на работа [95]

Волфрамовите сијалици имаат едноставна конструкција, едноставно одржување и замена и ниска цена. Тоа ги чини многу конкурентни и популарни во споредба со останатите типови сијалици, иако во последно време некои компактни флуоресцентни сијалици со слични карактеристики се јавуваат како алтернатива. За илустрација, се проценува дека бројот на продадени ВС во светот во 1997 е околу 10 милијарди, со очекуван годишен пораст од 3÷5% во годините што следат [112].

Волфрамовите сијалици се погодни за користење во сите оние ситуации каде што топлиот впечаток за боја е прифатлив или непходен. Тука, во прв ред, спаѓаат:

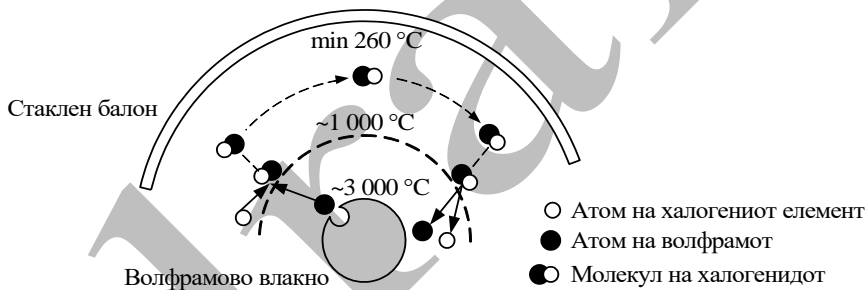
домовите, рестораните, хотелите и сл. Но, треба да се има предвид фактот дека ниското специфично производство ги чини многу несекономични ако користењето на сијалиците е долготрајно.

Рефлекторските сијалици се користат во ситуациите кога е потребно да се обезбедат поголеми осветлености на одделните делови од осветлуваната површина. Тука треба да се напомене дека рефлекторските ХС, поради поголемото специфично производство, постепено ги истиснуваат рефлекторските ВС.

5.2.3 Халогени сијалици

Халогените сијалици во комерцијално производство се јавуваат за првпат во 1959 година, иако принципот на работа на овие сијалици (и првите патенти) датира од крајот на XIX век. Но, скапата технологија за нивно производство долго време не дозволувала цените на ХС да опаднат на ниво прифатливо за крајните корисници.

По конструкцијата, ХС малку се разликуваат од ВС. Најголемата разлика се состои во тоа што во балонот, покрај инертен гас, се додаваат и некои халогени елементи, најчесто јод или бром. Присуството на халогените елементи го овозможува таканаречениот *регенеративен (кружен) процес на волфрамот*, прикажан на сликата 5.20.



Слика 5.20 Шематски приказ на регенеративниот процес кај ХС

Халогените елементи на температури пониски од 1 000 °C се соединуваат со испарените волфрамови атоми. Ако температурата е повисока од 260 °C халогенидите се во гасовита состојба поради што не се наталожуваат на стаклениот балон. Молекулите на халогенидите се движат во стаклениот балон и кога ќе дојдат во близина на волфрамовото влакно, каде што температурата е повисока од 1 000 °C, тие се разложуваат на своите составни делови, така што испарените волфрамови атоми секогаш се во близина на влакното и релативно далеку од стаклениот балон, со што веројатноста за нивно повторно враќање на влакното е многу поголема отколку кај ВС.

Поради намалената можност за таложување на волфрамови атоми на внатрешната страна од стаклениот балон, тој може кај ХС да биде изработен со значително помали димензии, отколку кај ВС со еднаква номинална моќност. Помалите димензии на балонот наметнуваат користење на кварцно стакло коешто има значително повисока издржливост на високи температури. Намалениот степен на истенчување на

волфрамовото влакно дозволува тоа да биде загреано на повисоки температури (вообичаено 3 000 K) со што се постигнува поголемо специфично производство. Кај ХС со поголеми моќности притисокот во внатрешноста на балонот е поголем од атмосферскиот.

На сликите 5.21 и 5.22 се прикажани најчестите облици на стаклените балони на ХС за општа намена и рефлекторските ХС, соодветно.

Заслужува да се нагласи дека релативно високата температура на стаклениот балон бара посебно внимание при манипулацијата со ХС. Имено, ако површината од стаклениот балон се замасти, на пример, со отисоци од прсти или нечисти помошни средства, при следното запалување на сијалицата маснотиите трајно ќе се стврднат и можат да го намалат флуксот на сијалицата. Поради тоа е потребно маснотиите да се отстранат пред сијалицата да се запали.

Сјајноста на влакното на ХС, загреано на околу 3 000 K, е околу 13 000 kcd/m² [6]. Поради тоа, а со цел да се намали сјајноста, стаклените балони на некои од ХС од сликата 5.21 можат да бидат матирани.

Бидејќи кварцното стакло пропушта ултравиолетови зраци, најголем број ХС имаат соодветни филтри.



Слика 5.21 Најчести облици на стаклените балони кај ХС за општа намена (сијалиците не се прикажани во вистинските пропорции)



Слика 5.22 Најчести облици на стаклените балони кај рефлекторските ХС (сијалиците не се прикажани во вистинските пропорции)

Халогените сијалици со стаклен балон чијашто должина е значително поголема од неговиот дијаметар имаат ограничена положба на работа. За деталите видете во каталозите на производителите.

Халогените сијалици се изработуваат за низок напон (120 или 230 V) и за мал напон (најчесто 12 V). Трајноста на ХС предвидени за низок напон е најчесто 2 000 h, додека ХС за мали напони вообичаено имаат трајност од 4 000 h.

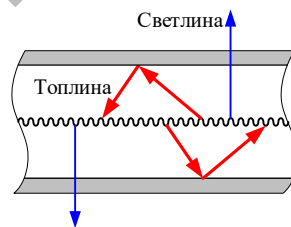
Рефлекторските ХС од сликата 5.22 се изработуваат со два типа рефлектори: алуминиумски и дихроик.

Халогените сијалици за мал напон се произведуваат за номинални моќности од 5 до 150 W, додека ХС за низок напон се изработуваат за моќности од 25 до 2 000 W. ХС со облик и димензии како и некои ВС овозможува замена на ВС со ХС, при што флуksот (односно специфичното производство) на ХС е поголем за околу 18%.

Халогените сијалици за мал напон (со номинални моќности од 5 до 150 W) имаат специфично производство помеѓу 14 и 22 lm/W. Специфичното производство на ХС за низок напон (230 V) се движи од 10 lm/W (за сијалиците со номинална моќност од 25 W) до 22 lm/w (за сијалиците со номинална моќност од 2 000 W) [91]. Да забележиме дека од две ХС со еднакви номинални моќности поголемо специфично производство ќе има сијалицата со понизок номинален напон.

За постигнување на поголемо специфично производство кај ХС, наместо криптон се користи ксенон.

Дополнително подобрување на специфичното производство кај ХС се постигнува со примена на IRC рефлекторите (видете попоглавје 4.4). Според некои пресметки максималното теоретско подобрување на специфичното производство на ХС со IRC рефлектор изнесува околу 300%. Но, засега во праксата се постигнуваат подобрувања не поголеми од 40% [5]. На сликата 5.23 шематски е прикажан ефектот на IRC рефлекторот кај ХС со балон во вид на цевка. IRC рефлекторот е поставен на внатрешната страна на стаклениот балон и се состои од повеќе тенки слоеви (околу 1 μm) на разни пропусни филтри коишто ја пропуштаат светлината, а значителен дел од инфрацрвените зраци го одбиваат назад кон влакното. Како резултат на тоа, зрачењето на топлината се намалува за околу 30%, а специфичното производство се зголемува и до 25%. Така, на пример, во табелата 5.5 се прикажани некои од номиналните податоци за ХС коишто се произведуваат во две варијанти: без и со IRC филтри. Покрај тоа, се прикажани и податоците за една рефлекторска ХС со дихроик филтер за низок напон.

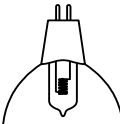
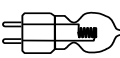



Слика 5.23 Шематски приказ на ефектите од IRC рефлектор кај ХС со балон во вид на цевка

Халогените сијалици за мал напон се приклучуваат на нисконапонските инсталации преку соодветни трансформатори за снижување на напонот. Овие

трансформатори се изработуваат како класични трансформатори со магнетно јадро (ККУ) или, во последно време, како „електронски трансформатори“ (ЕКУ).

Табела 5.5 Номинални податоци за некои ХС со и без IRC филтри [107]

Облик на сијалицата	Моќност W	Агол на рефлекторот °	Напон V	Трајност h	Светлинска јачина cd		Флукс lm		Специфично производство lm/W	
					Без IRC	Со IRC	Без IRC	Со IRC	Без IRC	Со IRC
 со дихроик филтер	20	10	12	4 000	5 000	6 000	-	-	-	-
	20	24	12	4 000	780	1 000	-	-	-	-
	20	60	12	4 000	350	450	-	-	-	-
	35	10	12	4 000	9 100	12 500	-	-	-	-
	35	24	12	4 000	3 100	4 400	-	-	-	-
	35	38	12	4 000	1 500	2 200	-	-	-	-
	35	60	12	4 000	700	1 100	-	-	-	-
	50	10	12	4 000	12 500	15 000	-	-	-	-
	50	24	12	4 000	4 400	5 700	-	-	-	-
	50	38	12	4 000	2 200	2 850	-	-	-	-
	50	40	230	2 000	750	-	-	-	-	-
	50	60	12	4 000	1 100	1 430	-	-	-	-
	35	-	12	4 000	-	-	600	900	17,1	25,7
	50	-	12	4 000	-	-	930	1 260	18,6	25,2
	300	-	230	2 000	-	-	5 000	-	16,7	-
	250	-	230	2 000	-	-	-	5 500	-	22,0
	500	-	230	2 000	-	-	9 500	-	19,0	-
	400	-	230	2 000	-	-	-	9 500	-	23,7

Класичните трансформатори имаат едноставна конструкција и релативно ниска цена. Но, тие имаат и определени недостатоци. Овде ќе ги наведеме најзначајните [82,91,96]:

- Релативно големи загуби во магнетното коло и навивките (и до 20% од номиналната моќност на трансформаторот).
- Релативно висока работна температура на трансформаторот што наметнува потреба од преземање дополнителни мерки за заштита од пожар во определени ситуации.
- Не постои можност за регулација (стабилизација) на напонот на секундарот и тој зависи од напонот на примарната страна, како и од оптоварувањето, т.е. бројот на ХС приклучени на секундарната страна (во случаите кога еден трансформатор се користи за напојување на повеќе сијалици). Поради тоа, многу често сијалиците ќе работат на напон повисок од номиналниот што придонесува за скусување на нивниот животен век.

Регулацијата на флуksот кај ХС предвидени за низок напон може да се изведе како и кај ВС со едноставни (тиристорски) регулатори на напонот. Но, во овој случај треба да се води сметка дека, при работа на пониски напони, температурата на стаклениот балон може да падне под критичната температура (260 °C) со што ќе се наруши регенеративниот процес на волфрамот. Поради тоа, се препорачува одбегнување на работа на сијалиците со флуks многу помал од номиналниот.

Халогените сијалици имаат веројатно најширока примена од сите типови сијалици. ХС за општа намена претставуваат поквалитетна и поефикасна, но и поскапа алтернатива на ВС. Малите димензии на стаклените балони на ХС овозможуваат реализација на поедноставни и поефикасни оптички системи на светилките. Покрај за општа намена, ХС се користат и за голем број специјални намени: филмски и телевизиски снимања, фото–снимања, аеродромска сигнализација, копирни апарати, проекциски системи, семафори, автомобили и останати транспортни средства, инфра-црвени греачи и др.

5.3 Сијалици со празнење во гасови

5.3.1 Општи карактеристики на сијалиците со празнење во гасови

Принципи на добивање светлина кај сијалиците со празнење во гасови

Кај сијалиците со празнење во гасови светлината се добива или само со фотолуминисценција или во комбинација со фосфоресценција. Принципите на добивање на светлината во СПГ ќе ги објасниме со помош на принципиелната шема, прикажана на сликата 5.25.

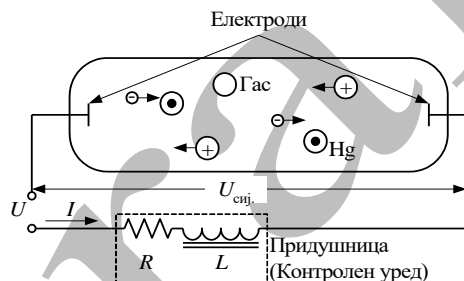
На сликата 5.25 е прикажана една сијалица со стаклен балон во вид на цевка со електроди на двата краја. Сијалицата може да се напојува со наизменичен или еднонасочен напон. Атмосферата во стаклениот балон е мешавина од повеќе гасови. Во зависност од притисокот во стаклениот балон, СПГ се делат на сијалици со низок (помалку од 1,3 Pa) и висок притисок (од неколку десетици до неколку стотини kPa) [19]. СПГ за висок притисок (ЖС, некои НСВП и МХС) и НСНП се изработуваат со два стаклени балона. Внатрешниот балон (*брeнер* или *горилник*) е сместен во поголем стаклен балон во којшто владее вакуум или е исполнет со инертен гас со цел да се намалат загубите на топлина по пат на конвекција и кондукција. Надворешниот балон може да послужи и како филтер за ултравиолетови зраци.

Атмосферата во внатрешниот балон се состои од *основно* и *дополнително полнење*. Основното полнење го сочинуваат пареи од некои метали⁶³ или нивни соединенија коишто, во процесот на фотолуминисценција, произведуваат светлина. Бројот на метали што се користат за оваа намена е ограничен, меѓу другото и, поради можните хемиски реакции со стаклото. Металите коишто се користат за добивање на светлина се: жива, натриум, талиум, индиум, калај, скандиум, диспрозиум, тулиум,

⁶³ Исклучок на ова се *ксенонските* сијалици кај коишто светлината се добива со експитација на ксенонот. Со оглед на тоа што ксенонските сијалици по конструкција се многу слични на МХС, тие се обработени заедно со МХС (видете потпоглавје 5.3.4).

холмиум и др. Живата и натриумот се користат во елементарна форма (живини и натриумови сијалици), додека кај метал–халогените сијалици се користат халогениди на претходно наведените метали. Дополнителното полнење најчесто се состои од еден или повеќе инертни гасови: аргон, криптон, неон или ксенон.

По доведувањето на напонот на сијалицата од сликата 5.25 во неа започнува движење на слободните електрони и јоните на инертниот гас, присутни во балонот поради природната радиоактивност и космичкото зрачење. Во овој период струјата помеѓу електродите е многу мала, но сепак доволна постапно да ја зголемува како концентрацијата на слободни електрони и јони така и температурата во балонот. Во определен момент, кога во балонот ќе се јави доволна концентрација на наелектризирани честички, напонот на сијалицата, т.е. напонот U , ќе биде доволен за воспоставување на електричен лак помеѓу електродите. Во тој момент струјата во електричното коло значително се зголемува и, поради инверзната волт–амперна карактеристика на лакот, напонот на сијалицата се намалува. Во услови кога во колото од сликата 5.25 не би постоела придушницата, којашто ја ограничува струјата во колото (*основна функција* на придушницата), би дошло до појава на преголема струја во сијалицата и до нејзиното уништување.



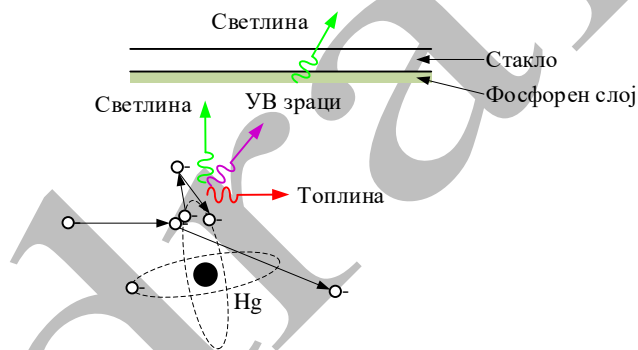
Слика 5.25 Принципиелна шема на сијалица со празнење низ гасови напојувана со наизменичен напон

Времето од приклучување на номиналниот напон на колото од сликата 5.25 до моментот кога ќе се воспостави електричниот лак зависи од својствата на гасот од дополнителното полнење во балонот. Поради тоа, кај овие сијалици се користат инертни гасови коишто имаат способност за лесна јонизација. Но, и покрај тоа, времето потребно за воспоставување на лакот може да биде многу долго. Кај некои сијалици ова време се скусува со доведување напонски импулс на електродите со помош на таканаречени *стартери* или *игнители*. Овие уреди не се прикажани на сликата 5.25.

Работната температура во внатрешниот балон може да биде и поголема од $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$. За таквите случаи, балонот се изработува од стакло отпорно на високите температури. Електродите се изработуваат од метали или нивни легури коишто мора да ги издржат високите температури, да бидат отпорни на хемиски реакции со елементите присутни во балонот и да бидат отпорни на ерозијата којашто настанува како резултат на големиот број удари на електрони и јони. Тие, најчесто, се изработуваат од волфрам или некои негови легури. Покрај тоа, на површината од

електродите се нанесува термоемисионен материјал којшто има способност за емитирање електрони.

Со настанувањето на лакот во балонот на СПГ, електроните се движат со голема брзина кон спротивно наелектризираната електрода, при што се судираат со атомите на металот, којшто е во гасовита состојба⁶⁴. На сликите 5.25 и 5.26 се прикажани судири со атоми на живата, но принципот важи и во останатите случаи. При судирот, под дејство на пренесената кинетичка енергија, електрон од валентната патека на живиниот атом привремено ја напушта стабилната орбита. Бидејќи тогаш се наоѓа во нестабилна состојба, електронот по кусо време ќе се врати на првобитната патека и, при тоа, вишокот енергија ќе го емитира во вид на фотон. Спектарот на израчената енергија зависи од составот на гасот од основното полнење и од температурата, односно притисокот во балонот. Да забележиме дека живата се користи скоро кај сите видови СПГ. Кај сијалиците каде што живата не е доминантна во основното полнење, нејзината улога е да го забрза процесот на запалување на сијалицата, а подоцна нејзиното зрачење е значително помало во однос на зрачењето на доминантниот елемент во основното полнење.



Слика 5.26 Добивање на светлина по пат на фотолуминисценција и флуоресценција

Кај флуоресцентните сијалици (т.е. живини сијалици со низок притисок) и кај живините сијалици со висок притисок, значителен дел од зрачењето е во ултравиолетовиот дел на спектарот. Кај НСНП во спектарот на зрачење доминира светлина со бранови должини 589 и 589,6 nm (таканаречени натриумови D линии). Кај НСВП и МХС спектарот е поширок, и тој зависи од составот на основното полнење.

Со цел дел од УВ зраци што ги емитира електричниот лак да се претворат во светлина, кај некои СПГ на внатрешната страна од стаклениот балон се нанесува фосфорен слој во којшто дел од УВ зраци, по пат на фосфоресценција, се претвора во

⁶⁴ Кај типична флуоресцентна сијалица што работи на наизменичен напон со фреквенција 50 Hz бројот на судири на слободните електрони со валентните електрони од атомот на живата е околу 10^9 во секунда [5].

светлина (слика 5.26)⁶⁵. Кај сијалиците со два стаклени балона, флуоресцентниот слој се нанесува на внатрешната страна од надворешниот балон. Спектарот на светлината кај сијалиците со флуоресцентен слој, покрај од составот на основното полнење во балонот, зависи и од составот на фосфорните соединенија што го сочинуваат флуоресцентниот слој.

Да забележиме дека влијанието на фосфорниот слој најмногу е изразено кај ФС и ЖС. Практично, ФС и ЖС за општа намена не се произведуваат во верзии без флуоресцентен слој. Флуоресцентниот слој кај НСВП и МХС има многу мало влијание врз спектарот на светлината и кај нив тој се додава за да се постигне помала сјајност на сијалиците, да се добие соодветна ТБ и/или ИРБ и поради компатибилност со ЖС со исти димензии и номинални моќности.

Спектралниот состав на светлината е одлучувачки за ТБ и ИРБ. Така, на пример, НСНП имаат најнизок ИРБ поради монохроматската светлина, додека некои ФС и МХС може да имаат ИРБ поголем и од 95. ТБ на натриумовите сијалици со висок притисок е 2 000 до 2 800 К, додека ФС и МХС се произведуваат за повеќе ТБ.

Специфичното производство на СПГ е значително поголемо отколку специфичното производство на СВВ. Слично важи и за животниот век којшто може да достигне и до неколку десетици илјади часови. Отстапувањето на погонскиот напон од номиналниот, по правило, има значително помало влијание врз карактеристиките на СПГ отколку што е случај кај СВВ. Кај СПГ многу е поизразено влијанието на бројот на вклучувања и условите за воспоставување на лакот.

Старењето на СПГ е резултат на повеќе фактори, меѓу коишто најзначајни се: а) „стареење“ на флуоресцентните слоеви коишто претвораат дел од ултравиолетовите зраци во видливо зрачење, б) „стареење“ на електродите и намалувањето на нивната способност за продукција на доволен број електрони и в) трошење на некои од компонентите од основното полнење.

Шеми на врзување и помошни уреди

Основната функција на КУ од сликата 5.25 е да обезбеди ограничување на струјата во колото. Тоа може да се постигне ако на краевите на КУ се обезбеди доволен пад на напон со помош на отпорник, индуктивитет, кондензатор или електричен уред составен како нивна комбинација.

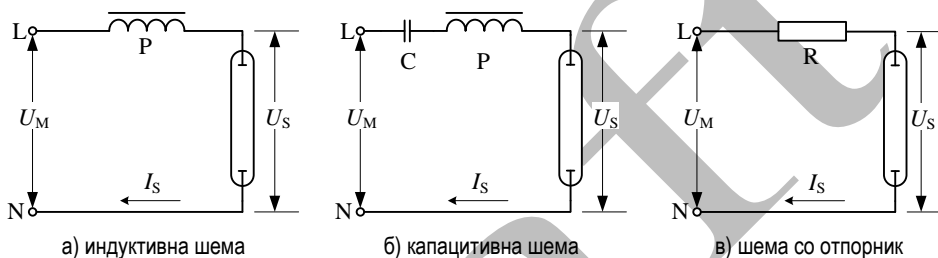
Во случаите кога напојувањето е со еднонасочен напон, КУ може да биде изработен како отпорник. Но, поради големите загуби на моќност што би се јавиле во отпорникот, КУ најчесто се изведува како електронски уред во којшто се врши конверзија од еднонасочна во наизменична струја.

Ако напојувањето е со наизменичен напон можни се голем број комбинации на претходно споменатите елементи, но најчесто се користат шемите со таканаречени „сериски баласта“: индуктивитет (слика 5.27.а) или индуктивитет и капацитет врзани во серија (слика 5.27.б). Шемата на врзување од сликата 5.27.в во пракса не се користи, а овде е прикажана само заради споредба.

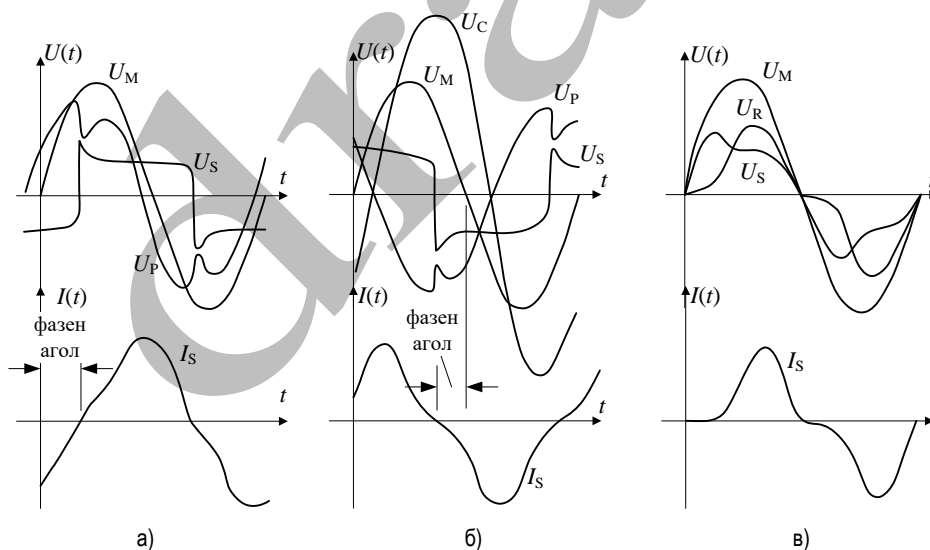
⁶⁵ Кај типична ФС само околу 40% од УВ што ќе паднат на флуоресцентниот слој ќе се претворат во светлина [5].

На сликата 5.28 се прикажани временските промени на електричните големини во колата од сликите 5.27. Како што може да се забележи од дијаграмот прикажан на сликата 5.28.в, во моментот кога струјата во колото има вредност нула и напонот на сијалицата е исто така еднаков на нула. Тоа може да предизвика проблеми сврзани со гаснење на електричниот лак. Поради тоа, но и поради релативно големите загуби на активна моќност во отпорникот, шемата од сликата 5.27.в не се користи.

За шемите од сликите 5.27.а и 5.27.б нема проблеми со одржување на лакот при секое поминување на струјата низ нулата. Тука треба да се нагласи дека напонот што се јавува на краевите на кондензаторот C од сликата 5.27.б е значително повисок од напонот U_M , за што треба да се води сметка при изборот на неговите карактеристики.



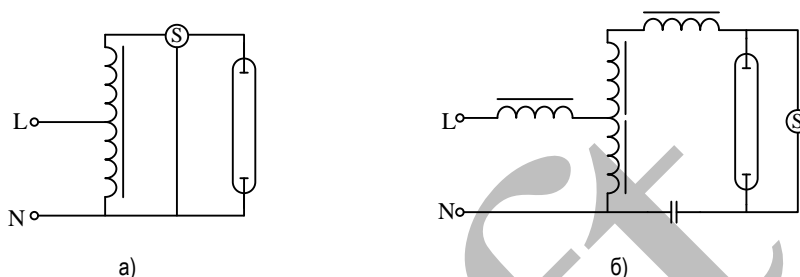
Слика 5.27 Некои принципиелни шемии на врзување на СПГ [5]



Слика 5.28 Временски промени на електричните големини во колата прикажани на сликата 5.27 [5]

Покрај шемите прикажани на сликата 5.27 се користат и шемии со КУ со поинаква конструкција и електрични карактеристики. Најчесто тоа се шемите со автотрансформатор (слика 5.29.а) и *придушница со константна моќност (constant*

wattage ballast) прикажана на сликата 5.29.б. Да забележиме дека овие шеми главно се користат во случаите кога напонот на напојната мрежа не е доволен да овозможи сигурно запалување на сијалиците (на пример во земјите каде што фазниот напон на нисконапонските мрежи е 110 до 130 V).



Слика 5.29 Некои принципиелни шеми на врзување на СПГ со номинален напон понизок од 230 V

Останатите функции на КУ од сликите 5.27 и 5.29 зависат од типот на сијалицата и тие детално ќе бидат опишани за секој тип сијалица одделно.

Контролниот уред од сликата 5.25 може да биде изведен и како електронски уред. Конструкцијата и функциите на ЕКУ за различните типови СПГ значително се разликуваат меѓусебе и тие ќе бидат обработени во одделите каде што се обработени одделните типови сијалици.

Независно од тоа дали ККУ се од типот како на сликите 5.27 или 5.29 тие имаат многу заеднички карактеристики. Нивните електрични карактеристики зависат од конструкцијата и квалитетот на материјалите од коишто се изработени. По правило, тие се изработуваат со голем коефициент на полезно дејство, т.е. се тежнее загубите на активна моќност во навивките и магнетното коло да се сведат на минимум. Но, како и кај секој друг уред, во практиката нивните карактеристики се резултат на компромис помеѓу цената на чинење и квалитетот.

Електромагнетните придрушници се со многу едноставна конструкција: навивки од изолирана жица од бакар или алуминиум се намотани на магнетно коло од трансформаторски лимови чијашто конструкција обезбедува соодветна реактивна отпорност. ККУ од шемите на сликата 5.29 се нешто посложени, но во основа и нивната конструкција е слична на конструкцијата на електромагнетните придрушници. Димензиите и електричните карактеристики на ККУ се прилагодени на сијалиците за коишто се наменети и тие, најчесто, се дефинирани со соодветни стандарди на ИЕС. Изолацијата на навивките најчесто се изработува за класите А, Е или F, што дозволува работната температура на навивките (t_w) да биде 105, 120 и 130 °C, соодветно. При овие температури на навивките, нивниот просечен животен век е 10 години.

Бидејќи температурата на навивките може да зависи и од температурата на непосредната околина во којашто работи придрушницата, покрај температурата t_w , за придрушниците се дефинира и таканаречениот *пораст на температурата* (Δt) кој што ја покажува разликата на температурата на навивките и температурата на амбиентот при номинални оптоварувања на придрушниците. Најчесто, порастот на температурата

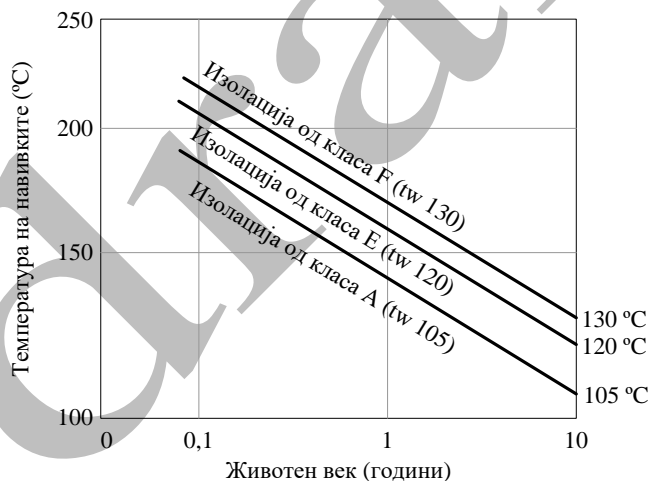
Δt се движи во границите од 50 до 70 °C. Така, на пример, ако за една придушница е $t_w = 130$ °C и $\Delta t = 70$ °C, температурата на амбиентот при којашто навивките ќе имаат температура од 130 °C изнесува 60 °C.

За електромагнетните придушници наменети за ФС често се дефинира и температурата во режим на работа ако струјното коло од сликите 5.27.a е приклучено на напон повисок од номиналниот за 10% и при тоа контакти на биметалниот starter се затворени [82].⁶⁶

Вообичаено, доколку на придушницата се означени сите три температури, ознаката е следна: $\Delta t / t / t_w$, каде што со t е означена температурата во режим на работа со затворени контакти на биметалниот starter.

Некои производители нудат електромагнетни придушници опремени со соодветни термички прекинувачи коишто служат за заштита од преоптоварување.

На сликата 5.30 е прикажана зависноста на животниот век на електромагнетните придушници, со различни класи на изолација, од температурата на навивките. Оваа информација се однесува на случаите кога придушниците работат континуирано. Во праксата таквите случаи се ретки. Следствено, во најголем број практични случаи животниот век на електромагнетните придушници е значително подолг од 10 години.



Слика 5.30 Зависност на трајноста на електромагнетните придушници од температурата на навивките [5]

Во зависност од големината на загубите на активна моќност во навивките и магнетното коло, придушниците можат да се поделат во повеќе групи. Повеќе детали за класификацијата на придушниците за ФС според нивната енергетска ефикасност можат да се најдат во потпоглавјето 5.5. Тука треба да се забележи дека декларираниите

⁶⁶ Во случај на дефект кај биметалниот starter за ФС може да се случи неговите контакти да останат трајно затворени (т.е. споени) при што струјата во придушницата ќе биде за околу 50% поголема од номиналната.

загуби на моќност на придушниците се однесуваат на таканаречен „ладен“ режим на работа (температура на навивките од 25 °C). Во пракса, загубите во номинален режим („топол“ режим на работа) се за 10 до 30% повисоки отколку декларираниите загуби.

Заслужува да се наведе дека електромагнетните придушници можат да бидат причинители на аудио шумови како резултат на вибрациите на магнетните лимови со фреквенција еднаква на фреквенцијата на напојниот напон. Ова е особено изразено во просториите во коишто има голем број СПГ напојувани преку ККУ.

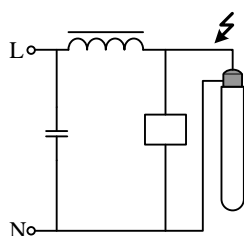
Уредите што го помагаат процесот на запалување на СПГ (стартери и игнители) се разликуваат меѓусебно и нивната конструкција и карактеристики зависат од типот на сијалицата за којашто се предвидени. Да забележиме дека покрај овие (надворешни) помошни уреди, за запалување на сијалиците постојат и други елементи коишто се вградуваат во самите сијалици, а го помагаат процесот на запалување на сијалиците, како што се помошни електроди, антени и сл.

Кај ФС најчесто се користат стартерите, а нивната конструкција и карактеристики ќе бидат објаснети во одделот 5.3.2. Кај ЖС за запалување се користи помошна електрода, додека кај НСНП се користат специјални КУ и/или помошни уреди (стартери или игнители), коишто ќе бидат објаснети во одделот 5.3.6. За МХС и НСВП, коишто имаат слични конструкции, за запалување се користат игнители коишто, во периодот на запалување на сијалицата, создаваат напонски импулси со амплитуда од 0,8 до околу 5 kV. На сликите 5.31.а, 5.31.б и 5.31.в се прикажани типичните принципиелни шеми на поврзување на МХС и НСВП. Паралелните игнители⁶⁷ се користат главно за некои НСВП со помали моќности каде што игниторот е вграден во сијалицата, а како екстерни тие се користат во случаите кога потребниот напонски импулс е околу 1 kV. Најчесто се користат семи-паралелните и сериските игнители. Во англиската терминологија овие игнители се нарекуваат *impulser* и *superimposed pulse ignitor*.

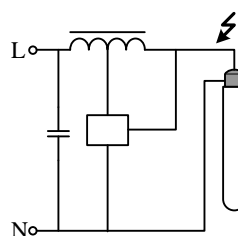
Во случаите кога должината на спроводниците од игниторот до сијалицата е релативно голема можат да се јават определени проблеми. Имено, капацитивноста на спроводниците, чијашто susceptance за фреквенција од 50 (или 60 Hz) е занемарлива, може да биде причина за големо слабеење на напонскиот импулс што го создава игниторот, така што импулсот може да биде недоволен за запалување на сијалицата. За ова треба да се води сметка во случаите кога, со цел да се намали тежината на светилките со СПГ со големи моќности, придушниците и игнитите се поставуваат во разводните табли, на релативно големи растојанија од светилките.

Шемата на врзување на МХС и НСВП зависи од карактеристиките на сијалиците (моќност и работен притисок во брениерот) и е потребно да се користат компатибилни игнители и придушници. Голем број игнители можат да се користат и за двата типа на сијалици, но, притоа треба да се води сметка за некои специфичности во процесот на запалување и повторно палење на МХС и НСВП.

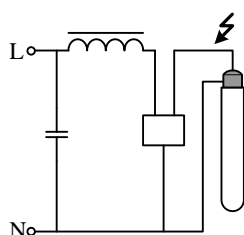
⁶⁷ Додавката во името на игниторот укажува во каква шема на поврзување на сијалицата тој се користи.



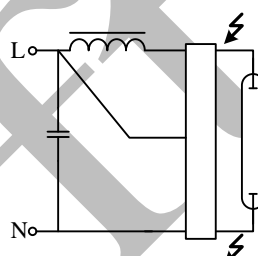
а) паралелна



б) семи-паралелна



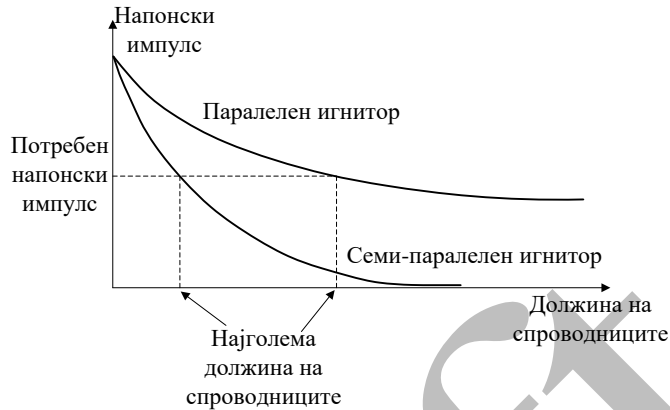
в) сериска



г) брзо повторно палење

Слика 5.31 Типични принципиелни шеми на поврзување на МХС и НСВП [83]

За оние СПГ коишто можат да се поврзат со различни шеми, изборот на шемата на поврзување зависи од неколку фактори коишто произлегуваат од карактеристиките на семи-паралелните и сериските игнители. На пример, сериските игнители создаваат по еден импулс во секоја периода на мрежниот напон, а ширината на напонскиот импулс е околу $50 \mu\text{s}$. Од друга страна, семи-паралелните игнители создаваат по три импулси во секоја полупериода, со ширина на импулсот од околу $0,2 \mu\text{s}$. Поради тоа, капацитивноста на спроводниците помеѓу игнаторот и сијалицата има поголемо влијание врз слабеењето на напонскиот импулс кај семи-паралелните игнители (слика 5.32).



Слика 5.32 Влијание на должината (капацитивноста) на спроводниците помеѓу игнаторот и СПГ врз слабењето на напонскиот импулс [5]

Покрај тоа, семи-паралелните игнатори имаат и други предности. Имено, при стационарен режим на работа во нив нема струја и нивната конструкција е поедноставна со оглед на тоа што за создавање на напонскиот импулс ја користат придушницата. Како резултат на тоа, помали ќе бидат загубите на моќност во системот и топлината што се оддава од игнаторот. Од економски аспект предноста е исто така на страната на семи-паралелните игнатори поради помалата цена и поради тоа што тие можат да се користат за СПГ со различни моќности.

Меѓу недостатоците на семи-паралелните игнатори најзначајни се: придушницата е изложена на напонскиот импулс (што не е случај кај сериските игнатори) и е потребна придушница со посложена конструкција.

Игнаторите, вообичаено, имаат вграден тајмер којшто ги исклучува по однапред определено време. Ако настане краткотраен прекин во напојувањето, по повторното воспоставување на напонот на краевите на електричното коло игнаторот станува активен со цел повторно да ја запали сијалицата. Со оглед на тоа што времето на повторно палење за некои МХС може да изнесува и до 20 минути, игнаторот треба да биде предвиден соодветно да реагира и во овие ситуации.

Во текот на експлоатацијата на НСВП, како резултат на повеќе фактори, потребниот напон за стабилна работа на електричниот лак станува поголем. Поради тоа, кон крајот на животниот век на НСВП, неколку минути по запалувањето, кога ќе настане термодинамичкиот еквилибриум, тие ќе престанат да работат бидејќи потребниот напон за горење на сијалицата е поголем отколку што тоа го дозволува електромагнетната придушница. По изладувањето на брениот сијалицата повторно ќе се запали и процесот се повторува сè до нејзиното прегорување или замена. Некои од игнаторите содржат соодветни логички кола коишто овозможуваат игнаторите соодветно да реагираат и во овие ситуации и да ги исклучат неисправните сијалици.

Уште една појава кај НСВП, а особено кај МХС, е поврзана со работата пред крајот на нивниот животен век. Имено, по дефект на сијалицата (скршена електрода

или скршен брениер) овие сијалици можат да работат како насочувачи (*rectifying effect*) и во колото да се јави струја која што во себе содржи значителна еднонасочна компонента. Со оглед на тоа што еднонасочната компонента на струјата во колото е ограничена главно со активната отпорност на електромагнетната придушница (а таа отпорност е многу мала), температурата на изолацијата во придушницата може да достигне недоволни вредности. Со цел да се одбегнат овие ситуации, се препорачува електромагнетната придушница да биде опремена со соодветен термички прекинувач. Во таквите случаи семи-паралелните игнители имаат предност бидејќи тие нема да бидат изложени на релативно големите вредности на еднонасочната компонента на струјата во колото.

Времињата на палење и повторно палење кај некои типови СПГ се релативно долги и можат да достигнат вредности од неколку минути до десетина минути. Во системите за осветление со СПГ со релативно долго време на повторно палење треба да се води сметка дека при кус прекин на напојувањето (типично неколку десетинки од секундата) сијалиците ќе изгаснат и е потребно да се обезбеди светлина од дополнителни (помошни) сијалици додека СПГ повторно не засветат. Некои производители на КУ во своите производни програми имаат и специјални уреди на коишто се приклучуваат дополнителните сијалици коишто се во функција само во периодот додека СПГ не се запалат.

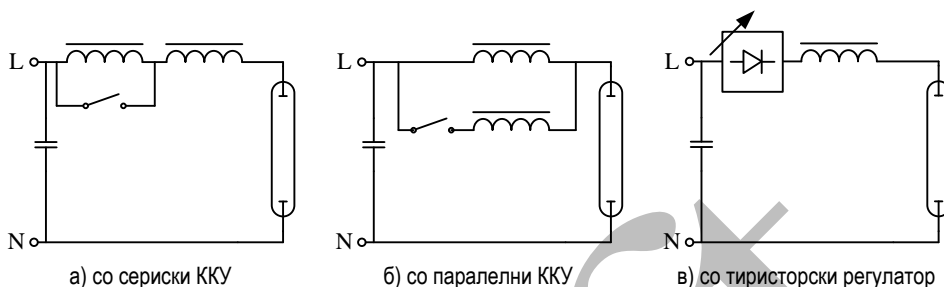
Кај некои СПГ е можно со соодветни игнители да се обезбеди напонски импулс од неколку десетини киловолти и да се обезбеди брзо палење и брзо повторно запалување на сијалиците, веднаш по доведувањето на мрежниот напон (*hot restrike*). Со оглед на големиот напонски импулс потребен за брзо повторно палење, ова е можно само кај СПГ со балон во вид на цевка со приклучок од двата краја. Должината на напонскиот импулс кај овие игнители е уште помала отколку кај семи-паралелните, па поради тоа спроводниците од нив до сијалицата треба да бидат многу куси (најчесто не подолги од 0,5 m). Игнитите за брзо повторно запалување се поврзуваат како на сликата 5.31.г.

Во последните години производителите на игнители нудат и таканаречени *дигитални* игнители. Овие игнители, покрај тоа што го исклучуваат игниторот откако ќе се запали сијалицата, овозможуваат посигурно палење и повторно палење со зголемување на енергијата на напонскиот импулс и воедно намалувањето на бројот на импулси со што се намалуваат напонските шокови врз опремата изложена на нив.

Регулацијата на флуксот кај СПГ е значително посложена отколку кај СВВ. За некои типови сијалици, на пример НСНП, дури не е можна, додека за други таа е поврзана со употреба на специјални КУ коишто се многу непрактични за масовна употреба.

На сликата 5.33 се прикажани принципелните шеми на струјните кола со коишто е можна промената на флуксот кај СПГ. Да забележиме дека во шемите од сликите 5.33.а и 5.33.б, наместо две придушници со иста номинална моќност многу често се користи електромагнетна придушница со три изводи. Номиналните моќности на придушниците од сликата 5.33.а одговараат на номиналната моќност на сијалицата, додека придушниците од сликата 5.33.б имаат двојно помала номинална моќност.

Положбите на прекинувачите во шемите од сликите 5.33.а и 5.33.б се прикажани за режим на работа со 50% флуks.



Слика 5.33 Принципиелни шемии за промена на флуksот кај СПГ со ККУ [82]

Кај сите три шемии од сликата 5.33 сијалицата треба да се запали во номинален режим, и во овој режим сијалицата треба да работи сè до воспоставување на номиналниот режим. Потоа, флуksот може да се намали со намалување на ефективната вредност на струјата во сијалицата (со исклучување на прекинувачите од сликите 5.33.а и 5.33.б, односно со регулација на напонот на портата на тиристорскиот регулатор од сликата 5.33.в).

Ако е потребно да се изврши компензација на реактивната моќност, кондензаторот се поставува како што е прикажано на сликите 5.33.

Шемите од сликите 5.33.а и 5.33.б можат да се применат кај сите типови СПГ (освен НСНП), додека шемата од сликата 5.33.в се користи најчесто кај ФС.

Работата на СПГ со флуks којшто е помал од номиналниот (помала ефективна вредност на струјата во колото и помал напон на краевите на сијалицата), по правило, значи и понеповолен режим на работа од аспект на светлотехничките параметри: промена на ТБ, опаѓање на ИРБ, помало специфично производство, скусување на животниот век и зголемен индекс на треперење.

Во голем број земји од западна Европа шемата од сликата 5.33.а има примена најчесто во системите за надворешно осветление со ЖС, МХС и НСВП. Во периоди од ноќта кога сообраќајот е со значително помал интензитет, со помош на високофреквентни сигнали коишто се испраќаат по енергетските кабли, се исклучува прекинувачот (паралелно поврзан со една од придушниците) и сијалиците работат со приближно 50% од номиналниот флуks. Во таквите кола, ако за компензација на реактивната моќност се користи паралелен кондензатор, во серија со него се поставува индуктивитет (не е прикажан на сликата 5.33) со цел високофреквентните сигнали да не бидат ослабени од кондензаторот.

Електричните кола на СПГ со ККУ имаат релативно низок фактор на моќност којшто е последица на присуството на големи индуктивитети.

Компензацијата на реактивната моќност, во општ случај, може да се изврши со кондензатор поврзан во паралела со електричното коло од сликата 5.27.а или во серија со придушницата како на сликата 5.27.б. Капацитивноста на кондензаторот се одбира така што резултантниот фактор на моќност да биде поголем од 0,9. Тука треба

да забележиме дека компензацијата со сериски кондензатор не се препорачува поради тоа што таквите кола, во општ случај, имаат полоши карактеристики од аспект на трајноста на сијалиците, времето на запалување на сијалиците и стабилноста на електричниот лак. Но, капацитивната врска од сликата 5.27.б (при што реактанцијата на кондензаторот е двојно поголема од реактанцијата на придрушницата) може да послужи за компензација на реактивната моќност во комбинација со индуктивната шема бидејќи резултантниот фактор на моќност за двете шеми ќе биде релативно висок. На тој начин, покрај подобрувањето на факторот на моќност, се намалува и стробоскопскиот ефект (видете пример 3.1). Шемата во која две сијалици во една светилка се паралелно поврзани и притоа едната сијалица е во индуктивна, а другата во капацитивна врска, се нарекува *дуо врска*. Во случаите кога светилките се со една сијалица, се практикува половина од светилките да бидат изведени со индуктивна врска, додека останатите во капацитивна врска. Дуо врските се практикуваат кај ФС, а многу поретко кај ЖС и МХС.

Да забележиме дека компензацијата на реактивната моќност не може да влијае врз намалувањето на вкупната хармоничка дисторзија на струјата. Напротив, во компензираните кола вкупната хармоничка дисторзија е понекогаш и двојно поголема поради тоа што со компензацијата се намалува ефективната вредност на струјата од основниот хармоник така што релативното учество на вишите хармоници во вкупната струја станува поголемо.

Електронските КУ коишто се опремени со соодветни филтри за намалување на THD_i , по правило, имаат многу висок капацитивен фактор на моќност (најчесто поголем од 0,9).

При поврзувањето на СПГ на различни фази од трифазниот систем треба да се одбегнува поврзување на две сијалици преку заеднички неутрален спроводник поради тоа што струјата во заедничкиот спроводник може да биде и до 30% поголема од соодветните струи во фазните спроводници. Ако три еднакви НСВП или МХС се поврзат на три фази од трифазен систем и при тоа се користи заеднички неутрален спроводник, поради постоењето на повисоките хармоници, струјата во неутралниот спроводник може да достигне 70% од струјата во фазните спроводници.

По правило, струите на пуштање на СПГ се 1,5 до 2,5 пати поголеми од номиналните струи. За овој факт треба да се води сметка при проектирањето на електричните инсталации и соодветните заштитни уреди (осигурувачи, прекинувачи и сл.).

Во електричните инсталации за електрично осветление со (голем број) СПГ е можно да се јават незанемарливи капацитивни струи спрема заземјените делови на опремата (*earth leakage currents*) поради постоењето на струи од повисоките хармоници и/или поради високата фреквенција на работа на ЕКУ. Според препораката IEC 598 најголемата дозволена вредност на капацитивните струи за ЕКУ изнесува 0,5 mA [82].

Во многу случаи заштитата од индиректен допир се врши со заштитен уред за диференцијална струја (ЗУДС). Ако тој уред е нагоден или предвиден да реагира на многу мали вредности на разликата на векторската сума на струите во фазните спроводници, од една страна, и струјата во неутралниот спроводник, од друга страна,

можни се несакани исклучувања на системот за осветление. Во таквите случаи, струите што би ги предизвикале исклучувањата и не се струи на грешка. Така, на пример, ако струјата на реагирање на ЗУДС е 30 mA, во [82] се препорачува преку еден ЗУДС да бидат приклучени најмногу 30 ЕКУ. Ако пак е потребно поголем број ЕКУ да се напојуваат преку еден ЗУДС тој треба да се предвиди за поголема диференцијална струи (доколку тоа условите го дозволуваат) или пак струјните кола за напојување на системот за осветление да се издвојат од останатите енергетски кола, а заштитата од индиректен допир за колата за осветление да се изведе на поинаков начин.

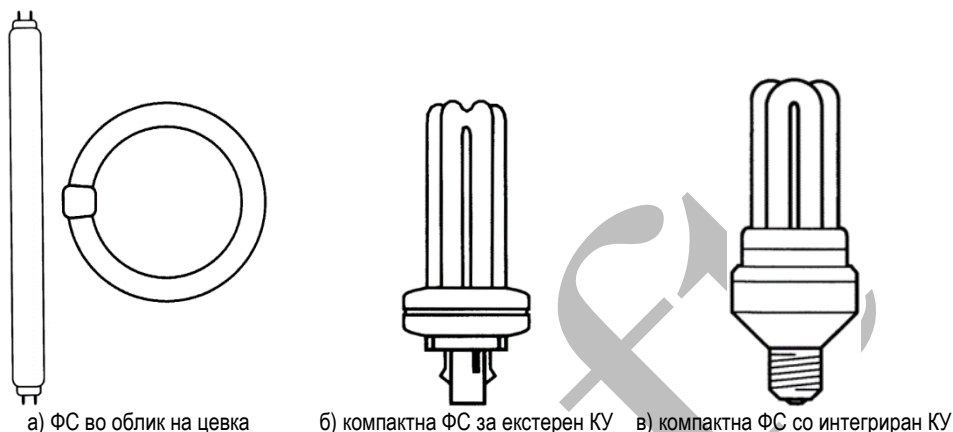
5.3.2 Флуоресцентни сијалици

Флуоресцентните сијалици за првпат се презентирани во 1934 и 1935 година во лабораториите на Џенерал електрик во Кливленд и Лондон и лабораториите на Осрам во Берлин. Во комерцијално производство се јавуваат неколку години подоцна. ФС настанеле како резултат на истражувањата во развојот на неонските сијалици коишто биле користени главно за светлечки ефекти и реклами. Токму поради тоа народот ФС ги нарекува *неонки*, а во литературата биле нарекувани и *живини сијалици со низок притисок*.

Од почетокот на нивната комерцијална примена, ФС поминале низ неколку значајни фази на развојот. Интересен е податокот дека првите ФС главно биле во боја со оглед на тоа што не биле познати доволен број соединенија на фосфорот коишто можеле да произведат поширок спектар на бои и поради тоа се верувало дека создавањето на светлечки ефекти ќе биде основната намена на ФС. Но, веќе во 1950 година тие стануваат најзначен вештачки извор на светлина. Денес се проценува дека околу 80% од светлината добиена од вештачки извори на светлина се добива од ФС [5].

Флуоресцентните сијалици се релативно ефикасни извори на светлина, поради што нивното процентуално учество во вкупната потрошена енергија за осветление е помало отколку нивното процентуално учество во сумарната светлинска енергија добиена од сите електрични извори на светлина. Така, на пример, се проценува дека ФС во Германија учествуваат со околу 50% во вкупната електрична енергија ангажирана за осветление, но во вкупната светлинска енергија добиена од сите електрични извори учествуваат со 70% [93].

Стаклениот балон на ФС се изработува во вид на цевка чијашто должина е значително поголема отколку нејзиниот дијаметар. Во зависност од конструкцијата на сијалицата и обликот на цевката, разликуваме *линиски ФС*, т.е. *ФС во вид на релативно долга цевка* (ФСЦ) и *компактни ФС* (КФС). Контролниот уред кај некои КФС е интегриран во еден уред заедно со сијалицата, па поради тоа КФС ги делиме на *компактни ФС за екстерен КУ* (КФСЕ) и *компактни ФС со интегриран КУ* (КФСИ). Примери на ФСЦ се прикажани на сликата 5.34.а, пример на КФСЕ е прикажан на 5.34.б, а пример на КФСИ е прикажан на сликата 5.34.в.



а) ФС во облик на цевка

б) компактна ФС за екстерен КУ

в) компактна ФС со интегриран КУ

Слика 5.34 Карактеристични облици на ФС
(прикажаните димензии не се пропорционални на вистинските)

Да забележиме дека во групата на ФСЦ има сијалици со облик на буквата O (прикажан на сликата 5.34.а) и во форма на латиничната буква U (не е прикажана на сликата 5.34) коишто наликуваат на КФСЕ, но поради тоа што по ништо друго не се разликуваат од ФСЦ, овде, како и на многу други места, ќе ги третираме како ФСЦ. Сите ФС работат на ист принцип и имаат многу заеднички карактеристики коишто ќе бидат објаснети кај ФСЦ, а за останатите типови ФС ќе бидат наведени само нивните специфичности. Исто така, КФСЕ и КФСИ имаат многу заеднички карактеристики, па поради тоа кога ќе се зборува за нив ќе го користиме заедничкиот термин компактни ФС.

ФС во вид на цевка

Флуоресцентните сијалици во вид на цевка се произведуваат во повеќе стандардизирани димензии. Номиналниот дијаметар на стаклениот балон може да биде 2/8", 5/8", 8/8", 9/8" (10/8") и 12/8", односно изразени во милиметри, тие приближно изнесуваат: 7, 16, 26, 32 и 38 mm.⁶⁸ Вообичаено е, според номиналниот дијаметар, сијалиците да се означуваат со буквата T и бројот којшто одговара на нивниот дијаметар, изразен во осминки од инч. Така, според овој начин, означувањето на ФСЦ со претходно наведените дијаметри би било: T2, T5, T8, T9, T10 и T12, соодветно. За поедноставно референцирање на ФСЦ, особено во табелите и сликите, нивниот номинален дијаметар ќе го придружуваме кон соодветната кратенка, заедно со номиналната моќност, ИРБ и ТБ. Така, на пример, со ознаката ФСЦ/16/14W/840 ќе се

⁶⁸ Со оглед на тоа што првите ФС се појавиле во САД, пракса е номиналниот дијаметар да се изразува во инчи (1" = 25,4 mm), а номиналните должини се најчесто дефинирани во стапки (1 ft ≈ 305 mm). ФС со дијаметар од 16 и 26 mm некаде се среќаваат како ФСЦ со номинален дијаметар од 15 и 25 mm, соодветно. ФСЦ со номинални дијаметри 9/8" и 10/8" се користат во САД и тие имаат ист дијаметар (10/8" ≈ 32 mm), со таа разлика што ФСЦ со номинален дијаметар од 9/8" имаат малку поинаков стаклен балон.

означува флуоресцентна сијалица во вид на цевка со номинален дијаметар 16 mm (5/8"), моќност од 14 W, ИРБ од групата 1В⁶⁹ и температура на боја од 4 000 К.

ФСЦ/7 и некои ФСЦ/16 се произведуваат со релативно мали должини на цевките (од 150 до 530 mm) и мали номинални моќности (од 4 до 13 W), поради што тие се нарекуваат и *минијатурни ФСЦ*. Минијатурните ФСЦ немаат голема примена во системите за осветление, освен во светилките за панично осветление, за рачни преносни светилки, светилки за дополнително осветление⁷⁰ и сл. Поради тоа, тука вниманието ќе го посветиме само на ФСЦ за општа намена. Во табелата 5.6 се прикажани номиналните моќности на ФСЦ за општа намена, во зависност од нивниот дијаметар и должина. Со зацрнети букви се прикажани моделите коишто се најраспространети кај нас и во поголем број европски држави.

ФСЦ/38 постапно се исфрлаат од употреба и тие денес се присутни во производните програми на производителите само заради компатибилност со оптичките системи на постарите светилки. Ова особено се однесува за некои варијанти на сијалиците со должина од 2 400 mm, коишто поради релативно големото специфично производство, стекнале голема популарност во САД и Велика Британија за осветление на индустриски погони.

Во последниот квартал од XX век на пазарот се појавуваат првите ФСЦ/26. Овие сијалици имаат околу 10% помала моќност, но еднаков флукс како и ФСЦ/38 со еднаква должина. Со ФСЦ/26 можат директно да се заменуваат постарите ФСЦ/38. Поголемото специфично производство на ФСЦ/26 во однос на ФСЦ/38 се должи на повеќе фактори, меѓу кои е најзначаен мешавината на инертни гасови, којашто кај овие ФСЦ е криптон и аргон во сооднос од 3:1. Од аспект на ТБ и ИРБ ФСЦ/26 се произведуваат во поголем број варијанти, во споредба со ФСЦ со други дијаметри.

⁶⁹ Видете табела 2.4.

⁷⁰ За дополнителното осветление видете во потпоглавјето 7.1.

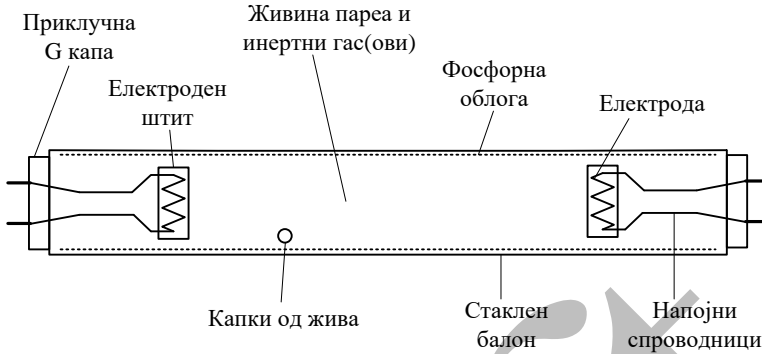
Табела 5.6 Номинални моќности (W) на ФСЦ за општа намена [108]

Ознака и номинален дијаметар	Номинална должина на цевката (mm)													
	450	550	600	720	850	900	970	1 050	1 150	1 200	1 450	1 500	1 800	2 400
ФСЦ/16 (16 mm, T5) со зголемена ефикасност		14			21					28		35		
ФСЦ/16 (16 mm, T5) со нормална ефикасност		24			39				54		49	80		
ФСЦ/26 (26 mm, T8)	15		18	16		30	23 36	38		36		58	70	
ФСЦ/38 (38 mm, T12)			20			30				40		65	75 85	85 125 100

Околу 1995 година на пазарот се јавува нова генерација ФСЦ/16 со должини и номинални моќности прикажани во табелата 5.6. Овие ФСЦ имаат поголемо специфично производство отколку ФСЦ/26 за приближно иста должина на сијалицата и се предвидени за работа само со ЕКУ. ФСЦ/16 се произведуваат во две варијанти: со нормална ефикасност и со зголемена ефикасност.

Во голем број случаи ФСЦ се користат во светилки наменети за вградување во спуштени плафони од модуларен тип, чиишто модули се со димензии 600×600 или 625×625 mm×mm. Со цел да се избегнат тешкотиите при конструкцијата на светилките и одржувањето, должината на новите ФСЦ/16 е помала за 50 mm од должината на соодветните модули на спуштените плафони. Помалиот дијаметар на сијалицата овозможува и дополнително смалување на димензиите на светилките и користење на поефикасни оптички системи. Да забележиме дека ФСЦ/16, како и некои модели на ФСЦ/26, се произведуваат со помало количество жива од останатите ФСЦ, во склад со општите заложби за намалување на загадувањето на човековата околина.

На сликата 5.35 е прикажана конструкцијата на ФСЦ. Балонот на ФСЦ е во вид на цилиндер изработен од обично стакло, а на неговата внатрешна страна е нанесен флуоресцентниот слој. Електродите се изведени во вид на двојна или тројна спирала од многу тенка волфрамова жица (видете слика 5.11) којашто е обложена со материјал којшто емитува електрони неопходни во процесот на празнење низ живината пара. Многу често електродите се заштитени со соодветни *штитову* (*electrode shield*) на коишто се нафаќаат испарените волфрамови атоми со што се намалува зацрнувањето на стаклениот балон на неговите краеве. Приклучувањето на ФСЦ е преку два приклучока од типот G поставени на основите од цилиндричниот балон.



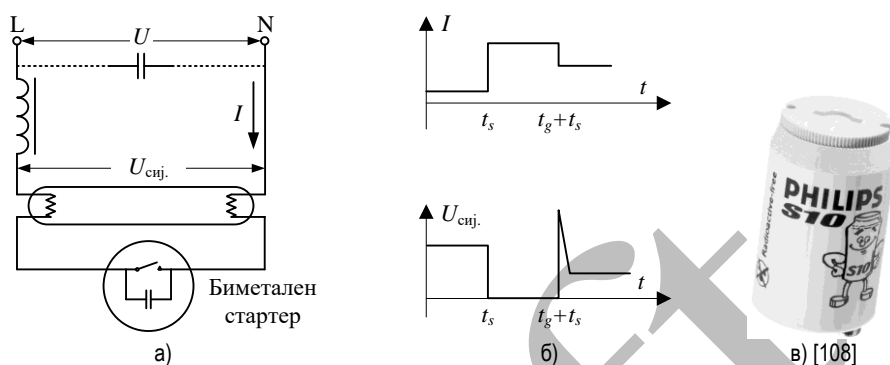
Слика 5.35 Конструкција на ФС во вид на цевка

Во цевката има смеса од инертни гасови и жива, којашто на собна температура е во течна состојба.

Постојат повеќе шеми на поврзување на ФСЦ, во зависност од конструкцијата на придушницата од сликата 5.25. Покрај тоа, за запалување на ФС е потребен и посебен уред наречен *стартер*. Од многуте шеми на поврзување на ФСЦ наједноставна е шемата со електромагнетна придушница и *биметален* стартер, прикажана на сликата 5.36.а. Тој начин на поврзување се нарекува *индуктивна врска* (поради тоа што струјата доцни зад напонот). Паралелно на колото може да се додаде кондензатор (на сликата 5.36.а кондензаторот е поврзан со спроводници прикажани со испрекинати линии) со соодветна капацитивност, за да се постигне фактор на моќност приближно еднаков на единица. Така добисениот начин на поврзување се нарекува *компензирана врска*. Да забележиме дека компензацијата може да се направи и со кондензатор поставен во серија со придушницата. Но, најчесто, таквата врска се применува во комбинација со индуктивна врска. Комбинацијата е позната под името *дуо врска* и е прикажана на сликата 5.39.б.

Биметалниот стартер (поврзан паралелно со ФС на сликата 5.36.а) се состои од мал стаклен балон исполнет со аргон, хелиум и водород. Во цевката постојат две електроди, од коишто барем едната мора да биде биметална. Овие електроди имаат функција на биметален прекинувач со нормално отворени контакти.

Со доведување на напон на краевите од струјното коло од сликата 5.36.а, напонот помеѓу електродите на стартерот добива вредност U . Под дејство на електричното поле во балонот на стартерот настанува јонизација и помеѓу електродите се јавува струја со интензитет од 20 до 40 mA. Струјата во колото е многу мала така што напонот на сијалицата ќе биде приближно еднаков на U . На сликата 5.36.б се прикажани промените на ефективните вредности на напонот на сијалицата $U_{\text{сиј}}$ и на струјата во електричното коло I .



Слика 5.36 ФЦС со електромагнетна придушница и биметален стартер

- а) шема на поврзување;
 б) промени на ефективните вредности на напонот на сијалицата и струјата во електричното коло во процесот на запалување
 в) фотографија на биметален стартер

Струјата во стартерот е причина за зголемување на температурата во него. Како резултат на зголемената температура во стартерот биметалните електроди се искривуваат и после време t_s (1 до 2 s) ќе ги затворат контактите на биметалниот прекинувач. Во тој момент напонот на сијалицата станува еднаков на нула, а струјата во колото е определена со импеданцијата на придушницата и отпорноста на волфрамовите електроди. Конструктивните карактеристики на овие елементи се одбрани така што струјата во колото е поголема од номиналната струја на сијалицата за околу 50%. Како резултат на тоа, волфрамовите влакна се загреваат на температура од 600 до 1 100 °C и, преку слојот на термоемисионен материјал, емитуираат електрони со што се зголемува концентрацијата на слободни електрони во цевката. За тоа време во стартерот не постои електрично празнење и температурата постепено опаѓа поради што биметалните елементи се ладат и, во моментот $t_s + t_g$, настанува отворање на контактите на биметалниот прекинувач. Времето t_g се нарекува време на *(пред)гревање* на електродите.

Прекинувањето на струјното коло предизвикува индуцирање на електромоторна сила (ЕМС) во придушницата. Индуцираната ЕМС може да достигне вредност од 600 до 1 500 V. Нејзината големина зависи од повеќе фактори, меѓу кои се најзначајни: моменталната вредност на наизменичната струја што се прекинува и капацитивноста на кондензаторот⁷¹ во стартерот.

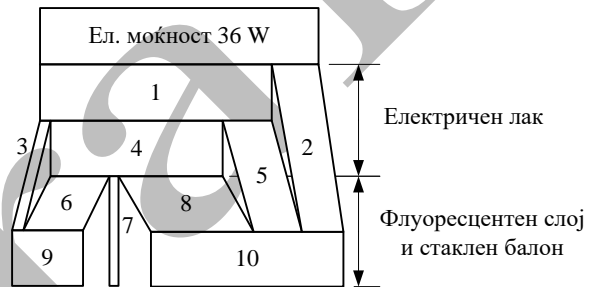
Со тоа, електричното поле во цевката станува доволно силно да започне процесот на интензивно празнење, т.е. дополнително јонизирање на инертниот гас како резултат на судирите помеѓу забрзаните слободни електрони и атомите на инертниот гас. После многу кусо време (околу 1 ms) настанува пробивање на електричниот лак при што напонот на сијалицата достигнува вредност определена со падот на напонот

⁷¹ Кондензаторот во стартерот има улога и за намалување на радио пречките коишто се присутни при отворањето на контактите на биметалниот прекинувач.

во придушницата, а струјата во сијалицата ја достигнува својата номинална вредност. Таа струја предизвикува повишување на температурата во цевката и, кога температурата на цевката ќе достигне приближно $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, доаѓа до испарување на живата. Во тој момент притисокот на живината пара изнесува околу 1 Pa . Забрзаните електрони удираат во испарените атоми на жива поради што доаѓа до емисија на УВ зраци, светлина и топлина, т.е. сијалицата почнува да свети (видете слика 5.26). Во овој случај велме дека настанало успешно запалување на сијалицата. Големината на индуциранта ЕМС што овозможува палење се нарекува и *напон на палење*.

На сликата 5.37 е прикажан билансот на моќности за ФСЦ/26 од 36 W , $CST = 2\text{ }700\text{ K}$ и $R_a = 85$. Како што може да се забележи од сликата 5.37, само околу 28% од електричната моќност на сијалицата се претвора во светлина, додека остатокот се претвора во топлина. Околу 75% од зрачењето при празнењето низ живината пара се УВ зраци. Дел од ова зрачење (околу 40%) се претвора во светлина во флуоресцентниот слој. Во вид на УВ зраци ФСЦ емитура многу мала моќност ($< 0,5\%$). Односот на светлината добиена во електричниот лак и флуоресцентниот слој е 3:22.

1. Моќност во ел. лак $30,1\text{ W}$
2. Термички загуби во електродите $5,9\text{ W}$
3. Видлива радијација од ел. лак $1,2\text{ W}$
4. УВ радијација од елек. лак $22,5\text{ W}$
5. Термички загуби во ел. лак $6,5\text{ W}$
6. Видлива радијација од флуоресцентниот слој $8,8\text{ W}$
7. УВ радијација $0,2\text{ W}$
8. ИЦ радијација $13,5\text{ W}$
9. Вкупно видлива радијација 10 W
10. ИЦ радијација, конвекција и кондукција $25,8\text{ W}$



Слика 5.37 Биланс на моќности за ФСЦ/26/36W/827 ($R_a = 85$; $2\text{ }700\text{ K}$) [84]

Придушницата и биметалниот starter за ФСЦ се така одбрани што во номиналниот режим на работа напонот помеѓу електродите на сијалицата (и на starterот) е недоволен за создавање струја во starterот. Следствено, нема повишување на температурата во starterот и не доаѓа до спојување на неговите електроди. Така, во номиналниот режим на работа, во струјното коло на ФСЦ не доаѓа до формирање врска со занемарлива импеданција, која би ги премостила електродите на сијалицата и би придонела за гаснење на електричниот лак во неа.

Кај ФСЦ, предвидени за напон 230 V , во номинален режим на работа напонот помеѓу електродите на сијалицата не е поголем од 135 V . Во шемите прикажани на сликите 5.39.a и 5.39.b се користат starterи за чиешто активирање (и спојување на електродите) е потребен напон повисок од 160 V . При напони пониски од 135 V овие starterи не се активираат.

Во табелата 5.7, покрај напоните на сијалиците во номинален режим на работа, се прикажани и останатите електрични податоци за кај нас најприменуваните ФСЦ/26 за општа намена.

Табела 5.7 Номинални електрични податоци за некои ФСЦ/26 за општа намена [119,98]

Податоци за сијалицата					Податоци за електричното коло	
Должина	Моќност	Напон	Струја	Фактор на моќност	Фактор на моќност при индуктивна врска	Капацитивност на кондензаторот во компензирана врска
mm	W	V	A	инд.		μF
600	18	59	0,36	0,85	0,33	4,5
1 200	36	103	0,44	0,79	0,50	4,5
1 500	58	111	0,67	0,78	0,45	7,0

Ако во моментот кога starterот ги одвојува своите контакти моменталната вредност на струјата во колото е нула или блиску до нулата, можно е индуцираната ЕМС во придушницата да не биде доволна за воспоставување на електричниот лак во сијалицата. Во овој случај велиме дека настанало неуспешно палење на сијалицата и напонот на сијалицата (и starterот) ќе достигне вредност како и на почетокот на процесот на запалување. Практично, претходниот процес ќе се повторува сè додека не настане успешно палење на сијалицата.

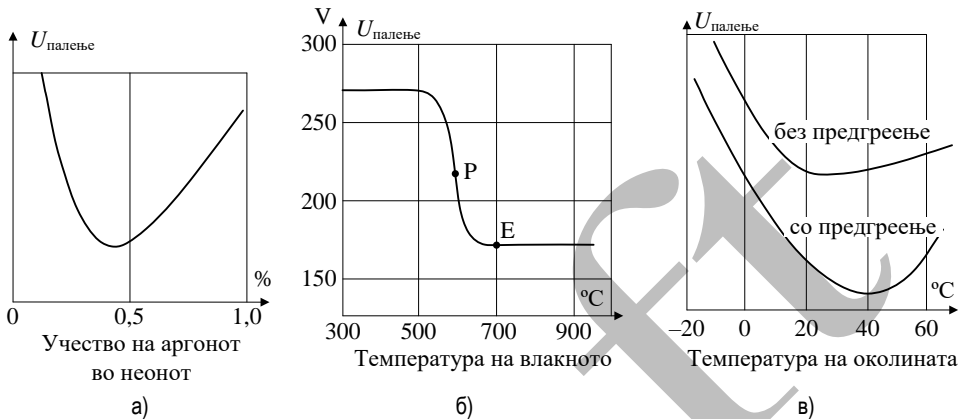
Успешноста на запалување на сијалицата зависи од неколку фактори. Најзначајни фактори се напонот на палење и предгреењето на електродите.

На сликата 5.38 се прикажани зависностите на напонот на палење на ФСЦ од составот на смесата инертни гасови во сијалицата, температурата на електродите и амбиентната температура. Од сликата 5.38.a е очигледно дека со соодветен избор на составот на смесата инертни гасови во сијалицата може да се минимизира потребниот напон за запалување на ФСЦ. Дијаграмот на сликата 5.38.b илустрира дека при температура на електродите (волфрамовите влакна) од 700 °C или повисока, за запалување на ФСЦ е потребен понизок напон отколку ако температурата на електродите е пониска. Од дијаграмот на сликата 5.38.v се гледа дека со снижување на температурата на амбиентот под 40 °C (односно 20 °C ако нема предгревање на електродите) се зголемува висината на напонот потребен за запалување на ФСЦ.

Со оглед на тоа што најголемата вредност на индуциранта ЕМС во придушницата зависи од електричните параметри на колото, за дадена комбинација на придушница и сијалица, останува со карактеристиките на биметалниот starter да се овозможи доволно долго предгревање на електродите.

Ако карактеристиките на starterот не се прилагодени на сијалицата и придушницата, или пак тој е неисправен, сијалицата нема да се запали и постојано ќе трепка. Во таквите случаи, покрај можноста за појава на психични замор и нервоза на луѓето изложени на трепкањето, се троши електрична енергија, а не се добива светлина. Исто така, напонските импулси што ги произведува придушницата го скусуваат нејзиниот животен век, како и животниот век на сијалицата и starterот. За

да се намали веројатноста за настанување на такви појави се препорачува биметалните стартери да се заменуваат при секоја замена на сијалиците.



Слика 5.38 Зависност на висината на напонот на палење на ФСЦ од составот на смесата инертни гасови, температурата на волфрамовите влакна и амбиентна температура [82]

Во услови на непрекинато трепкање, можно е стартерот да се расипе⁷² и неговите контакти да останат трајно затворени, што значи дека струјата во волфрамовите електроди ќе биде за околу 50% поголема од номиналната струја. Температурата на електродите може да достигне вредност при која стаклениот балон на сијалицата, особено за сијалиците со помал дијаметар, може да пукне или дури и да се стопи.

Втора причина за неуспешно запалување на сијалиците може да биде и самата сијалица. Имено, во текот на експлоатацијата способноста на термоемисиониот слој на електродите за емитување електрони се намалува така што, и покрај исправен стартер, запалувањето на сијалицата не е можно или се потребни поголем број циклуси за палење. Да забележиме дека ако е прекинато едно или двете волфрамови влакна ФСЦ нема да се запали, но во овој случај не постојат услови за воспоставување на струја во стартерот и не доаѓа до трепкање на сијалицата.

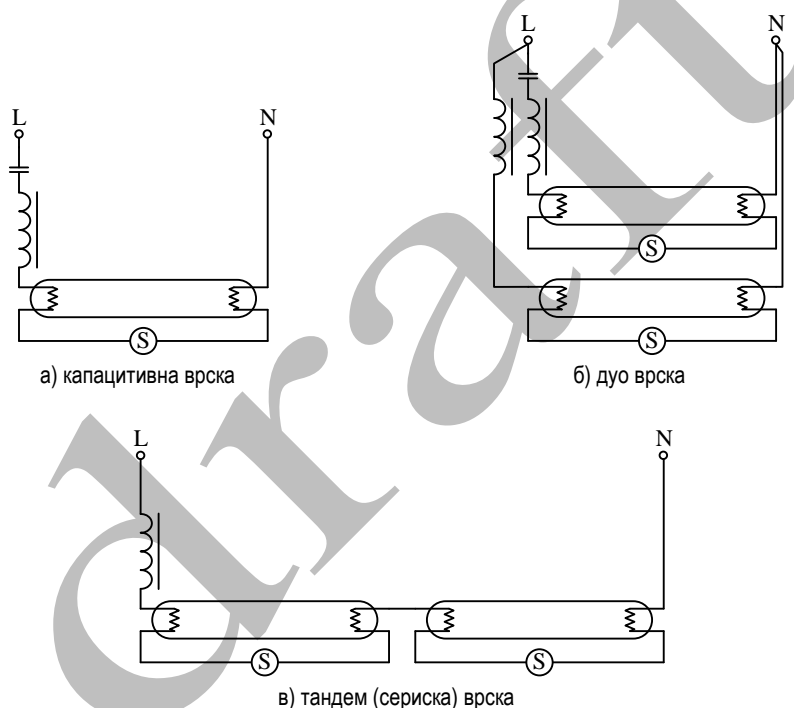
Биметалните стартери можат да функционираат и на температури од $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, при што времето на запалување на сијалицата е значително подолго (2 до 20 s) [82]. Но, при овие температури волфрамовото влакно во ФСЦ не може за кусо време да се загрее на температура којашто обезбедува доволен број слободни електрони. Во тие случаи е можно индуцираниот напон да не биде доволен за запалување на сијалиците. Поради тоа, но и поради малото специфично производство при ниски температури на амбиентот, ФСЦ не се погодни за надворешно осветление.

Покрај биметалниот стартер, постојат и електронски стартери коишто ја имаат истата функција и служат за замена на биметалните стартери од колото прикажано на сликата 5.36.a. Електронските стартери, во споредба со биметалните стартери,

⁷² Според податоците изнесени во [82], животниот век на биметалните стартери е околу 10 000 затворања и отворања на контактите.

овозможуваат побрзо запалување на сијалиците (обично за помалку од 2 s), продолжување на животниот век на сијалиците, исклучување на неисправните сијалици коишто не можат да се запалат и имаат значително подолг животен век. Така, на пример, во [107] се препорачува електронските стартери да се заменуваат при секоја четврта замена на ФСЦ, додека во [82] е наведено дека животниот век на електронските стартери е 100 000 вклучувања и исклучувања.

Покрај во индуктивна и компензирана врска, ФСЦ се поврзуваат и во *капацитивна, дуо* и *тандем (сериска)* врски (слика 5.39). Капацитивната врска се добива кога во серија со придушницата се поврзе кондензатор (слика 5.39.a). Капацитивноста на кондензаторот се одбира така што апсолутната вредност на неговата реактанција да биде двојно поголема од реактанцијата на придушницата.



Слика 5.39 Други шеми на поврзување ФСЦ со електромагнетна придушница и биметален стартер

Капацитивната врска има определени недостатоци во однос на индуктивната врска. Во номинален режим на работа напонот на кондензаторот од сликата 5.39.a е значително повисок од мрежниот напон, така што тој кондензатор треба да биде димензиониран за повисок напон (400 V ако номиналниот фазен напон на нисконапонската мрежа е 230 V) [98]. Поради постоењето на овој кондензатор напонските импулси во процесот на палење се поголеми, што има негативно влијание врз трајноста на ФСЦ. Кога ФСЦ е поврзана во капацитивна врска подолго е времето на запалување

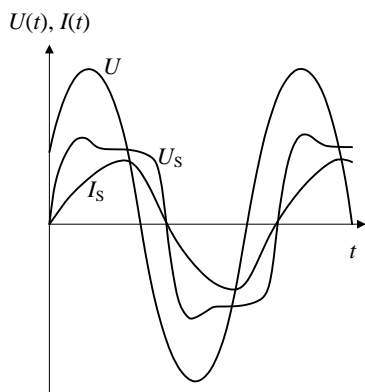
при ниски температури, отколку кога истата ФСЦ е поврзана во индуктивната врска [82].

Дуо врската (слика 5.39.б) има две специфични одлики. Прво, факторот на моќност на струјното коло е блиску до единица. Второ, струите во сијалиците се фазно поместени, а тоа придонесува да бидат намалени како индексот на треперење така и можностите за појава на стробоскопскиот ефект (видете пример 3.1).

Тандем врската (слика 5.39.в) се користи само за ФСЦ со определена номинална моќност. На пример, две ФСЦ/18 W се поврзуваат во серија со придушница наменета за сијалицата со номинална моќност од 36 W. Предностите на тандем врската се во помалите трошоци (цената на придушниците малку зависи од номиналната моќност) и поголемото специфично производство (загубите на моќност во една придушница за ФСЦ од 36 W се незначително поголеми од загубите на моќност во една придушница за ФСЦ од 18 W). Кај тандем врската факторот на моќност е нешто повисок (околу 0,55 индуктивен) отколку факторот на моќност во колото на ФСЦ од 36 W (индуктивна врска). За подобрување на факторот на моќност се користи паралелно поврзан кондензатор. Капацитивноста на кондензаторот се одбира така што да се обезбеди фактор на моќност блиску до единица. Покрај компензираната тандем врска, можна е и капацитивна тандем врска, која што во комбинација со индуктивна тандем врска ги обезбедува истите ефекти како и дуо-врската.

По правило, времето на запалување на ФСЦ во тандем врска е подолго отколку во шемите со една сијалица. Ако една од сијалиците во тандем врска е неисправна, нема да свети и другата сијалица. Да забележиме дека во тандем врската не се користат истите стартери како и за останатите врски. Имено, ако напонот на напојната мрежа е 230 V, напонот на приклучоците на секој од стартерите нема да биде поголем од 115 V. Поради тоа, стартерите наменети за тандем врските треба да бидат конструирани така што да можат да се активираат и при напони пониски од 115 V, за разлика од стартерите наменети за останатите врски коишто се активираат на напони повисоки од 160 V. Стартерите наменети за тандем врска најчесто се означуваат со ознаките *series* или *series circuit*, за разлика од останатите стартери коишто имаат ознака *single* или *single lamp circuit*.

На сликата 5.40 е прикажана временската зависност на напонот на ФС, мрежниот напон (идеална синусоида) и струјата во колото на индуктивната врска. Поради несинусоидалниот облик на напонот на сијалицата, во колото се јавуваат повисоки (непарни) хармоници, чиешто ефективни вредности на струјата, во однос на ефективната вредност на струјата на основниот хармоник, се прикажани во табелата 5.8. Присуството на повисоките хармоници е поизразено кај капацитивната врска. Кај компензираната врска струјата што колото ја зема од мрежата ќе биде скоро двапати помала, така што и релативните вредности на струите од повисоките хармоници од табелата 5.8 ќе бидат двојно поголеми [78,82]. Но, и во тој случај присуството на хармониците е во дозволените граници за опремата што се користи во осветлението.



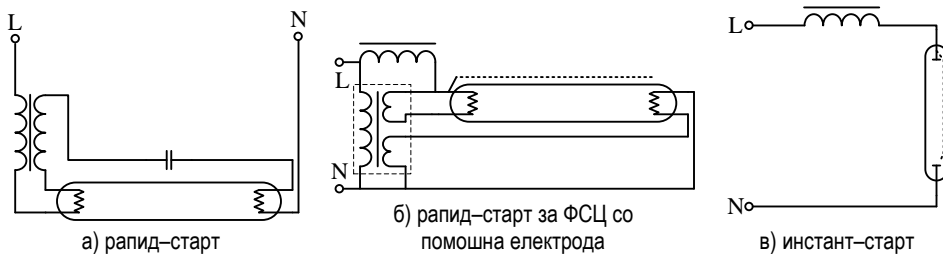
Слика 5.40 Временска зависност на мрежниот напон (U), напонот на сијалицата (U_s) и струјата (I_s) во колото со индуктивната врска [82]

Табела 5.8 Ефективни вредности на струите на повишоките хармоници во колото со индуктивна врска [82]

Хармоник	Ефективна вредност на струјата во однос на основниот хармоник (%)
1 (основен)	100
3	10
5	3
7	2
9 и повисок	1 или помалку
THD_i (IEEE)	најмногу 11,4

Покрај врските прикажани на сликите 5.36.а и сликите 5.39, во коишто е неопходен starter (често нарекувани и *врски со starter со предгревање – preheat starter circuits*), можни се и *врски без starter (starterless circuits)*. Во зависност од тоа дали при запалувањето на сијалицата постои предгревање на електродите постојат *врски без starter со предгревање (preheat starterless circuits)* и *врски за ладно стартување (cold-start circuits)* [84]. Врските без starter со предгревање понекогаш се нарекуваат и *rapid-start врски (rapid-start circuits)*, додека врските без starter за ладно стартување често се нарекуваат и *инстант-старт врски (instant-start circuits)*. Во литературата rapid-start врските се нарекуваат и *резонантни врски (resonant-start circuits)* поради тоа што напонскиот импулс потребен за запалување на сијалицата се добива од соодветно димензионирано $L-C$ коло.

На сликата 5.41 се прикажани некои од врските без starter. Да забележиме дека за најголем број од овие врски се потребни специјално конструирани сијалици со силиконски слој на надворешната страна на стаклениот балон (слика 5.41.а) или *помошна електрода* во вид на метална лента поставена долж стаклениот ѕид на ФСЦ од надворешната (слика 5.41.б) или внатрешната страна (слика 5.41.в). Кај сијалицата од сликата 5.41.в електродите не се во вид на волфрамова спирала бидејќи не е потребно нивно загревање.



Слика 5.41 Некои врски на ФСЦ без стартери [84]

Предгреењето на електродите кај рапид-старт врските се врши преку одделна намотка од електромагнетната придушница (слики 5.41.а) или со посебен трансформатор за загревање на електродите (слика 5.41.б). Греењето на електродите (со напон од околу 3 V) трае околу 1 до 2 s, за којшто период волфрамовото влакно ќе емитира доволен број слободни електрони за електричниот лак во сијалицата да може да се оствари со помал напонски импулс. Бидејќи греењето на електродите продолжува и во текот на работата на ФСЦ, дополнителните загуби на моќност го намалуваат специфичното производство на системот сијалица – КУ.

Поради релативно повисоките цени на сијалиците и/или помошните и контролните уреди, врските без стартери имаат ограничена примена. Покрај тоа, сијалиците наменети за овие врски најчесто се произведуваат со номинален дијаметар од 38 mm поради што имаат помало специфично производство и се нудат со ограничен број комбинации на ТБ и ИРБ.

Врските од типот рапид-старт овозможуваат поефикасна регулација на флуоксот и тие главно се користат во случаите каде што тоа е неопходно. Конструкцијата на сијалицата што се користи во инстант-старт врските, ги елиминира можностите за појава на електрични искри во процесот на запалување на сијалицата поради што овие сијалици се користат во сите ситуации каде што атмосферата на околината е лесно експлозивна и/или запалива.

Да забележиме дека со појавата на ЕКУ, примената на врските без стартери се намалува.

Како што претходно беше кажано, кај СПГ коишто користат живина пареа најголем дел од моќноста на зрачење е во доменот на УВ зраци. Поради тоа и кај ФС флуоресцентниот слој на внатрешната страна од балонот е неопходен за добивање на поголем процент светлина.

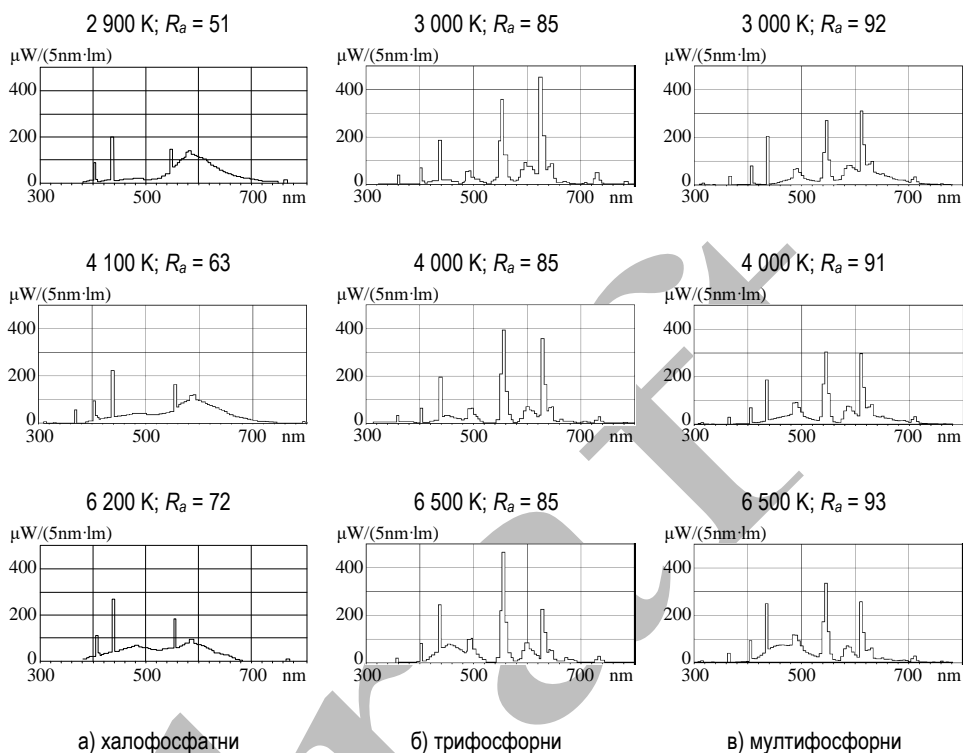
До појавата на ФСЦ/26 во употреба биле таканаречените *халофосфатни флуоресцентни слоеви* коишто овозможуваат скроман ИРБ. ФС сијалици се произведуваат за неколку ТБ. Во групата 1 (топли бои од табелата 2.2) ФС се произведуваат за ТБ од 2 700 до 3 000 К. Во групата 2 (неутрални бои), на пазарот се присутни ФС со ТБ од 3 500 до 4 300 К. На крајот, во групата на студени бои (дневна светлина) производителите нудат ФС со ТБ од 5 000 до 6 500 К.

Индексот на репродукција на бојата зависи од спектралниот состав на емитираната светлина и за халофосфатните ФС (ФС/Х) R_a е помеѓу 50 и 70. За апликациите каде што бил потребен поголем ИРБ производителите нуделе таканаречени *de luxe* бои со поголем R_a , но не поголем од 90. Поголемиот ИРБ бил постигнуван со збогатување на спектарот на емитирана светлина со бои од црвениот дел од спектарот на светлината. Но, специфичното производство на ФС/Х со *de luxe* бои е за околу 1/3 помало отколку специфичното производство на ФС/Х со стандардни бои.

Со појавата на ФСЦ/26 се јавуваат и таканаречените *трифосфорни флуоресцентни слоеви (three-band phosphors)*. Името на оваа мешавина од фосфорни соединенија доаѓа од обликот на линискиот спектар којшто се карактеризира со три врвови, за брановите должини на сината, зелената и црвената боја. Во споредба со ФС/Х, трифосфорните ФС (ФС/Т) имаат значително подобар ИРБ ($80 \leq R_a < 90$) и поголемо специфично производство за 13 до 30%.

Набргу по појавата на ФС/Т, на пазарот се појавуваат и таканаречените *мултифосфорни флуоресцентни слоеви (multi-band phosphors)*, понекогаш и нарекувани *петфосфорни флуоресцентни слоеви*. Мултифосфорните ФС (ФС/М) се карактеризираат со многу добар ИРБ (група 1А), којшто во некои случаи може да достигне и до 98. Но, збогатувањето на спектарот на светлината неминовно наметнало и намалување на специфичното производство коешто е приближно еднакво на специфичното производство на ФС/Х.

На сликата 5.42 се прикажани нормираните дијаграми на моќноста на зрачење за ФСЦ/26 со различните флуоресцентни слоеви за три температури на бои: топла, неутрална и студена. Номиналните светлински флукови за истите ФСЦ се прикажани во табелата 5.9.



Слика 5.42 Нормирани дијаграми на спектрите на светлината за некои ФСЦ во зависност од составот на флуоресцентниот слој [108,119]

Табела 5.9 Типични вредности на номиналните флуковски за некои ФСЦ/26 за општа намена [108,119]

Впечаток за боја и температура на бојата	Номинален флукс (lm)								
	Халофосфатни			Трифосфорни			Мултифосфорни		
	18 W	36 W	58 W	18 W	36 W	58 W	18 W	36 W	58 W
Топол (~3 000 K)	1 150	2 700	4 600	1 350	3 350	5 200	1 100	2 800	4 350
Неутрален (~4 000 K)	1 150	2 850	4 600	1 350	3 350	5 200	1 200	2 800	4 600
Студен (~6 500 K)	1 050	2 500	4 000	1 300	3 250	5 000	1 150	2 800	4 550

Од податоците изнесени на сликата 5.42 и табелата 5.9 е очигледна предноста што ФСЦ/Т ја имаат во однос на ФСЦ/Х, како во поглед на ИРБ така и во поглед на специфичното производство.⁷³ Тоа практично значи дека, во еден систем за осветление, потребниот број сијалици од типот ФСЦ/Т би бил помал отколку во случајот ако

⁷³ Како што во продолжение на ова потпоглавје ќе биде покажано, трифосфорните флуоресцентни слоеви имаат и други предности во однос на халофосфатните.

системот се проектира со ФСЦ/Х. Заштедите во инвестиционите трошоци (помал број светилки), како и заштедите во трошоците за работа на системите (помала инсталирана моќност), исто така ќе бидат помали, а при тоа ИРБ ќе биде значително повисок. Примената на ФСЦ/Х може да биде оправдана само во постојните системи за осветление, каде што не е неопходно подобрување на фотометриските карактеристики на системот и ако повисоката цена на ФСЦ/Т не може економски да се оправда.⁷⁴

Примената на ФСЦ/М, поради високата цена, но и поради помалото специфично производство, е оправдана само во случаите каде што високиот ИРБ е неопходен услов за квалитетен систем за осветление.

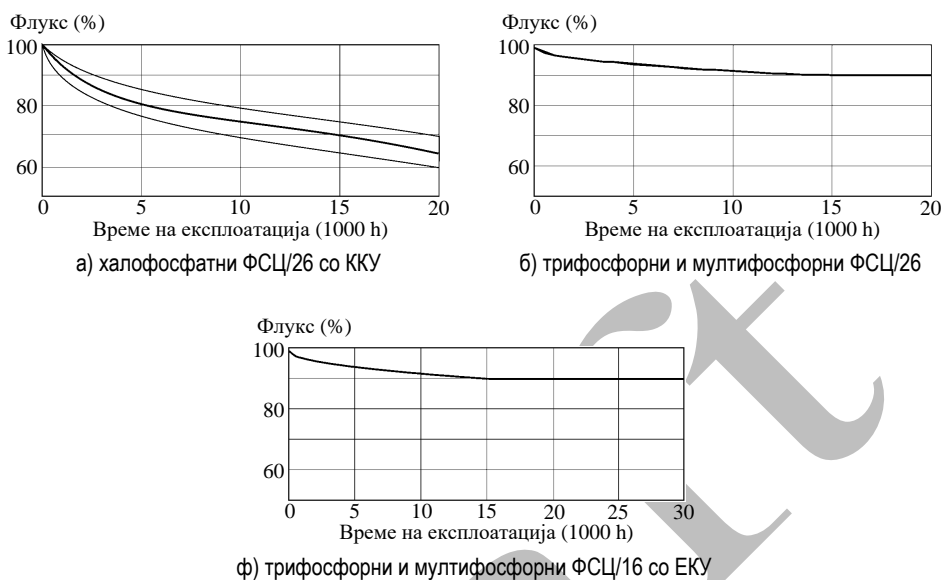
Да забележиме дека ФСЦ/38, со ретки исклучоци, се произведуваат само во халофосфатни варијанти, додека новите ФСЦ/16 се произведуваат само во трифосфорни варијанти.

Трајноста на ФСЦ се дефинира како животен век со 50% преживување, при што времето на работа по секое вклучување е 3 h^{48} , што одговара на 8 вклучувања на ден. Во минатото животниот век на ФСЦ бил околу 6 000 h, додека денес тој изнесува од 10 000 до 20 000 h, во зависност од КУ и шемата на врзување. Со оглед на тоа што врз трајноста значително влијание имаат типот на КУ преку којшто се напојуваат ФСЦ и шемата на поврзување, оваа карактеристика е подетално анализирана во пододелот на овој оддел каде што се разгледувани карактеристиките на КУ за ФСЦ. Од истите причини таму е анализирано и специфичното производство на ФСЦ.

Во текот на експлоатацијата на ФСЦ доаѓа до фотохемиска деградација на флуоресцентниот слој и нафаќање на испарени честички од термоемисиониот материјал врз фосфорниот слој. Опаѓањето на флуоресцентниот слој во текот на експлоатацијата најмногу зависи од типот на флуоресцентниот слој. По правило, трифосфорните слоеви се постабилни од овој аспект, па поради тоа коефициентите на стареење за нив се повисоки. За да се спречат или намалат фотохемиските реакции на флуоресцентниот слој, истиот се прекрива со соодветни заштитни слоеви. Но, овие слоеви не можат да го спречат намалувањето на флуоресцентниот слој поради наталожените честички од термоемисиониот материјал, со што се намалува количеството на УВ зраци коишто ќе паднат на флуоресцентниот слој.

На сликата 5.43 се прикажани кривите на стареење на ФСЦ со различни типови на флуоресцентни слоеви.

⁷⁴ Според податоците добиени од некои од дистрибутерите на ФС на нашиот пазар, релативните цени на ФСЦ/Т и ФСЦ/М за моќност од 36 W, во однос на цената на ФСЦ/Х со истата моќност, се 2,1 и 5,3, соодветно. Ако кон цените на сијалиците се додаде и цената на биметалниот стартер (приближно 30% од цената на ФСЦ/Х од 36 W), односите на цените на ФСЦ/Т и ФСЦ/М со стартери, во однос на ФСЦ/Х со стартер, ќе бидат 1,8 и 4,3, соодветно.

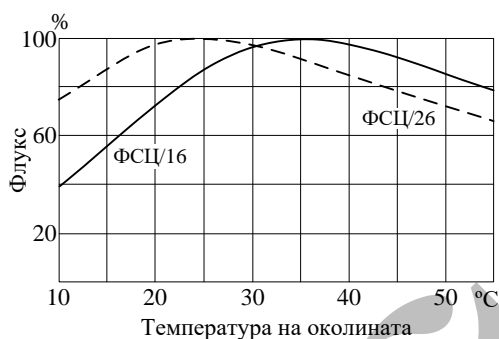


Слика 5.43 Криви на стареење за некои ФСЦ со ККУ и ЕКУ [108]

Флуksот на ФСЦ зависи од температурата на амбиентот (слика 5.44). Конструкцијата на ФСЦ со номинални дијаметри од 26 и 38 mm е таква што, во услови без струење на воздухот околу сијалицата, номиналниот флуks се постигнува при температура на амбиентот од 25 °C (испрекината линија на сликата 5.44). При оваа температура на околината, температурата на површината на стаклениот балон на ФСЦ е околу 40 °C, а притисокот во ФСЦ е таков што, за дадената конструкција, специфичното производство е најголемо. Температурата на амбиентот при којашто флуksот е најголем се нарекува и *оптимална температура*. Ако температурата на околината е различна од оптималната, флуksот на ФСЦ ќе биде помал, при што на пониски температури ова влијание е нешто повеќе изразено.

Голем број ФСЦ се користат во затворени светилки во коишто температурата во околината на ФСЦ е околу 35 °C, а при оваа температура ФСЦ/26 и ФСЦ/38 имаат за околу 10% помал флуks од номиналниот. Поради тоа, новите ФСЦ/16 се конструирани така што нивната оптимална температура е 35 °C (полна линија на сликата 5.44).

Температурата на околината има влијание и врз ТБ на ФС, но тоа влијание е забележливо само ако блиски ФСЦ функционираат во амбienti со релативно голема разлика во температурата [6].



Слика 5.44 Зависност на флуксот кај ФСЦ од температурата на околината [119]

Сјајноста на ФСЦ е многу помала отколку сјајноста на СВВ. Во табелата 5.10 се прикажани сјајностите на ФСЦ чишто димензии и номинални моќности се наведени во табелата 5.6.

Табела 5.10 Сјајност на ФСЦ за општа намена во зависност од дијаметарот и номиналната моќност [119]

Дијаметар mm	Флуоресцентен слој	Номинална моќност W	Средна сјајност cd/m ²	Забелешка
16	трифосфорен	14÷35	17 000	со зголемена ефикасност
		24÷49	23 000÷29 000	со нормална ефикасност
26	мултифосфорен	15÷58	7 500÷10 000	
	трифосфорен	15÷70	7 500÷15 000	
38	халофосфатен	15÷70	7 000÷13 500	
	халофосфатен	20÷65	5 900÷9 400	

Голем број позитивни карактеристики на ФСЦ за општа намена придонеле овие сијалици да имаат голема примена во системите за осветление. Меѓу најзначајните карактеристики на ФСЦ со електромагнетна придушница и starter се:

- релативно големо специфично производство (од 49 до 96 lm/W, вклучувајќи ги и загубите во КУ, видете табела 5.11) и воедно релативно висок ИРБ (видете коментар што се однесува на сликата 5.9);
- релативно долг животен век;
- релативно ниска температура на површината на сијалицата (околу 40 °C);
- релативно мала сјајност (до 30 000 cd/m²) што овозможува примена во светилки со поедноставна конструкција од аспект на ограничувањата на сјајностите;
- голем избор на температури на боја што ги чини погодни за примена во голем број случаи и погодни за комбинација со други типови сијалици;
- релативно мала зависност на флуксот и трајноста од погонскиот напон;

- пониска цена од сијалиците со слично специфично производство и ИРБ (на пример, метал-халогени сијалици);
- работа во било која положба.

Покрај позитивните карактеристики, ФСЦ имаат и определени недостатоци коишто, главно, доаѓаат до израз кога ФСЦ ќе се споредат со ВС, како наједноставни и најевтини сијалици. Во таа смисла на ФСЦ им се забележува следново:

- релативно големи димензии и релативно мали номинални моќности (флукови) што ја ограничува нивната примена, особено во услови кога светилките мора да бидат поставени на големи растојанија од осветлуваните предмети или ако треба да се користат рефлекторски светилки;
- релативно големи отстапувања на флуksот од номиналниот ако температурата на амбиентот е значително различна од оптималната температура, како и проблеми со запалувањето при многу ниски температури, што ги прави неадекватни за надворешно осветление;
- трајноста на сијалиците битно зависи од бројот на вклучувања и од квалитетот на помошните уреди (придушница и стартер);
- можност за појава на треперење и стробоскопски ефект чијашто елиминација бара дополнителни трошоци (кондензатори, поскапа инсталација за поврзување на светилките/сијалиците на различни фази на трифазните системи или ЕКУ);
- релативно мал фактор на моќност што наметнува дополнителни трошоци (за ангажирана реактивна моќност или за кондензатори за компензација);
- можност за појава на шумови кај електромагнетните придушници поради вибрации на магнетните лимови;
- ограничени можности за регулација на флуksот;
- повисока цена на светилките поради потребата од придушница и стартер.

Да забележиме дека претходните недостатоци, со исклучок на последниот (цената), делумно или целосно се надминуваат кај КФС и/или со користење на ЕКУ.

Освен за општа намена, ФСЦ се користат и за специјални намени, како што се:

- ФСЦ во боја наменети за декоративно осветление и светлечки ефекти;
- ФСЦ со рефлексен слој со којшто се постигнува насочување на светлинскиот флуks во определен просторен агол, наменети за осветление на огласни табли, акрилни провидни натписи и слично;
- ФСЦ за копирни апарати;
- ФСЦ за замена на сончева светлина при одгледување на растенија, за примена во стаклени бавчи, цвеќарници и сл.;
- УВ ФСЦ за стерилизација, медицински третмани и сончање под вештачки извори на светлина;
- УВ ФСЦ за таканаречена „сина црна светлина“ (*blacklight blue*) наменети за откривање на грешки во индустријата и фалсификувани пари, привлекување на инсекти, светлечки ефекти во дискотеки и сл.

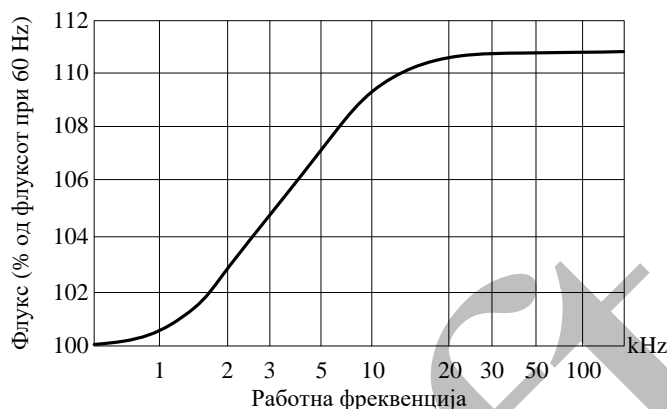
Контролни уреди за флуоресцентните сијалици

Во досега изложеното беа разгледувани шемите на напојување на ФСЦ преку електромагнетни КУ. Во последните години сè поголема примена имаат електронските КУ. Тука треба да се напомене дека постојат и таканаречени *хибридни КУ (hybrid ballasts или cathode-disconnect ballasts)* коишто во основа се електромагнетни придушници за рапид-старт врска, со дополнителен електронски уред којшто ја прекинува струјата за греење на електродите откако сијалицата/ите ќе се запалат [80]. Овде нема посебно да се задржиме на хибридниот КУ со оглед на тоа што тие кај нас многу малку се користат, а ЕКУ се значително подобра алтернатива.

Електромагнетните придушници за ФСЦ, што се присутни на пазарот, се со релативно широк дијапазон на загуби на активната моќност. Тие, според процентот на загубите на активна моќност во однос на номиналната моќност на придушницата, често се групираат во две групи: со нормални и смалени загуби на моќност. Овде ќе го наведеме податокот од [97] според којшто загубите во електромагнетните придушници со смалени загуби се за околу 67% помали отколку загубите кај придушниците со нормални загуби.

Загубите на активна моќност влијаат врз повишување на температурата на околината, односно на светилките. Така, на пример, електромагнетните придушници со нормални загуби можат да ја повишат температурата за околу 55 K, додека тоа повишување за придушниците со смалени загуби е околу 20 K [97]. Се разбира дека ККУ со смалени загуби имаат повисока цена, но релативната разлика на цените во однос на ККУ со нормални загуби и не е така голема.

Набргу по воведувањето на ФС во комерцијално производство било забележано дека со зголемување на фреквенцијата се зголемува и светлинскиот флукс добиен во процесот на празнење низ гасовите. На сликата 5.45 е прикажана зависноста на флуксот на ФСЦ од фреквенцијата на напонот на напојувањето, за ФСЦ предвидени за работа со номинална фреквенција од 60 Hz. Соодветната зависност кај ФСЦ наменети за номинална фреквенција од 50 Hz незначително се разликува од прикажаната на сликата 5.45. На тоа укажува и фактот дека значајните промени на флуксот настануваат при фреквенции повисоки од 1 kHz.



Слика 5.45 Зависност на флуksот кај ФС од фреквенцијата [6]

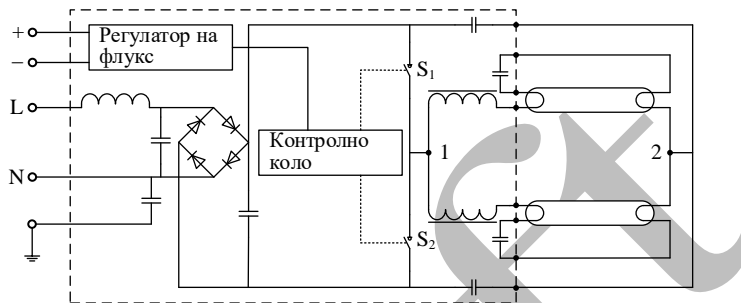
ЕКУ најчесто работат на фреквенции од 20 до 50 kHz, при што напоните и струите во ФСЦ што работат со ЕКУ се разликуваат од вредностите прикажани во табелата 5.7. Како резултат на тоа, при работа со ЕКУ, моќноста на сијалицата може да се намали, а при тоа флуksот значително да не опадне. Така, на пример, според податоците изнесени во [82], напонот, струјата и моќноста на ФСЦ/26 од 36 W кога работи со ЕКУ се 103 V, 0,32 A и 32 W, соодветно. Во овој случај, факторот на моќност е 0,97.

На сликата 5.46 е прикажана принципелната шема на еден ЕКУ предвиден за две ФСЦ, поврзани паралелно. Прекинувачите S_1 и S_2 од сликата 5.46 се полупроводнички прекинувачи управувани од контролното коло кое ги отвора и затвора со определена фреквенција. На тој начин, на приклучните контакти 1 и 2 се доведува напон со правоаголен облик. Контролното коло може да биде предвидено за поврзување на соодветни управувачки кола за регулација на флуksот по пат на промена на фреквенцијата и/или за далечинско управување во системите за управување со осветлението, како и со трансформатор за предгревање на електродите (не е прикажан на сликата 5.46).

Според начинот на запалување на сијалиците, ЕКУ можат да се поделат во две групи: ЕКУ со раpid-старт (со предгревање на електродите или *warm start*) и ЕКУ со инстант-старт (*cold start*). Слично се именувани шемите без стартери за електромагнетни КУ. Во рамките на овој текст ќе ги користиме термините раpid-старт ЕКУ и инстант-старт ЕКУ. Основната разлика на ЕКУ, во однос на соодветните уреди прикажани на шемите од сликите 5.36, 5.39 и 5.41, се состои во тоа што во ЕКУ се интегрирани функциите на електромагнетната придушница (обезбедување напонски импулс потребен за запалување, ограничување на струјата во сијалицата и ограничување на струјата при загревање на електродите) и стартерот.

Процесот на палење на ФСЦ со раpid-старт ЕКУ се состои во загревање на електродите до температура од најмалку 600 °C (точка P од сликата 5.38.б). Потоа,

ЕКУ генерира напонски импулс за запалување на сијалицата. Откога сијалицата ќе се запали, ЕКУ обезбедува релативно мала струја за загревање на волфрамовите влакна на сијалицата, за да се обезбеди континуирана емисија на електрони од термоемисиониот слој.



Слика 5.46 Принципиелна шема на ЕКУ предвиден за две ФСЦ во паралела⁷⁵ [84]

Ако ЕКУ е од типот инстант–старт, електродите на сијалицата не се греат, туку веднаш се доведува релативно висок напонски импулс помеѓу електродите на сијалицата.

ЕКУ се предвидени да ги исклучат неисправните сијалици за да се избегне непријатното трепкање и непотребно трошење на електрична енергија или да не дојде до недозволена висока температура на стаклениот балон.

Најголем број од ФСЦ/26 за општа намена, што денес се произведуваат, можат да работат и со ККУ и со ЕКУ, иако производителите нудат специјални варијанти на овие сијалици предвидени за работа само со ЕКУ. ФСЦ/16 од новата генерација се предвидени само за ЕКУ.

Покрај тоа што обезбедуваат поголемо специфично производство на самата ФСЦ, ЕКУ имаат и значително помали загуби отколку ККУ. Тука треба да се забележи дека кај рапид–старт ЕКУ намалувањето на загубите е нешто помало отколку кај инстант–старт ЕКУ. Во табелата 5.11 се прикажани споредбени показатели за специфичното производство на најчесто користените трифосфорни ФСЦ/26 со ККУ со нормални и смалени загуби и со рапид–старт ЕКУ. За споредба се прикажани и специфичните производства за две ФСЦ/16 коишто се предвидени за работа само со ЕКУ.

Од податоците прикажани во табелата 5.11 се гледа дека, во споредба со користење на ККУ со нормални загуби, при користење на ЕКУ специфичното производство е поголемо за 20 до 46%. Во однос на ККУ со смалени загуби овој процент е помал и изнесува од 11 до 26%. Од ФСЦ/26 најчесто се користат сијалиците со моќности од 18 и 36 W⁷⁶ во светилки со парен број сијалици (4×18 W и 2×36 W). Ако во таквите светилки предвидени за четири, односно 2 сијалици, се користат ЕКУ наместо ККУ со нормални загуби тогаш специфичното производство ќе биде поголемо за 21 и

⁷⁵ ЕКУ за повеќе ФСЦ се произведуваат и во варијанти во коишто сијалиците се поврзуваат сериски [82].

⁷⁶ Според неофицијални податоци добиени од дистрибутерите на ФС во Република Македонија.

29%, соодветно. Сосема е јасно дека и вкупната потребна моќност за осветление на определена просторија со светилки со ЕКУ ќе биде помала отколку кога би се користеле ККУ. Според тоа, од аспект на заштеда на енергија, ЕКУ се многу подобри од ККУ, но за жал нивната цена е многу повисока во споредба со ККУ (во некои случаи и неколку пати) и истите се економски исплатливи во услови на повисоки цени на електричната енергија. Проблемот со цената делумно се ублажува со тоа што постојат ЕКУ коишто можат да напојуваат повеќе сијалици.

Табела 5.11 Специфично производство на некои трифосфорни ФСЦ со различни КУ [98, 108, 119]

Број и моќност на сијалиците приклучени на КУ	ККУ со нормални загуби			ККУ со смалени загуби			ЕКУ рапид-старт		
	$P_{\text{сиј.}} + \Delta P_{\text{КУ}}^{77}$ W	Φ lm	ξ lm/W	$P_{\text{сиј.}} + \Delta P_{\text{КУ}}^{77}$ W	Φ lm	ξ lm/W	$P_{\text{сиј.}} + \Delta P_{\text{КУ}}$ W	Φ lm	ξ lm/W
ФСЦ/26/840									
1 × 18W	18 + 9,8	1 350	48,6	18 + 6,0	1 350	56,3	16,0 + 3,0	1 350	71,1
2 × 18W	36 + 9,2	2 700	59,7	36 + 6,0	2 700	64,3	32,0 + 4,0	2 700	75,0
4 × 18W	2 × (2 × 18W)			2 × (2 × 18W)			64,0 + 11,0	5 400	72,0
1 × 36W	36 + 9,2	3 350	74,1	36 + 6,0	3 350	79,8	32 + 4,0	3 350	88,2
2 × 36W	2 × (1 × 36W)			2 × (1 × 36W)			64 + 6,0	6 700	95,7
1 × 58W	58 + 12,7	5 200	73,6	58 + 8,5	5 200	78,2	50 + 6,0	5 200	92,9
2 × 58W	2 × (1 × 58W)			2 × (1 × 58W)			100 + 10,0	10 400	94,5
ФСЦ/16/840									
1 × 14W	–	–	–	–	–	–	14 + 3,0	1 350	79,4
2 × 35W	–	–	–	–	–	–	70 + 6,0	7 300	96,0

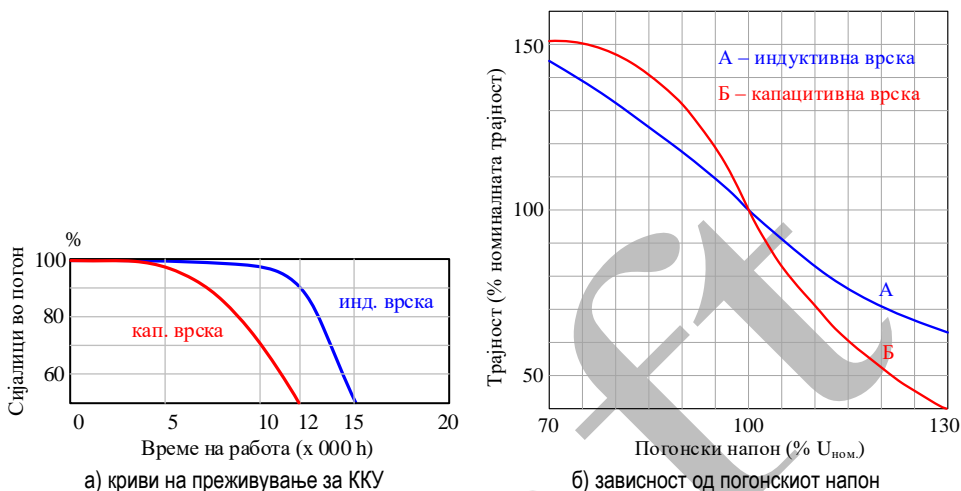
Покрај тоа што помалите загуби во ЕКУ го подобруваат специфичното производство, тие помалку придонесуваат за порастот на температурата во затворените светилки.

Во најголема мерка трајноста на ФСЦ зависи од трајноста на волфрамовите електроди. Меѓу факторите коишто имаат најголемо влијание врз трајноста на волфрамовите електроди најзначајни се предгревањето на електродите во процесот на палење на ФСЦ (типот на КУ) и бројот на вклучувања.

Отстапувањата на погонскиот напон во однос на номиналниот напон имаат влијание врз трајноста на ФСЦ, но ова влијание е многу помалку изразено отколку кај СВВ. На сликата 5.47.a се прикажани кривите на преживување на ФСЦ/Т за индуктивна и капацитивна врска за работа со циклус од 3 часа⁴⁸. На сликата 5.47.б е прикажана зависноста на трајноста на ФСЦ од отстапувањата на погонскиот напон за индуктивна и капацитивна врска на ККУ. Кога се користат ЕКУ отстапувањата на погонскиот напон многу малку влијаат врз трајноста со оглед на тоа што, меѓу

⁷⁷ Вообичаено, загубите на активна моќност во придрушниците се декларираат за температура на навикките од 25 °C, таканаречени *студени* загуби. Во номинален режим на работа стварните (*топли*) загуби можат да бидат повисоки и за 10 до 30% [82].

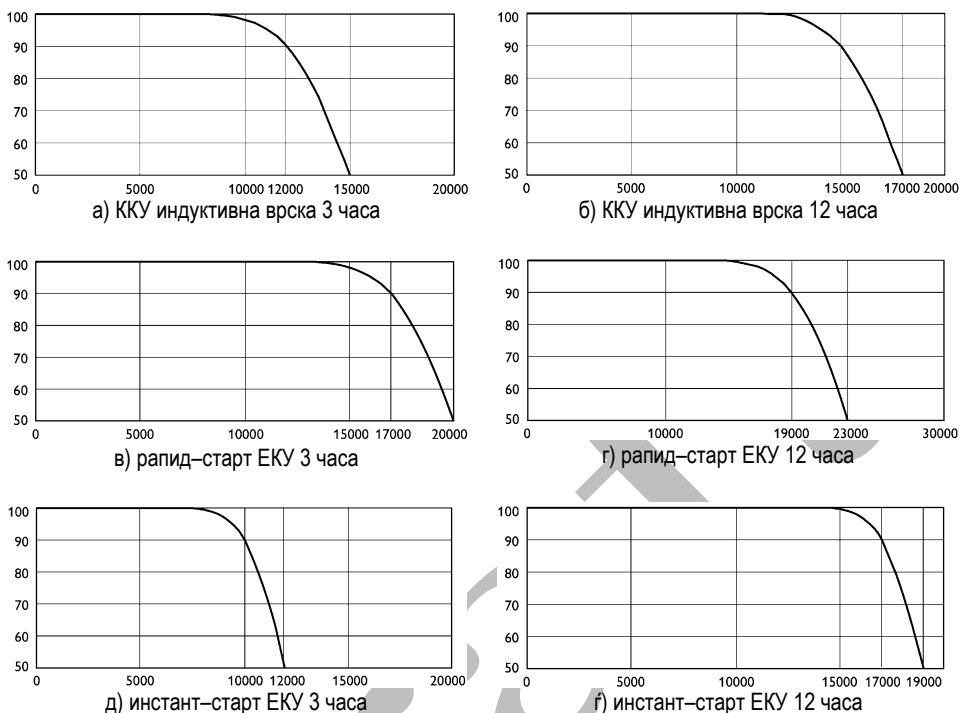
останатото, ЕКУ ги напојуваат ФСЦ со стабилизирани напон. Практично, отстапувањата на погонскиот напон имаат поголемо влијание врз трајноста на ЕКУ.



Слика 5.47 Трајноста кај ФСЦ со ККУ од погонскиот напон [95,82]

Ако во процесот на палење на ФСЦ волфрамовото влакно не е загреано на доволно висока температура ќе биде помало количеството на емитирани електрони и ќе биде потребна поголема ЕМС за успешно запалување на сијалицата отколку што може да се обезбеди во колото со електромагнетна придушница, така што во тој случај ќе има повеќе обиди за запалување на сијалицата. Со оглед на тоа што при секој обид за запалување сијалицата е изложена на напонски „шок“ од индуцираната ЕМС во придушницата, трајноста на ФСЦ опаѓа со зголемување на бројот на обиди за запалување.

По правило, рапид-старт КУ (ККУ и ЕКУ) овозможуваат подолг животен век во однос на ККУ со биметален starter и инстант-старт ЕКУ. Кај ККУ капацитивната врска го скусува животниот век на ФСЦ во споредба со индуктивната врска. На сликите 5.48 се прикажани кривите на преживување (во %) во функција од часовите работа (апсисна оска) за ФСЦ/26 со различни КУ за 3 и 12 часа работа по секое вклучување.



Слика 5.48 Криви на преживување за некои ФСЦ/Т/26 со ККУ и ЕКУ за циклус на работа од 3 и 12 h по вклучувањето [108]

Трајноста на ФС е во директна врска со температурата на волфрамовото влакно во моментот на запалување на сијалицата (т.е. воспоставување на електричниот лак). Ако со T_h и R_h се означат апсолутната температура (во келвини) и отпорноста на загреаното волфрамово влакно, а со T_c и R_c апсолутната температура ($273,16 + 25$ K) и отпорноста на студеното влакно, важи следната релација [6]:

$$T_h = T_c \cdot \left(\frac{R_h}{R_c} \right)^{0,814}$$

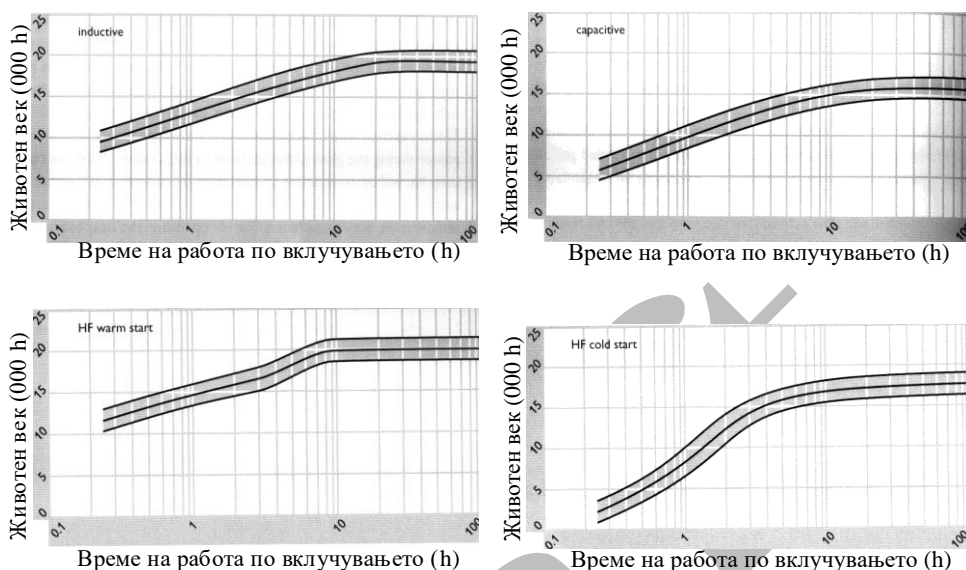
Според тоа, за постигнување на температура на влакното од 973 K (700 °C; точка Е од сликата 5.38.б), односот на отпорностите R_h/R_c треба да изнесува околу 4,25. Овој однос е значаен бидејќи може релативно едноставно да се измери и со него да се определи температурата на влакното во моментот на воспоставување на електричниот лак. Голем број производители на ЕКУ ги декларираат своите производи како рапид-старт ЕКУ, но кај некои од нив односот R_h/R_c е помал од 4,25, што укажува дека таквите ЕКУ спаѓаат во групата на инстант-старт. Во САД постојат заложби ANSI да го пропише овој однос како задолжителен за проценка дали рапид-старт ЕКУ доволно ги предпреваат електродите во процесот на запалување [79].

Трајноста на ФСЦ наменети за инстант–старт врските со ККУ (слика 5.41.в) практично не зависи од бројот на вклучувања бидејќи сијалиците наменети за овие шеми немаат волфрамово влакно, туку волфрамови електроди во вид на цилиндер и кај нив не е потребно предгревање.

Од сликата 5.48.а се гледа дека, во услови кога сијалицата работи 3 часа по секое вклучување, номиналниот животен век на ФСЦ со ККУ во индуктивна врска е околу 15 000 h. За тоа време ќе има околу 5 000 вклучувања на сијалицата. Во овој период биметалниот starter ќе направи исто толку, а многу често и значително повеќе, отворања и затворања на неговите контакти. Бидејќи просечниот животен век на биметалните starterи е околу 10 000 циклуси, сосема е разбирливо зошто се препорачува со секоја замена на сијалиците да се менуваат и биметалните starterи, иако тие навидум функционираат добро.

Со оглед на тоа што бројот на вклучувања и времето на работа по секое вклучување имаат големо влијание врз трајноста на ФС, во последно време постои тенденција животниот век на ФС да се дефинира како број на вклучувања (со определена интермитенција на работа). Ова е особено важно за случаите на примена на ФС во системи за осветление каде што бројот на вклучувања и исклучувања во текот на 24 h е значително поголем од 8. Така, на пример, според резултатите презентирани во [79], животниот век со 50% преживување на ФСЦ/26 приклучени на рапид–старт ККУ е околу 3 000 вклучувања, при што бил користен таканаречен брз циклус на интермитенција (5 минути работа, 5 минути мирување). Имајќи предвид дека со претходно наведениот циклус на интермитенција има 6 вклучувања на час, јасно е дека трајноста на сијалиците во овој случај би била околу 500 h!

На сликата 5.49 се прикажани зависностите на трајноста на ФСЦ од интермитенцијата на работа за различни КУ. Врз основа на дијаграмите од сликата 5.49 е очигледно дека инстант–старт ЕКУ, но и ККУ, не би требало да се користат во ситуациите кога времето на работа по вклучувањето е кусо (чести вклучувања и исклучувања, карактеристично за системите за управување на осветлението). Во таквите ситуации предноста ја имаат рапид–старт ЕКУ. Дури, според некои истражувања направени во САД [77], ако времето на работа по секое вклучување е покусо од 12 h, ФСЦ/26 што работат со инстант–старт ЕКУ имаат покус животен век отколку тие што работат со рапид–старт ККУ (шема на врзување слична на шемата прикажана на сликите 5.41.а и б).



Слика 5.49 Трајност на некои ФСЦ/26 со ККУ и ЕКУ во зависност од времето на работа по вклучувањето [82]

Промената на флуksот на ФСЦ може да се реализира со помош на шемите прикажани на сликата 5.33. Има две причини зошто практичната регулација на флуksот кај ФСЦ може да се постигне до 50% од номиналниот. Прво, во колата со биметален starter при помала струја во електричното коло, напонот на сијалицата, т.е. напонот на starterот, поради инверзната $U-I$ карактеристика, може да достигне вредност што ќе предизвика реагирање на starterот. Второ, при струи во сијалицата помали од 50%, електричниот лак не може да обезбеди загревање на електродите на температура којашто овозможува доволна емисија на електрони. Решение за овој проблем се рапид-старт ККУ со посебен трансформатор за греење на електродите (слика 5.41.б) коишто, во комбинација со тиристорскиот уред од слика 5.33.в, овозможуваат стабилна работа при намалување на флуksот до само неколку проценти од номиналниот. Да забележиме дека при работа на ФСЦ со многу мал флуks е можна појава на треперење на светлината.

Со ЕКУ регулацијата на флуksот е значително поедноставна. Таа се прави со промена на фреквенцијата (принципелна шема на сликата 5.6.г) за што се користи соодветен дополнителен уред, прилагоден на карактеристиките на ЕКУ. Тука треба да се каже дека ЕКУ најчесто се произведуваат во две варијанти (со различни цени): со и без можност за регулација на флуksот. ЕКУ со регулација на флуksот често се предвидени и за работа во склоп на системите за управување со осветлението. Долната граница на флуksот што може да се постигне со ЕКУ е помеѓу 0 и 10% од номиналниот флуks.

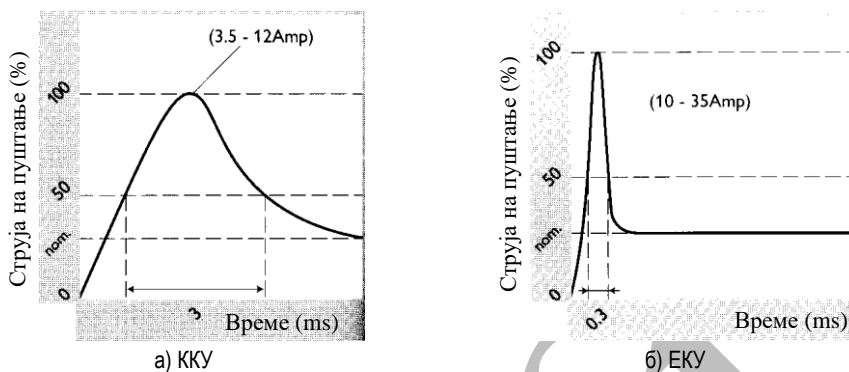
Вкупната хармоничка дисторзија што ја внесуваат ЕКУ зависи од нивната конструкција и е во директна зависност со цената. Можно е производителите да имаат повеќе варијанти на еден навидум ист ЕКУ, наменети за пазари со различна регулатива во поглед на хармоничката дисторзија.

Покрај претходно наведените предности на ЕКУ во однос на ККУ, тука ќе ги наведеме и следните:

- овозможуваат запалување на сијалиците и на пониски температури отколку ККУ;
- зависностите на флуksот и трајноста од погонскиот напон, по правило, се помалку изразени;
- имаат помала тежина и димензии;
- можат да бидат приклучени на еднонасочен напон (најчесто тоа се ЕКУ со посебна изведба);
- работата со високи фреквенции (ВФ) практично го елиминира стробоскопскиот ефект и аудио шумовите.

Треба да се има предвид фактот дека работата на ВФ создава и определени проблеми. Капацитивностите и индуктивноста на спроводниците за поврзување на ЕКУ со сијалиците, коишто при фреквенција од 50 или 60 Hz немаат влијание, при работа со ВФ може да создадат проблеми. Поради тоа, овие спроводници треба да бидат што е можно покуси и да се одбегнуваат јамки коишто може да ја зголемат индуктивноста. Дополнително, во случаите кога ЕКУ напојува повеќе сијалици, должините на спроводниците до одделните сијалици треба да бидат еднакви. Покрај тоа, конструкцијата на светилките треба да овозможи соодветно обликување на електромагнетното поле околу светилката со цел да се намалат електромагнетни пречки [82].

Електричните кола на ФС со ЕКУ имаат поголеми струји на пуштање отколку со ККУ. На сликата 5.50 се прикажани временските промени на ефективните вредности на струите на пуштање во електричните кола со ККУ и ЕКУ, при еднакви влезни импеданции на мрежата во точката на напојување на колата и еднакви номинални моќности на сијалиците.



Слика 5.50 Временска промена на ефективната вредност на струјата на пуштање за ФС со ККУ и ЕКУ [82]

Од дијаграмите на сликите 5.50.а и 5.50.б се гледа дека максималната вредност на струјата на напојување на колото со ЕКУ е за околу три пати поголема, но таа многу побрзо опаѓа до номиналната вредност отколку соодветната струја во колото со ККУ.

Енергијата што се ослободува во преодниот процес во осигурувачите и/или прекинувачите за заштита на електричните кола е пропорционална на производот од времето и квадратот на струјата, поради што почетната струја во колата со ЕКУ може да предизвика несакана реакција на заштитните уреди.

Ефектите од поголемите струи при вклучување особено доаѓаат до израз кај системите за осветление со поголем број сијалици. Притоа, не е за занемарување присуството на ЕКУ. Имено, во струјното коло со ККУ моментот кога струјата на пуштање ќе го достигне својот максимум е случајна големина и зависи од моментот на спојување на биметалните електроди на starterот. Поради тоа најголемата струја на целиот систем е значително помала отколку збирот на најголемите струи во струјните кола на одделни сијалици. Од друга страна, ЕКУ ги запалуваат сијалиците скоро едновремено што создава поголема резултантна струја за целиот систем. За овој проблем треба да се води сметка при изборот на заштитните елементи (осигурувачи и/или прекинувачи). Вообичаено, производителите на ЕКУ даваат информации за бројот на ЕКУ што може да се приклучат на еден заштитен уред, во зависност од карактеристиките на ЕКУ и заштитниот уред.

Компактни флуоресцентни сијалици

Еден од недостатоците на ФСЦ е тоа што тие имаат многу поголеми димензии отколку останатите сијалици со приближно ист номинален флукс. На пример, ХС во вид на цевка со моќност 250 W и флукс од 5 500 lm (табела 5.5) има дијаметар од 12 mm и должина 115 mm, а трифосфорна ФСЦ од 58 W и флукс од 5 200 lm, има дијаметар од 26 mm и должина 1 500 mm (табела 5.11). Овој проблем делумно се ублажува кај сијалиците во облик на круг (слика 5.34.а) или со ФСЦ во облик на латиничната буква U.

Од претпоследната деценија на XX век производителите почнуваат да нудат компактни ФС (КФС) предвидени за работа со екстерен КУ (КФСЕ) и КФС со интегриран КУ (КФСИ) коишто, за приближно иста моќност, имаат значително помали димензии од ФСЦ.

На сликата 5.51 се прикажани два најчесто користени облика на КФСЕ. Најчесто користените облици на КФСИ се прикажани на сликата 5.52. КУ кај КФСИ се интегрирани со сијалицата во еден уред и тие не можат да се искористат кога ќе прегори сијалицата.



Слика 5.51 Некои најчесто користени облици на компактните ФС со екстерен КУ (димензиите на сликата не одговараат на пропорциите во стварност)



Слика 5.52 Некои најчесто користени облици на компактните ФС со интегриран КУ (димензиите на сликата не одговараат на пропорциите во стварност)

Стаклениот балон на КФС се изработува во вид на цевка со дијаметар не поголем од 16 mm. Помалите димензии на КФС се постигнуваат со свиткување на цевката во вид на латиничната буква U или со поврзување на две или повеќе паралелни цевки при врвот и во основата на КФС, така што вкупната должина на цевката (електричниот лак) ја дефинира и моќноста на сијалицата. Кај некои од КФСИ постои и надворешен балон (опализиран или во вид на провидна призматична капа), со приближно исти димензии како и стаклените балони на некои ВС.

Во зависност од бројот на електричните контакти КФСЕ се произведуваат во две варијанти. Сијалиците со два контакта во себе имаат вградено starter и кондензатор потребен за создавање на соодветен напонски импулс за запалување на сијалицата и тие се предвидени за приклучување само на ККУ. КФСЕ со четири контакти немаат ниту starter ниту кондензатор и можат да работат со соодветни ККУ и надворешен starter или со ЕКУ.

Во табелата 5.12 се прикажани најголемите димензии на некои КФСЕ во зависност од бројот на цевки и номиналната моќност. Ако се споредат податоците од табелите 5.6 и 5.12 може да се заклучи дека КФСЕ имаат значително помали должини отколку ФСЦ со приближно иста моќност.

КУ во КФСИ можат да бидат електромагнетни придушници со помошно електронско коло (практично хибридни КУ) или ЕКУ. Првите КФСИ биле главно со хибридни КУ, додека денес на пазарот сè повеќе се присутни КФСИ со ЕКУ. Димензиите, номиналните флуksi и облиците на некои КФСИ се така одбрани што најголем дел од нив можат да заменат некои од ВС, поради што овие КФС се нарекуваат и *компатибилни* или *заменски* КФС.

Табела 5.12 Димензии на некои КФСЕ за различни номинални моќности [85,91]

Номинална моќност W	Број на цевки	Најголема димензија вклучувајќи ја и приклучната капа ⁷⁸ mm
5 / 7 / 9 / 11	2	105 / 135 / 167 / 236
18 / 24 / 36 / 40 / 55 / 80	2	227 / 322 / 417 / 542 / 542 / 572
10 / 13 / 18 / 26	4	118 / 140 / 152 / 173
18 / 26 / 32 / 42	6	124 / 134 / 142 / 159

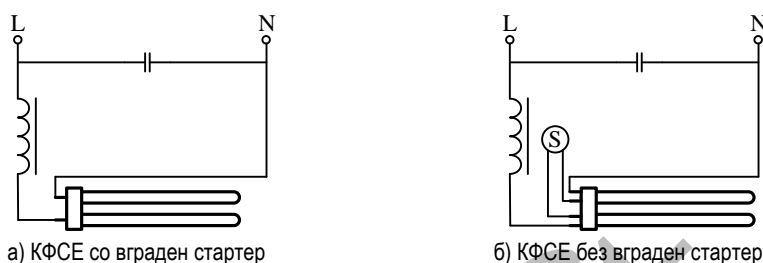
КФСЕ со ККУ се поврзуваат на сличен начин како и ФСЦ. На сликата 5.53 се прикажани индуктивните шеми на КФСЕ со и без вграден starter. Компензираната врска и во двата случаја се остварува со паралелно поврзан кондензатор. Покрај овие две шеми, КФСЕ со ККУ можат да се поврзат во капацитивна, дуо и тандем врски, слично како и ФСЦ. Тука треба да се забележи дека производителите не препорачуваат капацитивна врска за сите модели на КФСЕ.

КФСЕ со четири електрични контакти можат да работат со ЕКУ. Вообичаено, ЕКУ за КФСЕ можат да напојуваат една или две сијалици и имаат иста конструкција и функции како и ЕКУ за ФСЦ.

Со оглед на големиот број комбинации на моќности и број на електрични контакти, за приклучување на КФС е потребно да се следат упатствата на производителите на сијалиците и/или КУ.

КФС се изработуваат само со трифосфорни флуоресцентни слоеви, со исклучок на некои КФСЕ коишто постојат и во варијанти со мултифосфорни слоеви. Со оглед на тоа што составот на трифосфорните слоеви кај КФСЕ и КФСИ е скоро идентичен со составот на слоевите кај ФСЦ, дијаграмите за спектралниот состав на светлината и температурите на боја прикажани на сликата 5.42 важат и во овој случај. Тука треба да се наведе дека кај КФСИ температурите на боја од доменот на дневна светлина (студен впечаток) се застапени само кај помал број сијалици.

⁷⁸ Прикажаните димензии се за приклучоци со два електрични контакта. КФСЕ со четири контакти имаат помали димензии за 8 до 15 mm.



Слика 5.53 Индуктивна и компензирана шема на врзување на КФСЕ со електромагнетна придушница

Принципот на работа на КФС не се разликува од принципот на работа на ФСЦ. Разлики постојат само во поглед на некои карактеристики. Во продолжение ќе ги наведеме карактеристиките на КФС коишто се разликуваат од соодветните кај ФСЦ.

Специфичното производство на КФС е помало од специфичното производство за ФСЦ со иста или слична моќност и ист флуоресцентен слој. Во табелата 5.13 се прикажани споредбени показатели за специфичното производство на трифосфорни КФСЕ, ФСЦ/26 и ФСЦ/16 со ТБ од 4 000 К. Влијанието на типот на КУ врз специфичното производство на КФСЕ е исто како и за ФСЦ. Според тоа, квалитативните заклучоци во коментарот на табелата 5.11 важат и во овој случај. Помалото специфично производство на КФСЕ во никој случај не значи дека тие се положна алтернатива на ФСЦ. Имено, со оглед на помалите димензии на КФСЕ, можно е коефициентот на полезно дејство на светилките за нив да биде повисок од соодветниот за ФСЦ, така што резултантниот коефициент на полезно дејство на сијалицата, КУ и светилката може да биде подобар во случајот на КФСЕ. Повеќе детали за ова во одделот 6.5.1.

Табела 5.13 Специфично производство⁷⁹ за некои КФСЕ/840, ФСЦ/26/840 и ФСЦ/16/840 [85,91]

КФСЕ/840			ФСЦ/26/840			ФСЦ/16/840		
P (W)	Φ (lm)	ξ (lm/W)	P (W)	Φ (lm)	ξ (lm/W)	P (W)	Φ (lm)	ξ (lm/W)
18	1 200	66,7	18	1 350	75,0	14	1 350	96,4
36	2 900	80,6	36	3 350	93,1	35	3 650	104,3
55	4 800	87,3	58	5 200	89,7	49	4 900	100,0

Помалото специфично производство на КФС се должи на помалиот дијаметар на стаклените балони. Кај ФС со поголеми дијаметри на балонот бројот на удари на електроните и јоните во стаклениот балон (флуоресцентниот слој) е релативно мал. Со намалување на дијаметарот, како што е случај кај КФС, значителна количина од енергијата се губи во судирите на електрони со флуоресцентниот слој и рекомбинацијата на електроните со јоните од внатрешната страна на стаклениот балон.

⁷⁹ Во овој случај, при определување на специфичното производство не се земени предвид загубите на активната моќност во КУ.

Поради претходните причини е забрзано и стареењето на флуоресцентниот слој во текот на експлоатацијата. Како резултат на тоа, коефициентите на стареење кај КФС се помали во споредба со истите коефициенти за ФСЦ. Во стручната литература постојат мал број податоци за коефициентите на стареење на КФС. Според [85], коефициентот на стареење за КФСЕ по 2 000 h работа, со мали исклучоци, е околу 90%, додека соодветниот коефициент по 5 000 h работа е во границите од 75 до 90%.

Соодветно, животниот век на КФСЕ е помал од животниот век на ФСЦ и изнесува околу 8 000 до 12 000 h за КФСЕ напојувани преку ККУ, до околу 20 000 h ако КФСЕ се напојуваат преку ЕКУ [85,91,108].

КФСИ првенствено се наменети за замена на волфрамовите сијалици со приближно исти димензии и номинален флукс. Според тоа, номиналните моќности на КФСИ, поточно нивните флуковски, се одбрани имајќи го предвид тој факт. Номиналните моќности се движат во границите од 3 до 23 W, а специфичното производство, во зависност од изведбата и моќноста, е во границите од 33 до 67 lm/W.

Во своите каталози и рекламни материјали, вообичаено, производителите препорачуваат замена на ВС со КФСИ чијашто моќност е приближно пет пати помала. Тоа би требало да укаже дека КФСИ имаат и пет пати поголемо специфично производство од соодветните ВС. Но, ако се споредат флуковите на двата типа сијалици може да се заклучи дека КФСИ имаат приближно еднаков флукс како и ВС со приближно четири пати поголема моќност.

Производителите многу ретко ги публикуваат податоците за коефициентите на стареење или кривите на стареење за КФСИ. Ова може донекаде и да се разбере со оглед на тоа што овие сијалици се наменети за сите категории потрошувачи и таквите (технички) детали малкумина ги бараат. Од друга страна, нема доволно публикувани податоци од независни лаборатории, со оглед на тоа што овие сијалици на пазарот се присутни релативно кусо време и нивната технологија за производство постојано се менува и сè уште ја нема достигнато „зрелоста“ на технологијата за производство на ФСЦ. Од расположливите податоци може да се заклучи дека КФСИ имаат коефициенти на стареење слични на соодветните коефициенти кај КФСЕ.

Најголем број модели на КФСИ, што се денес во продажба, се со инстант-старт ЕКУ. Трајноста на овие КФСИ е околу 6 000 до 12 000 h, додека трајноста КФСИ со хибридни КУ може да достигне од 10 000 до 15 000 h. По правило, КФСИ со ЕКУ имаат нешто поголемо специфично производство од КФСИ со хибридни КУ.

Покрај животниот век со 50% преживување, изразен во часови работа, некои производители го публикуваат и податокот за бројот на вклучувања. Така, на пример, според [85], за КФСИ со животен век од 6 000 h, животниот век изразен како број на вклучувања е 5 000, додека за КФСИ со животен век поголем од 10 000 h, бројот на вклучувања е околу 20 000. Многу често, производителите ја изразуваат трајноста во години, претпоставувајќи просечно време на користење на КФСИ во текот на годината од 3 часа на ден.

Скоро без исклучок, сите КФСИ се со трифосфорни флуоресцентни слоеви со ИРБ од класата 1В.

Температурата на бојата на КФСИ најчесто е 2 700 K, што одговара на ТБ на ВС. Во производните програми на големите (реномирани) производители на сијалици

малку се застапени КФСИ за неутрални бои (околу 4 000 К) или за студени бои (околу 6 500 К).

Да забележиме дека во последно време на нашиот пазар има голем број КФСИ од малку познати производители со неутрални или студени ТБ (CCT поголеми од 4 000 К) со непознати (неозначени) ИРБ и индекс на енергетска ефикасност⁸⁰. Иако со употребата на КФСИ со ТБ поголеми од 4 000 К се постигнуваат значителни заштеди на електричната енергија, сепак треба да се внимава за студениот впечаток што го создаваат овие сијалици, во споредба со топлиот впечаток од ВС.

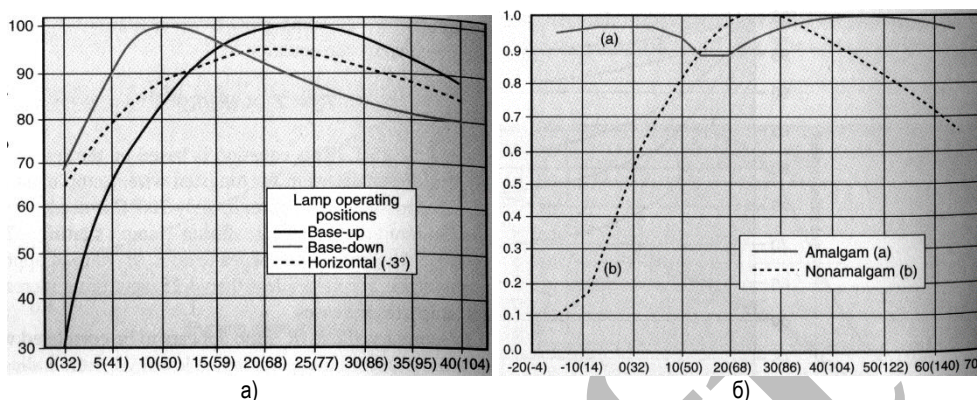
Зависноста на флуksот на ФСЦ од температурата на околината е прикажана на сликата 5.44. Во принцип кривите прикажани на сликата 5.44 важат и за КФС. Но, во случајот на КФС, покрај температурата на амбиентот и положбата на работа на сијалицата има влијание врз температурата на одделните делови на КФС, а со тоа и врз флуksот на сијалицата (слика 5.54.а). Притисокот на живината пареа е определен од температурата на таканаречените *студени точки*, т.е. точки на површината на стаклениот балон со најмала температура каде што се собира (кондензира) вишокот на жива во балонот. Количеството на кондензирана жива зависи од температурата на студените точки и при повисоки или пониски температури притисокот на живината пареа ќе биде повисок или понизок од оптималниот. Количеството на кондензирана жива може да се регулира ако во стаклениот балон се додаде амалгам⁸¹. Легурите на живата со другите метали (т.е. амалгами) имаат својство да ја врзуваат или ослободуваат живата во зависност од температурата што владее во електричниот лак (околу 90 °C), со што се постигнува притисокот на живината пареа да биде во тесни граници, блиску до оптималниот. Како резултат на тоа, флуksот на сијалицата е поголем од 90% од номиналниот во релативно широк интервал на амбиентни температури (слика 5.54.б). Така, КФС во комбинација со ЕКУ се поефикасни за работа на пониски температури отколку ФСЦ, што ги чини применливи за надворешно осветление. Присуството на амалгамите во балоните на ФС има и недостатоци. На ФС со амалгами им е потребно подолго време по запалувањето за постигнување на номиналниот флуks и имаат нешто помало специфично производство. Поради тоа, амалгамите главно се користат кај КФС.

За оптималната положба на работа на КФС, влијанието на положбата на работа врз флуksот, како и за предвидените температури на работа на КФС, треба да се следат упатствата на производителите.

Можноста за регулација на флуksот кај КФС зависи од изведбата на сијалиците. Кај КФСИ не е можна регулација со стандардните тиристорски регулатори наменети за СВВ. Во принцип, регулацијата на флуksот кај КФСИ е можна, но многу ретко се применува и тоа се прави, главно, со соодветни кола вградени во самата сијалица. Кај КФСЕ со вграден starter (т.е. со два електрични контакта) не е можна промена на флуksот, додека кај КФСЕ без вграден starter (т.е. со четири електрични контакти) постои можност за регулација на начин како што тоа се прави кај ФСЦ, а најдобри резултати се постигнуваат со соодветни ЕКУ.

⁸⁰ Индексот на енергетската ефикасност е објаснет во потпоглавјето 5.5.

⁸¹ Амалгами се користат и за некои ФСЦ наменети за специјални услови на работа.



Слика 5.54 Флукс на КФС во зависност од температурата на амбиентот, положбата на работа и присуството на амалгами [6]

КФСЕ се користат во сите случаи како и ФСЦ. Покрај тоа, поради помалите димензии КФСЕ можат да се користат и во некои рефлекторски светилки, така што претставуваат значително поефикасна алтернатива на соодветните светилки со ХС. За некои специјални намени, покрај ФСЦ, производителите нудат и специјални КФСЕ.

Специјално дизајнираните КФСЕ за работа на пониски температури (во комбинација со ЕКУ) наоѓаат сè поголема примена за осветление на надворешни простори. Специфичното производство на КФСЕ со ЕКУ за релативно мали моќности до околу 80 W е поголемо отколку специфичното производство на соодветните живини сијалици, натриумови сијалици со висок или низок притисок, коишто традиционално се користат за овие намени.

КФСИ се првенствено наменети за замена на ВС. Тука треба да се каже дека замената не е секогаш можна поради тоа што димензиите на КФСИ можат да бидат малку поголеми отколку соодветните димензии на ВС којашто треба да се замени.

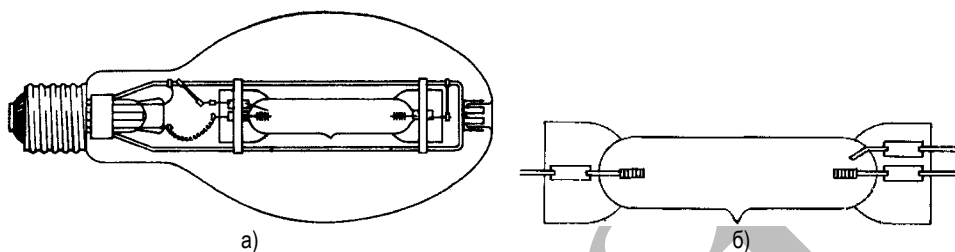
5.3.3 Живини сијалици

Живините сијалици во комерцијална и помасовна употреба се јавуваат неколку години пред ФС, иако принципот на работа бил познат од почетокот на XX век [53]. Првите ЖС биле користени главно во експериментални цели.

Кај ЖС, како и кај ФС, во основното полнење има жива, но нивните конструкции значително се разликуваат, пред сè, поради работниот притисок на живината пара.

ЖС се изработуваат со два стаклени балона (слика 5.55.a). Бренерот (внатрешниот балон изработен од кварцно стакло) прикажан на сликата 5.55.б е исполенет со жива и инертен гас, најчесто аргон. Во бренерот има две главни електроди (помеѓу кои се создава електричниот лак) и една помошна електрода која што служи за запалување на сијалицата. Главните електроди се изработени од волфрам-ови стапчиња чиишто слободни краеве се со поголем напречен пресек и прекриени

со слој од термоемисионен материјал. Помошната електрода е изработена од волфрам или молибден и е лоцирана во близина до една од главните електроди, а преку отпорник со отпорност од 10 до 30 k Ω е поврзана со спротивната главна електрода. Растојанието помеѓу помошната и блиската главна електрода е околу 1 mm.



Слика 5.55 Конструкција на ЖС и изглед на бренирот [5]

Кај ЖС за помали моќности надворешниот балон е изработен од обично стакло, а кај ЖС со поголеми моќности тој е од тврдо (борсиликатно) стакло. Најчестите облици на надворешниот балон се прикажани на сликата 5.56. Рефлекторските сијалици можат да бидат изработени од дувано стакло (слика 5.56.б) или поретко од пресувано стакло (PAR рефлектор, не е прикажан на сликата 5.56). Најчесто, внатрешната страна на надворешниот балон е обложена со флуоресцентен слој. Во минатото биле користени ЖС без флуоресцентна облога, но денес, освен за некои специјални апликации, таквите варијанти на ЖС немаат позначајна примена. Просторот помеѓу внатрешниот и надворешниот балон е исполнет со некој инертен гас (аргон или смеса од аргон и азот) под притисок од околу 16 kPa [84].

Надворешниот балон и инертниот гас имаат повеќе функции. Тие ги штитат металните делови (држачи на бренирот и електрични спроводници) од корозија при високи температури, го намалуваат влијанието на надворешната температура врз работата на ЖС, ја намалуваат радијацијата на УВ зраци итн.



Слика 5.56 Најчесто користени облици на живините сијалици [94]

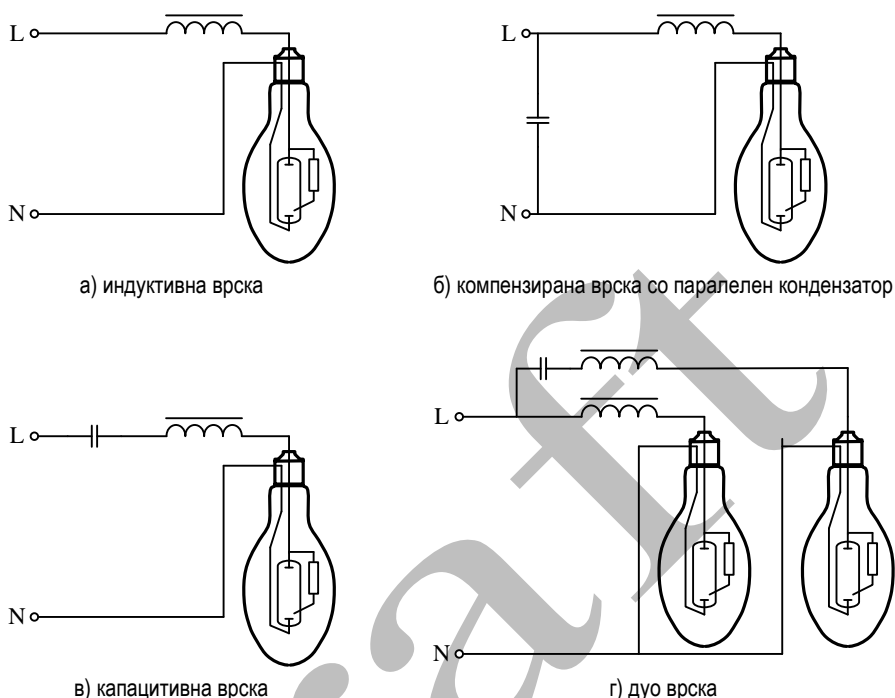
ЖС се произведуваат со два типа приклучни капи: едисонова и бајонет капа. Најчесто, овој вид на сијалици се поврзуваат на електричната мрежа според шемата прикажана на сликата 5.57.а. Придушницата во колото од сликата 5.57.а по конструкција не се разликува од електромагнетните придушници за ФС. Но, за разлика од придушниците за ФС, улогата на оваа придушница е само да ја ограничи струјата во колото на живината сијалица. Факторот на моќност на електричното коло со индуктивна врска (слика 5.57.а) е околу 0,5. Компензацијата е можна со паралелен кондензатор (слика 5.57.б). Капацитивната врска (слика 5.57.в) се користи многу ретко.

Компензацијата на реактивна моќност на две ЖС може да се изведе со дуо врска во којашто, исто како и кај ФСЦ, една од сијалиците е во индуктивна врска, додека другата е во капацитивна врска. Кондензаторите од колата на сликите 5.57.в и 5.57.г треба да бидат димензионирани за поголем напон, во споредба со кондензаторот од колото на сликата 5.57.б. Покрај компензацијата на реактивната моќност, дуо врската служи и за намалување на стробоскопскиот ефект.

Покрај шемите на поврзување на ЖС прикажани на сликата 5.57 постојат и шеми со автотрансформатори коишто, главно, се користат во земјите кадешто напонот на напојната нисконапонска мрежа е околу 120 V. Да забележиме дека за ЖС не постојат ЕКУ.

Процесот на добивање светлина кај ЖС е идентичен како и кај ФС, со таа разлика што ЖС се запалуваат на поинаков начин. Со доведување на мрежен напон на краевите од колото на сликата 5.57.а, напонот помеѓу помошната електрода и главната електрода во нејзината близина е еднаков на мрежниот напон. Под дејство на овој напон помеѓу помошната и главната електрода се јавува електрично празнење во аргонот со што се зголемува концентрацијата на јони во брениот. Под дејство на електричното поле помеѓу главните електроди овие јони се придвижуваат кон главните електроди и како резултат на тоа струјата во сијалицата значително се зголемува. Од тој момент колото во сијалицата е затворено преку главните електроди.

Почетната струја може да биде за околу 90% повисока од номиналната струја на ЖС.



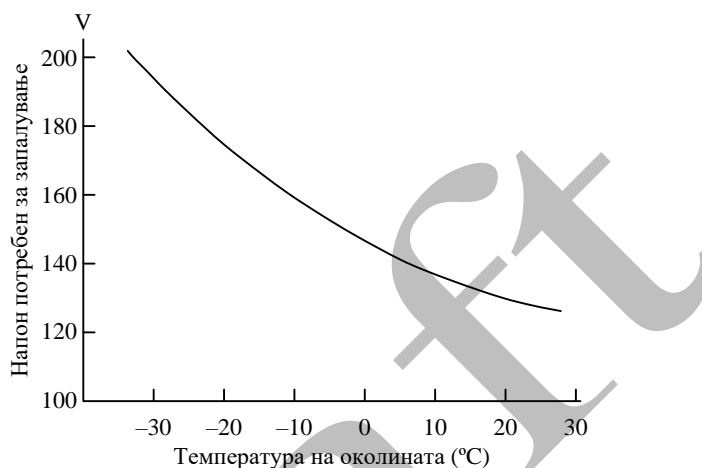
Слика 5.57 Шеми на поврзување на ЖС [84]

Струјата во сијалицата ја зголемува температурата на главните електроди и со тоа се интензивира емисијата на електрони од термоемисиониот слој. Во определен момент на време настанува создавање на електричен лак во инертниот гас помеѓу главните електроди. Во исто време температурата во брениот се зголемува поради што живата постепено испарува, а со тоа започнува и процесот на создавање светлина во кој учествуваат атомите на живата. Во тој момент ЖС работи со релативно мал притисок на живината пара, слично како и ФС. Зрачењето во оваа фаза на запалувањето на ЖС е главно со мали бранови должини и има сина боја. Со зголемувањето на притисокот во брениот спектарот на зрачењето се збогатува со зраци чијашто бранова должина е поголема. Термодинамичкиот еквилибриум на електричниот лак (номинален режим на работа на ЖС) настанува кога живата комплетно ќе испари и при тоа притисокот во брениот, во зависност од моќноста на сијалицата, достигнува вредност од 0,2 до 1,5 МРа, а температурата во брениот е помеѓу 600 и 750 °С.

Обликот на струјата во електричното коло и напонот на сијалицата се скоро идентични со соодветните облици прикажани на сликата 5.40, поради што и THD_i има вредност како и за ФСЦ [82].

Висината на напонот на напојувањето (мрежниот напон) при којшто настанува сигурно палење на ЖС, зависи од температурата на амбиентот. На сликата 5.58 е

прикажана зависноста на потребниот напон за запалување на ЖС од амбиентната температура. Од графикот на сликата 5.58 се гледа дека ЖС предвидена за мрежен напон од 230 V сигурно ќе се запали и на температури од $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, поради што овие сијалици се погодни за осветление на надворешни простори.

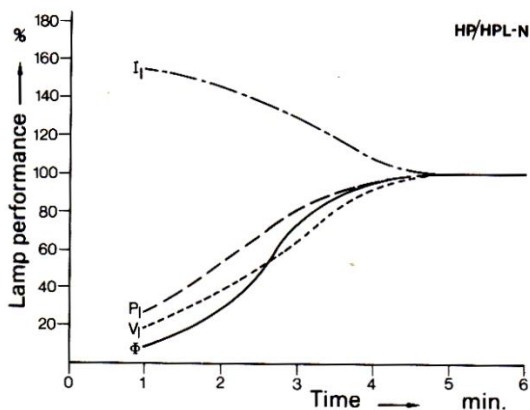


Слика 5.58 Зависност на напонот потребен за запалување на ЖС од амбиентната температура [5]

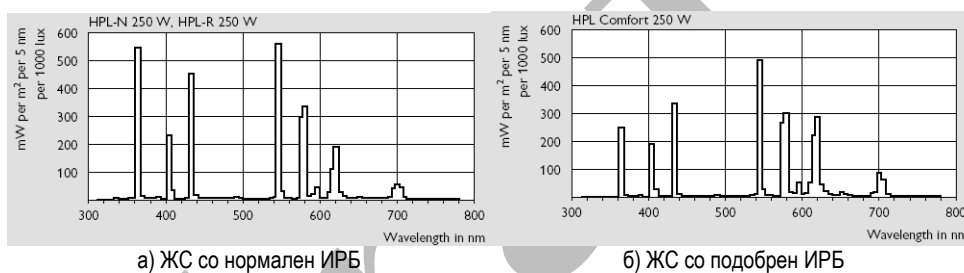
Времето на запалување на ЖС е околу 4 минути, додека номиналниот флукс го достигнуваат по околу 5 минути од приклучувањето на напон (слика 5.59). Ако ЖС што светела се исклучи и веднаш потоа се вклучи на мрежен напон таа не може веднаш да засвети бидејќи при номинален притисок во брнерот потребниот напон за создавање на електричниот лак е од редот на неколку киловолти. За ЖС повторно да се запали е потребно температурата во брнерот да опадне на околу $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Времето на повторно палење на ЖС изнесува околу 3 до 10 минути и зависи од температурата на околината, моќноста на сијалицата и начинот на ладење. Бидејќи кај ЖС не е можно брзо повторно запалување, во системите за осветление со ЖС треба да се предвидат определен број светилки со ВС или ФС коишто, во случај на краткотраен прекин на напојувањето, ќе обезбедат нужно осветление до засветувањето на ЖС.

Сијалиците со елипсоиден балон (слика 5.56.а) се произведуваат за моќности од 50 до 1 000 W, додека рефлекторските сијалици (слика 5.56.б) за моќности од 125 до 1 000 W.

Фотометриските карактеристики на ЖС (ТБ, ИРБ и специфичното производство) зависат од присуството и типот на флуоресцентниот слој. ЖС со флуоресцентен слој се произведуваат главно во две варијанти: со нормален ИРБ и со подобрен ИРБ. На сликата 5.60 се прикажани нормираните спектри на зрачење за ЖС со нормален и подобрен ИРБ.

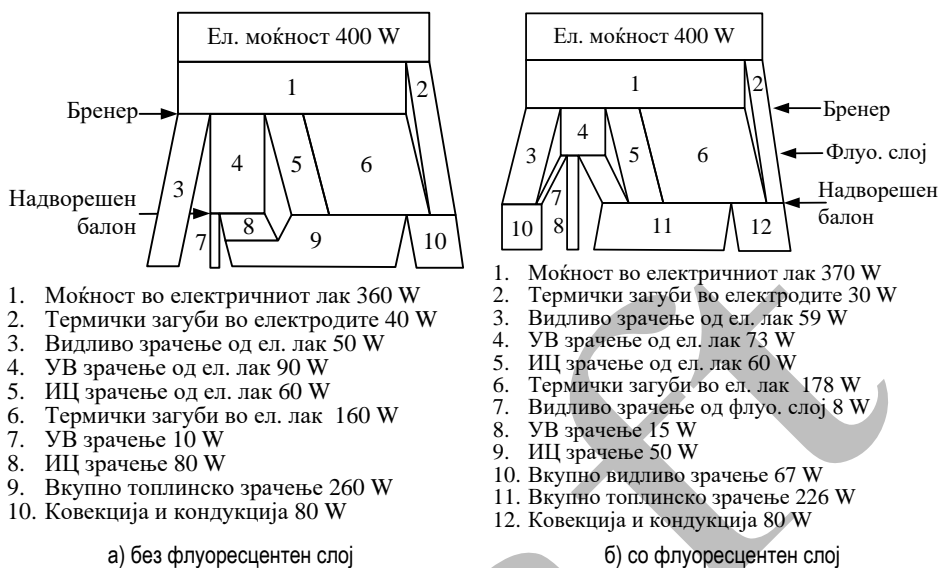


Слика 5.59 Типични погонски големина на ЖС во индуктивна врска во процесот на запалување [84]



Слика 5.60 Типични спектри на светлината на ЖС [108]

На сликата 5.61 се прикажани билансите на моќности за ЖС без флуоресцентен слој и ЖС сијалица со флуоресцентен слој – со нормален ИРБ. Како што може да се забележи од податоците прикажани на сликата 5.61, во електричниот лак во светлина се претвора само 13 до 15% од електричната моќност, додека моќноста израчена во вид на УВ зраци е од 18 до 23%. Во ЖС со флуоресцентен слој дел од УВ зраци, добиени во електричниот лак, се претвораат во видлива светлина, така што моќноста на зрачење во видливиот дел од спектарот достигнува до 17%, т.е. односот на моќноста на зрачењето на светлината од лакот и флуоресцентниот слој е околу 15:2. За споредба, кај ФСЦ овој однос беше 3:22 (слика 5.37). Според тоа, може да се каже дека главната функција на флуоресцентниот слој кај ЖС не е подобрување на специфичното производство на сијалицата туку збогатување на спектарот на светлината со бранови должини од портокаловата и црвената боја, подобрување на ИРБ и намалување на сјајноста на сијалицата. За илустрација, ИРБ за ЖС без флуоресцентен слој е 15, а CCT е 6 000 K [84].



Слика 5.61 Биланси на моќности за ЖС од 400 W [84]

Конструкцијата на ЖС е стандардизирана со соодветни ИЕС стандарди, така што перформансите на ЖС од различни производители малку се разликуваат. Во табелата 5.14 се прикажани номиналните податоци за типични ЖС со елипсоиден балон.

На сликата 5.62 се прикажани кривите на стареење и преживување на ЖС. Животниот век на ЖС не зависи од погонскиот напон, а зависи од бројот на вклучувања. Но, со оглед на тоа што ЖС најчесто работат долго време по нивното вклучување, т.е. имаат релативно мал број вклучувања и исклучувања во текот на работата, бројот на вклучувања практично незначително влијае врз нивната трајност.

Положбата на работа на ЖС е произволна, а температурата на амбиентот нема влијание врз флуксот.

Регулацијата на флуксот на ЖС се изведува со дополнителна придушница, приклучена во колото на сијалицата на начин прикажан на сликите 5.33.а и 5.33.б.

Покрај ЖС предвидени за работа со електромагнетна придушница постојат и ЖС предвидени за директно приклучување на мрежен напон.

Во овој случај, за ограничување на струјата се користи волфрамово влакно поставено во надворешниот балон, коешто воедно произведува светлина на идентичен начин како и кај ВС. Овие ЖС се нарекуваат сијалици за „мешана светлина“ (ЖС/М) и се произведуваат со стаклен балон во вид на елипсоид и со флуоресцентна облога за моќности од 100, 160, 250 и 500 W. Некои од производителите нудат и рефлекторски ЖС/М.

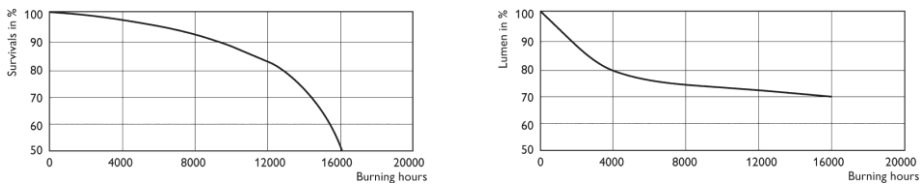
Волфрамовото влакно во ЖС/М е поврзано во серија со брениот. Во моментот на доведување на мрежен напон на приклучоците на сијалицата струјата во сијалицата

е таква што напонот помеѓу главната и помошната електрода е околу 40 V, додека напонот на краевите на волфрамовото влакно е околу 190 V, и е значително повисок од напонот во номинален режим (100 до 145 V). Поради тоа, флуксот што се произведува во волфрамовото влакно може да биде и за околу 30% повисок од номиналниот (слика 5.63.а). Со пораст на температурата во бренирот се зголемува светлинскиот флукс што во него се создава, но се зголемува и напонот на неговите краеве. По околу 2 до 3 минути ЖС/М свети во номинален режим при што околу 2/3 од флуксот се произведуваат во бренирот. Времето на повторно палење на ЖС/М е слично како и кај стандардните ЖС.

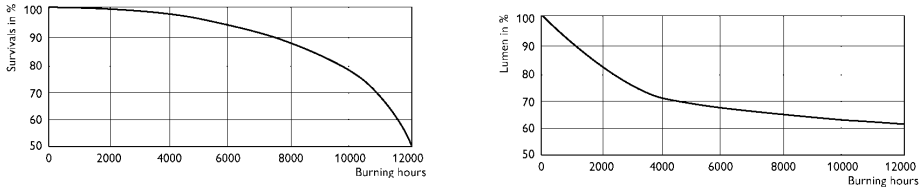
Табела 5.14 Номинални податоци за типични ЖС со елипсоиден балон и флуоресцентна облога [107,108]

$P_{\text{сиј.}} + \Delta P_{\text{кв}}$ W	Флукс lm	ξ lm/W	ССТ K	R_a	Сјајност kcd/m ²
ЖС со подобрен ИРБ					
50 + 9	2 000	33,9			40
80 + 9	4 000	44,9	3 000	47	50
125 + 12	6 700	48,9	до	до	70
250 + 16	14 200	53,4	3 400	58	100
400 + 25	24 200	56,9			105
ЖС со нормален ИРБ					
50 + 9	1 800	30,5			40
80 + 9	3 800	42,7			50
125 + 12	6 300	46,0	3 600	36	70
250 + 16	13 000	48,9	до	до	100
400 + 25	22 000	51,8	4 200	50	105
700 + 35	38 500	52,4			130
1 000 + 45	58 000	55,5			160
ЖС со долг животен век					
50 + 9	2 000	33,9	3 300		
80 + 9	4 000	44,9	до	60	-
125 + 12	6 800	49,6	4 200		

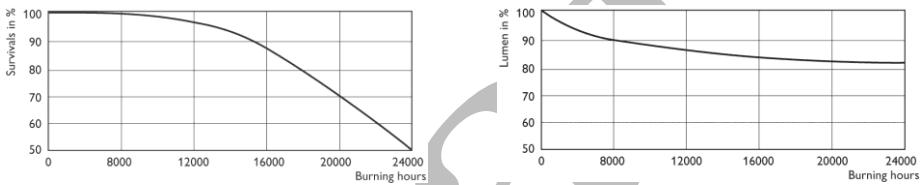
Присуството на волфрамовото влакно кај ЖС/М има позитивно влијание само врз ИРБ којшто, во овој случај, изнесува околу 70. При тоа, ЖС/М имаат нешто пониска ТБ (околу 3 000 до 3 500 K). Спектарот на светлината од ЖС/М е прикажан на сликата 5.63.б. Од друга страна, влакното негативно влијае врз специфичното производство и врз трајноста на ЖС/М (којашто зависи од погонскиот напон слично како и кај СВВ). Специфичното производство на ЖС/М е во границите од 11 до 26 lm/W и во случајот на ЖС/М со номинална моќност 100 W е 11 lm/W, т.е. помало е од специфичното производство на ВС со еднаква номинална моќност (кое изнесува од 13 до 14 lm/W).



ЖС со нормален и подобрен ИРБ (со номинални моќности 50 до 400 W)



ЖС со нормален ИРБ (со номинални моќности 700 и 1 000 W)

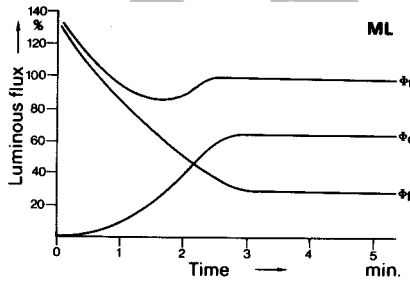


ЖС со долг животен век

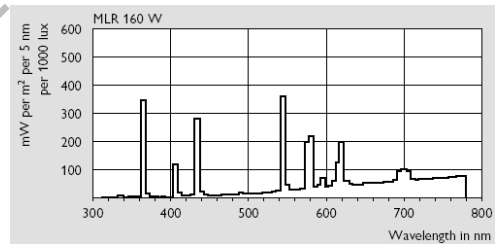
криви на преживување

криви на стареење

Слика 5.62 Криви на преживување и стареење на ЖС [5]



а) временска зависност на флуksот



б) спектрален дијаграм

Слика 5.63 Некои типични карактеристики на ЖС за мешана светлина [5, 108]

(Φ_f – флуks од волфрамовото влакно, Φ_d – флуks од брeнерот, Φ_t – вкупен флуks)

ЖС се користат главно за надворешно осветление и за осветление на индустриски објекти во коишто не е непоходно добро распознавање на боите. Малите димензии на сијалиците, релативно големиот флуks што може да го произведе една сијалица, како и релативно ниските цени на ЖС и соодветните придрушници овозможуваат користење на ефикасни рефлекторски светилки, погодни за осветление на индустриски

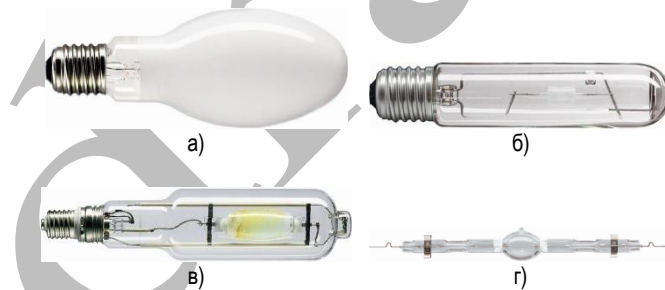
погони каде што светилките треба да се постават на големи растојанија над осветлуваните површини. ЖС/М се главно наменети за замена на ВС. Тука треба да се каже дека ЖС постепено се исфрлуваат од употреба за осветление на надворешни простори и се заменуваат со поефикасни сијалици (натриумови сијалици со висок притисок и метал–халогени сијалици).

5.3.4 Метал–халогени сијалици

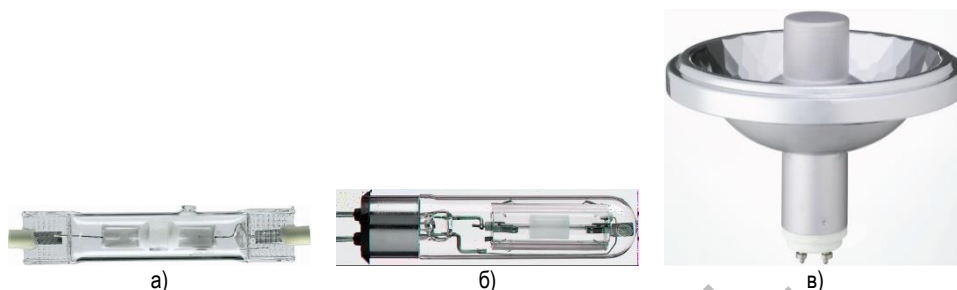
По конструкција, метал–халогените сијалици се многу слични на ЖС. Но, има и разлики. Првата се однесува на процесот на запалување бидејќи брнерот на МХС нема помошна електрода. Втората значајна разлика се однесува на содржината на основното полнење. Во случајот на МХС во основното полнење, покрај жива, има халогениди (најчесто јодици, а во ретки случаи хлориди) на некои метали или ретки земји. Составот на основното полнење има големо влијание врз светлотехничките карактеристики на МХС. Во дополнителното полнење на брнерот се користат аргон и неон, а во поретки случаи и ксенон. Електродите по конструкција се слични на електродите кај ЖС.

На сликите 5.64 и 5.65 се прикажани најчесто користените облици на МХС.

МХС се произведуваат со два стаклени балона, со исклучок на некои МХС во вид на цевка со облик како на сликата 5.64.г. Надворешниот балон може да биде во вид на елипсоид со флуоресцентна облога од внатрешната страна (МХС/Е, прикажана на сликата 5.64.а), во вид на цевка со приклучоци од едниот крај (МХС/Т, прикажани на сликите 5.64.б и 5.64.в) или со приклучоци од двата краја (МХС/Ц, прикажана на сликата 5.64.г).



Слика 5.64 Најчести облици на метал–халогените сијалици со поголеми номинални моќности (сијалиците не се прикажани во вистинските пропорции)



Слика 5.65 Најчести облици на метал-халогените сијалици со помали номинални моќности (сијалиците не се прикажани во вистинските пропорции)

МХС изработени со еден стаклен балон не смеат да се користат во отворени светилки (т.е. во светилки без заштитно стакло).

Според димензиите, конструктивните карактеристики и номиналните моќности МХС можат да се групираат во две групи.

Во првата група се МХС со номинални моќности од 250 и 400 W (слики 5.64.а и 5.64.б) и од 1 000 W до 3 500 W (слики 5.64.в и 5.64.г). МХС со номинална моќност од 1 000 W или поголема се произведуваат во верзии за номинален напон од 230 V или 400 V, а другите само за номинален напон од 230 V.

Во втората група се МХС со мали номинални моќности (35 до 150 W) и релативно мали димензии (со стаклени балони во облиците прикажани на сликата 5.65) поради што некои од нив се нарекувани и *компактни* МХС (КМХС). Комерцијалното производство на КМХС е присутно од последната деценија на XX век. Димензиите и облиците на балоните на КМХС овозможуваат примена и во случаите во кои досега се користеле само ХС.

Бренерот на МХС е изработен од кварцно стакло и во нормален режим на работа неговата температура изнесува околу 950 °C.

Бренерот на КМХС се изработува од керамичко стакло (PCA – Poly Crystalline Alumina). Работната температура на керамичкиот брениер е околу 1 150 °C и како резултат на тоа КМХС со моќности од 35 до 150 W можат да го достигнат специфичното производство на МХС што имаат кварцен брениер и десет пати поголеми номинални моќности. Покрај тоа, повисоката температура овозможува и поголем индекс на репродукција на бојата.

Положбата на работа на МХС зависи од нивната конструкција но, по правило, сијалиците во вид цевка со приклучок од двата краја имаат определени ограничувања во поглед на положбата на работа, коишто ги пропишуваат производителите.

Начинот на поврзување на МХС на електричната мрежа се разликува од ЖС поради тоа што запалувањето на сијалиците се врши со игнитор. Игниторот создава напонски импулс потребен за запалување на сијалицата, а големината на напонскиот импулс може да биде од 0,5 до 5 kV. Кај некои МХС игниторот е вграден во самата сијалица.

На сликата 5.31 се прикажани четири типични шеми на врзување на МХС со екстерен игнитор. Да забележиме дека шемата на врзување зависи од типот на МХС и е потребно да се следат упатствата на производителите за соодветната шема на врзување на конкретниот тип на сијалица. Тука треба да се нагласи дека шемата од сликата 5.31.г може да се користи само за некои МХС/Ц.

МХС со вграден игнитор се предвидени за поврзување преку придушница наменета за ЖС според шемите прикажани на сликите 5.57.а или 5.57.б. Кај МХС за коишто е потребен екстерен игнитор треба да се води сметка за должината на спроводниците од игниторот до сијалицата, со цел да не се дозволи слабеење на напонскиот импулс, поради паразитните капацитивности на спроводниците (видете оддел 5.3.1).

За некои МХС се предвидува работа преку соодветни ЕКУ со фреквенција повисока од мрежната.

Стробоскопскиот ефект кај МХС се намалува со поврзување на сијалиците на различни фази од трифазниот систем или со употреба на ЕКУ.

Факторот на моќност на електричното коло е околу 0,5 до 0,6 индуктивен, а за компензација се користи паралелен кондензатор. Вкупната хармоничка дисторзија на струјата е слична како и кај ЖС и се движи до 20% (според IEEE).

Процесот на запалување на МХС се состои од три фази. Во првата фаза, со помош на напонскиот импулс од игниторот, во гасовите од помошното полнење се создава слабо интензивно празнење. Набргу потоа настапува втората фаза во која се јавува „студено“ слабо интензивно празнење од електродите. Во втората фаза настанува интензивно загревање на електродите коишто емитуираат доволен број слободни електрони за во третата фаза да настане интензивно празнење и создавање на електричен лак помеѓу електродите.

Времето на палење на МХС изнесува околу три минути, додека времето на повторно палење е 5 до 20 минути. Во случаите кога е потребно брзо повторно палење се користат специјални игнители коишто се поврзуваат како на сликата 5.31.г, а коишто се предвидени да создадат напонски импулс од 30 до 60 kV. Тука треба да се нагласи дека брзото повторно запалување на МХС е можно само за некои сијалици со приклучок од двата краја.

Во јадрото (центарот) на електричниот лак температурите можат да достигнат вредности од 4 000 до 6 000 K. Во таквите услови молекулите на јодидите се разложуваат, при што само атомите на металите учествуваат во процесот на создавање на светлина – по пат на фотолуминисценција. Кога атомите на металите и халогените елементи ќе се најдат во зоните на бренирот со пониска температура тие повторно се соединуваат во халогенид (процес сличен на регенеративниот процес кај халогените сијалици). Како резултат на тоа, металите (во елементарна состојба) не доаѓаат во допир со кварцното стакло и поради тоа не стапуваат во хемиска реакција со стаклото.

Светлотехничките карактеристики на МХС (ТБ, ИРБ, фактор на стареење и др.) зависат од составот на основното полнење на сијалицата. Во зависност од составот на основното полнење разликуваме четири групи МХС: МХС со дволиниски спектар,

МХС со трилиниски (МХС/3) и мултилиниски спектар (МХС/М) и МХС со молекуларен радијатор [84]. МХС со трилиниски и мултилиниски спектри на зрачење се најчесто користени типови.

МХС со дволиниски спектар во основното полнење содржат халогениди на натриум и скандиум (Na/Sc) и, во споредба со МХС/3 имаат помало специфично производство и помал коефициент на стареење, па поради тоа постепено се напушта нивното производство во полза на МХС/3.

Во основното полнење на МХС/3 најчесто постојат халогениди на индиум, талиум и натриум (In/Tl/Na) и нивната ТБ е од околу 4 000 до 4 500 К, а ИРБ помеѓу 60 и 70.

Основното полнење на МХС/М може да ги содржи следните комбинации на јодидите на: диспрозиум, холмиум и тулиум (Dy/Ho/Tm), талиум и натриум (Tl/Na), диспрозиум, талиум и натриум (Dy/Tl/Na) или калај, натриум и талиум (Sn/Na/Tl).

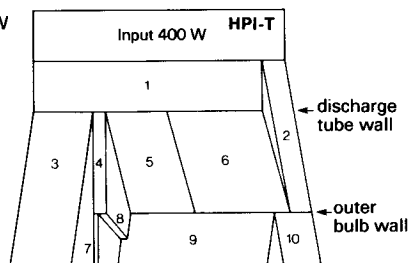
По правило, МХС/М имаат значително повисок ИРБ (75 до 95) отколку МХС/3, а нивната ТБ е во границите од 4 200 до 6 000 К.

МХС со керамички брениер се произведуваат и во варијанти на топли бои (околу 3 000 К).

На сликата 5.66 е прикажан билансот на моќности на МХС/Т од 400 W со трилиниски спектар. Ако се споредат податоците прикажани на сликите 5.61 и 5.66 се заклучува дека кај МХС значителен дел од моќноста на зрачење (околу 25%) е во видливиот дел од спектарот на оптичко зрачење, во споредба со ЖС без флуоресцентен слој каде што тој процент е скоро двојно помал. УВ зраци кај МХС учествуваат само со 15 W (~4%), во споредба со околу 90 W зрачење во доменот на УВ зраци кај ЖС. Токму поради тоа, МХС се произведуваат со флуоресцентна облога на внатрешноста од надворешниот балон само во случаите кога балонот е елипсоиден. Овој флуоресцентен слој има улога само да ја намали сјајноста на сијалицата и да овозможи компатибилност на МХС/Е со оптичките системи на светилките предвидени за ЖС со исти димензии на балонот.

Fig. 1.65 Energy balance of a typical 400 W clear-glass three-band metal halide lamp.

1. Power in discharge column - 364 W
2. Thermal losses at electrodes - 36 W
3. Visible radiation - 97 W
4. UV radiation from discharge - 15 W
5. IR radiation from discharge - 98 W
6. Thermal losses in discharge column - 154 W
7. UV radiation - 5 W
8. IR radiation - 10 W
9. Total IR radiation - 237 W
10. Convection and conduction - 61 W.



Слика 5.66 Биланс на моќности за МХС/Т од 400 W со трилиниски спектар [84]

Специфичното производство на МХС е значително поголемо отколку кај ЖС. Во табелите 5.15 и 5.16 се прикажани номиналните податоци за МХС.

Специфичното производство на КМХС се движи во границите од 65 lm/W до 86 lm/W, додека специфичното производство на МХС со поголеми моќности е во

границите од 69 до 104 lm/W. Загубите на моќност во КУ зависат од номиналната моќност на сијалицата и се движат од околу 4% за сијалиците со најголеми моќности до околу 20% за сијалиците со многу мали моќности. Да забележиме дека, за разлика од ФС, ЕКУ наменети за МХС не придонесуваат за значителни смалувања на загубите во комплетот составен од сијалица и КУ.

МХС од табелата 5.15 (без вграден игнитор) се поврзуваат преку придушници наменети за МХС и ЖС (најчесто според шемата од сликата 5.31.а, со паралелен игнитор). Покрај тоа, сијалиците со номинална моќност од 250 и 400 W можат да се поврзат и според шемата од сликата 5.31.б (со семи-паралелен игнитор) при што се користат придушници предвидени за НСВП со соодветна номинална моќност. Во овој случај струјата низ МХС е поголема, а како резултат на тоа повисоки ќе бидат моќноста на сијалицата и загубите на моќност во придушницата, флуksот и работната температура, додека ТБ е пониска. Поради повисоката работна температура на МХС, оваа врска се препорачува само во случаите кога светилката и опремата вградена во неа се конструирани да можат да ја издржат повишената температура на сијалицата.

Како што може да се види од податоците презентирани во табелите 5.15 и 5.16, од аспект на нивните светлотехнички карактеристики, МХС се произведуваат во голем број варијанти.

Табела 5.15 Номинални податоци за МХС со номинални моќности поголеми од 150 W [85,108]

Номинална моќност W	$P_{\text{сиј.}} + \Delta P_{\text{КУ}}$ W	Флуks klm	ξ lm/W	ССТ K	R_a
МХС/Е со Na/Sc					
400	390 + 20	30,0	73,1	4 700	69
МХС/Е со трилиниски спектар					
250	256 + 18	19,0	69,3	4 300	69
250 ⁸²	302 + 18	25,5	79,7	3 800	69
400	400 + 20	35,0	83,3	4 300	69
400 ⁸²	454 + 20	42,5	89,7	3 800	69
МХС/Т со трилиниски спектар					
250	250 + 18	19,0	70,9	4 500	65
250 ⁸²	295 + 23	23,0	72,3	4 000	65
400	390 + 20	35,0	85,4	4 300	65
400 ⁸²	445 + 29	38,0	80,2	4 000	65
1 000	985 + 56	85,0	81,6	4 300	65
2 000	1 960 + 75	189,0	92,9	4 600	65
2 000 ⁸³	1 930 + 74	200,0	99,8	4 200	65
МХС/Ц со мултилиниски спектар					
1 000	1 040 + 65	90,0	81,4	5 600	90
		100,0	90,5	4 200	80
2 000 ⁸³	2 040 + 82	190,0	89,5	5 600	90
		220,0	103,7	4 200	80
1 800	1 800 + 75	155,0	82,7	5 600	90
1 800 ⁸³	1 850 + 76	160,0	83,1		90
2 000 ⁸³	2 040 + 76	180,0	85,1	5 600	90
		200,0	94,5		80
3 500 ⁸³	3 650	320,0	87,7	6 000	90

⁸² Работа со придушница наменета за натриумови сијалици за висок притисок и семи-паралелен игнитор според шемата од сликата 5.31.б. Останатите сијалици се поврзуваат преку придушници наменети за МХС и ЖС.

⁸³ Номинален напон 400 V.

Табела 5.16 Номинални податоци за КМХС и МХС со номинални моќности до 150 W [85,108]

Номинална моќност W	$P_{\text{сиј.}} + \Delta P_{\text{КУ}}$ W	Флукс klm	ξ lm/W	ССТ К	R_a
МХС ⁸⁴ елипсоиден / провиден балон					
70	72 + 12,8	5,90 / 6,30	70 / 74	3 000	83
150	147 + 16,3	13,00 / 13,50	80 / 83	3 000	85
КМХС/Ц со Dy/Ho/Tm (MHN-TD Pro) ⁸⁵					
70	75 + 12,8	6,20 / 5,70	71 / 65	3 000 / 4 200	75 / 80
150	150 + 16,3	13,80 / 12,90	83 / 78	3 000 / 4 200	75 / 80
250	252 + 23	20,00	72	3 000 / 4 200	85
КМХС/Ц (CDM-T и CDM-TC)					
35	38 + 7,6	3,30	72	3 000	81
70	83,8 / 84,8	6,60	79 / 78	3 000 / 4 200	83 / 96
150	161,3 / 163,3	14,00	86 / 80	3 000 / 4 200	85 / 96
КМХС/Ц (CDM-TD)					
70	71 + 12,8	6,50 / 6,00	78 / 72	3 000 / 4 200	82 / 92
150	161,3 / 165,3	13,25 / 14,20	82 / 86	3 000 / 4 200	88 / 96
КМХС/Ц (CDM-TP)					
70	71 + 12,8	6,10 / 5,80	73 / 69	3 000 / 4 200	82 / 92
150	161,3 / 163,3	13,0 / 12,00	81 / 73	3 000 / 4 200	88 / 96

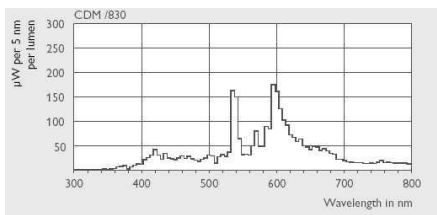
На сликата 5.67 се прикажани спектралните состави на светлината за некои МХС.

Еден од најголемите недостатоци на МХС е непостојаноста на ТБ во текот на експлоатацијата, како и нееднаквоста на ТБ на различни примероци сијалици од ист тип. Отстапувањата на ТБ од номиналната вредност во текот на експлоатацијата можат да достигнат и неколку стотини келвини. Овие варијации на ТБ не претставуваат посебен проблем во системите за надворешно осветление или за осветление на индустриски објекти. Но, во останатите случаи, а особено во системите наменети за телевизиски снимања, промените на ТБ се непожелни и поради тоа многу МХС треба да бидат заменети иако тие не се прегорени или пак достигнатиот коефициент на стареење не е многу мал.

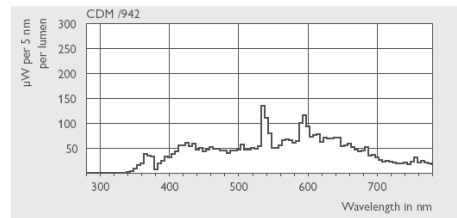
Керамичкиот брениер кај КМХС, во споредба со кварцните брениери кај останатите МХС, овозможува значително намалување на промените на ТБ во текот на експлоатацијата. Покрај тоа, промените на ТБ може да се намалат со користење на соодветни ЕКУ, при што варијациите на ТБ на крајот од животниот век на МХС се во границите од ± 50 К.

⁸⁴ За директна замена на НСВП со соодветна номинална моќност.

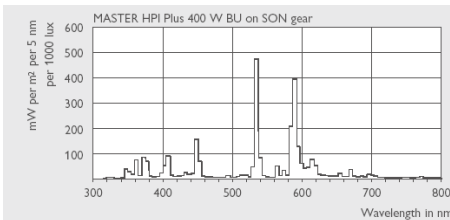
⁸⁵ Во заградите се комерцијалните ознаки на сијалиците.



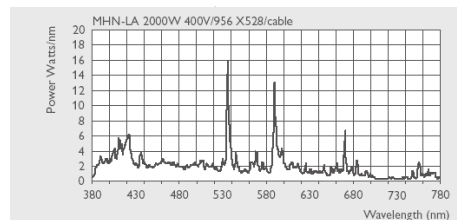
а) КМХС/Ц/830 со мултилиниски спектар



б) КМХС/Ц/942 со мултилиниски спектар



в) МХС/Е/643 со трилиниски спектар



г) МХС/Ц/956 со мултилиниски спектар

Слика 5.67 Спектрален состав на светлината на некои МХС [108]

Врз варијациите на ТБ на МХС влијаат и промените на погонскиот напон. Поради тоа, за најголем број МХС не се препорачува работа при погонски напони што се разликуваат од номиналниот за повеќе од 10%, а не се ретки случаите кога производителите за некои типови МХС препорачуваат и помали отстапувања на погонскиот напон.

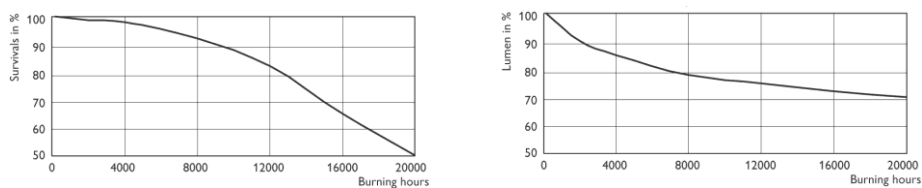
Флуksот на МХС е линеарно зависен од погонскиот напон. На пример, ако отстапувањата на погонскиот напон изнесуваат $\pm 5\%$ од номиналниот напон, флуksот на МХС/Т и МХС/Ц ќе се разликува од номиналниот за $\pm 20\%$, додека за МХС/Е тоа отстапување е помалку изразено и се движи во границите од $\pm 10\%$. За овој податок треба да се води сметка особено во случаите кога инсталационите спроводници или кабли за напојување на светилките со МХС се многу долги.

Трајноста на МХС зависи од нивната конструкција. МХС со поголеми моќности имаат трајност од 10 000 до 18 000 часови, додека трајноста на КМХС е околу 6 000 до 8 000 часови. На крајот од животниот век на МХС нивниот флуks ќе опадне за околу 50%. На сликата 5.68 се прикажани кривите на преживување и стареење на МХС/Е (слика 5.64.а) и МХС/Т (слики 5.64.б и 5.64.в). МХС/Ц со облици слични како прикажаниот на сликата 5.64.г имаат покус животен век. Кривите на преживување за некои МХС/Ц, главно наменети за осветление на спортски објекти, се прикажани на сликата 5.69.

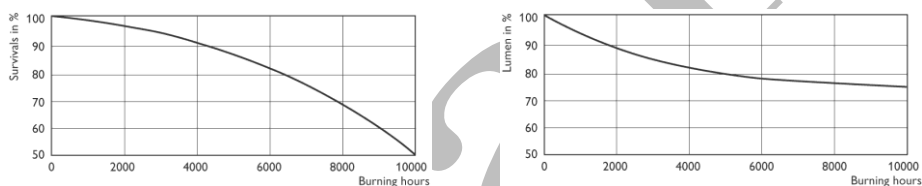
Тука треба да забележиме дека во пракса, поради релативно малиот флуks при крајот на животниот век на МХС/Ц, но и поради големите отстапувања што се јавуваат во ТБ, МХС/Ц се заменуваат пред истите да прегорат. Кај сите СПГ, а со тоа и кај МХС, трајноста зависи од бројот на вклучувања и периодот на работа на сијалиците

по секое вклучување. Но, поради долгото време на повторно палење, МХС и не се користат во случаите кога времето на работа после секое вклучување е кусо.

Регулацијата на флуксот (работа на МХС со намалена моќност) за најголем број МХС не е можна или не се практикува поради големите отстапувања на ТБ и ИРБ од номиналните вредности (слика 5.70). Од дијаграмите прикажани на сликата 5.70 се гледа дека кај МХС со флуоресцентна облога ТБ и ИРБ помалку зависат од моќноста со која работи сијалицата. Но, кај некои специјални МХС, главно наменети за сценско осветление, е можна регулација на флуксот без значително отстапување на ИРБ од номиналниот.



МХС/Е и МХС/Т со номинална моќност до 400 W

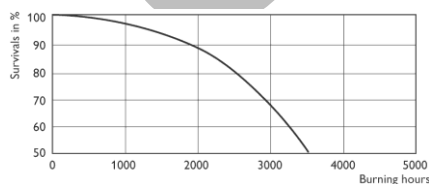
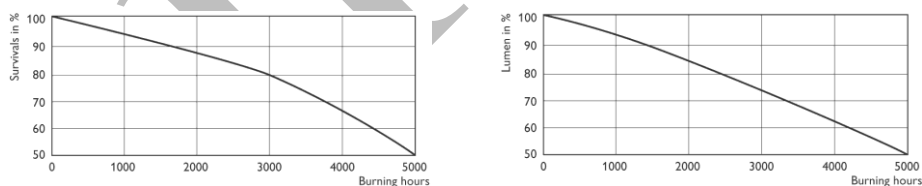


МХС/Т со номинална моќност 1 000 и 2 000 W

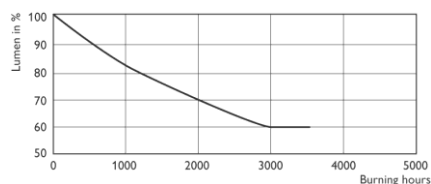
а) криви на преживување

б) криви на стареење

Слика 5.68 Типични криви на преживување и стареење на некои МХС со големи моќности [108]

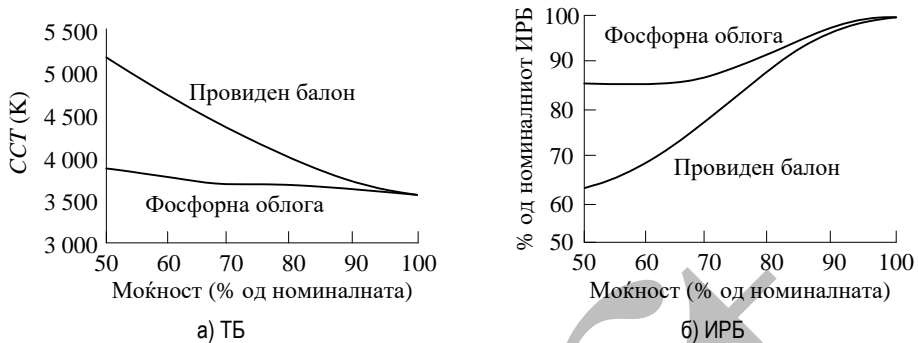


а) криви на преживување



б) криви на стареење

Слика 5.69 Типични криви на преживување и стареење на некои МХС/Ц со големи моќности [108]



Слика 5.70 ТБ и ИРБ во зависност од моќноста со која работи МХС [6]

Како што претходно беше кажано, ЕКУ се користат за поновите модели на МХС со помали моќности, а овозможуваат низа предности во однос на ККУ, меѓу коишто најзначајни се:

- продолжен животен век и до 50%;
- намалување на варијациите на температурата на бојата во текот на експлоатацијата;
- елиминација на стробоскопскиот ефект;
- брзо повторно палење (само за определени типови МХС);
- намалување на загубите на моќност во КУ до 20%.

Сјајноста на МХС зависи од конструкцијата на сијалицата (должината на лакот) и нејзината номинална моќност и може да достигне и преку $8\,000\text{ cd/cm}^2$ за МХС со многу големи моќности и/или за МХС со многу мала должина на лакот. Високите вредности на сјајноста на сијалиците наметнуваат употреба на светилки со сложени оптички системи, но од друга страна, МХС со голема сјајност, по правило, имаат и многу мали димензии на лакот што овозможува ефикасноста на овие оптички системи да биде релативно висока. Малите димензии на лакот кај МХС ги чинат многу погодни за користење во системите за дистрибуција на светлината со помош на светловоди или оптички влакна.

Примената на МХС е многукратна. Особено по појавата на КМХС и МХС со керамички брениер, кои во голем број случаи се јавуваат како алтернатива на ХС. Широкиот спектар на температури на боја, релативно големото специфично производство и способноста за добра или одлична репродукција на бојата (видете слика 5.9) се најважните карактеристики коишто придонеле МХС да се користат во сите случаи кога овие фактори се одлучувачки за квалитетен систем за електрично осветление. МХС за општа намена се користат за осветление на спортски игралишта во отворени и затворени простори, надворешно осветление на сообраќајници и објекти, внатрешно осветление на индустриски објекти, сценско осветление и др. МХС со мали моќности и пониски ТБ сè почесто се користат наместо ХС за декоративно осветление на излози во трговски објекти, осветление на административни простории

и сл. Покрај за осветление на простори МХС се користат и во голем број проекциски уреди и постепено ги заменуваат ХС.

Во групата на МХС за специјални намени може да се вбројат и таканаречените *ксенонски сијалици* (КС). КС веќе подолго време се користат за фото и телевизиски снимања, фото опрема, презентациона опрема, системи со оптички влакна, а во поново време, и во автомобилските фарови. Присуството на ксенонот во дополнителното полнење во бренирот овозможува брзо засветување на овие сијалици, а соодветната содржина на основното полнење овозможува висок ИРБ ($R_a > 90$). Електричниот лак кај овие сијалици има многу мала должина и површина така што тие се многу погодни за работа во оптички системи со многу мали димензии со што се обезбедува прецизно насочување на светлината. КС и сличните МХС за специјални намени имаат значително покус животен век (но сепак подолг отколку специјалните ХС) и помало специфично производство во споредба со МХС за општа намена. Претходните недостатоци на КС, како и нивната висока цена, засега, дозволуваат примена во автомобилските фарови на автомобилите од највисоките класи, но се очекува во иднина тие да имаат многу позначајна примена.

5.3.5 Натриумови сијалици со висок притисок

Натриумовите сијалици со висок притисок, слично како и МХС, се резултат на развојот на ЖС и поради тоа тие по својата конструкција малку се разликуваат од МХС. Разликите се однесуваат на: содржината на основното полнење (кај НСВП се користи легура на жива и натриум), содржината на дополнителното полнење (ксенон наместо аргон) и материјалот од којшто е изработен бренирот. Со оглед на големата хемиска агресивност на натриумот, бренирот на НСВП се изработува од керамичко стакло.

Првите НСВП се појавиле во шестата деценија од XX век, а нивното комерцијално производство започнало десетина години подоцна.

Надворешниот балон може да биде во облик на: елипсоид со флуоресцентна облога од внатрешната страна (слика 5.64.а), провиден балон во вид на цевка со приклучок од едната страна (слики 5.64.б и 5.64.в) или со приклучок од двете страни (слика 5.64.г) или, поретко, во облик на конусен рефлектор (слика 5.65.в). НСВП со балон во вид на елипсоид (НСВП/Е) и со рефлекторски балон имаат еднакви димензии со соодветните ЖС за истата номинална моќност. НСВП се произведуваат за моќности од 35 до 1 000 W.

НСВП се поврзуваат на електричната мрежа на сличен начин како и МХС, при што се користат шемите прикажани на сликите 5.31.а, 5.31.б и 5.31.в. Игниторот ја има истата функција како и кај МХС, и за запалување на сијалицата создава напонски импулс во границите од 1,8 до 5 kV. Во многу случаи, кај НСВП се користат истите игнители како и за МХС. Сите забелешки во врска со дозволените должини на спроводниците од игниторот до сијалицата што беа наведени за МХС важат и за НСВП.

НСВП со помали моќности можат да имаат вграден игнитор (или биметален стартер) во балонот, така што за нивно поврзување не е потребен надворешен игнитор.

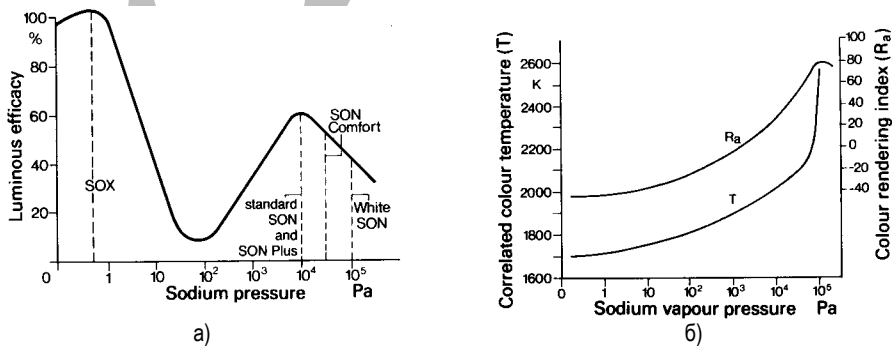
Слично како и за МХС, за НСВП постојат и ЕКУ коишто, главно, се користат за некои сијалици со помали номинални моќности (до 150 W). Овие ЕКУ ги имаат функциите на ККУ и игниторот, а во некои случаи може да овозможат и брзо повторно запалување.

Покрај „стандардните“ НСВП, производителите нудат и таканаречени *заменски* НСВП со моќности од 110, 220 (210) и 350 W коишто имаат исти димензии како и ЖС со номинални моќности од 125, 250 и 400 W, соодветно. Заменските НСВП се со вграден уред за стартување којшто ја има улогата на игниторот, а се предвидени за работа со електромагнетните придушници наменети за соодветните ЖС. Иако заменските НСВП имаат значително поголемо специфично производство од соодветните ЖС, тие не се препорачуваат за нови инсталации туку само за замена на ЖС во постојните системи за осветление (главно за надворешно осветление). Заменските НСВП не се предвидени за работа во капацитивна врска на колото од сликата 5.57.в поради тоа што понискиот напон што се јавува на сијалицата може да доведе до нејзино гаснење [84].

Процесот на запалување на НСВП е сличен на процесот кај МХС. Најнапред електричното празнење се воспоставува во ксенонот, а набргу потоа процесот на празнење се воспоставува и во живината пара, којашто ја има и пред натриумот да испари. Во номиналниот режим процентот на светлината добиен од зрачењето на живата и ксенонот е занемарлив. Да забележиме дека во последните неколку години производителите на сијалици нудат и НСВП без жива со цел да се намали загадувањето на човековата околина од отпадните материјали од прегорените сијалици.

Времето на палење за НСВП е околу четири минути, додека времето на повторно палење е покус и, за сијалиците предвидени за работа со екстерен игнитор, може да изнесува и една минута. За НСВП не се практикува брзо повторно запалување, со исклучок на НСВП приклучени на ЕКУ.

Врз светлотехничките карактеристики на НСВП најголемо влијание имаат температурата и притисокот во брнерот. На сликите 5.71.а и 5.71.б се прикажани специфичното производство, корелираната температура на бојата и индексот на репродукција на бојата – во зависност од притисокот на натриумовата пара во натриумовите сијалици.



Слика 5.71 Некои карактеристики на натриумовите сијалици [108]

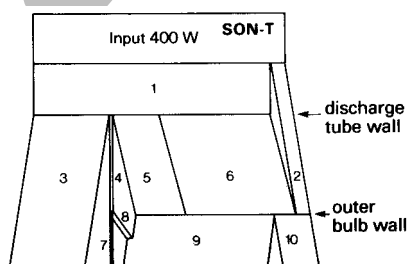
Според дијаграмите од сликата 5.71.6 произлегува дека *ССТ* на НСВП (со притисок на натриумовата пара во интервалот од 10^4 и 10^5 Pa) може да биде во границите од околу 1 950 до 2 500 K, а ИРБ може да биде во границите од 20 до 85. Од дијаграмот на сликата 5.71.а се гледа дека најголемото специфично производство на НСВП се јавува за притисок во бренирот од околу 10^4 Pa и тоа е за околу 40% помало од најголемото специфично производство што може да се оствари во натриумова пара под притисок од околу 0,7 Pa, што одговара на работниот притисок во натриумовите сијалици со низок притисок (видете потпоглавје 5.3.6).

Во зависност од работниот притисок во бренирот, постојат неколку варијанти НСВП: стандардни НСВП (НСВП/С), НСВП со подобрена ТБ и ИРБ (НСВП/ПБ) и НСВП за „бела светлина“ (НСВП/БС). Типичните вредности на притисокот во бренирот за овие три варијанти на НСВП се прикажани на сликата 5.71.а. Покрај претходно наведените варијанти на НСВП, постојат и НСВП со подобро специфично производство (НСВП/ПЕ) чиишто ТБ и ИРБ се исти како и кај НСВП/С. Поголемото специфично производство се постигнува со зголемен притисок на ксенонот во бренирот. Со оглед на тоа што при повисок притисок на ксенонот процесот на запалување на сијалиците е потежок, во стаклениот балон на НСВП/ПЕ се поставуваат дополнителни уреди (најчесто во облик на антени) коишто го помагаат процесот на запалување на сијалиците.

На сликата 5.72 е прикажан билансот на моќности за НСВП/С од 400 W со провиден балон во вид на цевка. Како што може да се забележи од податоците прикажани на сликата 5.72, процентот на зрачење во видливиот дел од спектарот изнесува повеќе од 25% од ангажираната моќност, а зрачењето во доменот на УВ зраци е занемарливо.

Fig. 1.80 Energy balance of the 400 W high-pressure sodium lamp.

1. Power in discharge column - 376 W
2. Thermal losses at electrodes - 24 W
3. Visible radiation - 118 W
4. UV radiation from discharge - 2 W
5. IR radiation from discharge - 80 W
6. Thermal losses in discharge column - 176 W
7. UV radiation - 1 W
8. IR radiation - 1 W
9. Total IR radiation - 221 W
10. Convection and conduction - 60 W.



Слика 5.72 Биланс на моќности за НСВП/С од 400 W со провиден балон во вид на цевка [108]

Во табелата 5.17 се прикажани типичните светлотехнички карактеристики на НСВП за општа намена. Врз основа на податоците презентирани во табелата 5.17 може да се заклучи дека НСВП се многу ефикасни извори на светлина, но треба да се има предвид дека големото специфично производство на НСВП е карактеристично за сијалиците со големи номинални моќности, додека сијалиците со мали номинални моќности имаат специфично производство дури и помало од ФС/Ц.

Табела 5.17 Светлотехнички карактеристики за типични НСВП за општа намена [94, 108]

Тип	Облик на балон	Моќност W	Загуби во КУ W	ξ_{lm}^{86} lm/W	ССТ К	R_a
НСВП/С	Елипсоиден	50 до 1 000	12 до 75	56 до 121		
	Провидна цевка	70 до 1 000	13 до 75	72 до 121		
Заменски	Елипсоиден	110 до 350	15 до 35	64 до 88	2 000	20 до 25
НСВП/ПЕ	Елипсоиден	35 до 400	10 до 50	49 до 120		
	Провидна цевка	50 до 600	16 до 45	67 до 140		
НСВП/ПБ	Елипсоиден	150 до 400	25 до 50	71 до 82	2 200	65
	Провидна цевка			74 до 84		
НСВП/ПБ ⁸⁷	Елипсоиден	50 и 80	13 и 10	57 и 63	2 800	40 до 59
	Провидна цевка			60 и 67		
НСВП/БС ⁸⁸	Провидна цевка	35 до 100	10 до 15	29 до 42	2 500	83

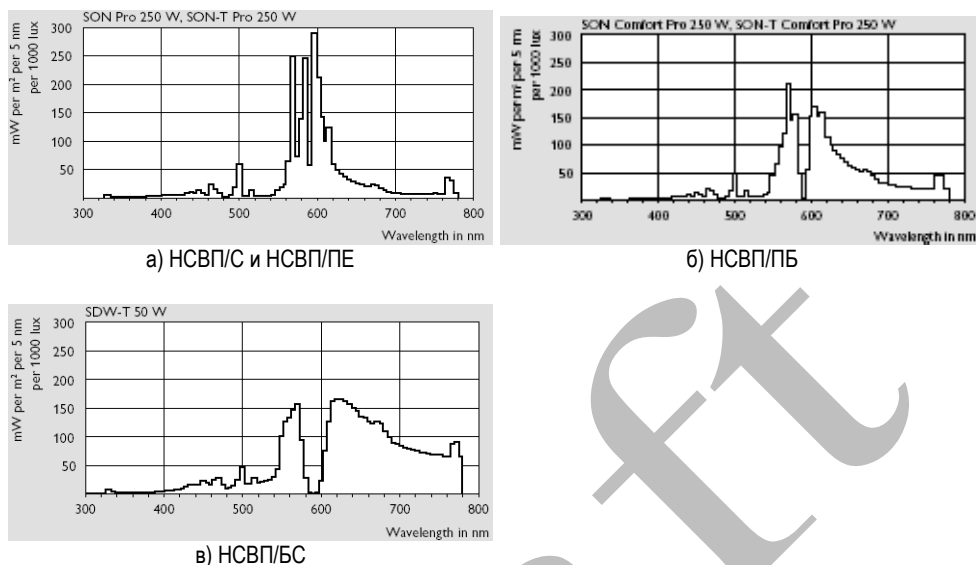
Сјајноста на НСВП зависи од обликот на балонот. Средната сјајност на НСВП со елипсоиден балон и флуоресцентна облога за номиналните моќности наведени во табелата 5.17 е 40 до 300 cd/cm², додека сјајноста на НСВП со провиден балон во вид на цевка е 2 500 до 7 000 cd/cm² [94]. И во двата случаја помалите сјајности се однесуваат на сијалиците со помали моќности.

Спектралниот состав на светлината на НСВП се карактеризира со многу мало зрачење со бранова должина од 589,6 nm. Имено, за притисоци на натриумовата параа помали од 1 Pa најголем дел од зрачењето е со бранова должина од 589,6 nm. Со зголемување на притисокот на пареата настанува самоапсорпција на светлината со оваа бранова должина, а вишокот на апсорбираната енергија натриумовите атоми ја емитуваат во вид на светлина со поширок спектар (слика 5.73). Како резултат на тоа, се зголемува ИРБ и ТБ, а се намалува специфичното производство во однос на случајот кога светлината би се добивала од натриумова параа под низок притисок.

⁸⁶ Со вклучени загуби во КУ.

⁸⁷ OSRAM Citylight® DS®. Според ТБ овие сијалици можат да се вбројат во групата на НСВП/БС. Но, овде се вклучени во категоријата НСВП/ПБ според ИРБ и специфичното производство. Предвидени се за работа со соодветни ЕКУ коишто овозможуваат намалување на флуксот на 50% од номиналниот.

⁸⁸ Philips CDW-T. Овие сијалици се предвидени за работа со ККУ и дополнителен електронски уред што овозможува стабилизација на напонот и напонски импулс за запалување. Загубите во КУ се проценети.

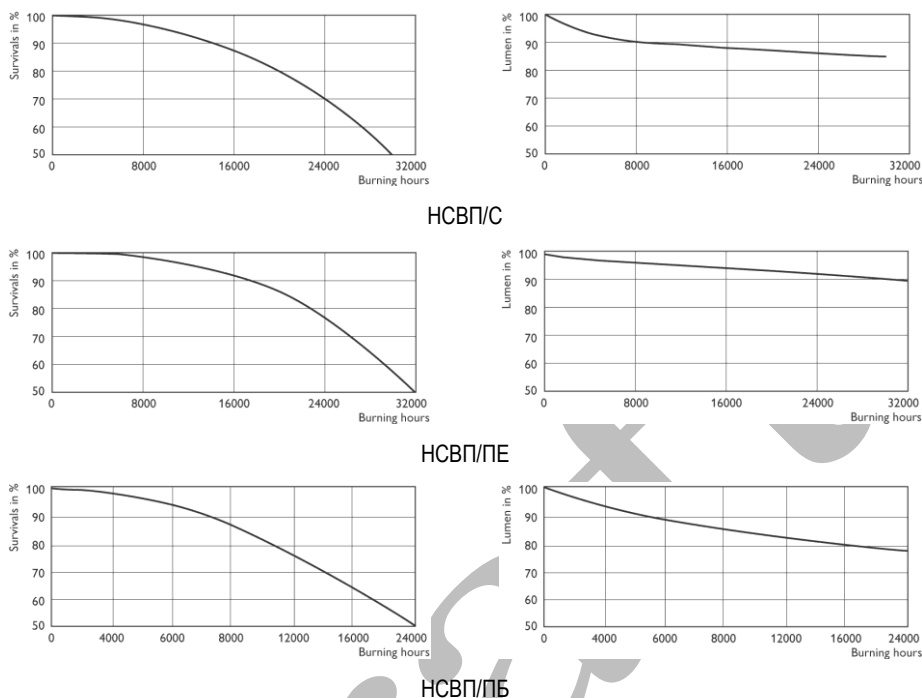


Слика 5.73 Спектрален состав на светлината кај НСВП [108]

Кога НСВП работат со ККУ промената на флуksот се остварува слично како и кај ЖС и МХС, со додавање дополнителна придушница или со специјални ККУ со три изводи. За некои НСВП, предвидени за работа со ЕКУ, е можно намалување на флуksот за половина од номиналниот, при што кога сијалицата работи со 50% од номиналниот флуks, ТБ и ИРБ се намалуваат.

За НСВП е дозволена произволна положбата на работа, а амбиентната температура нема влијание врз светлотехничките карактеристики и запалувањето на НСВП.

Трајноста на НСВП/С е во границите од 24 000 до 32 000 h (слика 5.74.а) и таа е поголема отколку трајноста на МХС и ЖС. Исто така, флуksот што НСВП ќе го имаат на крајот од својот номинален животен век е повисок отколку кај МХС и ЖС и тој е од 80 до 90% од номиналниот, за разлика од ЖС, каде што тој процент е од 60 до 80% (слика 5.62). НСВП/ПБ имаат значително покус животен век и тој изнесува околу 24 000 h (слика 5.74.а), а флуksот на крајот од номиналниот животен век ќе опадне на околу 78% од номиналниот (слика 5.74.б).



а) криви на преживување б) криви на стареење
Слика 5.74 Типични криви на преживување и стареење на НСВП [108]

Натриумовите сијалици со висок притисок се користат за осветление на надворешни и внатрешни простори во условите кога не е неопходен добар ИРБ. Така, на пример, НСВП се користат за осветление на: улици, паркинзи, отворени складишта, фасади на згради, индустриски објекти и сл.

НСВП/ПБ и НСВП/БС сè почесто наоѓаат примена за осветление на ексклузивните и историските делови во голем број градови.

5.3.6 Натриумови сијалици со низок притисок

Појавата на првите НСНП датира од 1919 година. Но сè до 1932 година, кога отпочнува нивното комерцијално производство, тие биле главно прототипски изведби коишто не нашле позначајна примена [114]. Во текот на својот развој НСНП претрпеле голем број промени, како во однос на нивниот облик така и по останатите (електрични и фотометриски) карактеристики. Првите НСНП работеле на релативно низок еднонасочен или наизменичен напон така што должината на електричниот лак била мала, а струјата во лакот релативно голема. Токму поради тоа некои од првите НСНП (пред 1932 година) имале стаклен балон со облик сличен како и балонот кај волфрамовите сијалици. Набрзо се заклучило дека ефикасноста на НСНП може да се зголеми со намалување на густината на струјата во електричниот лак, така што откога

влегле во комерцијално производство, НСНП се произведуваат за наизменичен напон и со релативно голема должина на стаклениот балон во којшто се случува електричното празнење.

Според начинот на добивање на светлината и некои конструктивни карактеристики НСНП се многу слични на ФС. Електричното празнење се одвива во стаклен балон во вид на цевка чијашто должина е значително поголема од нејзиниот дијаметар. Со цел да се намали димензијата на сијалицата овој стаклен балон е свиткан во облик на латиничната буква U и е поставен во надворешен стаклен балон во вид на цевка (слика 5.75).



Слика 5.75 Конструкција на НСНП [108]

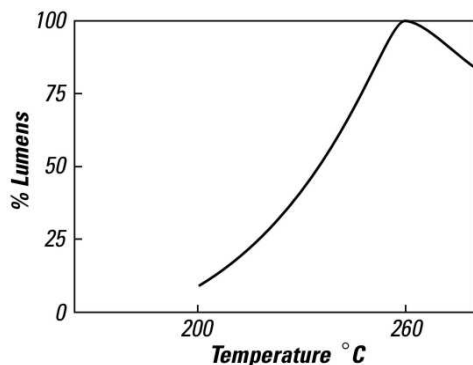
Внатрешниот стаклен балон е изработен од обично стакло, но неговата внатрешна страна треба да биде обложена со бор–силикатно стакло што е хемиски отпорно на натриумовите пари. Покрај натриумот, во балонот се наоѓа и мешавина од аргон и неон (во сооднос од $\sim 1:400$) коишто се неопходни во процесот на запалување на сијалицата.

Еден од најважните работни параметри на НСНП е температурата на внатрешниот балон која што, за разлика од температурата кај ФС, е значително повисока и изнесува повеќе од $230\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но, за да се постигне максимално специфично производство, притисокот на натриумовите пари треба да изнесува околу $0,4\text{ Pa}$ (видете слика 5.71.a) што одговара на температура во цевката од $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. На сликата 5.76 е прикажана зависноста на флуксот на НСНП од температурата на внатрешната цевка. Од дијаграмот прикажан на сликата 5.76 е очигледно дека одржувањето на оптималната температура на внатрешната цевка игра клучна улога во ефикасноста на НСНП.

За да се спречи одведувањето на топлина од внатрешната цевка (како со конвекција, така и со кондукција), меѓу внатрешната цевка и надворешниот балон е вакуум. Освен тоа, за да се намали и пренесувањето на топлина по пат на зрачење, на внатрешната страна на ѕидовите на надворешниот балон е нанесен слој на индиум оксид, што има задача да ги одбива инфрацрвените зраци, насочувајќи ги кон внатрешната цевка, слично како и кај ХС со IRC филтри (видете слика 4.12).

Втор важен фактор за светлотехничките карактеристики на НСНП е константната распределба на натриумот (и натриумовите пари) по должината на внатрешната цевка. Поради тоа, треба да се води сметка за пропишаната положба на работа. За најголем број НСНП пропишаната положба на работа е хоризонтална, со дозволено отстапување од хоризонталата до $\pm 20^{\circ}$. Но тука треба да се забележи дека за некои НСНП е дозволена работа и во вертикална положба, со приклучната капа од горната страна. Покрај тоа, за да се обезбеди соодветна распределба на натриумот по должината на внатрешната цевка таа се изработува со рамномерно поставени

вдлабнатини (таканаречени „резервоари“ за натриум, не се прикажани на сликата 5.75) во коишто се таложи натриумот кога сијалицата не работи.



Слика 5.76 Зависност на флуксот на НСНП од температурата на внатрешната цевка [114]

НСНП се произведуваат во две верзии: со стандардна ефикасност (SOX) и со зголемена ефикасност (SOX-E). Верзијата SOX-E се разликува од стандардната НСНП по тоа што таа има подобри термички изолациони својства и, за исти димензии на сијалицата, има помала струја (моќност) и светлински флукс, но повисоко специфично производство.

На електричната мрежа НСНП се поврзуваат преку електромагнетна придрушница со и без игнитор (слики 5.77.а и 5.77.б) или преку електромагнетни придрушници со константна моќност со паралелен или сериски игнитор (слика 5.77.в и 5.77.г). ККУ со константна моќност од сликите 5.77.в и 5.77.г се значително посложени и физички поголеми⁸⁹, а со тоа и поскапи. Исто така, тие имаат нешто повисоки загуби на активна моќност. Од друга страна, тие имаат определени предности во однос на поедноставните ККУ од сликите 5.77.а и 5.77.б, како што се: овозможуваат константна моќност на сијалицата во текот на експлоатацијата, промените на погонскиот напон не доведуваат до гасење на сијалицата, обезбедуваат скоро правоаголен облик на струјата во сијалицата (со што се намалуваат таканаречените „темни“ периоди во секоја полупериода од синусоидалната промена на струјата од мрежата) и создаваат релативно мали хармонички дисторзии на струјата. Треба да се забележи дека шемата на врзување зависи од верзијата на НСНП и нејзината моќност, поради што треба да се следат упатствата на производителите.

НСНП можат да работат и преку ЕКУ, коишто, како и кај другите типови сијалици, овозможуваат оптимални услови за работа на НСНП, придонесувајќи за поголемо специфично производство на системот сијалица + КУ.

Времето на запалување на НСНП изнесува 8 до 15 минути, додека времето на повторно палење е значително покусо (скоро моментално) бидејќи, благодарение на

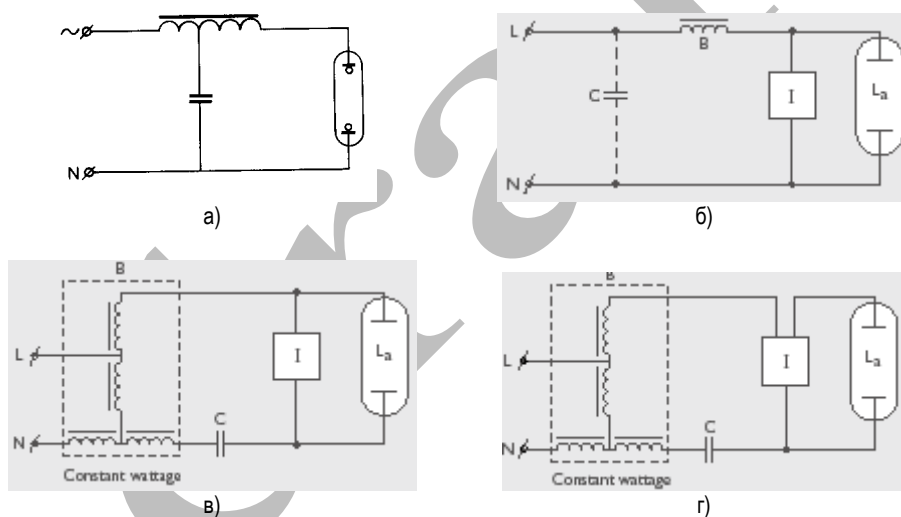
⁸⁹ Масата на ККУ со константна моќност за НСНП со номинални моќности од 36 до 180 W се движи од 1,7 до 4,3 kg, додека масата на поедноставните ККУ (од сликите 5.77.а и 5.77.б) е помала од 1,0 kg [108].

релативно нискиот притисокот во цевката, за запалување на сијалицата е доволна пониска амплитуда на напонскиот импулс.

Електродите на НСНП се изработени од волфрамова жица прекриена со слој од термоемисионен материјал (којшто интензивно емитува електрони, неопходни за електрично празнење низ натриумовата пара). Истрошеноста на термоемисиониот слој на електродите е главна причина за престанок на работа на НСНП поради тоа што во тие случаи потребниот напонски импулс за запалување на сијалицата е значително повисок отколку напонскиот импулс што се создава во колото на НСНП (400 до 600 V).

Варијациите на погонскиот напон многу малку влијаат врз светлинскиот флукс на НСНП. Така, на пример, ако погонскиот напон е во границите од 92% до 106% од номиналниот напон, светлинскиот флукс се менува во границите од 98% до 100% [84,108]. Но, и покрај тоа, поради проблемите што можат да се јават при запалување на сијалиците, производителите не препорачуваат НСНП да работат во услови кога погонскиот напон отстапува од номиналниот за повеќе од 10% [108].

Компензацијата на реактивната моќност во колата на НСНП може да се реализира со кондензаторите прикажани на сликите 5.77.



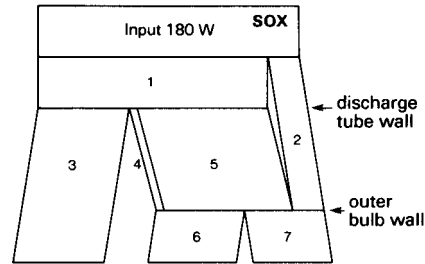
Слика 5.77 Вообичаени шеми на поврзување на НСНП [84,108]

На сликата 5.78 е прикажан билансот на моќности на една НСНП од типот SOX со номинална моќност од 180 W. Од податоците прикажани на сликата 5.78 се гледа дека околу 35% од ангажираната моќност на сијалицата се претвора во светлина. Овој процент е значително поголем во споредба со другите СПГ (видете слики 5.37, 5.61, 5.66 и 5.72) што е резултат на спектралниот состав на светлината од електричното празнење низ натриумовата пара – монохроматска (жолта) светлина со бранови должини од 589,0 и 589,6 nm (слика 5.79).

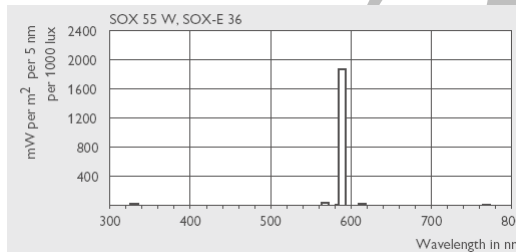
The energy balance of a SOX 180 W low-pressure sodium lamp is shown in Fig. 1.69.

Fig. 1.69 Energy balance of a 180 W low-pressure sodium lamp.

1. Power in discharge column - 158 W
2. Thermal losses at electrodes - 22 W
3. Visible radiation - 63 W
4. IR radiation - 5 W
5. Thermal losses in discharge column - 90 W
6. Total IR radiation - 62 W
7. Convection and conduction - 55 W.



Слика 5.78 Биланс на моќности за SOX 180 W [84]



Слика 5.79 Спектрален состав на светлината добиена од НСНП [108]

Ако спектралниот состав на НСНП се спореди со кривата за релативната осетливост на човечкото око ($V(\lambda)$) од сликата 2.3) може да се дојде до теоретското специфично производство на НСНП коешто изнесува околу 525 lm/W [5]. Но, ако на моќноста на сијалицата се додадат загубите на топлина во сијалицата, за НСНП со номинални моќности од 18 до 180 W, специфичното производство се движи во границите од 100 до 200 lm/W, додека ако се вклучат и загубите на електрична моќност во КУ, специфичното производство е во границите од 68 до 189 lm/W (табела 5.18).

Да забележиме дека податоците за специфичните производства на НСНП прикажани во табелата 5.18 се однесуваат на работа со оние КУ што овозможуваат оптимална работа на сијалиците. Режимите кога НСНП работат со други типови КУ, на пример со ККУ со константна моќност, специфичното производство е помало.

Со оглед на релативно големата светлечка површина, НСНП имаат релативно мала сјајност и таа изнесува околу 10 cd/cm² за верзијата SOX, односно околу 4 cd/cm² за верзијата SOX–E. Малата сјајност на НСНП овозможува нивно користење во светилки со релативно едноставни оптички системи.

Меѓу останатите позитивни карактеристики на НСНП да наведеме само две. Прво, НСНП можат да се запалат и да работат на релативно ниски температури (до – 30 °C). Второ, монохроматската светлина овозможува поголем контраст во услови на ноќно гледање и зголемена јасност на осветлуваните предмети поради тоа што во услови на голема влажност на воздухот (магла, дожд и сл.) монохроматската светлина е помалку подложна на рефракција од честичките вода.

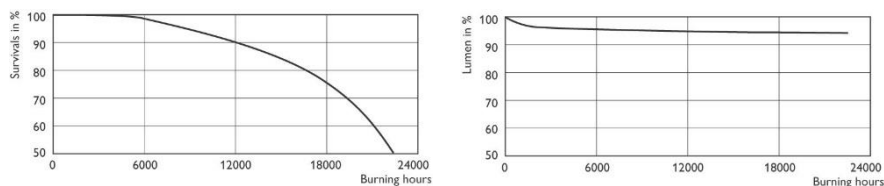
Табела 5.18 Номинални податоци за НСНП [91,108]

Номинална моќност W	$P_{\text{сиј.}} + \Delta P_{\text{КУ}}$ W	Флукс lm	ξ lm/W	Дијаметар на сијалицата mm	Должина на сијалицата mm
SOX со ККУ					
18	18 + 7	1 800	72,0	52	216
35	37 + 9	4 550	98,9	52	311
55	56 + 21	7 800	101,3	52	425
90	89 + 12	13 000	128,7	68	528
135	129 + 26	20 800	134,2	68	775
180	180 + 31	32 500	154,0	68	1120
SOX-E со ККУ					
18	18 + 8	1 770	68,1	52	216
26	27 + 6	3 700	112,1	52	311
36	38 + 10	6 160	128,3	52	425
66	65 + 16	10 700	132,1	68	528
91	90 + 18	17 000	157,4	68	775
131	128 + 22	26 000	173,3	68	1120
SOX со ЕКУ					
35	30 + 4	4 550	133,8	52	311
55	46 + 6	7 800	150,0	52	425
SOX-E со ЕКУ					
36	30 + 4	6 160	181,2	52	425
66	54 + 5	10 700	181,4	68	528
91	82 + 8	17 000	188,9	68	775

Сите претходно наведени специфичности на НСНП ги чинат погодни за осветление на надворешни простори: сообраќајници и тунели, пристаништа, товарни железнички станици, аеродроми, градилишта, челичарници, леарници, каменоломи, фабрики на бетонски производи, сепарации на јаглен или руда и сл.

Бојата на светлината на НСНП е жолта, иако во процесот на запалување, кога значителен процент на светлината се добива од електрично празнење во инертниот гас, бојата е црвена. SST на НСНП е 1 740 K (табела 2.3). Монохроматскиот карактер на светлината добиена од НСНП е причината за нивниот најголем недостаток, неможност за распознавање на боите. Всушност, за нив не може да се дефинира ИРБ, иако математички гледано, ИРБ е негативен (табела 2.3). Токму поради тоа, НСНП може да се користат во оние случаи каде што распознавањето на бои не е воопшто потребно, поради што и Меѓународната комисија за осветление не препорачува употреба на НСНП во случаите кога улиците се наменети и за пешачки сообраќај [41,44].

Животниот век на НСНП е околу 23 000 h, а флуксот на крајот од животниот век е околу 95% од номиналниот.



Слика 5.80 Типични криви на преживување и стареење на НСНП [108]

И покрај несомнената предност на НСНП во однос на останатите СПГ од аспект на специфичното производство, постојат голем број дилеми во врска со перформансите на НСНП во реални услови. Прво, релативно големите димензии на НСНП наметнуваат конструкции на светилки што, по правило, имаат коефициенти на полезно дејство пониски од, на пример, соодветните коефициенти за светилките наменети за НСВП. Поради тоа, може да се случи, систем на електрично осветление со НСВП да има поголема енергетска ефикасност отколку систем со НСНП.

Втората дилема за реалната ефикасност на НСНП се однесува на условите во коишто тие најчесто се користат – осветление на сообраќајници. Имено, ако со системот на осветление со НСНП се постигнуваат релативно мали сјајности, релативната осетливост на човечкото око е поблиска до кривата $V'(\lambda)$ од сликата 2.3 (ефект на Пуркиње).⁹⁰ Голем број студии во САД покажале дека помалку ефикасните НСВП (па дури и ЖС, МХС и КФСЕ), коишто во својот спектар имаат светлина и од останатите бранови должини (особено во синиот регион), имаат подобри перформанси отколку НСНП. Во Европа, каде што, по правило, се постигнуваат повисоки сјајности на осветлените сообраќајници, претходниот ефект е помалку изразен [114].

5.4 Сијалици без електроди

5.4.1 Општи карактеристики на сијалиците без електроди

Во групата сијалици без електроди (СБЕ) се следните типови сијалици: индукциони (ИС), микробранови (МБС), светлечки диоди (СД) и електролуминисцентни панели (ЕЛП).

Сијалиците без електроди во комерцијално производство се јавуваат во последната деценија од XX век и поради тоа нивната употреба за општа намена е сè уште назначителна. Тука треба да се забележи дека СД и ЕЛП се познати и се произведуваат подолг период, но тие не се користат за општа намена туку главно за сигнализација и осветление на делови од разни електронски апарати (екрани, тастатури и сл.). И покрај тоа, тие се вклучени во рамките на овој труд поради очекувањето дека во блиска иднина ќе можат да се користат и за општа намена или поради тоа што можат да заменат некои од помалку ефикасните сијалици (главно сијалиците со вжарено влакно) во системите за сигнализација.

⁹⁰ За бранова должина од 590 nm релативната осетливост на човечкото око во услови на големи сјајности изнесува околу 0,75, додека во услови на мали сјајности таа е околу десет пати помала.

Сијалиците без електроди, за разлика од сијалиците од останатите две групи, имаат меѓусебе многу малку заеднички карактеристики. Од малкуте заеднички карактеристики најзначајни се: непостоење на електроди и потреба од ЕКУ за нивно поврзување со електричната мрежа. Бидејќи електродите кај останатите групи сијалици се главни причинители за прегорување на сијалиците, СБЕ имаат значително поголема трајност, којашто може да достигне и до 100 000 h. Употребата на ЕКУ овозможуваат треперењето на светлината, добиена од овие сијалици, да не биде забележливо за човечкото око (работа на големи фреквенции) или воопшто да не постои (работа на еднонасочен напон). Бидејќи кај СБЕ не постојат никакви електрични (метални) компоненти во балонот во кој што се добива светлината, постои можност за употреба на други хемиски агресивни материјали (на пример сулфур), коишто кај сијалиците со електроди не можеле да се користат.

Кај СБЕ бројот на вклучувања не влијае врз животниот век.

Заедничка карактеристика на СБЕ е и нивната релативно висока цена што се должи на тоа што технологиите на овие сијалици се сè уште во развој, а нивното производство не е доволно масовно за да се постигнат пониски цени.

5.4.2 Индукциони сијалици

Принципот на работа на индукциони сијалици (ИС) бил познат уште пред повеќе од 100 години, благодарение на истражувањата на Хиторф (W. Hittorf), Никола Тесла и Томсон (J. J. Thomson) [60]. Во децениите потоа се патентирани голем број конструкции на ИС. Три од многуте патенти за принципот на работа на ИС се значајни за споменување поради тоа што претставуваат основа на денешните комерцијални ИС. Првиот патент, од 1907 година, е публикуван од страна на Хјуит (P. C. Hewitt), вториот патент на Бетенод и Клод (J. Bethenod и A. Claude) датира од 1936, додека патентот на Андерсон (J. M. Anderson) е од 1970 година [62].

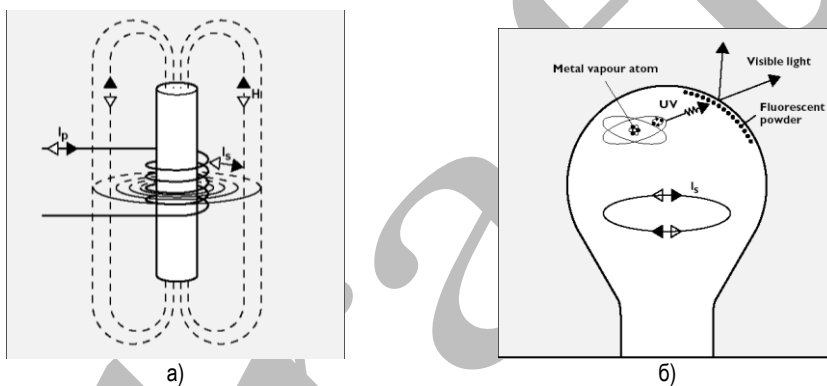
Во 1991 година компаниите Филипс и Мацушита ги пласирале на пазарот првите комерцијални ИС. Нивните комерцијални имиња се QL и Everlight, соодветно. Неколку години подоцна Генерал Електрик (Genuga™ во 1994 година) и Осрам (Endura® во 1995 година) ги вовеле ИС и во своите производни програми. Главна причина поради која било потребно да помине долг временски период до комерцијалното производство на ИС е потребата од сложени (и скапи) ЕКУ неопходни за функционирање на ИС, коишто работат на фреквенции од неколку MHz [5].

Во ИС денес присутни на пазарот принципот на добивање светлина базира на празнењето низ живини пареи под низок притисок и е идентичен како и кај ФС (слики 5.26 и 5.81.6). Токму поради тоа некои од производителите, во своите производни каталози, ИС ги категоризираат како ФС. Покрај овој принцип, технички е можно светлината да се добива и со празнење низ метални пареи под висок притисок. Поради редица технички, технолошки и економски проблеми, во блиска иднина не се очекува таквите верзии на ИС да се појават на пазарот [5].

Според начинот на создавање на електричното празнење кај ИС разликуваме два принципа: празнење од типот Е (*E discharge*) и празнење од типот Н (*H discharge*). Според првиот принцип, празнењето низ живините пареи се создава со помош на

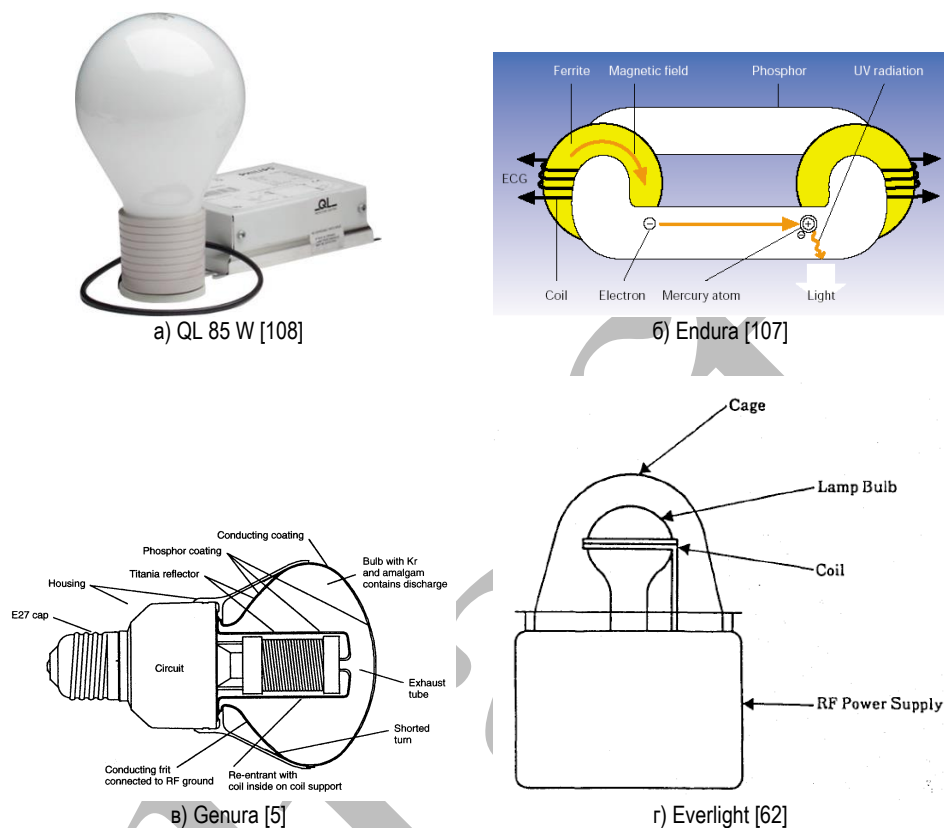
електрично поле помеѓу електродите на кондензатор, поставени надвор од стаклениот балон во којшто е сместена живата. Принципот на работа кај ИС базирани на овој принцип малку се разликува од принципот кај ФС што работат на многу високи фреквенции. Потребата од работа на релативно висока фреквенција (~ 915 MHz) за која што сегашните ЕКУ се многу неефикасни и/или многу скапи, не дозволуваат комерцијална примена на ИС базирани на овој принцип на празнење [60].

Кај вториот принцип на празнење (*H discharge*), задвижувањето на наелектризираните честички во живините пари е со помош на јако електромагнетно поле (слика 5.81.a). Всушност, ИС од овој тип може да се сметаат за високофреквентни трансформатори кај коишто струјата во примарната намотка (електромагнет, најчесто со феритно јадро) создава јако магнетно поле и индуцира струја во секундарната намотка, што се состои од наелектризираните честички во живините пари и инертните гасови во стаклениот балон на ИС.



Слика 5.81 Принцип на добивање светлина кај ИС [89]

Обликот, конструкцијата и стаклените балони на комерцијалните ИС е различен кај секој производител, а тие главно се базирани на трите патенти споменати на почетокот на овој оддел. На сликата 5.82 се прикажани облиците на ИС од различни производители, додека на сликата 5.83 се прикажани составните делови на системот QL од Филипс. Карактеристично за оваа ИС е тоа што стаклениот балон (сијалицата) во неговата средина има вдлабнатина во која влегува феритното јадро во вид на цилиндер. Оваа конструкција во стручната литература се нарекува *re-entrant cavity* и е многу слична на конструкцијата од патентот од 1936 година. Во овој труд оваа конструкција ќе ја нарекуваме *конструкција со „отворено“ магнетно коло*. Покрај QL, и Genuga е со конструкција со отворено магнетно коло, со таа разлика што ЕКУ е вграден во самата сијалица.



Слика 5.82 Облици на комерцијално расположливите ИС

Endura има поинаква конструкција, т.е. во овој случај феритното јадро е во вид на тороидални прстени поставени околу стаклениот балон, а оваа конструкција се нарекува *конструкција со затворено феритно јадро (closed ferrite core)* и е базирана на патентот на Андерсон од 1970 година.

Конструкција на Everlight базира на патентот на Хјуит каде што примарната намотка е поставена околу стаклениот балон во вид на сфера.

Независно од конструкцијата на ИС, нивна заедничка карактеристика е тоа што во стаклениот балон не постојат никакви електрични компоненти. Покрај живата (основно полнење), во стаклениот балон има смеса од аргон и неон (дополнително полнење), неопходни во процесот на запалување на сијалицата. Внатрешната страна на балонот е премачкана со флуоресцентни слоеви коишто УВ зраци ги претвораат во светлина.



Слика 5.83 Составни делови на системот QL [108]

Во поглед на димензиите, ИС можат да се поделат во две групи. Во првата група се ИС QL и Endura, коишто се предвидени да работат со екстерни ЕКУ, а во втората група спаѓа ИС Genura кај која ЕКУ е вграден во самата сијалица, слично како и кај компактните флуоресцентни сијалици со интегриран КУ. Покрај тоа, конструкцијата на Genura е таква што во неа има вградено рефлектор што ја чини компатибилна со рефлекторските ВС од типот R80 (во САД R25). Покрај Genura, во 2001 година се јавуваат и првите компактни ИС (КИС) од кинеско производство, главно наменети за кинескиот пазар [114].

ИС Everlight, по своите димензии и конструкција, може да се смета како компактна ИС, иако не може да послужи за замена на СВВ каков што е случајот со Genura.

Во процесот на запалување на ИС главна улога има струјата што се јавува во стаклениот балон како резултат на паразитните капацитети помеѓу две соседни навивки од феритното јадро. Како резултат на оваа струја се јавува почетна јонизација во дополнителното полнење на стаклениот балон која што, во натамошниот процес на запалување на сијалицата, е доволна за да се создаде движење на електроните под дејство на јакото магнетно поле.

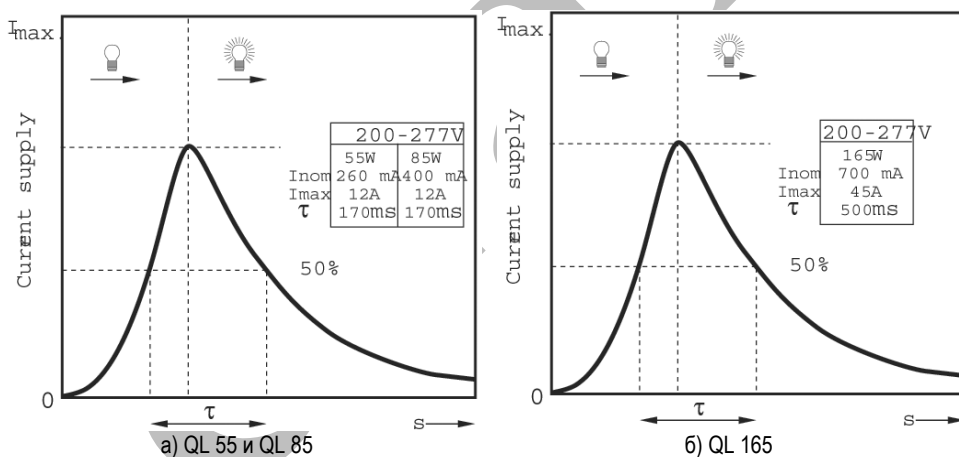
Струјата во примарната намотка треба да има фреквенција значително повисока од мрежната за да се постигне добро специфично производство. По правило, работата на ИС на повисоки фреквенции резултира со поголемо специфично производство, а изборот на оптималната фреквенција зависи од конструкцијата на ИС. Но, од друга страна, цената на ЕКУ за високите фреквенции е исто така повисока. Втор проблем, што се јавува при изборот на работната фреквенција на ИС, е тоа што многу малку фреквентни опсези во доменот на радио (и ТВ) брановите не се резервирани за други, најчесто, комуникациски потреби. Високата работна фреквенција на ИС наметнува значително посложена (и поскапа) конструкција на светилките наменети за овие сијалици, со оглед на тоа што меѓународните и националните стандарди се многу

строги во однос на интензитетот на радио пречките што ги создаваат електричните уреди.

За ИС со отворено магнетно коло оптималната фреквенција е околу 2,65 МНз и на оваа фреквенција работат ИС QL и Genuga, додека за ИС со затворено магнетно коло фреквенцијата може да биде пониска поради тоа што загубите во затвореното магнетно коло се помали. ИС Endura е предвидена да работи на фреквенција од 250 kHz што дозволува поедноставна (и поефтина) конструкција на ЕКУ, поедноставни светилки од аспект на намалување на радио пречките и поголема должина (до 20 m) на спроводниците за поврзување на ЕКУ и ИС.

Работната фреквенција на Everlight е 13,65 МНз и, со цел да се намалат радио пречките, целата ИС е поставена во соодветен „кафез“.

Како последица на ЕКУ, струјата на пуштање кај ИС е значително повисока отколку нивната номинална струја. Имено, според [89], номиналната струја на ИС QL, во зависност од номиналната моќност на сијалицата, се движи во границите од 260 до 700 mA, додека струјата на вклучување е во границите од 12 до 45 A (слика 5.84). Исто така, како последица на работата на високи фреквенции, капацитивните струи спрема заземјените делови може да бидат значителни, за што треба да се води сметка доколку голем број ИС се напојуваат преку еден заштитен уред за диференцијална струја (видете пододдел *Шеми на врзување и помошни уреди* во одделот 5.3.1).



Слика 5.84 Дијаграм на струјата на запалување за ИС QL [89]

За разлика од ФС, при запалувањето на ИС нема трепкање и тие засветуваат за помалку од 0,5 s. Но, времето на запалување на ИС (за кое се достигнува околу 80% од номиналниот флукс) е значително подолго отколку кај ФС и изнесува околу 15 s. Времето на повторно палење зависи од амбиентната температура и карактеристиките на употребената светилка (условите за одведување на топлина), но, по правило, тоа е многу покусо од времето на запалување.

Производителите на ИС засега не нудат ЕКУ со можност за регулацијата на флуксот, иако тоа е технички можно. Со оглед на тоа што ИС работат на фреквенции

значително повисоки од мрежната фреквенција, практично, кај нив стробоскопскиот ефект не е присутен. Факторот на моќност, по правило, е повисок од 0,95.

ТБ и ИРБ на ИС се определени од составот на флуоресцентниот слој во стаклениот балон. ИС се произведуваат со трифосфорни флуоресцентни слоеви (што обезбедуваат ИРБ поголем од 80), а ТБ може да биде 2 700, 3 000 и/или 4 000 К. Поради тоа, спектарот на светлината на ИС е идентичен со спектрите на светлината на ФСЦ/3 за иста ТБ.

Во табелата 5.19 се прикажани некои од светлотехничките карактеристики на комерцијалните ИС присутни на пазарите во Европа. Според податоците прикажани во табелата 5.19, специфичното производство на ИС е во границите од 64 до 80 lm/W. Во споредба со ФС, индукционите сијалици имаат помало специфично производство (видете табела 5.11), но треба да се има предвид дека ИС се во комерцијално производство нешто повеќе од една деценија и дека во иднина треба да се очекуваат значителни подобрувања на специфичното производство.

Сјајноста на ИС е релативно мала. На пример, за ИС од типот QL таа е во границите од 6,5 до 22 cd/cm² [119], додека за типот Endura сјајноста е 1,7 cd/cm².

Зависноста на флуксот кај ИС од амбиентната температура е слична како и кај ФС. Токму поради тоа живата во основното полнење е во форма на амалгам со што се постигнува оптимален притисок на живината пара (видете пододдел *Компактни флуоресцентни сијалици* во одделот 5.3.2). Употребата на амалгамот овозможува мали отстапувања на флуксот во однос на номиналниот – за широк дијапазон на амбиентни температури.

Кај ИС од типот QL врз големината на флуксот има влијание и положбата на работа. На сликата 5.85 е прикажана зависноста на флуксот за ИС QL од температурата на околината. Од кривите прикажани на сликата 5.85 се гледа дека поповолна положба на работа на ИС QL е вертикална, со приклучната капа од горната страна. Исто така, покрај амбиентната температура, врз светлинскиот флукс на ИС големо влијание има и конструкцијата на светилката, т.е. условите за одведување на топлината. За ИС QL поставени во светилки со различни можности за одведување на топлината, тоа влијание е прикажано на сликата 5.86. Од дијаграмот прикажан на сликата 5.86.a е јасно дека при изборот на светилката мора да се води сметка за условите на работа (температурата на амбиентот) и дека, со правилно одбрана светилка, ИС можат да работат на температури и до -30°C. Ако на тоа се додаде фактот дека сите ИС можат да се запалат на температури од -20°C или пониски, јасно е дека ИС, за разлика од ФС, можат да се користат и за осветление на надворешни простори.

Номиналниот животен век на ИС е значително подолг од сијалиците со електроди и тој, за ИС со екстерен ЕКУ, изнесува 60 000 h со 90% преживување, додека животниот век со 50% преживување може да биде и подолг од 100 000 h. На сликата 5.87.a е прикажана кривата на преживување за ИС од типот QL. Долгиот животен век на ИС се должи на тоа што во самата сијалица не постојат никакви компоненти коишто можат да бидат причина за престанок на работа на сијалиците. Всушност, трајноста на ИС е определена со трајноста на употребениот ЕКУ. Трајноста на ИС многу малку зависи од бројот на вклучувања и исклучувања.

Кривата на стареење за ИС QL е прикажана на сликата 5.87.6. Од дијаграмот прикажан на сликата 5.87.6 се гледа дека на крајот од номиналниот животен век, флуксот на ИС е за околу 30% помал од номиналниот.

Технички е можно ЕКУ да се направат со поголема трајност (се разбира и со повисока цена), но сепак, засега тоа производителите не го прават од едноставна причина што поради стареењето на флуоресцентниот слој флуксот после долг период на работа ќе биде значително понизок од номиналниот (слика 5.87.6).

Врз основа на сите претходно наведени карактеристики на ИС може да се заклучи дека тие можат да имаат широко поле на примена, вклучувајќи и примена за надворешно осветление. Единствено ограничување за широката примена на ИС е високата цена на сијалиците и светилките. Поради тоа, денес ИС се користат главно во случаите кога трошоците за замена на прегорените сијалици се многу високи или светилките (сијалиците) се тешко достапни: осветление на високи згради, мостови, тунели и сл. Во таквите случаи повисоките инвестициони трошоци (во светилки и сијалици) можат да се оправдаат со намалените трошоци за одржување. Покрај тоа, ИС наоѓаат примена за осветление на јавни отворени и затворени простори: улици, аеродроми, железнички станици и др.

ИС можат да бидат ефикасна алтернатива за НСВП со релативно мали моќности, со оглед на приближно еднаквото специфично производство, но ИС нудат подобар ИРБ и попријатна ТБ.

Како што претходно беше кажано, Genuga е предвидена за замена на помалку ефикасните рефлекторски СВВ. Но, конкуренцијата во тој сегмент од пазарот е многу голема, со оглед на тоа што производителите нудат голем број варијанти на рефлекторски КФСИ со цени коишто се пониски од цената на Genuga⁹¹. Дополнителен проблем, што не постои кај КФСИ, се однесува на помасовната примена на КИС во САД. Имено, поради релативно строгите стандарди за радио пречки во САД, Genuga долго време се продавала во Европа, пред да стане достапна на пазарот во САД.

ИС, како сијалици од најмладата генерација, многу тешко се пробиваат на пазарот, главно поради нивната висока цена⁹². Високата цена на ИС е резултат на повеќе фактори, меѓу коишто најзначајни се: примената на нови и скапи технолошки решенија во сијалиците и нивните помошни уреди и светилките, повисоките трошоци за производство на релативно мали количини на сијалици и светилки и малата конкуренција.

Покрај тоа, во стручната јавност постојат дилеми и во поглед на реалната примена на ИС во системите за надворешно осветление [72]. Имено, засега ИС се исплатливи во ситуациите кога трошоците за замена на сијалиците се многу високи, што најчесто претпоставува големи висини и тешко пристапни места на поставување

⁹¹ Во почетокот на 2003 година во САД и Европа малопродажната цена на Genuga била околу 30 EUR, додека цените на сличните рефлекторски КФСИ (OSRAM Dulux EL Reflector) биле околу 20 EUR.

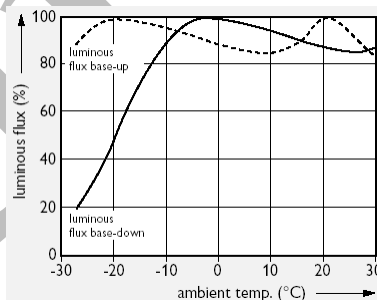
⁹² Во 1998 година во САД цените на една светилка за ИС од типот QL (вклучувајќи ја цената на ИС) се движеле околу 500 до 800 USD [72]. Во 2006 година, според информациите добиени од Филипс, во Република Македонија малопродажната цена (со ДДВ) за QL (сијалица, ВФ генератор и антена) била во границите од 350 до 520 EUR, во зависност од номиналната моќност. Цените на светилките наменети за QL сијалица, вклучувајќи ја и сијалицата, можат да достигнат вредност и до 1 000 EUR!

на светилките. Но, од друга страна, најголемиот номинален флуks што ИС го имаат (12 000 lm) е најчесто недоволен за обезбедување на соодветни светлотехнички перформанси.

Според некои размислувања, помасовната примена на ИС може да се постигне ако, покрај намалувањето на цената, се надмине и проблемот со малите номинални флуksови на ИС. Но, тоа може да им создаде проблеми на производителите на ИС бидејќи номиналниот флуks на ИС е директно пропорционален на површината на флуоресцентниот слој. Значи, ИС со поголем флуks ќе имаат поголеми димензии. Тоа ќе услови соодветните светилки да имаат поголеми димензии, што негативно ќе влијае врз нивната ефикасност.

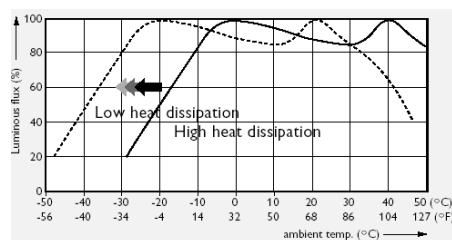
Табела 5.19 Светлотехнички карактеристики на ИС [89, 107]

Номинална моќност W	$P_{\text{сиј.}} + \Delta P_{\text{ЕКУ}}$ W	Флуks lm	Специфично производство lm/W	ССТ K	ИРБ
Philips QL					
55	55	3 500	64	2 700 / 3 000 / 4 000	1B
85	85	6 000	71	2 700 / 3 000 / 4 000	1B
165	165	12 000	73	3 000 / 4 000	1B
Osram Endura®					
70	81	6 500	80	3 000 / 4 000	1B
100 ⁹³	104	8 000	77	3 000 / 4 000	1B
	146	11 000	75		
150	153	12 000	78	3 000 / 4 000	1B

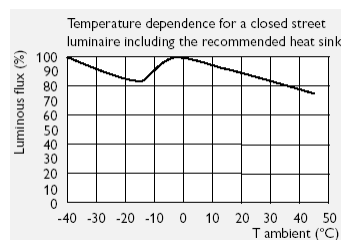


Слика 5.85 Зависност на светлинскиот флуks на ИС QL од амбиентната температура [89]

⁹³ ENDURA 100 е предвидена да работи со два ЕКУ.

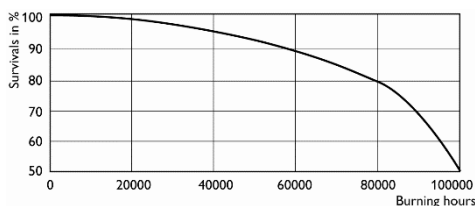


а) QL 55 и 85 W во светилки со различни можности за одведување на топлината

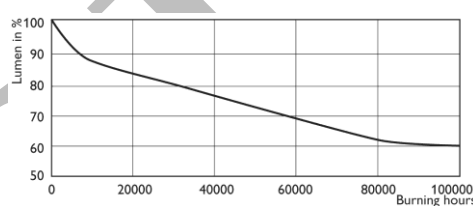


б) QL 165 W во затворена светилка за улично осветление

Слика 5.86 Зависност на светлинскиот флуks на ИС од температурата на околината и од конструкцијата на светилките [89]



а) крива на преживување



б) крива на стареење

Слика 5.87 Криви на преживување и стареење за ИС од типот QL [108]

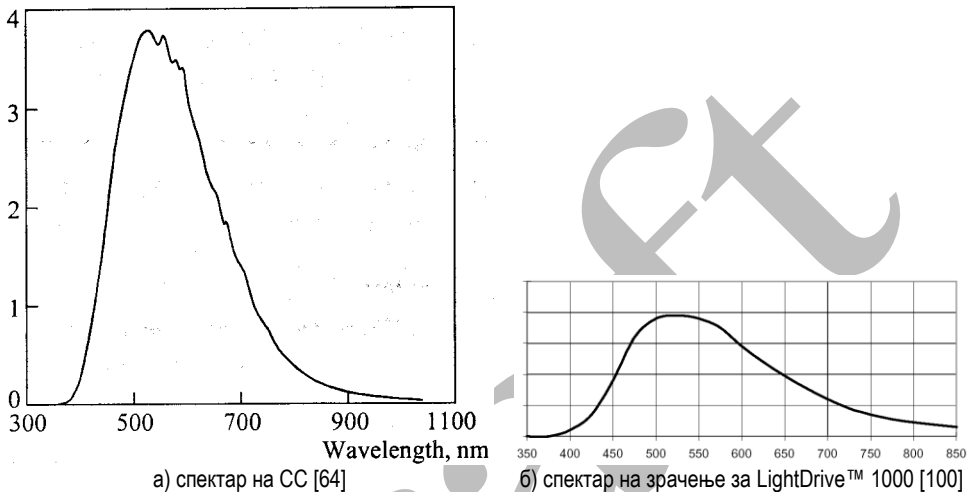
5.4.3 Микробранови (сулфурни) сијалици

Во 1992 година компанијата Fusion System Corporation (FSC) конструирала сијалица без електроди (СБЕ) во која што светлината се добива во стаклен балон исполнет со сулфур⁹⁴ (основно полнење) и инертен гас, најчесто, аргон (дополнително полнење). Компанијата FSC е долгогодишен производител на микробранови сијалици за УВ светлина што се користат, главно, во индустријата. Под дејство на енергијата добиена од микробранов генератор (*магнетрон*), најнапред се индуцира слабо електрично празнење во аргонот кое, заедно со енергијата од микробрановите, го доведува сулфурот до гасовита состојба.

Под дејство на микробрановата енергија доаѓа до хаотични судири на атомите на сулфурот, при што електроните од надворешните патеки преминуваат во нестабилни патеки. При враќање во стабилните патеки електроните емитураат енергија во вид на оптичко зрачење. Дел од оваа енергија се апсорбира од сулфурните пари (атомска и молекуларна апсорпција) и таа повторно се реемитира, само со друга

⁹⁴ Наместо сулфур, во основното полнење може да се користи и селен. Но, FSC не наведува која е причината зошто во комерцијалните производи не користеле селен. Истражувањата на микробранови сијалици (МБС) со основно полнење од живини и/или металхалогени пари не довеле до задоволувачки резултати бидејќи, за разлика од СИГ, кај МБС температурата во близината на стаклениот балон е значително повисока и атомите на металите многу лесно доаѓаат во допир со стаклото. Со оглед на тоа што алкалните метали или ретки земји се хемиски агресивни, нивната примена кај МБС е непрacticalна [61].

бранова должина. Како резултат на тоа, спектралниот состав на светлината добиена од зрачењето на сулфурните пари е континуиран, налик на спектарот на сончевата светлина (слика 2.4), со облик на нормираниот дијаграм на зрачење многу сличен на кривата на релативната осетливост на човечкото око (слика 2.3). На сликата 5.88.а е прикажан релативниот дијаграми на спектарот на зрачење на сулфурните сијалици (CC).



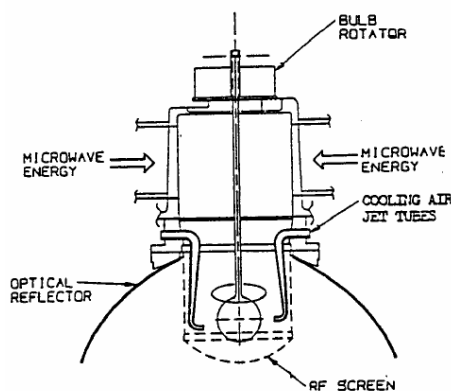
Слика 5.88 Спектарот на зрачењето на сулфурните сијалици

На сликата 5.88.б е прикажан нормираниот дијаграм на зрачење за комерцијалната сулфурна сијалица Light Drive™ 1000. Како што може да се забележи од дијаграмите на сликата 5.88, процентот на ултравиолетово и инфрацрвено зрачење и многу мал (0,1% УВ и 8,0% ИЦ [100]), што ја чини сулфурната сијалица многу различна од останатите сијалици. ТБ на овие сулфурни сијалици била околу 6 500 К, ИРБ околу 86 [61].

Првите системи на електрично осветление, реализирани со прототипски верзии на CC од компанијата Fusion Lighting (филијала на Fusion System Corporation), биле наменети за осветление на делови од две згради (на федералната администрација на САД) и нивната околина во Вашингтон, во 1994 година. Осветлението е изведено со 30 метри долги светловоди со CC со номинална моќност од 3,4 kW (два комерцијално расположливи магнетрона, секој со номинална моќност од 1,7 kW и фреквенција 2,45 GHz).

На сликата 5.89 е прикажана конструкцијата на првите CC од Fusion Lighting. Поради високите температури што се развиваат во стаклениот балон, било потребно да се обезбеди ефикасно ладење на сијалицата со принудно струење на воздух. Светлечката сулфурна плазма имала релативно мали димензии, но со големи отстапувања во поглед на нејзините димензии и облик. За да се спречи треперењето на рефлектираната светлина од оптичкиот систем, стаклениот балон ротирал со околу 450 вртежи во минута. Ако на моќноста на магнетроните се додадат моќностите на останатите

помошни уреди (систем за ладење и мотор за ротација), вкупната моќност на системот изнесува 5,9 kW, а светлинскиот флуks на сијалицата бил околу 410 000 lm. Според тоа, специфичното производство на системот СС и помошни уреди изнесува ~ 70 lm/W, што е помалку отколку кај најголем број комерцијално расположливи метал-халогени сијалици. Покрај тоа, интензивната бучава, големите димензии и значителна маса на системот (повеќе од 22 kg) придонеле СС да бидат конкурентни само во специјални случаи.



Слика 5.89 Конструкција на првата сулфурна сијалица од Fusion System Corporation од 1994 година [61]

Набргу по првите пилот проекти, во 1996 година Fusion Lighting ја лансира првата комерцијална СС наречена Light Drive™ 1000⁹⁵. Оваа сијалица е развиена во соработка со шведската компанија Celsius Tech, филијала на компанијата IKL. Light Drive 1000 се карактеризирала со значително помали димензии⁹⁶ и номинална моќност од 1 kW. Вкупната моќност на системот изнесувала 1,4 kW, со фактор на моќност од 0,99. Конструкцијата на сијалицата овозможувала непречена работа без потреба од принудно ладење, иако останала потребата за стабилизација на обликот на сулфурната плазма со ротација на стаклениот балон. Номиналниот флуks на Light Drive изнесувал 135 klm, што значи дека нејзиното специфично производство (~ 96 lm/W) било поголемо од специфичното производство на МХС со иста номинална моќност (табела 5.15).

Според [100], ТБ на Light Drive била 6 000 K, додека ИРБ изнесувал 78. Останатите светлотехнички карактеристики биле: средна сјајност $1\,900$ cd/cm², треперење на светлината помало од 5%, време на запалување 25 s, време на повторно палење (потребно за да опадне притисокот на сулфурните пари) 5 min⁹⁷ и номинална трајност од 45 000 до 60 000 h. Кога станува збор за трајноста треба да се каже дека трајноста

⁹⁵ Покрај ова комерцијално име, за сијалицата се користи и името Solar 1000™.

⁹⁶ Тежината со рефлекторот и заштитното стакло изнесувала околу 7,8 kg [100].

⁹⁷ Времето на повторно палење кај СС од 1994 година изнесувало неколку секунди поради големата моќност на употребените магнетрони.

на стаклениот балон е практично неограничена (не постои никакво стареење или хемиска реакција на полнењето со стаклото), но трајноста на сијалицата е ограничена со трајноста на магнетронот. Магнетроните што се користеле во Light Drive 1000 биле комерцијално расположливи магнетрони со номинална трајност од околу 15 000 h. Поради тоа, Celsius Tech во комплетот на Light Drive испорачувала 3 или 4 магнетрони, со што номиналната трајност на сијалицата е декларирана на 45 000 до 60 000 часа.

Во системот Light Drive, покрај сијалицата со помошните уреди, производителот испорачувал останата дополнителна опрема, вклучувајќи и микропроцесорски контролиран уред за управување којшто овозможувал соодветно контролирана секвенца за запалување и повторно палење на сијалицата и степенеста регулација на флуksот во границите од 20 до 100%.

Со оглед на карактеристиките на Light Drive (релативно големи димензии, номинален флуks и сјајност) таа била погодна за системи за осветление со помош на светловоди⁹⁸, т.е. системи за таканаречено *далечинско осветление (distant lighting)* или за индиректно осветление со помош на големи рефлектирачки површини. Досега се реализирани голем број системи за осветление (главно пилот проекти) во јавни установи во Шведска и САД.

Високата цена на системот Light Drive 1000⁹⁹ и соодветните пропратни елементи (светловод и сл.) биле главната причина за спорото прифаќање на CC за голем број апликации, иако карактеристиките на CC се многу слични на МХС.

Покрај тоа, во стручната литература се јавуваат информации за перформанси на Light Drive 1000 коишто не секогаш биле во согласност со спецификациите на производителот (номинален флуks, ИРБ и ТБ) [65]. Во 2000 година Fusion Lighting го прекинува сериското производство на Light Drive 1000 и најавува развој на нови, подобри верзии на CC со помала номинална моќност¹⁰⁰.

Да забележиме дека во последните години од XX век и во Русија се појавуваат CC со карактеристики слични како и на Light Drive 1000, но тие засега се користат само во експериментални цели и за специјални намени: осветление заедно со биомедицинска ирадијација [110].

5.4.4 Светлечки диоди

Светлечките диоди (СД) се извори на светлина чијшто развој во последно време е многу интензивен. Во рамките на овој оддел накусо ќе бидат објаснети само принципите на добивање светлина во СД и нивната примена. Податоците изнесени во

⁹⁸ Рефлекторите што се испорачувале со Light Drive 1000 биле прилагодени на стандардните димензии на светловодите (254 и 400 mm), производ на компанијата 3M.

⁹⁹ Според ценовникот на IKL/Celsius Tech од почетокот на 1998 година, Light Drive 1000 (сијалица, магнетрони и рефлектор со заштитно стакло) чинела околу 2 500 USD. Ако на таа сума се додаде цената на дополнителната опрема, системот без светилка (светловоди или рефлекторски површини за индиректно осветление) достигнувал цена од 3 000 до 3 500 USD.

¹⁰⁰ Според неофицијални информации добиени преку Интернет (<http://marketingVP.com>), Fusion Lighting престанува со работа на 31.12.2002 година поради големи финансиски проблеми. Според тоа, иднината на сулфурните сијалици останува неизвесна и зависи од плановите на наследникот на патентните права за сулфурните сијалици.

осветление на објектите и ретко кога корисниците треба да гледаат во нив, додека од сијалиците за сигнализација се бара спротивното. Второ, сјајноста на најпопуларните сијалици (т.е. СВВ) е голема, но сјајноста на сијалиците за сигнализација треба да биде релативно мала, за тие да не предизвикуваат директно блескотење. Тој услов наполно го исполнуваат СД. Трето, сијалиците за општа намена, во најголем број случаи, произведуваат бела светлина и за да се применат за сигнализација им е неопходен соодветен филтер во боја, а СД директно произведуваат светлина во боја. Покрај тоа, специфичното производство на СД во боја ја надминува ефикасноста на системот составен од СВВ и соодветен филтер за боја, комбинација што многу често се користи во сообраќајната сигнализација.

Веќе во 2006 година се располагало со СД во боја чиешто специфично производство го надминувало специфичното производство на СВВ. Меѓутоа, флуксот што го произведува една СД е релативно мал и во ретки случаи надминува десетина лумени. Но, она што ги чини СД конкурентни во однос на другите извори на светлина е просторот во којшто е распределен тој флукс. Имено, конструкцијата на светлечките диоди е таква што флуксот (со помош на леќата поставена на врвот од диодата) може да биде распределен во релативно мал просторен агол, така што и светлинската јачина може да биде релативно голема. Како резултат на тоа, се постигнува и сјајноста на СД да биде релативно голема.

Кон крајот на дваесеттиот век технологијата за производство на СД напреднува и на пазарот се јавуваат првите сини СД. Притоа е овозможено добивање „бела светлина“ со помош на една од следниве техники.¹⁰¹

- со мешање на светлината добиена од три (или повеќе) монохроматски СД (црвена, зелена и сина);
- со сина СД и фосфорни облоги што делумно ја пропуштаат сината светлина, а остатокот го претвораат во светлина со други бранови должини (зелена и црвена);
- со СД што произведуваат УВ зраци и фосфорни облоги што го претвораат УВ зрачење во видлива светлина.

Техниката со три СД (црвена, зелена и сина) овозможува, со нагудување на струјата во одделните диоди, да се добие светлина со трихроматски координати (т.е. ССТ) соодветни на намената. На сликата 5.91.а е прикажан спектралниот состав на светлината добиена со оваа техника. ИРБ (Ra) на светлината добиена на овој начин може да биде поголем од 95.

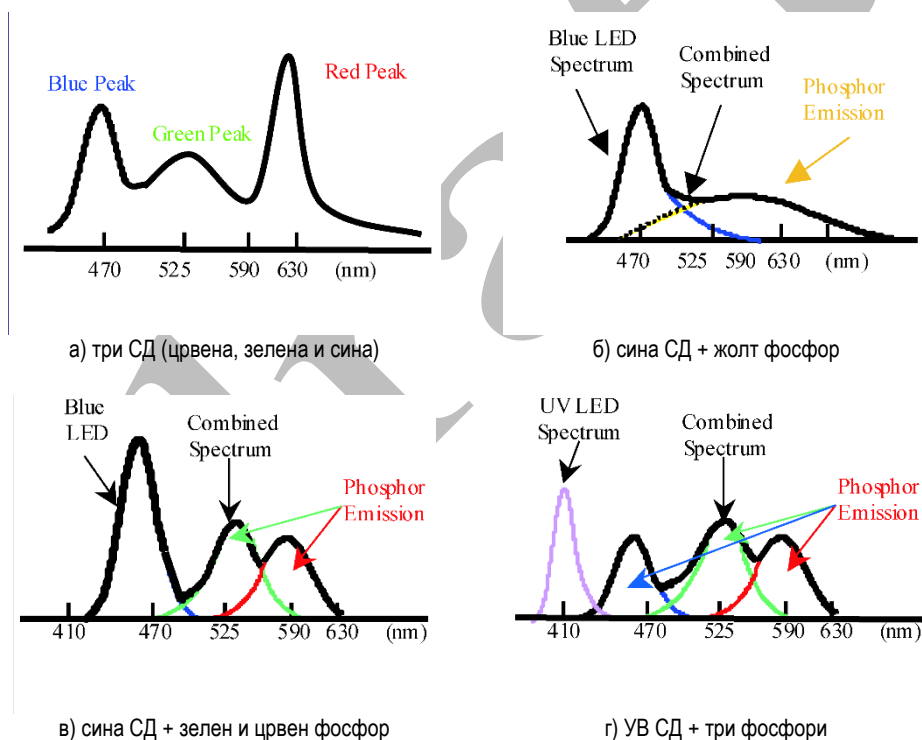
Со вториот начин белата светлина се добива со помош на фотолуминисценција што се јавува во фосфорната облога поставена на сината СД. Составот и дебелината на фосфорната облога овозможуваат добивање различен спектрален состав на светлината. Фосфорната облога пропушта дел од сината светлина произведена во СД, а дел од сината светлина претвора во светлина со други бранови должини. Најчесто се користи таканаречен жолт фосфор, со чија примена се добива светлина што овозможува ИРБ од околу 75. Релативно нискиот ИРБ се должи на недостатокот на

¹⁰¹ Сините СД, што се користат за добивање на бела светлина, многу често се нарекуваат „бели СД“.

бранови должини од црвениот регион. Спектралниот состав на светлината добиена со сина СД и жолта фосфорна облога е прикажан на сликата 5.91.б.

Ако сината СБ се обложи со зелен и црвен фосфорен слој добиената светлина ќе биде побогата со бранови должини од црвениот регион (слика 5.91.в) и, како резултат на тоа, ИРБ може да достигне и до 92 [56,57].

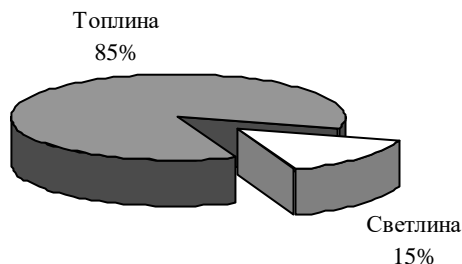
Кај третиот начин на добивање на светлина УВ зраци произведени од СД комплетно се апсорбираат од фосфорната облога, при што се врши нивната конверзија во видлива светлина. Најчесто се користат три фосфорни облоги што го претвораат УВ зрачење во светлина од регионите на сината, зелената и црвената светлина. Светлината добиена од ваквите УВ СД има спектрален состав прикажан на сликата 5.91.г. Поради недостатокот на доволно зрачење во синиот и црвениот регион (споредено со спектарот прикажан на сликата 5.91.а), ефикасноста на УВ СД со три фосфорни слоеви е многу помала отколку на останатите типови бели СД.



Слика 5.91 Спектрален состав на светлината на СД добиена со разни техники [56]

На сликата 5.92 е прикажан билансот на моќности за СД. Како што може да се забележи од сликата 5.92, СД имаат околу трипати поголемо зрачење (15%) во видливиот дел од спектарот на оптичкото зрачење отколку стандардна ВС (видете слика 5.18). Од друга страна, топлината што се генерира во СД целосно се предава на

околината преку кондукција, т.е. светлината од СД не е пропратена со топлинско зрачење.



Слика 5.92 Биланс на моќности за стандардна СД за бела светлина [118]

Специфичното производство на СД во боја е релативно големо и се движи во границите до 50 до 100 lm/W. Специфичното производство на белите СД со три диоди е во границите од 30 до 40 lm/W. Сините СД со една или две фосфорни облоги имаат специфично производство од 25 до 30 lm/W [56].

Како што претходно беше речено, СД во себе имаат вградено едноставен оптички систем (леќа) што ја насочува и распределува светлината во релативно мал просторен агол. Поради тоа, кај светилките што се наменети за СД, распределбата на светлинската јачина се постигнува со позиционирање и насочување на одделните СД во светилката. На тој начин, коефициентот на искористување на светилките¹⁰² е релативно голем, така што ефикасноста на системот СД + светилка е споредлива со ефикасноста на соодветен систем изведен со некои од класичните сијалици со електроди [118].

Трајноста на СД е многу поголема отколку трајноста на сијалиците со електроди и се движи од 50 до 100 илјади часови. Во раните години на развој на СД, нивниот светлински флукс кон крајот на животниот век изнесувал само 20 до 30% од номиналниот, додека денес е околу 70%.

Да забележиме дека трајноста на УВ СД е значително помала поради тоа што УВ имаат негативно (деградирачко) влијание врз смолите од кои се изработуваат куќиштата на СД.

Појавата на белите СД ја проширува примената на СД не само за сигнализација, туку и за осветление на отворени и затворени простори.

Релативно високата цена на белите СД и сè уште скромното специфично производство (во споредба со, на пример, ФСЦ) не овозможуваат нивна масовна примена како сијалици за општа намена. Примената е главно ограничена на системите за декоративно осветление (внатрешно и надворешно) и во автоиндустријата (предни светла на автомобилите). Сепак, во последно време веќе се појавуваат и светилки со СД за улично осветление.

Имајќи предвид дека развојот на СД е сè уште во фаза на експанзија, може да се очекува дека карактеристиките на СД ќе се подобруваат и понатаму, така што

¹⁰² Коефициентот на искористување на светилките е дефиниран во потпоглавјето 6.5.

нивната примена ќе се прошири и на областите во кои денес се користат релативно ефикасните ФСЦ, МХС и НСВП.

Во прилог на претходното тврдење е таканаречениот Хајтцов закон (Roland Haitz) според кој флуksот на СД (во последните 35 години) се зголемува двојно секои 18 до 24 месеци. Според овие предвидувања, може да се очекува дека номиналниот флуks на СД во 2010 ќе биде поголем од 200 lm. Во исто време, цената на СД сметана по единица флуks, од околу 100 USD/lm во 1970 година, до 2010 година се очекува да падне под 0,01 USD/lm [56,118].

5.5 Енергетска ефикасност на сијалиците и контролните уреди

Вкупните трошоци поврзани со изградбата и работата на системите за електрично осветление во зградите во текот на животниот век на системот се состојат од следните три компоненти: инвестициски трошоци за опрема и инсталирање, трошоци за одржување и трошоци за енергија. Според [73], структурата на овие трошоци е 33%, 12% и 55%, соодветно.

Само за илустрација, според [56], во 1999 година во САД вкупната потрошувачка на електрична енергија била околу 3 000 TWh, од коишто 21% биле искористени за осветление. Притоа, од електричната енергија за осветление:

- околу 40% ангажирале ВС и ХС, но во вкупната светлинска енергија тие сијалици учествувале со само околу 15% и
- околу 60% ангажирале СПГ, кои во вкупната светлинска енергија учествувале со околу 85%.

Од друга страна, според анализи направени кон крајот на последната деценија од XX век за 15-те земји членки на ЕУ, вкупната годишна потрошувачка на енергија за осветление во домаќинствата изнесува околу 86 TWh, што претставува околу 17% од вкупната потрошувачка на електрична енергија кај домаќинствата [74].

Претходно наведените информации говорат дека употребата на помалку ефикасните сијалици е значителна (што придонесува за голема потрошувачка на енергија), а ефектите се мали (бидејќи е релативно мало количество произведена светлина). Тоа значи дека би биле значајни заштедите на електричната енергија што би се добиле и со релативно мало подобрување на енергетската ефикасност на системите за осветление.

Во минатото енергетската ефикасност (или перформанса) на системите за осветление се изразува како инсталирана моќност на светилките по единица осветлувана површина. Меѓутоа, оваа мерка е индикација само за ангажираната електрична моќност, без да се води сметка за квалитетот на осветлението. Во последно време енергетската перформанса се определува како ангажирана електрична моќност за 100 lx осветленост на секој квадратен метар осветлувана површина.

Во рамките на мерките за зголемување на енергетската ефикасност (ЕЕ) спаѓаат и стандардите со коишто се упатува на користење енергетски поефикасни компоненти, т.е. напуштање на неефикасните ФС (како што се халофосфатните), обичните (PAR) рефлекторски сијалици и класичните (електромагнетни) придушници.

Освен тоа, зголемувањето на енергетската ефикасност на системите за осветление се постигнува и со примена на напредни системи за управување со осветлението во комерцијални и јавни објекти.

Во почетокот на последната деценија на XX век, индустриски развиените земји почнуваат да применуваат политика за стимулирање на енергетски ефикасни системи за осветление преку подобра информираност на потрошувачите и забрана за продажба на помалку ефикасни компоненти на системите за осветление.

Значајна мерка за подобрување на ЕЕ на системите за осветление претставува и задолжителното означување на ЕЕ на компонентите во овие системи (сијалици и придушници за ФС), слично како што тоа е направено со некои апарати за домаќинства (фрижидери, машини за перење и сл.).

Во ЕУ постојат две директиви што се однесуваат на енергетската ефикасност на компонентите: Директива 98/11 *Означување на енергетската ефикасност на сијалиците наменети за домаќинства* [25] и Директивата 2000/55 *Потреби за енергетска ефикасност на придушниците за флуоресцентни сијалици* [26].

Со Законот за енергетика од мај 2006 година [24] во Република Македонија се предвидени слични мерки за означување на енергетската ефикасност на електричните апарати.

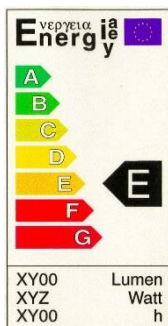
5.5.1 Означување на енергетската ефикасност на сијалиците

Со Директивата 98/11 ЕУ вовела задолжително означување на ЕЕ на сијалиците наменети за употреба во домаќинствата. Со оваа директива се опфатени сијалиците со вжарено влакно што се напојуваат од нисконапонските мрежи без трансформатори, компактните ФС (со и без вградени КУ) и ФСЦ, дури и кога не се наменети само за употреба во домаќинствата.

Наведената Директива не се однесува на:

- сијалиците со номинален флукс поголем од 6 500 lm,
- сијалиците со номинална моќност помала од 4 W,
- рефлекторските сијалици,
- сите сијалици што не се наменети за осветление (на пример, сигнални сијалици),
- сијалиците напојувани од останати извори на енергија (за батериски светилки, за автомобили и сл.), и
- сијалиците чијашто основна намена не е производство на светлина.

Енергетската ефикасност на сијалиците се означува со етикетата прикажана на сликата 5.93. На етикетата за ЕЕ, со латиничните букви од А до G, се означува *класата на ЕЕ* (КЕЕ). Покрај тоа, на етикетата, опционално, можат да бидат и следните информации: номинален флукс (Lumen), номинална моќност (Watt) и трајност (h).



Слика 5.93 Етикета за означување на ЕЕ на сијалиците за употреба во домаќинствата

Методологијата за определување на КЕЕ е „технолошки“ неутрална, т.е. класификацијата зависи само од *индексот на ЕЕ* (ИЕЕ), а не од типот на сијалицата. Една сијалица ќе припаѓа на класата А ако нејзината номинална моќност е помала или еднаква на референтната моќност за класата А, P_A . Референтната моќност за класата А, за ФС без вграден КУ, се пресметува според формулата:

$$P_A = 0,15 \cdot \sqrt{\Phi_{\text{ном.}}} + 0,0097 \cdot \Phi_{\text{ном.}}$$

додека за останатите сијалици, таа се пресметува според формулата:

$$P_A = 0,24 \cdot \sqrt{\Phi_{\text{ном.}}} + 0,0103 \cdot \Phi_{\text{ном.}}$$

каде што номиналниот флукс на сијалицата се изразува во лумени, а референтната моќност во вати.

Ако сијалицата не може да се класифицира во класата А, за неа ИЕЕ се пресметува како однос помеѓу номиналната моќност на сијалицата и нејзината „референтна“ моќност, $P_{\text{реф.}}$, т.е.

$$\text{ИЕЕ} = \frac{P_{\text{ном.}}}{P_{\text{реф.}}}$$

Референтната моќност $P_{\text{реф.}}$, за сијалиците со номинален флукс помал или еднаков на 34 lm се пресметува според формулата:

$$P_{\text{реф.}} = 0,2 \cdot \sqrt{\Phi_{\text{ном.}}}$$

додека за сијалиците со номинален флукс поголем од 34 lm се користи формулата:

$$P_{\text{реф.}} = 0,88 \cdot \sqrt{\Phi_{\text{ном.}}} + 0,049 \cdot \Phi_{\text{ном.}}$$

Класата на ЕЕ се определува врз основа на ИЕЕ според табелата 5.20.

Табела 5.20 КЕЕ на сијалиците во зависност од ИЕЕ

Класа на ЕЕ	Индекс на ЕЕ
B	ИЕЕ < 0,60
C	0,60 < ИЕЕ < 0,80
D	0,80 < ИЕЕ < 0,95
E	0,95 < ИЕЕ < 1,10
F	1,10 < ИЕЕ < 1,30
G	ИЕЕ > 1,30

За илустрација, во табелата 5.21 е прикажан преглед на класите на ЕЕ за најчесто употребуваните сијалици во домаќинствата.

Табела 5.21 Класа на ЕЕ на некои типови сијалици

Тип на сијалица	КЕЕ
ФСЦ/Т 26 и 16 mm	A
ФСЦ/М 26 mm и КФС без вградена придушница	B
ФСЦ/Х 26 и 38 mm	B
Трифосфорни КФС без вградена придушница	B, A
Трифосфорни КФС со вградена придушница	A, B
Халогени сијалици во вид на цевка (230 V)	E, D
Халогени сијалици во вид на цевка (230 V) со IRC	C, D
Волфрамови сијалици (двојна спирала)	E
Волфрамови сијалици (малку ефикасни, единична спирала)	E, F
Волфрамови сијалици со смалена сјајност (матирани или опализирани)	G

Со оглед на едноставниот облик и обемот на (задолжителните) информации на етикетите за ЕЕ на сијалиците, целната група на Директивата 98/11 се „обичните“ потрошувачи коишто немаат познавања за техничките карактеристики на електричните сијалици неопходни за проценка на нивната ЕЕ.

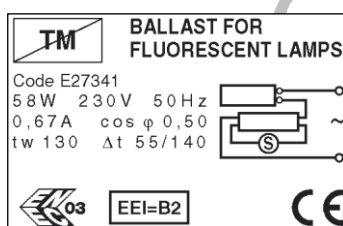
Со Директивата на ЕУ не се предвидува забрана за користење на помалку ефикасните сијалици, туку таа има за цел да ги информира „обичните“ потрошувачи за ефикасноста на електричните сијалици, со што се очекува да се намали користењето на помалку ефикасните светлински извори. Покрај тоа, имајќи предвид дека етикетата за означување на ЕЕ на сијалиците е слична на етикетите за останатите апарати за домаќинства и дека сијалиците се купуваат многу почесто од останатите апарати, се очекува дека со нејзината примена ќе се подигне свеста за ЕЕ и за останатите уреди што се користат во домаќинствата.

Со Директивата се опфатени само сијалиците за употреба во домаќинствата, но имајќи предвид дека истиот вид на сијалици се користи и во останатите објекти, тоа практично значи дека со неа се опфатени сијалиците со значајно учество во потрошувачката на електрична енергија за добивање светлина.

Класата на ЕЕ ја дефинира производителот на сијалицата врз основа на однапред дефинирана процедура и методологија. Не е предвидено таа да ја дефинираат или проверуваат независни лаборатории, туку тоа е оставено на здруженијата на потрошувачи или на конкурентските производители.

5.5.2 Означување на енергетската ефикасност на контролните уреди за флуоресцентни сијалици

Во 1998 година CELMA вовела (незадолжителна) шема на означување на ЕЕ на придушниците за ФС. Производителите на придушници, членки на CELMA, се обврзале да ја објават ЕЕ на КУ како што е прикажано на етикетата од сликата 5.94.



Слика 5.94 Означување на ЕЕ на придушниците за ФС според CELMA

Според класификацијата на CELMA, придушниците се поделени во седум класи, означени со латиничните букви од А до D, и тоа:

- класите А1, А2 и А3 се предвидени за електронските придушници¹⁰³,
- класите В1 и В2 се однесуваат на електромагнетните придушници со многу мали и мали загуби (бакарни навивки и висококвалитетни магнетни лимови), соодветно,
- класата С е наменета за електромагнетните придушници со нормални загуби (бакарни навивки), и
- класата D е наменета за електромагнетните придушници со зголемени загуби (алуминиумски навивки).

Во табелата 5.22 е прикажана класификацијата на придушниците за ФС. Со зацрнети букви се означени најчесто употребуваните ФСЦ/26.

Во 2000 година ЕУ ја донесува Директивата 2000/55 [26] со која, во период од пет години, на пазарите на ЕУ треба постепено да се забрани продажбата на придушници од класите С и D. Иако Директивата експлицитно не се повикува на класите на ЕЕ според CELMA, таа ги користи истите моќности за сијалици и КУ од табелата 5.22.

Основа за донесувањето на Директивата 2000/55 се стандардот EN 50295 од 1998 година (со кој се стандардизирани процедурите за мерење на ЕЕ на ФС и

¹⁰³ Класата А1 е предвидена за електронските придушници со можност за регулација на флуксот.

придушниците за работа при фреквенција од 50 Hz и високи фреквенции) и (незадолжителната) шема за означување на ЕЕ на придушниците за ФС (вовдена во 1998 година).

Со Директивата 2000/55 се опфатени придушниците за ФС за мрежен (низок) напон според стандардот EN 50294, а истата не се однесува на придушниците вградени во самите сијалици (КФС) и придушниците што се составен дел на светилки предвидени за вградување во намештај и придушниците наменети за пазари надвор од Унијата.

Директивата 2000/55 е донесена во ноември 2000 година, а се имплементирала во три фази. Во првата фаза, до мај 2002 година, на пазарот на ЕУ биле дозволени сите класи КУ. Во втората фаза е забранета продажбата на придушниците чијашто моќност, заедно со сијалицата, ги надминува вредностите што се однесуваат на класата С. Во третата фаза, којашто започнува пет години по донесувањето на директивата, се забранува продажбата на КУ чијашто моќност, заедно со сијалицата, ги надминува вредностите за класата В2. Практично, после ноември 2005 година, на пазарите во ЕУ можат да се продаваат КУ од класите А и В.

Постои значајна разлика помеѓу Директивите 98/11 и 2000/55 поради тоа што со втората се забранува продажбата (а со тоа и вградување) на помалку ефикасните КУ. Ова е направено бидејќи целната група на оваа Директива не се крајните потрошувачи на енергија, туку инвеститорите и техничките лица. Имено, придушниците се компоненти од светилките што „обичните“ потрошувачи не ги набавуваат (или специфицираат). Од друга страна, во најголем број случаи, поединците што се задолжени за спецификација на опремата и нејзина набавка се одлучуваат за значително поевтини варијанти (во интерес на сопственици на деловни простории), а корисниците на системите за осветление (закупувачи на деловниот простор) се тие што би ги почувствувале предностите на ефикасните придушници, т.е. тие ги плаќаат сметките за електрична енергија.

Европската унија била поттикната за ваков пристап затоа што пазарните услови не биле доволно поттикнувачки за ефикасните КУ да заземат позначителен дел во структурата на КУ присутни на пазарот.

Со примената на Директивата 2000/55 се очекува дека потрошувачката на електрична енергија за осветление во 2022 година ќе се намали за околу 12 TWh/година. Воедно, емисијата на CO₂ ќе се намали за околу 6 Mt/година. Направените проценки укажуваат дека, на таков начин, во периодот од првите дваесет години од примената на Директивата, ќе се постигнат економски ефекти од околу 9 милијарди евра.

Табела 5.22 Класификација на придушниците наменети за ФС според CELMA

Тип на сијалица	Моќност на сијалицата W		Најголема дозволена моќност на сијалицата со придушница (W) за одделни класи					
	50 Hz	Висока фреквенција	A2	A3	B1	B2	C	D
ФСЦ	15	13,5	16	18	21	23	25	> 25
	18	16	19	21	24	26	28	> 28
	30	24	31	33	36	38	40	> 40
	36	32	36	38	41	43	45	> 45
	38	32	38	40	43	45	47	> 47
	58	50	55	59	64	67	70	> 70
КФСЕ со 2 цевки	70	60	68	72	77	80	83	> 83
	18	16	19	21	24	26	28	> 28
	24	22	25	27	30	32	34	> 34
	36	32	36	38	41	43	45	> 45
	–	40	44	46	–	–	–	–
КФСЕ со 4 цевки	–	55	59	63	–	–	–	–
	18	16	19	21	24	26	28	> 28
	24	22	25	27	30	32	34	> 34
КФСЕ со 4 цевки во една рамнина	36	32	36	38	41	43	45	> 45
	10	9,5	11	13	14	16	18	> 18
	13	12,5	14	16	17	19	21	> 21
	18	16,5	19	21	24	26	28	> 28
КФСЕ со 6 цевки	26	24	27	29	32	34	36	> 36
	18	16	19	21	24	26	28	> 26
	26	24	27	29	32	34	36	> 36
	–	32	36	39	–	–	–	–
КФСЕ 2D ¹⁰⁴	–	42	46	49	–	–	–	–
	10	9	11	13	14	16	18	> 18
	16	14	17	19	21	23	25	> 25
	21	19	22	24	27	29	31	> 31
	28	25	29	31	34	36	38	> 38
	38	34	38	40	43	45	47	> 47
–	55	59	63	–	–	–	–	

104 Слика 5.51.в

6 СВЕТИЛКИ

6.1 Општо за светилките

Светилките, како елементи на системите за осветление, имаат две основни функции:

- прераспределба на светлинскиот флукс на сијалиците во просторот, и
- заштита на сијалиците од штетни дејства на околината, како и заштита на околината од дејствата на сијалиците.

Покрај тоа, светилките треба да обезбедат механичко прицврстување на сијалиците и нивно поврзување на електричната инсталација.

Освен една или повеќе сијалици, светилката ги содржи следните делови:

- елементи за поврзување со електричната инсталација заедно со контролните уреди (ако се потребни),
- оптички систем за прераспределба на светлинскиот флукс, вклучувајќи ги и потребните држачи за сијалиците, и
- куќиштето на светилката во кое се сместени оптичкиот систем и приклучниот дел.

Куќиштето на светилката го обезбедува нејзиното прицврстување и содржи елементи за заштита на сијалиците и/или надворешната околина.

Некои од функциите на светилките наметнуваат спротивставени карактеристики. Така, на пример, елементите со коишто се намалува влијанието на влагата од амбиентот можат да имаат негативно влијание врз ефикасноста на оптичкиот систем на светилките или врз условите за одведување на топлина.

Практично е невозможно да се произведе светилка што ќе биде ефикасна за примена во секакви услови на работа и за секоја намена. Поради тоа, светилките се произведуваат со оптимални конструктивни и фотометриски карактеристики, во согласност со улогата за која се наменети и средината за која се предвидени. Од голема важност, како од економски така и од технички аспект, е светилките да бидат соодветно одбрани за дадените услови на работа.

За да може да се одбере соодветен тип на светилка, при проектирање на електричното осветление е нужно да се знаат конкретните услови во кои ќе работи светилката. Несоодветно одбрана светилка не само што може да биде причина за лошо и некономично осветление или за намалена трајност на уредите за осветление, туку може да биде предизвикувач на пожар или експлозија со несогледиви последици.

Покрај чисто техничките аспекти, при изборот на светилка треба да се води сметка и за естетиката. Добро избраната светилка хармонично се вклопува во амбиентот и придонесува за негово оплеменување, и обратно. Затоа, изборот на соодветна светилка за еден објект претставува битен услов за изготвување добро светлотехничко решение.

6.2 Поделба на светилките

Светилките можат да се класифицираат на неколку начини. Како критериуми за поделба се користат: фотометриски карактеристики, конструктивни карактеристики, поле на примена, типот на сијалиците, начинот на поставување и др.

6.2.1 Поделба според фотометриските карактеристики

Според фотометриските карактеристики во употреба се класификациите на CIE, IESNA и NEMA. Класификациите на IESNA и NEMA се, главно, наменети за светилките за надворешна монтажа и се употребуваат во САД.

Според класификацијата на CIE светилките се поделени во пет групи. Поделбата е направена врз основа на податокот за процентот од флуksот што светилката го зрачи во долниот полупростор, во услови кога нејзината оптичка оска е вертикална, со ориентација надолу. Претпоставувајќи дека оптичките оски на светилките се вертикални и ориентирани надолу, во табелата 6.1 се прикажани основните карактеристики на светилките според оваа класификација.

Табела 6.1 Класификација на светилките според CIE

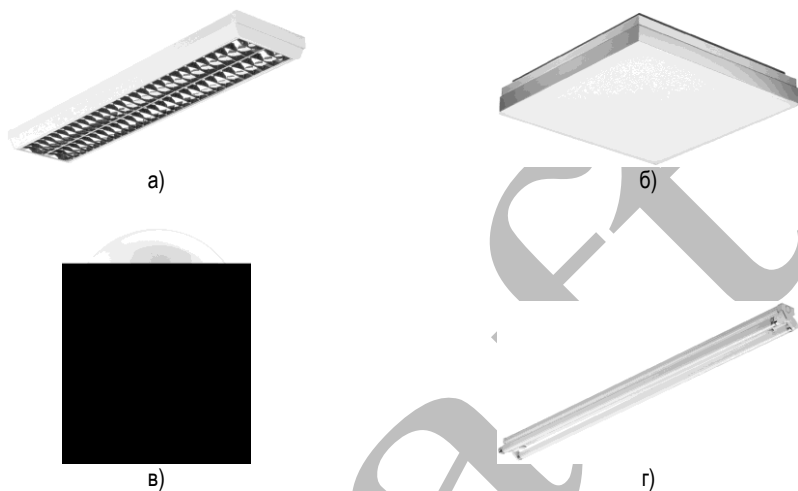
Светилки за	Процент на флуksот израчен во долниот полупростор	Ефекти во системот за осветление, карактеристики и примена
директно осветление	> 90%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ остри сенки ▪ можна појава на директно и/или рефлексно блескотење ▪ едноставни оптички системи ▪ простории со стаклен покрив, простории со висок плафон, фабрички хали, магацини, спортски терени, патишта, улици, плоштади, фасади на згради и сл. ▪ светилки за дополнително осветление
полу-директно осветление	60 до 90%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ сенките не се толку остри ▪ појавата на блескотење помалку изразена ▪ продавници, канцеларии, работилници, станови и сл. ▪ сенките не се остри ▪ намалена можност за појава на рефлексно блескотење
општо дифузно осветление	40 до 60% ¹⁰⁵	<ul style="list-style-type: none"> ▪ добар коефициент на искористување на осветлението може да се постигне ако плафонот и ѕидовите се светли ▪ предавални, канцеларии, продавници и сл.
полу-индиректно осветление	10 до 40%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ многу слаби сенки без остри граници ▪ блескотењето не се јавува ▪ степенот на искористувањето многу зависи од одбивните својства на плафонот и ѕидовите ▪ станови, канцеларии, музеи и слично.
индиректно осветление	< 10%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ практично незабележливи сенки ▪ нема ниту директно ниту рефлексно блескотењето ▪ просторот е рамномерно осветлен што создава пријатен впечаток ▪ степенот на искористување е мал и многу зависи од одбивните својства на плафонот и ѕидовите ▪ кина, театри, сали за концерти, изложбени павилјони и слични објекти

Треба да се напомене дека некои светилки за директно и полу-директно осветление имаат конструктивни карактеристики што овозможуваат светилката да се користи и како светилка за индиректно, т.е. полу-индиректно осветление. Кај овие светилки промената се постигнува со едноставно завртување на светилката за 180° околу нејзина хоризонтална оска. Покрај тоа, голем број светилки се предвидени да работат во положби во кои нивните оптички оски не се вертикални, но и нивната класификација се прави врз основа на процентот на флуksот што светилката го зрачи

¹⁰⁵ Флуksовите што светилката ги зрачи во горниот и долниот полупростор се приближно еднакви. Во оваа група светилки спаѓаат и таканаречените светилки за директно-индиректно осветление коишто се карактеризираат со тоа што емитураат релативно малку светлина во правци блиску до хоризонталата.

во долниот полупростор, во услови кога нејзината оптичка оска е вертикална и со ориентација надолу.

На сликата 6.1 се прикажани примери на светилки за директно, полу-директно и општо дифузно осветление, а на сликата 6.2 се прикажани светилки коишто можа да бидат светилки за директно или индиректно осветление.



Слика 6.1 Светилки за директно, полу-директно и општо дифузно осветление [108]



Слика 6.2 Светилки за директно или индиректно осветление

Кај светилките за осветление на сообраќајници за моторен сообраќај се поставуваат релативно строги барања во поглед на ограничувањето на блескотењето. Поради тоа, во разните национални стандарди примената на светилките за улично осветление е условена во зависност од обликот на фотометриското тело, поточно од правецот на максималната светлинска јачина.

Како карактеристични големени се користат големината на аголот што со вертикалата го зафаќа правецот во којшто светлинската јачина е најголема и светлинската јачина во правците што со вертикалата зафаќаат агли од 80° или повеќе.

Во таа смисла светилките за сообраќајници за моторен сообраќај можат да се поделат во три групи (табела 6.2):

- засенети (*cut-off*),

- полузасенети (*semi cut-off*), и
- незасенети (*non cut-off*).

Табела 6.2 Дефиниција на засенетоста на светилките за улично осветление [1,2]

Тип на светилката	Најголем дозволен агол во однос на вертикалата за кој се јавува I_{max}	Највисоки дозволени вредности на светлинската јачина во карактеристични правци cd/klm	
		I_{80°	I_{90°
Засенета	65°	30	10
Полузасенета	70°	100	50
Незасенета	–	–	1000 cd

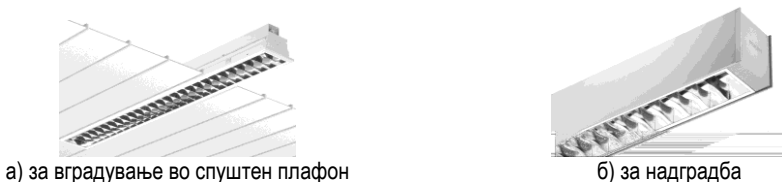
6.2.2 Поделба според условите на работа и монтажата

Според работните услови за кои се предвидени, разликуваме светилки за внатрешна и надворешна монтажа. Основната разлика помеѓу овие два типа светилки се состои во тоа што конструкцијата на светилките за внатрешна монтажа главно е насочена кон заштита на околината (корисниците) од штетното влијание на сијалиците/светилките, додека кај светилките за надворешна монтажа тоа е обратно. Се разбира, има голем број исклучоци од ова правило. На пример, постојат светилки за внатрешна монтажа наменети за простории со: многу влага, експлозивни гасови и пари, агресивни гасови и пари, со многу прав итн.

Во зависност од тоа за какви објекти се наменети (објекти за домување, комерцијални или индустриски), светилките за внатрешна монтажа имаат специфични конструктивни и фотометриски карактеристики. Во рамките на секоја од овие подгрупи можна е натамошна поделба според светлинскиот извор, начинот на монтажа и прицврстување итн.

На сликата 6.3 се прикажани примери на светилки за ФСЦ, наменети за комерцијални објекти за вградување во спуштен плафон и за надградба, додека на сликата 6.4 се прикажани примери на светилки, главно, наменети за индустриски објекти.

Кај светилките наменети за надворешна монтажа главно разликуваме три групи: светилки за осветление на пешачки улици (слика 6.5), светилки за осветление на сообраќајници за моторен сообраќај (слика 6.6) и рефлекторски светилки за осветление на спортски терени и згради (слика 6.2.a).



Слика 6.3 Примери на светилки за ФСЦ наменети за комерцијални објекти [108]



Слика 6.4 Примери на светилки за индустриски објекти [108]



Слика 6.5 Примери на светилки за осветление на пешачки улици и слични објекти [108]



а) за улици и патишта

б) за тунели





Слика 6.6 Примери на светилки за осветление на улици, патишта и тунели [108]

6.3 Конструктивни карактеристики на светилките

Конструктивните карактеристики на светилките се предмет на повеќе меѓународни и национални стандарди и/или препораки (ISO, IEC, CEN, CENELEC и др.). Овие документи ги пропишуваат минималните барања што светилките треба да ги задоволат од аспект на електрична, електромагнетна, термичка и механичка заштита.

Електричната заштита на светилката има за цел да обезбеди заштита од индиректен допир. Европскиот стандард EN 60598 дефинира четири класи на електрична заштита за светилките. Во табелата 6.3 се прикажани основните карактеристики на секоја од овие четири класи.

Табела 6.3 Класи на електрична заштита според EN 60598 [5,73]

Класа на заштита	Графички симбол	Опис на заштитата
0		Изолација на деловите под напон. Не е дозволена употреба во најголем број земји.
I	 или I	Изолација на деловите под напон и заземјување на изложените метални делови преку заштитен спроводник.
II		Двојна изолација. Изолација на деловите под напон и изолација на изложените метални делови. Нема потреба од поврзување со системот за заземјување.
III		Напојување со мал напон (до 50 V) преку трансформатор за раздвојување или батерии.

Стандардот EN 60598 исто така ги пропишува и барањата што светилките треба да ги исполнат од термички аспект. Во нив се дефинираат максимално дозволените температури на одделните компоненти на светилките.

Светилките, како и другите електрични уреди, во текот на својата работа не смеат да предизвикаат електромагнетни пречки на околината и останатите уреди. Директивата 89/336 на ЕУ (со дополние 92/31) за електромагнетна компатибилност и пратечките стандарди треба да обезбедат заштита на околината од електромагнетни влијанија и непречена работа на електричните уреди.

Механичката заштита на светилките од надворешни влијанија и заштитата на околината и луѓето од штетните дејства на светилките најчесто е најсложениот (и најскап) дел од конструкцијата на куќиштето на светилката.

Заштитата од надворешни влијанија треба да обезбеди непречена и сигурна работа на светилката за дадените услови на работа. Влагата и прашина се најчести причинители за оштетувања или намалување на функциите на светилките, па поради тоа куќиштата на светилките треба да имаат конструкција што оневозможува навлегување на влага и прашина во нив. Присуството на влага може да предизвика

корозија на металните делови и дефекти во електричниот дел на светилката (на пр. куси врски). Влагата, прашина и инсектите се нафаќаат на површините на оптичките системи и ги намалуваат коефициентите на одбивање и/или пропуштање. На тој начин се намалува и флуксот што ќе ја напушти светилката, условувајќи зголемени трошоци за нејзиното чистење.

Покрај тоа, некои светилки треба да работат во услови кога во околината има хемиски агресивни материи. Светилките за такви услови треба да имаат заштита од влага и прашина, а нивните куќишта треба да бидат изработени од материјали што се отпорни на присутните агресивни материи.

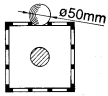
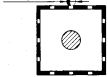
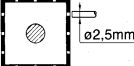
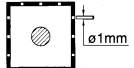

Степенот на заштита на светилките од влага и прашина (механичка заштита) има големо влијание врз нивната цена. Поради тоа е сосема разбирливо дека степенот на заштита треба да биде одбран соодветно на условите во кои ќе работи светилката.

Европскиот стандард EN 60529 (и соодветниот меѓународен стандард ИЕС 60529) ги дефинира класите на заштита (и нивното означување) на куќиштата на електричните уреди од навлегување на цврсти предмети, прашина и влага. Покрај тоа, со овој стандард се дефинирани и процедурите за тестирање на уредите.


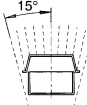
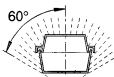

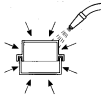
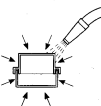
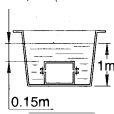
За означување на степенот на заштита се користи шемата во следниот облик: кратенката IP проследена со две цифри XY и, опционално, два дополнителни знака. На пример, целосната ознака на заштитата на еден уред би била IP 43 A M. Треба да се забележи дека дополнителните знаци се користат во мал број случаи.

Првата цифра X ја означува заштитата од навлегување на страни предмети, вклучувајќи и заштита од допир на деловите под напон, додека втората цифра Y ја означува заштитата од навлегување на вода. Во табелите 6.4 и 6.5 се дадени описите на степените на заштита од навлегување на страни тврди тела и вода, означени со првата цифра X, односно втората цифра Y.

Табела 6.4 Ознаки за степенот на заштита од навлегување на страни тврди тела и допир на деловите под напон (IP Xy) според EN 60529 [5,90]

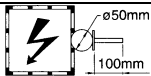
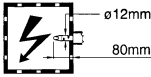
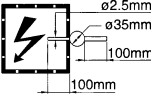
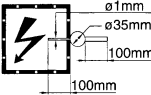
X	Графички опис	Опис на заштитата од навлегување на страни тврди тела и допир на деловите под напон
0	Нема	Нема заштита
1	 $\varnothing 50mm$	Навлегување на предмети со димензија поголема од 50 mm Допир со рака
2	 $\varnothing 12,5mm$	Навлегување на предмети со димензија поголема од 12,5 mm Допир со прст
3	 $\varnothing 2,5mm$	Навлегување на предмети со димензија поголема од 2,5 mm Допир со жица
4	 $\varnothing 1mm$	Навлегување на предмети со димензија поголема од 1 mm Допир со игли, шајки и сл.
5		Делумно навлегување на прашина
6		Потполна заштита од прашина

Табела 6.5 Ознаки за степенот на заштита од навлегување на вода (IP xY), според EN 60529 [5, 90]

Y	Графички опис	Опис на заштитата
0		нема
1		Кондензација и вертикални капки вода
2		Кондензација и капки вода што паѓаат под агол до 15° во однос на вертикалата
3		Дожд, но не и прскање од долна страна
4		Прскање на вода од сите правци
5		Прскање од сите правци со слаб млаз (Ф6,3 mm, 12,5 l/min)
6		Прскање од сите правци со јак млаз (Ф12,5 mm, 100 l/min)
7		Привремено потопување во вода
8		Постојано потопување во вода (во договор помеѓу нарачателот и производителот)

Третиот знак (буква) се користи за означување на заштитата од допир на деловите под напон во случаите кога таа заштита е различна (повисока) од заштитата од навлегување страни тврди тела. Во табелата 6.6 е прикажано објаснувањето на дополнителната ознака за заштита од допир на деловите под напон.

Табела 6.6 Ознаки за степенот на заштита од допир на деловите под напон (IP XY ? ?) според EN 60529 [5,90]

Ознака	Графички опис	Опис на заштитата од допир на деловите под напон
A		Допир со рака
B		Допир со прст
C		Допир со жица
D		Допир со игли, шајки и сл.

Четвртиот знак (буква) се користи во случаите кога е потребно дополнително да се опишат условите на тестирање на заштитата од вода (работа во движење, мирување и сл.).

Да забележиме дека практично не се можни сите комбинации на цифрите X и Y. Исто така, освен за мал број светилки (предвидени за работа во вода со степен на заштита IP X7 или IP X8) е $X \geq Y$.

На пример, со ознаката IP 32 D се означува заштита од навлегување на предмети со дијаметар поголем од 2,5 mm и капки вода што паѓаат под агол што не е поголем од 15° во однос на вертикалата. Латиничната буква D означува дека заштитата од допир на деловите под напон е за многу тенки предмети (игли, шајки и сл.), т.е. таа е повисока од соодветната заштита што се однесува на навлегувањето на страни тврди предмети.

Најмалиот степен на заштита за светилките за внатрешна монтажа е IP 20 што обезбедува заштита на деловите под напон од допир со прст, а без заштита од влага. За светилките за надворешно осветление се препорачува степен на заштита што не е помал од оној означен со IP 54.

Поголем степен на механичка заштита на една светилка, по правило, значи и поскапа светилка, не само затоа што е потребно да се употребат поскапи материјали или системи за подобра механичка заштита туку и поради тоа што на тој начин се влошуваат условите за одведување на топлината за што се потребни дополнителни (поскапи) решенија за ладење на светилката.

Поради тоа, многу често, куќиштата на светилките за надворешно осветление се направени од два дела, со различни степени на механичка заштита. Во првиот дел, со понизок степен на механичка заштита, се сместени електричниот приклучок, КУ и евентуалните помошни уреди. Вториот дел, наменет за оптичкиот систем и сијалицата, е изведен со повисок степен на заштита. На тој начин може да се обезбеди на оптичкиот систем да не се нафаќа прашина и периодот на негово чистење да биде

многу подолг. Тоа е многу значајно ако се има предвид дека трошоците за работна рака за чистење на светилките се сè повисоки.

Една од конструктивните карактеристики на светилките е и отпорноста на удар. Европскиот стандард EN 50102 ги дефинира степените за отпорност од удар и методите на тестирање. Кукиштето на светилката треба да биде способно да издржи механички удар со определена енергија, а притоа светилката да не ги изгуби функциите на електрична и механичка заштита и основната функција – да зрачи светлина. Степенот на заштитата се означува со кратенката IK, проследена со две цифри. Во табелата 6.7 е прикажана енергијата на механичкиот удар (во цули) за различните степени на отпорност од удар.

Табела 6.7 Енергија на ударот за различни степени на отпорност од удар (според EN 50102) [88]

Ознака	Енергија на ударот (J)
IK00	–
IK01	0,15
IK02	0,2
IK03	0,3
IK04	0,5
IK05	0,7
IK06	1
IK07	2
IK08	5
IK09	10
IK10	20

6.4 Оптички системи

Најголем број сијалици, со исклучок на некои СВВ, ЖС и МХС со вградени рефлектори, зрачат светлински флуks во сите правци. За ефикасно користење на такви сијалици се потребни соодветни светилки. Секоја од нив треба да биде опремена со оптички систем со којшто ќе се обезбеди фотометриското тело на светилката да има облик соодветен на нејзината намена.

Оптичките системи на светилките се изведуваат како: рефлектори, рефрактори, дифузори и заклони. Многу често, оптичките системи се изведени и како комбинација на два или три од претходните основни типови.

6.4.1 Рефлектори

Со одбивање од површината на рефлекторите светлинскиот флуks од сијалиците се насочува во саканите правци. Рефлекторите најчесто се изработуваат од метал или пластика, со површини што се обработени соодветно на потребите за распределба

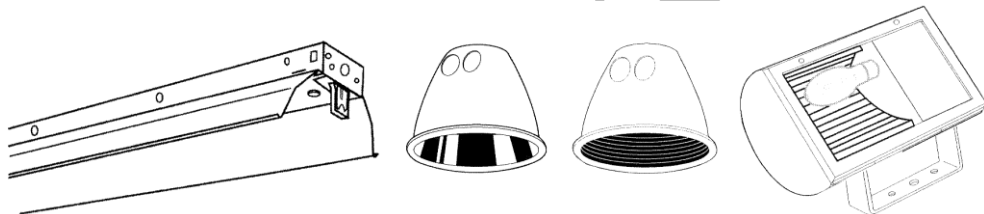
на одбиениот флуks. Површината на рефлекторот може да биде изработена така што одивањето на светлината да биде насочено, дифузно, полудифузно и мешано.

За светилките кај коишто е потребно да се обезбеди прецизно насочување на светлината се користат рефлектори што одбиваат насочено. Површината на овие рефлектори најчесто е полиран алуминиум со многу висок коефициент на насочено одбивање (табела 4.2). Дополнително, површината на рефлекторот може да биде изработена од повеќе помали површини поставени под различни агли за да се добие посакуваната распределба на флуksот што ја напушта светилката.

Во останатите случаи, кога не е потребно да се обезбеди прецизно насочување на светлина, рефлекторите се изработени од материјали што одбиваат полудифузно, на пример, бело обоени метални површини.

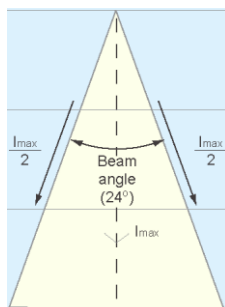
Површините што ја одбиваат светлината дифузно немаат практична примена кај светилките затоа што тие имаат мало влијание врз прераспределбата на светлината во светилките.

На сликата 6.7 се прикажани светилки кај коишто оптичкиот систем е изведен само со рефлектори.



Слика 6.7 Примери на светилки со рефлекторски оптички систем [6]

Терминот рефлектори, во смисла на оптичкиот систем, не треба да се поистоветува со истиот термин кога станува збор за тип на светилка. За да не дојде до забуна, во овој труд ќе го користиме терминот рефлекторска светилка. Рефлекторските светилки се светилки кај коишто оптичкиот систем е рефлекторски и се одликуваат со тоа што зрачат флуks распределен во релативно мал просторен агол. Кај рефлекторските светилки најголемата светлинска јачина се јавува во правец на нивната оптичка оска. Двојната вредност од аголот во однос на оптичката оска, за кој се јавува половина од максималната вредност на светлинската јачина, се нарекува „агол на снопот“ или „отвор на рефлекторската светилка“ (слика 6.8).



Слика 6.8 Скица за дефиниција на отвор на рефлекторска светилка

6.4.2 Рефрактори и дифузери

Поминувајќи низ материјали со различни индекси на прекршување, светлината се прекршува и го менува правецот на простирање (видете потпоглавје 4.2). Ова својство е искористено кај рефракторите што се направени од провидни материјали (стакло или пластика) во облик што овозможува да се постигне посакуваната прераспределба на светлината. Рефракторите се изработуваат на тој начин што на едната површина од планпаралелна плоча од стакло или пластика се нанесуваат многу мали испакнати (или вдлабнати) полу-сфери, призми или пирамиди. Вообичаено, ваквата плоча се нарекува *призматична лека*.

Прекршувањето на светлината во призматичната лека овозможува привидно зголемување на плоштината на видливата површина на сијалицата поставена во светилката, а со тоа и намалување на нејзината сјајност.

Примери на светилки со рефракторски оптички системи се прикажани на сликата 6.9.

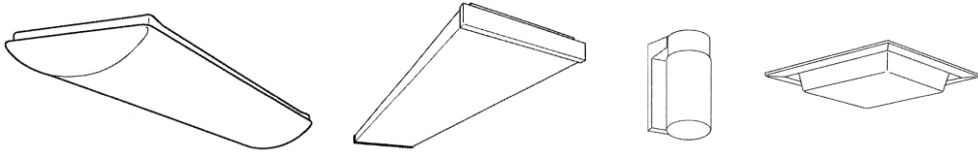


Слика 6.9 Примери на светилки со рефракторски оптички систем [6]

Дифузерите, слично како и рефракторите, се од материјали што пропуштаат светлина. Како што и самото име наведува, тие овозможуваат светлинскиот флуks што ќе ја напушти светилката да биде распределен во релативно голем просторен агол (дифузно или полу-дифузно пропуштање, видете потпоглавје 4.3). Бидејќи, при овие начини на пропуштање, ликовите на предметите практично не се забележливи или се со одвај препознатливи контури и поради тоа што површината што емитура светлина е значително поголема од површина на сијалицата, дифузерите обезбедуваат многу

големо намалување на сјајноста на светилките. Тие се изработуваат од бела поликарбонатна (или слична) пластика или опално или матирано стакло.

На сликата 6.10 се прикажани примери на светилки кај коишто оптичкиот систем е изведен со дифузери.



Слика 6.10 Примери на светилки со дифузери [6]

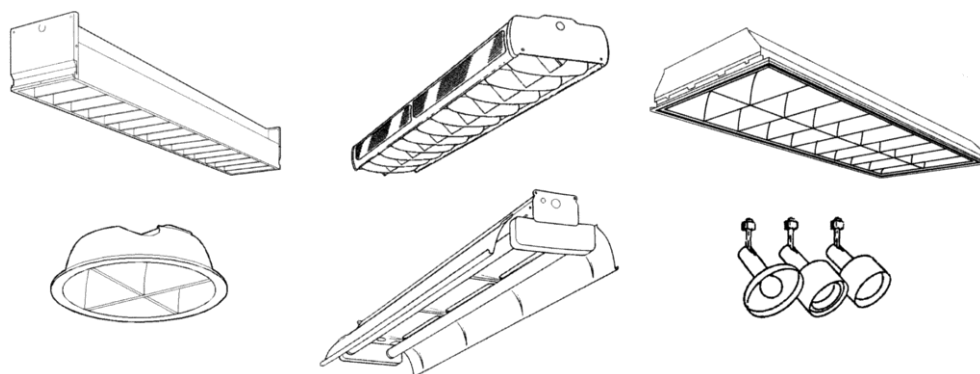
6.4.3 Заклони

Заклоните се изработуваат од полупровидни или непровидни материјали (стакло, пластика или метал) со кои се редуцира или елиминира видливоста на сијалицата(ите) од определени правци надвор од светилката. Како и кај дифузерите, полупровидните заклони обезбедуваат дифузна светлина, но заклоните тоа го овозможуваат само за некои агли на набљудување на светилката, т.е. тие само делумно ја засенуваат сијалицата. Непровидните заклони најчесто се изработуваат од материјали со големи коефициенти на одбивање и се поставуваат така што ја елиминираат директната видливост на сијалиците во светилката од определени правци и обезбедуваат насочување на светлината во саканите правци. Поради тоа, заклоните имаат и функција на рефлектор.

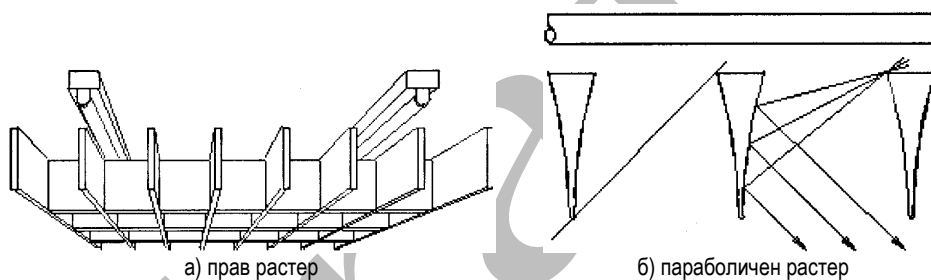
На сликата 6.11 се прикажани примери на светилки со заклони.

Ако заклоните се изведени така што формираат мрежа од елементи во вид на ленти, поставени нормално едни на други, тие, популарно, се нарекуваат „растери“ (слика 6.12.а). На тој начин се обезбедува контрола на блескотењето од сите критични правци од кои може да се набљудува светилката.

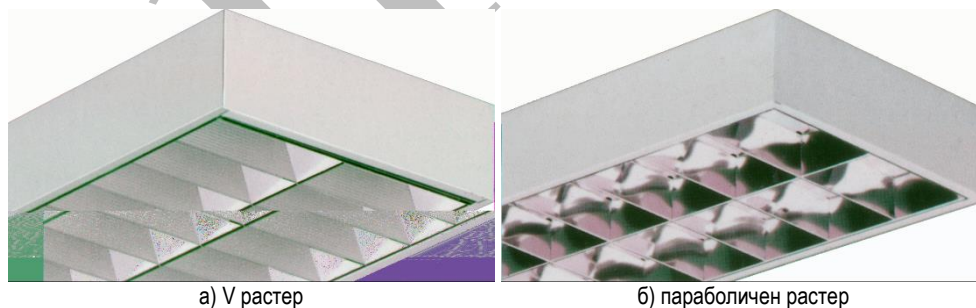
Почесто, особено кај светилките за ФСИ, се користат таканаречените „V“, „параболични“ и „двојно-параболични“ растери. Кај првите, надолжните заклони (паралелни на надолжната оска на ФСИ) се изведени од по две ленти поставени во облик на латиничната буква V. Кај параболичните и двојно-параболичните растери надолжните заклони се обликувани во вид на парабола. Притоа, ако напречните заклони се изработени од прави ленти тогаш станува збор за параболичен растер, додека во случајот кога и напречните растери се во вид на парабола, растерот се нарекува двојно-параболичен (слика 6.12.б).



Слика 6.11 Примери на светилки со заклони [6]



Слика 6.12 Растери за светилки за флуоресцентни сијалици



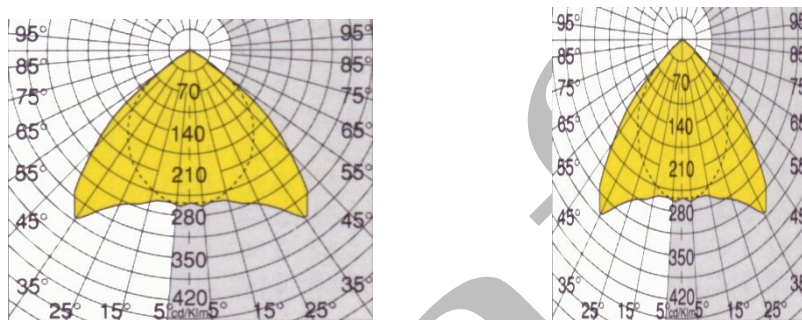
Слика 6.13 Примери на светилки со V растер и параболичен растер

На сликата 6.14 се прикажани примери на криви на распределба на светлинската јачина за светилки со ФСЦ со двоен параболичен растер.¹⁰⁶ Со полна линија е прикажана кривата во симетралната рамнина нормална на надолжните оски

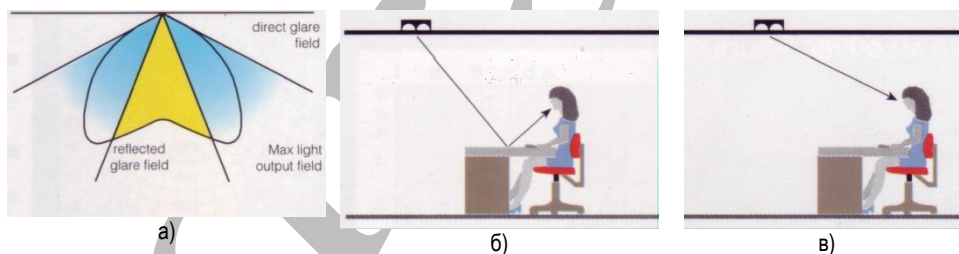
¹⁰⁶ Дефиницијата на кривите на распределба на светлинската јачина е дадена во потточката 3.7.3. Повеќе за облиците и начинот на презентација на овие криви може да се најде во потточката 6.5.2.

на ФСЦ, додека со испрекината линија е прикажана кривата на распределба во симетралната рамнина паралелна на надолжните оски на ФСЦ (во која лежи оптичката оска на светилката)

Светилките за ФСЦ со двојно-параболичен растер се карактеризираат со мали сјајности во критичните правци на набљудување на светилката (прикажани на сликата 6.15.a). Малите сјајности на светилката во правци коишто со оптичката оска зафаќаат релативно мали агли ја намалуваат можноста за појава на рефлексно блескотење (слика 6.15.б). Малите сјајности за правци коишто со оптичката оска зафаќаат агли поголеми од 45° ја намалуваат можноста за појава на директно блескотење (слика 6.15.в).



Слика 6.14 Примери на криви на распределба на светлинска јачина за светилки со ФСЦ и параболичен растер



Слика 6.15 Критични зони за појава на директно и рефлексно блескотење

6.5 Светлотехнички карактеристики

Светлотехничките карактеристики на една светилка во најголема мерка зависат од карактеристиките на сијалиците за кои таа е наменета и од оптичкиот систем, а помалку зависат од конструктивните карактеристики на светилката.

Меѓу позначајните светлотехнички карактеристики спаѓаат:

- коефициент на искористување на светилката,
- коефициент на искористување на осветлението,
- распределба на светлинската јачина (фотометриско тело),
- коефициент на нечистотија.

Светлотехничките карактеристики на светилките имаат големо влијание врз квалитетот и ефикасноста на еден систем за осветление (СО). Од особена важност е употребените светилки да бидат соодветно одбрани со цел да се постигнат оптимални ефекти на СО.

Квантитативните податоци за светлотехничките карактеристики на светилките се неопходни за изведување на фотометриските пресметки при проектирањето на СО. Стандардот EN 13032 и повеќе CIE документи (препораки) ги дефинираат податоците со кои се квантифицираат фотометриските и останатите карактеристики на сијалиците и светилките, процедурите за нивно мерење, форматот на датотеките за размена на податоците и ги специфицираат неопходните податоци што производителите на сијалици и светилки се должни да ги објават.

6.5.1 Коефициент на искористување на светилка

Коефициентот на искористување на светилката претставува однос помеѓу флуksот што го зрачи светилката $\Phi_{\text{св.}}$ и вкупниот флуks на сите сијалици инсталирани во светилката $\Phi_{\text{сиј.}}$. Коефициентот на искористување на светилката најчесто се означува со кратенката *LOR* (*Light Output Ratio*) и се изразува во проценти од $\Phi_{\text{сиј.}}$:

$$LOR = 100 \cdot \frac{\Phi_{\text{св.}}}{\Phi_{\text{сиј.}}} \quad (6.1)$$

LOR е помал од 100% и неговата вредност не зависи од специфичното производство на сијалиците туку од ефикасноста на оптичкиот систем на светилката (т.е. од обликот, видот и квалитетот на материјалите употребени за негова изработка).

Коефициентот на искористување на светилката може да се определи на два начина. Во првиот случај, со помош на интегрирен фотометар¹⁰⁷, најнапред се мери флуksот на светилката опремена со соодветен број на сијалици. Потоа, со истиот фотометар се мери само флуksот на сијалиците. На крајот, со помош на (6.1) се пресметува *LOR*. Вториот начин на определување на *LOR* се состои од математичка постапка во која, врз основа на информациите за распределбата на светлинската јачина на светилката, се пресметува флуksот што светилката го зрачи во целиот простор. Врз основа на овој податок и декларираниот флуks на сијалиците во светилката се определува *LOR*.

LOR се состои од две компоненти, означени со $\Phi_{\text{горе}}$ и $\Phi_{\text{долу}}$, коишто соодветствуваат на флуksовите што светилката ги зрачи во горниот и долниот полупростор. Вообичаено, овие компоненти на *LOR* се означуваат со кратенките *ULOR* (*Upward Light Output Ratio*) и *DLOR* (*Downward Light Output Ratio*). Нивната дефиниција е дадена со изразот (6.2).

$$LOR = 100 \cdot \frac{\Phi_{\text{св.}}}{\Phi_{\text{сиј.}}} = 100 \cdot \frac{\Phi_{\text{горе}} + \Phi_{\text{долу}}}{\Phi_{\text{сиј.}}} = 100 \cdot \left(\frac{\Phi_{\text{горе}}}{\Phi_{\text{сиј.}}} + \frac{\Phi_{\text{долу}}}{\Phi_{\text{сиј.}}} \right) = ULOR + DLOR \quad (6.2)$$

¹⁰⁷ Повеќе за уреди за мерење на светлинскиот флуks може да се најде во поглавјето 8.

Врз основа на LOR и $DLOR$ може да се определи делот од вкупниот флукс на светилката што таа го зрачи во долниот полупростор означен со DFF (*Downward Flux Fraction*):

$$DFF = \frac{DLOR}{LOR}. \quad (6.3)$$

Аналогно, делот од вкупниот флукс на светилката што таа го зрачи во горниот полупростор UFF (*Upward Flux Fraction*) е:

$$UFF = \frac{ULOR}{LOR}. \quad (6.4)$$

Коефициентот на искористување на светилката зависи од обликот и квалитетот на изработка на нејзиниот оптички систем. По правило, оптичките системи за помалите светилки имаат подобар коефициент на искористување. Покрај тоа, коефициентот на искористување на светилката зависи и од бројот на одбивања што ќе ги направи светлината пред да ја напушти светилката. Поради тоа, за постигнување на поефикасен оптички систем, а со тоа и поголем коефициент на искористување на светилката, е неопходно да се користат материјали со поголеми коефициенти на одбивање и да се избегнуваат повеќекратни одбивања.

Кога станува збор за LOR треба да се има предвид дека тој се дефинира за нова и чиста светилка. Имено, флуксот што ќе ја напушти светилката што подолг период била во погон ќе биде помал од флуксот што таа го зрачела кога била на полно нова и чиста. Причината за тоа се нечистотиите (прашина, маснотии и сл.) што се нафаќаат на внатрешните и надворешните површини од оптичкиот систем на светилката.

Коефициентот што покажува за колку ќе се намали флуксот на светилката како резултат на нечистотијата се нарекува *коефициент на нечистотија*, а се означува со LMF (*Luminaire Maintenance Factor*). Вредноста на LMF зависи од повеќе фактори, меѓу кои најзначајни се: степенот на IP заштита, степенот на нечистотија на околината и периодот на чистење на светилките. Подетални информации за LMF можете да најдете во потпоглавјето 7.3 каде што се зборува за одржувањето на системи за електрично осветление.

6.5.2 Распределба на светлинската јачина

Фотометриското тело на еден светлински извор ги содржи комплетните информации за распределбата на светлинската јачина (видете оддел 3.7.3). За жал, со исклучок на мал број светлински извори (униформни, униформно дифузни и сл.), површината што го ограничува фотометриското тело не може да се опише со релативно едноставен математички израз. Поради тоа, во светлотехничката пракса постојат повеќе графички и нумерички начини за опишување на фотометриското тело, како што се: криви на распределба на светлинската јачина, изоканделни и изолуксни дијаграми, табели за распределба на светлинската јачина (I -табели), флукс кодови (зонални флуксони) и др.

Обликот на фотометрското тело зависи од оптичкиот систем на светилката, обликот и големината на сијалицата во неа. Во голем број случаи, во една светилка може да се инсталираат сијалици со ист облик и димензија, но со различен номинален флуks. На пример, сијалците со вжарено влакно со балон во облик на круша и моќност од 25 W до 100 W имаат еднакви димензии, но различни флуksови. Слично, флуоресцентните сијалици во вид на цевка со еднакви моќности (и еднакви димензии) имаат различни флуksови, во зависност од составот на флуоресцентниот слој (халофосфатен, трифосфорен или мултифосфорен). Покрај тоа, ЖС, МХС и НСВП (со балон во вид на елипсоид и со фосфорен слој) имаат еднакви димензии, но различни номинални флуksови.

Во случаите кога во светилката се инсталира сијалица со поинаков флуks, при неизменет облик и димензии на сијалицата, ќе се промени и големината на фотометрското тело. Но, обликот на фотометрското тело, во сите такви случаи ќе остане ист. Поради тоа, информациите со кои се опишува фотометрското тело се прикажуваат за случај кога во светилката би била инсталирана сијалица од соодветниот тип и со номинален флуks од, најчесто, 1000 lm. За информациите прикажани на овој начин велите дека се нормирани (нормирани дијаграми за распределба, нормирани I -табели итн.). За да се добие светлинската јачина на светилката I е потребно нормираната светлинска јачина I' , добиена од нормираните дијаграми или табели, да се помножи со вкупниот флуks на сијалиците инсталирани во светилката ($\Phi_{\text{сиј.}}$) и да се подели со флуksот со којшто е нормиран дијаграмот, односно табелата ($\Phi_{\text{норм.}}$), т.е.:

$$I = I' \cdot \frac{\Phi_{\text{сиј.}}}{\Phi_{\text{норм.}}} \quad (6.5)$$

Криви на распределба на светлинската јачина

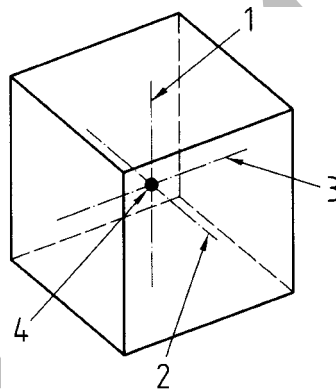
За презентација на распределбата на светлинската јачина е потребно да се користи соодветен координатен систем за еднозначно дефинирање на правецот за кој се дава информацијата за светлинската јачина на светилката. Вообичаено, се користи сферичен координатен систем чијшто центар е поставен во оптичкиот центар на светилката. Кривите на распределба на светлинската јачина се добиваат како пресек на фотометрското тело и рамнини што поминуваат низ една од фотометрските оски на светилката. Во тој случај, фотометрската оска на светилката воедно претставува поларна оска на координатниот систем.

Изборот на фотометрската оска е условен од обликот на светилката, нејзината апликација и оптичкиот центар. Според EN 13032 за светилката се дефинираат три меѓусебно нормални фотометриски оски што поминуваат низ оптичкиот центар на светилката. Овие оски се прикажани на сликата 6.16. Во зависност од типот и обликот на оптичкиот систем, производителите ги дефинираат оптичкиот центар на светилката и две фотометриски оски. Вообичаено, првата фотометриска оска е нормална на главната светлечка површина, додека втората (или третата) фотометриска оска се дефинира во зависност од изборот на рамнините за добивање на кривите на распределба на светлинската јачина.

За добивање на кривите на распределба на светлинската јачина фотометриското тело се пресекува со рамнини што поминуваат низ неговите фотометриски оски. Рамнините што имаат иста заедничка пресечна права (една од фотометриските оски на светилката) припаѓаат на еден систем. За поедноставно референцирање, фотометриската оска на светилката ги дели рамнините на две полурамнини. На тој начин се добиваат три системи (полу)рамнини, кои според СIE (и EN 13032) се нарекуваат А, В и С.

Во системот А рамнините со кои се пресекува фотометриското тело поминуваат низ третата фотометриска оска. Овој систем најмалку се користи и го нема во EN 13032.

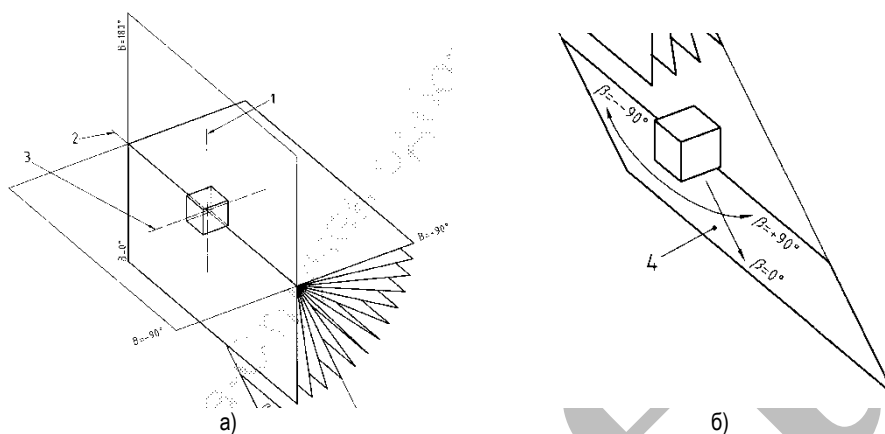
Сите полурамнини од системот В се сечат на втората фотометриска оска, којашто воедно претставува и поларна оска на координатниот систем (слика 6.17.а). Една од полурамнините се нарекува референтна (почетна) и се означува со B_0 .



Слика 6.16 Оптички центар и фотометриски оски на светилка

Во сферичниот координатен систем (чиј координатен почеток е во оптичкиот центар на светилката) било која полуправа, што започнува од оптичкиот центар на светилката, може еднозначно да се дефинира со два агли. Во случајот на полурамнините од системот В тие агли најчесто се означуваат со B_x и β . Со B_x се означува аголот помеѓу почетната полурамнина B_0 и полурамнината во којашто лежи набљудуваната полуправа. Со аголот β се означува аголот помеѓу набљудуваната полуправа и полуправата што лежи во полурамнината B_x и е нормална на поларната оска (слика 6.17.б). Аголот B_x воедно се користи за именување на полурамнината во која лежи бараната полуправа.

Многу често, овој систем на полурамнини се референцира и како систем $B-\beta$.

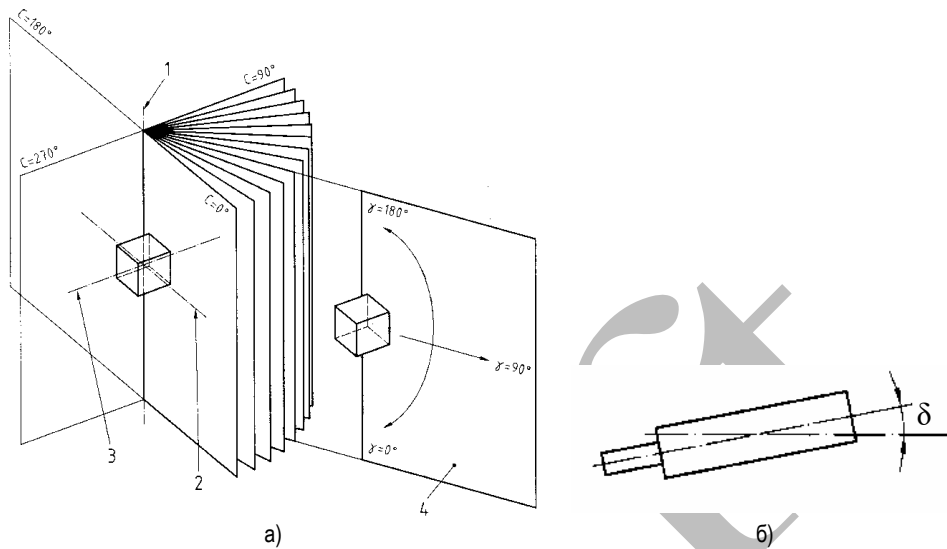


Слика 6.17 Полурамни од системот В

Како што може да се забележи од сликите 6.17.а и 6.17.б, аголот B_x може да има вредност од -180° до $+180^\circ$, додека аголот β може да има вредност од -90° до $+90^\circ$. На сликата 6.17.б со задебелена црна линија е прикажана кривата на распределба на светлинска јачина во полурамнината B_x и светлинската јачина во истата полурамнина за агол β во однос на поларната оска, означена со $I(B_x, \beta)$.

Системот полурамнини В се користи, главно, за рефлекторските светилки. Во тие случаи втората фотометриска оска е оската околу која се менува нагибот на рефлекторската светилка. Кај останатите светилки со сијалици во вид на цевка третата фотометриска оска е оската на сијалицата (или геометриската оска на множеството сијалици). Покрај овие генерални напатствија за избор на оските, производителот на светилката може да одлучи и за поинаква ориентација на фотометриските оски и тоа треба јасно да биде прикажано во соодветната техничка документација.

Системот полурамнини С е најчесто користен систем и истиот е префериран и од СИЕ и во EN 13032. Кај овој систем поларната оска е вертикална и, најчесто, таа се поклопува со првата фотометриска оска (слика 6.18.а). Ако мерењата на светлинската јачина на светилката се направени во услови кога светилката била поставена под нагиб (аголот δ на сликата 6.18.б), тогаш поларната оска и првата фотометриска оска не се поклопуваат и тоа треба да биде наведено во податоците за распределба на светлинската јачина.



Слика 6.18 Полурамни од системот С

С-полурамнината што ја содржи втората фотометриска оска е почетна полурамнина и се означува со C_0 . Изборот на втората фотометриска оска, т.е. полурамнината C_0 , зависи од типот на светилката. Кај светилките со сијалици во вид на цевка третата фотометриска оска се поклопува со оската на сијалицата (или со геометриската оска за повеќе сијалици). Ако светилката е со сијалица чијашто оска се поклопува со првата фотометриска оска, за полурамнина C_0 се одбира онаа полурамнина во која се јавува најголемата светлинска јачина.

И во системот на С-полурамнини се потребни два агла за еднозначно дефинирање на било која полуправа што започнува од оптичкиот центар. Првиот агол, означен со α , е аголот помеѓу почетната полурамнина C_0 и полурамнината во која се наоѓа полуправата. Вториот агол најчесто се означува со γ . Тоа е аголот помеѓу полуправата и поларната оска (т.е. правата заедничка за сите С полурамнини). Ознаката C_α се користи за именување на полурамнината која со полурамнината C_0 зафаќа агол α .

На сликата 6.18.а со задебелена црна линија е прикажана кривата на распределба на светлинската јачина во полурамнината C_α и светлинската јачина во истата полурамнина (означена со $I(\alpha, \gamma)$) во правец што зафаќа агол γ во однос на поларната оска.

Системот полурамнини С многу често се означува и како систем С- γ .

Аголот α може да има вредности од 0° до 360° (или од -180° до $+180^\circ$), а аголот γ вредности од 0° до 180° .

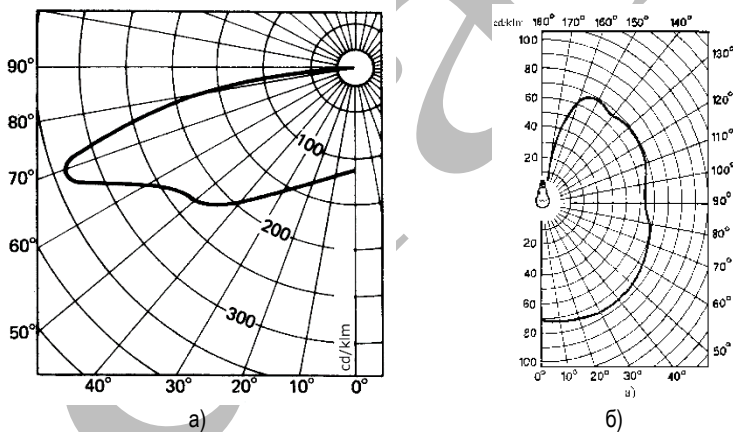
По правило, кривите на распределба на светлинската јачина се нормирани и се прикажуваат во системот на поларни координати I и γ . Во поретки случаи, како за

рефлекторските светилки, кривите можат да бидат прикажани со дијаграм во Декартовиот правоаголен координатен систем.

Системот полурамнини C е најчесто употребуван систем и поради тоа, во продолжение, тој систем ќе се користи за објаснување на дијаграмите за распределба на светлинската јачина и I -табелите.

Со оглед на тоа што можниот број на C полурамнини е неограничен, се поставува прашањето колкав е доволниот број карактеристични полурамнини, т.е. криви на распределба на светлинската јачина, со коишто на задоволителен начин може да се опише фотометриското тело на една светилка. Овој број, пред сè, зависи од обликот на фотометриското тело.

За светилките со ротационо симетрична распределба на светлинската јачина е доволна само една полурамнина, затоа што кај овие светилки кривите на распределба на светлинската јачина во било која C полурамнина се идентични. На сликите 6.1.в и 6.5 се прикажани примери на светилки со ротационо симетрична распределба на светлинската јачина, а на сликата 6.19 се прикажани примери на нормирани дијаграми со кривите за распределба на светлинската јачина кога фотометриското тело е ротационо симетрично. Најчесто, ротационо симетрична распределба на светлинската јачина имаат светилките кај коишто оската на симетрија на сијалицата се поклопува со првата фотометриска оска на светилката.



Слика 6.19 Дијаграми за распределба на светлинската јачина за светилки со ротационо симетрично фотометриско тело

Покрај овој тип на симетрија, светилките можат да имаат фотометриско тело што е: симетрично во однос на една рамнина, симетрично во однос на две рамнини или, многу ретко, комплетно несиметрично.

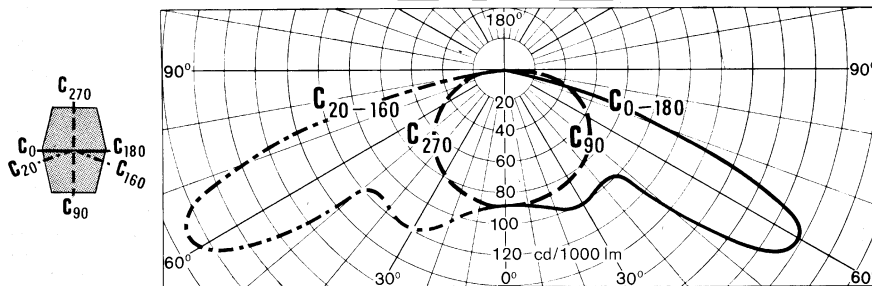
Ако фотометриското тело на светилката е симетрично во однос на една рамнина доволно е да се дадат информации за распределбата на светлинската јачина во C полурамнините од само еден од полупросторите на кои рамнината на симетрија го дели целиот простор. Така, на пример, ако рамнината на симетрија ја дефинираат

полурамнините C_{90} и C_{270} ¹⁰⁸ тогаш е доволно да се дадат информации за распределбата на светлинската јачина само за полурамнините што со полурамнината C_0 зафаќаат агли од 90° до 270° . Ако симетријата е во однос на рамнината C_0 – C_{180} , информациите се даваат за C полурамнините од 0° до 180° .

Кај светилките со овој тип на симетрија предната страна на светилката, најчесто, е дефинирана со полурамнината C_{90} . Светилките за улично осветление се типични претставници на светилки со ваков вид на симетрија (слика 6.6.a). Вообичаено, за овие светилки производителите даваат дијаграми со криви на распределба на светлинската јачина за следните полурамнини: C_0 , C_{90} , C_{270} и полурамнината во која се јавува максималната светлинска јачина. На сликата 6.20 е прикажан нормиран дијаграм со кривите на распределба на светлинската јачина за светилка со симетрично фотометриско тело во однос на рамнината C_{90} – C_{270} , а, во овој случај, максималната светлинска јачина се јавува во полурамнините C_{20} и C_{160} . Поради симетријата, кај овие светилки важи:

$$I(\alpha, \gamma) = I(180 - \alpha, \gamma), \quad 90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ, \quad (6.6)$$

каде со $I(\alpha, \gamma)$ е означена светлинската јачина на светилката во полурамнината C_α и во правец што со поларната оска зафаќа агол γ . Поради тоа, на дијаграмот од сликата 6.20 со по една крива се прикажани распределбата на светлинската јачина за полурамнините C_0 и C_{180} и полурамнините C_{20} и C_{160} , соодветно.



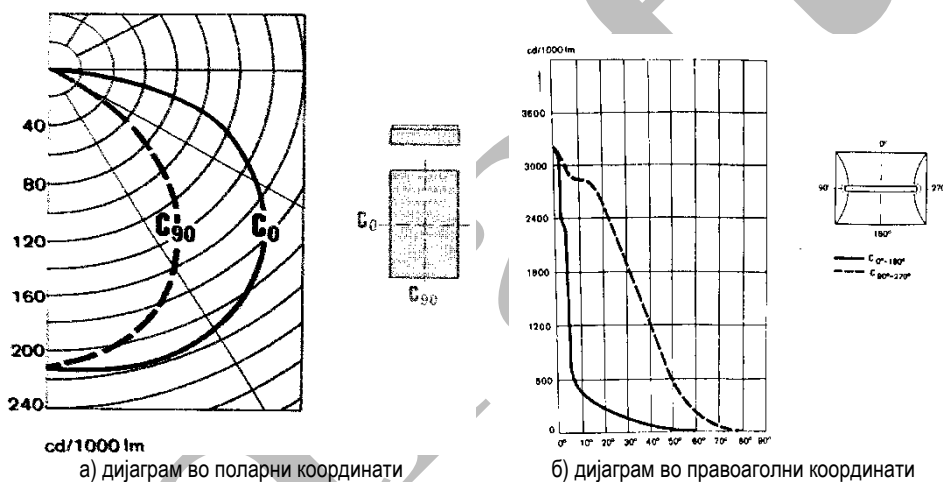
Слика 6.20 Дијаграм за распределба на светлинската јачина за светилка со симетрија во однос на рамнината C_{90} – C_{270} и со максимална светлинска јачина во полурамнините C_{20} и C_{160} [1]

Кај светилките што имаат фотометриско тело симетрично во однос на две рамнини (најчесто тоа се рамнините C_0 – C_{180} и C_{90} – C_{270}) е потребно да се дадат информации само за C -полурамнините од 0° до 90° . Светилките за ФСЦ и НСНП имаат ваков тип на симетрија. На сликите 6.1.a и 6.1.б се прикажани примери на светилки за ФСЦ што имаат симетрија на фотометриското тело во однос на две рамнини. Да напоменеме дека кај овие светилки рамнината C_{90} – C_{270} е паралелна со оските на сијалиците и кај нив не може да се дефинира предна страна.

¹⁰⁸ Математички гледано полурамнините C_α и $C_{\alpha+180}$ дефинираат една рамнина. Во натамошниот текст ваквата рамнина ќе ја означуваме со C_α – $C_{\alpha+180}$.

На сликата 6.21 се прикажани нормирани дијаграми со криви за распределба на светлинската јачина за светилки што имаат фотометриско тело симетрично во однос на две рамнини. Во случајот тоа се рамнините C_0-C_{180} и $C_{90}-C_{270}$. Вообичаено, во дијаграмите за овој тип светилки се прикажуваат три криви. Кривите се однесуваат на полурамнините: C_0 , C_{90} и полурамнината со најголема светлинска јачина. Светилките за ФСЦ и НСВП, како и рефлекторските светилки за НСВП и МХС во вид на цевка, се типични претставници на светилки што имаат фотометриско тело со овој тип на симетрија. Многу често најголемата светлинска јачина се јавува или во полурамнината C_0 или во полурамнината C_{90} , поради што за таквите светилки се прикажуваат криви за распределба само за овие две полурамнини.

Дијаграмот од сликата 6.21.а се однесува на светилка за ФСЦ и истиот е во поларни координати. Дијаграмот од сликата 6.21.б е за рефлекторска светилка со НСВП или МХС (слична на светилката од сликата 6.2.а) и тој дијаграм е прикажан во правоаголни координати.



Слика 6.21 Дијаграми за распределба на светлинската јачина за светилки со симетрија во однос на рамнините C_0-C_{180} и $C_{90}-C_{270}$

За светилките чиито фотометриски тела немаат симетрија потребно е да се прикажат криви за распределба на светлинската јачина за полурамнините од C_0 до C_{360} . Изборот на полурамнините во кои ќе биде прикажана распределбата на светлинската јачина зависи од обликот на фотометриското тело.

Дијаграмите за распределба на светлинската јачина може да се употребат за определување на светлинската јачина на светилката во било кој правец од просторот.

Во општ случај, кај светилки што немаат ротационо симетрична распределба на светлинската јачина, светлинската јачина во определен правец зависи од две променливи: аголот со кој се дефинира полурамнината што го содржи правецот и аголот што правецот го зафаќа со оптичката оска.

Многу често е потребно да се определи светлинската јачина на изворот во правец што лежи во полурамнина за која експлицитно не е дадена кривата на распределба на светлинската јачина. Во таквите случаи е вообичаено да се применува линеарната апроксимација. Така, на пример, ако е потребно да се определи светлинската јачина во полурамнината C_α , дефинирана со аголот α , и за агол γ во однос на оптичката оска, се интерполира помеѓу две соседни полурамнини на полурамнината C_α , дефинирани со агли α_1 и α_2 , за кои е позната распределбата на светлинската јачина. Изразот за линеарна интерполација е:

$$I(\alpha, \gamma) = I(\alpha_1, \gamma) + \frac{I(\alpha_2, \gamma) - I(\alpha_1, \gamma)}{\alpha_2 - \alpha_1} \cdot (\alpha - \alpha_1), \quad \alpha_1 < \alpha < \alpha_2 \quad (6.7)$$

Пример 6.1

Во правоаголниот координатен систем OXYZ рамнината XOY е хоризонтална. Набљудуваната светилка е со ротационо симетрична распределба на светлинската јачина. Оптичкиот центар на светилката се наоѓа во точката $S(2,0;6,0;8,0)$ и нејзината оптичка оска е вертикална (т.е. паралелна на оската OZ, но со спротивна ориентација). Распределбата на светлинската јачина на светилката е дадена со нормираниот дијаграм, прикажан на сликата 6.19.a. Во светилката е инсталирана ЖС со номинална моќност 125 W и номинален светлински флуks 6300 lm (табела 5.14). Да се пресмета хоризонталната осветленост во точката $T(6,0;3,0;3,0)$. Координатите на точките S и T се дадени во метри.

Меѓусебната положба на светилката S и точката T е прикажана на сликата 6.22.

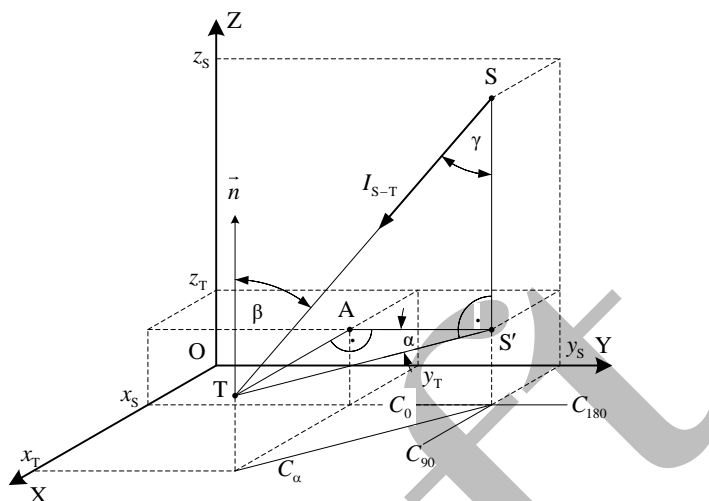
Сметајќи дека димензиите на светилката се мали во споредба со растојанието на нејзиниот оптички центар од набљудуваната точка T, светилката може да се смета за точкаст извор. Во таквите услови, за хоризонталната осветленост во точката T, според изразот (3.37), може да се напише:

$$E_T = \frac{I_{S-T} \cdot \cos \beta}{ST^2} \quad (6.8)$$

Аглите β и γ (слика 6.22) се меѓусебно еднакви затоа што имаат заемно паралелни краци. Нив ги определуваме од правоаголниот триаголник STS' (точката S' е проекција на точката S врз хоризонталната рамнина што ја содржи точката T):

$$\gamma = \beta = \arctg \frac{TS'}{SS'} = \arctg \frac{\sqrt{(x_S - x_T)^2 + (y_S - y_T)^2}}{|z_S - z_T|},$$

$$\gamma = \beta = \arctg \frac{\sqrt{(2-6)^2 + (6-3)^2}}{|8-3|} = 45^\circ.$$



Слика 6.22 Скица за примерот 6.1

Растојанието \overline{ST} е:

$$\overline{ST} = \sqrt{(x_S - x_T)^2 + (y_S - y_T)^2 + (z_S - z_T)^2} = \sqrt{(2-6)^2 + (6-3)^2 + (8-3)^2} = \sqrt{50} = 7,071 \text{ m}.$$

Светлинската јачина на светилката S, во правец кон точката T, ќе ја определиме од следниот израз:

$$I_{S-T} = I'_\gamma \cdot \frac{\Phi_{\text{свј.}}}{\Phi_{\text{норм.}}} = I'_\gamma \cdot \frac{6300}{1000},$$

каде што со I'_γ е означена нормираната вредност на светлинската јачина на светилката што се отчитува од кривата за распределба на светлинската јачина за агол γ во однос на оптичката оска.

Од дијаграмот на сликата 6.19.a ја отчитуваме светлинската јачина I'_{45° и таа, приближно, изнесува 220 cd/klm. Значи, светлинската јачина на светилката во правец кон точката T е:

$$I_{S-T} = 220 \cdot \frac{6300}{1000} = 1386 \text{ cd}.$$

Според тоа, со помош на равенката (6.8), за хоризонталната осветленост во точката T се добива:

$$E_T = \frac{1386 \cdot \cos 45^\circ}{50} = 19,6 \text{ lx}.$$

Пример 6.2

Да се реши примерот 6.1 ако светилката во точката S има распределба на светлинска јачина како на дијаграмот од сликата 6.20. И во овој случај, оптичката оска на светилката е вертикална,

а полурамнината C_{90} на светилката е паралелна со рамнината XOZ , од страната на позитивната насока на оската X (слика 6.22).

Аглите β и γ (слика 6.22) се определени во примерот 6.1 и нивната вредност изнесува 45° .

Точката T и оптичката оска на светилката дефинираат полурамнина C_α која што зафаќа агол α во однос на почетната полурамнина C_0 . Аголот α се определува од правоаголниот триаголник TAS' :

$$\alpha = \arctg \frac{\overline{TA}}{\overline{AS'}} = \arctg \frac{|x_T - x_S|}{|y_T - y_S|} = \arctg \frac{|6 - 2|}{|3 - 6|} \approx 53,1^\circ.$$

Бидејќи не ја познаваме распределбата на светлинската јачина за полурамнината $C_{53,1}$, бараната светлинска јачина ќе ја определиме со интерполација помеѓу соседните полурамнини за кои таа распределба е позната. Тоа се полурамнините C_{20} и C_{90} . Според тоа, од изразот (6.7), за светлинската јачина во полурамнината C_α и аголот γ во однос на оската на светилката пишуваме:

$$I(53,1;45) = I'(53,1;45) \cdot \frac{\Phi_{\text{свет.}}}{\Phi_{\text{норм.}}} = \left[I'(20;45) + \frac{I'(90;45) - I'(20;45)}{90 - 20} \cdot (53,1 - 20) \right] \cdot \frac{\Phi_{\text{свет.}}}{\Phi_{\text{норм.}}}$$

Вредностите на нормираната светлинска јачина за агол 45° во однос на оптичката оска во полурамнините C_{20} и C_{90} ги отчитуваме од соодветните криви од дијаграмот на сликата 6.20:

$$I'(20;45) \approx 115 \text{ cd/klm} \text{ и } I'(90;45) \approx 75 \text{ cd/klm}.$$

Врз основа на овие вредности, за светлинска јачина во бараниот правец, пресметуваме:

$$I(53,1;45) = \left[115 + \frac{75 - 115}{90 - 20} \cdot (53,1 - 20) \right] \cdot \frac{6300}{1000} = 96,1 \cdot 6,3 \approx 605,3 \text{ cd}.$$

Конечно, со помош на равенката (6.8), за осветленоста во точката T пресметуваме:

$$E_T = \frac{605,3 \cdot \cos 45^\circ}{50} = 8,6 \text{ lx}. \quad (6.9)$$

***I*-табели**

Како што може да се забележи од примерите 6.1 и 6.2, користењето на дијаграмите за распределба на светлинската јачина е поврзано со неколку проблеми: грешки во отчитувањето, грешки заради претпоставката дека промената на светлинската јачина помеѓу две соседни C полурамнини е линеарна и потребното време за пресметка (ако се определува светлинска јачина за голем број правци).

Грешките во отчитувањето може да бидат помали ако се користат дијаграми со помал размер, а грешките што произлегуваат од интерполацијата можат да се намалат ако дијаграмот содржи криви на распределба за поголем број рамнини. Времето потребно за пресметка може да се скуси со употреба на компјутери, но дијаграмите за распределба на светлинската јачина не се облик на влезни податоци соодветен за користење на компјутери.

Поради тоа, наместо дијаграмите за распределба на светлинската јачина, информациите за фотометрското тело се презентираат во нумерички облик, во вид на табели. Овие табели се нарекуваат *I*-табели. Вообичаено, како и во случајот со

дијаграмите за распределба на светлинската јачина, I -табелите се нормирани за флукс од 1 klm.

I -табелите претставуваат нумеричка информација за распределба на светлинската јачина. Тие може да се формираат и со отчитување на светлинската јачина од соодветниот дијаграм, но на тој начин не се надминуваат претходно наведените грешки. Всушност, I -табелите се добиваат со мерење на светлинската јачина на светилките со помош на компјутеризирани гониофотометри. Овие уреди овозможуваат голема резолуција при мерењата на светлинската јачина.

Со зголемената употреба на компјутерите за изведување на фотометриските пресметки, дијаграмите за распределба на светлинската јачина ја губат улогата како основен извор на информациите за фотометриското тело. Денес, во каталозите за светилки овие дијаграми се со многу мали димензии и служат само за информативни цели и за брзо стекнување претстава за обликот на фотометриското тело на светилката. Основниот облик на презентација и размена на информациите за распределбата на светлинската јачина претставуваат I -табелите што, заедно со останатите конструктивни и фотометриски податоци, се дистрибуираат во електронски облик.

Во табелата 6.8 е прикажан пример на I -табела за светилка со ротационо симетрична распределба на светлинската јачина. Ако е потребно да се пресмета светлинската јачина за агол γ во однос на оптичката оска, за којшто нема податок за светлинската јачина во I -табелата, таа се пресметува со линеарна интерполација според изразот (6.10):

$$I(\gamma) = I(\gamma_1) + \frac{I(\gamma_2) - I(\gamma_1)}{\gamma_2 - \gamma_1} \cdot (\gamma - \gamma_1), \quad \gamma_1 < \gamma < \gamma_2, \quad (6.10)$$

каде што со γ_1 и γ_2 се означени соседните агли на аголот γ за кои се дадени светлинските јачини во I -табелата.

Слично како и при употребата на дијаграмите, и кај I -табелите користењето на линеарната интерполација може да внесе грешка во пресметките. Таа грешка ќе биде поголема доколку резолуцијата на I -табелата е мала, т.е. доколку е помал бројот на агли за кои е позната светлинската јачина.

Табела 6.8 Пример на I -табела за светилка со ротационо симетрична распределба на светлинската јачина

Полурамнина	Агол γ во однос на оптичката оска ($^\circ$)										
	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	90
	Светлинска јачина cd/klm										
C_0	2,2	5,1	20,1	65,5	78,3	42,5	18,2	10,6	7,1	3,5	0

За светилките што немаат ротационо симетрична распределба на светлинската јачина, редиците во I -табелата соодветствуваат на C полурамнини за кои е дадена распределбата на светлинската јачина. Така, на пример, I -табелата што соодветствува на дијаграмот за распределба на светлинската јачина од сликата 6.20 е прикажана во табелата 6.9. Во овој случај (што никако не е правило), податоците од табелата 6.9 се

добени со отчитување на светлинската јачина од дијаграмот прикажан на сликата 6.20.

Табела 6.9 Пример на I -табела за светилка со симетрија на фотометрското тело во однос на рамнината $C_{90}-C_{270}$

Полурамнина	Агол γ во однос на оптичката оска ($^{\circ}$)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Светлинска јачина cd/klm									
C_0 и C_{180}	90	90	97	100	98	140	217	105	0	0
C_{20} и C_{160}	90	92	105	118	117	130	227	180	30	0
C_{90}	90	88	83	82	78	70	62	50	30	0
C_{270}	90	85	83	78	70	58	47	28	10	0

За правец, дефиниран со полурамнина C_{α} , за која не постои редица во I -табелата, и со агол во однос на оптичката оска γ , за кој не е дадена колона во I -табелата, светлинската јачина се определува со интерполација по овие две голедини. Редоследот на интерполација (α , γ или γ , α) е произволен. Во продолжение ќе ја објасниме постапката кога прво се интерполира по аголот γ , а потоа по аголот α .

Интерполацијата се изведува во три чекори. Во првиот и вториот чекор се определува светлинската јачина за бараниот агол γ во C полурамнините дефинирани со агли α_1 и α_2 според изразите (6.11). Полурамнините дефинирани со агли α_1 и α_2 се соседните полурамнини на полурамнината C_{α} за кои што е дадена светлинската јачина во I -табелата и притоа е исполнет условот $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$. Аналогно се избираат вредностите на агли γ_1 и γ_2 . Притоа се користат равенките:

$$I(\alpha_1, \gamma) = I(\alpha_1, \gamma_1) + \frac{I(\alpha_1, \gamma_2) - I(\alpha_1, \gamma_1)}{\gamma_2 - \gamma_1} \cdot (\gamma - \gamma_1), \quad \gamma_1 < \gamma < \gamma_2, \quad (6.11.a)$$

$$I(\alpha_2, \gamma) = I(\alpha_2, \gamma_1) + \frac{I(\alpha_2, \gamma_2) - I(\alpha_2, \gamma_1)}{\gamma_2 - \gamma_1} \cdot (\gamma - \gamma_1), \quad \gamma_1 < \gamma < \gamma_2. \quad (6.11.b)$$

Потоа, во третиот чекор, со помош на равенката (6.7), се определува светлинската јачина $I(\alpha, \gamma)$.

Пример 6.3

Да се реши примерот 6.1 ако распределбата на светлинска јачина на светилката е дадена со табелата 6.9.

Аголот γ , што го зафаќа правецот на кој се наоѓа осветлуваната точка T со оптичката оска на светилката, е определен во примерот 6.1 и изнесува $\gamma = 45^{\circ}$.

Аголот α со којшто се дефинира C полурамнината во којашто лежи точката T е определен во примерот 6.2 и тој изнесува $53,1^{\circ}$. Според тоа, агли α_1 и α_2 се 20° и 90° , соодветно, а аголот γ се наоѓа помеѓу агли $\gamma_1=40^{\circ}$ и $\gamma_2=50^{\circ}$.

Нормираните светлински јачини во полурамнините C_{20} и C_{90} , за агол 45° во однос на оптичката оска, ги определуваме од изразите (6.11), користејќи ги вредностите за $I'(20;40)$, $I'(20;50)$, $I'(90;40)$ и $I'(90;50)$ отчитани од табелата 6.9. Така добиваме:

$$I'(20;45) = I'(20;40) + \frac{I'(20;50) - I'(20;40)}{50 - 40} \cdot (45 - 40) = 117 + \frac{130 - 117}{50 - 40} \cdot (45 - 40) = 123,5 \text{ cd/klm},$$

$$I'(90;45) = I'(90;40) + \frac{I'(90;50) - I'(90;40)}{50 - 40} \cdot (45 - 40) = 78 + \frac{70 - 78}{50 - 40} \cdot (45 - 40) = 74 \text{ cd/klm}.$$

Потоа, од изразот (6.7) ја определуваме нормираната светлинска јачина на светилката во правец кон точката Т:

$$I'(53,1;45) = 123,5 + \frac{74 - 123,5}{90 - 20} \cdot (53,1 - 20) \approx 100 \text{ cd/klm}.$$

Конечно, со помош на равенката (6.8), за осветленоста во точката Т пресметуваме:

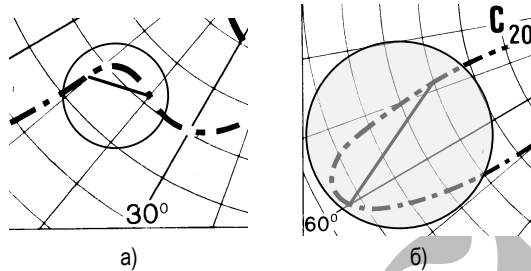
$$E_T = 100 \cdot \frac{6300}{1000} \cdot \frac{\cos 45^\circ}{50} = 8,9 \text{ lx}.$$

Ако се споредат резултатите од примерите 6.2 и 6.3 се доаѓа до заклучок дека светлинската јачина на светилката во правец кон точката Т е различна во двата случаја. Се поставува прашањето кој од двата резултата е поточен? По правило, I -табелите овозможуваат поточно определување на светлинската јачина во споредба со дијаграмите за распределба на светлинската јачина. Но, во овој случај тоа не е така. Имено, при формирањето на табелата 6.9 е направена (намерна) грешка со тоа што светлинската јачина е отчитана од дијаграмот на сликата 6.20 за секои 10° во однос на оптичката оска. Очигледно, за полурамнината C_{20} тоа доведува до погрешен резултат при линеарната интерполација со помош на изразите (6.11). На сликата 6.23 се прикажани деловите од кривата на распределба на светлинска јачина за полурамнината C_{20} . Со полна линија е прикажана линеарната зависност на светлинската јачина од аголот γ . Од сликата 6.23.а се гледа дека со линеарна интерполација за γ помеѓу 40° и 50° се прави грешка од околу 7 cd/klm, т.е. околу 6% во однос на вредноста на светлинската јачина отчитана од кривата за C_{20} . Грешката би била многу поголема ако интерполацијата се правеше за γ помеѓу 60° и 70° (слика 6.23.б). Ова укажува дека треба да се води сметка за изборот на чекорот на аголот γ со кој се формира I -табелата. Истата констатација важи и за изборот на чекорот за C полурамнините. Ако кај дијаграмите за распределба е непрактично и непрегледно на еден дијаграм да се даваат многу криви за распределба на светлинската јачина, кај I -табелите таков проблем не постои.

Во светот постојат повеќе стандардизирани формати на датотеките за размена на податоците за светилките. Еден од тие е пропишан во европскиот стандард EN 13032.

Покрај останатите информации, во EN 13032 е пропишан и минималниот број информации во I -табелите што производителите треба да го стават на располагање. Во

табелите 6.10 и 6.11 се прикажани минималниот број полурамнини и агли во однос на оптичката оска на светилката за кои е потребна информација за светлинската јачина.



Слика 6.23 Примери за грешки при линеарна интерполација за пресметка на светлинската јачина

Табела 6.10 Најмал број на С полурамнини за различни типови симетрија на фотометриското тело на светилката (според EN 13032)

Симетричност на фотометриското тело	С полурамнини
Ротационо симетрично	Една полурамнина
Симетрично во однос на две рамнини	За секои 15° од 0° до 90°
Симетрично во однос на една рамнина	За секои 15° од 270° до 90° или 0° до 180°
Асиметрично	За секои 15° од 0° до 360°

Табела 6.11 Најмал број на агли γ за различни типови на светилки (според EN 13032)

Тип на светилката	Процент од вкупниот флуks на светилката во долниот полупростор	
	DFF	Агли γ
За директно осветление	$> 90\%$	За секои 5° од 0° до 90°
За општо дифузно осветление	10% до 90%	За секои 5° од 0° до 180°
За индиректно осветление	$< 10\%$	За секои 5° од 90° до 180°

За светилките наменети за улично осветление CIE (во CIE 30-2 [29]) препорачува *I*-табелите да содржат информации за поголем број С полурамнини и поголем број агли во однос на оптичката оска и наместо линеарна да се користи квадратна интерполација. На тој начин се очекува поголема точност при определувањето на светлинската јачина. Средната грешка се проценува на околу 0,5%, додека најголемата грешка е помала од 3%. Во табелата 6.12 е прикажана препорачаната форма на *I*-табелите за светилките за улично осветление со асиметричен оптички систем. За светилките чиешто фотометриски тела имаат некаква симетрија, бројот на С полурамнини е помал.

Табела 6.12 Препорачана форма на I -табела за светилките за улично осветление (според CIE 30-2)

С полурамнина	Агол во однос на оптичката оска								
	0°	← чекор 10° →	30°	← чекор 5° →	45°	← чекор 2,5° →	105°	← чекор 15° →	180°
270°									
300°									
310°									
↑									
чекор 5°									
↓									
50°									
60°									
75°									
↑									
чекор 5°									
↓									
120°									
130°									
↑									
чекор 5°									
↓									
230°									
240°									
255°									

Флуks кодови

Распределбата на светлинската јачина за светилките со ротациона (или блиску до ротациона) симетрија на фотометриското тело, може да се изрази преку математичка зависност од аголот во однос на оптичката оска. Во рамките на методот за пресметка на осветленост во затворени простори, со помош на кумулативни зонални флуksови [31], светлинската јачина во било кој правец (во долниот полупростор) се изразува како полином од трет степен:

$$I(\gamma) = q_1 + q_2 \cdot \cos \gamma + q_3 \cdot \cos^2 \gamma + q_4 \cdot \cos^3 \gamma, \quad (6.12)$$

каде што со γ ($0 \leq \gamma \leq \pi/2$) е означен аголот што правецот го зафаќа со оптичката оска на светилката, а коефициентите q_i се пресметуваат преку кумулативните зонални флуksови на светилката за зоналните агли од долниот полупростор, дефинирани на сликата 3.6.

Наместо кумулативните зонални флуksови, за светилките се даваат таканаречените CIE флуks кодови. Користејќи ги ознаките дефинирани во потточките 3.7.4 и 6.5.1, CIE флуks кодовите (означени со N_i , $i=1, \dots, 5$) се пресметуваат со следните изрази:

$$N_1 = \frac{FCL_1}{FCL_4}, N_2 = \frac{FCL_2}{FCL_4}, N_3 = \frac{FCL_3}{FCL_4}, N_4 = \frac{FCL_4}{\Phi_{\text{св.}}} = DFF \text{ и } N_5 = \frac{\Phi_{\text{св.}}}{\Phi_{\text{сиј.}}} = LOR. \quad (6.13)$$

Поинаку кажано, флуks кодовите N_1 , N_2 и N_3 покажуваат колкав дел од флуksот што светилката го зрачи во долниот полупростор е во конусите со просторни агли од $\pi/2$, π и $3\pi/2$, соодветно. N_4 го покажува делот од вкупниот флуks на светилката што

таа го зрачи во долниот полупростор, а N_5 го покажува коефициентот на искористување на светилката.

Во европскиот стандард EN 13032 се дефинирани девет флуks кодови, наречени CEN флуks кодови. Првите пет CEN флуks кодови се идентични со CIE флуks кодовите. Користејќи ги ознаките дефинирани во одделите 3.7.4 и 6.5.1, преостанатите четири CEN флуks кодови се определуваат од следните изрази:

$$CEN_6 = \frac{FCU_1}{FCU_4}, CEN_7 = \frac{FCU_2}{FCU_4}, CEN_8 = \frac{FCU_3}{FCU_4}, N_9 = \frac{FCU_4}{\Phi_{св.}} = UFF. \quad (6.14)$$

За светилките што зрачат флуks само во долниот полупростор ($UFF=0$) се дефинираат само првите пет CEN флуks кодови.

CIE и CEN флуks кодовите се изразуваат во проценти, заокружени на цел број. Тие можат да послужат за брза проценка на распределбата на флуksот на светилката во просторот и на нејзиниот коефициент на искористување.

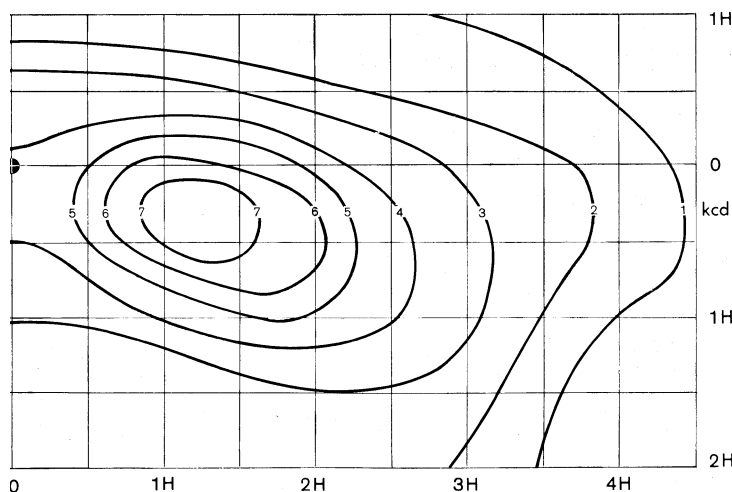
CEN флуks кодовите може да се искористат и за определување на коефициентот на искористување на осветлението (видете оддел 6.5.3).

Изоканделни дијаграми

Распределба на светлинската јачина на една светилка може да се прикаже графички и со изоканделен дијаграм. Тој се состои од множество криви, а секоја од тие криви поврзува точки од осветлуваната рамнина кон кои светилката има еднаква светлинска јачина. Изоканделните дијаграми се нормираат за определен инсталиран флуks на сијалицата односно на сијалиците во светилката (најчесто 1 klm).

На сликата 6.24 е прикажан пример на изоканделен дијаграм за светилка чие фотометриско тело е симетрично во однос на една рамнина. Координатниот почеток на изоканделниот дијаграм е точката на пробив на оптичката оска на светилката и осветлуваната рамнина, а координатите се изразуваат во H единици, т.е. координатите на точката во метри се поделени со растојанието H на светилката од осветлуваната рамнина.

Во минатото, пред масовната употреба на компјутерите за фотометриски пресметки, изоканделните дијаграми имале определена предност пред дијаграмите за распределба на светлинската јачина затоа што со нивната употреба бројот на математички операции за пресметки на англи бил помал. Денес овие дијаграми немаат практична примена.



Слика 6.24 Изоканделен дијаграм за светилка со симетрично фотометриско тело во однос на една рамнина

Изолуксни дијаграми

Изолуксните дијаграми се состојат од множество криви при што секоја од кривите поврзува точки од осветлуваната рамнина што имаат еднакви осветлености. Таквите криви се нарекуваат *изолуксни криви*. Изолуксните дијаграми, слично како и изоканделните дијаграми, се нормирани за определен инсталиран флуks на сијалицата односно сијалиците во светилката (најчесто 1 klm) и за определена висина на поставување на светилката над осветлуваната рамнина (најчесто $H_{\text{норм.}}=1$ m или $H_{\text{норм.}}=10$ m).

Од изолуксните дијаграми може многу едноставно и брзо да се определи осветленост во точки од осветлуваната рамнина. На сликата 6.25 е прикажан пример на изолуксен дијаграм за светилка со фотометриското тело што е симетрично во однос на рамнината $S_{90}-S_{270}$. Дијаграмот е нормиран за $\Phi_{\text{норм.}}=11\,500$ lm и $H_{\text{норм.}}=10$ m. Тој дијаграм се однесува на случајот кога аголот што го зафаќа оптичката оска на светилката со нормалата на осветлуваната рамнина е $\delta = 0^\circ$. Со тој агол се изразува наклонот на светилката. Координатниот систем е дефиниран како и за изоканделниот дијаграм. Во случајов, поради симетријата на фотометриското тело, на изолуксниот дијаграм се прикажани само деловите од осветлуваната рамнина чиишто точки лежат во полурамнините од S_{90} до S_{270} .

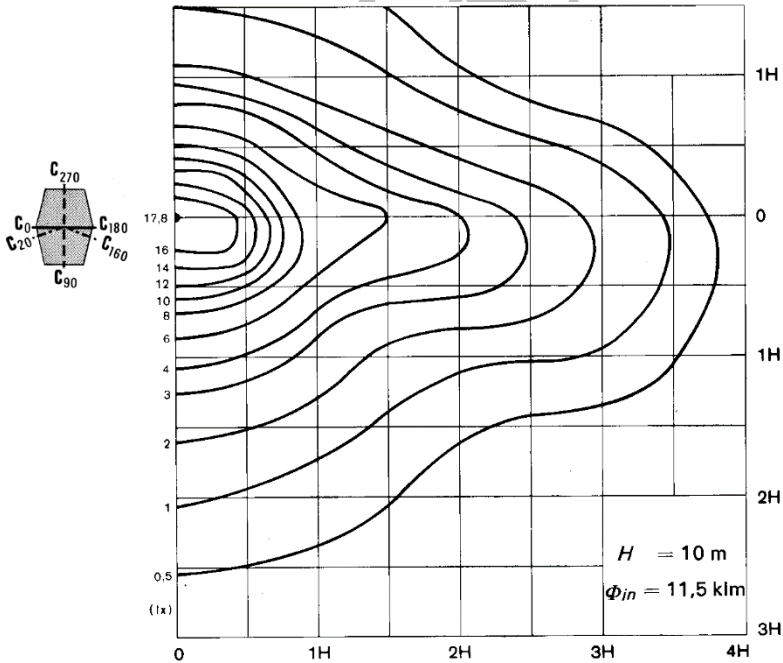
Осветленоста во останатите точки од осветлуваната рамнина, што не лежат на ниту една изолуксна крива, се определува со помош на линеарна интерполација помеѓу точките од две соседни изолуксни криви што припаѓаат на една S полурамнина.

Денес, изолуксните дијаграми се користат само за брза проценка на осветленоста во точките од осветлуваната рамнина.

Дијаграмот на сликата 6.25 може да се користи и во случаите кога висината на монтажа на светилката е поинаква од нормираната (т.е. означената на дијаграмот) и/или светлинскиот флуks на изворите во светилката е поинаков од нормираниот (т.е. означениот на дијаграмот). Во таквите случаи, постапката за определување на осветленоста во точката Т од осветлуваната рамнина се состои од три чекори. Во првиот чекор се определуваат координатите на точката Т во координатниот систем на кој е прикажан изолуксен дијаграмот. Во вториот чекор, од нормираниот изолуксен дијаграм што соодветствува за дадената светилка и дадениот наклон се отчитува осветленоста на точката Т. Во третиот чекор се пресметува осветленоста за условите кога висината на светилката е еднаква на зададената и вкупниот светлински флуks на сијалиците во светилката е еднаков на зададениот. За таа цел се користи равенката (6.15):

$$E_T = E'_T \cdot \frac{\Phi_{\text{сиј.}}}{\Phi_{\text{норм.}}} \cdot \left(\frac{H_{\text{норм.}}}{H} \right)^2, \quad (6.15)$$

каде што со E'_T е означена нормираната осветленост во точката Т отчитана од изолуксниот дијаграм, H ја означува висината на светилката над осветлуваната рамнина, $\Phi_{\text{сиј.}}$ го означува флуksот на сијалиците во светилката, а $H_{\text{норм.}}$ и $\Phi_{\text{норм.}}$ ги означуваат висината и флуksот за коишто е нормиран изолуксниот дијаграм, соодветно.



Слика 6.25 Изолуксен дијаграм за светилка со симетрично фотометриско тело во однос на една рамнина

Пример 6.4

Да се реши примерот 6.1 ако вкупниот влукс на сијалиците во светилката е 23 000 lm. Изолуксниот дијаграм за светилката е прикажан на сликата 6.25. Оптичката оска на светилката е вертикална, а полурамнината C_{90} се поклопува со полурамнината определена со $y=6$ m и $x>2$ m (слика 6.22).

Рамнината што минува низ точката Т и е паралелна на рамнината XOY ќе ја сметаме за осветлувана рамнина. Во неа ќе дефинираме локален координатен систем $X'S'Y'$. Неговиот координатен почеток е во точката S' , којшто е проекција на оптичкиот центар на светилката врз осветлуваната рамнина. Оската $S'X'$ е паралелна на оската OX и со неа има иста ориентација. Оската $S'Y'$ е паралелна на оската OY и со неа има иста ориентација.

За да можеме од изолуксниот дијаграм да ја прочитаме нормираната хоризонтална осветленост во точката Т, најнапред треба да ги определиме координатите на таа точка во локалниот координатен систем $X'S'Y'$, и тоа:

$$x'_T = x_T - x_S = 6 - 2 = 4 \text{ m} \quad \text{и} \quad y'_T = y_T - y_S = 3 - 6 = -3 \text{ m} .$$

Висината на светилката над осветлуваната рамнина е $H = z_S - z_T = 8 - 3 = 5 \text{ m} .$

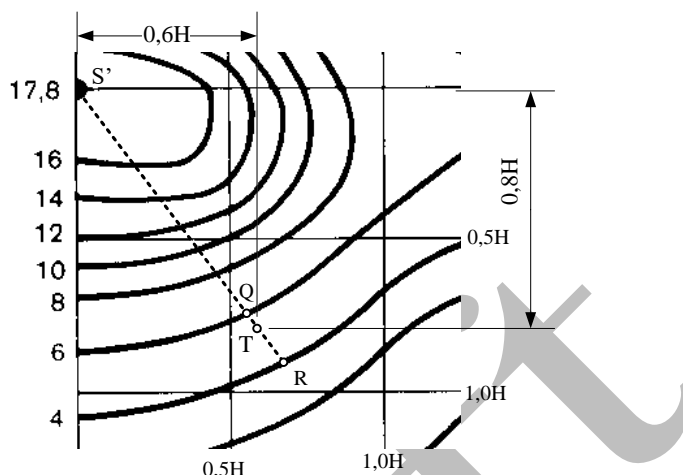
Координатите на точката Т, изразени преку висината на поставување на светилката (т.е. во координатниот систем во кој е прикажан изолуксниот дијаграм), се:

$$T\left(\frac{x'_T}{H}, \frac{y'_T}{H}\right) = T\left(\frac{4}{5}H; \frac{-3}{5}H\right) = T(0,8H; -0,6H) .$$

Позитивната вредност на апсцисата и негативната вредност на ординатата укажуваат дека точката Т лежи во С полурамнина чијшто агол е помеѓу 0° и 90° . Поради симетријата на фотометриското тело на светилката во однос на рамнината $C_{90}-C_{270}$ и уважувајќи ја релацијата (6.6), може да се напише:

$$E'(0,8H; -0,6H) = E'(0,8H; 0,6H) .$$

На сликата 6.26 е прикажан дел од изолуксниот дијаграм на светилката на којшто е нацртана позицијата на точката Т. Од сликата 6.26 ги определуваме должините на отсечките $\overline{QT} \approx 3 \text{ mm}$ и $\overline{QR} \approx 7 \text{ mm} .$



Слика 6.26 Определување на нормираната осветленост во точката T

Сметајќи дека промената на осветленоста по должината на отсечката \overline{QR} е линеарна, за нормираната осветленост во точката T се добива:

$$E'_T = E'_Q + \frac{\overline{QT}}{\overline{QR}} \cdot (E'_R - E'_Q) = 6 + \frac{3}{7} \cdot (4 - 6) \approx 5,14 \text{ lx} .$$

Конечно, со примена на изразот (6.15), за осветленоста во точката T се пресметува:

$$E_T = E'_T \cdot \frac{\Phi_{\text{свет.}}}{\Phi_{\text{норм.}}} \cdot \left(\frac{H_{\text{норм.}}}{H} \right)^2 = 5,14 \cdot \frac{23000}{11500} \cdot \left(\frac{10}{5} \right)^2 = 41,1 \text{ lx} .$$

6.5.3 Коэффициент на искористување на осветлението

Коэффициент на искористување на осветлението се дефинира како однос помеѓу светлинскиот флукс што паѓа врз површината што треба да се осветли и вкупниот флукс на сијалиците инсталирани во светилките со кои се осветлува површината. Коэффициентот на искористување на осветлението се означува со грчката буква η или, почесто, со кратенката UF што доаѓа од англискиот термин *Utilisation Factor*. Ако со $\Phi_{\text{површ.}}$ го означиме флуксот што паѓа врз осветлуваната површина, а со $\Phi_{\text{сиј.}}$ се означи вкупниот флукс на сијалиците во сите употребени светилки, за коэффициентот на искористување на осветлението UF може да се напише:

$$UF = 100 \cdot \frac{\Phi_{\text{површ.}}}{\Phi_{\text{сиј.}}} . \quad (6.16)$$

Од дефиницијата на коэффициентот на искористување на осветлението е разбирливо дека тој е помал од 100%. Во општ случај, UF може да се дефинира како

за светилките наменети за внатрешно осветление така и за светилките наменети за надворешно осветление. Но, по правило, тој се дефинира за светилките за внатрешно осветление. Исто така, со оглед на тоа што рефлекторските светилки не се наменети за системи за општо осветление¹⁰⁹, за нив не се практикува публикување на податоците за коефициентот на искористување на осветлението.

Во затворениот простор (просторија) во кој се наоѓаат светилките се јавува ефектот на повеќекратно одбивање (видете пододдел 4.5.3). Флукот што ќе падне на набљудуваната рамнина се состои од две компоненти: директна и индиректна. Директната компонента на овој флукс зависи од светлотехничките карактеристики на светилките, димензиите на просторијата и растојанието на набљудуваната рамнина од светилките. Индиректната компонента зависи од светлотехничките карактеристики на светилките, обликот и димензиите на просторијата, начинот на одбивање и коефициентите на одбивање од граничните површини на просторијата (плафонот, ѕидовите и подот).

Врз основа на дефиницијата на UF може да се каже дека во неговата вредност е вклучена вредноста на коефициентот на искористување на светилките, LOR . Имајќи го тоа предвид, за UF може да се напише:

$$UF = LOR \cdot RUF, \quad (6.17)$$

каде што со RUF (*Room Utilisation Factor*) е означен коефициентот на искористување на просторот.

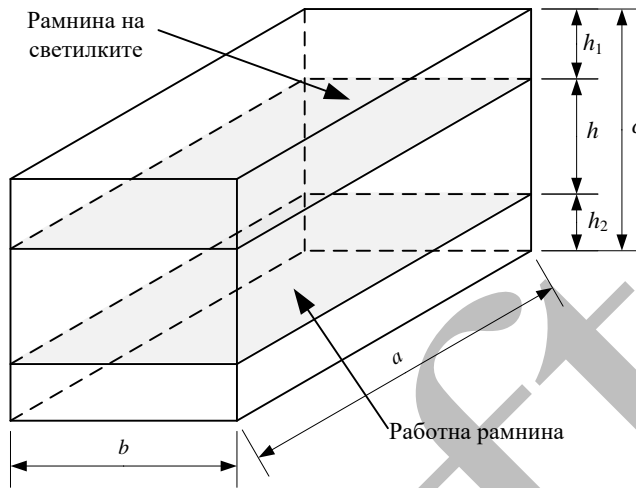
Во најголем број случаи коефициентот на искористување на осветлението се дефинира за работната рамнина во една просторија (која е во вид на правоаголен паралелопипед). Најчесто, работната рамнина е паралелна на подот на просторијата и е на висина $h_2=0,85$ m од него. UF се користи за фотометриски пресметки во системи за електрично осветление каде што светилките се рамномерно распоредени во една рамнина, паралелна на работната рамнина и на растојание h од неа.

На сликата 6.27 е прикажана скица на просторија во вид на правоаголен паралелопипед (т.е. квадар). Коефициентот на одбивање на ѕидовите ќе го означиме со ρ_3 .¹¹⁰ Со цел да се поедностави постапката за пресметка на UF се претпоставува дека работната рамнина е материјална со еквивалентен коефициент на одбивање ρ_4 во којшто се вклучени ефектите¹¹¹ на подот, ѕидовите под работната рамнина и намештајот и опремата. Слично на тоа, ако светилките не се поставени на плафонот од просторијата, ефектите од таканаречената „шуплина на плафонот“ се апроксимираат на тој начин што рамнината на светилките се смета за материјална со еквивалентен коефициент на одбивање означен со ρ_1 . Ако светилките се поставени на плафонот, со ρ_1 се означува просечниот коефициент на одбивање од плафонот.

¹⁰⁹ За подетални информации и дефиниции на системите за осветление погледајте го поглавјето 7.

¹¹⁰ Коефициентот на одбивање од ѕидовите претставува просечна вредност на коефициентите на одбивање на одделните површини на ѕидовите.

¹¹¹ Станува збор за одбивање на светлината и „заробениот флукс“ како резултат на повеќекратното одбивање што настанува во таканаречената „шуплина на подот“ (*Floor cavity*).



Слика 6.27 Скица на просторија кон дефиницијата на UF

Врз основа на претходните забелешки, за коефициентот на искористување на осветлението, со избран тип на светилка, можеме да кажеме дека претставува функција од повеќе променливи:

$$UF = f(a, b, h, \rho_1, \rho_3, \rho_4), \quad (6.18)$$

каде што ознаките a , b , и h се со значењата како на сликата 6.27.

Сосема е разбирливо дека за избран тип на светилка може да се дефинираат бесконечно голем број коефициенти на искористување на осветлението, во зависност од димензиите на просторијата, висината на поставување на светилките и коефициентите на одбивање од граничните површини на просторијата. Со цел да се поедностави постапката со која се пресметува UF и со цел да се обезбеди практичен начин на презентација на податоците за UF , влијанието на димензиите на просторијата и висината на поставување на светилките се обединети во една променлива која што се нарекува *индекс на просторијата*. Индексот на просторијата се означува со k и се пресметува според следниот израз:

$$k = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)}, \quad (6.19)$$

каде што значењето на a , b и h е како на сликата 6.27.

Според тоа, за UF можеме да кажеме дека е функција од четири променливи:

$$UF = f(k, \rho_1, \rho_3, \rho_4).$$

Изразот (6.19) овозможува со релативно мал број вредности за k да се опфатат практично сите простории во вид на правоаголен паралелопипед со различни димензии и различни висини на поставување на светилките.

Во табелата 6.13 е даден пример на табела со вредности на коефициентот на искористување на осветлението за еден тип на светилка, во зависност од индексот на просторијата и коефициентите на одбивање од граничните површини. За секој тип на светилка, производителите на светилки обезбедуваат табела со сличен облик како и табелата 6.13.

Со помош на табелите (каква што е табелата 6.13), коефициентот на искористување на осветлението се определува на следниот начин. Се избира светилка што соодветствува на потребите за осветление на просторијата. Потоа, се усвојуваат коефициентите на одбивање од граничните површини. Во зависност од висината на поставување на светилките, за просторијата се пресметува индексот на просторијата k според (6.19). Со светилки од избраниот тип во дадената просторија, UF се отчитува од табелата 6.13, во пресекот на редицата што одговара на индексот на просторијата и колоната што одговара на комбинацијата на коефициентите на одбивање.

Во општ случај, пресметаниот индекс на просторијата k може да не биде еднаков со ни една од вредностите наведени во табелата 6.13. Во тој случај, претпоставувајќи дека во интервалот помеѓу соседните вредности k_1 и k_2 ($k_1 < k < k_2$) зависноста на UF од k е линеарна, коефициентот на искористување на осветлението се пресметува од следниот израз:

$$UF(k) = UF(k_1) + \frac{UF(k_2) - UF(k_1)}{k_2 - k_1} \cdot (k - k_1). \quad (6.20)$$

На сличен начин се постапува и во случајот кога комбинацијата на одбраните коефициенти на одбивање не постои во табелата за UF .

Податоците од табелите за UF можат да се пресметаат на неколку начини. Во САД се користи методот на IESNA [6], додека во Европа методологијата предвидена со EN 13032, која уште се нарекува и „хармонизирана европска методологија за пресметка на UF “. Заедничко и за двата метода е што податоците за UF се пресметуваат преку кумулативните зонални флукови за светилката. Во методот на IESNA за пресметка на коефициентот на искористување на осветлението се дефинирани 18 зонални агли (10° , 20° , ..., 180°), со што е опфатен целиот простор околу една светилка. Во методологијата од EN 13032, UF се пресметува од CEN флукс кодовите на светилката и табеларни податоци што го дефинираат влијанието на геометријата на просторијата, коефициентите на одбивање итн. Методот од EN 11032 има предност затоа што табелите за влијанието на просторијата се непроменливи и не зависат од светилката. Така, ако се познати CEN флукс кодовите на светилката, со релативно едноставен компјутерски програм, табела за UF може многу брзо и лесно да се генерира..

Табела 6.13 Пример на табела со вредности на коефициентот на искористување на осветлението

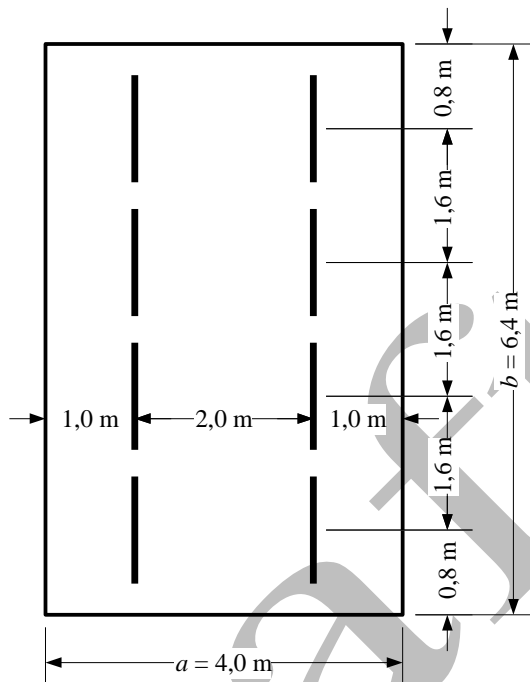
Индекс на просторијата	Коефициенти на рефлексија $\rho_1/\rho_3/\rho_4$ (%)						
	80/70/30	70/50/30	70/50/10	50/50/10	50/30/10	30/30/10	0/0/0
	Коефициент на искористување на осветлението (%)						
0,60	35	25	24	22	18	17	12
0,80	42	31	29	27	23	21	16
1,00	47	36	33	31	27	25	19
1,25	51	40	37	34	31	28	22
1,50	55	44	41	37	34	31	25
2,00	60	50	45	41	38	35	29
2,50	63	53	48	44	41	38	32
3,00	65	56	50	46	43	40	34
4,00	68	59	52	48	46	42	36
5,00	70	61	54	50	47	44	37

Во табелата 6.13 се дадени седум комбинации на коефициенти на одбивање. Во пракса, производителите можат да обезбедат табели и со други комбинации на коефициенти на одбивање. Исто така, во некои случаи, во табелите се прикажуваат податоците за UF за коефициенти на одбивање еднакви на нула, како што е тоа случајот со табелата 6.13. Од коефициентите на искористување на осветлението од последната колона на табелата 6.13 може да се определи директната компонента на флуksот што паѓа врз работната рамнина.

Во врска со табелите за UF треба да се забележи дека тие се однесуваат за номиналната вредност на односот SHR , т.е. $SHR_{ном.}$. Кратенката SHR (*Spacing to Height Ratio*) го означува односот на (просечното) растојание меѓу светилките и висината на поставување на светилките над работната рамнина. Во таа смисла SHR_{max} го означува најголемиот дозволен однос на SHR при којшто сè уште се задоволени барањата за рамномерност на осветленоста на работната рамнина. SHR_{max} зависи од распределбата на светлинската јачина на светилката и тој, по правило, се движи во границите од 1 до 2. Во EN 13032 се предвидени вредности на $SHR_{ном.}$ од следната низа броеви: 1, 1,25, 1,5, 1,75 и 2. Номиналната вредност на SHR за светилката, $SHR_{ном.}$, се одбира како првата вредност од претходната низа броеви што е помала од SHR_{max} .

Пример 6.5

Просторијата е во вид на правоаголен паралелопипед со должина 6,4 m, ширина 4,0 m и висина 3,2 m. На плафонот на просторијата се поставени 8 еднакви светилки. Распоредот на светилките е прикажан на сликата 6.28. Секоја од светилките е долга 1,27 m и во неа се инсталирани две ФСЦ. Секоја ФСЦ е со номинален светлински флуks 3 350 lm. Коефициентите на одбивање од плафонот, ѕидовите и подот се 0,5, 0,3 и 0,1, соодветно. За употребениот тип на светилка, коефициентите на искористување на осветлението се дадени во табелата 6.13. Работната рамнина е на висина 0,85 m од подот. Да се пресмета средната осветленост на работната рамнина.



Слика 6.28 Распоред на светилките за примерот 6.5

Бидејќи светилките се поставени на плафонот, нивната висина над работната рамнина е:

$$h = 3,2 - 0,85 = 2,35 \text{ m}.$$

Од (6.19) за индексот на просторија следува:

$$k = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot 6,4}{2,35 \cdot (4 + 6,4)} = 1,047.$$

Во табелата 6.13 не се дадени вредностите на UF за $k = 1,047$. Поради тоа, од табелата 6.13 ќе отчитуваме вредности за коефициентот на искористување на осветлението за двете соседни вредности за k , и тоа: за $k_1=1,00$ и за $k_2=1,25$. Вредностите ќе ги отчитуваме од колоната што соодветствува на задените коефициенти на одбивање од плафонот, ѕидовите и подот. Тоа е колоната кај која при врвот стои 50/30/10. Од таа колона отчитуваме $UF_{k_1} = 0,27$ и $UF_{k_2} = 0,31$. Потоа, со линеарна интерполација го пресметуваме коефициентот на искористување на осветлението за $k=1,047$:

$$UF = UF_k = UF_{k_1} + \frac{UF_{k_2} - UF_{k_1}}{k_2 - k_1} \cdot (k - k_1) = 0,27 + \frac{0,31 - 0,27}{1,25 - 1,00} \cdot (1,047 - 1,00) = 0,2775.$$

Според зададеното, во просторијата се поставени 8 светилки. Во секоја светилка има по две ФСЦ. Бидејќи секоја ФСЦ е со номинален светлински флукс 3 350 lm, вкупниот светлински флукс на сите сијалици во просторијата е:

$$\Phi_{\text{сите сијалици}} = 8 \cdot 2 \cdot 3 \, 350 = 53 \, 600 \text{ lm} .$$

Врз основа на дефиниционата равенка за коефициентот на искористување на осветлението (6.16), при приближно рамномерен распоред на светилките во просторијата, флуksот што паѓа на работната рамнина е еднаков на производот на флуksот на сите сијалици во сите светилки во просторијата и коефициентот на искористување на осветлението:

$$\Phi_{\text{работна рамнина}} = \Phi_{\text{сите сијалици}} \cdot UF = 53 \, 600 \cdot 0,2775 = 14 \, 874 \text{ lm} .$$

Бараната средна осветленост на работната рамнина се добива како количник помеѓу флуksот што на неа паѓа и нејзината плоштина:

$$E_{\text{средна}} = \frac{\Phi_{\text{работна рамнина}}}{S_{\text{работна рамнина}}} = \frac{10 \, 934,4}{4 \cdot 6,4} = 581 \text{ lx} .$$

Да нагласиме дека пресметаната средна осветленост на работната рамнина се однесува на условите кога: сијалиците се нови, светилките се чисти и коефициентите на одбивање од плафонот, ѕидовите и подот се еднакви на зададените.

6.5.4 Сјајност на светилките

Во стандардот EN 13032 се предвидува производителите на светилките да обезбедат податоците за сјајноста на светилките. Ови податоци се прикажуваат во нормираните табели на сјајности. Табелите за сјајност, слично како и *I*-табелите, се нормираат за флуks на сијалиците инсталирани во светилката еднаков на 1 klm. Во табелите за сјајност се прикажуваат сјајностите на светилката за критичните правци (од аспект на појава на директно блескотење) дефинирани со следниве агли во однос на оптичката оска: 55°, 65°, 75° и 85°. За секој од овие агли во табелата се прикажува средната сјајност на светилката добиена од сјајностите во *C* полурамнините дефинирани во табелата 6.10.

Пресметката и контролата на блескотењето во системите за осветление претставува составен дел од фотометриските пресметки. За пресметка и контрола на блескотењето кај системите за внатрешно осветление CIE и CEN го препорачуваат методот *UGR* [42].

Со помош на методот *UGR* се пресметува *индексот на блескотење (Glare Rating)*. Методот има три варијанти: со користење на формула за *UGR*, со употреба на табели за *UGR* и со примена на криви за *UGR*.

Методот за пресметка на блескотењето со помош на формулата за *UGR* е погоден за компјутерска пресметка и е составен дел на сите современи апликации за фотометриски пресметки. Неопходните податоци за примена на оваа варијанта на методот се распределбата на светлинската јачина (*I*-табели) и обликот, положбата и плоштината на светлечките површини на светилката. Со помош на овој метод се генерираат табелите и кривите за *UGR*.

Методот во кој се користат криви за *UGR* се смета за наједноставен за примена, но се одликува со релативно големи грешки при пресметките.

Табеларниот метод за *UGR* се одликува со релативно точни пресметки и релативно едноставна примена. Тој најчесто се користи при „рачни“ пресметки, во комбинација со табелите за коефициентот за искористување на осветлението.

Табелата 6.14 претставува пример на типична табела за *UGR* за светилка со ФСЦ. Табелите за *UGR* содржат вредности на факторот на блескотење за референтни вредности на параметрите, како што се: флуks на сијалиците во светилката, висина на поставување на светилките над висината на набљудувачот (*H*), број и моќност на сијалице итн. Притоа, се дадени две множества на податоци за индексот на блескотење, во зависност од позицијата, т.е. правецот на гледање на набљудувачот, и тоа: надолжен (паралелен на подолгата страна на основата на просторијата) и напречен (паралелен на покусата страна на основата на просторијата).

Димензиите на просторијата се изразени како множители на висината на поставување на светилката над окото на набљудувачот. Вообичаено, податоците во табелите за *UGR* се однесуваат за $H=2$ m и инсталиран флуks од 1 klm. Вака дефинираните табели за *UGR* се нарекуваат и *некорегирани*.

Табелите за *UGR* можат да бидат *комплетни* или *редуцирани*. Во комплетните некорегирани табели, каква што е табелата 6.14, во долниот дел се дадени податоците за корекција. Во случајот, податоците за индексот на блескотење треба да се корегираат за различни вредности на *SHR* и различен број и моќност на ФСЦ.

Табела 6.14 Пример на комплетна и некорегирана табела за *UGR*

Reflectances:												
ceiling/cavity	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3		
walls	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3		
working plane	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2		
Room dimensions:		Viewed crosswise					Viewed endwise					
x = 2H	y = 2H	14,4	15,4	14,6	15,6	16,0	13,5	14,5	13,7	14,7	15,1	
	3H	14,3	15,3	14,6	15,5	15,8	13,3	14,3	13,6	14,5	14,8	
	4H	14,2	15,1	14,5	15,3	15,6	13,2	14,1	13,5	14,3	14,6	
	6H	14,0	14,8	14,4	15,1	15,4	13,0	13,8	13,4	14,1	14,4	
	8H	14,0	14,8	14,4	15,1	15,4	13,0	13,8	13,4	14,1	14,4	
	12H	14,0	14,8	14,3	15,0	15,4	13,0	13,8	13,3	14,0	14,4	
	4H	2H	14,4	15,3	14,7	15,5	15,8	13,6	14,5	13,9	14,7	15,0
		3H	14,3	15,1	14,6	15,3	15,7	13,4	14,2	13,7	14,4	14,8
		4H	14,1	15,0	14,5	15,2	15,7	13,2	14,1	13,6	14,3	14,8
		6H	14,1	14,7	14,6	15,1	15,6	13,2	13,8	13,7	14,2	14,7
		8H	14,0	14,6	14,6	15,0	15,5	13,1	13,7	13,7	14,1	14,6
		12H	14,0	14,6	14,6	15,0	15,5	13,1	13,7	13,7	14,1	14,6
	8H	4H	14,0	14,6	14,6	15,0	15,5	13,1	13,7	13,7	14,1	14,6
		6H	14,0	14,5	14,5	14,9	15,3	13,1	13,6	13,6	14,0	14,4
		8H	13,9	14,3	14,4	14,7	15,3	13,0	13,4	13,5	13,8	14,4
		12H	13,9	14,3	14,4	14,6	15,3	13,0	13,4	13,5	13,7	14,4
	12H	4H	14,0	14,6	14,6	15,0	15,5	13,1	13,7	13,7	14,1	14,6
		6H	13,9	14,3	14,4	14,7	15,3	13,0	13,4	13,5	13,8	14,4
		8H	13,9	14,3	14,4	14,6	15,3	13,0	13,4	13,5	13,7	14,4
Variations with the observer position at spacings:												
S = 1H	+0,9 / -2,1					+0,8 / -1,5						
1,5H	+2,2 / -7,9					+2,6 / -12,1						
2H	+4,0 / -16,0					+4,0 / -22,9						
Corrections for other luminaires of the same type:												
1 x 18W: +2,4				1 x 36W: 0				1 x 58W: -0,8				

Кај системите за надворешно осветление се користат други методи, споменати во потпоглавјето 3.12. Кај тие методи доволни податоци за светилките се

распределбата на светлинската јачина и плоштината на делот од површината на светилката кој зрачи светлина.

Draft

7 СИСТЕМИ НА ЕЛЕКТРИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ

7.1 Општо за системите за електрично осветление

Системите за (електрично) осветление (СО) се состојат од повеќе компоненти. Секоја од компонентите има влијание врз светлотехничките одлики на СО. Најголемото влијание, секако, го имаат светилките со соодветните сијалици. Но, како што беше покажано во одделот 6.5.3, и осветлуваната просторија, со својата форма, димензии и рефлексни својства на граничните површни, има влијание врз светлотехничките ефекти. Во случаите на надворешно осветление, осветлуваниот простор и објектите имаат помало влијание врз светлотехничките карактеристики на системот за осветление, отколку во случаите со системи за осветление на затворени простори.

Како составни делови на СО можат да се сметаат напојната електрична инсталација и системите за управување со СО. Електричната инсталација ја доведува електричната енергија до секоја светилка одделно, така што светлината се произведува „локално“, во сијалиците инсталирани во светилките. Во поново време, со појавата на системите со оптички влакна и светловодите (засега главно наменети за специјални апликации), улогата на електричната инсталација делумно ја заменуваат „спроводниците“ за светлина. Системите за управување со СО, во најголем број случаи, се состојат од прекинувачи со кои се вклучува и исклучува напојувањето на светилките со електрична енергија.

Посложените системи за управување најчесто се користат во комерцијални и административни згради, со главна цел да се намали потрошувачката на електрична енергија наменета за осветление. Многу често, овие системи се конструирани така што максимално ја искористуваат дневната светлина. Значителни заштеди во електричната енергија се постигнуваат на тој начин што, во одделните простории, светилките се контролирани од детектори за присуство на луѓе, временски релиња и фотоќелии за детекција на дневна светлина, така што сијалиците се вклучуваат само ако нема доволно дневна светлина и ако некој престојува во просторијата. Не се ретки случаите кога со софистицирани системи за управување можат да се постигнат заштеди во потрошувачката на енергија дури од 80%, во споредба со СО без системи за управување [6].

Управувањето на СО наменети за надворешни простори главно се сведува на вклучување на светилките во раните ноќни часови со помош на фотосензори и намалување на флуksот на сијалиците во доцните ноќни часови кога сообраќајот е значително намален.

7.2 Видови системи на електрично осветление

7.2.1 Системи на електрично осветление за затворени простори

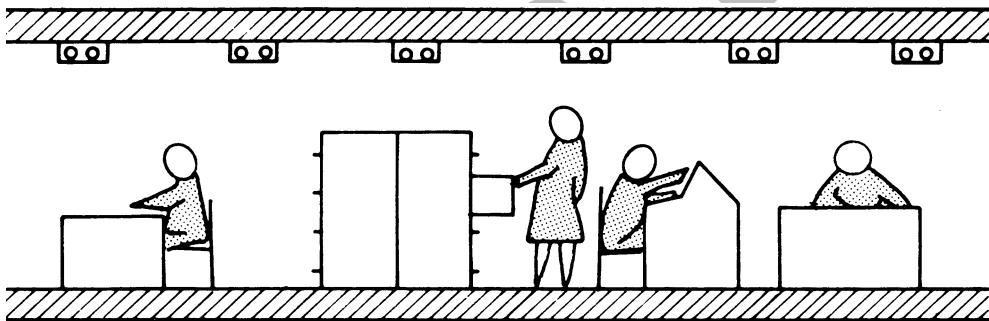
Кај системите за осветление наменети за затворени простори разликуваме:

- системи за општо осветление,
- системи за општо и дополнително осветление и
- системи за локализирано општо осветление.

Оваа поделба на СО произлегува од типот на употребените светилки и нивниот распоред во осветлуваната просторија.

Општо осветление

Систем за општо осветление се одликува со фиксно поставени светилки, рамномерно распоредени над осветлуваната (работна) рамнина. Светилките се од ист тип или со многу слични светлотехнички карактеристики и се поставени во една рамнина, а начинот на којшто се распоредени овозможува релативно голема рамномерност на осветленоста во сите делови од осветлуваната рамнина. На сликата 7.1 е прикажан пример на систем за општо осветление во една работна просторија.



Слика 7.1 Систем за општо осветление [5]

Системите за општо осветление се карактеризираат со следното:

- + создаваат приближно рамномерна осветленост во целата просторија, а со тоа и пријатен амбиент за работа,
- + овозможуваат флексибилен избор на локации за работните места и на тој начин придонесуваат за подобро искористување на површината на просторијата,
- + имаат едноставна електрична инсталација и релативно едноставен систем за управување, и
- создаваат поголема осветленост и во деловите од просторијата каде тоа не е неопходно.

Како резултат на последната (негативна) карактеристика, системите за општо осветление, во споредба со останатите, се карактеризираат и со зголемена потрошувачка на електрична енергија и поголема ангажирана моќност.

Системите за општо осветление се применуваат во случаите кога нивните позитивни карактеристики доаѓаат до израз, како што е во случаите: кога во фазата на проектирање не е познат распоредот на работните места, кога постои потреба за измена на распоредот на работните места во текот на експлоатацијата на објектот или ако во целата просторија се предвидуваат активности со приближно еднакви светлотехнички барања. Типични примери на работни простории во кои се применуваат системите за општо осветление се: училиници, фабрички хали, конференциски сали, простории за административни и комерцијални работи, и сл.

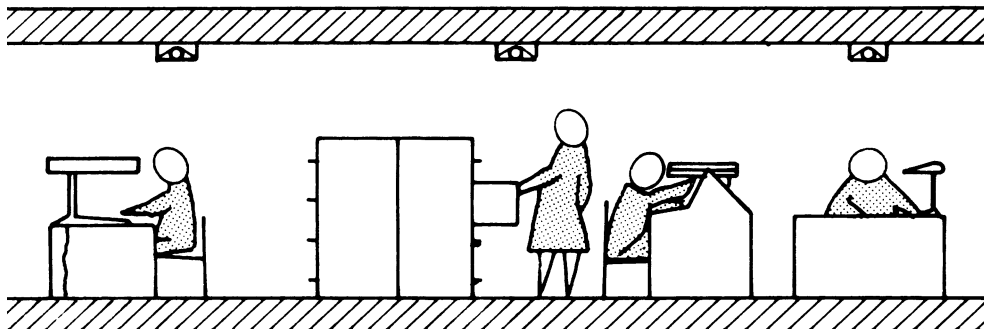
Општо и дополнително осветление

Како што самото име кажува, овој систем всушност се состои од два система. Системот за општо осветление обезбедува определено ниво на осветленост во просторијата, додека со светилките за дополнително осветление се подобрува осветленоста на одделни делови од осветлуваната површина. Системот за дополнително осветление се состои од светилки (за директно осветление) поставени блиску до површината или објектите што треба да бидат осветлени. Во ретки случаи, системот за дополнително осветление се изведува со оддалечени рефлекторски светилки.

Создавање на повисока осветленост на помали површини има функционално и економско оправдание. Покрај другото, улогата на дополнителното осветление е да овозможи на секое осветлувано место потребната осветленост да се усогласи со карактерот на работните задачи, староста на корисниците на осветлението и карактеристиките на нивниот вид. Но, изворите на дополнителното осветление треба да бидат избрани и поставени така да не предизвикуваат блескотење кај корисниците во просторијата.

Во просторија осветлена со општо и дополнително осветление, деловите од работната рамнина, што се осветлени со светилки од двата система, можат да имаат значително поголема осветленост отколку деловите осветлени само од светилките од системот за општо осветление. Со цел рамномерноста на осветленоста на целата работна површина да биде во прифатливи граници, се препорачува системот за општо осветление да обезбеди најмалку 20% од осветленоста што се постигнува со општото и дополнителното осветление.

На сликата 7.2 е прикажан пример на просторија осветлена со општо и дополнително осветление.



Слика 7.2 Систем за општо и дополнително осветление [5]

Комбинацијата на општо и дополнително осветление има за цел да ја ублажи негативната карактеристика на општото осветление. Но, притоа, се усложнува (и поскапува) електричната инсталација, поради тоа што е потребно да се обезбеди напојување на светилките за дополнително осветление.

Карактеристиките на општото и дополнителното осветление се:

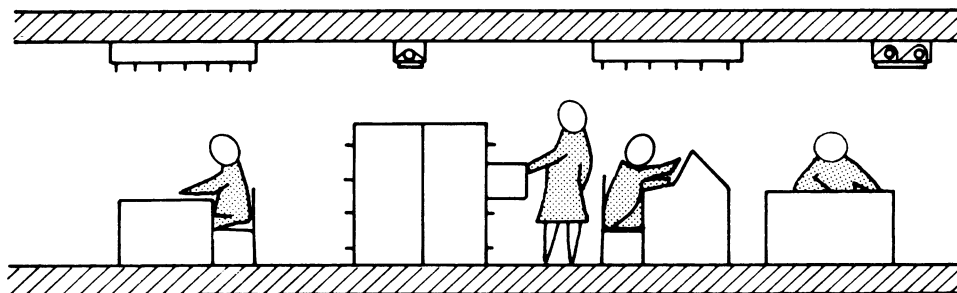
- + релативно едноставно обезбедување на потребната осветленост за квалитетно извршување одделни работни задачи, како и прилагодување на потребната осветленост кон карактеристиките на видот на работникот,
- + заштеда на трошоците за електричната енергија и моќност,
- подоцнежна промена на локациите на работните места зависи од можностите на претходно изведената електрична инсталација за дополнително осветление, и
- посложена електрична инсталација, за чие проектирање и изведување е неопходно однапред да се знае распоредот на опремата и локациите на работните места.

Комбинацијата на општо и дополнително осветление се користи во случаите кога однапред е познат распоредот и карактерот на работните места и во случаите кога во една просторија треба да се изведуваат активности и работни задачи со големи разлики во потребната осветленост.

Локализирано општо осветление

Локализираното општо осветление е модификација на општото осветление со определени карактеристики на дополнителното осветление. Осветленоста на одделните делови од работната рамнина е прилагодена на видните потреби на предвидените активности, но тоа се постигнува со фиксно поставени светилки, слично како и кај општо осветление. Светилките не мора да се од ист тип и нивните карактеристики се прилагодени според потребите за осветление на одделните делови во просторијата.

На сликата 7.3 е прикажан пример на просторија осветлена со локализирано општо осветление.



Слика 7.3 Системи за локализирано општо осветление [5]

Локализираното општо осветление може да ги надмине некои од проблемите и негативни карактеристики на претходните два типа. Но, евидентно е дека карактеристиките на локализираното општо осветление претставуваат комбинација на некои од позитивните и негативните карактеристики на општото и дополнителното осветление, како што се:

- + усогласување на нивото на осветленост во одделните делови на просторијата со предвидените активности,
- + смалени трошоци за ангажираната електрична моќност и енергија,
- релативно скапа електрична инсталација,
- проблеми при проектирањето поврзани со потреба за однапред познавање на видот и локации на работните места, и
- кај веќе изградените системи нема флексибилност при изборот на локации за работните места.

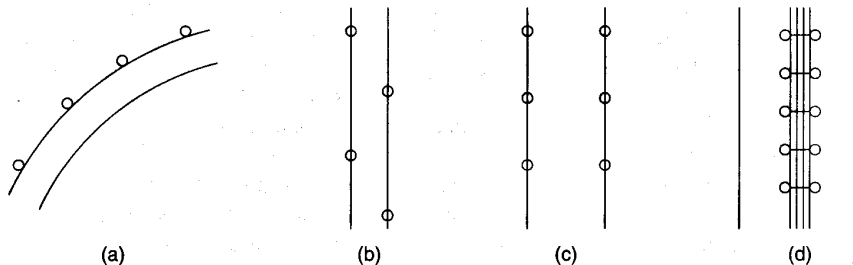
7.2.2 Системи на електрично осветление за отворени простори

Во најголем број случаи, системите за осветление на отворени простори ги имаат карактеристиките на општото осветление за затворени простори. Една од одликите на осветлението на отворени простори е што осветлуваните површини се обично големи (а тоа може да значи голема ангажирана електрична моќност и голема потрошувачка на електрична енергија). Ваквите системи главно се користат за осветление на сообраќајници, паркиралишта, отворени складишта и сл. Во останатите случаи светилките се поставуваат, и нивните карактеристики се одбираат, да одговараат на потребите за осветление на непосредната околина, слично како и кај системите за локализирано општо осветление.

Поради тоа, за СО за отворени простори, со исклучок на СО наменети за сообраќајници, не постои посебна категоризација.

На сликата 7.4 се прикажани четирите основни типа на СО за сообраќајници. Поделбата е направена според начинот на којшто се распоредени светилките, и тоа: а) едностран распоред, б) двостран наизменичен, в) двостран распоред и г) централен распоред. Кај овие системи, слично како и кај општото осветление за затворени простори, светилките се од ист тип и се поставени на иста висина и на еднакви

меѓусебни растојанија. Покрај овие основни типови распореди, можни се и комбинации од нив.



Слика 7.4 Системи на осветление за сообраќајници [5]

Специфичен проблем е осветлението на терени на отворено за спортски активности, како што се: фудбал, безбол, скијање и др.

7.2.3 Системи со оптички влакна и светловоди

Системи со оптички влакна

Кај системите со оптички влакна¹¹² и светловодите се користат специјални видови светилки и оптички системи. За разлика од „класичните“ СО, наместо електрична енергија да се доведува до светилките поставени блиску до осветлуваните објекти, кај овие системи светлината се дистрибуира со помош на оптички влакна или светловоди. Поради тоа, системите со оптички влакна и светловодите во овој труд се третирали како специјални СО.

Системите со оптички влакна имаат извор на светлина (специјална рефлекторска светилка со халогена или метал-халогена сијалица) и соодветен рефлекторски оптички систем што ја насочува светлината кон почетоците на едно или повеќе оптички влакна. Светлината навлегува во влакното и се простира до неговиот крај, при што загубите (поради апсорпцијата) се многу мали. Крајот на оптичкото влакно, на којшто може дополнително да биде поставен некаков оптички систем или филтер во боја, всушност претставува светилка. Покрај претходните типови влакна, постојат и варијанти кај коишто светлината се емитува по целата обвивка на влакното, со што се постигнува ефект сличен како кај сијалиците со племенити гасови (на пример, неонските).

Оптичките влакна се изработуваат од пластика или стакло и нивниот дијаметар може да достигне и до десетина милиметри. Главен недостаток на оптичките влакна,

¹¹² Во англиската терминологија за овие системи се користи терминот *fiber optics*. Можеби посоодветени би биле термините *оптички спроводник* или *оптички вод*, но тие термини се многу слични со терминот *светловод*. Со оглед на конструктивните разлики, во овој труд ќе го користиме терминот *оптички влакна*, вообичаен во системите за телекомуникации или пренос на податоци, иако оптичките влакна за дистрибуција на светлина можат да имаат значително поголема димензија (дијаметар) од оптичките влакна за пренос на податоци.

во споредба со електричните спроводници, е нивната кршливост. Од друга страна, системите со оптички влакна имаат предности во однос на класичните СО поради следното:

- намалени опасности од пожар, експлозија и електромагнетни влијанија,
- намалено загревање на осветлените предмети и смалени трошоци за ладење на просториите,
- поедноставена електрична инсталација,
- централизирано одржување и чистење на светлинските извори,
- зголемување на енергетската ефикасност на системот за осветление со употреба на сијалици со голема моќност (т.е. големо специфично производство) наместо голем број сијалици со мала моќност (т.е. мало специфично производство).

Системите со оптички влакна главно се користат за ефекти при внатрешно уредување на просториите и за осветление на излози, музеи, галерии, базени и др.

Светловоди

Светловодите, слично како и оптичките влакна, служат за пренесување на светлината од светлинскиот извор до предметите што треба да се осветлат. За разлика од оптичките влакна, светловодите се изведени како цевки изработени од пластика и нивниот дијаметар може да биде и неколку десетина центиметри.

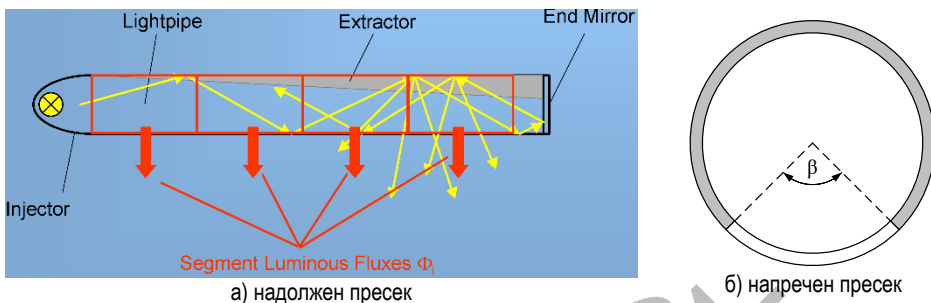
На почетокот на светловодот може да биде „вештачки извор на светлина“¹¹³ (на пример, сулфурна или метал-халогена сијалица) и/или уред со кој се зафаќа дневна светлина. На другиот крај од светловодот се поставува огледало што ја одбива светлината наназад (слика 7.5.а).

Внатрешната страна од светловодот е направена од материјали со различни светлотехнички својства. Делот од светловодот што треба да емитира светлина (светлечка површина) е изработен од материјал чиишто својства на одбивање и пропуштање зависат од упадниот агол на светлината. За упадни агли, во однос на нормалата на површината, поголеми од $\sim 60^\circ$ внатрешната страна од светловодот ја одбива светлината, додека за упадни агли помали од $\sim 60^\circ$ материјалот ја пропушта светлината.

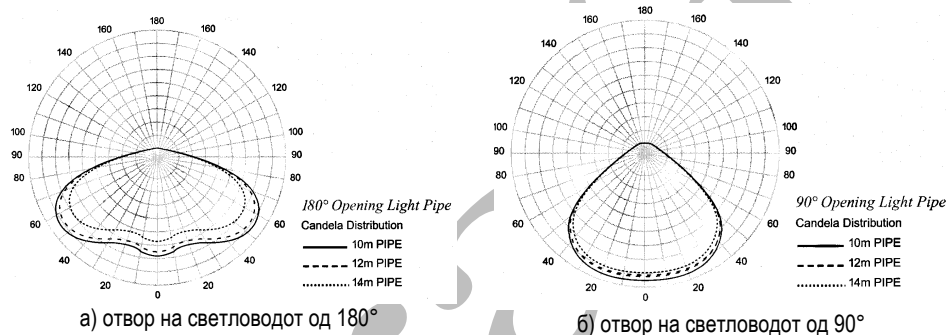
На страната на светловодот што е наспроти светлечката површина се поставува материјал што ја одбива светлината дифузно. Овој дел од светловодот се нарекува *екстрактор*. За да се обезбеди униформна распределба на израчениот светлински флуks по должината на светловодот треба, со зголемување на растојанието од светлинскиот извор, екстракторот да зафаќа сè поголем дел од внатрешната површина на светловодот.

Големината на светлечката површина определена со аголот β (прикажан на сликата 7.5.б), се нарекува „отвор на светловодот“ и таа ја дефинира распределбата на светлинската јачина на светловодот. На сликата 7.6 се прикажани дијаграмите за распределба на светлинската јачина за светловоди со различни отвори.

¹¹³ Под „вештачки извори на светлина“ подразбираме електрични сијалици.



Слика 7.5 Скица на светловод

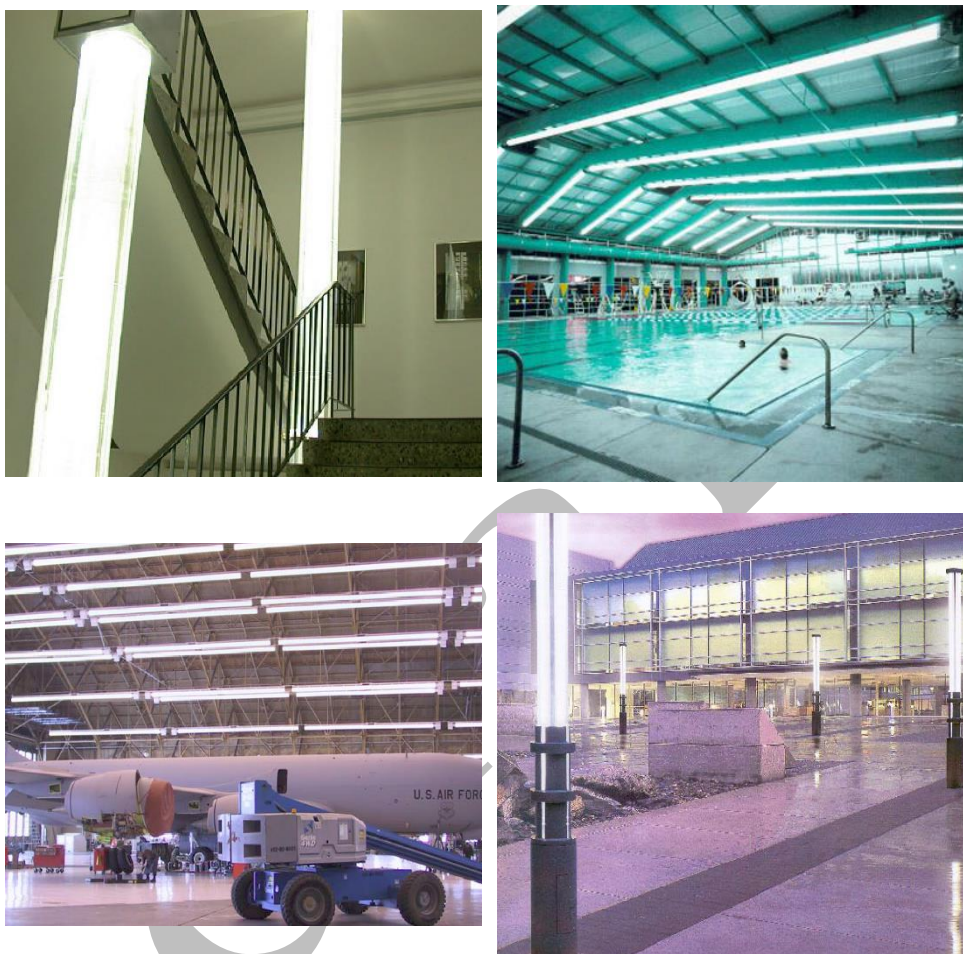


Слика 7.6 Распределба на светлинската јачина за светловоди со различни отвори [116]

Како што претходно беше кажано, на почетокот на светловодот може да биде вештачки извор на светлина или да се користи дневна светлина, или комбинација од нив. Кога се користи дневната светлина, таа со помош на хелиостати се насочува кон почетокот на светловодот. Системите што едновременно користат вештачки извори и дневна светлина се опремени со таканаречени „миксери“ коишто овозможуваат мешање на светлината од двата извора. Кај овие системи, преку ден дневната светлина претставува доминантан извор, а вештачкиот извор на светлина дополнува ако дневната светлина не е доволна за постигнување на потребната осветленост во осветлуваниот простор. На тој начин можат да се постигнат значителни заштеди на електричната енергија.

Предностите на СО изведени со светловоди се слични како и во случајот со системи со оптички влакна. Имајќи ги предвид овие предности, светловодите главно се користат во ситуациите кога во просториите има зголемен ризик од употреба на електрични апарати (експлозивна атмосфера, опасност од пожар, влага и сл.) и/или кога светилките од класичните СО треба да се постават на тешко пристапни места што ги зголемува трошоците за одржување (фабрички хали, авионски хангари и сл.). Да напоменеме дека светловодите се користат и за осветление на надворешни простори.

На сликата 7.7 се прикажани фотографии со примери на системи на осветление изведени со светловоди.



Слика 7.7 Примери за осветление со светловоди [66,116]

7.3 Одржување на системите за електрично осветление

7.3.1 Општи забелешки за одржувањето на системите за електрично осветление

Средната осветленост на референтната (работна) рамнина зависи од флуksот што ќе падне на таа рамнина. Во СО за внатрешно осветление овој флуks се состои од две компоненти: директна и индиректна. Овие компоненти зависат од флуksот што го зрачат сијалиците. Кај системите за надворешно осветление флуksот што паѓа на

референтната рамнина, во најголем број случаи, ја содржи само директната компонента (бидејќи одбиениот флукс е релативно мал).

Но, во текот на експлоатацијата, флуксот што го зрачат светилките се менува. Овие промени се предизвикани од повеќе фактори, групирани во две групи. Во првата група се факторите врз чиешто влијание може малку да се влијае со одржувањето на СО и тие се резултат на работа на светилките и сијалиците во „неноминални“ услови, како што се:¹¹⁴

- погонскиот напон варира и не е еднаков на номиналниот напон (најизразено е влијанието кај СВВ и МХС),
- сијалиците се поставени и работат во положба што не соодветствува на препораките на производителот (карактеристично за некои типови ХС, МХС и НСНП),
- температурата на околината не е соодветна (карактеристично за ФС),
- бројот на вклучувања и исклучувања е голем што придонесува работниот век на сијалиците да биде покус отколку при номинални услови на работа (карактеристично за СПГ, особено ФС),
- трајни промени (намалување) на коефициентите на одбивање и/или пропуштање на материјалите од кои се направени оптичките системи на светилките, т.е. намалување на коефициентот на искористување на светилките (*LOR*).

Во најголем број случаи, врз факторите од оваа група може да се влијае во фазата на проектирање и избор на соодветна опрема, но има и случаи кога причините се надвор од системот за осветление. Во натамошното излагање ќе се претпостави дека светилките и сијалиците работат во номинални услови. Во оние случаи кога е неекономично да се намали влијанието на трајните фактори (потребни се многу скапи светилки, одржување на СО со предвремена замена на светилките и сл.), нивното влијание треба да се уважи. Притоа, треба да се земе предвид дека ефектот на трајните фактори врз осветленоста на референтната површина не е поголем од 3% [38].

Втората група фактори, што влијаат врз промената на флуксот во текот на експлоатацијата, се предизвикани од причини кои не може да се одбегнат. Овие фактори го намалуваат флуксот што ќе падне на референтната рамнина и тие се:

- намалување на флуксот на сијалиците поради нивно стареење,
- намалување на флуксот на светилките поради прегорување на сијалиците,
- намалување на флуксот што го зрачат светилките поради нечистотијата што се нафаќа на деловите од нивниот оптички систем, и
- нафаќање на нечистотија на граничните површини на осветлуваниот простор, со што се намалуваат нивните коефициенти на одбивање, а со тоа и индиректната компонента на осветленоста (важна кај системите за внатрешно осветление).

¹¹⁴ Во публикацијата CIE 97:2005 [38] овие фактори се нарекуваат „трајни фактори“ (*non-recoverable factors*).

Со добро организирано одржување на СО влијанието на втората група фактори¹¹⁵ може да се сведе во прифатливи граници. Како резултат на тоа, енергетската ефикасноста на СО ќе се подобри, што ќе резултира со намалување на делот на трошоците за енергија. Но, од друга страна, трошоците за одржување се повисоки доколку одржувањето е многу интензивно. Поради тоа, мерките за одржување треба да бидат соодветно избрани така што економските придобивки од доброто одржување да бидат поголеми отколку трошоците за одржување.

Треба да се забележи дека врз ефикасноста на СО не влијае само одржувањето на СО туку и решенијата што се донесуваат во фазата на проектирање. Ако СО е несоодветно проектиран (на пример, изборот на опремата не соодветствува на условите што владеат во околината) одржувањето не може (или е премногу скапо) да обезбеди ефикасна експлоатација. Поради тоа, уште во фазата на проектирање, треба да се води сметка за условите во коишто ќе работи СО и проектантот треба да предложи соодветен план за одржување.

Основни мерки за одржување во СО се замена на прегорените сијалици и сијалиците што после долг период на работа имаат многу помал флуks од номиналниот и периодично чистење на светилките и граничните површини во просторијата.

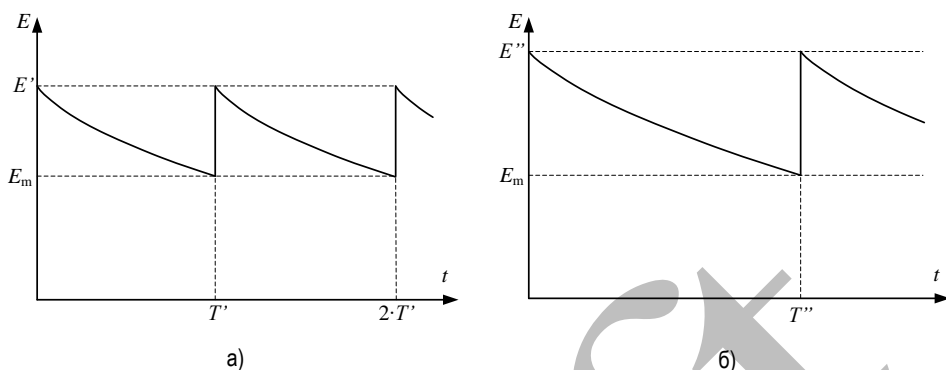
За донесување на правилна одлука е неопходно да се квантифицираат загубите на флуksот (а со тоа и загубите на енергија) и трошоците за одржување. Загубите на флуksот се изразуваат преку *коэффициентот на одржување*. Врз основа на тие информации, како и податоците за трошоците за одржување и останати информации, може да се определи оптималниот *период на одржување*.

Во публикацијата CIE 97:2001 се дадени детални препораки и напатствија за определување на коэффициентот на одржување и оптималниот период на чистење на светилките. Во рамките на овој труд ќе бидат објаснети само општите начела за одржувањето на СО.

Еден од критериумите за проектирање на СО е количеството светлина што ќе падне врз референтната рамнина. Во системите за внатрешно осветление овој критериум се квантифицира преку потребната осветленост на референтната рамнина, пропишана во националните или меѓународните стандарди, каков што е, на пример стандардот CIE S 008/E-2001 [46]. Тоа значи дека за дадена просторија најмалата експлоатациона осветленост, што ќе ја означиме со E_m , треба да биде еднаква или поголема од потребната осветленост пропишана во соодветните стандарди.

На сликата 7.8 е прикажана временската промена на средната осветленост на работната рамнина во текот на користењето на СО за два различни периода на одржување. Во двата случаја, најмалата експлоатациона осветленост е еднаква.

¹¹⁵ Во публикацијата CIE 97:2005 овие фактори се нарекуваат *recoverable factors*.



Слика 7.8 Два случаја на промена на осветленоста на референтната рамнина во текот на експлатацијата

Во првиот случај одржувањето се прави на временски интервал T' и при тоа се заменуваат сите сијалици и се чистат светилките и граничните површини. За дадените услови на работа на СО, за осветленоста во моментот T' да не биде помала од E_m , е потребно почетната осветленост E' да биде поголема од E_m . Да го означиме со n потребниот број светилки во СО за постигнување на осветленоста E_m , а со n' да го означиме потребниот број светилки во СО за постигнување на осветленоста E' . Во тој случај важи следната релација:

$$n' = \frac{E'}{E_m} \cdot n. \quad (7.1)$$

Во вториот случај (слика 7.8.б) одржувањето се изведува на истиот начин, но периодот е T'' и тој е поголем од T' . За најмалата експлоатациона осветленост E_m да биде еднаква како и во првиот случај, почетната осветленост, означена со E'' , треба да биде поголема од E' . Имајќи го предвид изразот (7.1), може да се заклучи дека потребниот број светилки за постигнување на осветленоста E'' , означен со n'' , ќе биде поголем од n' . Тоа значи дека со вториот начин на одржување на СО трошоците за одржување се помали (интервалот на одржување е подолг), но почетната инвестиција (бројот на светилки) ќе биде поголема, а поголеми ќе бидат и трошоците за енергија. Се поставува прашањето: која од овие две шеми на одржување е поекономична?

На претходното прашање може да се одговори во фазата на проектирањето, откако се изврши економска анализа на инвестиционите трошоци и трошоците на работење (меѓу кои се трошоците за енергија и одржување). Врз основа на таквата анализа може да се одбере соодветна опрема и да се препорачаат мерки за одржување на СО.

Треба да забележиме дека, во општ случај, одржувањето на СО може да се прави на нееднакви временски интервали. По правило, чистењето на светилките се прави многу почесто отколку замената на сијалиците и чистењето на граничните површини. За просториите што се осветлени со многу мал број сијалици групната

замена на сијалиците е многу непрактична затоа што прегорување на само една сијалица може да доведе до значително намалување на осветленоста во просторијата. Поради тоа, во таквите случаи се препорачува замената на сијалиците да се врши штом тие ќе прегорат.

Активностите поврзани со одржувањето на СО треба да се изведуваат така што да не се попречуваат нормалните активности. Во индустриските погони тоа се прави заедно со периодичните ремонти на технолошката опрема. Во комерцијалните објекти тоа може да се прави во периодот на годишни одмори, а во училиштата за време на распустите. Со оглед на тоа што ремонтите или одморите се случуваат на редовни годишни или полугодишни интервали, периодот на одржување најчесто се заокружува на половина година.

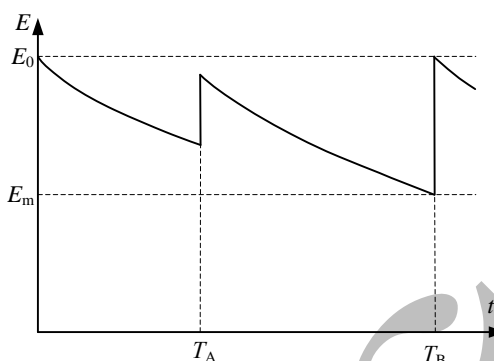
7.3.2 Коефициент на одржување

Податокот кој што покажува колкава ќе биде осветленоста на референтната рамнина после определен период на експлоатација на СО се нарекува коефициент на одржување. Тој најчесто се означува со кратенката MF , што е изведена од англискиот термин *Maintenance Factor*.

Вообичаено, коефициентот на одржување се дефинира и пресметува за период после кој, откако ќе се направат сите неопходни зафати, СО треба да се доведе во првобитната состојба.

На сликата 7.9 е прикажана зависноста на средната осветленост на референтната рамнина за нешто поинаква шема на одржување од шемите прикажани на сликата 7.8. Одржувањето на СО се изведува на нееднакви временски интервали. По изминување на времето T_A се чистат светилките и граничните површини, а по изминување на времето T_B се врши комплетно реновирање на СО (чистење на светилки и гранични површини и замена на сите сијалици). По првата интервенција осветленоста не ја достигнува почетната вредност (во случајот означена со E_0) затоа што во СО има прегорени сијалици и сијалиците во погон имаат помал флуks од номиналниот. Во случајот од сликата 7.9 периодот на одржување е еднаков на T_B .

Како што се забележува од сликите 7.8 и 7.9 коефициентот на одржување зависи од шемата и периодот на одржување.



Слика 7.9 Промена на осветленоста на референтната рамнина за нееднакви периоди на одржување

Користејќи ги ознаките од сликата 7.9, за коефициентот на одржување можеме да напишеме:

$$MF = \frac{E_m}{E_0} . \quad (7.2)$$

MF е помал од единица и, во општ случај, може да се изрази како производ на четири коефициенти што соодветствуваат на факторите што влијаат врз намалувањето на флуksот на светилките, т.е. осветленоста на референтната рамнина:

$$MF = \frac{E_m}{E_0} = LLMF \cdot LSF \cdot LMF \cdot RSMF , \quad (7.3)$$

каде што $LLMF$ и LSF се коефициенти на стареење и преживување на сијалиците, соодветно (видете оддел 5.1.2), LMF е коефициент на нечистотија на светилките (видете оддел 6.5.1) и $RSMF$ е коефициент на нечистотија на (граничните површини од) просторијата, а неговата ознака претставува кратенка од англискиот термин *Room Surface Maintenance Factor*. Кај системите за надворешно осветление $RSMF$ се зема дека е еднаков на единица.

Покрај коефициентот на одржување, во литературата се среќава и големината *коефициент на намалување на флуksот (Lumen Depreciation Factor)*. Ако со $DepF$ го означиме коефициентот на намалување на флуksот, со изразот (7.3) е дадена неговата врска со MF :

$$DepF = 1 - MF . \quad (7.4)$$

Коефициентот MF зависи од периодот на одржување. Со цел да се одбегнат решенија во кои бројот на светилките би бил многу поголем од бројот на светилки потребен за обезбедување на E_m , периодот на одржување се одбира така што MF да биде околу 0,80, но не помал од 0,70. На тој начин, почетната осветленост е за околу 25% повисока од потребната.

Коефициентите на нечистотија на светилките и просторијата зависат од степенот на нечистотија на околината. Според овој степен CIE ги групирала просториите во четири групи. Во табелата 7.1 се дадени примери на простории или активности со различен степен на нечистотија на околината. Покрај тоа, во табелата 7.1 се прикажани и препорачаните временски периоди на инспекција на CO (мерења на осветленост и сл.).

Коефициентот на нечистотија на светилките *LMF*, а со тоа и периодот на нивно редовно чистење, зависи и од конструкцијата на светилките. Во CIE 97:2005 светилките се групирани во седум групи, во зависност од нивната конструкција и степенот на механичка заштита. Описот на овие групи светилки е прикажан во табелата 7.2, а препорачаните периоди за нивно чистење се прикажани во табелата 7.3.

Табела 7.1 Препорачани периоди на инспекција на CO за различни работни околини (според CIE 97:2005)

Период на инспекција	Околина	Опис на просторијата или активноста
3 години	Многу чиста (VC)	Чисти простории, електронска индустрија, клинички простории, компјутерски центри
	Чиста (C)	Канцеларии, училишта, болнички простории
2 години	Нормална (N)	Продавници, лаборатории, ресторани, складишта, работилници
1 година	Нечиста (D)	Челичарници, хемиски фабрики, леарници, заварување, полирање, обработка на дрво

Табела 7.2 Категоризација на светилките од аспект на можноста за нивно онечистување (според CIE 97:2005)

Група	Опис
A	Светилки без оптички систем (со „голи“ сијалици)
	Светилки за општо дифузно осветление
B	Светилки за директно осветление отворени од горна страна
	Сидни светилки отворени од горна и долна страна
C	Светилки затворени од горната страна и без вентилација (на пример, светилки со растер)
D	Светилки за општа намена со капак и оптички систем
	Степен на заштита IP2у
E	Светилки со степен на заштита IP5у
F	Слободно стоечки светилки, сидни светилки затворени од долна страна
G	Светилки со куќиште и оптички систем предвиден за поврзување со системите за климатизација

Табела 7.3 Препорачани периоди на чистење (во години) на светилките (според CIE 97:2005)

Група	Околина		
	Многу чиста (VC) и Чиста (C)	Нормална (N)	Нечиста (D)
A	3	2	1
B	3	2	1
C	3 или 2	1	-116
D	3 или 2	1	-116
E	3	3	2
F	2 или 1	1	-116
G	3	3	2

Врз основа на претпоставениот период на чистење на светилките, коефициентот на нечистотија на светилките се отчитува од табели или дијаграми што ги даваат производителите на светилки. Ако таквите информации не се расположливи, може да се користат типичните вредности наведени во препораката CIE 97:2005.

Коефициентот на нечистотија на просторијата влијае врз индиректната компонента на флуksот што паѓа врз референтната рамнина. Практично, може да се каже дека тој влијае врз коефициентот на искористување на осветлението UF и неговото влијание може да се вгради во UF . Изразот (7.5) ја дава временската промена на коефициентите на одбивање од граничните површини во зависност од степенот на нечистотија на околината:

$$\rho(t) = \rho_0 \left[c + (1-c) \cdot e^{-t/t_c} \right], \quad (7.5)$$

каде што $\rho(t)$ е вредноста на коефициентот на одбивање после t години, ρ_0 е почетната вредност на коефициентот на одбивање (чиста површина), а константите c и t_c зависат од степенот на нечистотија и се дефинирани во табелата 7.4.

Табела 7.4 Вредности на константите c и t_c (според CIE 97:2005)

Околина	c			t_c
	плафон	сидови	под	
Многу чиста (VC)	0,96	0,92	0,85	1/2
Чиста (C)	0,92	0,84	0,70	5/12
Нормална (N)	0,83	0,70	0,50	1/3
Нечиста (D)	0,70	0,45	0,30	1/4

Коефициентот $RSMF$ може да се определи на следниот начин. Најнапред се определува коефициентот на искористување на осветлението за дадената просторија и избраните светилки, сметајќи со коефициенти на одбивање од граничните површини што одговараат на чисти површини. Потоа, врз основа на тие коефициенти, од изразот (7.5) се определуваат коефициентите на одбивање по предвидениот интервал на чистење или повторно боене. За новите вредности на коефициентите на одбивање се

пресметува новата вредност на UF . Разликата помеѓу отчитаните вредности на UF за првиот и вториот случај одговара на намалувањето на индиректниот флукс, како резултат на влијанието на коефициентот $RSMF$.

Коефициентот $RSMF$ може да се определи и врз основа на типски табели од препораката CIE 97:2005.

Коефициентите на стареење и преживување на сијалиците се определуваат на следниот начин. Најнапред се дефинира дали сијалиците ќе се менуваат „групно“ или „поединечно“. Во вториот случај коефициентот на преживување се зема дека е еднаков на единица. Врз основа на технологијата на работа и бројот на часови на искористување на CO во текот на годината се определува периодот на замена на сијалиците. Замената на сијалиците се врши заедно со чистењето на светилките и, во голем број случаи, таа се прави после две или три чистења на сијалиците.

Потоа, се пресметува времето на работа на сијалиците до нивната замена, од кој податок се определуваат коефициентите на стареење и преживување. Овие коефициенти се отчитуваат од соодветни дијаграми или табели што ги обезбедуваат производителите за периодот на работа определен претходно. Примери на такви дијаграми, за одделните типови сијалици, се прикажани во поглавјето 5. Во недостаток на подобри информации, може да се искористат информациите од CIE 97:2005 или од друга литература.

7.3.3 Период на одржување на системите за електрично осветление

Коефициентот на одржување зависи од периодите на чистење на светилките и површините во просторијата и од периодот на замена на сијалиците. Стратегијата за одржување влијае врз определување на периодот на одржување. Во пракса се користат четири стратегии за одржување на CO. Нивните карактеристики се прикажани во табелата 7.5.

Изборот на стратегијата треба да се направи врз основа на анализа на сите трошоци (инвестиции и оперативни) и избор на оптимален период на одржување. Во стручната литература [5,38,39] можат да се најдат дополнителни информации за методите за определување на оптималните периоди на замена на сијалиците и чистење на светилките.

Годишните трошоци за експлоатација (GTE), во коишто се вклучени инвестиционите трошоци, трошоците за енергија и трошоците за одржување, се функција од повеќе фактори. Според [5], зависноста на GTE од периодите на чистење на светилките и замена на сијалиците, означени со $T_{\text{свет.}}$ и $T_{\text{сиј.}}$, соодветно, во случаите кога се применува чистење на сите светилки и/или групни замени на сијалиците, е прикажана со следниот израз:

$$GTE = f(T_{\text{свет.}}, T_{\text{сиј.}}, p), \quad (7.6)$$

каде со p се прикажани сите останати фактори што влијаат врз GTE .

Табела 7.5 Стратегии за одржување на системите на осветление [5]

Стратегија	Карактеристики
Групна замена на сијалиците и чистење на сите светилки	Наједноставен начин од аспект на организација на процесот на одржување Мали трошоци за енергија Прегорените сијалици можат да остават лош впечаток
Групна и поединечна замена на сијалиците и чистење на сите светилки	Посложена организација на процесот на одржување Мали трошоци за енергија Релативно добар впечаток (нема прегорени сијалици)
Поединечна замена на сијалиците и чистење на сите светилки	Многу сложена организација на процесот на одржување Релативно големи трошоци за енергија Релативно добар впечаток (нема прегорени сијалици)
Поединечна замена на сијалиците и поединечно чистење на светилките	Најмал коефициентот на одржување Најголеми трошоци за енергија

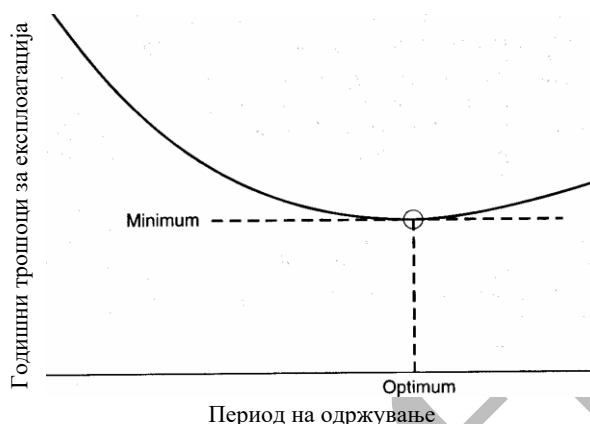
Оптималните вредности на периодите $T_{\text{свет.}}$ и $T_{\text{сиј.}}$ можат да се определат од равенките што се добиваат кога парцијалните изводи на функцијата (7.6) по променливите $T_{\text{свет.}}$ и $T_{\text{сиј.}}$ се изедначат со нула. Резултатите од тие пресметки укажуваат дека формулата за пресметка на оптималните вредности на периодите го има следниот облик:

$$T_{\text{опт.}} = \sqrt{\frac{C_r}{D}}, \quad (7.7)$$

каде што C_r претставува однос на трошоци, а D покажува колкаво е намалувањето на флуксот.

Ако оптималната вредност на $T_{\text{свет.}}$ се пресметува со помош на (7.7), C_r се пресметува како однос на трошоците за чистење на светилките и сите останати трошоци (амортизација и трошоци за енергија и чистење на светилките), а D претставува коефициент на намалување на флуксот за една година предизвикан од нечистотијата на светилките. Ако пак со (7.7) треба да се пресмета оптималната вредност на $T_{\text{сиј.}}$, тогаш C_r претставува однос на трошоците за замена на сијалиците (сијалици и работна рака) и вкупните трошоци, а D го покажува намалувањето на флуксот како резултат од стареењето и прегорувањето на сијалиците после 1 000 часа работа.

На сликата 7.10 е прикажана зависноста на GTE од периодите $T_{\text{свет.}}$ и $T_{\text{сиј.}}$. Како што може да се забележи од сликата 7.10, релативната промена на функцијата GTE во близина на нејзиниот минимум е многу мала, така што резултатите добиени со (7.7) можат да се сметаат како приближни, што дозволува оптималниот период да се прилагоди на технологијата на изведување на активностите во осветлуваната прос-торија, односно зграда.



Слика 7.10 Зависност на годишните трошоци за експлоатација од периодите на чистење на светилките и замена на сијалиците

Пример 7.1

За осветление на просторијата од примерот 6.5 ќе се користат светилките и сијалиците од истите типови како и во наведениот пример. И во овој случај, светилките ќе бидат монтирани на плафонот. Коefициентот на одржување е 0,69. Колкав е најмалиот број светилки со кои се постигнува на крајот од периодот на одржување средната осветленост на работната рамнина да не биде помала од $E_m = 300 \text{ lx}$?

Поради тоа што не се сменети ниту димензиите на просторијата ниту висината на светилките над работната рамнина, вредноста на индексот на просторијата ќе биде како и во примерот 6.5. Бидејќи не е сменет ни типот на светилката, и вредноста на коefициентот на искористување на осветлението ќе остане иста како и во примерот 6.5, т.е. $UF = 0,2775$.

Според дефиниционата равенка за факторот на одржување (7.2), ако на крајот од периодот на одржување осветленоста на работната рамнина не треба да биде помала од $E_m = 300 \text{ lx}$, на почетокот од периодот на одржување осветленоста не треба да биде помала од:

$$E_0 = \frac{E_m}{MF} = \frac{300}{0,69} \approx 435 \text{ lx} .$$

За на почетокот од периодот на одржување средната осветленост на работната рамнина да не биде помала 435 lx, треба светлинскиот флукс што на неа паѓа да не биде помал од:

$$\Phi_{0, \text{ работна рамнина}} = E_0 \cdot S_{\text{ работна рамнина}} = 435 \cdot 4 \cdot 6,4 = 11136 \text{ lm} .$$

Според дефиниционата равенка за коefициентот на искористување на осветлението (6.16), за на работната рамнина да падне флуксот $\Phi_{0, \text{ работна рамнина}}$, треба вкупниот флукс на сите сијалици во сите светилки во просторијата да не биде помал од:

$$\Phi_{\text{ сите сијалици}} = \frac{\Phi_{0, \text{ работна рамнина}}}{UF} = \frac{11136}{0,2775} \approx 40110 \text{ lm} .$$

Бидејќи во светилките има по две ФСЦ, сума на номиналните флукови на сијалиците во една светилка е:

$$\Phi_{\text{сијалиците во светилката}} = 2 \cdot \Phi_{\text{една сијалица}} = 2 \cdot 3\,350 = 6\,700 \text{ lm}.$$

Според тоа, потребниот број светилки од дадениот тип не треба да биде помал од:

$$n_{\text{пресметан}} = \frac{\Phi_{\text{сите сијалици}}}{\Phi_{\text{сијалиците во светилката}}} = \frac{40\,110}{6\,700} = 5,987 \text{ светилки.}$$

Бидејќи вкупниот број светилки во просторијата мора да биде цел број, усвојуваме $n_{\text{усвоен}} = 6$ светилки. Светилките ќе бидат инсталирани во две низи. По три во низа.

7.4 Користење на дневната светлина за осветление

7.4.1 Општо за осветление со дневна светлина

Сите живи сувоземни суштества на Земјата се идеално прилагодени на условите што Сонцето ги создава на земјината површина и на карактеристиките на сончевата (дневна или природна) светлина. И покрај тоа што производителите на сијалици се трудат да произведат сијалица чија светлина би ги имала карактеристиките на сончевата светлина, сè уште не постои таква сијалица.

Дневната светлина игра голема улога врз квалитетот на живеењето и престојот во зградите. Поради тоа, многу е значајно ако таа се користи за осветление на просториите наместо светлината произведена од електричните сијалици. Покрај тоа, дневната светлина е бесплатна, така што трошоците за осветление можат да бидат намалени доколку се зголеми учеството на дневната светлина при осветление на внатрешноста на зградите.

Во внатрешноста на зградите дневната светлина навлегува преку отворите на ѕидовите и, евентуално, покривот. Бројот на отворите, нивните димензии и ориентација, влијаат врз количеството на дневната светлина што ќе навлезе во внатрешноста на зградата. Методите и принципите за проектирање на осветление на зградите со дневна светлина се надвор од областа на овој труд и овде ќе се задржиме само на аспектите на употребата на дневната светлина што се поврзани со интегрирањето на СО.

Количеството дневна светлина што може да се искористи за осветление на затворените простори зависи и од други фактори, како што се: време во текот на денот, годишното време, географската ширина, степен на облачност и природните или вештачките пречки помеѓу небото и отворите (прозорците) во просторијата.

По правило, фотометриските пресметки за осветление со дневна светлина се многу посложени од фотометриските пресметки за вештачкото осветление затоа што тие треба да ги вклучат претходно наведените фактори. Еден од методите се базира на факторот на дневна светлина. Овој метод се одликува со едноставност, но и релативно мала точност.

7.4.2 Фактор на дневна светлина

Во услови кога небото е облачно, хоризонталната осветленост во внатрешноста на зградите е пропорционална на хоризонталната осветленост надвор од зградата. Факторот на дневна светлина (*Daylight Factor*) претставува мерило со кое може да се процени, колкава ќе биде осветленоста во определена точка од внатрешноста на просторијата во зависност од осветленоста надвор од зградата. Ако со $E_{\text{внатре}}$ се означи хоризонталната осветленост во определена точка во зградата, а со $E_{\text{надвор}}$ се означи хоризонталната осветленост на отворен простор, факторот на дневна светлина DF , изразен во проценти, е:

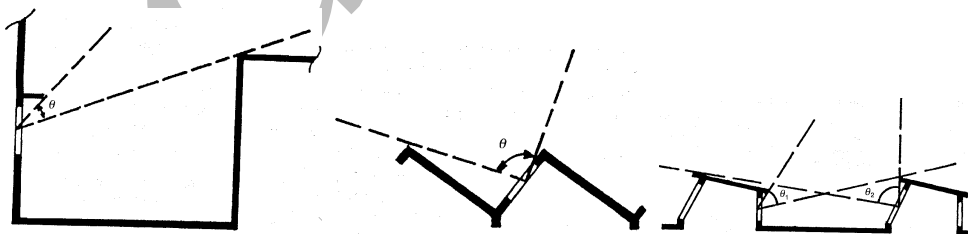
$$DF = \frac{E_{\text{внатре}}}{E_{\text{надвор}}} \cdot 100.$$

Сосема е разбирливо дека DF не е еднаков за сите точки на една просторија што е осветлена со дневна светлина. Исто така, DF во определена точка не се менува со менување на осветленоста на отворениот простор. Да забележиме дека DF се дефинира само за облачен ден, бидејќи претпоставките при неговата дефиниција не важат во услови на сончево небо.

Средната вредност на DF може да се определи ако се пресмета вкупниот флукс од природната светлина што влегува во просторијата преку прозорците. Многу почесто, средната вредност на DF се пресметува со помош на следната формула:

$$DF = \tau \cdot \frac{A_{\text{прозорец}} \cdot \theta}{A \cdot (1 - \rho_{\text{прос}}^2)} \cdot 100, \quad (7.8)$$

каде $A_{\text{прозорец}}$ е плоштината на прозорецот(ите), A е вкупната плоштина на граничните површини на просторијата (сидови, плафон и под, вклучувајќи ја плоштината на прозорецот(ите)), τ е коефициентот на пропуштање на провидниот материјал од којшто е направен прозорецот, $\rho_{\text{прос}}$ е просечна вредност на коефициентите на одбивање од граничните површини, вклучувајќи ги и прозорците, а аголот θ (во радијани) е агол под кој се гледа небото од средината на прозорецот. Сликата 7.11 ја илустрира дефиницијата на аголот θ .



Слика 7.11 Скици за дефиниција на аголот под кој се гледа небото од средината на прозорецот

Во најголем број случаи, околу 80% од површината на подовите во зградите имаат DF во границите од 0 до 5%, додека во деловите од просториите што се блиску

до прозорците факторот може да има вредности од 10 до 15% [73]. Според тоа, факторот на дневна светлина може да се искористи за оценка на сјајноста на одделните зони во просториите предизвикана од дневната светлина. Во табелата 7.6 е прикажана класификацијата на зоните во зградите врз основа на средната вредност на факторот на дневна светлина.

Табела 7.6 Класификација на зоните во зградите врз основа на средната вредност на факторот на дневна светлина (според [73])

Зона	<i>DF</i>	<i>DF</i>	Компонента на дневната светлина
	јужна Европа	северна Европа	
Многу светла	> 3%	>6%	Многу значајна. Неопходна е употребата на ролетни или слични мерки за засенување
Средно светла	1,5 - 3,0%	3,0 – 6,0%	Добра. Светла просторија. Употребата на ролетни е препорачлива
Средно темна	0,5 - 1,5%	1,0 – 3,0%	Просечно
Темна	0,1 – 0,5%	0,2 – 1,0%	Многу слаба осветленост за работа. Најголем дел од времето е потребно вештачко осветление.
Многу темна	<0,05%	<0,1%	Прифатливо само за движење на луѓето Нема дневна светлина. Вештачко осветление е потребно во текот на цел ден

Според [73], една зграда е добро осветлена со дневна светлина ако средната вредност на *DF* во целата зграда е поголема од 0,1% (0,2 за северна Европа¹¹⁶). Во просториите наменети само за комуникација и движење, *DF* треба да биде поголем од 0,3% (0,6%). За просториите наменети за одвивање на работни активности, *DF* треба да биде поголем од 1,5% (3,0%). Во деловите од просторот што има *DF* поголем од 3,0% (6,0%) луѓето се чувствуваат како да се наоѓаат на отворено.

Факторот на дневна светлина се користи во процесот на проектирање на зградите. Со помош на изразот (7.8) може да се определи потребната плоштина на прозорецот(ите) во просторијата, за да се постигне потребната вредност на факторот на дневна светлина.

7.5 Управување со системите за електрично осветление

Системите за управување со осветлението претставуваат дел од системот за (електрично) осветление. Основната функција на еден систем за управување со осветлението (СУО) е да обезбеди вклучување или исклучување на светилките (во зависност од тоа дали во просторијата има присутни лица) и/или регулација на флуksот

¹¹⁶ Препорачаните вредностите на *DF* за северна Европа се двојно поголеми.

на светилките (ако е потребно). Според тоа, основната придобивка од СУО е да се намали потрошувачката на електрична енергија за осветление.

Наједноставниот систем за управување е со прекинувачи и со уреди за регулација на флуksот. Вклучувањето и исклучувањето на непотребните светилки е рачно и е препуштено на корисниците што често доведува светилките да не бидат исклучени кога тоа е потребно да се направи.

Со тек на време, намалувањето на цената на електронските компоненти (за изработка на КУ за сијалиците и контролерите за управување) придонело помасовно да се користат автоматизирани СУО. Степенот на автоматизација зависи од сложеноста на објектот, но и од технологијата на работа во објектот. Во едноставните СУО автоматизацијата е локална, т.е. се реализира за секоја просторија одделно, додека во останатите случаи таа може да биде централизирана и со целиот систем да управува микропроцесорски контролер или компјутер. По правило, посложените и централизираните СУО овозможуваат поголеми заштеди на енергија, но исто така нивната изградба е многу поскапа.

СУО можат да бидат предвидени за искористување на дневната светлина, со што се постигнуваат уште поголеми заштеди во потрошувачката на електрична енергија.

Намалувањето на потрошувачката на електрична енергија, што е основна цел на СУО, може да се постигне со различни стратегии и концепции при проектирањето на СУО.

Работата на СУО се сведува на две основни операции: вклучување и исклучување на светилките или регулација на флуksот на одделни сијалици. Поради тоа опремата од СО, што треба да се управува и контролира, треба да биде предвидена за таков режим на работа. Бројот на вклучувања и исклучувања на сијалиците во текот на еден ден е многу поголем доколку се користи СУО. Со цел СУО да не предизвика непотребни трошоци (на пример, поради скусување на животниот век на сијалиците во СО со ФС) треба да се користат рапид-старт ЕКУ, наместо инстант-старт ЕКУ или ККУ.

Во комерцијалните и административните згради што имаат централизираните системи за климатизација (греење и/или ладење) СУО можат да бидат и составен дел на централизираните системи за управување со СО и системот за климатизација.

Во продолжение на ова потпоглавје накусо ќе бидат опишани основните принципи на работа на СУО. Главно ќе се дискутира за СУО наменети за внатрешно осветление, но принципите, со мали исклучоци, се применуваат и во системите за надворешно осветление.

7.5.1 Компоненти на системите за управување

Според основните функции што ги обавуваат, компонентите во СУО можат да се групираат во три групи: мерни уреди и детектори, извршни елементи и управувачки единици. Во првата група спаѓаат уредите што служат за мерење на неопходните светлотехнички големини (најчесто, осветленост), детекторите за светлина и детек-

торите за присуство и/или движење. Во групата извршни единици спаѓаат прекинувачите и уредите за регулација на флуksот. Врз основа на информациите добиени од мерните уреди и детекторите и врз основа на предефинирана логика, управувачките единици испраќаат извршни наредби до извршните елементи.

Многу често, компонентите од СУО обавуваат повеќе од една основна функција. Исто така, некои функции можат да се вградат и во останатите делови на СО (придушници или светилки). На пример, регулацијата на флуksот кај СПГ може да се врши преку соодветната електронска придушница.

Мерни уреди и детектори

Детекторите за светлина се изработени од фотосензори коишто со помош на соодветни електронски кола светлината ја претвораат во електрични сигнали што потоа се процесираат преку управувачките уреди или директно ги управуваат извршните елементи. Контролните сигнали, што детекторите ги испраќаат, можат да бидат дискретни (има или нема светлина) или пропорционални на количеството светлина.

Во првиот случај тие се користат за вклучување или исклучување на определени струјни кола, во случаите кога ќе се достигне осветленост при која ќе реагира детекторот. Притоа, треба да се води сметка, при осцилации на осветленоста околу вредноста за која е нагоден детекторот, да не доаѓа до чести вклучувања и исклучувања

Детекторите што генерираат електрични сигнали пропорционални на расположливото количество светлина се користат во СУО за регулација на флуksот на сијалиците за постигнување на потребната осветленост. Тие наоѓаат примена во СУО коишто ја комбинираат употребата на дневната и светлината од сијалиците.

Работата на детекторите за движење и присуство на луѓе се базира на два принципа: пасивен и активен. Пасивните детектори се предвидени да реагираат на звук и топлина произведени од луѓето што се присутни во просторијата. Активните сензори работат на ист принцип како и радарите. Но, наместо микробранови, тие емитуваат ултразвучни бранови (со фреквенции од 25 до 40 kHz). Детекторите се изведуваат и како комбинација од активни (кои користат ултразвук) и пасивни (кои користат инфрацрвени зраци) сензори.

Во случаите кога детекторите за движење и присуство се користат за директно вклучување на светилките, без посредство на други управувачки единици, во нив е потребно да бидат вградени и елементи (на пример, временски релеји) што ќе обезбедат задоцнето исклучување на светилките. Тоа е неопходно бидејќи луѓето, често пати, ќе ја напуштат просторијата, но во неа се враќаат многу брзо потоа. На тој начин се одбегнува непотребно вклучување и исклучување на сијалиците, што негативно влијае врз нивниот животен век.

Улогата на детекторите во функционирањето и ефикасноста на СУО е многу значајна затоа што информациите што тие ги доставуваат до управувачките единици претставуваат основа за правилно управување. Поради тоа, тие треба да бидат одбрани и соодветно поставени во просториите според специфичностите на задачите што треба да ги извршуваат.

Извршни елементи

Прекинувачите за вклучување и исклучување на светилките можат да бидат управувани рачно или далечински, со помош на електрични сигнали.

Рачните прекинувачи се користат практично во сите СО. Тие, нормално, се многу поефтини од другите прекинувачи, но ефикасноста на нивното користење во голема мерка зависи од електричната инсталација и начинот како се поврзани светилките, но и од дисциплината и навиките на корисниците. Во СО каде што постои некакво автоматско или полуавтоматско управување таквите прекинувачи се користат како главни прекинувачи за комплетно исклучување на струјните кола.

Далечински управуваните прекинувачи можат да бидат електромагнетни релеи или тиристорски прекинувачи. Тие се управувани од управувачките единици или пак директно од детекторите за светлина и/или движење и присуство на луѓе.

Уредите за регулација на флуksот ги користат сигналите од сензорите на светлина за да ја прилагодат осветленоста во просториите уважувајќи го влијанието на дневната светлина или потребите за различно ниво на осветленост во различни прилики. Наједноставните регулатори на флуks се рачно управувани тиристорски уреди наменети за СВВ. За ХС и ФС напојувани преку ЕКУ регулаторите треба да бидат предвидени за работа со соодветните ЕКУ.

Регулацијата на флуksот кај ФС се постигнува со специјални ЕКУ предвидени за таа намена. Електричниот сигнал од контролерот (рачен регулатор или управувачка единица) се доведува до ЕКУ којшто соодветно ја регулира струјата во сијалицата за да се постигне потребниот флуks. Современите ЕКУ можат да го регулираат флуksот на сијалиците во границите од ~0% до 100% од номиналниот флуks, при што можат да ја имаат и функцијата за вклучување и исклучување на сијалиците.

Да забележиме дека регулацијата на флуksот на светилките може да се изведе и на поинаков начин. Во светилките со повеќе сијалици (најчесто ФС) тие се приклучуваат на различни струјни кола. Во зависност од потребите за осветленост од системот за вештачко осветление, се вклучува потребниот број сијалици преку соодветните струјни кола. На тој начин, осветленоста во просторијата може да се менува во дискретни чекори, на пример со чекори од 1/4, 1/3 или 1/2 од номиналниот флуks на светилките и притоа рамномерноста на осветленоста во просторијата не се нарушува. Недостатокот на овој начин е тоа што инсталацијата за напојување на светилките е значително посложена и поскапа.

Во системите за надворешно осветление регулацијата на флуksот на СПГ се врши со уреди поврзани според принципиелната шема на сликата 5.33.a со придушница со три изводи или, во поново време, со ЕКУ. Во првиот случај флуksот на сијалицата може да биде 100% или 50% од номиналниот, додека во вториот случај е можна континуирана регулација во границите од околу 20% до 100%. Командувањето може да биде локално, со помош на временски прекинувач, или далечинско, за што се потребни дополнителни сигнални спроводници или соодветни радио врски.

Управувачки единици

Управувачките елементи (контролери) ги анализираат податоците добиени од детекторите и, врз основа на однапред програмирана логика, ги командуваат извршните елементи. Контролерите можат да бидат локални, централни или дистрибуирани.

Локалните контролери, најчесто базирани на микропроцесор, се наменети за самостојна работа при што управуваат релативно мал број светилки. Тие се поставуваат во близина на светилките што ги управуваат или пак можат да бидат изведени како комбинација на детектор, извршен елемент и контролер.

Централните контролери се состојат од (персонален) компјутер опремен со соодветни влезно-излезни единици и софтвер. Информациите од детекторите пристигнуваат во компјутерот којшто ги командува извршните елементи во целиот објект. Еден од недостатоците на централизираниот СУО е тоа што постои релативно голем ризик СО да не функционира во случај на испад на централниот контролер.

Дистрибуираните контролери, слично како и локалните, управуваат со релативно мал број светилки и извршни елементи. Најголем дел од информациите што пристигнуваат од детекторите се обработуваат локално и контролерот соодветно реагира командувајќи ги извршните елементи. Потоа, дистрибуираниот контролер сите информации ги испраќа до централниот процесор. Во овој случај, централниот контролер служи за следење на состојбата (на пример, прегорени сијалици) и да обезбеди глобални параметри за сите дистрибуирани контролери (на пример, временска синхронизација), а во специјални случаи може да реагира со командување на извршни елементи. СУО изведени со дистрибуирани контролери имаат предност во споредба со централно управуваните СУО затоа што испад на централниот процесор нема големо влијание врз работата на СО.

Покрај автоматската работа на контролерите, добро проектиран СУО треба да овозможи голема флексибилност во користењето со тоа што ќе биде предвиден и за рачно управување (преку соодветни прекинувачи или рачни регулатори на флуksот).

Комуникација и поврзување на елементите од СУО

Комуникацијата и поврзувањето помеѓу уредите во СУО може да биде преку посебна инсталација наменета за управување, изведена со спроводници или безжична. Безжичната комуникација е поскапа и таа, главно, се користи во ситуации кога надградбата на постоен СУО со инсталација за управување би била многу скапа. На пример, при постоење на оддалечени и/или тешко достапни светилки.

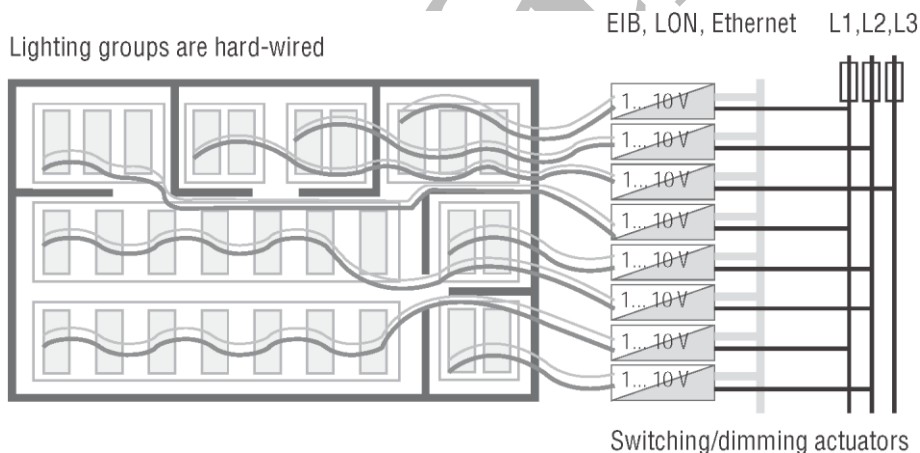
Влезните и управувачките сигнали во системот можат да бидат аналогни и/или дигитални.

Во СУО со централни контролери, особено ако СУО е интегриран со останатите систем за управување во зградите, комуникацијата е со дигитални сигнали пренесувани преку мрежа слична на компјутерските мрежи. На пример ЕІВ или дури преку Ethernet компјутерска мрежа. Недостаток е тоа што сите влезни единици (детектори) и извршни единици се поскапи затоа што треба да имаат соодветни конвертори за претворање на аналогните сигнали во дигитални и обратно. Тоа може делумно да се надмине со поставување на аналого-дигитални конвертори, слично

како и кај дистрибуираните контролери. Овие конвертори ги собираат аналогните сигнали од влезните единици и кон централниот процесор ги испраќаат како дигитални. Командите од централната единица, преку конверторот, се проследуваат до извршните единици.

Во СУО со локални или дистрибуирани контролери комуникацијата помеѓу детекторите и контролерот е аналогна, а помеѓу дистрибуираниот контролер и централниот процесор комуникацијата е дигитална. Контролерот, на локално ниво, може да ги управува извршните елементи преку аналогни или дигитални сигнали.

Меѓу најпопуларните аналогни системи за регулација на флуksот кај ФС е таканаречениот „1–10V“ систем. Кај овој систем до извршната единица (соодветен ЕКУ) се доведува еднонасочен напон од 0 до 10 V. Во зависност од големината на напонот, ЕКУ го регулира флуksот на ФС од 1% до 100% од нејзиниот номинален флуks. Одделните елементи од системот се релативно едноставни (и евтини), но тој има и недостатоци. Исклучувањето и вклучувањето на сијалиците се прави преку напојни спроводници, а регулацијата на флуksот преку управувачки спроводници. Напојните и управувачките струјни кола не смеат да бидат во ист кабел или инсталациски спроводник и мора одделно да се постават од контролерот до секоја светилка. Тоа практично значи дека овој систем е или неприменлив за управување од централен контролер, или пак се премногу скапи решенијата со кои се надминуваат проблемите (слика 7.12).



Слика 7.12 Принципиелна шема на СУО со систем 1–10 V и централен контролер

Дигиталната комуникација помеѓу локалниот или дистрибуираниот контролер и извршните елементи овозможува многу предности во споредба со аналогниот начин на управување. Меѓу најмногу користените стандарди за дигитална комуникација, специјално наменети за СО, се системите DMX и DALI. Системот DMX е предвиден за управување на сценско осветление и нема практична примена кај останатите СО.

Системот DALI е развиен како систем базиран на „отворен“ стандард, т.е. не е есклузивен производ на само еден производител. Тој е развиен од групација

производители на опрема за осветление и е главно наменет за управување на ФСЦ. Спецификацијата на DALI е пропишана со соодветните стандарди: IEC 60929 и EN 60929. Во последно време производителите нудат и DALI компатибилни уреди и за регулација на флуksот на халогени сијалици и светлечки диоди.

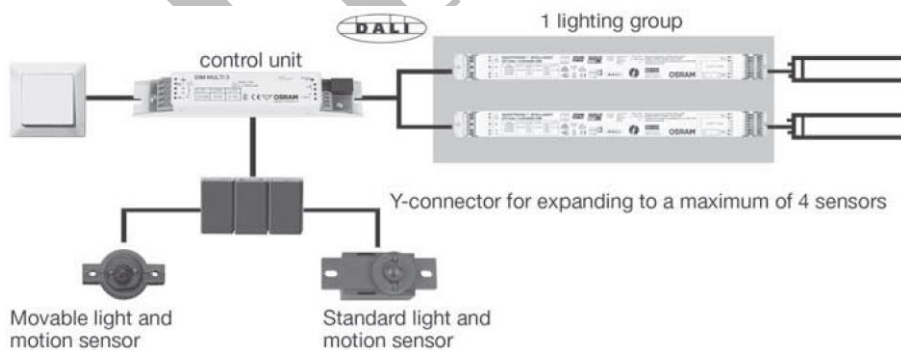
Системот DALI е наменет за локално и дистрибуирано управување со СО. Контролерите базирани на овој систем, преку соодветни единици, можат да се поврзат со централните управувачки единици.

Комуникацијата на DALI контролерите со извршните единици е преку двожилен кабел или инсталациски спроводник. За разлика од аналогниот 1–10 V систем, двата спроводника можат да бидат во рамките на повеќежилен кабел или инсталациски спроводник. Исто така, во DALI системот, извршните уреди се поврзуваат паралелно на командниот спроводник што дополнително ја поедноставува инсталацијата затоа што не е неопходна посебна врска на секој извршен елемент со контролерот.

DALI контролерот може независно да контролира до 64 извршни елементи. За да се обезбеди извршните елементи да реагираа соодветно, секој извршен елемент има своја еднозначна адреса. DALI контролерот ги испраќа извршните команди во вид на пакети податоци (датаграми) составени од два дела: адресата на извршниот елемент и акцијата што елементот треба да ја изврши. Бидејќи извршните елементи се паралелно врзани преку командниот спроводник, сите елементи ги примат сигналите, но реагираат само оние за коишто тие сигнали се наменети.

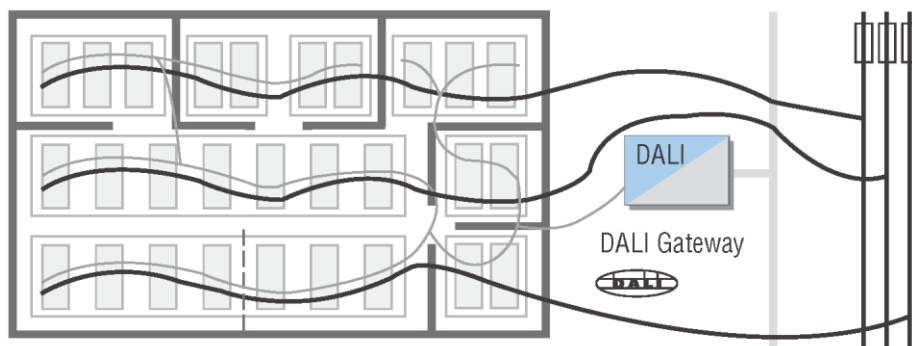
Сигналите што детекторите ги испраќаат до DALI контролерот се аналогни и притоа можат да се користат сигнални спроводници предвидени за работа на многу мали напони.

На сликата 7.13 е прикажана принципиелна шема на поврзување на DALI контролер во улога на локален контролер, додека на сликата 7.14 е прикажана принципиелна шема на врзување на DALI контролер во улога на дистрибуиран контролер.



Слика 7.13 Принципиелна шема на SYO со DALI локален контролер

Lighting groups are flexible



Слика 7.14 Принципиелна шема на CYO со DALI и централен контролер

7.5.2 Стратегии за управување со системите на осветление

Системите за управување со осветлението треба да обезбедат намалување на потрошувачката на електрична енергија и попријатен амбиент, преку можност за прилагодување на осветленоста на потребите. Претходните цели може да се постигнат со имплементација на неколку основни стратегии што ќе бидат накусо објаснети во продолжение. Во посложените CYO се користат стратегии што претставуваат комбинации на претходно споменатите основни стратегии.

Стратегија за однапред предвидливи активности

Во објектите каде престојот во одделните простории е рутински и однапред познат, управувањето со СО може да се изведе со едноставни временски програмабилни контролери. Оваа стратегија може да се примени за најголем број простории во фабриките, административните згради, училиштата, библиотеките, продавниците и сл. Во таквите системи е неопходно да се обезбеди и рачно вклучување и исклучување на светилките во случаите кога активностите се обавуваат надвор од предвидената шема.

Стратегија за однапред непредвидливи активности

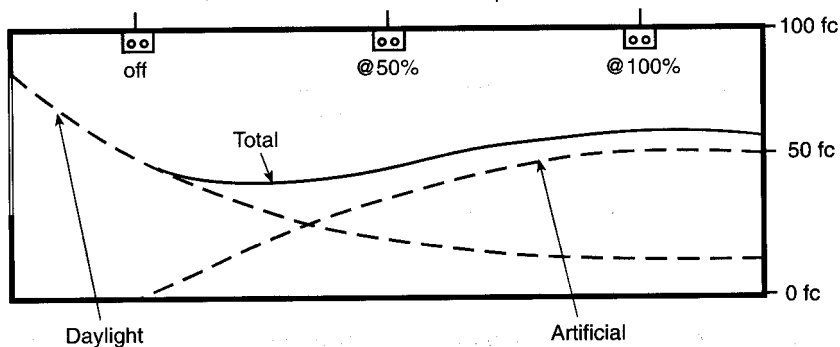
Оваа стратегија се користи за просториите за коишто не може однапред да се предвиди престојот (и потребата за осветление) на луѓе, како што се: тоалети, помошни простории во административни згради, магацини, гардероби во продавници за текстилна конфекција и сл. Овие простории најчесто и не се осветлени со дневна светлина, така што е неопходно осветление од вештачки извори. Рачното вклучување и исклучување е непрактично затоа што, многу често, луѓето забораваат да ги исклучат светилките по напуштањето на просторијата. Најсоодветно решение за ваквите простории се детектори за присуство приклучени на локален или дистрибуиран контролер, или пак детектори со можност за директно управување со светилките. На таков начин се можни значителни заштеди на електрична енергија. Според [6], тие можат да достигнат и до 60%.

Комбинација со дневна светлина

Во просториите што се осветлени со дневна светлина, потреба од користење вештачки извори на светлина се јавува кога дневната светлина е недоволна за обезбедување на потребната осветленост. Нивото на осветленост што СО треба да ја обезбеди зависи од повеќе фактори: ориентацијата на просторијата, годишното време, големината на прозорците, периодот на денот и сл. Исто така, светлината од електрични сијалици не мора да биде потребна во текот на целиот ден. Ако СО не е управуван, исклучувањето на светилките, во периодот на денот кога има доволно дневна светлина во просторијата, е препуштено на корисниците и, како резултат на тоа, често се случува светилките да бидат вклучени и кога тоа не е потребно.

За намалување на трошоците за енергија можни се две стратегии: а) со вклучување и исклучување на светилки или сијалици поврзани на одделни струјни кола или б) со регулација на флуksот кај сите светилки.

Првата стратегија е поедноставна, но за нејзина реализација е потребна посложена инсталација, а флексибилноста на системот е многу ограничена. На сликата 7.15 е прикажан напречен пресек на просторија во која се обезбедува приближно еднаква осветленост на референтната рамнина во текот на денот со дневна и светлина од електрични сијалици. Тоа се постигнува со вклучување и исклучување на сијалиците поврзани на одделни струјни кола. Просторијата од примерот прикажан на сликата 7.15 е осветлена со три редици светилки со по две ФС. Сијалиците во светилките што се најблиску до прозорците се исклучени во текот на денот. Во втората редица светилки е вклучена по една сијалица, додека од третата редица светилки (што се најдалеку од прозорците) сите сијалици се постојано вклучени.



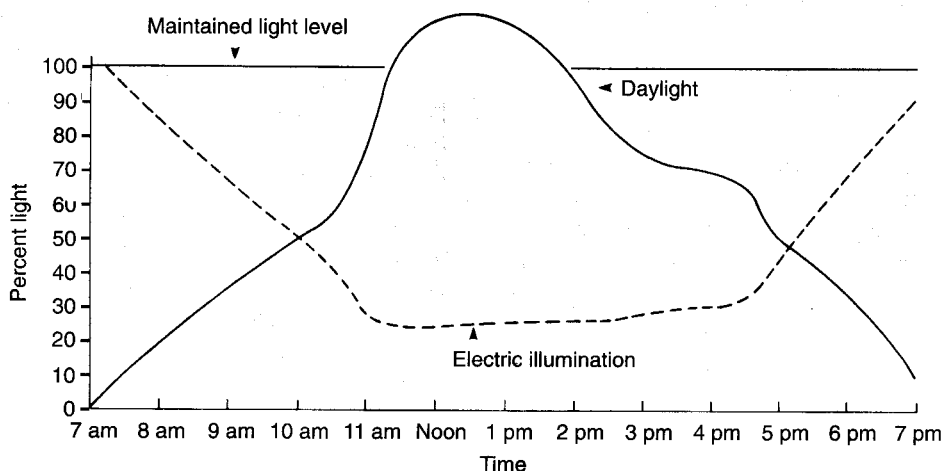
Слика 7.15 Комбинација на дневна и светлина од сијалици со групна контрола на светилките [6]

Претходната стратегија може да се генерализира ако просторијата се подели во повеќе зони. Во зависност од компонентата на дневната светлина (факторот на дневната светлина), локалниот контролер го менува флуksот на светилките што ја осветлуваат таа зона и на тој начин осветленоста во зоната е приближно еднаква во текот на целиот ден. На сликата 7.16 е прикажана зависноста на средната осветленост во една зона во текот на 24 часа. Помалите простории, особено таму каде што факторот

на дневна светлина во одделните делови на просторијата е приближно еднаков, можат да се третираат како една зона. Ако во тие случаи на контролерот се приклучи и детектор за присуство на луѓе, можат да се остварат заштеди на електрична енергија што достигнуваат и до 80%, во споредба со трошоците за неуправуван СО.

Константна осветленост во текот на периодот на одржување

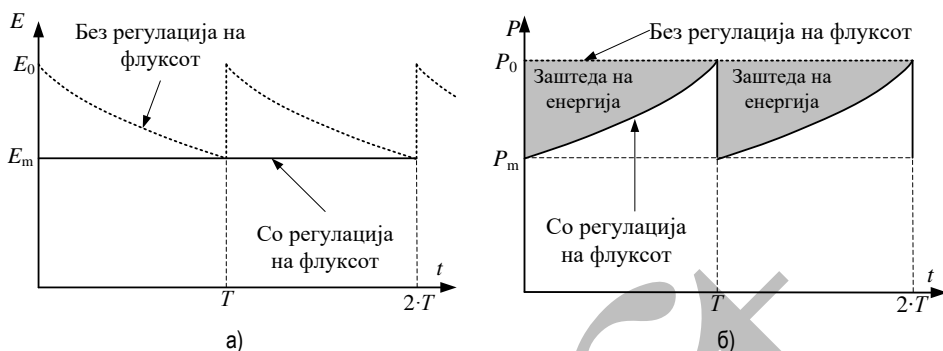
Осветленоста на референтната рамнина во една просторија во почетокот на експлоатација на СО и после секоја комплетна замена на сијалиците и чистење на светилките и површините на просторијата е за околу 20 до 30% повисока отколку потребната осветленост. СУО може да се конструира така што тој ќе го регулира флуксот на светилките за осветленоста да биде константна во текот на експлоатацијата. Притоа, на почетокот од периодот на одржување светилките работат со мален флукс. Со текот на времето, како што се смалува флуксот што го произведуваат светилките, фотосензорите вградени во просторијата даваат сигнал за зголемување на моќноста (т.е. флуксот) на сијалиците.



Слика 7.16 Комбинација на дневна светлина и светлина од сијалици [6]
(со континуирана регулација на флуксот на одделните светилки)

На сликата 7.17.a е прикажана осветленоста во една просторија без и со регулација на флуксот според претходната стратегија. За истата просторија, на сликата 7.17.б е прикажана ангажираната моќност со текот на времето за случај со и без регулација на флуксот. Засенчените површини на сликата 7.17.б ги покажуваат можните заштеди.

Примената на оваа стратегија бара многу посложен СУО затоа што се потребни повеќе фотокелии што ќе ја мерат осветленоста во секоја просторија.



Слика 7.17 Пример за одржување на константна осветленост во текот на експлоатацијата

Намалување на ангажираната моќност

Трошоците за ангажирана моќност за СО во големите згради можат да бидат значајна ставка во вкупните трошоци за електрична енергија. СУО може да се искористи за намалување на тие трошоци на тој начин што ќе ја намали моќноста на сијалиците во просториите во коишто намалувањето на осветленоста не е критично. Ако оваа шема се применува во летните месеци, дополнителни заштеди можат да се очекуваат и поради намалување на ангажираната моќност како резултат на намалените потреби за ладење на просториите.

Употребата на СУО за намалување на ангажираната моќност најдобро се реализира ако СУО е дел, или во тесна врска, со останатите системи за управување во зградите.

8 СВЕТЛОТЕХНИЧКИ МЕРЕЊА

8.1 Општо за светлотехничките мерења

Мерењата во светлотехниката се вршат за определување на карактеристиките на светлината, светлинските извори и материјалите што се користат во светлотехниката. Мерењата можат да бидат фотометриски и електрични. Со електричните мерења се определуваат електричните карактеристики на светлинските извори (моќност, струја и сл.). Со оглед на фактот дека таквите мерења спаѓаат во категоријата вообичаени мерења во електротехниката, тие нема да бидат обработени во рамките на овој труд. Фотометриските мерења ги опфаќаат мерењата на фотометриските и радиометриските големини на светлината, како и останатите физички големини (бранова должина, боја, температура на боја и сл.).

Мерењата на фотометриските големини се поврзани со проблеми што не се среќаваат кај останатите мерења на физичките (и радиометриските) големини. Имено, инструментите наменети за фотометриски мерења треба да бидат конструирани така што да ја симулираат работата на човечкото око. За мерење на фотометриските големини постојат мерни инструменти базирани на принципите на *визуелна* и *физикална* фотометрија. Принципот на визуелна фотометрија се базира на систем на мерење во кој е вклучено и човечкото око и се состои од споредба на ефектите од извор на светлина за кој е потребно да се определи некоја светлотехничка големина, со соодветните ефекти од референтен (познат) извор на светлина. Овој принцип денес се користи само во лабораториски услови.

Принципот на физикална фотометрија се применува кај мерните инструменти што мерат радиометриски големини, а фотометриските големини се добиваат по пат на конверзија со помош на соодветни филтри или пресметковни процедури.

Фотометриските мерења ги опфаќаат мерењата на следните фотометриски големини: светлинскиот флукс, светлинската јачина, сјајноста и осветленоста. Првите две мерења се изведуваат, главно, во лабораториски услови, додека вторите во лаборатории или на терен. Инструменти со кои се изведуваат наведените мерења со заедничко име се нарекуваат фотометри. Тука спаѓаат:

- интегрирен фотометар (наменет за непосредно мерење на светлинскиот флукс на светилка или сијалица),
- гониофотометар (наменет за мерење на распределбата на светлинската јачина),
- мерач на сјајноста,
- луксметар (наменет за мерење на осветленоста).

Мерењата на физичките големини на светлината се однесуваат на: бранова должина, спектрален состав, боја и температура на боја. Мерните уреди за овие мерења се:

- спектрометар,

- спектрометријетар,
- спектрофотометар,
- колориметар.

Во продолжение накусо ќе бидат објаснети принципите на мерење и мерните инструменти за претходно наведените фотометриски големина.

8.2 Мерни инструменти

Мерните инструменти, најчесто, се состојат од два дела: фотоелектричен приемник (детектор) и мерен инструмент за електрична големина.

Фотоелектричниот приемник има задача определената светлинска големина да ја претвора во соодветна електрична големина. На тој начин, преку мерење на една електрична големина може да се добие информација за интензитетот на соодветната светлинска големина.

Мерниот инструмент за електричната големина (напон или струја) е баждарен така што директно ја покажува измерената вредност на светлотехничката големина. Во поново време мерниот инструмент може да биде опремен и со определен микропроцесорски склоп (или да биде приклучен на компјутер) со што се создава дополнителна можност за аквизиција и обработка на податоците. Да забележиме дека модерните и посовршени мерни инструменти можат едновременно да мерат и фотометриски и радиометриски големина.

Фотоелектричните приемници (често нарекувани и фотоќелии) се базираат на следните два принципа на работа: термоелектричен и фотоелектричен.

Термоелектричните детектори служат за претворање на радијацијата во електрична струја или вршат промена на јачината на струјата во електрично коло во зависност од количеството на радијација. Кај овие детектори спектралната осетливост е независна од брановата должина на светлината и, по правило, тие се помалку осетливи од фотоелектричните детектори, па поради тоа се користат главно во инструменти наменети за лабораториски услови на работа.

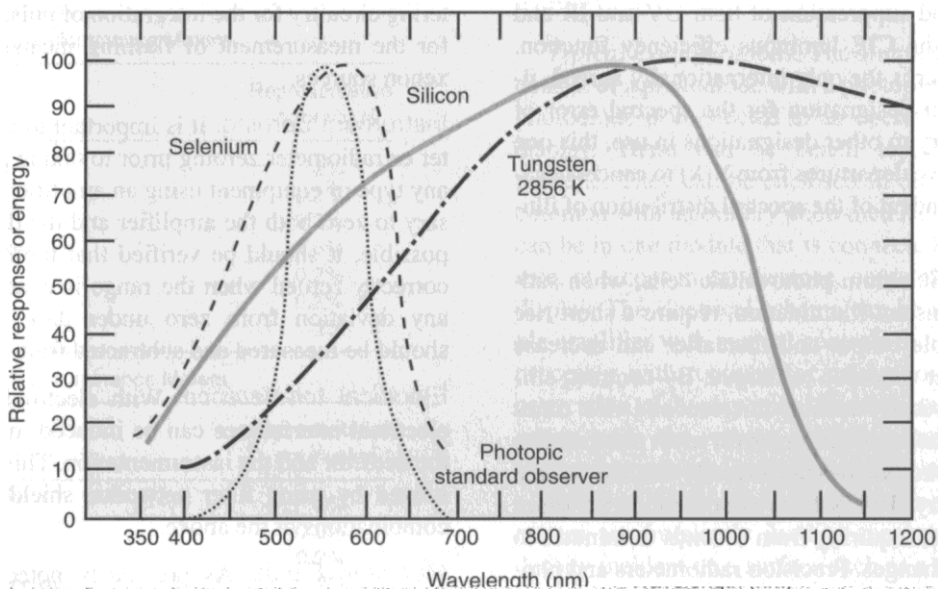
Фотоелектричните детектори директно ја претвораат светлината во електрична енергија и можат да работат на следните три принципи: како фотоемисиони ќелии, како фотоволтаични ќелии или како фотоспроводносни ќелии.

Кај фотоемисионите ќелии светлината влијае врз големината на струјата во струјното коло. Тие се изработуваат во вид на електронски цевки во кои (фото)катодата е изработена од слој што емитува електрони во зависност од интензитетот на зрачењето. Главниот недостаток на фотоемисионите ќелии е тоа што струјата во колото е многу мала и затоа се погодни за случаи кога зрачењето е со голем интензитет.

Фотоволтаичните ќелии се полупроводнички елементи и за нивна работа не е потребен дополнителен електричен извор затоа што самите ќелии се генератори на електрична енергија, пропорционална на количеството светлина што ќе падне на ќелијата. Селенот и силициумот се најчестите материјали за изработка на фотоволтаични ќелии.

Фотоспроводливите ќелии имаат својство да ја менуваат спроводливоста во зависност од интензитетот на светлинскиот флукс што ќе падне врз ќелијата. Се одликуваат со релативно кусо време на реакција и голема осетливост. Нивните недостатоци се тоа што не произведуваат линеарен сигнал и се подложни на појавата на хистереза.

Кај сите фотоелектрични детектори сигналот што го произведуваат зависи од брановата должина на радијацијата. На сликата 8.1 е прикажана релативната осетливост на некои полупроводнички материјали што се користат за изработка на фотоелектрични ќелии.



Слика 8.1 Релативна осетливост на некои материјали за изработка на фотоелектрични детектори [6]

За фотоелектричниот детектор да може да произведе соодветен електричен сигнал неговата релативна осетливост треба да биде идентична на релативната осетливост на човечкото око. Тоа се постигнува со поставување на соодветни филтри. Како што може да се забележи од сликата 8.1, ќелиите од селен имаат релативна осетливост што е најблиска до осетливоста на човечкото око (крива $V(\lambda)$ од сликата 2.3) така што за овие ќелии е потребна најмала корекција. Но, од друга страна, силициумските ќелии се помалку подложни на стареење и, со примена на подобрени филтри, наоѓаат сè поголема примена.

Да забележиме дека, како и сите електрични мерни инструменти, мерните инструменти наменети за мерење на фотометриските големини треба повремено да се калибрираат во акредитирани лаборатории.

8.3 Мерење на светлинската јачина

Мерењето на светлинската јачина на светлинските извори може да се изведе со помош на едноставна процедура, користејќи таканаречена *фотометриска работна маса*. Фотометриската работна маса овозможува светлинскиот извор и фотокелијата да бидат поставени на иста оска и на точно определено растојание.

Мерењето на светлинската јачина на еден извор може да се изведе на два начина. И во двата случаја се користи референтна сијалица за која е позната светлинската јачина во определен правец, $I_{\text{реф.}}$. Референтната сијалица се поставува на определено растојание од фотокелија со $V(\lambda)$ корекција и се мери струјата $F_{\text{реф.}}$. Потоа, референтната сијалица се заменува со сијалицата за која ја определуваме светлинската јачина. Струјата на овој случај ја означуваме со $F_{\text{тест.}}$. Светлинската јачина на сијалицата ја пресметуваме со помош на следниот израз:

$$I_{\text{тест.}} = I_{\text{реф.}} \cdot \frac{F_{\text{тест.}}}{F_{\text{реф.}}} \quad (8.1)$$

Вториот начин за мерење на светлинската јачина се разликува од првиот во тоа што растојанијата помеѓу фотокелијата и светлинските извори (означени со $d_{\text{реф.}}$ и $d_{\text{тест.}}$, соодветно) не се еднакви. Во првиот чекор, за референтната сијалица поставена на растојание $d_{\text{реф.}}$ од фотокелијата се отчитува струјата $F_{\text{реф.}}$. Потоа, референтната сијалица се заменува со сијалицата што се тестира и растојанието $d_{\text{тест.}}$ се нагдува така што струите за двата извора да се еднакви. Во тој случај, бараната светлинската јачина на сијалицата е:

$$I_{\text{тест.}} = I_{\text{реф.}} \cdot \frac{d_{\text{реф.}}^2}{d_{\text{тест.}}^2} \quad (8.2)$$

Претходните постапки не се погодни за определување на I-табелите на светилките затоа што бројот на отчитувања (елементи од I-табелата), најчесто, е многу голем. За таа цел се користат два уреда наречени: поларен фотометар и гониофотометар.¹¹⁷ Овие фотометри се разликуваат според конструкцијата, т.е. намената. Поларниот фотометар е погоден за светилки за улично осветление и светилки за внатрешно осветление. Гониофотометарот е погоден за рефлекторски светилки каде што растојанието помеѓу светилката и фотокелијата треба да биде релативно големо. На пример, кај рефлекторските светилки наменети за осветление на стадиони растојанието треба да биде околу 33 m, додека кај автомобилските фарови околу 25 m [5].

Поларниот фотометар и гониофотометарот ја обавуваат истата функција што ја има фотометриската работна маса, но процесот на мерење е автоматизиран и управуван од компјутер. Со цел да се обезбеди што е поточно мерење на светлинската јачина е потребно светилката да може да се смета за точкаст извор. Тоа значи дека

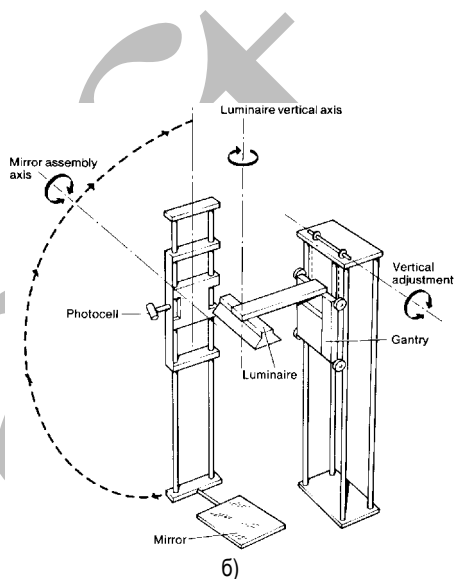
¹¹⁷ Во стручната литература за двата уреда многу често се користи терминот *гониофотометар*.

растојанието помеѓу светилката и фотоќелијата треба да биде најмалку петпати поголемо отколку најголемата димензија на светлечката површина на светилката.

Кај поларниот фотометар тоа се постигнува така што патот на светлината се продолжува со користење на систем со огледала. На сликата 8.2.a е прикажана фотографија, додека на сликата 8.2.б е прикажана скица на поларен фотометар.



a)

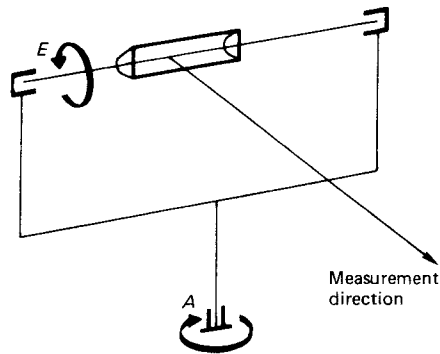


б)

Слика 8.2 Изглед и скица на поларен фотометар [102,5]

Светилката се поставува така што нејзината оптичка оска да биде вертикална. Нејзиниот оптички центар се поставува во хоризонталната оска на завртување на фотоќелијата и огледалото (слика 8.2.б). На почетокот од мерењата светилката се поставува така што фотоќелијата се наоѓа во полурамнината C_0 . Фотоќелијата, заедно со огледалото, се завртува околу хоризонтална оска при што фотоќелијата ја регистрира светлинската јачина на светилка за различни агли во однос на оптичката оска на светилката. Потоа, светилката се завртува околу оптичката оска за мерењата да се повторат за друга полурамнина.

За разлика од поларниот фотометар кај гониофотометарот, поради големите растојанија помеѓу фотоќелијата и светилката, фотоќелијата е статична, додека светилката се завртува околу нејзините фотометриски оски. Со завртување на светилката се овозможува отчитување на светлинската јачина за различни агли во однос на нејзината оптичка оска и за различни полурамнини. На сликата 8.3 е прикажана скица на гониофотометар.



Слика 8.3 Скица на гониофотометар [5]

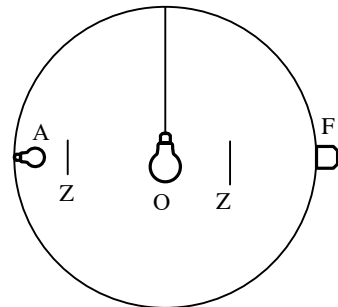
8.4 Мерење на светлинскиот флукс

Најчесто користениот уред за мерење на светлинскиот флукс е Улбрихтовата сфера. Таа уште се нарекува *интегрирачки фотометар*. Сферата е со релативно голем дијаметар. На сликата 8.4.а е прикажана фотографија од Улбрихтова сфера.

Внатрешната површина на сферата е обично бела, со особина да одбива дифузно. Сијалицата или светилката, чиј светлински флукс се мери, се поставува во средината на сферата, како што е прикажано на сликата 8.4.б.



а)



O – светлински извор
 A – помошен извор
 F – фотокелија
 Z – заклон

б)

Слика 8.4 Изглед и принципиелна шема на Улбрихтова сфера [102,5]

Флуксот што паѓа на внатрешната површина на сферата се состои од две компоненти: директна и индиректна. Директната компонента ја сочинува флуксот што од светлинскиот извор директно паѓа на сферата, додека индиректната компонента е резултат на ефектот на повеќекратното одбивање во сферата. Нека со Φ го означиме

флуksот на светлинскиот извор и воедно тој флуks ќе одговара на директната компонента на флуksот што паѓа на внатрешната површина на сферата. Ако со $\Phi_{\text{внатр.}}$ го означиме вкупниот флуks што паѓа на внатрешната површина на сферата, а со ρ го означиме коефициентот на одбивање од внатрешната површина на сферата, според изразот (4.35), за индиректната компонента, $\Phi_{\text{инд.}}$, следува:

$$\Phi_{\text{инд.}} = \Phi \cdot (\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots) = \frac{\rho \cdot \Phi}{1 - \rho} . \quad (8.3)$$

Ако осветленоста, постигната од индиректниот флуks, се означи со $E_{\text{инд.}}$ и ако со S се означи плоштината на внатрешната површина на сферата, за индиректниот флуks што паѓа на сферата може да се напише:

$$\Phi_{\text{инд.}} = S \cdot E_{\text{инд.}} . \quad (8.4)$$

Израмнувајќи ги десните страни на равенките (8.3) и (8.4), за непознатиот светлински флуks на изворот добиваме:

$$\Phi = \frac{1 - \rho}{\rho} \cdot S \cdot E_{\text{инд.}} . \quad (8.5)$$

Индиректната компонента на осветленоста на внатрешната површина на сферата $E_{\text{инд.}}$ може да се измери со помош на фотоелементот поставен во точката F. Бидејќи е потребно да се измери осветленоста што ја создава одбиената светлина, помеѓу светлинскиот извор и фотоелементот е поставен соодветен заклон.

Да забележиме дека резултатите добиени со изразот (8.5) во себе содржат грешка поради појавата на апсорпција на светлината од страна светлинскиот извор. За да се елиминира оваа грешка потребно е да се примени таканаречената постапка на *супституција*. Во постапката на супституција најнапред се мери индиректната компонента на осветленоста $E_{\text{реф.}}$ на внатрешната површина од сферата создадена од референтен светлински извор со познат флуks $\Phi_{\text{реф.}}$. Потоа, во сферата се поставува светлински извор со исти димензии како и референтниот и се мери осветленоста што ја означуваме со $E_{\text{тест.}}$. Бидејќи двата извора се со идентични димензии, апсорпцијата на светлината во изворите е еднаква. Според (8.5), за бараниот флуks на светлинскиот извор добиваме:

$$\Phi_{\text{тест}} = \Phi_{\text{реф.}} \cdot \frac{E_{\text{тест.}}}{E_{\text{реф.}}} . \quad (8.6)$$

Ако димензиите на референтниот светлински извор не се еднакви со димензиите на изворот за кој го определуваме флуksот, тогаш се применува малку поинаква процедура. За таа цел ќе послужи помошна сијалица, означена со A на сликата 8.4. Помошната сијалица е поставена зад соодветен заклон што оневозможува директна компонента на нејзиниот флуks да падне на светлинскиот извор O и фотокелијата F.

Постапката се состои од два чекора. Во првиот чекор се мери индиректната компонента на осветленоста од помошниот извор, означена со $E_{\text{реф.}}$. Потоа, во сферата се поставува референтниот извор, но тој не се вклучува и се мери осветленоста од

помошниот извор, означена со $E'_{\text{реф.}}$. Односот помеѓу измерените осветлености $E_{\text{реф.}}$ и $E'_{\text{реф.}}$ измерени во првиот чекор го означуваме со $R_{\text{реф.}}$. Очигледно, односот $R_{\text{реф.}}$ ќе биде помал од единица поради апсорпцијата на светлината во референтниот светлински извор.

Во вториот чекор се повторува постапката од првиот чекор, но наместо референтниот светлински извор, во сферата го поставуваме изворот за кој треба да го определеме флуksот. Односот на измерените осветлености во овој случај да го означуваме со $R_{\text{тест.}}$

Според тоа, за точната вредност на флуksот на светлинскиот извор, означена со $\Phi_{\text{тест.}}$, од изразот (8.6), добиваме:

$$\Phi_{\text{тест.}} = \Phi_{\text{реф.}} \cdot \frac{E_{\text{тест.}}}{E_{\text{реф.}}} \cdot \frac{R_{\text{реф.}}}{R_{\text{тест.}}} \quad (8.7)$$

8.5 Мерење на осветленост

Инструментот за мерење на осветленоста се нарекува *луксметар*. Тој е составен од два дела. Едниот е фотоелектричен елемент, а другиот е електричен мерен инструмент, баждарен во лукси. Пракса е двата дела да се изработени како одделни делови, поврзани со електрични спроводници. Со тоа се овозможува лицето што го отчитува инструментот да биде на доволно растојание од местото на кое се мери осветленоста (т.е. од местото на кое е поставен фотоелементот) и со своето присуство да не влијае врз осветленоста што се мери. На сликата 8.5 се прикажани два комерцијално расположливи луксметри со дигитално отчитување.

Вообичаено, на фотоелементот се наоѓа филтер со кој се коригира големината на сигналот за тој да одговара на релативната осетливост на човечкото око. Покрај тоа, луксметрите треба да имаат и соодветна корекција за упадниот агол на светлината, таканаречена *косинусна корекција*. Имено, грешката во одзивот на реалните фотокелији (интензитетот на струјата) се зголемува со зголемување на аголот на упадната светлина во однос на вертикалата на површината на фотоелементот. Поради тоа, на фотокелијата се поставува таканаречен *косинусен филтер*, изработен во вид на полусфера од материјал што дифузно пропушта светлина.

Модерните луксметри имаат релативно добри косинусна и $V(\lambda)$ корекции и се релативно прецизни, при што вкупната грешка во мерењето не надминува 5%.

Осветленоста се мери како кај новоизградените инсталации така и кај тие што се во погон подолго време. Во двата случаја, преку мерењата се настојува да се одговори на прашањата колкава е средната осветленост и каква е рамномерноста на осветленоста.



Слика 8.5 Лукметри [103,104]

Мерењата се вршат за работната рамнина која што, најчесто, се наоѓа на висина од 0,85 m од подот на просторијата. Пред да се започне со мерењата, на работната (т.е. осветлуваната) површина се дефинира мрежа, како што е прикажано на сликата 8.6. Со мрежата, осветлуваната површина се дели на $n \times m$ еднакви компонентни површини. Осветленоста се мери во средиштата на елементарните површини.

• (1,1)	• (1,2)	• (1,3)	• (1, j)	• (1, m)
• (2,1)	• (2,2)	• (2,3)	• (2, j)	• (2, m)
• (i ,1)	• (i ,2)	• (i ,3)	• (i , j)	• (i , m)
• (n ,1)	• (n ,2)	• (n ,3)	• (n , j)	• (n , m)

Слика 8.6 Шема на мерни места

По извршеното мерење на осветленоста во назначените точки, средната осветленост се пресметува со формулата:

$$E_{\text{средна}} = \frac{1}{n \cdot m} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ij} . \quad (8.8)$$

Така добиената средна осветленост не треба да биде помала од предвидената средна осветленост за просторијата, односно за конкретните светлотехнички барања.

Потоа, користејќи ги измерените вредности, се утврдува најмалата измерена осветленост, $E_{\text{најм.}}$, што се користи за оценка на тоа колку е рамномерна осветленоста на осветлуваната (работна) површина. Општата рамномерност на осветленоста е:

$$U_E = \frac{E_{\text{најм.}}}{E_{\text{средна}}} . \quad (8.9)$$

При мерење на осветленоста треба да се мери и напонот на кој се приклучени светлинските извори. Измерените вредности на погонскиот напон треба да се внесат во записникот од извршените мерења и треба да се земат предвид при анализа на резултатите добиени со светлотехничките мерења.

Точноста на резултатот добиен со пресметувањето на средната осветленост според (8.8) зависи и од големината на компонентните површини. Колку плоштината на компонентните површини е помала, толку се поточни резултатите добиени со изразот (8.8). Во Препораката СИЕ 29–2 се дефинира најмалиот број точки потребен за да се постигне задоволителна точност при определувањето на средната осветленост. Во табелата 8.1 е прикажан најмалиот број точки во кој треба да се мери осветленоста во зависност од индексот на просторијата k , дефиниран со изразот (6.19). Бројот на мерни точки од табелата 8.1 треба да се зголеми доколку тој број се совпаѓа со бројот на светилки во просторијата, или ако мерните точки се поклопуваат или се многу блиску до проекциите на центрите на светиликите врз работната рамнина.

Табела 8.1 Потребен број на мерни точки за определување на средна осветленост (според [28])

Индекс на просторијата	Најмал број на мерни точки
$k < 1$	4
$1 \leq k < 2$	9
$2 \leq k < 3$	16
$k \geq 3$	25

Кога е потребно да се определи средна осветленост на дел од работната површина во една просторија се постапува на сличен начин, но притоа мерните точки се дефинираат само за разгледуваниот дел од осветлуваната површина.

На крајот да наведеме дека со користење на уред за мерење на осветленост може приближно да се определи коефициент на одбивање од една површина во вид на квадрат, чија плоштина не е помала од 144 cm^2 . Набљудуваната површина треба да биде рамномерно осветлена. Во таа смисла, најнапред се мери нејзината осветленост. Потоа фотоелементот се свртува кон површината и полака се оддалечува од неа. Оддалечувањето треба да запре кога луксметарот престане да покажува зголемување на осветленоста. Така добиената осветленост се дели со порано измерената осветленост

на набљудуваната површина. Добиениот количник е приближната вредност на коефициентот на одбивањето од таа површина.

8.6 Мерење на сјајност

Сјајноста на светлинските извори или осветлени површини се мери со специјално развиени мерни уреди. Многу често овие уреди се референцираат и со генеричкото име – *фотометри*.

По својата конструкција мерачите на сјајност наликуваат на кино камера. Тие содржат соодветен оптички систем со којшто е можно да се набљудуваат оддалечени предмети. Исто така, тие се опремени со соодветна дијафрагма (бленда), слично како и камерите, со којашто може да се ограничи површината за која се врши мерењето. На сликата 8.7.a е прикажан изглед на мерач на сјајност, додека на сликата 8.7.б е прикажан пример на екранот при мерење на сјајност. Вообичаено, полето на набљудување изнесува околу 10° (агол при врвот на конусот со кој е дефиниран просторниот агол на набљудуваната површина), додека полето на мерење е околу 1° . Подобрите и посложени инструменти можат да мерат сјајност на површини со агли од $1'$ до 3° .



Слика 8.7 Мерач на сјајност [103]

Мерачот на сјајност во суштина е луксметар што ја мери осветленоста на површината на фотокелијата создадена од ликот на набљудуваната површина. Флуксот што ќе падне врз леќата на мерачот на сјајност, $\Phi_{\text{леќа}}$, може да се пресмета како производ на светлинската јачина на ликот на набљудуваната површина во правец кон инструментот и просторниот агол што го зафаќа ликот во однос на леќата на фотометарот:

$$\Phi_{\text{леќа}} = I \cdot \Omega = L \cdot S \cdot \frac{A}{D^2}, \quad (8.10)$$

каде што со L и S се означени сјајноста и плоштината на набљудуваната површина, соодветно, A ја означува плоштината на леќата, а D е растојанието на леќата од набљудуваната површина.

Флуксот што ќе падне на фотокелијата да го означиме со $\Phi_{\text{келија}}$, а тој може да се добие како производ на флуксот $\Phi_{\text{леќа}}$ и коефициентот на пропуштање на леќата, τ :

$$\Phi_{\text{келија}} = \tau \cdot \Phi_{\text{леќа}} = \tau \cdot L \cdot S \cdot \frac{A}{D^2}. \quad (8.11)$$

Бидејќи од средиштето на леќата под еднакви просторни агли (Ω) се гледаат како набљудуваната површина така и нејзиниот лик врз фотокелијата, за плоштината на ликот може да се напише:

$$A_{\text{лик}} = S \cdot \frac{d^2}{D^2}, \quad (8.12)$$

каде што со d е означено растојанието помеѓу фотокелијата и леќата и се имаат предвид релациите:

$$A_{\text{лик}} \ll d^2 \text{ и } S \ll D^2.$$

За осветленоста што ја создава ликот врз фотокелијата, $E_{\text{лик}}$, може да се напише:

$$E_{\text{лик}} = \frac{\Phi_{\text{келија}}}{A_{\text{лик}}} = \tau \cdot \frac{L \cdot A}{d^2}, \quad (8.13)$$

а сјајноста на набљудуваната површина е

$$L = \frac{E_{\text{лик}} \cdot d^2}{\tau \cdot A}. \quad (8.14)$$

Од изразот (8.14) произлегува дека сјајноста на набљудуваната површина не зависи од нејзината плоштина или растојание (просторен агол), туку само од измерената осветленост и карактеристиките на мерачот на сјајност. Мерачот на сјајност всушност претставува луксметар што ја мери осветленоста создадена од светлинскиот извор или осветлената површина врз површината на фотокелија, која што треба да има $V(\lambda)$ корекција.

9 ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. Podlipnik, A. Čop. *Svetlotehnički priručnik*. Maribor: Elektrokovina, 1978.
- [2] E. Širola. *Cestovna rasvjeta*. Zagreb: ESING, 1997.
- [3] Д. Рајичиќ. *Електрично осветление*. Скопје: Електротехнички факултет Скопје, 1993.
- [4] S. T. Henderson, A. M. Marsden, eds. *Lamps and Lighting, 2 ed.* London: Edward Arnold, 1979.
- [5] J. R. Coaton, A. M. Marsden, eds. *Lamps and Lighting, 4 ed.* London: Arnold, 1997.
- [6] M. S. Rea, ed. *The IESNA Lighting Handbook, 9 ed.* New York: IESNA, 2000.
- [7] V. V. Meshkov. *Fundamentals of Illumination Engineering*. Moscow: Mir Publishers, 1981.
- [8] В. В. Мешков. *Основы светотехники*. Москва: Энергия, 1979.
- [9] S. L. Lyons. *Handbook of Industrial Lighting*. London: Butterworths, 1981.
- [10] Ю. Б. Айзенберг, редактор. *Справочная книга по светотехнике*. Москва: Энергоатомиздат, 1983.
- [11] G. Millerson. *The Technique of Lighting for Television and Motion Pictures, 2nd ed.* London: Focal Press, 1982.
- [12] G. L. Dimić, F. Virag. *Osvetljenje I*. Beograd: Građevinska knjiga, 1972.
- [13] P. D. Rančić. *Prilozi svetlotehničkim karakterizacijama; Sveska 4: Osvetljenje zatvorenih prostora; A ~ Raspodela svetlosnog fluksa i osvetljenosti*. Niš: Elektronski fakultet Niš, 1997.
- [14] H. Prochazka. *Praksa industrijske rasvjete*. Zagreb: Tehnička knjiga, 1968.
- [15] D. Matanović. *Tehnika rasvjete*. Zagreb: Nakladni zavod Hrvatske, 1948.
- [16] А. Я. Коц. *Освещение электрических станций и подстанций*. Москва: Энергоиздат, 1981.
- [17] B. Perme. *Razsvetljava*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 1971.
- [18] I. Ashdown. *Radiosity: A Programmer's Perspective*. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [19] M. Kostić. *Vodič kroz svet tehnike osvetljenja*. Beograd: MINEL–SCHRÉDER, 2000.
- [20] Б. Трпеновски, Н. Целакоски. *Елементи од нумеричката математика*. Скопје: Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, 1987.

- [21] Н. В. Волоцкой, Г. М. Кнорринг, М. С. Рябов, А. С. Шайкевич, *Электрическое освещение производственных и гражданских зданий*. Москва: Энергия, 1964.
- [22] Б. Ф. Федоров, *Общий курс светотехники*. Москва: Госэнергоиздат, 1944.
- [23] Б. Конески, редактор; Т. Димитровски, Б. Корубин и Т. Стаматоски, составувачи. *Речник на македонскиот јазик со српскохрватски толкувања*. Скопје: Македонска книга, Графички завод „Гоце Делчев“, 1986.
- [24] _____. Закон за енергетика. Службен весник на Република Македонија, бр. 63/2006, 23 мај 2006.
- [25] _____. Commission Directive 98/11/EC on Energy Labeling of Household Lamps. *Official Journal of the European Communities*, L71 Vol. 41, 10 March 1998.
- [26] _____. Parliament and Council Directive 2000/55/EC on Energy Efficiency for Ballasts for Fluorescent Lamps. *Official Journal of the European Communities* L279, Vol. 33, 01 November 2000.
- [27] МКС У.Ц9.100. Македонски стандард. „Дневно и електрично осветление на простории во згради“. (JUS U.C9.100. Jugoslovenski standard. Dnevno i električno osvetljenje prostorija u zgradama). Службен лист на ФНРЈ бр. 48/1962.
- [28] CIE. *Guide for Interior Lighting*. Publication CIE 29–2, 1986.
- [29] CIE. *Calculation and Measurement of Luminance and Illuminance in Road Lighthing*. Publication CIE 30–2, 1990.
- [30] CIE. *Glare and Uniformity in Road Lighthing Installations*. Publication CIE 31, 1976.
- [31] CIE. *Calculations for Interior Lighting: Basic Method*. Publication CIE 40, 1978.
- [32] CIE. *Road Lighting for Wet Conditions*. Publication CIE 47, 1979.
- [33] CIE. *Calculations for Interior Lighting: Applied Method*. Publication CIE 52, 1982.
- [34] CIE. *Lighting for Football*. Publication CIE 57, 1983.
- [35] CIE. *Lighting for Sport Halls*. Publication CIE 58, 1983.
- [36] CIE. *Guide for the Photometric Specification and Measurement of Sports Lighting Installations*. Publication CIE 67, 1986.
- [37] CIE. *Guide for the Lighting of Sports Events for Colour Television and Film Systems*. Publication CIE 83, 1989.
- [38] CIE. *Maintenance of Indoor Electric Lighting Systems*. Publication CIE 97:2005, 2005.
- [39] CIE. *The Economics of Interior Lighting Maintenance*. Publication CIE 103/5:1993, 1993.
- [40] CIE. *Glare Evaluation System for Use within Outdoor Sports and Area Lighting*. Publication CIE 112, 1994.

- [41] CIE. *Recommendations for the Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic*. Publication CIE 115, 1995.
- [42] CIE. *Discomfort Glare in Interior Lighting*. Publication CIE 117, 1995.
- [43] CIE. *Guide for Lighting Exterior Work Areas*. Publication CIE 129, 1998.
- [44] CIE. *Guide to Lighting Urban Areas*. Publication CIE 136, 2000.
- [45] ISO/CIE. *International Standard: CIE Standard Illuminants for Colorimetry*. ISO 10526:1999(E)/CIE S 005/E–1998, 1998.
- [46] CIE. *CIE Standard: Lighting of Indoor Work Places*. Publication CIE S 008/E–2001, 2001.
- [47] IEC. *Technical Specification: International Lamp Coding System 2nd edition*. Publication IEC/TS 61231, 1999-06, 1999.
- [48] CEN. *European Standard EN 13032-1: Light and lighting – Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires – Part 1: Measurement and file format*. Publication EN 13032-1:2004:E, 2004.
- [49] CEN. *European Standard EN 13032-2: Light and lighting – Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires – Part 2: Presentations of data for indoor and outdoor work places*. Publication EN 13032-2:2004:E, 2004.
- [50] IESNA. *IESNA Approved Method for Life Testing of High Intensity Discharge (HID) Lamps*. Publication LM-47-01, 2001.
- [51] CELMA. *Guide for the application of Directive 2000/55/EC on Energy Efficiency Requirements for Ballasts for Fluorescent Lighting*. CELMA, May 2005.
- [52] The Commission of the European Communities. „Commission Directive 98/11/EC: Energy Labeling of Household Lamps“. *Official Journal of the European Communities*, L71, Vol. 41, 10 March 1998.
- [53] L. J. Buttolph. „The Cooper Hewitt Mercury Vapor Lamp: Part I. Theory and Operation“, *General Electric Review*, Vol. XXIII, No. 9, September, 1920.
- [54] L. Peretto, A. E. Emanuel. „A Theoretical Study of the Incandescent Filament Lamp Performance under Voltage Flicker“, Paper No. 96 WM 068–7 PWRD, 1996 IEEE/PES Winter Meeting, January 21–25, 1996, Baltimore, MD.
- [55] A. E. Emanuel, L. Peretto. „The Response of Fluorescent Lamp with Magnetic Ballast to Voltage Distortion“, Paper No. 96 WM 069–5 PWRD, 1996 IEEE/PES Winter Meeting, January 21–25, 1996, Baltimore, MD.
- [56] D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M. O. Holcomb, M. J. Ludowise, P. S. Martin, S. L. Rudaz. „Illumination With Solid State Lighting Technology“, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 8, No. 2, March/April 2002, pp. 310–320.
- [57] H. Wu, X. Zhang, C. Guo, J. Xu, M. Wu, Q. Su. „Three-band White Light From InGaN-Based Blue LED Chip Precoated With Green/Red Phosphors“, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, No. 6, June 2005, pp. 1160–1162.

- [58] N. Narendran, J. D. Bullogh, N. Maliyagoda, A. Bierman. „What is Useful Life for White Light Leds?“. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 30(1), 57–67, 2001.
- [59] K. M. Conway, J. D. Bullogh. „Will LEDS Transform Traffic Signals as the did Exit Signs? “. Paper #57, 1999 IESNA Annual Conference: New Orleans, LA; 8–11 August, 1999.
- [60] D. O. Wharmby. „Electrodeless Lamps for Lighting: A Review“. *IEE Proceedings – A*, Vol. 140, No. 6, November 1993, pp. 465–473.
- [61] J. T. Dolan, M. G. Ury, C. H. Wood. „A Novel High Efficiency Microwave Powered Light Source“. Sixth International Symposium on the Science and Technology of Light Sources, Technical University Budapest: 1992.
- [62] V. A. Godyak. „Radio Frequency Light Sources“, *Conference Record of the 2000 IEEE/IA Conference*, Vol. 5, pp. 3281–3288.
- [63] A. N. Kozlov, A. E. Reznikov, G. A. Lyakhov, Yu. V. Pavlov, R. M. Umarhodzaev, E. E. Shlifer. „High–Frequency and Microwave Excitation of a Discharge in Sulfur Vapors“, *Allerton Press Physics of Vibration*, Vol. 6, No. 4, pp. 261–266: 1998.
- [64] E. G. Leksina, E. A. Mukhina, Yu. V. Pavlov, R. M. Umarhodzhaev, O. M. Volnik, A. N. Kozlov, G. A. Lyakhov. „Spectroscopy of the Interaction between Sulfuric Plasma and Quartz Glass“, *Allerton Press Physics of Vibration*, Vol. 8, No. 3, pp. 158–164: 2000.
- [65] S.-H. Kloss, T. Müller, A. Rosemann, C. Steinwandt, H. Kaase. „Photometrische und spektrale Eigenschaften der Schwefellampe“. Tagungsband OTTI - Fünftes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, 1999, S. 223–228.
- [66] A. Rosemann. *Lightpipe Applications for Daylighting Systems*. Technical University of Berlin, 2002.
- [67] R. Taleski, D. Rajičić. „An Algorithm for Illuminance Calculation Respecting the Inter–Reflection Effect: A Practical Approach“, презентирани на конференцијата *Lighting '96*, Варна, 1996.
- [68] R. Taleski, D. Rajičić. „Interior Illuminance Calculation Respecting the Inter–Reflection Effect“, *Proceedings of the Fifth International Conference "Nikola Tesla"*, Belgrade 1996.
- [69] R. Taleski, D. Rajičić. „A Method for Interior Illuminance Calculation“, *Proceedings of the 8th European Lighting Conference LUX Europa '97*, Amsterdam, 1997, pp. 1173–1179.
- [70] FGL. *Die Beleuchtung mit künstlichem Licht*. Licht Zum Leben, Heft 1. Frankfurt: Fördergemeinschaft Gutes Licht, 1974.
- [71] FGL. *Die Beleuchtung mit künstlichem Licht*. Licht Zum Leben, Heft 1, 4/93. Frankfurt: Fördergemeinschaft Gutes Licht, 1993.
- [72] _____. „Electrodeless Lamps“. *Lighting Futures*, Vol. 1, No. 1. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 1998.

- [73] A. Tsangrassoulis, A. Synnefa, A. Jacobs, M. Wilson, M. Fontoynt, W. Pohl, A. Zimmermann. *SynthLight Handbook: European educational infrastructure on energy efficient lighting technologies, assisted by 3D environments*. SAVE Programme, Project No. 4.1031/Z/01-123/2001, 2001.
- [74] J. Palmer, B. Boardman, eds. *DELIGHT: Domestic Efficient Lighting - Final Report*. University of Oxford, 1998.
- [75] J. D. Bullogh. „La vita è bella“. *Lighting Futures*, Vol. 4, No. 3. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2000.
- [76] LRC. *Specifier Report: Specular Reflectors*. National Lighting Product Information Program, Vol. 1, Issue 3, July 1992. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 1992.
- [77] LRC. *Lighting Answers: T8 Fluorescent Lamps*. National Lighting Product Information Program, Vol. 1, No. 1, April 1993. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 1992.
- [78] LRC. *Lighting Answers: Power Quality*. National Lighting Product Information Program, Vol. 2, No. 2, February 1995. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 1995.
- [79] LRC. *Guide to Selecting Frequently Switched T8 Fluorescent Lamp-Balast Systems*. National Lighting Product Information Program, April 1998. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 1998.
- [80] LRC. *Specifier Report: Cathode-Disconnect Ballasts*. National Lighting Product Information Program, Vol. 2, No. 1, June 1993. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 1993.
- [81] LRC. *Specifier Report: Electronic Ballasts*. National Lighting Product Information Program, Vol. 8, No. 1, May 2000. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2000.
- [82] Philips Lighting. *Application Guide to Lamp Control Gear: 'TL', CFL, QL, Halogen*. Philips, 09/97.
- [83] Philips Lighting. *Application Guide to Lamp Control Gear: HID*. Philips, 03/98.
- [84] Philips Lighting. *Lighting Manual, 5. ed.* Eindhoven: Philips, 1993.
- [85] Philips Lighting. *General Catalogue: Lamps/Gear/Controls 2000-2002*. Eindhoven: Philips, 1999.
- [86] Philips Lighting. *Basic Lamps Catalogue 2001-2002, 1 edition*. Eindhoven: Philips, 2001.
- [87] Philips Lighting. *Κατάλογος 1999-2000*. Eindhoven: Philips, 1999.
- [88] Philips. *Philips Luminaires Catalogue Central & Eastern Europe*. Philips, 2001.
- [89] Philips Lighting. *Philips QL Lamp Systems: Information for Original Equipment Manufacturers*. Eindhoven: Philips, May 2002.
- [90] GEWISS. *Catalogue 2001*, 2001.

- [91] Osram. *Lichtprogramm 1999/2000*. München: Osram GmbH, 1999.
- [92] Osram. *Halogen Lamps from Osram*. Osram GmbH, 1995.
- [93] Osram. *Lighting Programme 1999/2000* (CD-ROM). München: Osram GmbH, 1999.
- [94] Osram. *Lighting Programme 2000/2001* (CD-ROM). München: Osram GmbH, 2000.
- [95] TEŽ–TESLA. *Žarulje za opću upotrebu*. Zagreb–Pančevo: TEŽ–TESLA, 1989.
- [96] Tridonic. *Transformers for Low Voltage Lamps: Catalogue 1999/2000*. Dornbirn: Tridonic, 1999.
- [97] Tridonic. *Magnetic Control Gear for Fluorescent Lamps: Catalogue 1999/2000*. Dornbirn: Tridonic, 1999.
- [98] Helvar. *Helvar Components for the Lighting Industry: Edition 1997*. Helsinki: Oy Helvar.
- [99] Helvar. *Product Catalogue: Edition 2000*. Helsinki: Helvar Oy Ab.
- [100] IKL. *Light Drive 1000 type 1400–E2/1: Installation and Operation Manual*. IKL document ID ET1376014, IKL AB, 1998.
- [101] Waldmann Lighting. *DIN 5035, Part 8: EU Directive 90/270/EWG*. Publication 1.500/05/99. Villingen–Schwenningen: Waldmann Lighting, 1999.
- [102] Lighting Sciences Inc. *Technical Products and Services for the Lighting Industry*. LSI, 1998.
- [103] The Cooke Corporation. *Lightmeter and Spotmeters*. The Cooke Corporation, 1997.
- [104] GMC-Instruments. *Mesuring Instruments and Testers. 1999 Catalogue*. Gossen-Metrawatt-Camille Bauer, 1999.
- [105] <http://www.gelighting.com>
- [106] <http://www.mew.co.jp> (<http://www.matsushita.co.jp>)
- [107] <http://www.osram.com>
- [108] <http://lighting.philips.com>
- [109] W. J. Hammer. *The William J. Hammer Historical Collection of Incandescent Lamps*. (<http://www.bulbcollector.com>)
- [110] A. Kozlov, V. Perevodchikov, R. M. Umarhodzaev, E. Shlifer. „Electrodless Microwave Discharges as Sources of Light and UV–Emission for the Illumination and Biomedical Applications“, (<http://top.izmiran.rssi.ru/~kozlov/publish.html>).
- [111] J. H. Lienhard. *The Engines of Our Ingenuity: Electric Lights Before Edison*. (<http://www.uh.edu/engines/epi1330.htm>)
- [112] N. Borg. „Global CFL Boom“, *IAEEL Newsletter 3–4/97*, Vol. 6, Issue 19, 1997. (<http://www.iaeel.org>).
- [113] <http://www.lampstech.co.uk>
- [114] <http://www.ledalite.com>

- [115] <http://www.bega.de>
- [116] <http://www.3m.com>
- [117] <http://www.dali-ag.org>
- [118] <http://www.lumileds.com>
- [119] Philips Lighting. *General OEM Catalogue Lamps & Gear/Controls 2003–2004, 1 edition*. Eindhoven: Philips, 2003.
- [120] LIF. *Lamp Guide 2001*. Lighting Industry Federation Limited, London:2001.

Draft

10 КРАТЕНКИ И ОЗНАКИ

10.1 Список на кратенки

AC	Alternating Current
ANSI	American National Standards Institute
DC	Direct Current
CCG	Conventional Control Gear
CCT	Correlated Color Temperature
CELMA	National Manufacturers Associations for Luminaires and Electrotechnical Components for Luminaires
CEN	European Committee for Standardization
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
DMX	Digital MultipleX
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
ECG	Electronic Control Gear
EIB	European Installation Bus
EN	Europäische Norm
FSC	Fusion System Corporation
GR	Glare Rating
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
IP	Ingress protection
IRC	Infrared Coating
ISO	International Standards Organization
LED	Light Emitting Diode
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
SI	System International
SOX	НСП со стандардна ефикасност комерцијална ознака на некои производители
SOX-E	НСП со зголемена ефикасност комерцијална ознака на некои производители

TI	Threshold Increment
UGR	Unified Glare Rating
USC	Unified Chromacity system diagram
BC	Волфрамова сијалица
BF	Висока фреквенција
EE	Енергетска ефикасност
EKY	Електронски контролен уред
ELP	Електролуминисцентен панел
EMC	Електромоторна сила
ЖС	Живина сијалица (со висок притисок)
ЖС/М	Живина сијалица за мешана светлина (со волфрамово влакно)
ЗУДС	Заштитен уред за диференцијална струја
ИЕЕ	Индекс на енергетска ефикасност
ИРБ	Индекс на репродукција на бојата
ИС	Индукциона сијалица
ИЦ	Инфрацрвени зраци
ИЦТ	Идеално црно тело
КЕЕ	Класа на енергетска ефикасност
КИС	Компактна индукциона сијалица
ККУ	Класичен (конвенционален) контролен уред
КМХС	Компактна метал халогена сијалица
КС	Ксенонска сијалица
КУ	Контролен уред
КФС	Компактна флуоресцентна сијалица
КФСЕ	Компактна флуоресцентна сијалица со екстерен контролен уред
КФСИ	Компактна флуоресцентна сијалица со интегриран контролен уред
МБС	Микробранова сијалица
МХС	Метал халогена сијалица
МХС/З	Метал халогена сијалица со трилиниски спектар
МХС/Е	Метал халогена сијалица со надворешен балон во вид на елипсоид и флуоресцентна облога
МХС/М	Метал халогена сијалица со мутилиниски спектар
МХС/Т	Метал халогена сијалица во вид на цевка со приклучоци од едниот крај
МХС/Ц	Метал халогена сијалица во вид на цевка со приклучоци од двата краја
НС	Натриумова сијалица

- НСВП Натриумова сијалица со висок притисок
- НСВП/БС Натриумова сијалица со висок притисок за бела светлина
- НСВП/Е Натриумова сијалица со висок притисок со елипсоиден балон
- НСВП/ПБ Натриумова сијалица со висок притисок со подобрена ТБ и ИРБ
- НСВП/ПЕ Натриумова сијалица со висок притисок со подобрено специфично производство
- НСВП/С Стандардна натриумова сијалица со висок притисок
- НСНП Натриумова сијалица со низок притисок
 - СБЕ Сијалица без електроди
 - СВВ Сијалица со вжарено влакно
 - СД Светлечка диода
 - СО Систем за осветление
 - СПГ Сијалица со празнење во гас или гасови
 - СС Сулфурна сијалица
 - СУО Систем за управување со осветлението
 - ТБ Температура на боја
 - УВ Ултравioletови зраци
 - ФС Флуоресцентна сијалица
- ФС/М Мултифосфорна флуоресцентна сијалица
- ФС/Т Трифосфорна флуоресцентна сијалица
- ФС/Х Халофосфатна флуоресцентна сијалица
- ФСЦ Флуоресцентна сијалица во вид на цевка
- ХС Халогена сијалица

10.2 Список на ознаки

- LLMF* Lamp Lumen Maintenance Factor
Коефициент на стареење на сијалиците
- LMF* Luminaire Maintenance Factor
Коефициент на нечистотоја
- LSF* Lamp Survival Factor
Коефициент на преживување
- MF* Maintenance Factor
Коефициент на одржување
- RSMF* Room Surface Maintenance Factor
Коефициент на нечистотија на просторијата

<i>THD</i>	Total Harmonic Distortion Тотална хармоничка дисторзија
<i>PF</i>	Фактор на моќност
<i>Q</i>	Количество светлина
<i>Q_e</i>	Енергија на зрачење
<i>E</i>	Осветленост
<i>E₀</i>	Средна осветленост на работната рамнина на крајот од периодот на одржување
<i>E_m</i>	Средна осветленост на работната рамнина на почетокот од периодот на одржување
<i>I</i>	Светлинска јачина
<i>I(α,γ)</i>	Светлинска јачина на светилката во полурамнината <i>C_α</i> во правец што со поларната оска зафаќа агол γ
<i>L</i>	Сјајност
<i>IT</i>	Индекс на треперење
<i>DF</i>	Фактор на дневна светлина
<i>R_a</i>	Општ индекс на репродукција на бојата
Φ	Светлински флукс
Φ_e	Флукс на зрачењето (моќност на зрачењето)
λ	Бранова должина
<i>P'(λ)</i>	Спектрална дистрибуција на моќноста на зрачењето по единица бранова должина
<i>V(λ)</i>	Релативна осетливост на човечкото око за монохроматска светлина во услови на дневно гледање
<i>V'(λ)</i>	Релативна осетливост на човечкото око за монохроматска светлина во услови на ноќно гледање
ρ	Коефициент на одбивање на светлината
τ	Коефициент на пропуштање на светлината
ω	Кружна фреквенција на наизменичната големина (струја, напон)
Ω	Просторен агол
<i>GTE</i>	Годишни трошоци за експлоатација
<i>LOR</i>	Light Output Ration Коефициент на искористување на светилка
<i>DFD</i>	Downward Flux Fraction Дел од флуксот што светилката го зрачи во долниот полупростор
<i>UFF</i>	Upwar Flux Fraction Дел од флуксот што светилката го зрачи во горниот полупростор

UF Utilization Factor

Коефициент на искористување на осветлението

RUF Room Utilization Factor

Коефициент на искористување на просторот

SHR Spacing to Height Ratio

Однос на просечно растојание меѓу светилките и висината на поставување на светилките над работната рамнина

Draft