

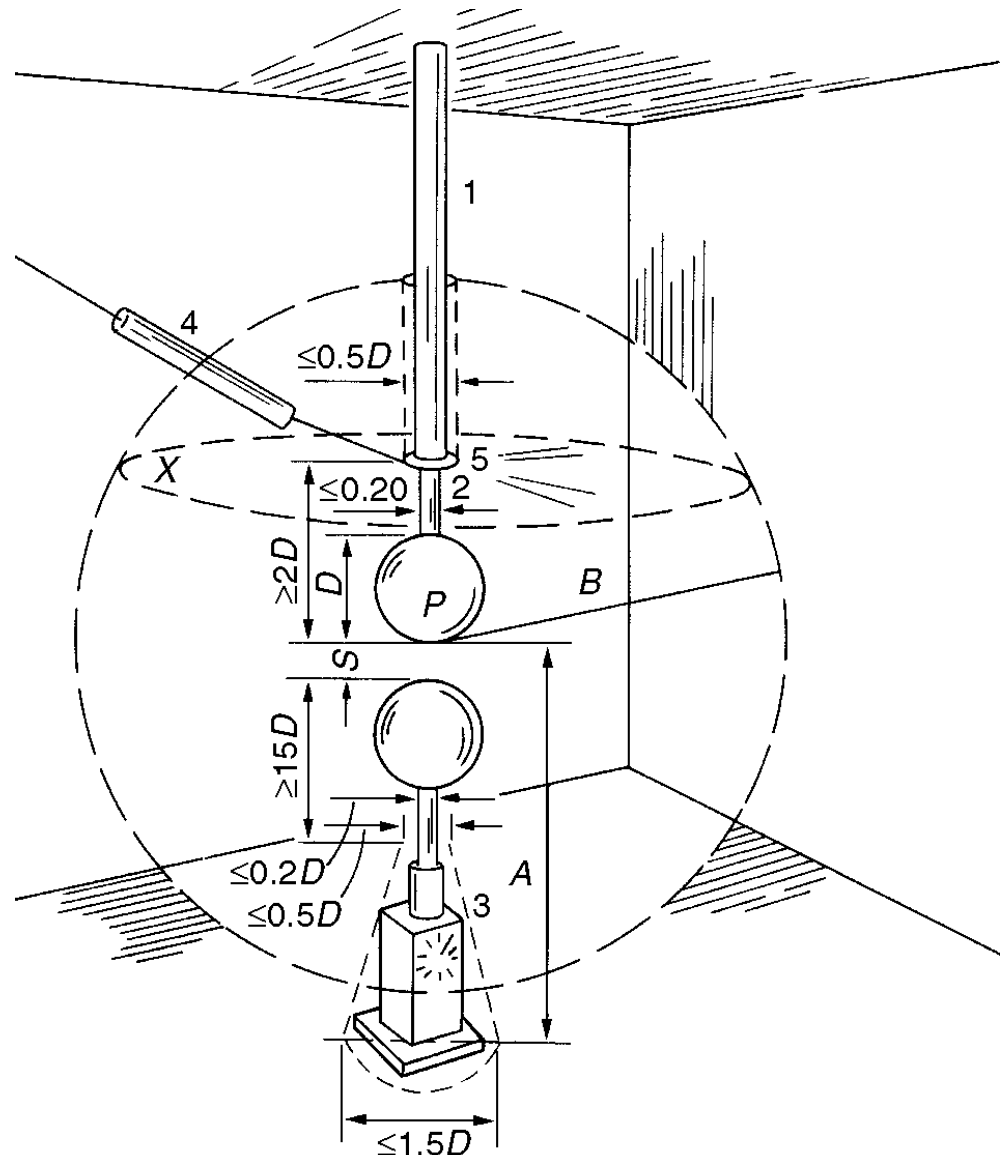


Универзитет „Св. Кирил и Методиј“  
Факултет за електротехника  
и информациски технологии



М. Тодоровски

# Техника на висок напон 1



Скопје, 2014

---

Изложениот материјал во оваа скрипта е наменет за настава по предметот Техника на висок напон 1 (шифра ФЕИТ093009) кој е задолжителен предмет во петтиот семестар на студиската програма Електроенергетски системи. Текстот е пишуван со користење на  $\LaTeX$ . Истиот може да се најде во електронска форма на интернет страницата на предметот: <http://pees.feit.ukim.edu.mk/predmeti/tvn1/index.php>

---

© М. Тодоровски, ПЕЕС, ФЕИТ, 2014.

ПЕЕС – Институт за преносни електроенергетски системи:

<http://pees.feit.ukim.edu.mk/>

ФЕИТ – Факултет за електротехника и информациски технологии:

<http://www.feit.ukim.edu.mk/>

# СОДРЖИНА

<b>1</b>	<b>Вовед</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Диелектрици</b>	<b>5</b>
2.1	Диелектрици во електрично поле . . . . .	5
2.2	Видови на поларизација во диелектриците . . . . .	9
2.3	Примери на електрично поле во диелектрици . . . . .	11
2.3.1	Коаксијален кабел со двослоен диелектрик . . . . .	11
2.3.2	Плочест кондензатор со двослоен диелектрик . . . . .	13
2.3.3	Диелектрик со шуплини . . . . .	15
2.3.4	Спроводна сфера во хомогено електрично поле . . . . .	16
2.4	Електрична спроводливост на диелектриците . . . . .	17
2.5	Диелектрични загуби . . . . .	17
2.6	Модел на диелектрикот . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Изолациони материјали</b>	<b>22</b>
3.1	Гасни изолациони материјали . . . . .	22
3.1.1	Воздух . . . . .	22
3.1.2	Сулфурен хексафлуорид – $\text{SF}_6$ . . . . .	23
3.2	Течни изолациони материјали . . . . .	24
3.3	Цврсти изолациони материјали . . . . .	25
3.3.1	Електропорцелан . . . . .	25
3.3.2	Стеатит . . . . .	26
3.3.3	Стакло . . . . .	26
3.3.4	Полимери . . . . .	27
3.3.5	Лискун . . . . .	27
3.3.6	Импрегнирана хартија . . . . .	28
3.3.7	Поливинилхлорид . . . . .	28
3.3.8	Полиетилен . . . . .	29
3.3.9	Прешпан . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Испитни напони</b>	<b>30</b>
4.1	Испитни напони со индустриска фреквенција . . . . .	31
4.2	Импулсни испитни напони . . . . .	31
4.3	Склопни испитни напони . . . . .	31
4.4	Еднонасочни испитни напони . . . . .	32
4.5	Големина на испитните напони . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Добивање на високи испитни напони</b>	<b>33</b>
5.1	Добивање на високи наизменични напони со индустриска фреквенција . . . . .	33
5.2	Добивање на високи еднонасочни напони . . . . .	39
5.3	Добивање на импулсни напони . . . . .	42
5.4	Добивање на високи наизменични напони со висока фреквенција . . . . .	51
5.5	Лабораторија за висок напон на ФЕИТ . . . . .	57

<b>6</b>	<b>Мерење на високи напони</b>	<b>60</b>
6.1	Сферно искриште . . . . .	60
6.2	Електростатски волтметар . . . . .	65
6.3	Амперметар со редно врзани елементи . . . . .	67
6.4	Делители на напон за еднонасочни и наизменични напони . . . . .	68
6.5	Делители на напон за импулсни напони . . . . .	69
6.6	Волтметри за мерење на максимални вредности . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Пробив во диелектрици</b>	<b>74</b>
7.1	Пробив во гасови . . . . .	75
7.1.1	Пробив во хомогено електрично поле . . . . .	75
7.1.2	Пробив во нехомогено електрично поле . . . . .	78
7.1.3	Волт-секундна карактеристика . . . . .	81
7.2	Пробив во течни диелектрици . . . . .	83
7.3	Пробив во цврсти диелектрици . . . . .	84
<b>8</b>	<b>Старење на изолацијата</b>	<b>86</b>
8.1	Електрично стареење на изолацијата . . . . .	86
8.2	Топлинско стареење на изолацијата . . . . .	87
8.3	Механичко стареење на изолацијата . . . . .	91
<b>9</b>	<b>Изолациони конструкции</b>	<b>92</b>
9.1	Надворешна изолација . . . . .	92
9.1.1	Пробив по површината на цврст диелектрик . . . . .	92
9.1.2	Изолатори кај надземните водови . . . . .	95
9.1.3	Потпорни изолатори кај разводните постројки . . . . .	101
9.1.4	Воведни изолатори . . . . .	103
9.2	Внатрешна изолација . . . . .	107
9.2.1	Изолација на енергетски кабли . . . . .	107
9.2.2	Изолација на енергетски трансформатори . . . . .	111
9.2.3	Изолација на вртливи електрични машини . . . . .	117
<b>10</b>	<b>Методи за испитување на изолацијата – профилактика на изолацијата</b>	<b>121</b>
10.1	Недеструктивни методи за контрола на изолацијата . . . . .	122
10.1.1	Појави кои се користат за недеструктивни методи за контрола на изолацијата . . . . .	122
10.1.2	Контрола според аголот на диелектрични загуби . . . . .	122
10.1.3	Контрола според повратниот напон . . . . .	129
10.1.4	Контрола според отпорот на изолацијата . . . . .	136
10.1.5	Контрола според парцијалните празнења . . . . .	141
10.2	Испитување на изолацијата со зголемен напон . . . . .	145
10.2.1	Испитување со импулсен напон . . . . .	146
10.2.2	Испитување со наизменичен напон . . . . .	146
10.2.3	Испитување со еднонасочен напон . . . . .	146
10.2.4	Крива на струјата на одведување . . . . .	148
10.2.5	Влажност на изолацијата на генераторите . . . . .	149
<b>11</b>	<b>Недеструктивни неелектрични методи за контрола на изолацијата</b>	<b>150</b>
11.1	Физичко-хемишка анализа на маслото . . . . .	150
11.2	Анализа на гасовите кои се содржат во маслото . . . . .	150

# 1

## ВОВЕД

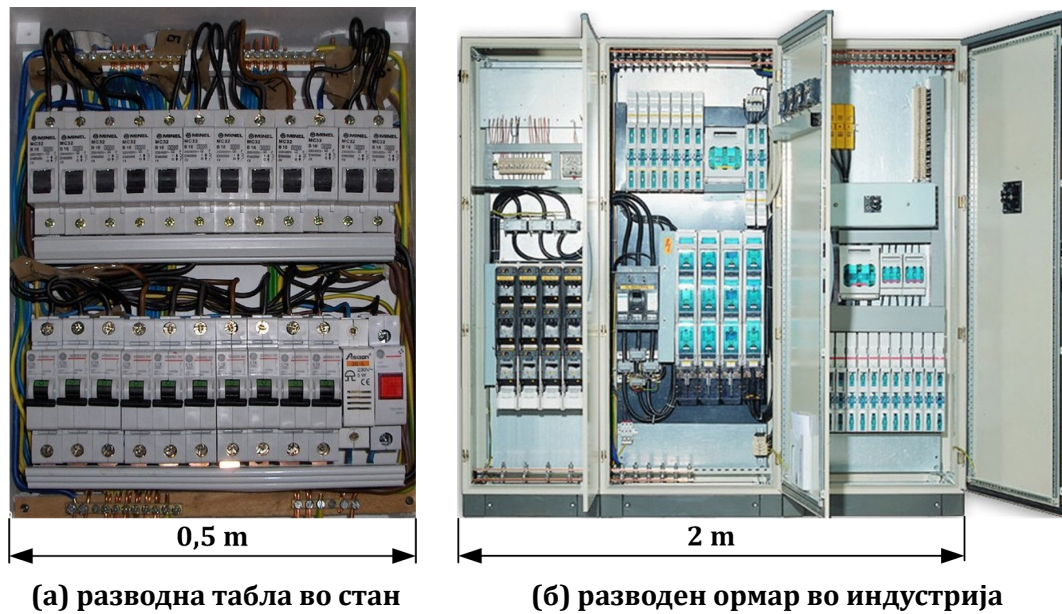
Вообичаено електроенергетските мрежи и опрема се делат на нисконапонски и високонапонски при што граница е вредноста на напон од 1 kV.

Нисконапонската опрема е присутна насекаде и е на дофат на луѓето во секојдневниот живот и затоа големо внимание се посветува на опасноста од дејството на електричната струја на човекот. Во нисконапонските инсталации постои цела област за тоа наречена заштита од индиректен напон на допир. Секако дека се води сметка и за директен напон на допир но за да се случи такво нешто потребно е да се оствари физички допир со опремата или инсталацијата. За разлика од тоа, кај високонапонската опрема струен удар е можен и без физички допир, затоа што јачината на електричното поле е толку голема што може да настане електрично празнење во воздухот на одредено растојание. Затоа кај високонапонската опрема големо внимание се посветува на минимално дозволените растојанија меѓу деловите под напон и заземјените делови. За илустрација на димензиите на сликите 1.1 и 1.2 прикажани се нисконапонски разводни табли/ормари и високонапонски трафостаници. Воочлива е разликата во димензиите кои кај нисконапонските уреди е од редот на сантиметри или метри, додека кај високонапонските таа е десетици, дури и стотици метри.

Суштинска разлика меѓу нисконапонската и високонапонската опрема во поглед на изолацијата е принципот според кој таа е направена. Кај нисконапонската опрема изолацијата е димензионирана главно водејќи се од принципи на нејзина механична издржливост додека во поглед на електричните својства таа треба само да не дозволи допирање на делови под напон (растојанијата се од редот на милиметри). Кај таквата опрема практично воопшто не се разгледува можноста од пробив поради повишен напон, затоа што изолацијата од механички причини е направена толку дебела што може да издржи и десеткратно повисок напон од номиналниот. Кај високонапонската опрема за изолација во прв ред се води сметка за опасноста од пробив поради пренапони, како и за најмалите растојанија кои треба да се одржуваат меѓу деловите под напон.

Основна задача на техниката на висок напон е обезбедување на електрична изолација на спроводниците и елементите на апаратите кои се наоѓаат под висок напон. Изолацијата е суштински дел од конструкцијата на уредите за висок напон и обично покрај изолационните задачи исполнува и други функции како што се пренесување на механички сили од еден до друг дел на уредот, одведување на топлина и херметизација на уредот од влијанија на надворешната средина.

Изолацијата на електричните уреди се дели на надворешна и внатрешна. Во



Слика 1.1. Нисконапонски развод



Слика 1.2. Дел од трафостаница за напон од 110 kV

надворешната изолација спаѓаат воздушните меѓурастојанија помеѓу деловите под напон и делови од изолационите конструкции кои имаат допир со воздухот. Внатрешната изолација се наоѓа во кукиштата на трансформаторите или други апарати, во обвивката на спроводниците на каблите и друго. Таа се состои од комбинација на различни течни, цврсти и гасни диелектрици.

Под влијание на големите напрегања во електричното поле, кои може да се појава во процесот на експлоатација, можно е делумно или целосно губење на диелектричните својства на изолацијата – пробив на изолацијата. Карактерот на оштетувањето изолацијата и последиците од него се различни за надворешната и внатрешната изолација.

Основна особина на надворешната (воздушната) изолација е зависноста на нејзината цврстина од атмосферските услови: притисок, температура и влажност на воздухот. На електричната цврстина на изолаторите на надворешни постројки значително влијание имаат и нечистотиите на нивната површина и врнежите од дожд и снег.

Електричната цврстина на внатрешната изолација практично не зависи од

атмосферските услови. Нејзина главна особина е стареењето, т.е. влошувањето на електричните карактеристики во процесот на експлоатација. Во неа се појавуваат парцијални празнења во гасни шуплини кои се последица на промената на температурниот работен режим поради промената на оптовареноста на уредот во кој е поставена изолацијата. На острите рабови на електродите, на потпорните делови на апаратите се појавува коронско празнење. Под дејството на двата вида на празнења доаѓа до разрушување на изолацијата и таа се загадува со продукти од нејзиното распаѓање.

Поради диелектричните загуби во изолацијата доаѓа до нејзино загревање. При отежнато одведување на топлина, што е карактеристично за изолација со поголема дебелина, прекумерното загревање може да доведе до топлински пробив на изолацијата.

Воздушната (надворешната) изолација по пробивот во потполност се самообновува веднаш штом се намали напонот или се изгаси електричниот лак на местото на пробивот.

Пробивот во цврстата и комбинираната изолација е неповратна појава која доведува до испад од погон на одредена високонапонска опрема (кабел, трансформатор, мотор, генератор, кондензатор и друго). Течната и внатрешната гасна изолација се самообновуваат, меѓутоа пробивот доведува до влошување на нејзините карактеристики. Поради тоа состојбата на внатрешната изолација во текот на експлоатацијата повремено се контролира за да се откријат процесите кои би предизвикале дефекти и да се превенира хавариски отказ на високонапонската опрема.

Изолацијата на електричните уреди постојано се наоѓа под дејство на работниот напон. Во процесот на експлоатација можни се и покачувања на напонот над номиналниот работен напон кои се нарекуваат внатрешни пренапони. Нивни извори се нормални или хавариски комутации на расклопните уреди при што настануваат осцилаторни процеси со повисоки напони, а исто така причина може да бидат и резонантните појави во системот. Покрај внатрешните пренапони на изолацијата можат да делуваат и атмосферски пренапони кои се појавуваат поради удар на гром во електрични постројки или во нивна непосредна близина.

Надземните водови поради големата должина доста често се изложени на удар на гром. При тоа врз изолацијата на водовите делуваат прилично високи напони коишто таа не може да ги издржи и настанува пробив во воздухот по должината на изолаторскиот ланец кој потоа преминува во електричен лак чие горење е поддржано и изворите во системот. Кај среднонапонските надземи водови често пати како начин за гаснење на електричниот лак се поставува реактори (тнр. Петерсенови калемии) помеѓу неутралните точки на трансформаторите и земјата. Поради појавата на антирезонанција во колото составено од реакторите и капацитетите на надземните водови доаѓа до намалување на струјата на електричниот лак, а со тоа и до негово гаснење. Во високонапонските мрежи, со напон од 110 kV и повисок, неутралните точки на трансформаторите се директно заземјени поради што во тој случај гаснењето на електричниот лак може да се изведе само со примена на автоматско повторно вклучување (АПВ).<sup>1</sup> Меѓутоа

---

<sup>1</sup>Автоматското повторно вклучување (АПВ) делува на таков начин што во случај на еднофазна куса врска на надземен вод тоа го исклучува водот на двата краја (или само фазата на која што настанала кусата врска), потоа прави кратка безнапонска пауза за време на која доаѓа до гаснење на електричниот лак и на крајот водот повторно го вклучува во погон на двата негови краја.

примената на АПВ не е секогаш успешна и затоа како дополнителна мерка за намалување на бројот на испади на надземните водови се ставаат заштитни јажиња кои имаат задача најголем дел од ударите на гром преку столбовите да ги спроведат во земја без да се појават пренапони на изолацијата.

Покрај нарушувањето на изолацијата на надземните водови ударите на гром предизвикуваат и распростирање на импулси на висок напон по фазните спроводници на водовите. Ваквите патувачки импулси можат да продрат во трафостаниците и да имаат негативно дејство врз опремата во нив.

Двата вида на пренапони, внатрешните и атмосферските, имаат статистички карактер што значи дека во два настани од ист карактер (комутација на расклопни уреди или удар на гром) нема да се добијат исти вредности на пренапоните. Во привот случај тоа е така затоа што моментот и местото каде што се прави комутацијата се случајни величини, додека во вториот случај случајна величина е големината на струјата на громот.

Ограничувањето на пренапоните се прави со помош на заштитни уреди коишто се нарекуваат одводници на пренапони. Взаемната усогласеност на големината на пренапоните, карактеристиките на заштитните уреди (одводници) и електричните карактеристики на изолацијата обезбедува доверлива работа при најмали трошоци. Усогласувањето на наведените величини заедно со водењето сметка за економичноста при прокетрирањето на постројките се нарекува координација на изолацијата.

Во натамошниот текст ќе ги разгледуваме претходно наведените проблеми од областа на техниката на висок напон. Посебно ќе се задржиме на електричните карактеристики на надворешната и внатрешната изолација, експлоатација на изолацијата при работни напони и при пренапони од комутационо и атмосферско потекло. Ќе бидат наведени карактеристични конструкции на изолации за различни видови високонапонска опрема за надворешна и внатрешна употреба. Освен тоа посебен осврт ќе биде даден на методите за испитување на изолацијата со различни испитни напони, при што ќе стане збор и за добивањето на високи напони за таа цел како и за методите за нивно мерење.



# 2

## ДИЕЛЕКТРИЦИ

### 2.1 Диелектрици во електрично поле

Во диелектричните материјали, односно изолаторите, спаѓаат цела низа на цврсти, течни и гасовити материјали кои за разлика од спроводниците немаат голем број на слободни електрони. Елементарните електрични полнежи кои постојат во диелектриците се врзани со внатрешни атомски и молекуларни сили така што тие под дејство на надворешно електрично поле можат да се поместуваат само на микроскопски кратки растојанија. Тие можат да ги напуштат матичните атоми или молекули само во случај на полиња со многу голема јачина.

Поместувањето на полнежите при поларизацијата е еластично што значи дека по престанокот на дејството на електричното поле полнежите се враќаат во првобитната положба. Поместувањето на полнежите се манифестира со течење на поларизациона струја која што има капацитивен карактер. Оваа струја постои постојано ако е приклучен наизменичен напон, а за еднонасочен напон постои само кратко време при вклучување на кондензаторот под напон додека се изврши поларизацијата.

Тука ќе ги разгледуваме диелектриците само од аспект на макроскопските електрични полиња, бидејќи проучувањето на нивното однесување на микроскопско ниво спаѓа во доменот на атомска физика и тоа не е од интерес на инженерските проблеми во областа на техниката на висок напон.

Макроскопските ефекти од поставувањето на диелектрици во електрично поле се согледани многу одамна, уште од времето на Фарадеј, кога експериментално е откриено дека капацитетот на еден кондензатор се менува ако во просторот помеѓу неговите електроди се постави диелектрик. При тоа, капацитетот се зголемува пропорционално со капацитетот на истиот кондензатор во случајот кога помеѓу неговите електроди имало вакуум (воздух). Секој диелектрик се карактеризира со релативна диелектрична константа  $\epsilon_r$  која е дефинирана на следниот начин

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (2.1)$$

каде што  $C_0$  е капацитет на кондензаторот кога помеѓу неговите електроди има вакуум, а  $C$  е капацитет на кондензаторот кога просторот помеѓу неговите електроди е исполнет со диелектрик.

Релативната диелектрична константа  $\epsilon_r$  е поголема од 1 за сите видови изолациони материјали, додека за воздухот е приближно иста како за вакуумот и

изнесува  $\varepsilon_r = 1,0006$ . Нејзината вредност за дестилирана вода е 81, додека за разни видови материјали вредностите може да се видат во табелата 2.1.

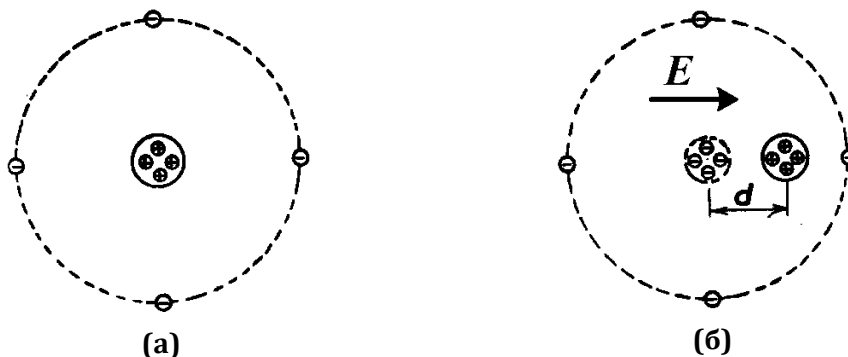
**Табела 2.1. Релативна диелектрична константа  $\varepsilon_r$  за разни материјали**

Материјал	$\varepsilon_r$	Материјал	$\varepsilon_r$
бакелит	3,5 – 8,2	плексиглас	2,6 – 3,4
дрво	2,5 – 6,5	порцелан	4,6 – 6
калит	6 – 6,5	прешпан	2,5 – 3,4
кварц	4,3 – 4,7	стакло	2 – 16
мраз	2 – 3	стеатит	6,4
лискун	4 – 8	стирофлекс	2,5
миканит	4 – 6	шелак	2,7 – 3,8
хартија (сува)	1,8 – 2,6	тефлон	2,1
парафин	1,7 – 2,3	трансформаторско масло	2,2 – 2,5
пертинакс	4,8 – 5,4		

Кога еден диелектрик ќе се внесе во електрично поле неговите елементарни наелектризирани честички ќе се поместат под дејство на полето. При тоа позитивните честички ќе се поместат во правец на полето, а негативните обратно од правецот на полето. Процесот на поместување на елементарните полнежи во диелектрикот се нарекува поларизација на диелектрикот. Со помош на појавата на поларизација на диелектриците може да се објасни зошто капацитетот на даден кондензатор се зголемува кога помеѓу неговите електроди ќе се стави диелектрик.

Иако макроскопскиот ефект на поларизацијата е ист за сите диелектрици разликуваме два основни типа на диелектрици во поглед на нивната молекуларна структура: *неполарни* и *поларни* диелектрици.

Во отсуство на електрично поле неполарните диелектрици се електрично неутрални во однос на својата околина. Таквата состојба е прикажана на сликата 2.1а каде што е даден еден атом кој во центарот е позитивно наелектризиран со количество електрицитет со вредност  $+q$ , а по неговата периферија кружат негативно наелектризирани електрони чиешто вкупно количество електрицитет изнесува  $-q$ .



**Слика 2.1. Формирање на дипол кај неполарен диелектрик**

Кога неутралниот атом од неполарниот диелектрик ќе се најде во електрично поле со јачина  $E$  тогаш доаѓа до изместување на центрите на полнежите  $+q$  и  $-q$  на

растојание  $d$  (слика 2.1б) со што се формира дипол<sup>1</sup> со диполен момент

$$\vec{p} = q \cdot \vec{d}$$

којшто е вектор насочен од негативниот кон позитивниот полнеж, т.е. диполниот момент е насочен во насока на електричното поле.

Макроскопската величина со која што се карактеризира состојбата на поларизација кај еден диелектрик е векторот на поларизација кој е дефиниран како средна вредност од диполните моменти во одреден мал волумен  $\Delta V$  од диелектрикот

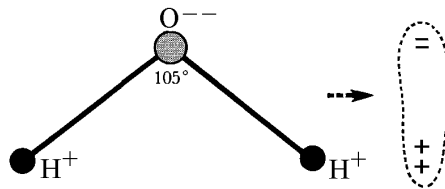
$$\vec{P} = \frac{\sum \Delta V \vec{p}}{\Delta V} = \frac{\sum \Delta V q \cdot \vec{d}}{\Delta V} \quad (2.2)$$

Векторот на поларизација е пропорционален на јачината на електричното поле и физички има природа на површинска густина на наелектризирање така што неговата мерна единица е  $C/m^2$ . За него важи следната релација

$$\vec{P} = \alpha \cdot \vec{E} = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E} \quad (2.3)$$

каде што  $\alpha$  е коефициент на поларизација на диелектрикот кој е производ од  $\epsilon_0$  и бездимензионален број  $\chi$  кој се нарекува електрична сусцептибилност на диелектрикот.

Кај поларните диелектрици молекулите имаат диполен момент различен од нула дури и кога не постои надворешно електрично поле. Карактеристичен пример за поларен диелектрик е даден на сликата 2.3 каде што се гледа дека центрите на позитивните и негативните полнежи се изместени така што тие природно формираат дипол.



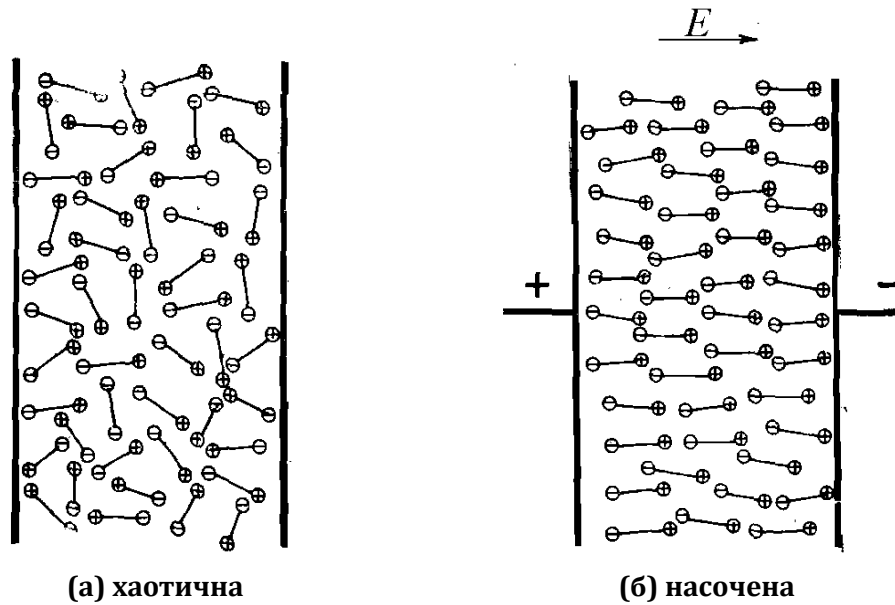
Слика 2.2. Дипол кај поларен диелектрик (молекула на вода)

Поради интензивното термично движење на молекулите на поларните диполи тие во просторот се распоредени хаотично така што поголема група на молекули во однос на околината се однесува неутрално (слика 2.3а). Меѓутоа кога диелектрик со поларни молекули ќе се најде во електрично поле (слика 2.3б) диполите тежнеат со своите оски да се постават во насока на полето во што делумно успеваат (целосното насочување во правец на полето е оневозожено од термичкото движење) и на таков начин векторот на поларизација станува различен од нула.

За да ги разгледаме последиците од поларизацијата на диелектрикот ќе разгледаме наједноставен случај на плочест кондензатор (слика 2.4) чии плочи се наелектризиран со површинска густина на електрицитет  $+\sigma$  и  $-\sigma$  и се поставени на растојание  $d$ . Во тој случај, со примена на Гаусовиот закон, лесно може да се покаже дека јачината на електричното поле во просторот помеѓу плочите изнесува

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

<sup>1</sup>Дипол претставува систем од два електрични полнежи со еднакви количества електрицитет но спротивни по знак кои се наоѓаат на одредено растојание  $d$ .



Слика 2.3. Ориентација на диполи кај поларен диелектрик

каде што  $\varepsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi) = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m е диелектрична константа на вакуумот.



Слика 2.4. Плочест кондензатор без диелектрик

Откако кондензаторот од сликата 2.4 ќе се наполни изворот на напон со вредност  $U$  се исклучува. На тој начин количеството електрицитет на неговите плочи останува константно ( $+\sigma$  и  $-\sigma$ ). Според дефиницијата за капацитет на кондензатор

$$C = \frac{Q}{U}$$

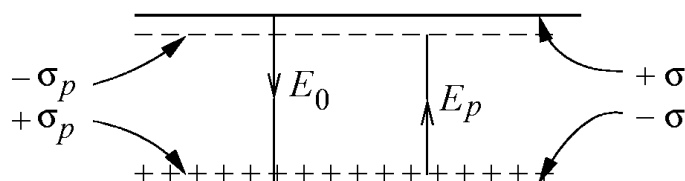
и користејќи го изразот (2.4) можеме да го пресметаме неговиот капацитет на следниот начин

$$C_0 = \frac{\sigma S}{E_0 d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \quad (2.5)$$

каде што  $S$  е површина на плочите на кондензаторот.

Потоа помеѓу плочите вметнуваме диелектрик чии диполи ќе се ориентираат во правец на електричното поле (слика 2.3б) при што во средината помеѓу плочите влијанието на позитивните и негативните полнежи од диполите ќе се поништи и ќе остане само по еден тенок површински наелектризиран слој веднаш до плочите на кондензаторот (2.5).

Површинската густина на електрицитетот којшто се појавува поради процесот на поларизација е означена со  $\sigma_p$  и таа е еднаква на вредноста на векторот на поларизација, т.е.  $\sigma_p = P$ .



Слика 2.5. Плочест кондензатор со диелектрик

Знакот на  $\sigma_p$  е обратен од знакот на слободниот електрицитет  $\sigma$ . Според тоа електрицитетот од поларизацијата на диелектрикот ќе создаде електрично поле со јачина

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_0}$$

коешто е насочено во спротивна насока од полето  $E_0$ .

Вкупното електрично поле изнесува

$$E = E_0 - E_p = \frac{\sigma - \sigma_p}{\epsilon_0} = \frac{\sigma - P}{\epsilon_0} = \frac{\sigma - \epsilon_0 \chi E}{\epsilon_0}$$

од каде што следува

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 + \epsilon_0 \chi} = \frac{\sigma}{\epsilon_0(1 + \chi)} = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.6)$$

при што со  $\epsilon_r = 1 + \chi$  е означена релативната диелектрична константа.

Од последниот израз следува дека јачината на електричното поле при вметнат диелектрик помеѓу плочите на кондензаторот  $\epsilon_r$  пати помала од јачината на полето  $E_0$ .

Капацитетот на кондензаторот изнесува

$$C = \frac{\sigma S}{Ed} = \frac{\sigma S}{\frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = \epsilon_r \cdot C_0 \quad (2.7)$$

што значи дека тој е поголем за  $\epsilon_r$  пати од  $C_0$  како што веќе беше наведено на почетокот на ова поглавје. Со тоа е објаснет начинот на кој еден диелектрик поставен помеѓу електродите на кондензатор го зголемува неговиот капацитет.

Ако електродите на кондензаторот при вметнувањето на диелектрик помеѓу неговите плочи се поврзани на константен извор на напон  $U$  на сличен начин може да се покаже дека тогаш количеството електрицитет  $Q$ , а со тоа и  $\sigma$  ќе се зголемат  $\epsilon_r$  пати што повторно како последица ќе имаат зголемување на капацитетот на кондензаторот за ист фактор.

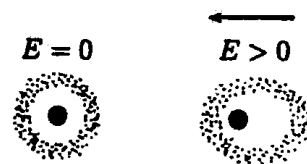
## 2.2 Видови на поларизација во диелектриците

Постојат два основни вида на поларизација во диелектриците кои се разликуваат според тоа дали во процесот на поларизација настануваат загуби на енергија или не:

- Поларизација која настанува моментално, целосно еластично и без загуба на енергија. Во овој вид спаѓаат електронската и јонската поларизација.

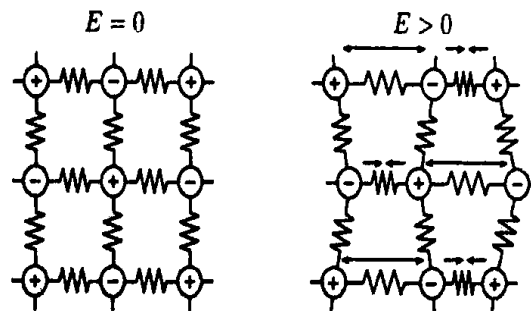
- Поларизација која настанува и се губи постепено, при што двата во циклусот на поларизација и деполаризација настануваат загуби на енергија и доаѓа до загревање на диелектрикот. Овој втор вид поларизација со општо име се вика релаксациона поларизација или ориентациона поларизација затоа што во тој случај доаѓа до ориентација на диполите во правец на електричното поле. Во овој вид спаѓаат диполната, јонско-релаксационата, електронско-релаксационата и миграционата поларизација.

Електронската поларизација е еластично поместување (деформација) на електронските орбити во однос на јадрата, поради што таа уште се нарекува и деформациона. Под дејство на надворешното поле електронската поларизација настанува скоро моментално и тоа за време од  $10^{-15}$  до  $10^{-14}$  секунди. Електронската поларизација постои кај сите диелектрици (поларни и неполарни), без разлика дали кај нив постојат и други видови поларизација.



Слика 2.6. Електронска поларизација

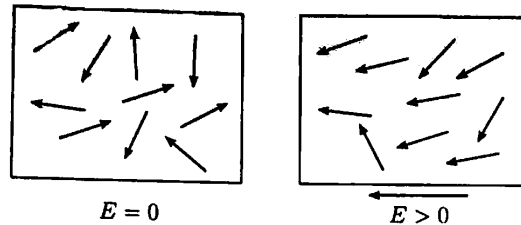
Јонската поларизација се појавува кај диелектриците со кристална решетка во чии агли се наоѓаат јони. Под дејство на електричното поле доаѓа до поместување на јоните и деформација на кристалната решетка. Јонската поларизација е поспора од електронската поларизација и таа се завршува за време од  $10^{-13}$  секунди. Со зголемување на температурата доаѓа до оддалечување на јоните во кристалната решетка со што еластичните сили меѓу нив ослабуваат, а со тоа расте поларизацијата и диелектричната константа  $\epsilon_r$ .



Слика 2.7. Јонска поларизација

Диполна поларизација, која што се појавува кај поларните диелектрици, претставува вртење (ориентација) на диполните молекули и затоа се вика ориентациона поларизација. Насоката на поединечните диполи во отсуство на електрично поле поради топлинските движења е во различни правци. Но под дејство на електричното поле се појавува момент кој има стремеж да ги насочи сите диполи во иста насока. На тој процес се спротивставуваат меѓумолекуларните сили, како и топлинското движење на молекулите така што насочувањето во правец на полето не е комплетно. Бројот на ориентираните диполи

се зголемува со зголемување на јачината на електричното поле и со намлување на температурата. За воспоставување на оваа поларизација е потребно подолго време, околу  $10^{-9}$  секунди и затоа се нарекува спора или релаксациона поларизација. Ориентационата поларизација е секогаш придружена со диелектрични губитоци кои се манифестираат со претворање на електричната енергија во топлина.



Слика 2.8. Ориентациона поларизација

Во диелектриците можат да се појават сите претходно наведени поларизации во зависност од структурата на материјалот од којшто се направени. Според тоа кој вид на поларизација доминира можеме ориентационо да ги процениме нивните карактеристики: релативна диелектрична константа  $\epsilon_r$  и специфичната електрична отпорност  $\rho$  (табела 2.2).

Табела 2.2. Карактеристики на диелектриците според видот на поларизација

Вид на поларизација	$\epsilon_r$	$\rho(\Omega m)$
Електронска	под 3	над $10^{14}$
Јонска	под 10	$10^{10} \div 10^{14}$
Ориентациона	над 10	$10^6 \div 10^{10}$

## 2.3 Примери на електрично поле во диелектрици

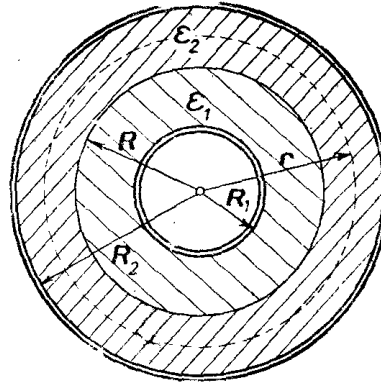
### 2.3.1 Коаксијален кабел со двослоен диелектрик

Разгледуваме цилиндричен коаксијален кабел со внатрешен радиус  $R_1$  и надворешен радиус  $R_2$ . Средината меѓу нив е исполнета со два диелектрика со диелектрични константи  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , при што граничната површина помеѓу диелектриците е на радиусот  $R$  (слика 2.9). Бидејќи линиите на полето се нормални на граничната површина следува дека векторот на електрична индукција во двете средини ќе биде еднаков  $D_1 = D_2 = D$ . Ако претпоставиме дека внатрешниот спроводник е наелектризиран со подолжно количество електрицитет  $q'$  тогаш со примена на Гаусовиот закон лесно може да се добие следниот израз за зависност на интензитетот на векторот  $D$  од растојанието  $r$

$$D = \frac{q'}{2\pi r}$$

Јачината на електричното поле во двете средини изнесува

$$E_1 = \frac{D}{\epsilon_1} = \frac{q'}{2\pi\epsilon_1 r} \quad \text{и} \quad E_2 = \frac{D}{\epsilon_2} = \frac{q'}{2\pi\epsilon_2 r} \quad (2.8)$$



Слика 2.9. Коаксијален кабел со двослоен диелектрик

Напонот помеѓу електродите на кондензаторот е даден со помош на следниот интеграл

$$U = \int_{R_1}^R E_1 dr + \int_R^{R_2} E_2 dr = \frac{q'}{2\pi} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{R}{R_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R_2}{R} \right) \quad (2.9)$$

Користејќи ја релацијата (2.8) за да го изразиме  $q'$  преку  $E_1$  или  $E_2$ , а потоа направиме замена во (2.9) за јачината на електричното поле во двете средини при познат напон на електродите на кондензаторот добиваме

$$E_1 = \frac{U}{\varepsilon_1 r \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{R}{R_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R_2}{R} \right)}, \quad R_1 \leq r < R \quad (2.10)$$

$$E_2 = \frac{U}{\varepsilon_2 r \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{R}{R_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R_2}{R} \right)}, \quad R < r \leq R_2 \quad (2.11)$$

Доколку целата средина во кондензаторот е исполнета со еднороден диелектрик тогаш електричното поле ќе се менува според следната релација

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (2.12)$$

Од (2.10) и (2.11) може да се пресметаат најголемата (најмалата) јачина на електричното поле ако за  $r$  се стави најмалата (најголемата) можна вредност. Доколку сакаме во двата слоја од диелектрици да имаме иста вредност за максималната јачина на електричното поле ( $E_{1,\max} = E_{2,\max}$ ) и иста вредност за минималната јачина на електричното поле ( $E_{1,\min} = E_{2,\min}$ ) треба да бидат исполнети следните услови

$$\varepsilon_1 R_1 = \varepsilon_2 R \quad \text{и} \quad \varepsilon_1 R = \varepsilon_2 R_2 \quad (2.13)$$

од каде што следува

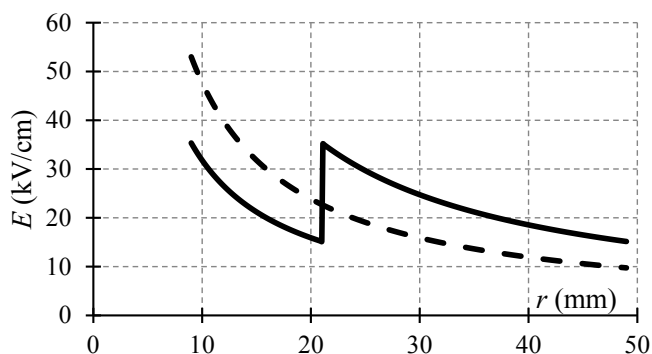
$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \quad \text{и} \quad R = \sqrt{R_1 R_2} \quad (2.14)$$

Во електроенергетските системи коаксијални кабли се всушност еднофазните кабли кои поставени по три формираат високонапонски кабелски вод. За



илустрација, ќе разгледаме еден кабел за 110 kV кој се состои од три еднофазни кабли за кои се познати следните податоци:  $R_1 = 9 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 49 \text{ mm}$  и  $\varepsilon_{1r} = 3$ . Од (2.14) пресметуваме  $\varepsilon_{2r} = 1,29$  и  $R = 21 \text{ mm}$ . Максималната вредност на напонот на којшто е изложена изолацијата изнесува  $U = 110/\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} = 89,8 \text{ kV}$ . Со овие податоци можеме да ја одредиме промената на јачината на електричното поле во кабелот која што е дадена на сликата 2.10. За споредба на истата слика е нацртана промената на полето кога кабелот би бил со еден диелектрик со  $\varepsilon_{2r} = 2$  (испрекинатата линија).

Од наведениот едноставен пример се гледа кое е значењето на примена на два диелектрика за изолација на еден кабел: се добива помала максимална вредност на јачината на електричното поле, а потоа и порамномерна оптовареност на целиот волумен на диелектриците. Размислувајќи на сличен начин како наведениот може да се решат и други варијанти на проблемот во коишто ќе бидат зададени диелектричните константи на диелектриците, а ќе треба да се одредат нивните радиуси и тоа дури и користејќи други критериуми како што е на пример еднаквост на средната вредност на полето во двата диелектрика.



Слика 2.10. Електрично поле во коаксијален кабел со двослоен диелектрик

### 2.3.2 Плочест кондензатор со двослоен диелектрик

На сликата 2.11 е прикажан плочест кондензатор каде просторот помеѓу електродите е исполнет со два слоја различни диелектрици чијашто разделна површина е паралелна со плочите на кондензаторот. Диелектриците имаат ширини означени со  $d_1$  и  $d_2$ , додека нивните диелектрични константи се  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Напонот помеѓу плочите на кондензаторот изнесува  $U$ .

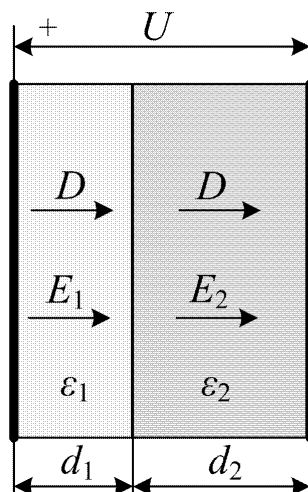
Бидејќи линиите на полето се нормални на граничната површина следува дека векторот на електрична индукција во двете средини ќе биде еднаков  $D_1 = D_2 = D$ , додека јачините на електричните полиња во двете средини се

$$E_1 = \frac{D}{\varepsilon_1} \quad \text{и} \quad E_2 = \frac{D}{\varepsilon_2}$$

така што, познавајќи го напонот на кондензаторот, можеме да напишеме

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2 = D \left( \frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right)$$

од каде што следува



Слика 2.11. Плочест кондензатор со двослоен диелектрик

$$D = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 U}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2}$$

Конечно за вредностите на јачината на електричното поле во двата диелектрика можеме да напишеме

$$E_1 = \frac{\varepsilon_2 U}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2} \quad (2.15)$$

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 U}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2} \quad (2.16)$$

Од релациите (2.15) и (2.16) можат да се извлече заклучок кој е од практично значење за техниката на висок напон. Бидејќи именителот е ист во двата случаја ако  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$  тогаш ќе биде  $E_1 > E_2$ , односно појако електрично поле ќе има во диелектрикот со помала диелектрична константа. Што е уште поважно, ако во кондензаторот се додаде диелектрик со поголема диелектрична константа тогаш во диелектрикот со помала диелектрична константа јачината на електричното поле ќе се зголеми, а со тоа ќе се зголеми и опасноста од пробој на изолацијата. Наведениот заклучок ќе го илустрираме со едноставен пример.

**Пример 2.1.** Нека имаме плочест кондензатор со растојание помеѓу плочите од 8 mm во кој како диелектрик се користи трансформаторско масло со  $\varepsilon_r = 2,2$  чија што максимална дозволена јачина на електричното поле изнесува 25 kV/mm. Бидејќи полето е хомогено јасно е дека таквиот кондензатор ќе може да издржи напон од 25 kV/mm · 8 mm = 200 kV. Понатаму, во просторот меѓу плочите додаваме друг диелектрик (трансформаторски картон) којшто има максимална дозволена јачина на електричното поле изнесува 50 kV/mm и дебелина од 2 mm. Така што сега имаме плочест кондензатор со двослоен диелектрик со следните параметри

$$\begin{aligned} E_{1,\max} &= 25 \text{ kV/mm} & \varepsilon_{1r} &= 2,2 & d_1 &= 6 \text{ mm} \\ E_{2,\max} &= 50 \text{ kV/mm} & \varepsilon_{2r} &= 4,4 & d_2 &= 2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Да се одреди колкав напон ќе може да издржи кондензаторот со двослоен диелектрик.

### Решение

Од (2.15) можеме да го одредиме напонот на кондензаторот при кој јачината на електричното поле во првиот диелектрик ќе изнесува 25 kV/mm

$$25 = \frac{4,4 \cdot U}{4,4 \cdot 6 + 2,2 \cdot 2} \Rightarrow U = \frac{30,8 \cdot 25}{4,4} = 175 \text{ kV}$$

што е помалку од 200 kV колку што можеше да поднесе кондензаторот во случајот кога просторот меѓу неговите плочи беше исполнет само со трансформаторско масло. Доколку на ваквиот кондензатор приложиме напон од 200 kV тогаш јачината на електричното поле во првиот диелектрик ќе биде

$$E_1 = \frac{4,4 \cdot 200}{4,4 \cdot 6 + 2,2 \cdot 2} = 28,6 \text{ kV/mm} > 25 \text{ kV/mm}$$

што е повеќе од неговата диелектрична цврстина и веројатноста дека во него ќе настане пробив е голема. Истовремено, јачината на полето во вториот диелектрик е

$$E_2 = \frac{2,2 \cdot 200}{4,4 \cdot 6 + 2,2 \cdot 2} = 14,3 \text{ kV/mm} \ll 50 \text{ kV/mm}$$

од каде се гледа дека тој е многу слабо оптоварен во однос на својата диелектрична цврстина. Поради тоа, кога е потребно да се направи изолација од повеќе слоеви од различни диелектрични материјали треба да се внимава тие да имаа диелектрични константи кои малку се разликуваат.

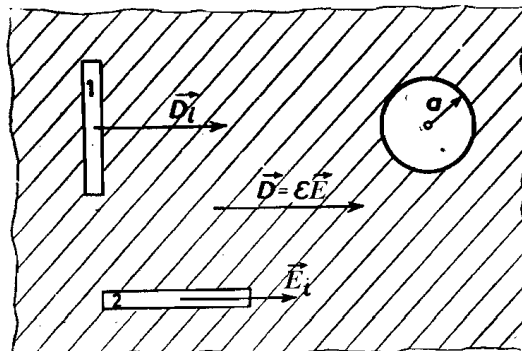
□ □ □

### 2.3.3 Диелектрик со шуплини

Даден е диелектрик со диелектрична константа  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$  во кој јачината на електричното поле изнесува  $E$ , а векторот на електрична индукција е  $D$ . врската помеѓу нив е дадена со

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_r \varepsilon_0 E$$

Ќе разгледаме три примери со шуплини во него кои се исполнети со воздух, што значи дека нивната диелектрична константа е  $\varepsilon_0$ . Целта е да ја пресметаме јачината на електричното поле во шуплините која ќе ја означиме со  $E_i$  (слика 2.12).



Слика 2.12. Диелектрик со шуплини

Прво ќе разгледаме случај во кој шуплината е во форма на цилиндер (означен со 1) чишто основи се нормални на правецот на електричното поле. Висината

на цилиндерот е многу помала од радиусот на неговите основи. Кога висината на цилиндерот е многу мала во однос на радиусот на основата, векторот на електрична индукција  $D_i$  во внатрешноста на шуплината според граничниот услов за нормални вектори на границата помеѓу два диелектрика е  $D_i = D$ . Од тука следува дека јачината на електричното поле во шуплината ќе биде

$$E_i = \frac{D_i}{\varepsilon_0} = \frac{D}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 E}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r E$$

што значи дека електричното поле во шуплината е  $\varepsilon_r$  пати појако во воздушната шуплина. Полето е практично хомогено во целата шуплина освен во непосредна близина на обвивката на цилиндерот.

Како втор пример разгледуваме издолжена цилиндрична шуплина (означена со 2) чија оска е паралелна со електричното поле. Во овој случај висината (должината) на цилиндерот е многу поголема од радиусот на неговите основи. Сега на граничната површина помеѓу двата диелектрика векторите на полето се тангенцијални така што следува

$$E_i = E$$

при што полето е хомогено во целата шуплина освен во непосредна близина на основите на цилиндерот.

Во третиот случај разгледуваме сферна шуплина со радиус  $a$  во која јачината на полето, без да навлегуваме во деталите како е пресметана, изнесува

$$E_i = \left(1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{3}\right) E$$

од каде се гледа дека тоа е повторно појако отколку полето во околниот диелектрик.

Од наведените случаи можеме да констатираме дека во зависност од тоа како се поставени шуплините во однос на електричното поле во најдобар случај полето во нив ќе биде еднакво со полето во околниот диелектрик, а во најлош случај ќе биде  $\varepsilon_r$  пати појако. Често пати се случува полето во воздушните шуплини да биде толку јако што ќе предизвика искрење во нив кое е познато под името парцијални празнења. Тие се со мал интензитет, но доколку долготрајно делуваат врз околниот диелектрик постепено ќе предизвикаат негово оштетување кое по одредено време може да премни во целосен пробив и уништување на диелектрикот.

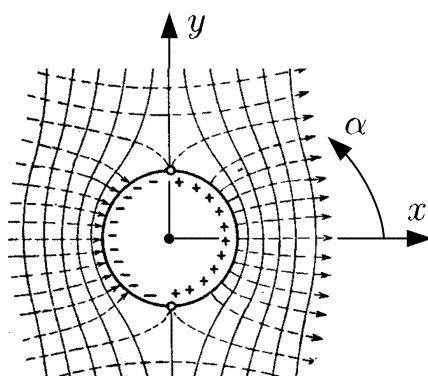
### 2.3.4 Спроводна сфера во хомогено електрично поле

На крајот ќе разгледаме случај каде што во хомогено електрично поле со јачина  $E_0$  се вметнува спроводна сфера. Нејзиното присуство ќе ја расипе хомогеноста на полето со што тоа ќе добие изглед како на сликата 2.13. За различни вредности на аголот  $\alpha$ , означен на сликата, јачината на електричното поле на површината на сферата ќе биде

$$E = 3E_0 \cos \alpha$$

од каде што следува дека електричното поле на површината на сферата на пресекот со  $x$  оската ( $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 180^\circ$ ) ќе биде 3 пати посилено во споредба со случајот кога сферата не била присутна.

Интересно е да се забележи дека еквипотенцијалната линија која се протега по  $y$  оската останува непроменета без разлика на присуството на сферата. Другите



Слика 2.13. Спроводна сфера во електрично поле

еквипотенцијални линии силно се искривуваат и се згуснуваат во близина на  $x$  оската. Оваа појава може да има и практична примена во следната смисла: 1) ако имаме рамна метална плоча со одредени нерамнини тогаш ако сметаме дека тие се мали сфери електричното поле на местото со нерамнини ќе биде 3 пати посилено – што значи дека во висконапонските уреди треба да се избегнуваат нерамнини и зашилени делови, 2) вметнување на метални приклучоци во изолацијата на висконапонските уреди (што е неизбежно) ќе доведе до засилување на електричното поле околу нив што може да предизвика пробив во изолацијата за што треба да се води сметка.

## 2.4 Електрична спроводливост на диелектриците

Електричната спроводливост на диелектриците е зависна од движењето на слободните јони кои се формираат при дисоцијација на смесите или од движење на подвижните колоидни честички (во течностите).

Со порастот на температурата расте подвижноста на наелектризираните честички, а со тоа се зголемува и електричната спроводливост. Зависноста на електричната спроводливост  $\sigma$  од температурата  $\theta$  за поголем број диелектрици во релативно мал интервал на температури е дадена со следниот израз

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\alpha \cdot (\theta - \theta_0)} \quad (2.17)$$

каде што  $\theta_0$  е температура при која електричната спроводливост изнесува  $\gamma = \gamma_0$ .

Колку што повеќе нечистотији има во изолацијата, толку е поголема електричната спроводливост, а помала електричната цврстина. Поради тоа, спроводливоста и нејзината реципрочна величина отпорноста на изолацијата  $R$ , може да послужат како индиректни показатели за степенот на нечистотија, а според тоа и за општата состојба на изолацијата.

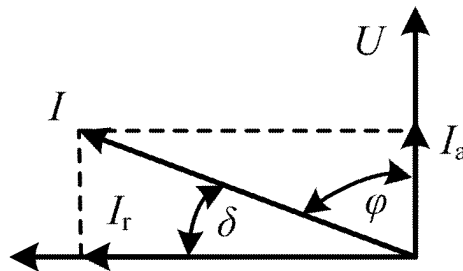
## 2.5 Диелектрични загуби

Кога одредена изолациона конструкција би била направена од идеален диелектрик таа во електричното коло за испитување на изолацијата би се однесувала како идеален кондензатор. Во тој случај струјата низ диелектриот би предничела пред напонот за агол од  $90^\circ$ . Меѓутоа, во реалните диелектрици настануваат загуби

на активна моќност чија вредност е пропорционална на активната компонента на струјата  $I_a$  (слика 2.14). Активната компонента на струјата се состои од два дела и тоа од струјата на електричната проводливост на диелектрикот и од струјата на поларизација на диелектрикот која обично доминира во  $I_a$ .

Аголот на диелектрични загуби  $\delta$  е агол кој го надополнува до  $90^\circ$  аголот на фазно поместување  $\varphi$  меѓу напонот и струјата во едно коло со кондензатор чија што изолација е направена од реален диелектрик:

$$\delta = 90^\circ - \varphi \quad (2.18)$$



Слика 2.14. Фазорски дијаграм на струјата и напонот за реален диелектрик

Моќноста на диелектричните загуби може да се пресмета како

$$P_\delta = U \cdot I_a = U \cdot I \cdot \sin \delta = \omega C \cdot U^2 \cdot \sin \delta \approx \omega C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (2.19)$$

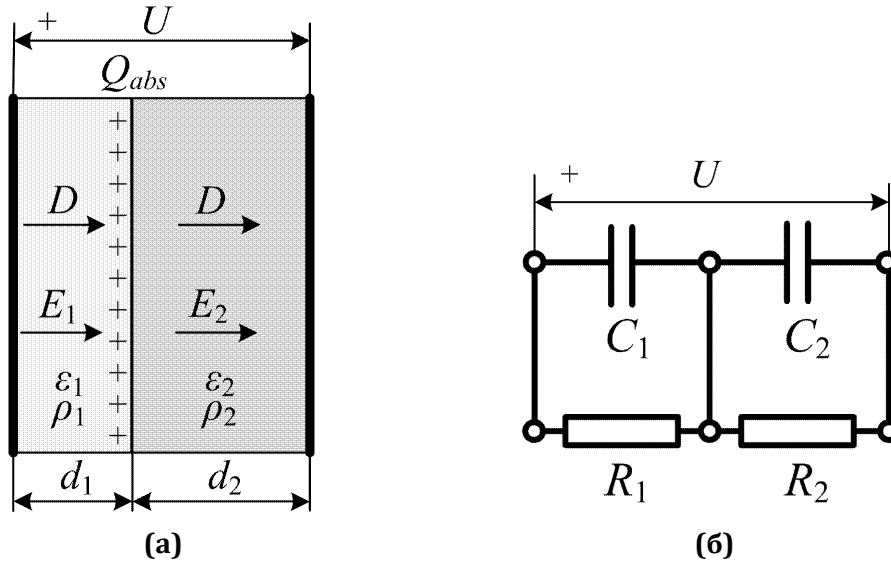
каде што  $C$  е капацитетот на изолацијата, а  $U$  е напонот на којшто таа е приклучена.

Во текот на експлоатација на изолацијата напонот, според стандардите за квалитет на напонот, нема да ја надмине вредноста  $1,1 \cdot U_n$ , што значи поради таа причина диелектричните загуби најмногу можат да се зголемат за околу 20%. Од друга страна диелектричните загуби може повеќекратно да се зголемат поради повеќекратното зголемување на факторот на диелектрични загуби  $\operatorname{tg} \delta$  поради навлажнување или онечистување на изолацијата. Толкавото зголемување на диелектричните загуби доведува до нејзино побрзо трошење, односно до скратување на нејзиниот животен век. Слични ефекти се присутни и поради зголемувањето на капацитетот на изолацијата  $C$ .

## 2.6 Модел на диелектрикот

За да се извршат анализи на диелектрикот се прикажува со еквивалентна шема која се состои од елементи со концентрирани параметри (кондензатори и отпорници). Таа шема ги презентира електричните особини на диелектрикот и нејзините параметри и поврзаност треба да биде таква што вредностите на напоните и струите во неа ќе бидат реална слика на електричните појави во диелектрикот. Тука не интересираат реалната и имагинарната компонента на струјата во однос на напонот со кои можеме да ги моделираме загубите на активна моќност во диелектрикот и капацитивноста на изолациониот систем кој го содржи разгледуваниот диелектрик.

Во комбинирана изолација, која се состои од неколку диелектрици со разни карактеристики, присутна е специфичната појава на акумулирање полнежи на границата на диелектриците, кои се викаат полнежи на апсорпција  $Q_{abs}$ . Оваа појава е поврзана со различните особини на слоевите и се вика миграциона поларизација, а ќе ја разгледаме на еден прост пример од двослојна изолација на плочест кондензатор при еднонасочен напон (слика 2.15а).



**Слика 2.15. Електричен полнеж на апсорпција во двослојна изолација и нејзин електричен модел**

Во моментот на вклучување на напонот  $U$  на плочите на кондензаторот моментално ќе се појават полнежи, а јачината на електричното поле во слоевите ќе биде определена само со диелектричните константи  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  и со дебелините на слоевите  $d_1$  и  $d_2$ , како што е дадено со (2.15) и (2.16).

Бидејќи диелектрикот не е идеален во неговите слоеви ќе течат струи со следните густини

$$J_1 = \frac{E_1}{\rho_1} = \frac{\epsilon_2/\rho_1 \cdot U}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2}$$

$$J_2 = \frac{E_2}{\rho_2} = \frac{\epsilon_1/\rho_2 \cdot U}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2}$$

каде што  $\rho_1$  и  $\rho_2$  се специфични отпорности на двата слоја од диелектрикот.

Ако изолацијата е нехомогена, т.е. ако е  $\epsilon_2/\rho_1 \neq \epsilon_1/\rho_2$ , густините на струи нема да бидат еднакви  $J_1 \neq J_2$ . Во тој случај, при  $t = 0$  ако е  $\epsilon_2/\rho_1 > \epsilon_1/\rho_2$ , кон границата на слоевите дотекнуваат повеќе полнежи, отколку што од неа истекуваат, така што на границата која ги дели слоевите почнува да се акумулира полнежот на апсорпција  $Q_{abs}$  кој е позитивен.

Со акумулирање на полнежот на апсорпција, јачините на електричните полиња во слоевите од изолација се менуваат:  $E_1$  се намалува, а  $E_2$  се зголемува. Соодветно на тоа, се менуваат и струите на одведување низ слоевите и притоа разликата меѓу  $J_1$  и  $J_2$  се намалува. Акумулирањето на полнежот на апсорпција завршува при  $t \rightarrow \infty$  кога важи  $J_{1,\infty} = J_{2,\infty}$ .

Полнежот на апсорпција и неговата надворешна манифестација може да се анализира со помош на моделот на изолацијата според сликата 2.15б.

Конечната распределба на напонот во изолацијата, кога веќе не тече струја низ капацитетите, е диктирана од отпорностите на изолацијата така што напоните на двата слоја на изолацијата можеме да ги одредиме според правилото за напонски делител

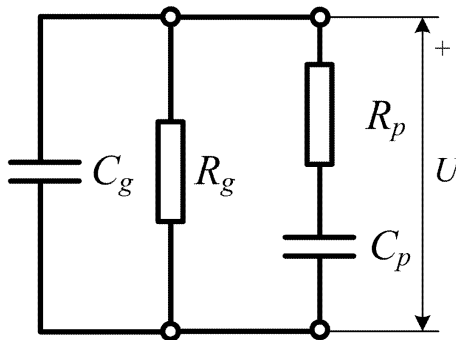
$$U_{1,\infty} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$

$$U_{2,\infty} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

Полнежот на апсорпција при траен режим е еднаков на разликата на полнежите на електродите на капацитивностите  $C_1$  и  $C_2$ , односно

$$Q_{abs} = C_1 U_{1,\infty} - C_2 U_{2,\infty} = \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{R_1 + R_2} U \quad (2.20)$$

За анализа на појавите во нехомогена изолација, кои се користат за контрола на квалитетот на изолацијата, најчесто се користи еквивалентната шема која е дадена на сликата 2.16.



Слика 2.16. Електричен модел на слоевата изолација

Во еквивалентната шема со

$$R_g = R_1 + R_2 \quad (2.21)$$

е даден отпорот на изолацијата во стационарен режим, додека со

$$C_g = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.22)$$

е даден геометрискиот капацитет на изолацијата кој зависи само од нејзините домензии и диелектричните константи на изолацијата (со него се моделираат брзите поларизации во диелектрикот како што се електронската и јонската поларизација).

Отпорноста  $R_p$  и капацитивноста  $C_p$  го одразуваат натрупувањето на полнежите на апсорпција на граничниот слој на изолацијата поради диполната поларизација. Од условите за равенство на еквивалентните импеданции (во лапласов домен) на шемите од сликите 2.15б и 2.16 може да се покаже дека за нив важат следните релации

$$R_p = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2} \quad (2.23)$$



$$C_p = \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)} \quad (2.24)$$

Од последните релации следува дека во хомогена изолација, каде што е  $R_1 C_1 = R_2 C_2$ , се добива дека  $R_p = \infty$  и  $C_p = 0$ . Во тој случај еквивалентната шема ги содржи само елементите  $R_g$  и  $C_g$  што значи дека полнежите на абсорпција не се акумулираат ( $Q_{abs} = 0$ ) што е во согласност со (2.20).

Користејќи ги изразите за  $R_p$  и  $C_p$  можеме да ја пресметаме поларизационата временска константа

$$T_p = R_p C_p = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} \quad (2.25)$$

Понатаму ќе видиме дека за степенот на нехомогеност на изолацијата и за нејзината цврстина можеме да судиме врз основа на тнр. повратен напон на изолацијата. Тој се добива така што повеќеслојна изолација долготрајно (15–30 min) ќе се изложи на еднонасочен напон, во неа ќе се акумулира полнеж  $Q_{abs}$ , а потоа ќе се следи како нејзиниот напон се менува во процесот на празнење на полнежот  $Q_{abs}$  преку отпорностите на нејзините слоеви ( $R_1$  и  $R_2$  во случај на двослојна изолација).

# 3

## ИЗОЛАЦИОНИ МАТЕРИЈАЛИ

Материјалите кои се користат за изолација во високонапонските уреди според *агрегатната состојба* можат да бидат *гасовити, течни и цврсти*. Од гасовите најчесто се користи воздухот како изолатор за надземни водови и разводни постројки на отворено, додека за оклопени постројки обично се користи гасот SF<sub>6</sub> под притисок. Течните и цврсти изолациони материјали, како и нивни комбинации, се користат за внатрешна изолација на трансформатори, вртливи машини, кабли, кондензатори, високонапонски прекинувачи и друго.

Освен според агрегатната состојба изолационите материјали може да се поделат според *хемискиот состав* на *органиски и неорганиски* материјали. Додека, пак, според потеклото можат да бидат *природни и синтетички (вештачки)*.

Основен податок за изолационите материјали е нивната диелектричка цврстина. Таа е дефинирана како максимална вредност на електричното поле коешто одреден изолационен материјал може да го издржи. Над таа вредност доаѓа до електричен пробив<sup>1</sup> на изолацијата, нејзината отпорност нагло се смалува и таа ги губи изолационите својства. Диелектричната цврстина се изразува во kV/cm или во kV/mm.

Според максималната дозволена работна температура изолацијата за електричната опрема се дели на седум класи кои се наведени во табелата 3.1.

**Табела 3.1. Класи на изолацијата според максималната работна температура  $\theta_{\max}$**

Класа	Y	A	E	B	F	H	C
$\theta_{\max}(\text{°C})$	90	105	120	130	155	180	> 180

### 3.1 Гасни изолациони материјали

#### 3.1.1 Воздух

Основен изолационен материјал за надворешната изолација е атмосферскиот воздух. При нормални атмосферски услови електричната цврстина на воздухот е

<sup>1</sup>Електричен пробив освен поради делување на превисок напон, т.е. прејако електрично поле, може да настане и од други причини како што е на пример повишена температура која постепено ја нарушува структурата на изолаторот и по подолг период го уништува.

мала и во хомогено електрично поле на растојанија од ред на величина сантиметри изнесува 30 kV/cm. Во случај на нехомогено електрично поле какво што е во праксата електричната цврстина на воздухот е уште помала и опаѓа со зголемување на растојанијата. На пример, во силно нехомогено поле и растојанија од 1÷2 m електричната цврстина на воздухот е околу 5 kV/cm, а при растојанија од 10÷20 m таа изнесува 2,5÷1,5 kV/cm. Затоа димензиите на надземните водови за висок напон и разводните постројки при зголемувањето на номиналниот напон многу брзо растат.

Електричната цврстина на воздухот многу зависи од неговиот притисок, температура и апсолутна влажност. За нормални атмосферски услови се сметаат услови при кои притисокот на воздухот изнесува  $p_0 = 101,3 \text{ kPa}$ , а неговата температура е  $\theta = 20^\circ\text{C}$ . Како нормална апсолутна влажност за воздухот се усвојува  $11 \text{ g/m}^3$ . Електричната цврстина зависи од релативната густина на воздухот која е дефинирана со изразот

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}$$

каде што  $p$  е актуелниот притисок на воздухот, додека  $\theta$  е актуелната температура. За параметарот  $\delta$  повеќе ќе стане збор подоцна во поглавјето за мерење на високи наизменични напони со пробив на воздух во мерно сферно искриште.

Големината на влажноста има помало влијание, така на пример ако таа се зголеми за 50% од нормалната пробивните напони на надворшената воздушна изолација се зголемуваат за околу 5%.

Релативната диелектрична константа изнесува  $\epsilon_r \approx 1$ , специфичниот електричен отпор изнесува  $\rho = (1 \div 3) \cdot 10^{16} \Omega\text{m}$ , додека фактор на диелектрични загуби при 50 Hz е  $\text{tg}\delta = 4 \cdot 10^{-6}$ .

### 3.1.2 Сулфурен хексафлуорид – SF<sub>6</sub>

Сулфурен хексафлуорид (SF<sub>6</sub>) се произведува со синтеза на сулфур и флуорид на температура од 300°C. Флуоридот се добива со електролиза на флуорна киселина. Гасот има специфична маса која што е околу 5 пати поголема од специфичната маса на воздухот, тој нема мирис и боја и е инертен до температура од 500°C. Гасот SF<sub>6</sub> е неотровен и незапалив, а освен тоа има одлични способности за гасење на електричен лак со што е погоден за примена во прекинувачи.

Изложувањето на електричен лак ги разбива молекулите на гасот но тој има својство по престанок на дејството на лакот самиот да се обнови и да се врати во нормална состојба.

Електричната цврстина на SF<sub>6</sub> е 2,5 пати поголема од електричната цврстина на воздухот. Тој најчесто се користи за изолација на оклопени разводни постројки или кабли во коишто се наоѓа под притисок од 4÷5 бари (1 бар = 100 kPa), со што имајќи ја превид и големата електрична цврстина овозможува намалување на димензиите на таквите постројки за околу 10 пати во однос на постројки изолирани со воздух. Постројките изолирани со SF<sub>6</sub> под притисок често пати се прават под земја во центрите на големите градови каде што не е можна изградба на разводна постројка на отворено поради ограничениот простор. Друга предност на таквите постројки е тоа што е избегната опасноста од појава на пожар.

Во последните неколку децении со водење грижа за климатските промени често пати се потенцира дека ефектот на стаклена градина од гасот SF<sub>6</sub> е 23900 пати

поголем од ефектот на гасот  $\text{CO}_2$ . Но, имајќи предвид дека  $\text{SF}_6$  се произведува во количини од околу 10000 тони годишно, наспроти околу 35 милијарди тони  $\text{CO}_2$  годишно уделот на  $\text{SF}_6$  во климатските промени е незначителен и е далеку помал од 1%.

Иако гасот  $\text{SF}_6$  не е отровен тој е опасен ако се вдиши во поголеми количини затоа што може да дојде до гушење поради недостиг на кислород во белите дробови. Имајќи предвид дека тој е потежок од воздухот ваква опасност е присутна во случаите кога треба да се работи под нивото на постројки изолирани со  $\text{SF}_6$  во случај да има истекување на гас од нив.

Релативната диелектрична константа изнесува  $\epsilon_r \approx 1$ , специфичниот електричен отпор изнесува  $\rho = (1 \div 3) \cdot 10^{16} \Omega\text{m}$ , додека фактор на диелектрични загуби при 50 Hz е  $\text{tg}\delta < 2 \cdot 10^{-7}$ .

## 3.2 Течни изолациони материјали

Течните изолациони материјали се применуваат кај: трансформатори, прекинувачи и контактни регулатори на напон под оптоварување, кондензатори и кабли. Освен обезбедувањето на соодветна електрична изолација тие се користат и како средство за ладење и понекогаш се прави нивна принудна циркулација со помош на пумпи. Според хемискиот состав се делат на минерални и синтетички масла.

Минералните масла, кои се смеса од јагленоводороди, се добиваат од последната фракција од дестилацијата на сурова нафта. По дестилацијата минералните масла се прочистуваат со сулфурна киселина, потоа се цедат, а сулфурната киселина се неутрализира. На крајот се врши дехидрација на маслото. Во целиот процес се води сметка за соодветна застапеност на одделни јаглеводороди за да се добие масло со подолг работен век, но при тоа треба да се внимава да не се влошат неговите електрични карактеристики.

Новото трансформаторско (кондензаторско) масло има обично светло жолта боја, при што колку е почисто толку е посветло. Во текот на експлоатацијата заради натрупување на продукти од закиселување на маслото тоа добива темна боја. Кондензаторското масло се разликува од трансформаторското по тоа што тоа е потемелно прочистено, што значи е поквалитетно и со тоа поскапо.

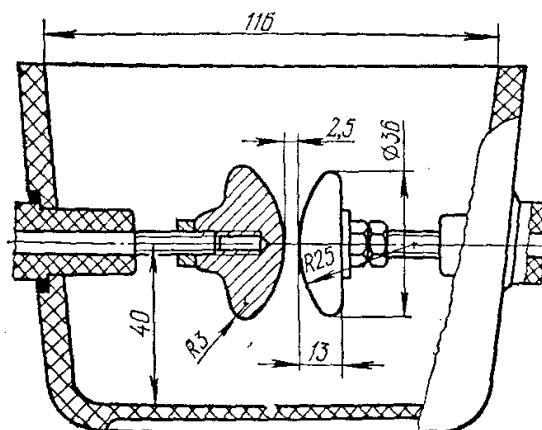
Електричната цврстина на маслата е многу осетлива на количината на влага во нив и брзо опаѓа со порастот на содржаната влага. Електричната цврстина на маслата се одредува со стандардно искриште (слика 3.1) кое помеѓу електродите има приближно хомогено електрично поле. Електродите се во форма на делови од сфера со радиус 25 mm поставени на растојание од 2,5 mm.

Пробивниот напон на нови и чисти масла е во опсегот 50 ÷ 60 kV, што значи дека нивната електрична цврстина изнесува 200 ÷ 240 kV/cm.

Минералните масла ги имаат следните својства:

- густина  $\approx 0,8 \text{ g/cm}^3$ ,
- електрична цврстина околу 200 ÷ 240 kV/cm,
- релативна диелектрична константа  $\epsilon_r = 2,2 \div 2,3$ ,
- специфичниот електричен отпор  $\rho \approx 10^{13} \Omega\text{m}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при 50 Hz  $\text{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-3}$  за трансформаторско масло и  $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-3}$  за кабелско и кондензаторско масло.

По одреден период на експлоатација можно е да се направи регенерација на маслото со чистење од цврстите примеси и влагата. За таа цел се користат



**Слика 3.1. Стандардно искриште за определување на диелектрична цврстина на течни диелектрици**

центрифуги и уреди за термичка и вакумска обработка на маслото. Регенерираното масло има исти карактеристики како и ново масло.

Освен минералното масло се корити и синтетичко масло какво што е на пример силиконското масло кое во однос на минералното се разликува по тоа што во својот состав наместо јагленород содржи силициум.

Синтетичките масла се применуваат кај уреди со повисока работна температура и со поголеми јачини на електричното поле. Освен тоа тие се употребуваат во средини каде што треба да се избегне опасност од пожар или експлозија.

Синтетичките масла ги имаат следните својства:

- густина  $\approx 0,9 \text{ g/cm}^3$ ,
- електрична цврстина околу  $180 \div 220 \text{ kV/cm}$ ,
- релативна диелектрична константа  $\epsilon_r = 2,7 \div 2,9$ ,
- специфичниот електричен отпор  $\rho = 3 \cdot 10^9 \div 10^{12} \Omega\text{m}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при  $50 \text{ Hz}$   $\text{tg}\delta = (1,5 \div 3) \cdot 10^{-2}$ .

## 3.3 Цврсти изолациони материјали

### 3.3.1 Електропорцелан

Електропорцеланот во основа претставува смеса од каолин (50%), кварц (25%) и глиненец (фелдшпат) (25%). Од овој однос зависи какви ќе бидат особините на порцеланот. Поголемиот процент на глиненец дава поголема електрична цврстина на пробој, поголемиот процент на кварц дава поголема механичка цврстина, додека пак поголемиот процент на каолин дава поголема отпорност спрема температурните промени.

Електропорцеланот ги има следните својства:

- густина  $\approx 2,5 \text{ g/cm}^3$ ,
- механичка цврстина на затегање  $40 \div 80 \text{ MPa}$  ( $4 \div 8 \text{ daN/mm}^2$ ),
- механичка цврстина на притисок  $400 \div 800 \text{ MPa}$  ( $40 \div 80 \text{ daN/mm}^2$ ),
- електрична цврстина околу  $300 \div 400 \text{ kV/cm}$  – зависи од дебелината на материјалот (десетина пати повеќе од воздухот),
- релативна диелектрична константа  $\epsilon_r = 6 \div 7$ ,

- специфичниот електричен отпор  $\rho \approx 10^{11} \Omega\text{m}$ ,
- максимална работна температура околу  $160^\circ\text{C}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при  $50 \text{ Hz } \text{tg}\delta = (1 \div 3) \cdot 10^{-2}$ .

Во текот на сушењето и печењето на порцеланската маса настануваат големи волуменски контракции (10–20%) поради што е отежнато производството на предмети од електропорцелан со стандардни димензии и мали отстапувања во димензиите.

Површината на испечениот порцелан е рапава. Како таква, таа ги задржува нечистотиите и влагата со што се намалува површинскиот отпор на изолаторот. Поради ова, површината од порцеланот се глазира и потоа тој повторно се пече. Глазурата претставува мазен слој од стакло, со дебелина  $0,2 \div 0,3 \text{ mm}$ . На глазурата и се дава кафена или темно зелена (многу ретко бела) боја што придонесува за побрзото испарување на нафатената влага под дејство на сончевите зраци. Темните бои исто така помагаат механичките оштетувања и трагите од настанатите пукнатини на изолаторот да бидат полесно воочливи.

Глазурата го штити порцеланот од продор на влага. Таа е исто така отпорна на разни хемиски агресивни материи, а при дожд лесно се мие од нафатените нечистотии. Отпорна е и на површинските струи кои се присутни кај изолаторите во услови на загадување, а отпорна е и на електричниот лак.

### 3.3.2 Стеатит

Стеатитот претставува исто така електроизолационен керамички материјал, сличен на порцеланот. Кај него глиненецот е главно заменет со магнезиев силикат, поради што тој има поголема механичка цврстина. Затоа и изолаторите од стеатит се одликуваат со висока механичка цврстина а се употребуваат главно во оние случаи каде што се очекуваат големи механички напрегања (на пример кај спроводните изолатори, изолаторите за изведба на прекинувачи, разделувачи и друго).

Стеатитот не се собира при печење и сушење и нема потреба од глазирање – се обработува само со брусене.

### 3.3.3 Стакло

Стаклото како изолациски материјал во последно време се користи многу често, како во светот, така и кај нас, за водовите со висок и највисок напон ( $U_n > 110 \text{ kV}$ ). Се одликува со добра електрична и механичка цврстина и лесно се обработува, а технолошкиот процес за производство на стаклените изолатори е прилично едноставен. Формираните стаклени изолатори, сè уште загреани, со посебна постапка се калат во струја од ладен воздух со што стаклото добива значително поголема механичка цврстина и поголема отпорност на температурните промени. Заради тоа, стаклените изолатори во погонот се покажале како подобри и посигурни од порцеланските како во електрички така и во механички поглед.

Стаклените изолатори се употребуваат претежно кај водовите со највисок напон (220 kV и повеќе), каде што барањата во поглед на електромеханичката цврстина, сигурноста и квалитетот на погонот се најголеми.

Стаклото ги има следните својства:

- густина  $\approx 2,5 \text{ g/cm}^3$ ,

- механичка цврстина на затегање  $100 \div 120 \text{ MPa}$  ( $10 \div 12 \text{ daN/mm}^2$ ) – нешто повеќе од порцеланот,
- механичка цврстина на притисок  $700 \text{ MPa}$  ( $70 \text{ daN/mm}^2$ ),
- електрична цврстина нешто поголема од електричната цврстина на порцеланот,
- релативна диелектрична константа  $\varepsilon_r \approx 7$ ,
- специфичниот електричен отпор  $\rho \approx 10^{11} \Omega\text{m}$ ,
- максимална работна температура околу  $110^\circ\text{C}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при  $50 \text{ Hz}$   $\text{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-2}$  што е доста повеќе од порцеланот.

### 3.3.4 Полимери

Полимерните изолатори за високонапонските надземни водови се состојат од јадро направено од фиберглас со што имаат голема механичка цврстина. Над јадрото е поставена обвивка од полимер за заштита од атмосферски влијанија. За таа цел се користат два материјала: етиленска-пропиленска гума и силиконска гума. Силиконската гума е отпорна на ултравиолетово зрачење и не е хидроскопна. Поради тоа таа најчесто се користи, а во последно време композитните изолатори со јадро од фиберглас и обвивка од силиконска гума често пати се користат наместо порцеланските или стаклените изолатори. Главната причина за тоа е големата механичка цврстина, солидните електрични карактеристики и што е најважно многу помалата тежина и цена.

Полимерите ги имаат следните својства:

- густина  $\approx 1,15 \text{ g/cm}^3$ ,
- електрична цврстина околу  $160 \div 200 \text{ kV/cm}$ ,
- релативна диелектрична константа  $\varepsilon_r \approx 4$ ,
- специфичниот електричен отпор  $\rho \approx 10^{12} \Omega\text{m}$ ,
- максимална работна температура околу  $350^\circ\text{C}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при  $50 \text{ Hz}$   $\text{tg}\delta = (2 \div 3) \cdot 10^{-2}$ .

### 3.3.5 Лискун

Лискунот е природен материјал кој главно се користи за изолација на вртливи електрични машини за висок напон (асинхрони и синхрони мотори и генератори), а исто така и како диелектрик во кондензатори. Неговите главни својства се: голема електрична цврстина, топлинска отпорност, отпорност на влага и механичка отпорност. Во природата се среќава во кристален облик, со карактеристични својства да се цепи во тенки листови.

Поважни видови лискуни се мусковит и флогопит. Мусковитот е обично безбоен, додека флогопитот е темен. Според електричните својства мусковитот е подобар од флогопитот, а освен тоа тој е и механички потврд. Нивните својства се следните Мусковит:

- густина  $\approx 2,2 \text{ g/cm}^3$ ,
- електрична цврстина  $250 \text{ kV/cm}$ ,
- механичка цврстина на притисок  $400 \text{ MPa}$  ( $40 \text{ daN/mm}^2$ ),
- механичка цврстина на виткање  $230 \text{ MPa}$  ( $23 \text{ daN/mm}^2$ ),
- релативна диелектрична константа  $\varepsilon_r = 6,5$ ,

- специфичниот електричен отпор  $\rho > 10^{16} \Omega\text{m}$ ,
- нормална работна температура  $500^\circ\text{C}$ ,
- максимална работна температура  $800^\circ\text{C}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при  $50 \text{ Hz } \text{tg}\delta = 10^{-2}$ .

Флогопит:

- густина  $\approx 2,2 \text{ g/cm}^3$ ,
- електрична цврстина  $200 \text{ kV/cm}$ ,
- механичка цврстина на притисок  $320 \text{ MPa } (32 \text{ daN/mm}^2)$ ,
- механичка цврстина на виткање  $200 \text{ MPa } (20 \text{ daN/mm}^2)$ ,
- релативна диелектрична константа  $\epsilon_r = 6$ ,
- специфичниот електричен отпор  $\rho > 10^{16} \Omega\text{m}$ ,
- нормална работна температура  $800^\circ\text{C}$ ,
- максимална работна температура  $1000^\circ\text{C}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при  $50 \text{ Hz } \text{tg}\delta = 10^{-2}$ .

### 3.3.6 Импрегнирана хартија

Првиот изолационен материјал кој се користел практично кај сите уреди за висок напон била хартијата. Дури и денес кога има развиена технологија за производство на многу квалитетни изолациони материјали хартијата и понатаму е често употребувана. Причината за тоа е што хартијата лесно и евтино се произведува, а има задоволително добри изолациони својства.

Хартијата се произведува од дрво и има форма на ленти со широчина од 15 до 25 mm и дебелина од околу 0,1 mm. Од неа во услови на вакуум се отстранува влагата практично сета влага содржана во хартијата. Хартијата се мота цврсто околу спроводните делови во форма на спирала во определен број слоеви, се додека не се постигне потребната дебелина. На крајот хартијата се импрегнира со изолациона маса со што се пополнуваат воздушните шуплини во неа.

За импрегнација се користи минерално масло, а во специјални случаи кога се бара зголемен вискозитет на маслото се додава калафониум и восок со што тоа останува во доволно цврста состојба и при највисоката работна температура. Во спротивно може да се случи маслото да истече и изолациониот систем со импрегнирана хартија практично да биде разрушен.

Импрегнираната хартија ги има следните својства:

- густина  $0,8 \div 1 \text{ g/cm}^3$ ,
- електрична цврстина  $450 \text{ kV/cm}$ ,
- релативна диелектрична константа  $\epsilon_r \approx 2,5$ ,
- специфичниот електричен отпор  $\rho = 10^{13} \div 10^{14} \Omega\text{m}$ ,
- максимална работна температура околу  $90^\circ\text{C}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при  $50 \text{ Hz } \text{tg}\delta = (0,8 \div 1) \cdot 10^{-2}$ .

### 3.3.7 Поливинилхлорид

Изолацијата од поливинилхлорид (PVC) се изведува како безрабен слој, рамномерно нанесен околу спроводникот. Поливинилхлоридот е лесен за обработка, совитлив, не го подржува горењето, отпорен е на абење и не прима влага. Во поглед на електроизолационите особини гласни недостатоци му се: малата пробојна цврстина, високиот фактор на диелектрични загуби и ниската работна



температура. Поради тоа поливинилхлоридот се користи кај каблите со номинален напон до 10 kV (ретко и кај едножилните кабли за 20 kV), но затоа пак доминира со својата примена кај нисконапонските кабли.

Поливинилхлоридот ги има следните својства:

- густина  $1,4 \div 1,5 \text{ g/cm}^3$ ,
- електрична цврстина 80 kV/cm,
- релативна диелектрична константа  $\varepsilon_r = 3 \div 4$ ,
- специфичниот електричен отпор  $\rho = 10^{11} \div 10^{12} \Omega\text{m}$ ,
- максимална работна температура околу  $70^\circ\text{C}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при 50 Hz  $\text{tg}\delta = (2 \div 10) \cdot 10^{-2}$ .

### 3.3.8 Полиетилен

Полиетиленот (PE) има значително подобри изолациони особини во однос на поливинилхлоридот. Покрај високата диелектрична цврстина и малиот фактор на диелектрични загуби, тој е стабилен по својот хемиски состав дури и на температури над  $100^\circ\text{C}$ . Има голема механичка цврстина, отпорен е на абење, отпорен е на температурни и хемиски влијанија и скоро воопшто не прима влага. Единствениот недостаток му е релативно високата цена. Полиетиленот се употребува кај каблите со напони од 1 kV до 500 kV. Многу сличен материјал на полиетиленот е умрежениот полиетилен (XLPE), кој има специјална умрежена структура на полимерните врски. Главна разлика во однос на полиетиленот е што тој ги задржува своите својства и на повисоки температури.

Полиетиленот ги има следните својства:

- густина  $0,8 \div 1 \text{ g/cm}^3$ ,
- електрична цврстина 400 kV/cm,
- релативна диелектрична константа  $\varepsilon_r = 2,3$ ,
- специфичниот електричен отпор  $\rho = 10^{14} \Omega\text{m}$ ,
- максимална работна температура околу  $100^\circ\text{C}$ ,
- фактор на диелектрични загуби при 50 Hz  $\text{tg}\delta = (4 \div 5) \cdot 10^{-4}$ .

### 3.3.9 Прешпан

Прешпанот се добива од пресувани влакнести струготини од дрва. Се прави во вид на јак картон, чии површини се тврди и мазни, при што колку е помазен толку има поголема диелектрична цврстина. Се изработува во вид на листови со дебелина од 0,1 до 5 mm, а се применува во изолационите конструкцијата на вртливите електрични машини и трансформатори. Се користи за изолација на намотките во однос на железото во статорските канали на вртливите електрични машини како и за меѓуфазна изолација. Кај трансформаторите обично се употребува за изработка на цилиндри врз кои се мотаат намотките.

# 4

## ИСПИТНИ НАПОНИ

Нормалните работни напони не предизвикуваат сериозни напрегања на изолацијата освен во посебни околности како на пример во услови со загадување на надворешната изолација или појава на влага и парцијални празнења во воздушните шуплини на внатрешната изолација<sup>1</sup>.

Големи напрегања на изолацијата можат да се појават од различни видови на пренапони<sup>2</sup> кои се појавуваат во електроенергетските системи.

Пренапоните можат да бидат од надворешно или внатрешно потекло. Надворешни пренапони, коишто уште се нарекуваат и атмосферски пренапони, се поврзани со удар на гром во елементите на електроенергетските системи или во нивна близина и не се зависни од напонот на системот. Внатрешните пренапони се генерирани од промени во работата на системот како што се операциите со расклопните уреди, куси врски или нагли промени на потрошувачката или производството на електрична енергија. Поради тоа тие се нарекуваат комутациони или склопни пренапони.

Атмосферските пренапони имаат апериодичен облик со траење кое се мери во микросекунди поради што во нивниот фреквенциски спектар се појавуваат хармоници чија фреквенција е од редот на 1 до 5 MHz. Понекогаш атмосферските пренапони можат да предизвикаат преодни процеси кои со осцилаторен карактер со истиот фреквенциски опсег.

Склопните пренапони траат многу кусо време во споредба со должината на периодот на струјата со индустриска фреквенција од 50 Hz, кој изнесува 20 ms, што значи дека нивното времетраење се мери во делови од милисекунда. Нивната фреквенција варира од неколку стотини Hz до неколку десетини kHz иако понекогаш (во постројките изолирани со гасот SF<sub>6</sub>) можат да се појават преодни процеси со фреквенција од редот на MHz.

За да се провери однесувањето на изолацијата која може да биде подложена на горенаведените пренапони е потребно да се прави нејзино испитување со соодветни испитни напони кои се дефинирани со посебни стандарди и прописи. Ваквите испитувања се прават во процесот на проектирање и производство на изолацијата, како и пред нејзиното монтирање во одредена постројка и во текот на работниот век на постројката.

<sup>1</sup>За овие појави ќе стане збор подоцна.

<sup>2</sup>Во електроенергетските системи под поимот пренапон се подразбира секоја моментална вредност на напонот која има вредност поголема од  $\sqrt{2}U_n$ , каде што  $U_n$  е номинална ефективна вредност на напонот во делот од системот каде што се појавува пренапонот.

## 4.1 Испитни напони со индустриска фреквенција

За да се процени способноста на изолацијата на уредите во ЕЕС да ги издржи напоните со индустриска фреквенција (50 Hz) таа се изложува на едноминутни испитни напони. Големината на испитните напони се бира така што тие се повисоки од најчесто очекуваните работни напони во ЕЕС со цел да се симулираат напрегањата на изолацијата коишто таа најверојатно ќе треба да ги поднесе во текот на долгогодишната експлоатација кога во одредени моменти може да се појават толку високи напони. За опрема која што е наменета за внатрешна монтажа тестовите се прават само во суви услови, додека за опремата за надворешна монтажа е потребно да се прават и тестови во услови со стандарден дожд како што е пропишано во соодветни стандарди.

## 4.2 Импулсни испитни напони

Ударите на гром во надземните водови, или пак во разводните постројки, предизвикуваат високи напони коишто стрмно растат, а потоа во форма на напонски бранови се движат по надземните водови и по елементите од разводните постројки. Ваквите високи и брзопроменливи напони лесно можат да предизвикаат оштетување на изолацијата. Големината на импулсните пренапони може да биде од редот на неколку стотини киловолти и својата максимална вредност ја постигнуваат за време кое е од дел од микросекунда до неколку микросекунди, а потоа десетици пати поспоро опаѓаат до нула. Прифатено е дека стандардниот импулсен напон е аperiодичен импулс кој го достигнува својот максимум за  $1,2 \mu s$  (време на челото), а потоа значително поспоро опаѓа така што за  $50 \mu s$  има вредност еднаква на половина од максималната (време на грбот). Повеќе детали за изгледот на импулсните напони ќе стане збор подоцна при што ќе бидат образложени и постапките за нивно добивање во лабораториски услови.

## 4.3 Склопни испитни напони

Склопните пренапони, кои уште се нарекуваат транзиентни, се појавуваат при нагли промени на состојбата во ЕЕС какви што се вклучување и исклучувања на расклопните уреди и куси врски. Склопните пренапони обично се доминантен фактор кој влијае на изборот на изолацијата за ЕЕС со номинални напони од околу 300 kV и повисоки. Поради тоа, различни меѓународни стандарди препорачуваат опремата наменета за напони над 300 kV да биде тестирана со склопни испитни напони. Иако формата на склопните пренапони може да биде многу различна користејќи практично искуство се препорачува тестирањата да се прават со импулси со време на челото од околу  $250 \mu s$  и време на грбот од околу  $2500 \mu s$ . За прекинувачи изолирани со гасна изолација се користат и склопни испитни напони со осцилаторен карактер.

## 4.4 Еднонасочни испитни напони

Порано еднонасочните испитни напони биле главно користени за истражувачка работа, како и при испитувањето на електроенергетски кабли со релативно големи капацитети во кои би течеле големи струи кога би се тестирале со наизменичен напон. Исто така во ситуации кога тестовите со наизменичен напон можат да доведат до значителни праџијални празнење во воздушните шуплини на изолацијата тестовите се прават со еднонасочни напони. Во последно време се поголем е интересот за примена на висок еднонасочен напон за пренос на електрична енергија поради што примената на еднонасочните испитни напони ќе станува се поголема.

## 4.5 Големина на испитните напони

Износот на испитните напоните тип зависат од номиналниот напон на опремата но и од видот на опремата. Тие се дефинирани во националните стандарди или во препораките на ИЕС (Интернационална електротехничка комисија). Големината на различните видови испитни напони, превземени од публикацијата ИЕС-60071-1, се дадени во табелите 4.1 и 4.2. Во табелите со (kV, eff) се означени ефективни вредности на напоните, додека со (kV, max) се означени максимални вредности. Во табелата 4.2 во колоната фаза-фаза е даден коефициент со којшто треба да се помножат вредностите од колоната фаза-земја.

**Табела 4.1. Испитни напони според ИЕС-60071-1**

Највисок напон на опремата (kV, eff)	Поднослив наизменичен напон (kV, eff)	Поднослив ударен напон (kV, max)
3,6	10	20; 40
7,2	20	40; 60
12	28	60; 75; 95
24	50	95; 125; 145
36	70	145; 170
123	(185); 230	(450); 550
245	(275); (325); 360; 395; 460	(650); (750); 850; 950; 1050

**Табела 4.2. Испитни напони според ИЕС-60071-1 за највисок напон на опремата од 420 kV**

Подолжна изолација (kV, max)	Фаза-земја (kV, max)	Фаза-фаза (коефициент)	Поднослив ударен напон (kV, max)
850	850	1,6	1050; 1175
950	950	1,5	1175; 1300
950	1050	1,5	1300; 1425

# 5

## ДОБИВАЊЕ НА ВИСОКИ ИСПИТНИ НАПОНИ

Терминот испитен напон се користи во областа на високите напони за секој напон кој се користи за проверка на карактеристиките на изолационите конструкции при нивната изработка и во текот на експлоатацијата. При тоа се користат напони и од неколку стотини киловолти и тие можат да бидат употребени во стационарен работен режим (простопериодичен или временски константен) и во преоден работен режим кога се користат импулси со времетраење од редот на микросекунди.

Потребата од испитен напон со индустриска фреквенција е поврзан со потребата за испитување на високонапонската опрема во однос на нејзината способност да ги издржи напрегањата во нормален режим на работа во ЕЕС. Со помош на краткотрајните импулсни испитни напони може да се добие потврда за способноста на опремата да ги издржи пренопоните поради надворешни влијанија какви што се удар на гром или комутациони пренопони кои се појавуваат во случаите со вклучување или исклучување на елементи во системот или, пак, куси врски.

Ваквите испитувања се потребни затоа што течните и цврстите изолациони материјали во помал или поголем степен стареат и нивната електрична цврстина се намалува со текот на времето. Бијдеќи во ЕЕС се појавуваат пренапони кои може да се значително повисоки од номиналните напони потребата од очигледна е потребата од генерирање на испитни напони со вредности кои за 2-5 пати (во зависност од видот на опремата и напонското ниво) ги надминуваат нормалните работни напони.

### 5.1 Добивање на високи наизменични напони со индустриска фреквенција

Високите наизменични напони со индустриска фреквенција се добиваат со помош на трансформатори кои се нарекуваат испитни. Кај нив главен податок е нивниот номинален напон  $U_n$ , додека нивната номинална моќност се определува од капацитивниот товар на изолацијата која што се испитува. Затоа номиналната моќност на испитните трансформатори е практично еднаква на реактивната моќност поради капацитивноста на испитната изолација

$$S_n = k\omega C_i U_n^2 \quad (5.1)$$

каде што  $C_i$  е капацитивноста на изолацијата што треба да се испитува (нејзина најголема очекувана вредност),  $U_n$  е номиналниот напон на испитниот

трансформатор, додека  $k$  е коефициент на пропорционалност со кој се земаат предвид: растурните капацитети на испитниот објект, капацитетите на врските помеѓу испитниот објект и трансформаторот кои можат да вклучуваат и екранирачки електроди, како и дополнителен товар кој го создаваат мерните уреди на страната на високиот напон (сферни мерни искришта и капацитивни мерни трансформатори).

За илустрација на големината на капацитетите кои може да бидат приклучени на високонапонската страна на испитниот трансформатор во табелата 5.1 се дадени нивни ориентациони вредности за различен тип на високонапонска опрема.

**Табела 5.1. Капацитет на одделни видови високонапонска опрема**

Вид на опремата	Капацитет
Висечки и потпорни изолатори	$\approx 10 \text{ pF}$
Воведни изолатори	$100 \div 1000 \text{ pF}$
Мерни трансформатори	$200 \div 500 \text{ pF}$
Енергетски трансформатори со $S_n < 1 \text{ MVA}$	$\approx 1000 \text{ pF}$
Енергетски трансформатори со $S_n > 1 \text{ MVA}$	$1000 \div 10000 \text{ pF}$
Кабли со изолација од импрегнирана хартија	$250 \div 300 \text{ pF/m}$
Кабли со гасна изолација	$\approx 60 \text{ pF/m}$
Оклопени постројки изолирани со $\text{SF}_6$	$1000 \div 10000 \text{ pF}$

Бидејќи пробојот на изолацијата во најголем број случаи се случува во моментот кога испитниот напон ќе ја достигне максималната вредност, а имајќи предвид дека струјата е скоро чисто капацитивна нејзината моментална вредност ќе биде блиска до нула во моментот на пробив.

Поради својата голема реактанција испитниот трансформатор не е во состојба за кратко време да обезбеди номинална струја низ пробиениот испитен објект. Голем дел од енергијата која е неопходна за целосно завршување на пробивот се добива од акумулираната енергија во капацитетот  $C_i$  и од растурните капацитети кои се поврзани паралелно со него. Ако за завршување на пробивот треба уште енергија тогаш напонот нагло се снижува што влијае на процесот на пробив.

За да не се случи претходно наведеното напонот не треба да падне повеќе од 5%, односно струјата на куса врска на испитниот трансформатор треба да биде поголема од некоја минимална вредност. Поради тоа при испитивање на изолација во која е потребна голема енергија за реализирање на пробив во неа е потребно да се избере испитен трансформатор со поголема моќност.

Испитните трансформатори ретко работат во траен режим, кога границите за оптовареност на намотките би се одредиле од условите за нивно загревање/ладење. Во случаите тие работат кусовремено (што е најчеста појава) параметрите на намотката за висок напон се одредуваат според потребите од механичка цврстина (заради можните куси врски при пробив на испитниот објект) и тие сосема малку се загреваат.

На испитните трансформатори не делуваат надворешни пренапони и затоа нивната изолација се испитува со напони кои се само за 1,2-1,3 пати поголеми од номиналниот напон.

Испитните трансформатори секогаш се прават како еднофазни и од нив се добива висок напон во однос на земјата бидејќи долниот крај од високонапонската намотка е заземјен. Нивните намотки се цилиндрични и се прават од една целосна

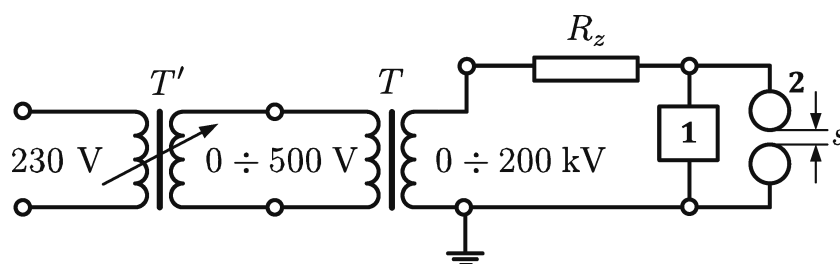
секција за напони до неколку стотини киловолти. За поголеми напони се користат намотки од повеќе секции при што проблемите со изолација се решаваат за секоја секција посебно. Освен тоа можни се и каскадни врски на повеќе испитни трансформатори.

Како илустрација за потребата номинална моќност на еден испитен трансформатор ќе разгледаме случај кога неговиот номинален напон е 200 kV, а капацитетот на испитниот објект е 10 nF. Од релацијата (5.1) може да се пресмета дека потребната моќност изнесува 126 kVA. Секако дека ако со таквиот трансформатор се испитува објект со ист капацитет но со помал напон моќноста со која тој ќе биде оптоварен ќе се намали и тоа пропорционално со квадратот на напонот. Така при 100 kV истиот испитен трансформатор ќе биде оптоварен со моќност од само 32 kVA.

Кај испитните трансформатори специфичната тежина изнесува околу 20 kg/kVA, така што еден трансформатор со номинална моќност од 100 kVA тежи околу 2000 kg. Од овие причини, а и поради потребата за добивање на висок напон на терен, добро е да се располага со повеќе испитни трансформатори со доволна моќност (помали и поголеми) и со разни номинални напони.

Испитниот трансформатор не смее да има голем интензитет на парцијални празнења кои се појавуваат во шуплините на изолацијата, што значи тој треба да биде направен со особено квалитетна изолација. Тоа е потребно за да не дојде до негово оштетување и што е многу важно да не биде извор на пречки при мерењето на парцијалните празнења кај други испитни објекти.

Принципиелната шема на еден испитен трансформатор е дадена на сликата 5.1 која што се состои од два еднофазни трансформатори - нисконапонски регулационен трансформатор  $T'$ , високонапонски испитен трансформатор  $T$ , заштитен отпорник  $R_z$ , испитен објект и мерно сферно искриште. Со нисконапонскиот трансформатор се менува примарниот напон на високонапонскиот испитен трансформатор од нула до номинална вредност со што на секундарот се добива посакуваниот висок напон.



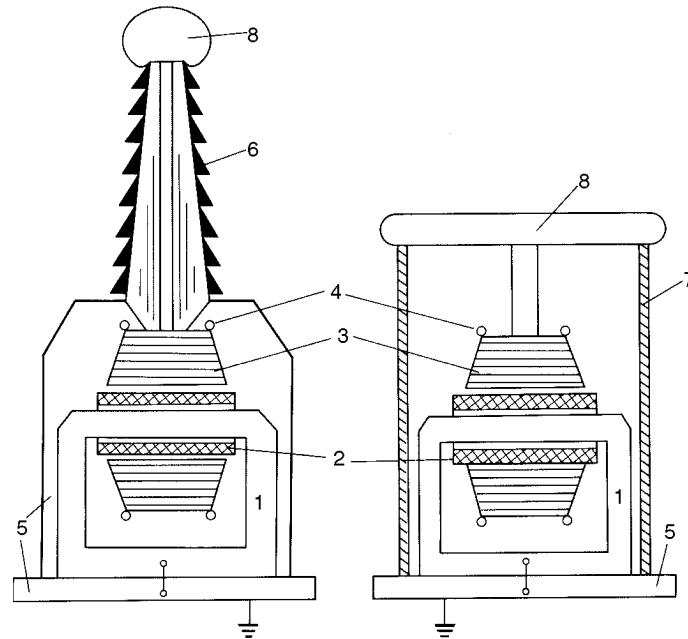
**Слика 5.1. Принципиелна шема на испитен трансформатор**

$T'$  - нисконапонски регулационен трансформатор,  $T$  - високонапонски испитен трансформатор,  
 $R_z$  - заштитен отпорник, 1 - испитен објект, 2 - мерно сферно искриште

Заштитниот отпорник штити од преголеми струи и нагли пропади на напонот во случај кога доаѓа до празнења или пробив во испитуваниот објект. Со тој тој го штити и мерните сферно искриште од преголемо оштетување на површината на сферите при пробиви во текот на испитувањето. Неговата големина се бира во опсегот  $0,5 \div 1\Omega/V$  од номиналниот висок напон на трансформаторот.

Сферното искриште е направено од бакарни сфери од кои долната е заземјена и подвижна. На таков начин може да се менува растојанието  $s$  меѓу нив со што се менува пробивниот напон меѓу нив. Тоа служи за мерење на високиот напон, како

и за заштита на испитуваниот објект од случајно зададени превисоки напони на испитниот трансформатор.



**Слика 5.2. Изглед на испитни трансформатори: котелска изведба (лево) и цилиндрична изведба (десно)**

1) железно јадро, 2) нисконапонска намотка, 3) високонапонска намотка, 4) штит за регулација на електричното поле, 5) заземјен метален сад, 6) високонапонски воведен изолатор, 7) изолационен оклоп, 8) високонапонска електрода

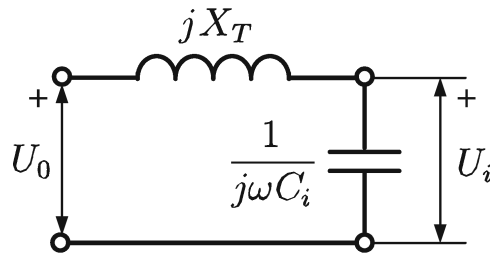
Испитните трансформатори не смеат да го изобличуваат напонот на секундарната страна, поради што магнетното јадро е димензионирано да работи со помали вредности на магнетна индукција за да не се појави заситување. Тие се наполнети со трансформаторско масло и кај нив вообичаени се две изведби (слика 5.2):

- *Цилиндрична изведба:* јадрото и намотките се сместени во изолационен цилиндар чија горна основа е високонапонската електрода со што не е потребен воведен изолатор. Изведбата е едноставна и евтина, но нејзин недостаток е што ладењето е отежнато и трансформаторот треба да работи со прекини за да не се прегрее;
- *Котелска изведба:* јадрото и намотките се сместени во железен казан слично како кај енергетските трансформатори, при што изводот за висок напон е изведен со помош на воведен изолатор. Котелот може да има ребра за ладење со што трансформаторот може да има поголема моќност без да се прегрее. Котелската изведба е поскапа од цилиндричната.

Кај испитните трансформатори, напонот на секундарната страна, т.е. напонот на испитниот објект  $U_i$  не можеме да го одредиме така што ќе го измериме напонот на примарната страна и ќе го поделиме со преносниот однос на трансформаторот. Причините за тоа ќе ги согледаме преку еквивалентната шема на сликата 5.3. Таму со  $U_0$  е означен напонот на секундарот на трансформаторот при празен од<sup>1</sup> за кој

<sup>1</sup>Кај испитните трансформатори за идеален празен од не може да стане збор затоа што помеѓу високонапонскиот извод и земјата секогаш постојат одредени растурни капацитети кои иако се





**Слика 5.3. Еквивалентна шема на испитниот трансформатор оптоварен со капацитативен товар**

важи  $U_0 = U'/m$  каде што  $U'$  е напонот на примарната намотка, а  $m$  е преносниот однос на трансформаторот.

Занемарувајќи го активниот отпор на намотките на трансформаторот тој во еквивалентната шема е претставен со својата реактанција

$$X_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (5.2)$$

додека испитниот објект е претсравен со својот капацитет  $C_i$ . Неговиот напон можеме да го одредиме според правилот за напонски делител на следниот начин

$$U_i = \frac{1/j\omega C_i}{jX_T + 1/j\omega C_i} U_0 = \frac{1}{1 - \omega X_T C_i} U_0 = a U_0 \quad (5.3)$$

Ќе го одредиме коефициентот  $a$  според релацијата (5.3) за еден пример на испитен трансформатор со следните номинални податоци:  $U_{1n} = 500 \text{ V}$ ,  $U_{2n} = 200 \text{ kV}$ ,  $S_n = 100 \text{ kVA}$  и  $u_k = 6\%$ . На секундарот на трансформаторот е приклучен испитен објект со капацитет  $C_i = 10 \text{ nF}$ .

Од податоците на трансформаторот можеме да ја пресметаме неговата реактанција  $X_T$  сведена на секундарната страна:

$$X_T = \frac{6}{100} \cdot \frac{200^2}{0,1} = 24.000 \Omega$$

и потоа пресметуваме

$$a = \frac{1}{1 - \omega X_T C_i} = \frac{1}{1 - 100 \cdot \pi \cdot 24 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 1,082$$

од каде што заклучуваме дека напонот ќе порасне за околу 8% во однос на напонот на празен од што не е за занемарување доколку сакаме да правиме прецизни мерења. Порастот на напон би бил уште поголем доколку се работи со трансформатор со помала номинална моќност затоа што реактанцијата  $X_T$  ќе биде поголема. Лесно може да се најде пример во кој порастот на напонот ќе биде  $10 \div 20\%$ .

Доколку го во претходните пресметки го земеме предвид и заштитниот отпорник, нека тој во случајов е  $R_z = 200 \text{ k}\Omega$ , за коефициентот  $a$ , повторно

поради високиот напон можат да предизвикаат течење на струја која не смееме да ја занемариме. Нив можеме да ги моделираме како паралелно поврзани кондензатори со испитниот кондензатор кој има капацитет  $C_i$ .

користејќи го правилото за напонски делител, се добива

$$\underline{a} = \frac{1}{1 - \omega X_T C_i + j\omega R_z C_i} = \frac{1}{1 - 100 \cdot \pi \cdot 24 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9} + j100 \cdot \pi \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 0,7399 - j0,5028$$

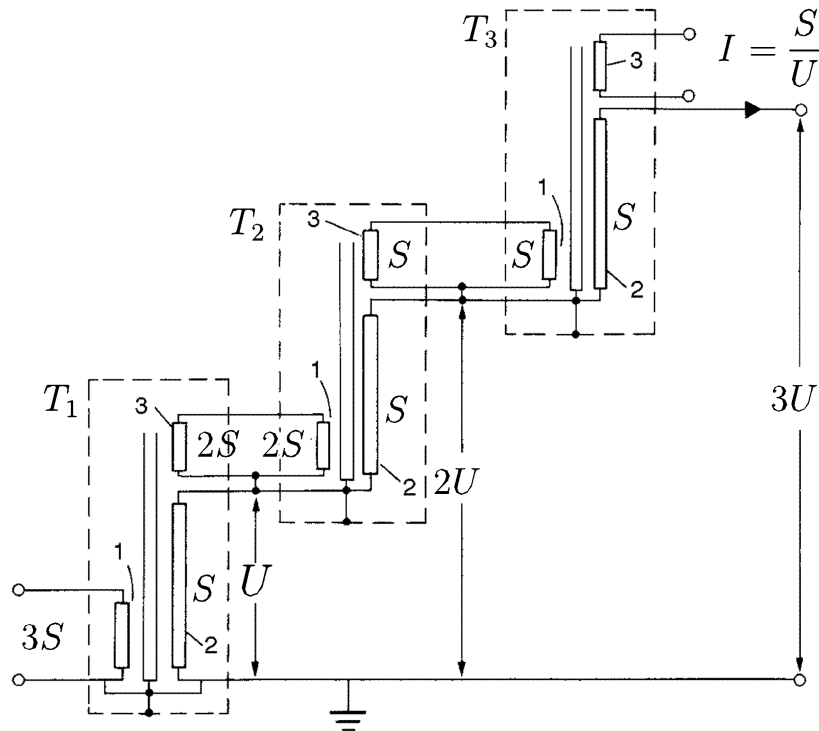
додека неговиот модул е  $a = \sqrt{0,7399^2 + 0,5028^2} = 0,895$ , што значи дека во овој случај ќе имаме за околу 10% понизок напон од напонот во празен од.

Од овие причини напонот на испитниот објект секогаш треба да го мериме директно, за што се користат мерно сферно искриште или соодветен напонски делител за што ќе стане збор подоцна.

За напони повисоки од околу 300 до 500 kV каскада од испитни трансформатори нуди предности во однос на единствен испитен трансформатор и тоа во поглед на решавање на проблемите со изолацијата и вкупната тежина на испитниот трансформатор. За да може да се примени каскада од трансформатори секој одделен трансформатор покрај примарна и секундарна намотка треба да има и трета возбудна намотка.

Принципот на поврзување на трансформатори во каскада е прикажан на сликата 5.4. Нисконапонското напојување е поврзано на примарната намотка на трансформаторот  $T_1$ , при што на секундарната намотка се добива напон  $U$ . Неговата возбудна намотка (означена со 3) ја напојува примарната намотка на трансформаторот  $T_2$  (двете намотки се направени за ист напон) кој исто така на секундарната намотка дава напон  $U$ . Секундарните намотки на трансформаторите  $T_1$  и  $T_2$  се поврзани сериски така што на горниот крај на секундарната намотка на трансформаторот  $T_2$  напонот во однос на земјата изнесува  $2U$ . На идентичен начин е поврзан трансформаторот  $T_3$  во однос на трансформаторот  $T_2$ . Со тоа на горниот крај од секундарната намотка на трансформаторот  $T_3$  се добива напон  $3U$ , додека куќиштата на трансформаторите  $T_2$  и  $T_3$  се наоѓаат под напон  $U$ , односно  $2U$ , во однос на земјата и според тоа треба да бидат соодветно изолирани.

Недостаток на каскадата од испитни трансформатори е големото оптоварување на примарните намотки на трансформаторите во долните делови од каскадата. На сликата 5.4 моќностите на сите намотки се означени со  $S$  помножени со соодветен фактор. За тристепена каскада излезната моќност е  $3S$ , при што секоја секундарна намотка дава моќност еднаква на  $S$ . Примарната намотка на трансформаторот  $T_2$  предава моќност  $2S$ , додека примарната намотка на трансформаторот  $T_3$  предава моќност  $3S$ , што соодветсува на бројот на трансформатори кои се напојуваат преку нив. Според тоа примарните намотки на долните два трансформатори треба да бидат димензионирани за двојна односно тројна моќност од номиналната моќност на секундарната намотка. Имајќи предвид дека моќностите при испитување на изолација на некој испитен објект се капацитивни можна е нивна компензација со поставување на индуктивитети паралелно со примарните намотки, но во тој случај треба да се води сметка дека тие треба да имаат можност за промена затоа што и капацитивната моќност ќе се менува пропорционално со капацитетот на испитуваниот објект и применетиот напон за испитување.



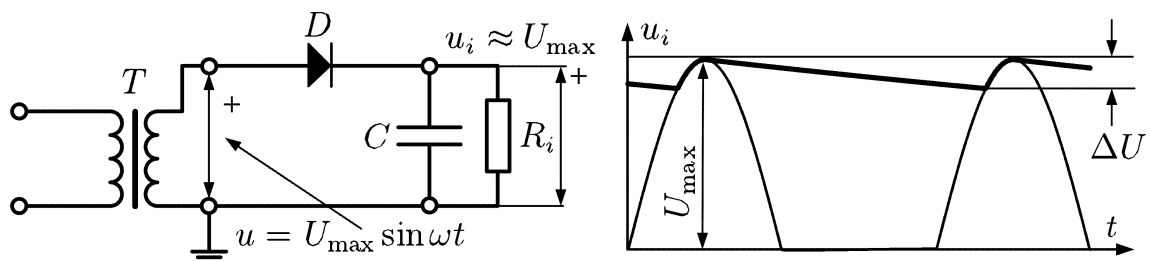
Слика 5.4. Каскада од испитни трансформатори

1) примарна намотка, 2) секундарна намотка, 3) терциерна возбудна намотка

## 5.2 Добивање на високи еднонасочни напони

Испитувањето на изоацијата со висок наизменичен напон со индустриска фреквенција е тешко изводливо кај испитни објекти со голем капацитет затоа што се потребни моќни, тешки и скапи уреди. На пример, испитувањето на изоацијата на енергетски кабли со наизменичен напон е практично неизводливо поради големата реактивна моќност која е потребна во тој случај.

Од таа причина многу се употребуваат уреди за испитување на изоацијата со еднонасочен напон<sup>2</sup>. До моментот на пробив во испитниот објект низ него тече само струја поради отпорноста на изоацијата, која што е многу голема, така што таа е од редот на  $\mu\text{A}$  или  $\text{mA}$  така што испитните уреди се со мала моќност и тежина и се лесно преносливи.



Слика 5.5. Полубранов насочувач

Принципиелната шема на испитен уред за еднонасочен напон е дадена на

<sup>2</sup>Под еднонасочен напон се подразбира напон кој не го менува поларитетот, но тоа не значи дека тој е временски константен.

сликата 5.5, каде што е прикажан полубранов насочувач кој се напојува со висок наизменичен напон преку трансформаторот  $T$ . Паралелно со испитниот објект, кој е прикажан со отпорот на изолација  $R_i$ , е поврзан кондензатор со капацитет  $C$  кој служи за пеглање на напонот така што се добива напонската форма на испитниот напон прикажана на десната страна од сликата. Често пати сервиски со диодата  $D$  се поврзува заштитетн отпорник кој треба да ја штити од преголеми струи на полнење на кондензаторот  $C$ , како и од струи на куси врски во случај на пробив во испитната изолација. Бидејќи се работи за релативно високи напони диодата се состои од сервиска врска на повеќе диоди со пониски номинални напони (неколку стотини волти), а за постигнување на рамномерна распределба на напонот на сервиската врска од диоди кога тие се поларизирани во инверзна насока паралелно со нив се поврзуваат соодветни отпорници. Ако максималниот вредност на наизменичниот напон изнесува  $U_{\max}$  тогаш диодата во инверзна насока треба да издржи напон еднаков на  $2U_{\max}$ .

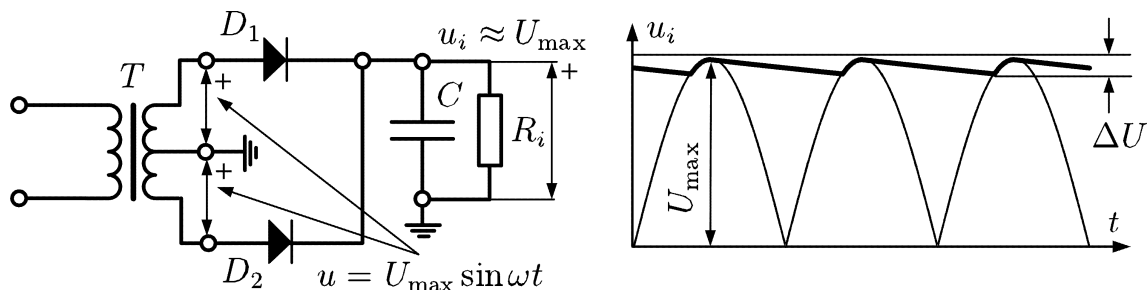
Добиениот напон не е временски константен туку тој има одредена брановидност која најмногу за вредност  $\Delta U$  му ја менува вредноста од величината  $U_{\max}$ . Ако претпоставиме дека во интервалот помеѓу два врва на напонот кондензаторот  $C$  се празни со константна струја (што е приближно точно), тогаш напон линеарно ќе опаѓа и за вредноста на неговиот пропад можеме да напишеме:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I \cdot T_v}{C} \quad (5.4)$$

каде што  $T_v$  е време помеѓу два врва од исправениот наизменичен напон. За полубрановиот насочувач ова време приближно изнесува  $T_v = 20 \text{ ms}$  при фреквенција од  $50 \text{ Hz}$ .

Претходната релација ни дава можност да ја одредиме големината на капацитетот  $C$  така што промената на еднонасочниот напон  $\Delta U$  нема да биде преголема. На пример ако правиме некое испитување со струја  $I = 1 \text{ mA}$ , при што сме избрале  $C = 1 \mu\text{F}$  може да се пресмета дека е  $\Delta U = 20 \text{ V}$  што е сосема занемарливо имајќи предвид дека испитните напони се од редот  $5 \div 10 \text{ kV}$ . Според тоа можеме да напишеме дека е  $u_i \approx U_{\max}$

Ако сакаме да добиеме уште порамномерен еднонасочен напон можеме да користиме целобранов насочувач во кој наизменичниот напон се користи во двете полупериоди (слика 5.6). Во тој случај важи  $T_v = 10 \text{ ms}$ , што значи дека промената на напон  $\Delta U$  ќе биде два пати помала.

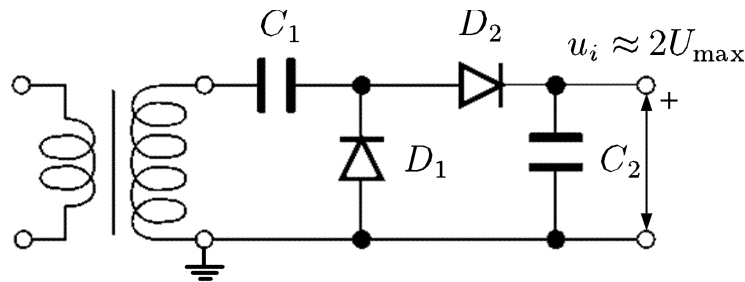


Слика 5.6. Целобранов насочувач

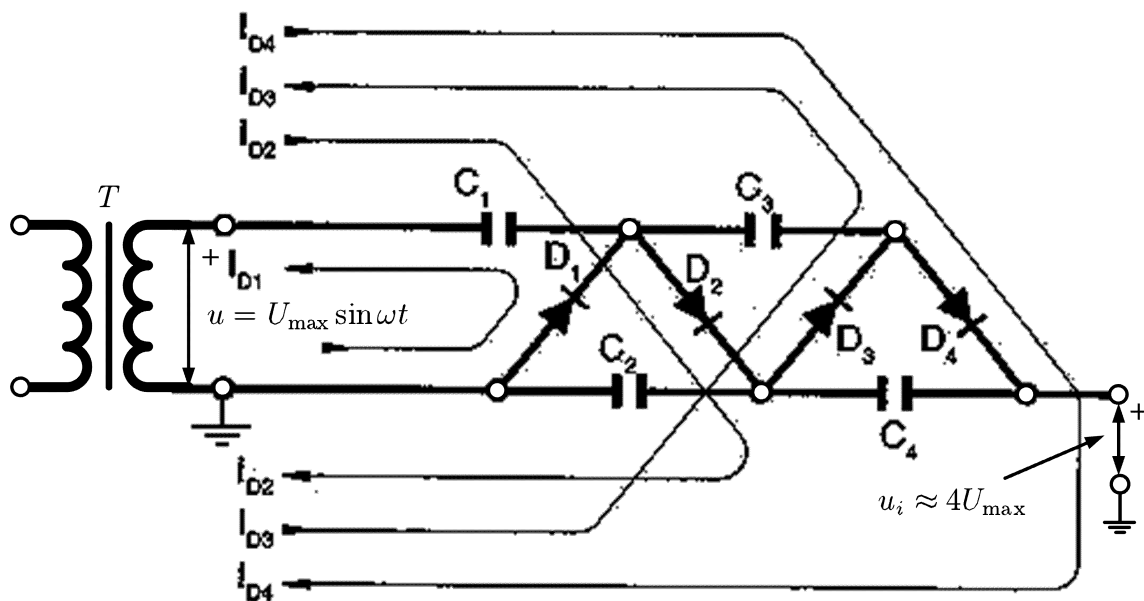
Ако се потребни повисоки испитни еднонасочни напони се користат каскадни шеми. Една од можните шеми за дуплирање на напонот е прикажана на сликата 5.7. Таа е позната под името напонски дупликатор на Грејнахер (Greinacher) –

швајцарски физичар кој во 1913 година сакал да добие напон од околу 300 V за својот јонометар (уред за мерење јонизирачки зрачења) користејќи ја напојната мрежа со наизменичен напон од 110 V.

Подоцна, истата шема каскадно поврзана, во 1932 година била користена од Кокрофт и Волтон (Cockcroft-Walton) за повеќекратно зголемување на напонот (слика 5.8). Тие високиот еднонасочен напон го користеле во акцелератор на атомски честички со што постигнале вештачко цепање на атоми што подоцна било потребно за производство на атомската бомба<sup>3</sup>.



Слика 5.7. Дупликатор на напон



Слика 5.8. Мултипликатор на напон

Каскадните шема ја елиминираат потребата од користење на гломазни трансформатори и наместо тоа користат само диоди и кондензатори, поради што се многу полесни, а овозможуваат од релативно ниски напони да се добијат многу високи еднонасочни напони.

На сликата 5.8 е прикажан двостепен мултипликатор на напон и неговиот принцип на работа може да се опише преку следните чекори:

1. Напонот на трансформаторот е  $u = -U_{\max}$ : Кондензаторот  $C_1$  се полни преку диодата  $D_1$  со струја  $I_{D1}$  до напон  $U_{\max}$ ,

<sup>3</sup>Кокрофт и Волтон во 1951 година добиле Нобелова награда за физика за Трансмутација на атомски јадра со помош на вештачки забрзани атомски честички.

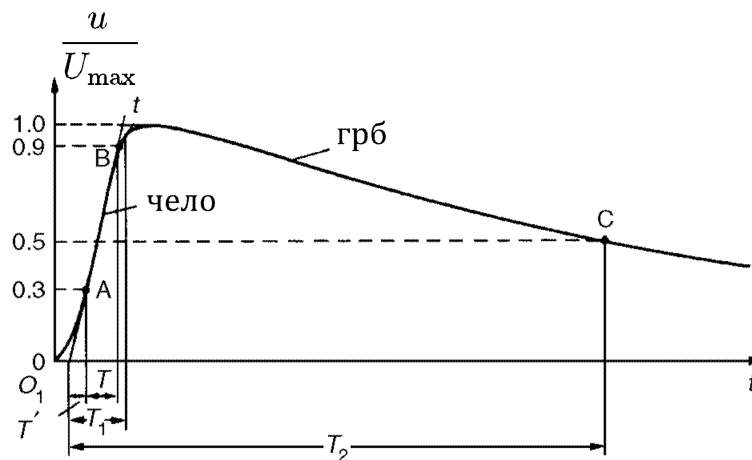
2. Напонот на трансформаторот е  $u = +U_{\max}$ : Напонот на трансформаторот  $U_{\max}$  е врзан во серија со напонот на кондензаторот  $C_1$  кој од чекорот 1 исто така изнесува  $U_{\max}$ , така што кондензаторот  $C_2$  се полни преку диодата  $D_2$  со струја  $I_{D2}$  до напон  $2U_{\max}$ ,
3. Напонот на трансформаторот е  $u = -U_{\max}$ : Кондензаторот  $C_3$  се полни преку диодата  $D_3$  со струја  $I_{D3}$  до напон  $2U_{\max}$ ,
4. Напонот на трансформаторот е  $u = +U_{\max}$ : Кондензаторот  $C_4$  се полни преку диодата  $D_4$  со струја  $I_{D4}$  до напон  $2U_{\max}$ .

Бидејќи излезниот напон е сума од напоните на кондензаторите  $C_3$  и  $C_4$  произлегува дека неговата вредност ќе изнесува  $4U_{\max}$ . Во праксата потребни се повеќе циклуси со наведените чекори за да се постигне полната вредност на напонот.

Во општ случај, ако бројот на степени во мултипликаторот на напон изнесува  $n$ , излезниот напон ќе биде  $2 \cdot n \cdot U_{\max}$ .

### 5.3 Добивање на импулсни напони

Високите импулсни напони имаат примена при проверката на изолацијата во поглед на нејзината цврстина при надворешни пренапони од атмосферско потекло. Обликот на импулсниот испитен напон е дефиниран според сликата 5.9. Импулсниот напон се состои од два дела: чело и грб, чиешто времетраења се означени со  $T_1$  и  $T_2$ . Покрај тоа тој е карактеризира со својата максимална вредност  $U_{\max}$ .

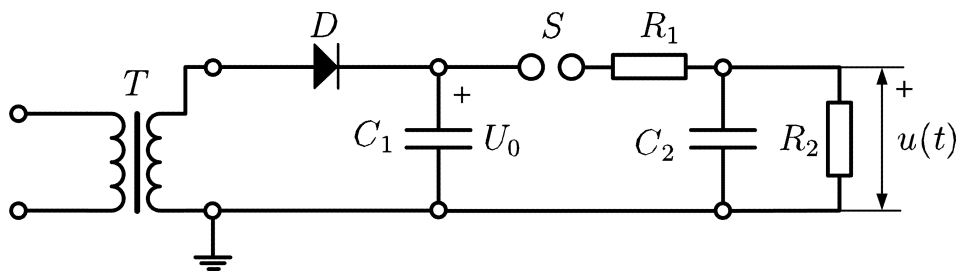


Слика 5.9. Стандарден облик на импулсен напон

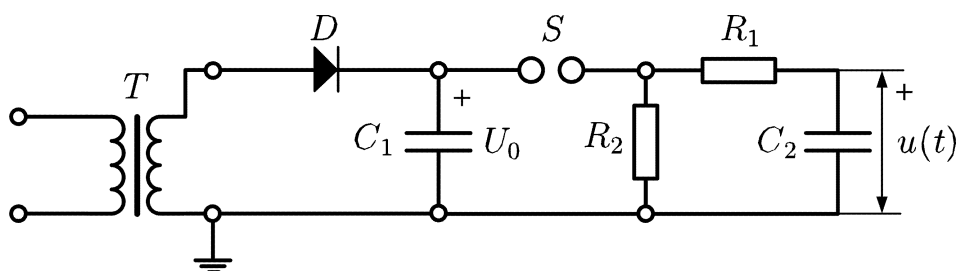
Времетраењето на челото е дефинирано како  $T_1 = 1,67 \cdot T$ , каде што  $T$  е време за коешто импулсниот напон достигнува вредност од  $0,3 \cdot U_{\max}$  до  $0,9 \cdot U_{\max}$  (точки A и B на сликата). Правата A-B ја сече хоризонталната оска во точката  $O_1$  која што се нарекува точка на условен почеток на импулсниот напон. Времињата  $T_1$  и  $T_2$  се мерат од таа точка. Времето на грбот е до моментот кога напонот по поминувањето на максималната вредност ќе опадне до вредност  $0,5 \cdot U_{\max}$ . Стандардниот импулсен напон ги има следните карактеристики  $T_1 = 1,2 \pm 0,36 \mu s$  и  $T_2 = 50 \pm 10 \mu s$ . Таквиот импулсен напон се означува со ознаката 1,2/50.

Добивањето на високи импулсни напони се прави со помош на генератори на импулсни напони. Две варијанти на принципиелната шема на такви генератори се

дадени на сликите 5.10 и 5.11. Во понатамошниот текст ќе се задржиме на анализа на колото според варијантата 1, додека за варијантата 2 на аналоген начин лесно може да се дојде до слични резултати.



Слика 5.10. Едностепен генератор на импулсни напони (варијанта 1)



Слика 5.11. Едностепен генератор на импулсни напони (варијанта 2)

Генераторот за импулсни напони се напојува со еднонасочен напон добиен со насочувач на висок наизменичен напон од трансформаторот  $T$ . Кондензаторот  $C_1$  се полни до напон  $U_0$ , а потоа откако ќе настане пробив на сферното искриште  $S$  тој преку отпорникот  $R_1$  го полни кондензаторот  $C_2$  и на крајот двата кондензатори се празнат преку отпорникот  $R_2$ .

Тоа значи дека времетраењето на челото ќе биде времето за кое кондензаторот  $C_2$  ќе се наполни до максималната вредност на напонот, односно тоа зависи од големините на  $R_1$  и  $C_2$ . Времетраењето на грбот зависи од брзината со која ќе се испразнат кондензаторите, на што највеќе влијаат големините на  $R_2$  и  $C_1$ .

Секако дека процесите на полнење и празнење на кондензаторите не се независни еден од друг туку тие се случуваат едновремено и за да го добиеме обликот на напонот  $u(t)$ , колото треба целокупното да го решиме користејќи некој од методите од теорија на електрични кола.

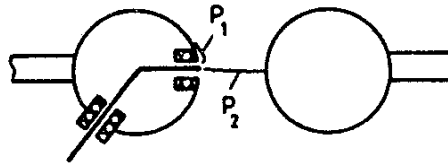
Кај генераторите на импулсни напони секогаш е  $R_2 \gg R_1$  и  $C_1 \gg C_2$ .

За да се добие импулсен напон прво е потребно да настане пробив во сферното искриште  $S$ . За таа цел се користат два начина:

1. Растојанието помеѓу двете сфери се прави доволно големо така што напонот на пробив е за околу 10% повисок од  $U_0$ . Потоа, од посебен извор на напон се додава краткотраен импулс со посебна електрода вградена во една од сферите (слика 5.12). Тој импулс создава празнење меѓу дополнителната електрода и сферата (означено со  $P_1$ ), а потоа настанува главното празнење меѓу сферите (означено со  $P_2$ ). Со помош на посебни електронски кола може да се инјектираат неколку импулси на точно одредени временски интервали, при што со првите импулси се прави вклучување на мерните кола (импулсни волтметри, осцилоскопи, фотографски апарати), додека со последниот импулс

се предизвикува празнење помеѓу сферите со што се генерира посакуваниот импулсен напон,

2. Се поставува одредно растојание меѓу сферите и напонот на полнење  $U_0$  постепено се подига се додека не настане пробив. На тој начин не е можно да се контролира точниот момент кога ќе се добие импулсниот напон и тој се користи кај импулсни генератори од постар тип.



Слика 5.12. Уред за управување со моментот на пробив на сферното искриште

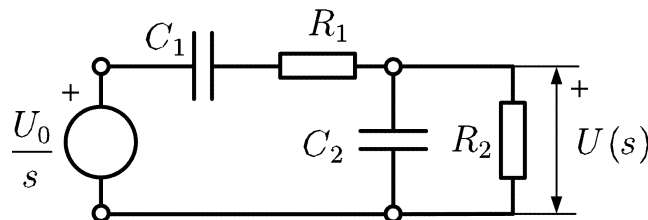
Пред да почнеме со анализата на колото само ќе наведеме дека најбитен параметар со кој се карактеризира еден импулсен генератор е енергијата која што е складирана во него пред да го генерира импулсот. Таа изнесува

$$W = \frac{1}{2} C_1 U_0^2 \quad (5.5)$$

и ако сакаме да имаме генератор со голема складирана енергија тогаш треба да имаме поголем кондензатор  $C_1$ , а бидејќи е тој доста поголем од кондензаторот  $C_2$  следува дека неговата големина ќе биде доминантна во вкупните трошоци за изработка на генераторот.

### Анализа во лапласов домен

По настанување на пробив кај сферното искриште  $S$  тоа можеме да го сметаме за куса врска така што за импулсниот генератор можеме да го користиме еквивалентното коло според сликата 5.13. Еквивалентното коло е нацртано во лапласов домен, каде што почетната вредност на напонот на кондензаторот  $C_1$  е прикажана со напонски генератор (поврзан редно со  $C_1$ ) со константен напон  $U_0$  чија што лапласова трансформација е  $U_0/s$ .



Слика 5.13. Еквивалентно коло на генераторот на импулсни напони во лапласов домен (за варијантата 1)

Во еквивалентното коло лесно се воочливи две импеданции од кои првата  $Z_1$  се состои од редна врска на  $R_1$  и  $C_1$ , додека втората  $Z_2$  се состои од паралелна врска на  $R_2$  и  $C_2$ . За нив можеме да напишеме



$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{C_1 s}$$

$$Z_2 = \frac{1}{R_2^{-1} + C_2 s} = \frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1}$$

а понатаму користејќи го правилото за напонски делител за напонот  $U$  го добиваме следниот израз:

$$U(s) = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{U_0}{s} = \frac{R_2 C_1 U_0}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1) s + 1} \quad (5.6)$$

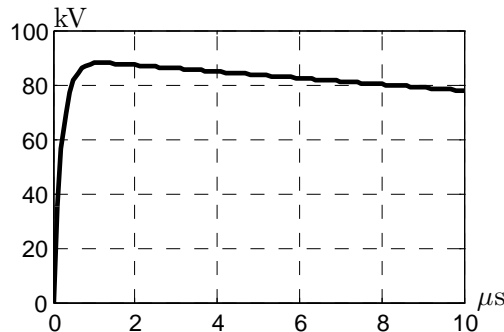
Ќе разгледаме конкретен случај со следните податоци:  $R_1 = 50 \Omega$ ,  $C_1 = 63 \text{ nF}$ ,  $R_2 = 1000 \Omega$ ,  $C_2 = 4,5 \text{ nF}$  и  $U_0 = 100 \text{ kV}$ ; со што за напонот  $U$  можеме да напишеме:

$$U(s) = \frac{6,3}{1,4175 \cdot 10^{-11} s^2 + 7,065 \cdot 10^{-5} s + 1}$$

Временската промена на напонот  $u(t)$  можеме да ја добиеме со инверзна лапласова трансформација за што е користена симболичка математика во Matlab според програмата 5.1. На таков начин го добиваме следниот израз

$$u(t) = 89,683 \cdot 10^3 \left( e^{-t/7,045 \cdot 10^{-5}} - e^{-t/2,012 \cdot 10^{-7}} \right)$$

чиј што облик е даден на следната слика



Слика 5.14. Облик напонот на кондензаторот  $C_2$  за разгледуваниот пример

#### Програма 5.1. Инверзна лапласова трансформација за импулсен генератор

```

1 syms s
2 U = 6.3/(1.4175e-011*s^2 + 7.065e-005*s + 1);
3 U = vpa(U, 10);
4 u = ilaplace(U);
5 f = inline(char(u));
6 fplot(f, [0 10e-6]);
7 t_max = solve(diff(u))
8 U_max = f(t_max)

```

За да одредиме колкав е максималниот напон и во кој момент се јавува правиме прв извод на напонот по време и ја решаваме равенката која е добиена на тој начин (линија 7 од програмата). Така добиваме дека моментот кога напонот е максимален е  $t_{\max} = 1,18 \mu\text{s}$ . Потоа едноставно го пресметуваме напонот за тој временски момент и добиваме  $U_{\max} = 87,939 \text{ kV}$ .

Од решението е очигледно дека напонот има двоен експоненцијален облик чии временски константи зависат од параметрите на колото. Во општ случај изразот за напонот  $u(t)$  е

$$u(t) = U_0' \left( e^{-t/T'} - e^{-t/T''} \right) \quad (5.7)$$

Со одредување на нулите на полиномот во именителот на (5.6) се одредуваат сопствените фреквенции на колото, додека временските константи  $T'$  и  $T''$  се нивни негативни реципрочни вредности, т.е.  $T' = -1/s_1$  и  $T'' = -1/s_2$ . Може да се покаже дека тие се дадени со прилично комплицирани изрази

$$\begin{aligned} T' &= \frac{2R_1R_2C_1C_2}{(R_1 + R_2)C_1 + R_2C_2 - \sqrt{[(R_1 + R_2)C_1 + R_2C_2]^2 - 4R_1R_2C_1C_2}} \\ T'' &= \frac{2R_1R_2C_1C_2}{(R_1 + R_2)C_1 + R_2C_2 + \sqrt{[(R_1 + R_2)C_1 + R_2C_2]^2 - 4R_1R_2C_1C_2}} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Во литературата може да се најдат поедноставни приближни изрази во следната форма

$$\begin{aligned} T' &= (R_1 + R_2)(C_1 + C_2) \\ T'' &= \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} \end{aligned} \quad (5.9)$$

кои може уште да се упростат ако се земе предвид дека е  $R_2 \gg R_1$  и  $C_1 \gg C_2$ , така што се добива

$$\begin{aligned} T' &= R_2C_1 \\ T'' &= R_1C_2 \end{aligned} \quad (5.10)$$

За примерот кој го разгледувавме со (5.8) се добива  $T' = 7,045 \cdot 10^{-5} \text{ s}$  и  $T'' = 2,012 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ , со (5.9) се добива  $T' = 7,088 \cdot 10^{-5} \text{ s}$  и  $T'' = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ , додека со (5.10) се добива  $T' = 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}$  и  $T'' = 2,25 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ .

Познавајќи ги временските константи можеме да го пресметаме моментот кога импулсниот напон ќе има максимална вредност

$$t_{\max} = \frac{\ln(T'/T'')}{1/T' - 1/T''} \quad (5.11)$$

Времетраењето на челото и грбот можат да се пресметаат преку временските константи  $T'$  и  $T''$  на следниот начин

$$\begin{aligned} T_1 &= 3,24 \cdot T'' \\ T_2 &= 0,69 \cdot T' \end{aligned} \quad (5.12)$$

На крајот ќе наведеме дека максималната вредност на напонот на импулсниот генератор  $U_{\max}$  може да се пресмета преку напонот на полнење  $U'_0$  на следниот начин

$$U_{\max} = kU'_0 \quad (5.13)$$

каде што

$$k = \left(\frac{T''}{T'}\right)^{T''/(T'-T'')} - \left(\frac{T''}{T'}\right)^{T'/(T'-T'')} \quad (5.14)$$

Коефициентот  $k$  е секогаш помал од 1 и во разгледуваниот пример тој изнесува 0,981.

За импулсните генератори се дефинира и коефициент на искористување на напонот  $\eta$  на следниот начин

$$\eta = \frac{U_{\max}}{U_0} \quad (5.15)$$

кој исто така е помал од 1 и во разгледуваниот пример изнесува 0,879. Овој коефициент можеме да го пресметаме на следниот начин

$$\eta = \frac{T'T''}{R_1C_2(T'' - T')} \left[ \left(\frac{T'}{T''}\right)^{T'/(T''-T')} - \left(\frac{T'}{T''}\right)^{T''/(T''-T')} \right] \quad (5.16)$$

односно ако се земат предвид упростувањата како и претходно се добива

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (5.17)$$

## Анализа преку диференцијални равенки

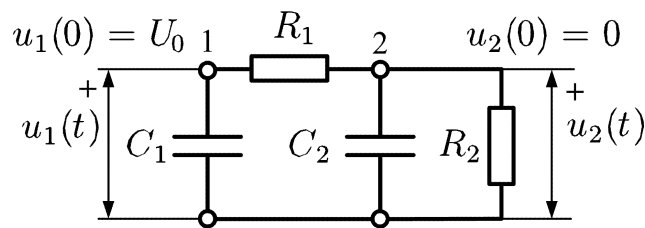
Решенијата на диференцијалните равенки се функции со кои што е дадена временската промена на одредена големина како што е напон или струја. Егзактното решавање на диференцијалните равенки кон кое секогаш се тежнее во математиката (или примената на Лапласовата трансформација како во претходната секција), ги дава овие функции во аналитички облик, односно дава сложени изрази од независната променлива (време) со која што е опишана промената на одредена величина. Инженерскиот пристап кон добивањето на решението ќе биде поинаков затоа што нас ни е сосема доволно да го познаваме решението дадено во нумерички облик од кој што можеме да ги извлечеме сите потребни заклучоци. Нумеричкото решение е дадено во еден или повеќе вектори кои што содржат нумерички вредности на функциите кои што ги бараме за одредени вредности на независната променлива (одредени временски моменти). Од тие вектори можеме да заклучиме дали одредена величина (напон или струја) има осцилаторна или апериодична промена, како и дали нејзината максимална вредност претставува опасност за некоја опрема или уред (пренапони или ударни струи).

Во Matlab постојат повеќе методи за нумеричко решавање на системи диференцијални равенки од прв ред како што се ode23, ode45, ode113, ode15s, ode23s, ode23t и ode23tb. Тука, преку пример, ќе ја разгледаме примената на функцијата ode45 за решавање на системи диференцијални равенки од прв ред од следниот облик

$$\begin{aligned}
 \frac{dy_1}{dt} &= f_1(t, y_1, y_2, \dots, y_n) \\
 \frac{dy_2}{dt} &= f_2(t, y_1, y_2, \dots, y_n) \\
 &\vdots \\
 \frac{dy_n}{dt} &= f_n(t, y_1, y_2, \dots, y_n)
 \end{aligned}
 \tag{5.18}$$

од каде што се забележува дека диференцијалните равенки треба да бидат напишани на таков начин што од левата страна ќе бидат дадени првите изводи на зависните променливи  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , додека од десната страна може да има изрази (функции) од произволен облик (не само линеарен) кој што може да ги содржи сите зависни променливи како и независната променлива  $t$ .

Кога се пишуваат диференцијални равенки за едно електрично коло се практикува за независни променливи да се одберат напоните на кондензаторите и струите во калемите. Тоа може да се постигне со примена на основните равенки за електрични кола или некој од методите изведени од нив.



**Слика 5.15. Еквиваленто коло за одредување на диференцијалните равенки на генераторот на импулсни напони (за варијантата 1)**

Бидејќи веќе го имаме еквивалентното коло во лапласов домен (слика 5.15) за него ќе напишеме матрична равенка според методот на независни напони која гласи

$$\begin{bmatrix} R_1^{-1} + C_1 s & -R_1^{-1} \\ -R_1^{-1} & R_1^{-1} + R_2^{-1} + C_2 s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

додека во развиена форма во која од левата страна ги оставаме само членовите  $sU_1$  и  $sU_2$  имаме

$$\begin{aligned}
 sU_1 &= \frac{U_2 - U_1}{R_1 C_1} \\
 sU_2 &= \frac{U_1 - U_2}{R_1 C_2} - \frac{U_2}{R_2 C_2}
 \end{aligned}$$

Како што е познато, множењето со  $s$  во лапласов домен е еквивалентно на прв извод по време во временски домен. Според тоа диференцијалните равенки со кои е опишано колото на импулсниот генератор се

$$\begin{aligned}
 \frac{du_1}{dt} &= \frac{u_2 - u_1}{R_1 C_1} \\
 \frac{du_2}{dt} &= \frac{u_1 - u_2}{R_1 C_2} - \frac{u_2}{R_2 C_2}
 \end{aligned}
 \tag{5.19}$$

За да го решиме системот диференцијални равенки (5.19) е потребно да дефинираме посебна функцијата во Matlab со која што ќе ги зададеме десните страни од двете диференцијални равенки од системот. Функцијата има име `imp_gen` и е дадена со програмата 5.2.

**Програма 5.2. Диференцијалните равенки на импулсниот генератор**

```

1 function dudt = imp_gen(t,u,R_1,C_1,R_2,C_2)
2 dudt = [
3     (u(2) - u(1))/(R_1*C_1)
4     (u(1) - u(2))/(R_1*C_2) - u(2)/(R_2*C_2)
5 ];

```

Системот диференцијални равенки се решава со програмата 5.3, каде што во редицата 4 се користи функцијата `ode45` во која прво се задава името на функцијата `imp_gen`, потоа временскиот интервал за којшто сакаме да ја добиеме промената на напонот и по него почетните вредности за двата напона. Бидејќи не користиме никакви посебни нагодувања за `ode45` следува една празна матрица `[]` и на крајот се дадени четири параметри со кои е опишано колото.

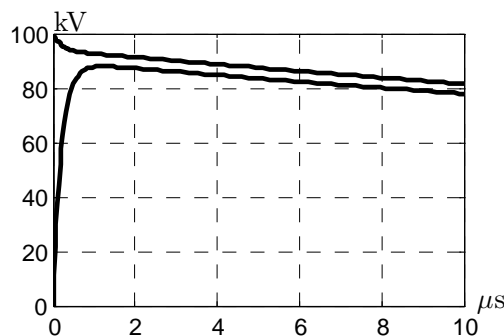
**Програма 5.3. Решение на диференцијалните равенки на импулсниот генератор**

```

1 R_1 = 50;    C_1 = 63e-9;
2 R_2 = 1000; C_2 = 4.5e-9;
3 U_0 = 100e3;
4 [t, u] = ode45(@imp_gen, [0 10e-6], [U_0 0], [], R_1, C_1, R_2, C_2);
5 plot(t, u);
6 [U_max, i] = max(u(:,2));
7 t_max = t(i)

```

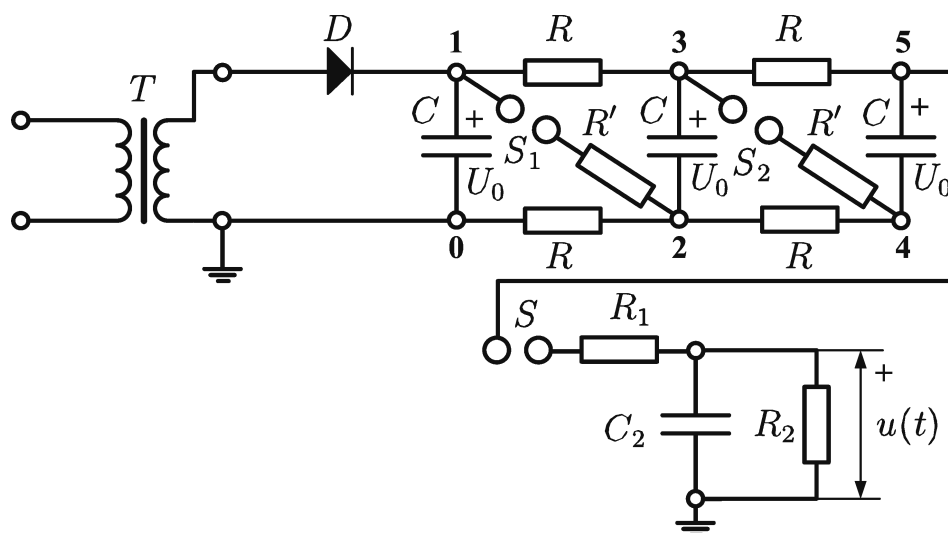
Како решение го добиваме векторот  $t$  и матрицата  $u$  која што има две колони кои одговараат на двата непознати напони. Нивниот изглед е даден на сликата 5.16 каде што повисоката крива е за напонот  $u_1$ . Со последните две наредби од програмата ја одредуваме максималната вредност на напонот  $u_2$  и временскиот момент  $t_{\max}$  кога напонот ја достигнува својата максимална вредност.



Слика 5.16. Облици на напоните на кондензаторите  $C_1$  и  $C_2$

## Генератори на импулсни напони со повеќе степени

Едностепените генератори на импулсни напони се користат за релативно ниски напони во опсегот  $100 \div 200 \text{ kV}$ . За повисоки напони се користат повеќестепените генератори чиј принцип на работа е прикажан на сликата 5.17 каде што е прикажан тристепен генератор. Тие се употребени од германецот Маркс (Marx) во 1924 година и затоа се познати под името генератори на Маркс<sup>4</sup>.



Слика 5.17. Генератор на импулсни напони со три степени

Повеќестепенитот генератор се разликува од едностепенитот по тоа што кондензаторот  $C_1$  се состои од повеќе кондензатори, со еднаков капацитет  $C$ , кои се полнат паралелно до ист напон, а потоа се поврзуваат сериски пред да започне нивното празнење. Нивното полнење се прави со полубранов насочувач при што кондензаторите се поврзани паралелно преку отпорници со отпорност  $R$ . Од вредноста на  $R$  зависи времето на полнење на кондензаторите и тие обично имаат неколку десетици  $\text{k}\Omega$  така што во зависност од големината на  $C$  кондензаторите ќе се наполнат до напон  $U_0$  за време од неколку секунди до најмногу една минута. Во тој момент потенцијалите на точките 1, 3 и 5 достигнуваат вредност  $U_0$ , додека точките 0, 2 и 4 се на потенцијал еднаков на нула.

Во моментот кога потенцијалот на точката 1 ќе ја надмине вредноста на пробивниот напон на сферното искриште  $S_1$  тоа ќе пробие со што практично кусо ќе ги спои точките 1 и 2 (вредноста на отпорникот  $R'$  е во опсегот  $10 \div 50 \Omega$ ). Со тоа потенцијалот на точката 2 постанува еднаков на  $U_0$ , а првиот кондензатор е поврзан паралелно со отпорникот  $R$  и на прв поглед изгледа дека тој ќе се испразни. Тој навистина се празни, но поради големата вредност на  $R$  празнењето е толку споро што скоро е незабележливо во текот на работа на генераторот на импулсни напони кој работи со импулси од редот на микросекунди.

По пробивањето на  $S_1$  потенцијалот на точката 3 станува еднаков на  $2U_0$ , бидејќи како што кажавме точката 2 е на потенцијал еднаков на  $U_0$ , а на нејзиниот потенцијал се додава напонот на вториот кондензатор кој исто така е еднаков на  $U_0$ . Или поинаку кажано потенцијалот на точката 3 е еднаков на сумата на напони

<sup>4</sup> Според одредени руски автори генераторот московскиот професор Аркадиев (Аркадџев) направил уште во 1914 година.

на првите два кондензатори од импулсниот генератор. Понатаму доаѓа до пробив на сферното искриште  $S_3$  со што потенцијалот на точката 4 станува еднаков на  $2U_0$ , а потенцијалот на точката 5 добива вредност  $3U_0$ .

Кога би имале генератор со  $n$  степени потенцијалот на горната електрода од последниот кондензатор би бил  $nU_0$ , а по пробивот на сите сферни искришта ќе имаме редна врска од  $n$  идентично кондензатори така кои може да се еквивалентираат со еден со капацитет

$$C_1 = \frac{C}{n} \quad (5.20)$$

Со тоа повеќестепениот импулсен генератор се сведува на еквивалентата шема на едностепениот генератор (слика 5.10) со капацитет  $C_1$  даден со горната формула и почетен напон еднаков на  $nU_0$ . Според тоа анализата на повеќестепениот импулсен генератор можеме да ја направиме на истиот начин и со истите методи кои ги разгледавме во претходните две потпоглавја.

Вкупната енергија која може да се ослободи од повеќестепениот импулсен генератор може да се пресмета на следниот начин.

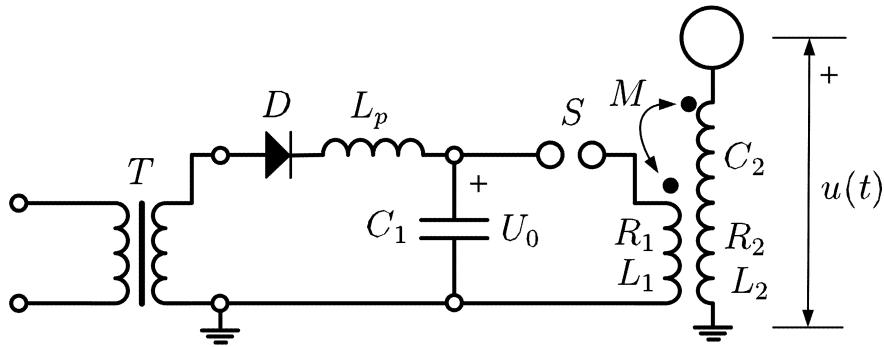
$$W = n \frac{CU_0^2}{2} = \frac{C_1(nU_0)^2}{2} \quad (5.21)$$

## 5.4 Добивање на високи наизменични напони со висока фреквенција

Високите наизменични напони со висока фреквенција имаат примена за напојување кола за добивање еднонасочни напони со што се добива помала брановидност на еднонасочниот напон, како и за тестирање на високонапонска опрема со вклопни пренапони кои по својата природа се придушени осцилации со фреквенција од редот на kHz. Предноста на трансформаторите за висока фреквенција е

- Намотките се без железно јадро со што трошоците за изработка и гломазноста на трансформаторите е значително намалена,
- Напоните се добиваат од осцилаторни кола кои природно даваат чисто синусни форми (подолу ќе видиме дека се добиваат осцилации со две фреквенции),
- Напоните постепено го достигнуваат максимумот по неколку периоди со што има помала можност за оштетување на изолацијата на испитуваниот објект.

Најчесто употребуван трансформатор за добивање високи наизменични напони со висока фреквенција е Теслиниот трансформатор кој за прв пат е конструиран во 1891 година. Тој се одликува со многу едноставна конструкција и се состои од две осцилаторни резонантни кола кои се шематски прикажани на сликата 5.18. Примарното коло се состои од кондензаторот  $C_1$  и калемот  $L_1$  кој има отпорност  $R_1$ , додека секундарното коло го сочинуваат калемот  $L_2$  (со активна отпорност  $R_2$ ) и кондензаторот  $C_2$  кој всушност не е посебно поставен кондензатор како на примарот туку тој се состои од паразитскиот капацитет помеѓу навивките на секундарната намотка и од капацитетот на сферата која се наоѓа на врвот на намотката.



Слика 5.18. Теслин трансформатор напојуван со еднонасочен напон

Примарниот кондензатор се полни до напон  $U_0$  преку извор на еднонасочен напон<sup>5</sup> кој кога ќе стане доволно висок ќе предизвика пробив во искриштетот  $S$  со што се затвора осцилаторното коло  $C_1 - L_1$  во кое започнуваат осцилации со фреквенција

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

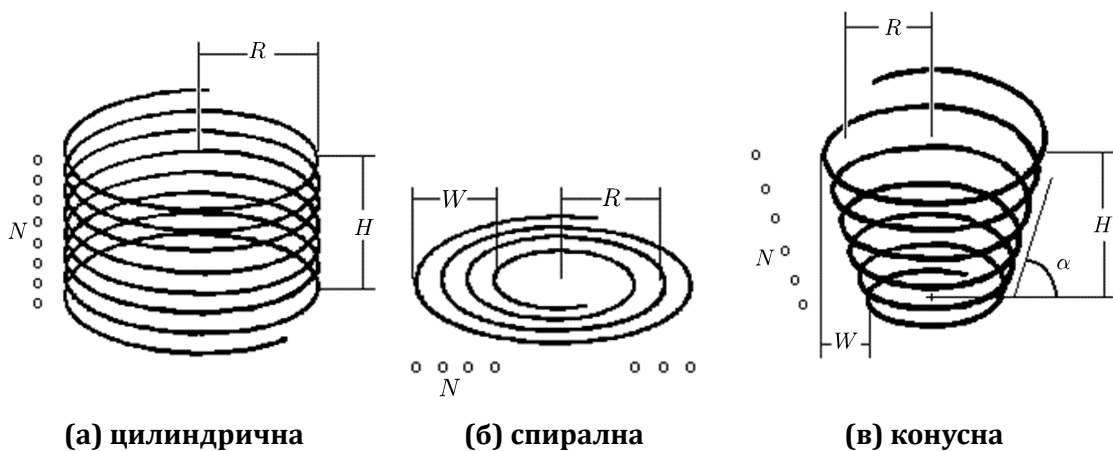
кои поради индуктивната спрега на двете намотки се пренесуваат во секундарното коло кое има резонантна фреквенција

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

За време на пробивот на искриштетот  $S$  напојното коло е практично кусо врзано преку калем со мала индуктивност и отпорност (примарниот) и за да не дојде до негово оштетување сериски е поврзана придушницата  $L_p$ .

При изработка на трансформаторот се тежи да биде исполнето  $f_1 \approx f_2$  со што напонот на секундарот поради појавите на резонанција ќе биде многукратно повисок од напонот на примарот. Примарниот напон е од редот на 10 kV, додека на секундарот може да се добија напони од 500 до 1000 kV.

Намотките на трансформаторот може да имаат една од формите дадени на сликата 5.19.



Слика 5.19. Видови намотки кај теслиниот трансформатор

<sup>5</sup>Можна е и варијанта со напојување директно со наизменичен напон со индустриска фреквенција што било применувано во времето на Тесла затоа што тогаш немале полупроводнички елементи за насочување на напонот.



Примарната намотка е направена од неколку навивки од жица со голем пречник и може да има една од трите наведени форми, при што најчесто се користи спиралата или конусната форма. Секундарната намотка е со илјадници навивки од жица со мал пречник и секогаш има цилиндрична форма. Индуктивитетот на трите вида намотки се пресметува со формулите (5.22) - (5.23) соодветно, при што значењето на димензиите е дадено на сликата 5.19 и тие се изразуваат во см. Пресметаната вредност за индуктивноста е изразена во  $\mu\text{H}$ .

$$L_c = \frac{N^2 R^2}{2,54 \cdot (9R + 10H)} \quad (5.22)$$

$$L_s = \frac{N^2 R^2}{2,54 \cdot (8R + 11W)} \quad (5.23)$$

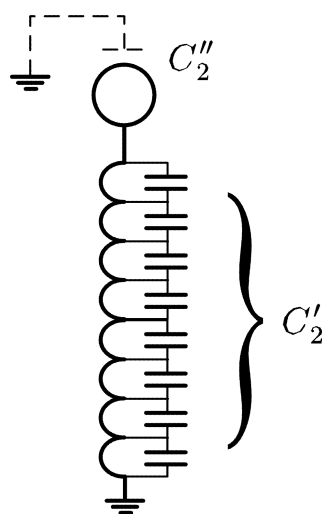
$$L_k = \sqrt{(L_c \sin \alpha)^2 + (L_s \cos \alpha)^2} \quad (5.24)$$

Меѓусебната индуктивноста помеѓу примарната и секундарната намотка можеме да ја пресметаме на следниот начин

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (5.25)$$

каде што  $k$  е коефициентот на спрега помеѓу намотките.

На сликата 5.20 е прикажано еквивалентно коло за капацитетот на секундарната страна на трансформаторот. Тој се состои од паразитскиот капацитет помеѓу навивките на секундарната намотка  $C'_2$  и капацитетот на топката  $C''_2$ .



**Слика 5.20. Капацитет помеѓу навивките на секундарната намотка и капацитет на топката**

Паразитскиот капацитет на секундарната намотка изнесува

$$C'_2 = 0,114L + 0,161R + 0,764\sqrt{\frac{R^3}{H}} \quad (5.26)$$

при што тој е изразен во pF, додека сите димензии се изразени во см.

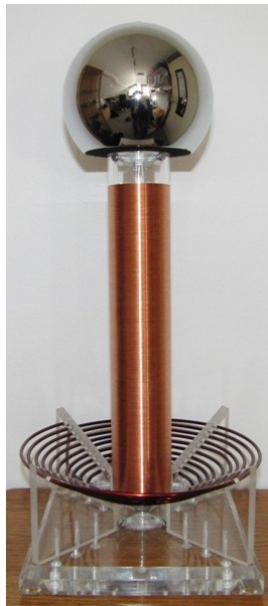
Како што е познато капацитетот на осамена сфера изнесува  $4\pi\epsilon_0 R$ . Имајќи предвид дека е  $\epsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi)$  и ако радиусот на сферата го изразиме во mm, тогаш за нејзиниот капацитет во pF ќе го добиеме следниот едноставен израз

$$C_2'' = \frac{R}{9} \quad (5.27)$$

Вкупниот капацитет на секундарот на трансформаторот изнесува

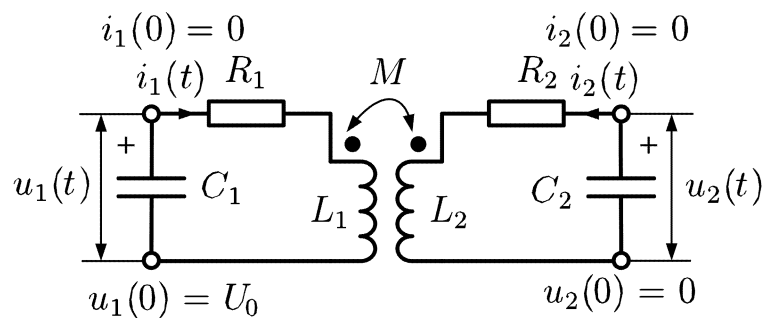
$$C_2 = C_2' + C_2'' \quad (5.28)$$

На следната слика е прикажан изгледа на еден мал теслин трансформатор (висок е околу 50 cm) кој подолу ќе го анализираме и ќе видиме дека тој е во состојба да генерира многу високи напони.



**Слика 5.21. Изглед на теслиниот трансформатор (без напојниот дел и примарниот кондензатор)**

За анализа на трансформаторот ќе се послужиме со еквивалентното коло од сликата 5.22 каде во моментот  $t = 0$  примарниот кондензатор е наполнет до напон  $U_0$  и во колото започнуваат осцилациите.



**Слика 5.22. Еквивалентно коло на теслиниот трансформатор**

Бидејќи во колото има четири реактивни елементи (по два кондензатори и калеми) ќе ни бидат потребни четири диференцијални равенки од прв ред за да

можеме да го решиме. Тие се дадени како што следува

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{du_1}{dt} &= -i_1 \\
 C_2 \frac{du_2}{dt} &= -i_2 \\
 u_1 - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} &= 0 \\
 u_2 - R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{5.29}$$

каде што првите две се равенки за струите во кондензаторите, а другите две се равенки за контурите на примарот и секундарот на трансформаторот. Со нивно преуредување добиваме равенки во форма погодна за решавање во Matlab:

$$\begin{aligned}
 \frac{du_1}{dt} &= -\frac{i_1}{C_1} \\
 \frac{du_2}{dt} &= -\frac{i_2}{C_2} \\
 \frac{di_1}{dt} &= \frac{L_2(u_1 - R_1 i_1) - M(u_2 - R_2 i_2)}{L_1 L_2 - M^2} \\
 \frac{di_2}{dt} &= \frac{L_1(u_2 - R_2 i_2) - M(u_1 - R_1 i_1)}{L_1 L_2 - M^2}
 \end{aligned}
 \tag{5.30}$$

Фунцкијата со која се опишани десните страни од диференцијалните равенки на теслиниот трансформатор е дадена со програмата 5.4. Во неа ознаките на променливите се  $u_1 = y_1$ ,  $u_2 = y_2$ ,  $i_1 = y_3$  и  $i_2 = y_4$ . Решението на равенките при  $R_1 = 0,05 \Omega$ ,  $L_1 = 15,5 \mu\text{H}$ ,  $C_1 = 10 \text{ nF}$ ,  $R_2 = 62 \Omega$ ,  $L_2 = 9,374 \text{ mH}$ ,  $C_2 = 17,2 \text{ pF}$ ,  $k = 0,2$  и  $U_0 = 10\sqrt{2} \text{ kV}$  е дадено со програмата 5.5.

#### Програма 5.4. Диференцијалните равенки на теслиниот трансформатор

```

1 function dydt = tesla_tr(t,y,R_1,L_1,C_1,R_2,L_2,C_2,M)
2 dydt = [
3     -1/C_1*y(3)
4     -1/C_2*y(4)
5     (L_2*(y(1)-R_1*y(3))-M*(y(2)-R_2*y(4)))/(L_1*L_2-M^2)
6     (L_1*(y(2)-R_2*y(4))-M*(y(1)-R_1*y(3)))/(L_1*L_2-M^2)
7     ];

```

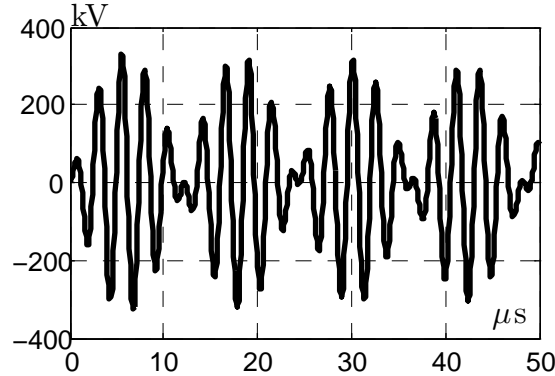
#### Програма 5.5. Решение на диференцијалните равенки на теслиниот трансформатор

```

1 R_1 = 0.05; L_1 = 15.5e-6; C_1 = 10e-9;
2 R_2 = 62; L_2 = 9.374e-3; C_2 = 17.2e-12;
3 k = 0.2;
4 U_0 = 10e3*sqrt(2);
5 M = k * sqrt(L_1*L_2);
6 [t, y] = ode45(@tesla_tr,[0 50e-6],[U_0 0 0 0],[],R_1,L_1,C_1,
7     R_2,L_2,C_2,M);
8 plot(t,y(:,2));
9 [U_max, i] = max(abs(y(:,2)))
t_max = t(i)

```

Обликот на напонот на секундарот од трансформаторот е даден на сликата 5.23. Од програмата добиваме дека неговата максимална вредност изнесува  $U_{2,\max} = 331,3 \text{ kV}$  во временскиот момент  $t_{2,\max} = 5,6 \mu\text{s}$ . Може да се покаже дека ако коефициентот на спрега  $k$  е голем фреквенцијата опаѓа, а ако уште и отпорностите на намотките се големи тогаш ќе се добие само еден аperiодичен имплус.



**Слика 5.23. Облик на напонот на секундарната намотка на теслиниот трансформатор**

Од обликот на напонот се насетува дека тој се состои од две придушени осцилации со различни фреквенции. За да ги пресметаме тие фреквенции како и времето за кое осцилациите ќе исчезнат треба да ги одредиме сопствените вредности на матрицата

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1/C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/C_2 \\ L_2/L & -M/L & -L_2R_1/L & MR_2/L \\ -M/L & L_1/L & MR_1/L & -L_1R_2/L \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

која што ги содржи коефициентите пред напоните и струите од десната страна на системот диференцијални равенки (5.30). Во неа е користена ознаката  $L = L_1L_2 - M^2$ .

Сопствените фреквенции се добиени со програмата 5.6 и тие изнесуваат

$$\underline{s} = \begin{bmatrix} -2989 + j2813317 \\ -2989 - j2813317 \\ -2135 + j2294842 \\ -2135 - j2294842 \end{bmatrix}$$

Се забележува дека тие се парови од коњугирано комплексни броеви чии реални делови се негативни што укажува на придушени осцилации. Имагинарните делови се аголните фреквенции на осцилациите. Од нив можеме да ги пресметаме фреквенциите

$$f_1 = \frac{2813317}{2\pi} = 447,8 \text{ kHz}$$

$$f_2 = \frac{2294842}{2\pi} = 365,2 \text{ kHz}$$

Придушувањето на осцилациите ќе биде изразено преку членовите  $e^{-2989t}$  и  $e^{-2135t}$  со кои се множат синусните осцилации со горенаведените фреквенции. Ако

сметаме дека осцилациите ќе исчезнат во моментот кога множителот ќе постане  $e^{-3}$  тогаш двете осцилации ќе исчезнат по време

$$t_1 = \frac{3}{2989} = 1 \text{ ms}$$

$$t_2 = \frac{3}{2135} = 1,4 \text{ ms}$$

### Програма 5.6. Сопствени фреквенции на теслиниот трансформатор

```

1 R_1 = 0.05; L_1 = 15.5e-6; C_1 = 10e-9;
2 R_2 = 62; L_2 = 9.374e-3; C_2 = 17.2e-12;
3 k = 0.2;
4 M = k * sqrt(L_1*L_2);
5 L = L_1 * L_2 - M^2;
6 A = [
7     0      0      -1/C_1      0
8     0      0           0     -1/C_2
9     L_2/L  -M/L  -L_2*R_1/L  M*R_2/L
10    -M/L  L_1/L  M*R_1/L  -L_1*R_2/L
11 ];
12 s = eig(A)

```

На крајот само ќе наведеме дека ако сметаме дека во трансформаторот нема загуби на енергија тогаш во одреден момент целокупната акумулирана енергија на примарната намотка ќе и се оддаде на секундарната намотка под услов нивните резонантни фреквенции да се наполно еднакви. Од условите за еднаквост на енергиите на двата кондензатори, односно на двата калеми можеме да напишеме прости изрази за односот на напоните на примарот и секундарот на трансформаторот.

$$U_{2,\max} = U_0 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = 347,8 \text{ kV}$$

$$U_{2,\max} = U_0 \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} = 341,0 \text{ kV}$$

што е за околу 5% повеќе од вредноста добиена со симулацијата во Matlab.

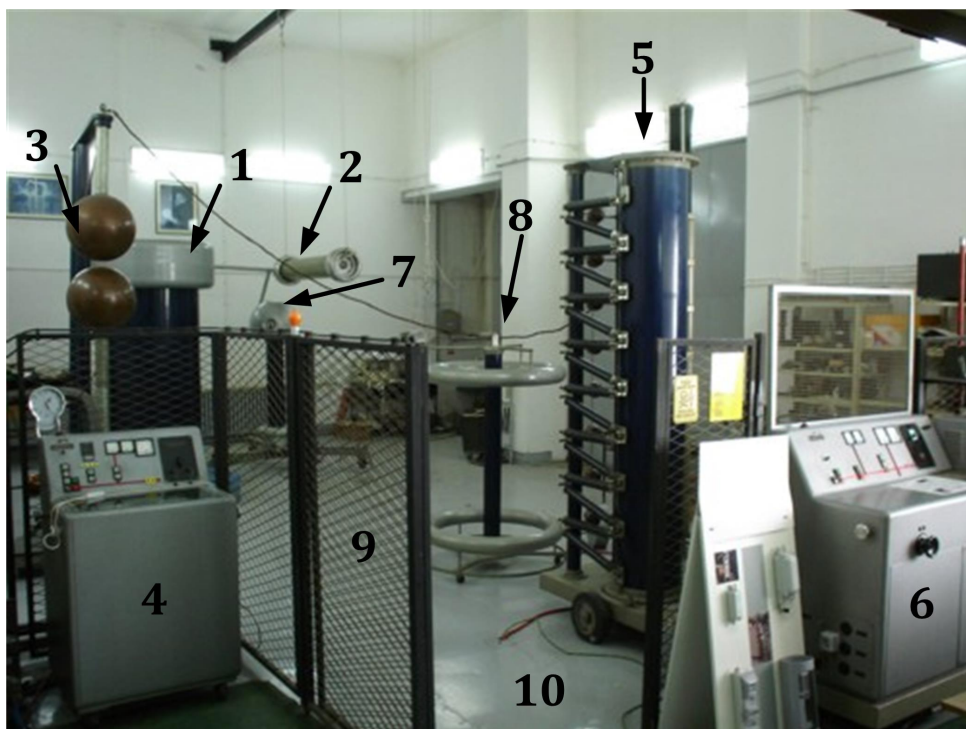
## 5.5 Лабораторија за висок напон на ФЕИТ

Лабораторија за висок напон на ФЕИТ е формирана во 1967 година. Таа располага со професионална мерна опрема, како и со долгогодишното искуство на нејзините соработници. Лабораторијата е опремена со следната опрема:

- Двостепена каскада за добивање висок наизменичен напон, 50 Hz, 400 kV, 200 kVA;
- Генератор за добивање импулсни напони (600 kV, 4 kJ, 8 степени) со стандарден облик на ударниот напон 1,2/50;
- Мобилни уреди за добивање високи напони. За наизменичен напон: 50 kV, 4 kVA; 66 kV, 1 kVA 20 kV, 5 kVA и 22 kV, 15 kVA. За еднонасочен полубранов исправен напон: 100 kV, 1 mA;

- Нисконапонска придушница;
- Постројка за мерење на карактеристиките на парцијалните празнења;
- Постројка за мерење на капацитивноста и аголот на диелектричните загуби;
- Шерингов мост;
- Постројка за испитување на карактеристиките на изолационо масло;
- Друга опрема: лабораториско возило, постројка за ревитализација на мерни трансформатори со масло-хартиена изолација, репетиционен ударен генератор 500 V, неколку гигаомметри, осцилоскопи, волтметри, амперметри, компјутери, модели и друга придружна опрема).

Параметрите на основната испитна опрема (трансформаторска каскада и генератор за ударен напон) се избрани така што ги задоволуваат стандардните испитни напони според IEC 71-1 за електроенергетската опрема со најголем напон на мрежата 123 kV. Оваа опрема е прикажана на сликата 5.24.



**Слика 5.24. Лабораторија за висок напон на ФЕИТ**

1) испитен трансформатор, 2) заштитен отпорник, 3) мерно сферно искриште, 4) контролен пулт за испитниот трансформатор, 5) импулсен генератор, 6) контролен пулт за импулсниот генератор, 7) напонски делител за наизменичен напон, 8) напонски делител за импулсни напони, 9) заштитна ограда, 10) заземјен метален под.

Во лабораторијата е изградена постројка за филтрирање и вакумирање на изолациони масла и оддел за истражување и ревитализира масло-хартиената изолација, пред сè изолацијата на високонапонските мерни трансформатори. Покрај висококвалитетната постројка за вакумирање и филтрирање, изградена и е печка за сушење на изолацијата.

Освен ова, во лабораторијата се конструирани и реализирани: уред за мерење високи отпорности на изолацијата; високонапонски испитни трансформатори (20 kV, 5,5 kVA и 20 kV, 20 kVA); регулациона придушница за компензација на реактивната моќност за потребите на теренските високонапонски

испитувања на големи капацитети; уред за испитување на карактеристиките на трансформаторското масло; делител за напони до 100 kV; уред за испитување на изолациони теписи и друго.

Во рамките на лабораторијата во изминатиот период е реализиран голем број проекти, преку кои е проценувана состојбата на изолационите системи на: речиси сите генератори од ЕЕС на Република Македонија, на енергетските и мерните трансформатори, кондензатори, кабли, водови, одводници на пренапони и друго. Со тоа е постигнато, преку однапред испланирана и дефинирана зачестеност на таквите испитувања и анализи, наменски да се следи најосетливиот дел од опремата и притоа навреме да се интервенира, со што се обезбедува програмиран пристап при ревитализацијата и се спречуваат непредвидените хаварии и испади на елементите од електроенергетскиот систем.

Поважни проекти и извршени испитувања во нашата земја се следните: ревитализацијата на изолационите системи на двата генератора во ХЕЦ „Глобочица“, првиот генератор во ХЕЦ „Шпилје“; ревитализација на поголем број трансформатори и одводници на пренапони; следење на карактеристиките на изолационите системи на статорските намотки на сите поголеми генераторски единици; следење на квалитетот на изолацијата на сите блок-трансформатори во електричните централи и голем број енергетски трансформатори 400/115/31,5; 220/110/10 и 110/X/Y kV; усовршување и верификација на мерните процедури; усвојување и иновирање на критериумите за квалитет на изолацијата на опремата; следење на квалитетот на изолационите системи на 20 големи хидро и турбогенератори и над 60 енергетски трансформатори; изградба на одделение за истражување на маслохартиена изолација со чија помош досега успешно се ревитализирани околу 80 мерни трансформатори; развивање на постапка за мерење и анализа на карактеристиките на парцијалните празнења; мерење на капацитивноста и мерење на диелектричните загуби на високонапонски изолациони системи и друго. Покрај работата на овие испитувања со коишто е опфатена клучната опрема од ЕЕС на Македонија, во континуитет се вршени рутински испитувања на изолационите карактеристики на високонапонски и среднонапонски изолаторски вериги, мерни трансформатори, одводници на пренапони, изолациони масла, изолациона и заштитна опрема.

# 6

## МЕРЕЊЕ НА ВИСОКИ НАПОНИ

Мерењето на високи напони (еднонасочни, наизменични или импулсни) вклучува специфични проблеми кои не се присутни кај вообичаените мерења во електротехниката. Овие проблеми се зголемуваат со зголемување на напонот, но сепак се лесно решливи за напони до околу 10 kV, а при напони од редот на стотици киловолти веќе се сериозни главно поради габаритот на мерните уреди, можноста за пробив на изолацијата и опасно за луѓето кои ракуваат со мерната опрема, а понекогаш и проблемите со создавање на топлина во мерните кола.

Обично се мери максималната вредност на напонот бидејќи од неа директно зависи ефектот што високиот напон ќе го предизвика врз изолациониот систем на некој уред. Понекогаш, на пример при мерење на импулсните напони и напоните при парцијални празнења се регистрира и обликот на напонот.

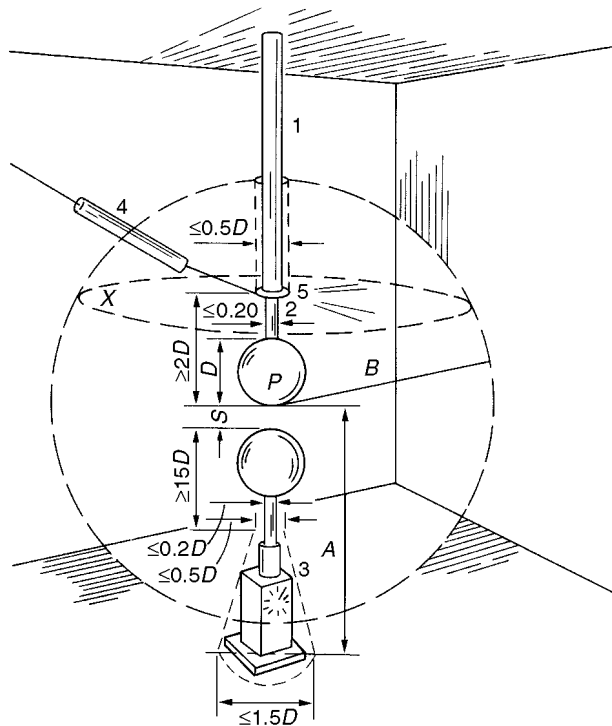
Опсегот на мерење на вредноста на напонот е од mV до неколку стотици kV и дури MV, а фреквенцискиот опсег кој се движи од 0 Hz до неколку стотици kHz, некогаш и MHz ја усложнува задачата. Тука ќе разгледаме неколку начини за мерењето на напонот кои се специфични за техниката на висок напон.

Мерењата на напон можат да бидат директни или индиректни. Кај директните мерења уредот за мерење се приклучува директно на приклучоците на испитниот објект каде што владее високиот напон, а при индиректните мерења мерниот уред се приклучува преку некој уред за приспособување, т.е. намалување на мерениот напон до износ кој може да се мери со општоприменливи инструменти.

### 6.1 Сферно искриште

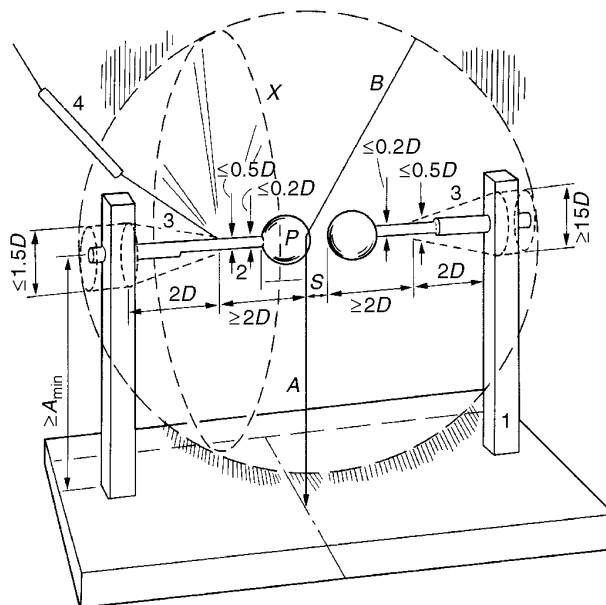
Мерното сферно искриште спаѓа во уредите за директно мерење на високи напони. Тоа се состои од две метални сфери со еднакви дијаметри  $D$  поставени на одредено расројание  $S$ . Тие најчесто се направени од бакар или месинг и можат да бидат поставени вертикално (слика 6.1) или хоризонтално (слика 6.2). За сферите е пропишано колу смеат да отстапуваат од идеална сфера и при мерењата треба да бидат чисти без прашина, капки вода и слично. Методот за мерење се базира на зависноста на пробивниот напон помеѓу сферите од растојанието  $S$  во слабо нехомогено електрично поле. Бидејќи мерениот напон зависи од растојанието меѓу сферите  $S$ , особено е важно неговото точно отчитување.





**Слика 6.1. Вертикални мерни сфери**

- 1) Изолационен држач, 2. Метален држач на сферата, 3. Механизам за регулирање на растојанието меѓу сферите – со поместување на долната сфера, 4) Приклучок за висок напон преку заштитен отпорник, 5) Прстен, P) Точка од која започнува пробивот меѓу сферите, A) Висина на P над земјата, B) Радиус во кој не смее да има други објекти, X) Рамнина под која не смее да се спушти приклучокот за висок напон.



**Слика 6.2. Хоризонтални мерни сфери**

Легендата е иста како кај сликата 6.1.

Стандардни дијаметри на сферите се: 2; 5; 6,25; 10; 12,5; 15; 25; 50; 75; 150 и 200 см. Максималниот напон изразен во киловоти којшто може да се измери со

едно сферно искриште приближно е еднаов на дијаметарот на сферите изразен во милиметри. Според тоа во лабораториите за висок напон треба да се располага со повеќе сферни искришта со различни дијаметри на сферите за да може да се покрие широк опсег на напони.

Со експерименти е утврдено дека статистичкото растурање на пробивните напони меѓу сферите, т.е. точноста на измерениот напон, не е поголемо од  $\pm 3\%$  ако се исполнети условите за мерење пропишани со стандарот IEC 60052. При мерењето е важно главно да се исполнат следните услови:

- Растојанието меѓу сферите не треба да биде поголемо од нивниот радиус, т.е.  $S \leq D/2$ . По потреба може да се мери и до растојание  $S = 0,75D$  но во тој случај точноста на пробивните напони ќе биде  $\pm 5\%$ ,
- Односите на димензиите на конструкцијата за држење на сферите не треба да ги надминат гранците означени на сликите 6.1 и 6.2,
- Растојанијата на сферите до подот и до други метални предметни (означени со А и В на сликите 6.1 и 6.2) треба да се во границите наведени во табелата 6.1,
- При мерење на напони помали од 50 kV и при користење на сфери со дијаметар помал од 12,5 cm е неопходно да се озрачи сферното меѓурастојание за да се создадат почетни слободни електрони со што ќе се обезбеди празнење во него. Тоа најчесто се прави со помош на живина кварцна лампа (со моќност над 35 W) или со некој извор на рентгенски зраци.

**Табела 6.1. Дозволени растојанија од сферното искриште до околните објекти**

$D$ (cm)	$A$		$B$	
	најмалку	највеќе	$S \leq 0,5D$	$0,5D < S < 0,75D$
2 ÷ 6,25	7D	9D	14S	7D
10 ÷ 15	6D	8D	12S	6D
25	5D	7D	10S	5D
50 ÷ 75	4D	6D	8S	4D
100	3,5D	5D	7S	3,5D
150 ÷ 200	3D	4D	6S	3D

Пробивните напони во зависност од растојанието меѓу сферите се дадени во форма на табели во стандардот IEC 60052 и тоа за различни дијаметри на сферите и за различни видови на напони. За илустрација, во табелите 6.2 и 6.3 се дадени податоците за пробивните напони за сфери со дијаметри од 12,5 и 50 cm. Зависноста на пробивните напони од растојанието меѓу сферите е прикажана графички на сликите 6.3 и 6.4 од каде што се забележува дека тие сосема добро може да се апроксимираат со параболи. Со помош на методот на најмали квадрати е добиено дека тие параболи гласат:

$$\begin{aligned}
 U_A &= -1,2249 \cdot S^2 + 31,4836 \cdot S + 1,3890 \\
 U_B &= -0,9963 \cdot S^2 + 31,4782 \cdot S + 0,7935 \\
 D &= 12,5 \text{ cm} \quad 0,5 \leq S \leq 10
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

$$\begin{aligned}
 U_A &= -0,3190 \cdot S^2 + 29,2387 \cdot S + 1,6158 \\
 U_B &= -0,3004 \cdot S^2 + 29,8249 \cdot S - 2,0507 \\
 D &= 50 \text{ cm} \quad 2 \leq S \leq 40
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

**Табела 6.2. Пробивни напони за сферно искриште со дијаметар  $D = 12,5 \text{ cm}$**

S (cm)	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6
$U_A$ (kV)	16,8	19,9	23,0	26,0	28,9	31,7	37,4	42,9	45,5	48,1
$U_B$ (kV)	16,8	19,9	23,0	26,0	28,9	31,7	37,4	42,9	45,5	48,1
S (cm)	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,5	4,0	4,5
$U_A$ (kV)	53,5	59,0	64,5	70,0	75,0	80,0	85,5	97,0	108	119
$U_B$ (kV)	53,5	59,0	64,5	70,0	75,5	80,5	85,5	98,0	110	122
S (cm)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10	
$U_A$ (kV)	129	138	146	(154)	(161)	(168)	(174)	(185)	(195)	
$U_B$ (kV)	134	145	155	(164)	(173)	(181)	(189)	(203)	(215)	

Напонот  $U_A$  е за наизменични напони, позитивни и негативни еднонасочни напони и негативни ударни напони. Напонот  $U_B$  е за позитивни ударни напони.

**Табела 6.3. Пробивни напони за сферно искриште со дијаметар  $D = 50 \text{ cm}$**

S (cm)	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$U_A$ (kV)	59	64,5	70,0	75,5	81,0	86,6	99,0	112	125	138
$U_B$ (kV)	59	64,5	70,0	75,5	81,0	86,6	99,0	112	125	138
S (cm)	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10	11	12
$U_A$ (kV)	151	164	177	189	202	214	239	263	286	309
$U_B$ (kV)	151	164	177	189	202	214	239	263	287	311
S (cm)	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24
$U_A$ (kV)	331	353	373	392	411	429	445	460	489	515
$U_B$ (kV)	334	357	380	402	422	442	461	480	510	540
S (cm)	26	28	30	32	34	36	38	40		
$U_A$ (kV)	(540)	(565)	(585)	(605)	(625)	(640)	(655)	(670)		
$U_B$ (kV)	(570)	(595)	(620)	(640)	(660)	(680)	(700)	(715)		

Напонот  $U_A$  е за наизменични напони, позитивни и негативни еднонасочни напони и негативни ударни напони. Напонот  $U_B$  е за позитивни ударни напони.

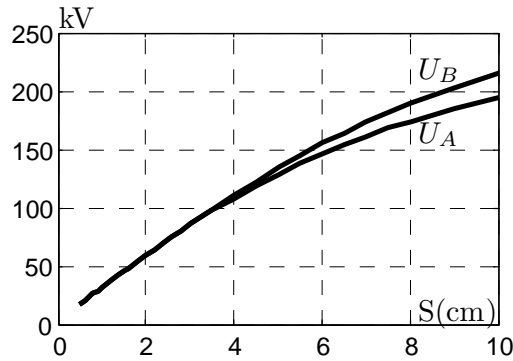
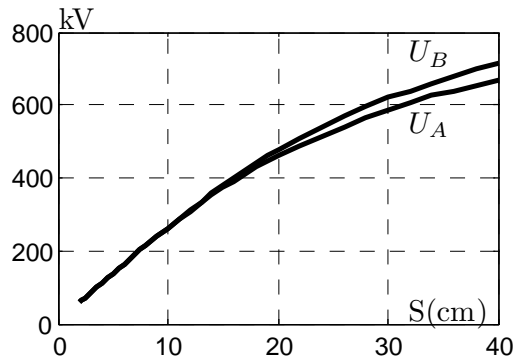
Употребната вредноста на изразите (6.1) и (6.2) ќе ја илустрираме преку еден пример за случај со наизменичен напон. Да се одреди пробивниот напон на сферно искриште со  $D = 50 \text{ cm}$  ако растојанието меѓу сферите е  $S = 4,7 \text{ cm}$ . Потоа да се одреди колкаво треба да биде растојанието  $S$  за пробивниот напон да биде 300 kV.

Во првиот случај едноставно пресметуваме

$$U_A = -0,3190 \cdot 4,7^2 + 29,2387 \cdot 4,7 + 1,6158 = 132 \text{ kV}$$

додека во вториот случај е потребно да ја решиме следната квадратна равенка

$$-0,3190 \cdot S^2 + 29,2387 \cdot S + 1,6158 = 300$$

Слика 6.3. Пробивни напони за сферно искриште со дијаметар  $D = 12,5$  cmСлика 6.4. Пробивни напони за сферно искриште со дијаметар  $D = 50$  cm

со што се добива  $S_1 = 80,0$  cm и  $S_1 = 11,7$  cm. Бидејќи параболата важи за  $2 \leq S \leq 40$  како конечно решение го усвојуваме  $S = 11,7$  cm.

Наведените зависимости на пробивниот напон од растојанието  $S$  важат за нормални атмосферски услови при кои притисокот на воздухот изнесува  $p_0 = 101,3$  kPa, а неговата температура е  $\theta = 20^\circ\text{C}$ . Пробивниот напон зависи од релативната густина на воздухот која е дефинирана со изразот

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} = \frac{p}{101,3} \frac{273 + 20}{273 + \theta} = 2,892 \frac{p}{273 + \theta} \quad (6.3)$$

каде што  $p$  е актуелниот притисок на воздухот изразен во kPa, додека  $\theta$  е актуелната температура изразена во  $^\circ\text{C}$ .

Пробивниот напон во атмосферски услови со  $\delta \neq 1$  се пресметува како

$$U_\delta = k_\delta \cdot U \quad (6.4)$$

каде што  $U$  е напонот отчитан од табелите или пресметан со помош на апроксимационите параболи.

Зависноста на  $k_\delta$  од релативната густина на воздухот  $\delta$  е дадена во табелата 6.4. Во случаите кога е  $0,95 \leq \delta \leq 1,05$  се зема  $k_\delta = \delta$ .

Табела 6.4. Корекционен коефициент за релативната густина на воздухот

$\delta$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
$k_\delta$	0,72	0,77	0,81	0,86	0,91	0,95	1,00	1,05	1,09	1,13

Мерењето со сферно искриште се врши на два можни начина:

- Напонот кој треба да се мери не е познат. На почетокот искриштето се поставува на растојание поголемо од очекуваниот износ на мерениот напон. Потоа напонот се приложува, а растојанието на сферите полека се намалува сè додека не настапи прескок и притоа движењето на сферите се запира,
- Изворот за висок напон да се нагоди да дава напон со зададена максимална вредност. Прво се наместува растојанието на сферите така што до прескок би дошло токму на саканиот напон. Потоа се вклучува напојувањето и напонот полека се подига сè до пробојот. При пробојот е постигнат саканиот напон.

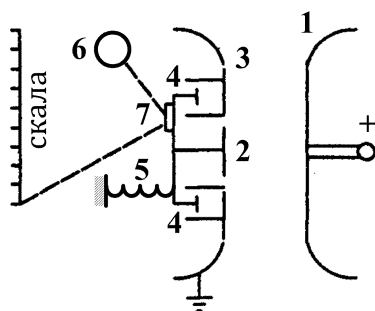
Бидејќи прескочниот напон има одредено статистичко растурање, при мерењето на еднонасочни и наизменични напони постапката се повторува најмалку 3 пати и како резултат се зема средна вредност од мерењата. Ако пак е во прашање импулсен напон, тогаш се бара да се одредни тнр. 50% прескочен напон. Тоа е напон при кој во една серија од 10 удари кои сите имаат иста темена вредност, 5 успеваат да го пробијат даденото растојание (50% од вкупниот број удари).

Предноста на сферното искриште во однос на индиректните начин на мерење (за кои ќе стане збор подолу) е во неговата едноставност и очигледност, која не дозволува да се јават скриени грешки. Кај другите мерни системи преку делители на напон, кои содржат сложени електронски уреди, можни се и скриени грешки, како и неисправност.

Недостатоците на сферното искриште се состојат пред сè, во тоа што по проработувањето настанува слом на испитниот напон и исклучување на изворот на напојување. Ова мерење спаѓа во тнр. деструктивни мерења, при што со самото мерење се уништува мерената величина. Исто така, недостаток е и тоа што немаме можност да го следиме обликот на мерената величина во функција од времето.

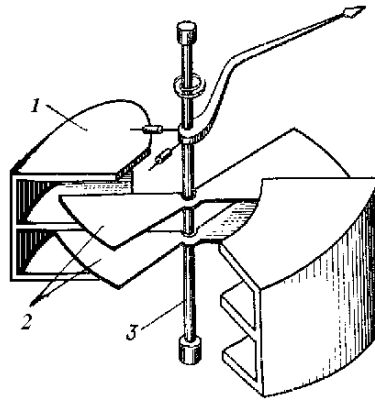
## 6.2 Електростатски волтметар

Електростатскиот волтметар исто така спаѓа во групата на уреди за директно мерење на напон. Неговиот принцип на работа се базира на појавата на сила во електростатско поле помеѓу две електроди од плочест кондензатор. Едната електрода е неподвижна и е поврзана на изворот на висок напон којшто треба да се измери, а другата електрода е подвижна и е прицврстена со пружина која го држи инструментот во рамнотежа (слика 6.5). Друга можна конструкција е со вртливи плочи како што е прикажано на сликата 6.6.



**Слика 6.5. Плочест електростатски кондензатор**

- 1) Неподвижна плоча, 2) Подвижна плоча, 3) Заштитна електрода за регулација на полето, 4) Воздушни придушувачи на вибрации, 5) Пружина, 6) Светлински извор, 7) Огледало.



**Слика 6.6. Вртлив електростатски кондензатор**

1) Неподвижни плочи, 2) Вртливи плочи, 3) Оска со пружина.

Силата која делува на подвижната електрода може да се пресмета преку енергијата складирана во кондензаторот формиран од двете електроди на кондензаторот

$$F = \frac{dW}{dx}$$

каде што  $x$  е координата во однос на која е можно движење на подвижната електрода.

Бидејќи енергијата на еден кондензатор изнесува

$$W = \frac{1}{2}CU^2$$

за силата која што делува на подвижната електрода добиваме

$$F = \frac{1}{2}U^2 \frac{dC}{dx} \quad (6.5)$$

која има негативна вредност затоа што изводот  $dC/dx$  е негативен бидејќи со зголемување на растојанието  $x$  доаѓа до опаѓање на капацитетот  $C$ . Тоа значи дека силата  $F$  делува во насока на зголемување на капацитетот  $C$  т.е. делува во насока на доближување на плочите.

Но, главниот заклучок кој следува од (6.5) е дека силата зависи од  $U^2$  што значи дека инструментот ќе има квадратна скала. Во случај на мерење на наизменични напони тој ќе ја измери нивната средна квадратна вредност, односно ќе ја измени квадратната вредност од ефективната вредност на напонот.

Ако инструментот е во форма на плочест кондензатор чиј капацитет е

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{x}$$

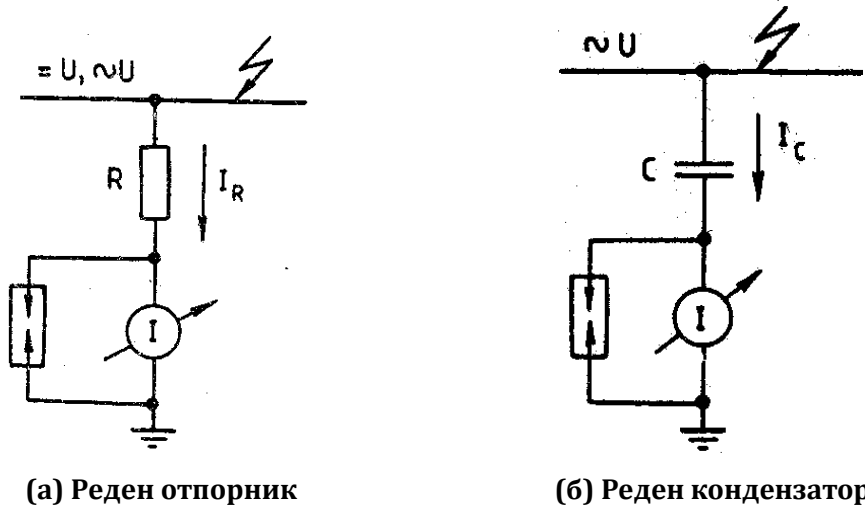
каде што  $S$  е површината на плочите изразот за силата е

$$F = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{x^2} U^2$$

Електростатските волтметри се прават за напони до 600 kV и нивната предност е тоа што во нив тече многу мала струја затоа што тие имаат мал капацитет во опсегот  $5 \div 50$  pF. Со тоа тие скоро воопшто не влијаат на колото во кое се приклучени.

### 6.3 Амперметар со редно врзани елементи

Високи еднонасочни напони може да се мерат преку мерење на струјата  $I_R$  низ отпорник со голема позната отпорност  $R$  (слика 6.7а). Ако се занемари отпорноста на мерниот уред (амперметар), која што е многу пати помала од  $R$ , за напонот добиваме  $U = RI_R$ .



Слика 6.7. Мерење на висок напон со амперметар и редно врзани елементи

Обично високонапонскиот отпорник се состои од голем број редно поврзани отпорници кои се поставени во цевка наполнета со трансформаторско масло. Вредноста на отпорноста  $R$  се избира доволно висока така што струјата  $I_R$  да не биде поголема од  $100 \mu A$ . За поголема точност на мерењето треба да се води сметка за зависноста на отпорноста  $R$  од температурата  $t$ :

$$R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)]$$

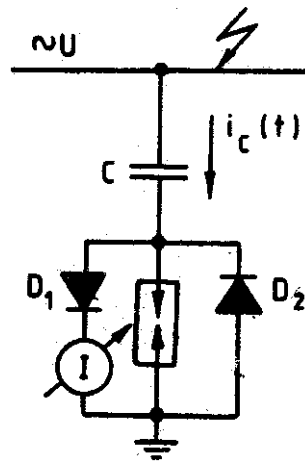
каде што  $R_0$  е отпорност при температура  $t_0$ , а  $\alpha$  е темпертураен коефициент. Поради тоа подобри резултати се добиваат кога се користат жичени или повеќеслојни керамички отпорници со мал температурен коефициент  $\alpha$ .

При мерење на наизменични напони, поради големите димензии на отпорникот се јавува проблем со нерамномерната распределба на паразитските капацитети од одделни делови на отпорникот кон земјата. Со тоа струјата на мерење нема да е еднаква по целата должина на отпорникот и отчитаната вредност може да биде со значителна грешка. Затоа во најголем број случаи за мерење на високи наизменични напони над  $100 kV$  наместо предотпорник се користи кондензатор (слика 6.7б).

Струјата која што се мери во овој случај е пропорционална на напонот и изнесува  $I_C = \omega CU$ , при што треба да се води сметка за постоењето на виши хармоници коишто би довеле до зголемување на струјата.

Редно врзаните кондензатори се посебни мерни кондензатори со гасна изолација, при што најчесто се користи гасот  $SF_6$ . Освен тоа се користат специјално поставени екрани за регулација на електричното поле со што капацитетот практично не им зависи од околните предмети.

Ако со мерниот уред дополнително на кондензаторот сериски се поврзе и диода  $D_1$ , како на сликата 6.8, тогаш средната вредност на измерената струја за една полупериода ќе биде пропорционална на максималната вредност на напонот.



Слика 6.8. Мерење на максималната вредноста на наизменичен напон

Нека напонот се менува според изразот

$$u(t) = -U_{\max} \cos \omega t$$

тогаш за струјата во кондензаторот имаме

$$i_C(t) = C \frac{du}{dt} = \omega C U_{\max} \sin \omega t$$

и понатаму за нејзината средна вредност добиваме

$$I_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_C(t) dt = \frac{\omega C U_{\max}}{T} \int_0^{T/2} \sin \omega t dt = \frac{\omega C U_{\max}}{T} \frac{2}{\omega} = 2f C U_{\max} \quad (6.6)$$

со што навистина добивме дека средната вредност на струјата е пропорционална на  $U_{\max}$ .

Диодата  $D_2$  служи за овозможување на течење на струја во втората полупериода.

За заштита на мерните кола од оштетувања при пробив во редниот елемент паралелно со мерниот уред се поврзува искриште или варистор.

## 6.4 Делители на напон за еднонасочни и наизменични напони

Принципот на работа на активен и капацитивен делител на висок напон е прикажан на сликата 6.9. Мерењето на високиот напон  $U_1$  се прави преку мерење на напонот  $U_2$  на нисконапонската страна на делителот и тој изнесува

$$U_1 = k U_2 \quad (6.7)$$

каде што  $k$  е коефициентот на напонскиот делител.

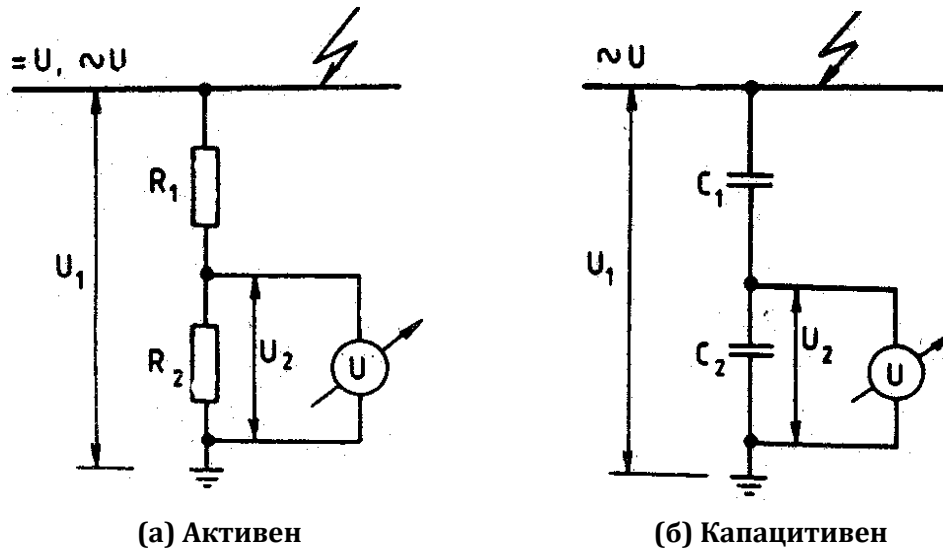


Коефициентот  $k$  за активен делител изнесува

$$k = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (6.8)$$

додека за капацитивен делител е

$$k = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (6.9)$$



Слика 6.9. Делители за висок напон

Делителите на напон треба да бидат направени така што напонот  $u_2(t)$  треба прилично точно да ја следи формата на напонот  $u_1(t)$ . Тоа значи дека коефициентот  $k$  на напонскиот делител не треба да зависи од големината или фреквенцијата на напонот.

За мерење на еднонасочни напони и напони со индустриска фреквенција се користат делители на напон чија струја во сервиската врска на отпорници е од редот на неколку милиампери. Како и во случајот со користење на редни отпорници и тука треба да се води сметка за можноста за нерамномерна распределба на напонот по должина на отпорниците поради паразитските капацитети спрема земја.

При мерење на високи напони во случаи кога врската од нисконапонскиот дел на делителот до мерниот инструмент се остварува со долг коаксијален кабел треба да се води сметка и за неговиот капацитет.

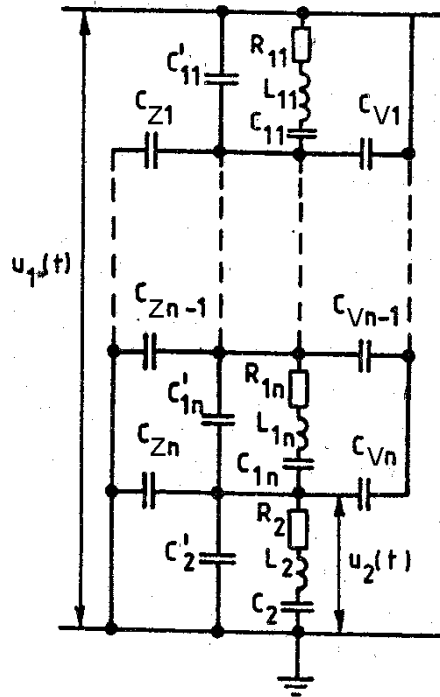
Важно барање кое треба да се исполни при проектирањето на делителите за висок напон е елиминирање на можноста за појава на корона. Тоа се постигнува со намалување на јачината на електричното поле на краевите од делителот со помош на посебни сферни електроди.

## 6.5 Делители на напон за импулсни напони

Делителите на импулсни напони служат за мерење на еднократни апериодични или осцилаторни напони кои брзо се придушуваат. Тие се разликуваат од претходно

наведените делители по тоа што нивната намена е за мерење на брзи процеси коишто имаат високофреквентен спектар на хармоници кој достигнува до  $10 \div 15$  MHz.

Делителите за високи импулсни напони можат да бидат омски или капацитивни. На сликата 6.10 е прикажана полната еквивалентна шема на капацитивен делител на импулсни напони во која се земени предвид паразитните капацитети и индуктивитети.



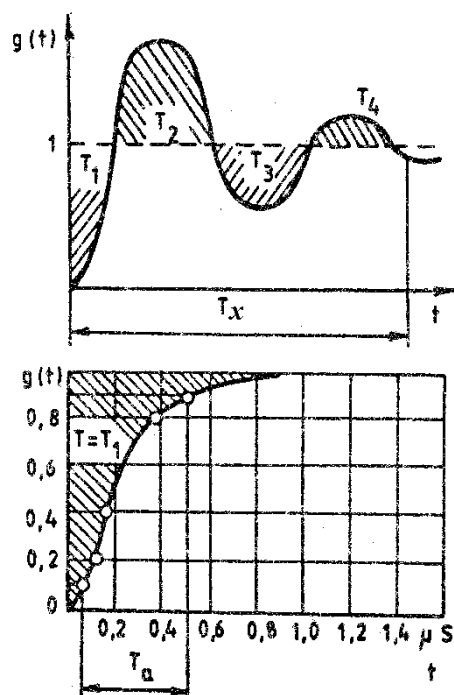
Слика 6.10. Еквивалентна шема на делител за импулсни напони

Високонапонскиот дел се состои од  $n$  редно поврзани секции кои имаат параметри  $R_{1i}, L_{1i}$  и  $C_{1i}$  ( $i = 1 \div n$ ), додека нисконапонскиот дел има параметри  $R_2, L_2$  и  $C_2$ . Доколку се работи за омски импулсен делител тогаш ќе биде  $C_{1i} = 0$  ( $i = 1 \div n$ ) и  $C_2 = 0$ . Паразитните капацитети спрема земјата се означени со  $C_{Zi}$ , паразитните капацитети спрема високонапонскиот приклучок се означени со  $C_{Vi}$ , додека паразитните капацитети помеѓу одделните секции на високонапонскиот дел се означени со  $C'_{1i}$  ( $i = 1 \div n$ ). Паразитниот капацитет на нисконапонскиот дел е означен со  $C'_2$ .

Квалитетот на еден импулсен делител на напон зависи од неговите амплитудно-фреквенциски карактеристики. Освен тоа се користи и преносната функцијата  $g(t)$  која во суштина е индиционен одзив на колото, т.е. таа го дава обликот на напонот  $u_2(t)$  во случај кога напонот  $u_1(t) = 1$  V за  $t > 0$  (хевисајдова функција). Преносната функција се оценува според времето на реакција на правоаголен импулс  $T_p$  коешто се добива како алгебарска сума од површините меѓу единичната функција и  $g(t)$  (слика 6.11):

$$T_p = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] dt = T_1 - T_2 + T_3 - T_4 + \dots \quad (6.10)$$

Времето за кое функцијата  $g(t)$  ќе се придуши и ќе стане приближно еднаква на 1 се нарекува време на придушување  $T_x$  и тоа е исто така показател за квалитетот



Слика 6.11. Определување на преносната функција  $g(t)$  и времето на пораст  $T_a$  на импулсен делител на напон

на импулсниот делител на напон. Помали вредности на  $T_p$  и  $T_x$  се показател за поголема точност на делителот на напон.

Кај импулсните делители на напон се дефинира и време на пораст  $T_a$  кое се дефинира како време за кое излезниот сигнал ќе порасне од вредност 0,1 до вредност 0,9.

Кај квалитетни импулсни делители наведените времиња се од редот на наносекунди.

Во праксата импулсните делители на напон се тестираат со специјални генератори на правоаголни импулси со напон  $100 \div 200$  V и време на пораст  $1 \div 5$  ns. Излезниот сигнал се снима со дигитален осцилоскоп, а потоа дополнително се обработува за да се одредат времињата на реакција на импулсниот делител.

Омските импулсни делители се прават од жичени отпорници кои се мотаат бифиларно за да се намалат надолжните паразитски индуктивности. За намалување на паразитските капацитети  $C_Z$  и  $C_V$  се користат екрани во форма на прстени поставени на двата краја од делителот.

Капацитивните импулсни делители се прават од кондензатори со диелектрик од керамика или лискун и имаат специјална конструкција за намалување на сопствените паразитни индуктивности.

Најдобри карактеристики се постигаат со мешани делители на напон кои се состојат од паралелна врска на отпорници и кондензатори. Капацитетот на кондензаторите е распределен нерамномерно по височината на делителот така што се компензираат паразитските капацитети.

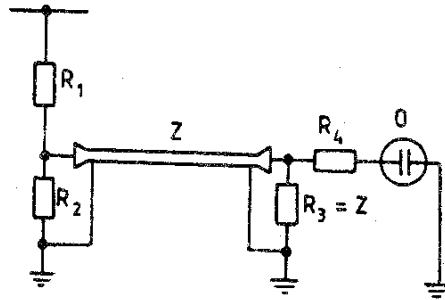
Делителите се поврзуваат со мерните уреди преку коаксијален кабел со должина од десетици метри кој треба да се третира како вод со распределени параметри. За да не се појавуваат деформации на сигналот поради повеќекратни прекршувања и одбивања од краевите на коаксијалниот кабел неговата бранова импеданција треба

да е еднаква на брановата импеданција на делителот на напон.

Во случај на омски делител усогласувањето на приклучокот на мерните инструменти се прави според шемата прикажана на сликата 6.12. Коефициентот на делителот во тој случај е

$$k = \frac{R_1 R_2 + R_1 Z + R_2 Z}{R_2 Z} \quad (6.11)$$

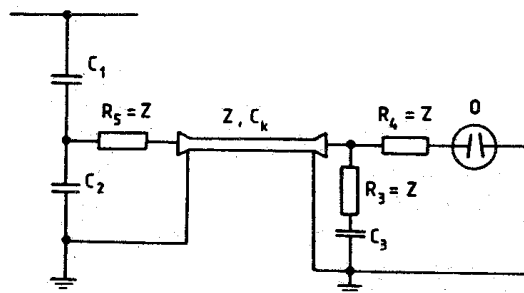
каде што  $Z$  е бранова импеданција на коаксијалниот кабел.



Слика 6.12. Шема за усогласување на омски импулсен делител со кабел и осцилоскоп

Капацитивните делители не можат да бидат напдно усогласени со кабелот и мерниот уред. За нив се препорачува шемата дадена на сликата ???. Капацитетите треба да го задоволат условот  $C_1 + C_2 = C_3 + C_k$ . Поради релативно малиот капацитет на кабелот  $C_k$  и  $C_2 \gg C_1$  практично е потребно да биде исполнето  $C_2 \approx C_3$  и коефициентот на делителот ќе биде

$$k = \frac{C_1 + 2C_2}{C_1} \quad (6.12)$$



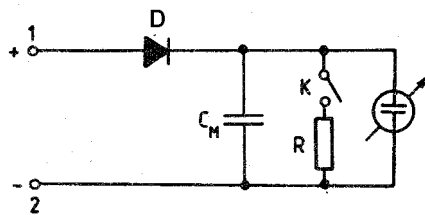
Слика 6.13. Шема за усогласување на капацитивен импулсен делител со кабел и осцилоскоп

## 6.6 Волтметри за мерење на максимални вредности

Принципиелната шема на волтметар за мерење на максимални вредности на еднократни аperiодични импулси е прикажана на сликата 6.14. Со приклучување на импулсен напон со означениот поларитет диодата  $D$  ќе проведе и ќе започне полнење на кондензаторот  $C_M$ . Бидејќи временската константа на полнење

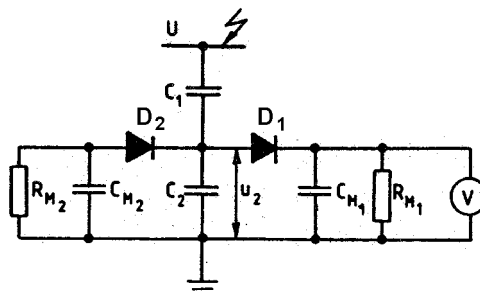
на кондензаторот е мала неговиот напон практично ќе го следи напонот на приложениот импулс се додека тој не ја достигне својата максимална вредност. Кога напонот на влезот ќе започне да опаѓа под максималната вредност диодата ќе биде инверзно поларизирана и нема веќе да спроведува, така што кондензаторот ќе остане наполнет со напон еднаков на максималниот. Напонот на кондензаторот се мери со волтметар со многу голема влезна отпорност (на пример електронски) за да не се случи во текот на мерењето тој значително да се испразни. Покрај тоа, од истите причини, кондензаторот треба да биде направен со квалитетна изолација со голема отпорност, а и инверзната струја на диодата треба да биде што е можно помала.

За да се измери амплитудата на нареден импулс кондензаторот  $C_M$  претходно треба да се испразни. За таа цел служи отпорникот  $R$  кој се поврзува паралелно со кондензаторот со затворање на контактите на прекинувачок  $K$ .



Слика 6.14. Принципиелна шема на импулсен волтметар

За мерење на амплитудата на наизменичен напон се користи уред чија принципиелна шема е дадена на сликата 6.15. Напонот  $u_2$  кој се добива од нисконапонската страна на делителот на напон  $C_1 - C_2$  преку диодата  $D_1$  се води до кондензаторот  $C_{M1}$  кој се полни до максималната вредност на напонот  $U_{2max}$ . За да може напонот на кондензаторот да ја следи евентуалната промена на максималната вредност на напонот  $u_2$  паралелно со него е поврзан отпорникот за празнење  $R_{M1}$ . Неговата вредност се бира така што временската константа на празнење  $T_{M1} = R_{M1}C_{M1}$  да биде околу 1 секунда. Поставувањето на отпорникот  $R_{M1}$  воведува грешка во мерењето која опаѓа со порастот на фреквенцијата на мерениот напон. Треба да се има предвид и тоа дека при проведување на диодата  $D_1$  кондензаторот  $C_{M1}$  е поврзан паралелно со  $C_2$  со што се менува коефициентот на делителот на напон. За мерење на максимални вредности на напонот во негативна насока се користи сличен принцип со елементите  $D_2 - C_{M2} - R_{M2}$ .



Слика 6.15. Принципиелна шема за мерење на максимална вредност на наизменичен напон

# 7

## ПРОБИВ ВО ДИЕЛЕКТРИЦИ

Диелектриците кои се наоѓаат во електрично поле ги задржуваат своите изолациони својства се додека напонот на кој се приклучени не надмине некоја критична вредност. Во тој момент, јачината на електричното поле може да стане толку голема што диелектрикот ги губи своите изолациони својства. Таа појава се нарекува пробив во диелектриците, напонот при кој што се случува пробивот се нарекува пробивен напон, а вредноста на јачината на електричното поле се нарекува електрична цврстина на диелектриците.

По завршувањето на пробивот во гасните и течните диелектрици тие имаат способност да се самообноват, додека кај цврстите диелектрици настануваат трајни оштетувања кои треба да се отстранат пред уредот да може повторно да се користи.

Пробивот во гасовите настанува поради ударна јонизација што значи дека појавата е од чисто електричен карактер. Поради тоа пробивот е зависен од максималната вредност на напонот.

Пробивот кај течни и цврсти диелектрици настанува како резултат од јонизациони и топлински процеси. Во тој случај пробивот со електричен карактер, како и кај гасовите, е поврзан со електронските процеси во диелектрикот кои се појавуваат во силни електрични полиња кога одеднаш се појавува голем скок во јачината на струјата што тече во диелектрикот. Топлинскиот пробив се појавува како последица од намалување на електричната отпорност на диелектриците под вилијание на загревањето предизвикано од силно електрично поле. Тоа доведува до пораст на активната компонента на струјата која предизвикува дополнително загревање и на крајот завршува со термичко разрушување на диелектрикот.

При долготрајно влијание на високи напони пробивот може да биде предизвикан и од електрохемиски процеси. Бидејќи кај течните и цврстите диелектрици суштинска улога имаат топлинските процеси како причина за нивниот пробив, произлегува дека во тој случај меродавна величина за наизменичниот напон е неговата ефективна вредност.

До моментот на настанување на пробив во диелектриците јачината на електричното поле и распределбата на напоните во нив можеме да ги пресметаме со методите кои се познати од електростатиката. Кога ќе започне појавата на пробив се случува движење на голем број наелектризирани честички што е проблем надвор од доменот на електростатиката. Доколку сакаме детално да ги анализираме тие појави треба да користиме методи од физиката на цврсто тело, па дури и да анализираме појави на атомско ниво но ние тоа тука нема да го правиме. Наместо тоа, во продолжение накусо ќе ги објасниме појавите на пробив во диелектриците

и тоа гледано како на појави кои можат да се забележат на макроскопско ниво без да навлегуваме во атомската или молекуларната структура на диелектриците.

## 7.1 Пробив во гасови

### 7.1.1 Пробив во хомогено електрично поле

Во секој гас под дејство на надворешни јонизатори какви што се космичките зрачење или, пак, топлинските процеси постои одредено количество на слободни јони (позитивни и негативни), како и слободни електрони. Наелектризираните честички под дејство на електричното поле почнуваат да се движат во правец на полето или спротивно од него во зависност од знакот на нивниот електричен полнеж, при што главна улога имаат електроните затоа што тие имаат најмала маса и се најлесно подвижни.

Под дејство на електричното поле електроните се залетуваат и се судираат со атоми од гасот. Но пред тоа тие поминуваат одреден пат во слободен простор без да се судрат со некој атом. Должината на слободниот пат ќе ја означиме со  $\lambda$  (за воздух при нормални атмосферски услови таа изнесува  $0,57 \mu\text{m}$ ). Ако полнежот на електронот го означиме со  $q_e$ , јачината на електричното поле со  $E$  тогаш еден електрон поминувајќи го слободниот пат ќе добие енергија

$$W = q_e E \lambda \quad (7.1)$$

Атомите на одреден гас можат да постанат јони ако со нив се судри електрон којшто има доволно голема енергија за од нив да се избие друг електрон. Енергијата која што е потребна за избивање на електрон од еден атом се нарекува енергија на јонизација  $W_j$  и таа обично се изразува преку потенцијалот на јонизација  $U_j$  на следниот начин  $W_j = q_e U_j$ . За различни гасови јонизациониот потенцијал изнесува  $U_j = 4 \div 25 \text{ V}$ . За да настане јонизација треба да е исполнет условот

$$W > W_j, \quad q_e E \lambda > q_e U_j$$

од каде што следува дека јонизација во гасот ќе започне при јачина на полето пресметана со следниот израз

$$E > \frac{U_j}{\lambda} \quad (7.2)$$

Брзината која што еден електрон ќе ја постигне поминувајќи го слободниот пат, изразена во  $\text{km/s}$ , изнесува

$$v \approx 600 \sqrt{U_j} \quad (7.3)$$

така што имајќи ја предвид големината на  $U_j$  можеме да заклучиме дека таа е во опсегот  $1200 \div 3000 \text{ km/s}$ .

При судирот на електронот со атом од гасот од атомот се ослободува нов електрон кој исто така се залетува во електричното поле. Двата електрона понатаму може да се судрат со други два атома и од нив да избијат два нови електрони. Со тоа процесот на добивање на слободни електрони брзо се одвива и нивниот број практично експоненцијално се зголемува со што се создава лавина од електрони. Во некои случаи судирот со атомот не е толку силен што од него не се избива електрон туку некој од електроните само се префрла на повисока енергетска

орбита од каде што брзо се враќа на почетната позиција и при тоа испушта фотон. Тоа значи дека лавината при своето напредување испушта фотони кои се многу побрзи од неа бидејќи се движат со брзина од 300000 km/s (слика 7.1).



Слика 7.1. Лавина од електрони

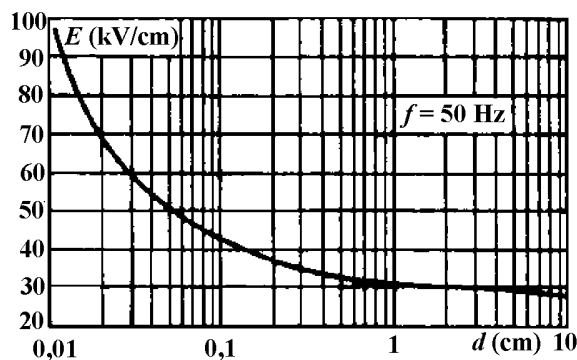
Фотоните коишто излетуваат од електронската лавина се судираат со други атоми, кои се пред лавината во правец на полето, со што предизвикуваат дополнителна фотонска јонизација. На тој начин, започнува нова лавина која што е пред првата. Аналогно на тоа се појавува и трета лавина која што е пред првите две итн. Со тоа просторот помеѓу електродите е исполнет со низа од лавини со што брзо се создава спроводен канал кој се нарекува стример (слика 7.2). По тој канал настанува и пробивот низ гасот.



Слика 7.2. Развивање на стример при пробив во гас

Обично пробивот во гасот станува практично моментално. Траењето на пробивот на гас на растојание од 1 cm се случува за време од  $10^{-8} \div 10^{-7}$  s.

Електричната цврстина на воздухот зависи од растојанието меѓу електродите (слика 7.3). При мали растојанија меѓу електродите се забележува значително зголемување на електричната цврстина кое може да се објасни со намалената должина на слободниот така што во согласност со изразот (7.2) се добива поголема јачина на полето.



Слика 7.3. Зависност на електричната цврстина на воздухот од растојанието помеѓу електродите во хомогено електрично при нормални атмосферски услови



Разгледувајќи ја едновремено зависноста на пробивниот напон од притисокот на гасот  $p$  и растојанието меѓу електродите  $d$  се дошло до заклучокот дека тој зависи од производот на тие две величини  $U_p = f(pd)$ . Оваа зависност е позната под името Пашенов (Paschen) закон и таа експериментално е добиена во 1889 година. Зависноста е потоа одредена и теоретски и е добиено дека таа е

$$U_p = \frac{a(pd)}{b + \ln(pd)} = \frac{190(pd)}{6,18 + \ln(pd)} \quad (7.4)$$

каде што пробивниот напон  $U_p$  е изразен во kV, притисокот  $p$  е изразен во бари (1 bar = 101,3 kPa), а растојанието  $d$  е изразено во cm. Вредностите на константите  $a$  и  $b$  се дадени за воздух, за други гасови тие имаат други вредности.

Покрај претходната релација често пати се користи друга многу поедноставна емпириска релација. Таа гласи

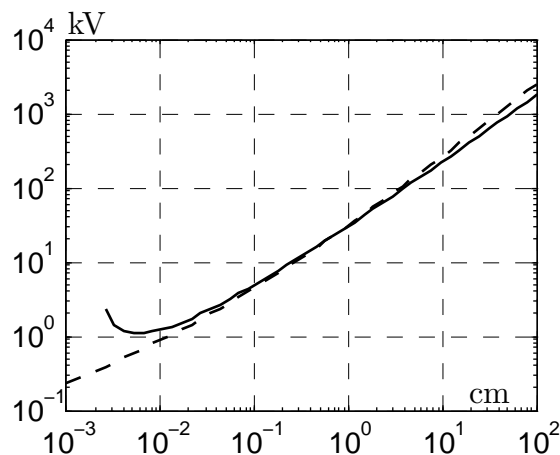
$$U_p = A\delta d + B\sqrt{\delta d} = 24,5\delta d + 6,4\sqrt{\delta d} \quad (7.5)$$

каде што пробивниот напон  $U_p$  е изразен во kV, а растојанието  $d$  е изразено во cm. Со  $\delta$  е означена релативната густина на воздухот која е дефинирана со изразот

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} = \frac{p}{1} \frac{273 + 20}{273 + \theta} = p \frac{293}{273 + \theta}$$

каде што  $p$  е актуелниот притисок на воздухот изразен во бари, додека  $\theta$  е актуелната температура изразена во °C. Вредностите на константите  $A$  и  $B$  се дадени за воздух.

На следната слика се нацртани двете претходно наведени релации за пробивниот напон во зависност од растојанието меѓу електродите за случај со нормални атмосферски услови:  $p = 1$  bar и  $\delta = 1$ .



**Слика 7.4. Пашенов закон за воздух**

Полна линија – Пашенов закон (7.4), испрекинатата линија – емпириска формула (7.5)

Од сликата се гледа дека двете криви значително се разликуваат за многу мали растојанија, но тие се толку мали растојанија што не се од практично значење во техниката на висок напон. Кривата дадена со (7.4) има минимум кога е исполнет условот

$$pd = e^{1-b} = 0,0056 \text{ bar} \cdot \text{cm}$$

од каде што при  $p = 1 \text{ bar}$  се добива дека е  $d = 0,0056 \text{ cm} = 56 \text{ }\mu\text{m}$ .

Користејќи ја емпириската релација на Пашеновиот закон можеме да ја пресметаме пробивната јачина на електричното поле во воздух

$$E_p = \frac{U_p}{d} = 24,5\delta + 6,4\sqrt{\frac{\delta}{d}} \quad (7.6)$$

При нормални атмосферски услови и растојание  $d = 1 \text{ cm}$  пробивната јачина на електричното поле во воздух изнесува  $30,9 \text{ kV/cm}$ , додека при поголеми растојанија таа опаѓа и се стреми кон вредноста  $24,5 \text{ kV/cm}$ .

### 7.1.2 Пробив во нехомогено електрично поле

Во праксата најчесто се среќаваат случаи со нехомогени електрични полиња. Кај метални конструкции кои не се идеално рамни плочи електричното поле е секогаш посилено на зашилените делови, а потоа силно опаѓа и тоа практично пропорционално со квадратот од растојанието ( $E \propto 1/r^2$ ). Во случај на цилиндрични конфигурации полето е најјако на обвивката на цилиндерот, а опаѓа со порастот на растојанието ( $E \propto 1/r$ ).

Нехомогени електрични полиња има околу спроводниците на надземните водови и околу изолаторите кои се користат кај нив посебно на точките на обесување кои имаат зашилените делови. Исто така, нехомогени полиња се среќаваат кај оклопените водови и постројки изолирани со  $\text{SF}_6$  кои всушност се коаксијални кондензатори.

Во нехомогено електрично поле може да постои пробив во гасот само на кратко растојание околу металните делови до каде што јачината на електричното поле е поголема од одредена критична вредност  $E_k$  при која што започнува пробивот. Во овој случај пробивот не е целосен, т.е. не оди од една до друга метална електрода, туку е во форма на локално искрење познато под името корона кое е проследено со виолетова светлина (слика 7.5).



Слика 7.5. Корона на изолаторски ланец од  $500 \text{ kV}$  надземен вод

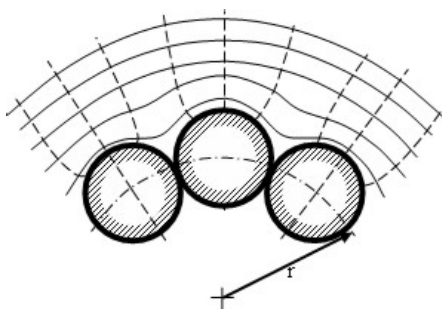
Јачината на електричното поле (изразено во  $\text{kV/cm}$ ) при коешто започнува корона спроводник со радиус на кривината  $r$  (изразен во  $\text{cm}$ ) изнесува

$$E_k = 24,5m\delta \left[ 1 + \frac{0,65}{(\delta r)^{0,38}} \right] \quad (7.7)$$

каде што  $\delta$  е релативната густина на воздухот, а  $m$  е коефициент на глаткост на спроводникот. При мали радиуси  $r < 1$  cm се користи следниот израз

$$E_k = 30,3m\delta \left[ 1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}} \right] \quad (7.8)$$

За различни типови спроводници за надземни водови коефициентот на глаткост изнесува  $m = 0,82 \div 0,94$ . Од него зависи каква ќе биде распределбата на електричното поле на површината на спроводникот (слика 7.6).



Слика 7.6. Електрично поле на површината на многужичен спроводник

Моменталната вредност на напонот при којшто настанува короната изнесува

$$U_k = E_k r \ln \frac{2H}{r} \quad (7.9)$$

каде што  $H$  е висина на спроводниците над земјата. Бидејќи напонот се менува по синусен напон тој може два пати во една периода (во позитивна и негативна насока) да ја надмине вредноста  $U_k$ . Тоа значи дека коронското празнење ќе се случува 100 пати во секунда. Затоа короната може да се слушне како карактеристично зуење ако се застане блиску до високонапонска постројка или под надземен вод.

Главните негативни страни на короната се создавањето на озон кој може хемиски да ги оштети металните делови на високонапонската опрема. Освен тоа постојаното палење и гасење на короната, кое што во суштина е поместување на полнежи кон и од спроводниците е придружено со загуби на активна енергија која се претвора во топлина.

На условите за појава на корона значително влијаат временските услови. Врнежите ја зголемуваат јачината на електричното поле на површината на спроводникот затоа што за него се лепат капки дожд или мраз кои може да имаат зашилени форми. Во такви услови почетниот напон за појава на корона  $U_k$  многу се намалува. За одредување на јачината на полето  $E_k$  при постоење на талози од мраз треба да се смета со  $m = 0,6$ , додека во услови на дожд или снег во зависност од нивната интензивност се зема  $m = 0,57 \div 0,73$ .

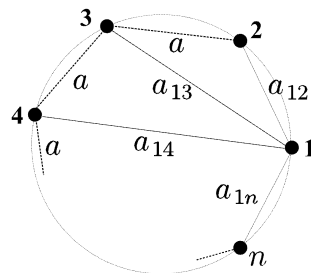
Загубите на моќност од корона може да се пресметаат со формулата на Пик (Пеек)

$$P_k = \left( \frac{241}{\delta} \right) \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{D}} \cdot (U_f - U_k)^2 \cdot 10^{-5} \quad (7.10)$$

каде што загубите се изразени во kW/km и тоа само за една фаза. Во формулата со  $f$  е означена фреквенцијата, а со  $D$  средното геометриско растојание меѓу фазите кое изнесува  $D = \sqrt[3]{D_{AB}D_{AC}D_{BC}}$ .

Загубите на активна моќност кај надземните водови поради короната се мали и изнесуваат до 1 kW/km за надземни водови со напон од 110 kV, односно неколку kW/km за водови со напон до 400 kV. За водови со многу високи напон (500 kV, 750 kV и 1150 kV) загубите достигнат и вредности од неколку десетици kW/km па дури и 100 kW/km. Имајќи ја предвид големата должина на таквите водови се заклучува дека вкупните загуби на моќност се значителни загуби и споредливи со загубит на моќност во фазните спроводници предизвикани од течењето на струја во нив.

За да се намали интензитетот на короната треба да се употребуваат спроводници со поголем радиус, но тоа би било економски неисплатливо и затоа се користат шупливи спроводници кои со иста количина материјал имаат поголем надворешен радиус. Наместо тоа, најчесто се применува друга мерка: користење на спроводници во сноп каде што за секоја фаза се ставаат 2 или повеќе спроводници поставени во темињата на правилен многуаголник со должина на страната  $a$  (слика 7.7). Суштината во намалувањето на јачината на електричното поле на површината на спроводниците се состои во тоа што секој од нив на површината има  $n$  пати помало количество електрицитет во однос на случајот со еден спроводник по фаза.

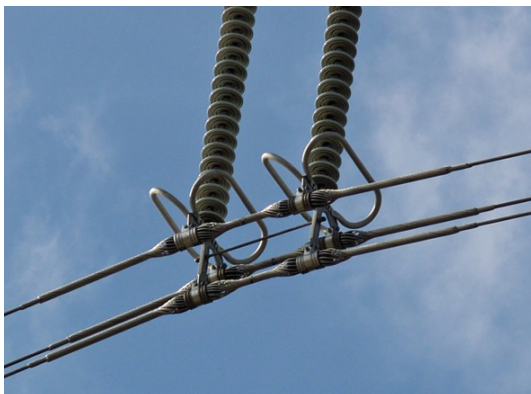


Слика 7.7. Спроводници во сноп

Снопот од  $n$  спроводници може да се третира како единствен спроводник со еквивалентен радиус пресметан на следниот начин

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot a_{12} \cdot a_{13} \cdot \dots \cdot a_{1n}} \quad (7.11)$$

при што секогаш важи  $r_e \gg r$ . Кај нас кај 400 kV водови се користат два спроводника во сноп при што обично е  $r = 1,5$  cm и  $a = 40$  cm со што се добива  $r_e = \sqrt{r \cdot a} = 7,7$  cm.



(а) изолатор кај спроводници во сноп



(б) одводник и трансформатор

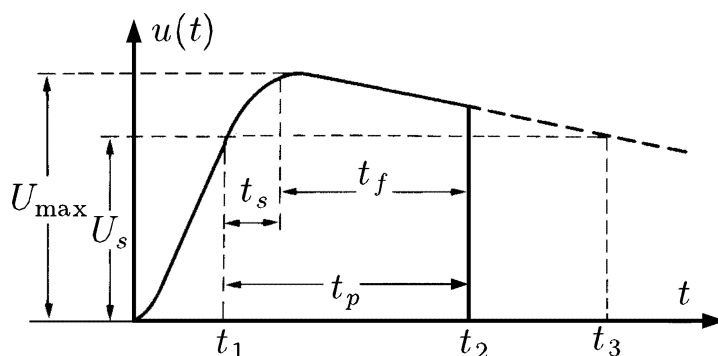
Слика 7.8. Прстени за намалување на короната

Уште еден начин за намалување на короната е поставување на прстени на местата каде што се прицврстуваат спроводниците (слика 7.8). Тоа е обично на висечките и потпорните изолатори кај надземните водови, како и кај спроводните изолатори на трансформаторите и друга опрема. Прстените служат за регулација на електричното поле со што се избегнуваат со што се намалуваат неговите големи вредности на острите метални делови.

### 7.1.3 Волт-секундна карактеристика

Во претходните разгледувања за пробив во гасови не водевме сметка за долготрајноста на приложениот напон и притоа се подразбираше дека времето на делувањето на напонот е доволно големо за да настане пробив. Сосема е поинаква ситуацијата ако не некое меѓувоздушно растојание или на површината од цврст изолатор (на пример кај надземен вод) делува импулсен напон со стандарден облик 1,2/50 (времетраење на челото  $1,2\mu\text{s}$  и времетраење на грбот  $50\mu\text{s}$ ).

Ќе разгледаме воздушно меѓурастојание чиј пробивен напон е  $U_s$  и на кое делува импулсен напон со максимална вредност  $U_{\text{max}}$  (слика 7.9).



Слика 7.9. Пробив при импулсен напон

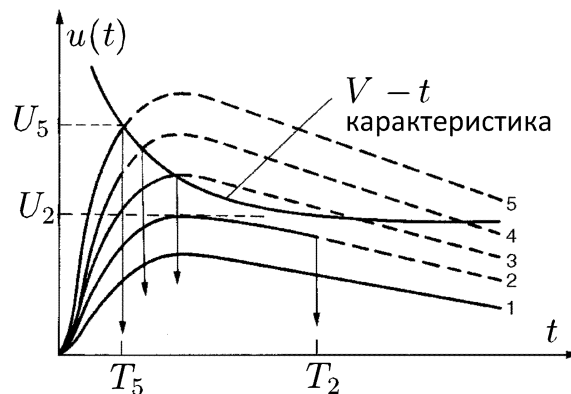
Во моментот  $t_1$  импулсниот напон достигнува вредност  $U_s$  и од тогаш постои шанса да настане пробив. За да настане пробив треба најдоцна до моментот  $t_3$ , кога импулсниот напон опаднал до  $U_s$ , да се појави еден слободен електрон кој ќе формира лавина, потоа ќе се формира стример од повеќе лавини и на крајот ќе се премести целото воздушно меѓурастојание.

Процесот на образување на слободни електрони во едно меѓуелектродно растојание во гас е случаен процес и затоа времето за појава на првиот слободен електрон  $t_s$  се вика статистичко време на закаснување. Тоа значи дека во просек пробивот започнува во моментот  $t_1 + t_s$ , а неговото траење изнесува  $t_f$  кое е наречено време на формирање на пробивот. Според тоа, вкупното време на пробивот се состои од три компоненти  $t_1 + t_s + t_f$ .

За различни вредности на  $U_{\text{max}}$  овие времиња се различни, а и при повеќекратно приложување на напон со една иста вредност на  $U_{\text{max}}$  нема секогаш да настане пробив. Затоа е воведен терминот 50% пробивен напон кој има таква амплитуда што по поголем број повторени удари на непроменетата конфигурација на електродите ќе предизвика пробив во 50% од случаите.

Зависноста на 50% пробивен напон од времето за кое ќе настане пробивот на една изолациона конструкција се нарекува волт-секундна ( $V - t$ ) карактеристика на изолацијата.

Волт-секундната карактеристика се добива во лабораториски услови со испитување на изолацијата со стандарден импулсен напон со различни вредности на неговата амплитуда. На одредена изолациона конструкција повеќе пати се приложуваат импулсни напони со одредени амплитуди и со помош на осцилоскоп се одредува моментот кога ќе настане пробив (слика 7.10). Таму се прикажани 5 импулсни напони кои се приложени на одредена изолација при што првиот од нив не предизвикал пробив, а другите предизвикале пробив со веројатност од 50% со временско доцнење означено со  $T_2 \div T_5$ . Испитувања се долготрани бидејќи бараат повторување на експериментот голем број пати за да се определи доволно точно 50% пробивен напон. Обично кривата  $V-t$  се одредува со околу 5 точки.

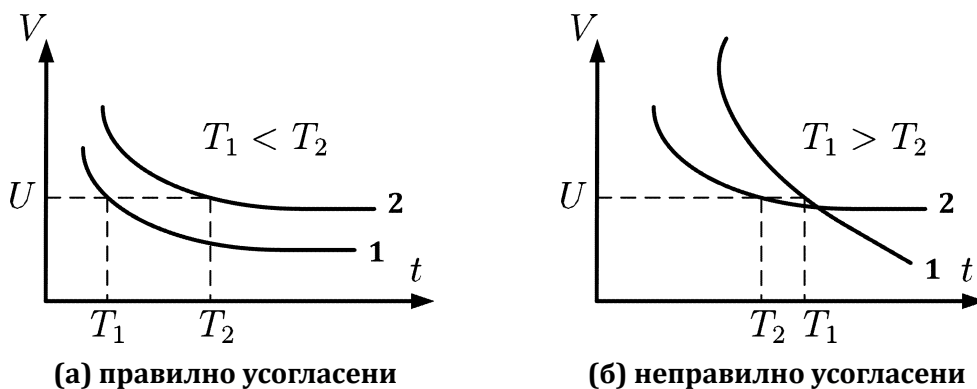


Слика 7.10. Добивање на волт-секунда карактеристика

Волт-секундната карактеристика на изолацијата кај изолаторските ланци од надземните водови може да се опише со помош на следната релација

$$U_{50\%} = \left( 400 + \frac{710}{t^{3/4}} \right) \cdot d \quad (7.12)$$

каде што  $d$ (m) е меѓуелектродното растојание. Времето  $t$  се изразува во  $\mu s$ , а пробивниот напон се добива во kV.



(а) правилно усогласени

(б) неправилно усогласени

Слика 7.11. Усогласеност на волт-секундни карактеристики

1) заштитетн уред, 2) изолациона конструкција

На сликата 7.11 прикажани се два примера за волт-секундни карактеристики на заштитетн уред (на пример искриште) и изолациона конструкција (на пример изолаторски ланец од надземен вод). За нив велите дека се правилно усогласени

ако при која било вредност на напонот пробив побрзо настанува кај заштитниот уред ( $T_1 < T_2$ ). На сликата под б) прво ќе настане пробив кај изолацијата, што значи дека заштитниот уред во тој случај не е правилно избран.

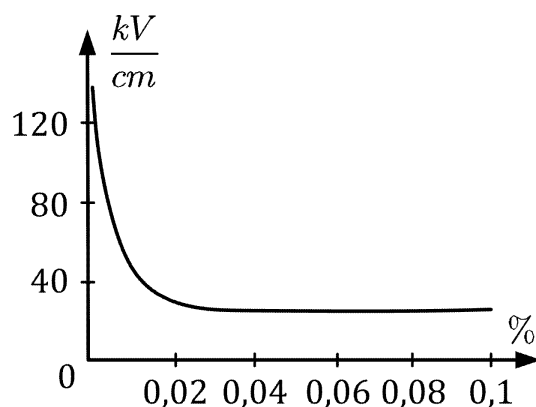
## 7.2 Пробив во течни диелектрици

Кај многу чистите течни диелектрици настанувањето на електричен пробив е на сличен начин како и кај гасовите. Под дејство на јако електрично поле настанува оттргнување на електрон од електродите кој во судир со молекулите на течноста врши судирна јонизација. При судирната јонизација се ослободува нов електрон кој исто така се забрзува во електричното поле и врши нова јонизација со што се создава лавина од електрони со што многу брзо настанува пробив. Зголемената електрична цврстина на течните диелектрици во однос на гасовите се толкува со помалиот среден слободен пат заради поголемата густина на течностите.

Во праксата големо влијание врз електричната цврстина на течните диелектрици пресудна улога имаат присуството на гасови, влага и нечистотии дури и во најмала мерка.

Кај течни диелектрици кои содржат гасови пробивот настанува со јонизација на гасот во микрошуплините, т.е. гасните меурчиња, кои се прошируваат и образуваат гасен канал меѓу електродите.

Присуството на вода во трансформаторското масло во вид на мали капки при нормална температура многу ја намалува електричната цврстина. Под влијание на силното електрично поле, капките вода (која е многу поларна течност) се издолжуваат во форма на елипсоиди и се наредуваат една до друга по силовите линии на електричното поле прилепувајќи се со спротивно поларизираните краеве. Со тоа прават спроводен мост по кој настанува електричниот пробив. На сликата 7.12 дадена е зависноста на електричната цврстина од процентуалната содржина на вода кај трансформаторско масло.



Слика 7.12. Типична зависност на електричната цврстина на трансформаторското масло од содржината на вода (%)

Бидејќи електричната цврстина на трансформаторското масло (слично е и со другите видови масла) опаѓа за повеќе од 5 пати дури и при содржина на влага од 0,02% неопходно е негово сушење и добра херметизација при полнењето на високонапонските уреди изолирани со масло. Влага во маслото може да се појави

во текот на експлоатацијата поради „дишење“ на лошо херметизиран уред, како и процесот на стареење и закиселување на маслото.

### 7.3 Пробив во цврсти диелектрици

Цврстите диелектрици се широко применети во техниката на висок напон не само поради нивната голема електрична цврстина туку и затоа што тие се користат и како конструкциони материјали за високонапонските уреди. Затоа при дизајнирањето на изолациони конструкции со цврсти диелектрици се тежнее кон максимално искористување на нивните електрични, механички и термички карактеристики. Нивната повеќекратна улога има негативна страна во тоа што тие се напрегнати од повеќе фактори одеднаш (електрично поле, топлина, механички сили), така што кај нив причините за пробив се разнолики.

Пробивот во цврстите диелектрици претставува неповратно разрушување. По пробивот изолацијата не е во состојба самостојно да ја воспостави првобитната електрична цврстина, така што се потребни крупни поправки или замена на целата изолацијата, а понекогаш и на целиот уред. Поради тоа изолационите конструкции кои содржат цврсти диелектрици треба да имаат поголеми резерви во електричната цврстина од очекуваните јачини на електрични полиња кои може да се појават во текот на експлоатацијата.

Кај цврстите диелектрици постојат неколку главни начини за настанување на пробив

- Електричен пробив,
- Топлински пробив,
- Електрохемиски пробив,
- Електромеханички пробив.

Секој од наведените видови на пробив може да се појави кај кој било цврст диелектрик во зависност од карактерот на електричното поле, постоењето на дефекти во диелектрикот, условите за ладење и времето на делување на високиот напон.

*Електричниот пробив* се карактеризира со многу брз развој. Тој се случува за време од  $10^{-8} \div 10^{-7}$  s и не е условен со потребата од топлинска енергија. По својата природа тој е чисто електронски процес, при што од малиот број почетни електрони во цврстото тело како резултат на сударна јонизација во силно електрично поле се формира електронска лавина. Ваквиот пробив се случува при појава на многу високи пренапони од атмосферско потекло или комутациони пренапони.

*Топлинскиот пробив* се карактеризира со постепена загуба на изолационите својства на цврстите диелектрици поради нивната загревање кое е предизвикано од диелектричните загуби и парцијалните празнења. Топлинскиот пробив се појавува кога ослободената топлина во диелектрикот во подолг период е поголема од количеството на топлина кое диелектрикот може да го оддаде преку системот за ладење на уредот во кој е поставен. Со тоа се нарушува топлинскиот биланс, диелектрикот се прегрева со што електричната цврстина му опаѓа и се создава можност за развој на електронски лавини кои го разрушуваат. Времетраењето на пробивот се мери со минути и часови, а во услови кога се работи за минимално прегревање на диелектрикот пробивот може да настане по повеќе месеци или години (стареење на изолацијата).



*Електрохемискиот пробив* се појавува при повишена температура и влажност на диелектрикот кога во него се развиваат електрохемиски процеси. Тие предизвикуваат неповратно намалување на отпорноста на изолацијата кое се нарекува и топлинско стареење на изолацијата. Електричната цврстина постепено се намалува до тој степен што пробивот може да настане и при нормален работен напон. На електрохемискиот пробив му треба долго време затоа намалувањето на отпорноста на диелектрикот оди споро поради тоа што се одделува мало количество на хемиски активни супстанции и треба долго време за постигнување нивна висока концентрација. Може да се каже дека и електрохемискиот пробив настанува поради поголемо одделување топлина само што во овој случај причината е во активните загуби на моќност во отпорноста на диелектрикот.

*Електромеханички пробив* е можен кај полимерните диелектрици кои при зголемена температура се наоѓаат во еластична состојба. Под дејство на електростатичките сили помеѓу електродите при висок напон се случува механички притисок врз диелектрикот. При достигнување на критична деформација настанува негово механичко разрушување.

Електромеханички пробив може да се појави и кај кршливите диелектрици, на пример во керамичките материјали кои содржат пори исполнети со гас (воздух). Парцијалните празнења во порите предизвикуваат локално загревање на диелектрикот, а тоа, пак, предизвикува локално топлинско ширење. Како резултат на тоа во диелектрикот се појавуваат механички напрегања кои во него создаваат микроскопски пукнатини. Со текот на времето тие пукнатини се шират и на крајот предизвикуваат кршење на диелектрикот.

# 8

## СТАРЕЕЊЕ НА ИЗОЛАЦИЈАТА

При експлоатацијата на изолацијата таа е подложена на различни напрегања како што се, на пример, електричните, топлинските и механичките. Поради тоа во изолацијата се случуваат сложени процеси чија последица е шпстепено влошување на својствата на изолацијата кое се вика стареење на изолацијата. По правило промената на својствата на изолацијата е неповратен процес кој завршува со пробив. Но, во некои случаи изолацијата може да биде обновена како што е на пример случајот со пречистување и сушење на трансформаторското масло.

Процесите на стареење на изолацијата го намалуваат нејзиниот рок на траење. Затоа при проектирањето, изработката и во процесот на експлоатација на високонапонската опрема треба да се превземат мерки кои ќе ја намалат брзината на стареење. Со тоа ќе се овозможи непречено користење на изолација во текот на проектираниот рок на траење кој обично е 20-30 години, па дури и повеќе.

Промената на својствата во текот на експлоатацијата на внатрешната изолација е поради различните причини, па така разликуваме електрично, топлинско и механичко стареење. Освен тоа, стареењето на изолацијата може да биде предизвикано и од навлегување на цврсти нечистотии и влага.

### 8.1 Електрично стареење на изолацијата

Електричното стареење на изолацијата се случува и при јачини на електричното поле кои се многу пати пониски од електричната цврстина на материјалот. Со зголемување на напонот брзината на електричното стареење се зголемува, а рокот на траење на изолацијата се намалува. Причина за електричното стареење се парцијалните празнења во изолацијата кои може да се појават и при напони кои се пониски од номиналниот работен напон на изолацијата. Експериментално е утврдено дека рокот на траење на изолацијата може да се пресмета со следниот израз

$$T = \frac{A}{(U - U_{pp})^n} = \frac{6 \cdot 10^9}{(U - U_{pp})^6} \quad (8.1)$$

каде што  $U$  е работен напон на изолацијата,  $U_{pp}$  е напон при којшто се појавуваат парцијални празнења, додека  $A$  и  $n$  се константи. Типичните вредности на константите се  $n = 6$  и  $A = 6 \cdot 10^9$  год./ $(\text{kV})^6$ . Релацијата важи за  $U > U_{pp}$ , во спротивно се смета дека изолацијата не е подложна на електрично стареење.

Ќе разгледаме случај на едножилен кабел за 110 kV вод кај кој со мерење е утврдено дека парцијални празнења се појавуваат при напон од  $U_{pp} = 45$  kV во однос на земјата. Неговиот нормален работен век изнесува 40 години. Ако сметаме дека кабелот работи со својот номинален напон ќе имаме  $U = 110/\sqrt{3} = 63,5$  kV и за неговиот рок на траење ќе добиеме

$$T = \frac{6 \cdot 10^9}{(63,5 - 45)^6} = 149,7 \text{ год.}$$

што е далеку над вообичаениот проектиран рок на работа на кабелот. Тоа ни укажува дека кај таквиот кабел електричното стареење ќе биде толку споро што практично нема да му го скрати нормалниот рок на работа. Во овој случај кабелот старее  $149,7/40 = 3,7$  пати поспоро, што значи дека треба да работи 3,7 години за да остари 1 година. Или поинаку кажано: во текот на 1 година тој ќе остари  $1/3,7 = 0,3$  години.

Но, ако кабелот постојано работи со 10% зголемен напон, тогаш ќе имаме  $U = 1,1 \cdot 110/\sqrt{3} = 69,9$  kV и за неговиот рок на траење ќе добиеме

$$T = \frac{6 \cdot 10^9}{(69,9 - 45)^6} = 25,2 \text{ год.}$$

што е драстично намалување на рокот на траење. Во овој случај кабелот старее побрзо од проектираното и тоа  $40/25,2 = 1,6$  пати побрзо. Тоа значи дека за 1 година работа ќе остари 1,6 години.

Доколку се случи кабелот да работи со 10% повишен напон во 1/2 од годината (во просек по 12 часа на ден), а во остатокот од времето тој работи со номинален напон тогаш тој за 1 година еквивалентно ќе остари за  $0,5 \cdot 1,6 + 0,5 \cdot 0,3 = 0,95$  години. Тоа значи дека во таков случај работниот век практично нема да му се скрати.

Претходните резултати се многу чувствителни на вредноста на напонот  $U_{pp}$ , како и на работниот режим на кабелот. Овој хипотетички пример само ни укажува на фактот дека треба да се прават редовни контроли кај високонапонската опрема за да се одреди нивото на парцијални празнења од кои настанува електрично стареење кое може да го скрати работниот век на опремата.

## 8.2 Топлинско стареење на изолацијата

Диелектричните материјали кои се користат за внатрешна изолација на високонапонските уреди на собна температура се практично хемиски инертни. Меѓутоа при работни температури ( $90 \div 180^\circ\text{C}$ ) во нив се појавуваат или нагло се убрзуваат хемиските реакции кои ја изменуваат структурата на материјалот и предизвикуваат влошување на неговите изолациони својства. Таквите процеси се нарекуваат топлинско стареење на изолацијата. Топлинското стареење на изолацијата кај цврстите материјали доведува до намалување на механичката цврстина, со што при постојаните механички напрегања на кои е изложена изолацијата доаѓа до нејзино разрушување и пробив.

Како резултат од топлинското стареење на изолацијата кај течните диелектрици се натрупуваат продукти од хемиските реакции кои може да бидат во форма на гасови, течности и цврсти честички. Сите тие ја намалуваат чистотата на диелектрикот со што нагло му се намалува диелектричната цврстина, опаѓа

електричната отпорност и растат диелектричните загуби со што процесот на стареење се забрзува.

За да се оцени брзината на топлинско стареење на изолацијата е воведен терминот релативна истрошеност на изолацијата  $\lambda$ , која уште се нарекува и фактор на стареење. Релативната истрошеност е однос помеѓу вистинскиот животен век  $T$  што изолацијата ќе го помине со наметнатото темпо на работа во погонот и нејзиниот нормален животен век  $T_n$ . Факторот  $\lambda$  во најголема мерка зависи од работната температура  $\theta$  на изолацијата, односно од нејзиното отстапување од номиналната работна температура  $\theta_n$ . Релативната истрошеност на изолацијата се пресметува со правилото на Монсингер (Montsinger) кое гласи

$$\lambda = \frac{T}{T_n} = 2^{(\theta - \theta_n) / \Delta\theta} \quad (8.2)$$

каде што  $\Delta\theta$  е зголемување на температурата кое предизвикува 2 пати поголемо релативно стареење на изолацијата што значи скратување на рокот на траење за 2 пати. Вредноста на  $\Delta\theta$  за различни видови изолација е во опсегот  $8 \div 12^\circ\text{C}$ , а најчесто се зема  $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$ .

**Пример 8.1.** Одредена изолација од класа Y која што има номинална работна температура  $\theta_n = 90^\circ\text{C}$  е проектирана за рок на траење од 25 години. Колкав ќе биде нејзиниот рок на траење ако работна температура изнесува  $\theta = 114^\circ\text{C}$ ?

#### Решение

Според правилото на Монсингер (8.2) релативното стареење на изолацијата изнесува

$$\lambda = 2^{(114-90)/10} = 5,278$$

што значи дека изолацијата за 1 година работа ќе остаре како да работела 5,278 години. Според тоа нејзиниот рок на траење ќе изнесува

$$T = \frac{25}{5,278} = 4,74 \text{ години.}$$

□ □ □

**Пример 8.2.** Изолација од класа A ( $\theta_n = 105^\circ\text{C}$ ) и проектиран за рок на траење од 20 години во првите 2,5 години работела со работна температура  $\theta = 115^\circ\text{C}$ . Уште колку години ќе може нормално да работи ако продолжи да работи со следната работна температура а)  $\theta = \theta_n = 105^\circ\text{C}$  и б)  $\theta = 125^\circ\text{C}$ ?

#### Решение

Во првите 2,5 години релативното стареење на изолацијата изнесува

$$\lambda = 2^{(115-105)/10} = 2$$

што значи дека изолацијата остарела како да работела 5 години.

Во случајот под а) бидејќи е  $\theta = \theta_n$  релативното стареење е  $\lambda = 1$ , така што, водејќи сметка дека таа е веќе остарена 5 години, изолацијата ќе може да работи уште  $20 - 5 = 15$  години. Тоа значи дека вкупниот работен век ќе изнесува  $2,5 + 15 = 17,5$  години наместо проектираните 20 години.

Во случајот под б) релативното стареење на изолацијата изнесува

$$\lambda = 2^{(125-105)/10} = 4$$

што значи дека изолацијата за да остаре 15 години (колку што и преостануваат во нормални работни услови) таа треба да работи само  $15/4 = 3,75$  години. Со тоа купниот работен век ќе изнесува  $2,5 + 3,75 = 6,25$  години.

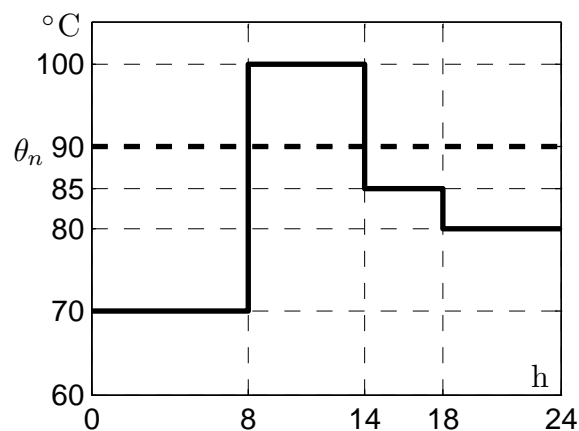
□ □ □

Кога одредена изолација работи со променлив дијаграм на оптоварување којшто може да се подели на определен број  $n$  временски подинтервали:  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_n$ , тогаш релативната истрошеност на изолацијата што ќе се оствари за време на разгледуваниот период ќе биде

$$\lambda_e = \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t_1 + \lambda_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + \lambda_n \cdot \Delta t_n}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n} \quad (8.3)$$

Во последната равенка со  $\lambda_j$ , ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), се означени вредностите на релативните истрошености на изолацијата во одделните временски интервали  $\Delta t_j$ , пресметани со помош на (8.2) каде што се заменуваат температурите  $\theta_j$  во соодветниот временски интервал.

**Пример 8.3.** Кабел со изолација од класа Y ( $\theta_n = 90^\circ\text{C}$ ) е проектирана за рок на траење од 30 години. Во текот на денот тој работи со променлива температура која што е прикажана на сликата П.8.3.1. Колкав ќе биде неговиот рок на траење?



Слика П.8.3.1. Промена на температурата на кабелот во текот на денот

### Решение

Бројот на временски интервали е  $n = 4$ , а од сликата може да се одреди дека нивното времетраење изнесува:  $\Delta t_1 = 8$  h,  $\Delta t_2 = 6$  h,  $\Delta t_3 = 4$  h и  $\Delta t_4 = 6$  h. За секој временски интервал го пресметуваме релативното стареење на изолацијата на кабелот со што добиваме

$$\lambda_1 = 2^{(70-90)/10} = 0,25$$

$$\lambda_2 = 2^{(100-90)/10} = 2$$

$$\lambda_3 = 2^{(85-90)/10} = 0,707$$

$$\lambda_4 = 2^{(80-90)/10} = 0,5$$

од каде понатаму можеме да го пресметаме еквивалентното релативно стареење

$$\lambda_e = \frac{0,25 \cdot 8 + 2 \cdot 6 + 0,707 \cdot 4 + 0,5 \cdot 6}{24} = 0,826$$

Бидејќи се доби  $\lambda_e < 1$  изолацијата на кабелот старее поспоро отколку кога тој цело време би работел со номинална работна температура иако во одреден дел од денот тој работи со температура над номиналната, т.е. работи прегреан.

Вкупниот рок на траење на кабелот ќе биде

$$T = \frac{30}{0,826} = 36,3 \text{ години}$$

што е повеќе од проектираниот рок од 30 години.

Во практиката, при димензионирањето на кабелските мрежи, површините на напречните пресеци на спроводниците од каблите обично се избираат само според максималното оптоварување, не земајќи ги предвид изразите за топлинска истрошеност на изолацијата. Од тука произлегува дека со таквиот избор на површината на напречниот пресек на спроводниците, сумарната топлинска истрошеност на изолацијата на каблите ќе биде  $\lambda_e < 1$ , т.е. стареењето на изолацијата се забавува и каблите најчесто остануваат недоискористени.

□ □ □

**Пример 8.4.** Стареењето на изолацијата од класа Е се случува под влијание на два фактора: работната температура и парцијалните празнења, т.е. таа старее и топлински и електрично едновремено. Работниот напон на изолацијата е  $U = 35 \text{ kV}$ , а напонот на појава на парцијални празнења е  $U_{pp} = 15 \text{ kV}$ . Изолацијата е проектирана за рок на траење  $T_n = 25$  години при отсуство на парцијални празнења и при работа со нормална работна температура  $\theta_n = 120^\circ\text{C}$ . Да се пресмета работниот век на изолацијата при работна температура  $\theta = 130^\circ\text{C}$  и при појава на парцијални празнења.

#### Решение

Релативното топлинско стареење на изолацијата изнесува

$$\lambda = 2^{(130-120)/10} = 2$$

така што рокот на траење на изолацијата поради топлинското стареење изнесува

$$T_1 = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ години.}$$

Рокот на траење на изолацијата поради електричното стареење изнесува

$$T_2 = \frac{6 \cdot 10^9}{(35 - 15)^6} = 93,75 \text{ години.}$$

Рокот на траење на изолацијата при едновременото дејство на двата механизми на стареење ќе биде

$$T = \frac{1}{T_1^{-1} + T_2^{-1}} = \frac{1}{12,5^{-1} + 93,75^{-1}} = 11 \text{ години.}$$

□ □ □

### 8.3 Механичко стареење на изолацијата

Под дејство на механички напрегања во диелектрикот постепено се појавуваат микроскопски пукнатини кои со текот на времето се шират. Кога нивната големина ќе надмине одредени критични вредности настанува пробив во диелектрикот. Влијанието на пукнатините врз пробивниот напон на диелектрикот ќе го прикажеме преку еден пример.

**Пример 8.5.** Плочест кондензатор со растојание меѓу електродите  $d_1 = 5 \text{ mm}$  е исполнет со диелектрик со релативна диелектрична константа  $\varepsilon_{1r} = 4$  и електрична цврстина еднаква на  $E_{1,\text{max}} = 20 \text{ kV/mm}$ . Од механички напрегања во диелектрикот се појавува воздушна пукнатина со ширина  $d_2 = 0,2 \text{ mm}$  со електрична цврстина  $E_{2,\text{max}} = 3 \text{ kV/mm}$  и  $\varepsilon_{2r} = 1$ . Да се одреди колкав максимален напон може да се приложи на таквиот кондензатор за да не дојде до пробив.

#### Решение

Кога кондензаторот бил исправен, без пукнатината исполнета со воздух, тој бил во состојба да издржи напон со вредност

$$U_{1,\text{max}} = E_{1,\text{max}} \cdot d_1 = 20 \cdot 5 = 100 \text{ kV} \quad (8.4)$$

Од изразите (2.15) и (2.16), дадени на стр. 14, заклучивме дека појако електрично поле ќе има во диелектрикот со помала диелектрична константа. Тоа значи дека тука појако електрично поле ќе има во воздушната пукнатина.

Од (2.16) можеме да го пресметаме напонот при којшто јачината на електричното поле во воздушната шуплина ќе изнесува  $E_{2,\text{max}}$

$$U_{2,\text{max}} = E_{2,\text{max}} \cdot \frac{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2}{\varepsilon_1} = 3 \cdot \frac{1 \cdot 5 + 4 \cdot 0,2}{4} = 4,35 \text{ kV}$$

што значи вредноста на максималниот напон кој може да го поднесе кондензаторот е намалена 23 пати. Со тоа дури и при нормален работен напон најверојатно ќе дојде до пробив во воздушната шуплина кој потоа дополнително ќе ја оштетува и проширува се додека не дојде до целосен пробив во останатиот дел од изолацијата.

□ □ □

# 9

## ИЗОЛАЦИОНИ КОНСТРУКЦИИ

### 9.1 Надворешна изолација

Надворешната изолација е широко распространета во високонапонските постројки и уреди, при што како изолатор се користи атмосферскиот воздух. Воздухот како изолатор го среќаваме кај надземните водови, кај собирниците во разводните постројки и кај надворешните делови од електричните апарати (енергетски трансформатори, мерни трансформатори, прекинувачи, раставувачи и друго).

Проводните делови коишто се изолирани меѓусебно со воздух треба да се одржуваат на одредени растојанија за што се користат цврсти изолатори кои служат како елементи од механичката конструкција на соодветниот уред. Цврстите изолатори можат да бидат потпорни, носечки, затезни и воведни. Како материјал за нивна изработка најчесто се користи порцелан, а тие може да бидат и стаклени и во поново време силиконски со јадро од фиберглас.

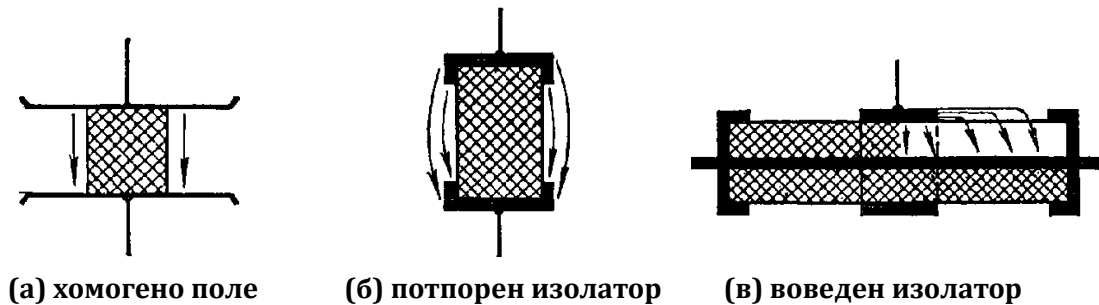
Поставувањето на цврст изолатор во воздух има свои особености во поглед на начинот на настанување на пробив во изолационата конструкција. Претходно видовме како настанува пробив во воздух или во цврст диелектрик. Наведените механизми на пробив во воздух и цврст диелектрик важат и овде, но тука пробивот често пати настанува на површината која е гранична меѓу воздухот и цврстиот диелектрик. Затоа тука прво ќе ја разгледаме појавата на пробив по површината на цврст диелектрик од каде што ќе дојдеме до важни заклучоци за обликот на граничната површина со кој ќе се намали можноста за таков вид на пробив. Освен тоа ќе наведеме и други начини за намалување на зачестеноста на пробив на површината на цврст диелектрик. Потоа, ќе разгледаме карактеристични форми на изолатори кои се користат како цврсти изолатори кај надворешната изолација.

#### 9.1.1 Пробив по површината на цврст диелектрик

На сликата 9.1 дадени се три карактеристични конструкции на цврст диелектрик во допир со воздух. Во случајот под а) диелектрикот се наоѓа во хомогено електрично поле што може да не доведе до заклучок дека бидејќи неговото присуство не го менува електричното поле (тоа е еднакво и во диелектрикот и во воздухот затоа што на границата има само тангенцијална компонента) пробивниот напон на конструкцијата ќе остане ист како и кога го немало диелектрикот. Но тоа не е така, пробивниот напон ќе се намали во присуство на цврстиот диелектрик



(причините ќе ги наведеме подолу). Во случајот под б) дадена е конструкција која е се среќава кај потпорните изолатори и за неа е карактеристично тоа што полето е нехомогено при што на допирната површина на диелектрикот и воздухот преовладува тангенцијалната компонента на електричното поле (тоа е скоро паралелно со диелектрикот). Во случајот под в) дадена е конструкција која се среќава кај воведни изолатори и за неа е карактеристично тоа што полето е исто така нехомогено, а на допирната површина на диелектрикот со воздухот доминира нормалната компонента на електричното поле (тоа е скоро нормално на диелектрикот).



**Слика 9.1. Карактеристични конструкции на цврст диелектрик во допир со воздух**

Причината за намалување на електричната цврстина во конструкцијата од сликата 9.1а е поврзана со апсорпцијата на влага од воздухот на површината на диелектрикот и со постоењето на воздушни шуплини меѓу електродите и диелектрикот. Површината на диелектрикот во влажен воздух е покриена со тенок слој вода кој содржи јони. Јоните под дејство на електричното поле се движат меѓу електродите и на таков начин формираат течење на струја. Како резултат на тоа полето во близина на електродите се засилува, а на средината се ослабува. Засилувањето на полето во близина на електродите доведува до снижување на електричната цврстина на меѓуелектродното растојание. Тоа снижување е поголемо ако е поголема хигроскопноста на диелектрикот. На пример стаклото е похигроскопно од полираниот порцелан и кај него пробивот по површината настанува при пониски напони.

Покрај тоа постоењето на воздушни процепи меѓу електродите и диелектрикот или по површината на диелектрикот предизвикува појава на појако електрично поле во воздухот кој има помала диелектрична константа ( $\epsilon_r$  на диелектрикот е  $3 \div 4$ ). Поради тоа таму се појавуваат локални празнења кои го оштетуваат диелектрикот. За да се избегне оваа појава диелектрикот се спојува со металните електроди со помош на цементни врзивни средства со што се намалува можноста за појава на воздушни шуплини.

Во изолационата конструкција од сликата 9.1б полето е нехомогено и тоа во поголема мерка отколку нехомогеноста предизвикана од површинските струи во конструкцијата од сликата 9.1а. Според тоа тука пробивот ќе настане при понизок напон. Слично е и во случајот даден на сликата 9.1в со тоа што бидејќи во последниот случај доминира нормалната компонента на електричното поле течењето на струите оди директно кон диелектрикот со што се зголемува опасноста од негово оштетување.

Во експлоатациони услови површината на изолаторот секогаш има нечистотии

во форма на прашина или смог. При тоа сувите нечистотии имаат голем електричен отпор и не влијаат на распределбата на напонот на површината на изолаторот. Но, при навлажнување со слаб дожд или роса отпорноста на површинскиот слој многу опаѓа и тоа нееднакво на секаде со што се менува распределбата на напонот по површината, а се менуваат и големините на струите кои течат по нечистата површина. Силниот дожд обично е поволен бидејќи настанува делумно измивање на загадениот слој.

Површинските струи се поголеми во деловите кои се со поголема влажност со што на тие места доаѓа до загревање на површината и испарување на влагата со што се добиваат локални суви места со голема електрична отпорност. Бидејќи околните влажни места имаат помала отпорност практично целиот напон ќе биде приложен на сувото место (според принципот за напонски делител) и таму ќе се појави празнење во форма на искра. Доколку постојат повеќе такви места на површината на изолаторот можно е локалните искрења да се поврзат во едно целосно искрење кое ќе ја премости целата должина на изолаторот и ќе предизвика пробив во изолационата конструкција кој практично е еднофазна куса врска. Дури и да не настане еднофазна куса врска локалните искрења, кои се во форма на корона, создаваат озон и азотни оксиди кои хемиски делуваат врз цврстиот диелектрик, а во комбинација со високата температура на површината на диелектрикот може да се формира јагленосана трага. По подолго време бројот на јагленосани патеки може да се зголеми така што на крајот ќе дојде до термичко разрушување на површината на диелектрикот, продор на влага во него што на крајот ќе предизвика пробив во него.

Површината на цврстиот диелектрик заедно со јонизираниот слој кој е во негова непосредна близина формираат кондензатор кој се карактеризира со површински капацитет  $C$  кој се изразува во  $F/cm^2$ . Напонот на настанувањето на површинското празнење зависи од тој капацитет и може да се одреди со емпириската формула на Теплер

$$U_0 = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{C^{0,44}} \quad (9.1)$$

каде што  $U_0$  се добива во kV.

Должината на искрата на површинското празнење  $l_p$  зависи од површинскиот капацитет и од брзината на промената на напонот и може да се одреди со емпириската формула

$$l_p = kC^2U^5\sqrt{dU/dt} \quad (9.2)$$

каде што коефициентот  $k$  се одредува експериментално.

Од претходната релација можеме да одредиме при кој напон ќе дојде до целосен пробив на површината на цврстиот диелектрик кој се добива од условот должината на искрата да биде еднаква на должината на изолаторот  $l_{iz}$

$$U_p = \frac{1}{k} \sqrt[5]{\frac{l_{iz}}{C^2}} \left(1/\sqrt[20]{dU/dt}\right) \approx \frac{1}{k} \sqrt[5]{\frac{l_{iz}}{C^2}} \quad (9.3)$$

бидејќи  $\sqrt[20]{dU/dt} \approx 1$ .

Изразот (9.3) покажува дека за да се зголеми напонот на пробив, треба да се зголеми должината на изолаторот  $l_{iz}$  и да се намали површинскиот капацитет  $C$  што е поефективно бидејќи тој во изразот е степенуван на квадрат. Во праксата изолаторите се изведуваат со „ребра“ со зголемен дијаметар со што се постигнува

едновремено зголемување на должината на изолаторот (позната и како должина на патот на одведување) и намалување на површинскиот капацитет.

За намалување на зачестеноста на површинскиот пробив при загадени и навлажнети изолатори се користат некои од наведените мерки

- Користење на изолатори со специјална форма кои имаат многу голем пат на одведување (должина на ребрата);
- Користење на низи од капести изолатори (се применува кај надземните водови);
- Периодично површинско миење на изолаторите;
- Сместување на разводните постројки во затворени простории и користење на кабелски водови;
- Примена на специјални масти за нанесување на површината на изолаторите (решението не е трајно и е потребно повремено повторно миење на изолаторите и мачкање со маст).

### 9.1.2 Изолатори кај надземните водови

Според начинот на прицврстување за електричните столбови, изолаторите кај надземните водови се делат на потпорни и висечки.

#### Потпорни изолатори кај надземните водови

Потпорните изолатори со помош на челични држачи се фиксно прицврстени за столбовите. Спроводниците се сместуваат во посебен жлеб на изолаторот и се прицврстуваат за него со сврзна жица или со посебни стегалки (слика 9.2). Изолаторите се применуваат кај водовите со низок и среден напон до 35 kV и најчесто се изработуваат од порцелан, но се повеќе се користат и композитните изолатори кои се залиени со силикон и се поотпорни на атмосферски влијанија (слика 9.3).



Слика 9.2. Среднонапонски вод со потпорни изолатори од силикон

#### Висечки изолатори кај надземните водови

Висечките изолатори (изолаторски синџири) се применуваат кај водовите со номинален напон над 20 kV. Тие се составени од поголем број членови кои имаат



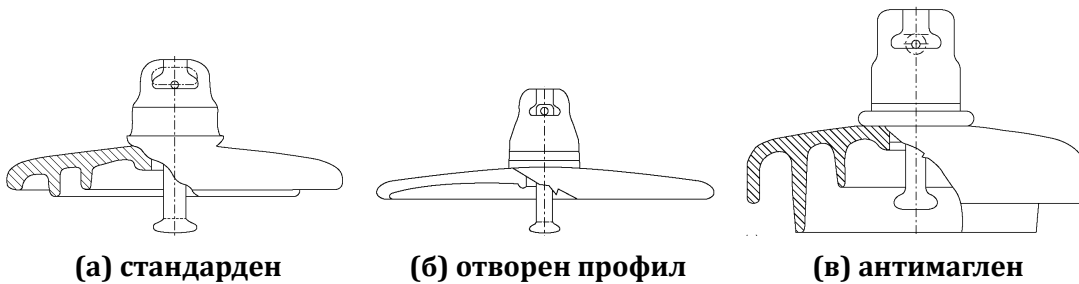
(а) порцелански



(б) силиконски

Слика 9.3. Потпорни изолатори за среднонапонски водови

форма на капа поради што се нарекуваат капести изолатори. Скиците на типичните конструкции на капести изолатори се дадени на сликата 9.4 каде се прикажани три профили на изолатори кои главно се разликуваат по обликот и должината на ребрата. Типовите дадени на сликата под а) и б) се применуваат во средини со мало загадување, додека во средини со големо загадување и присуство на магла и смог се употребува типот даден под в). Изгледот на капестите изолатори, изработени од порцелан и стакло, е даден на сликата 9.3.



(а) стандарден

(б) отворен профил

(в) антимаглен

Слика 9.4. Скици на типични конструкции на керамички капести изолатори

(а) стандарден  
керамички

(б) стандарден стаклен



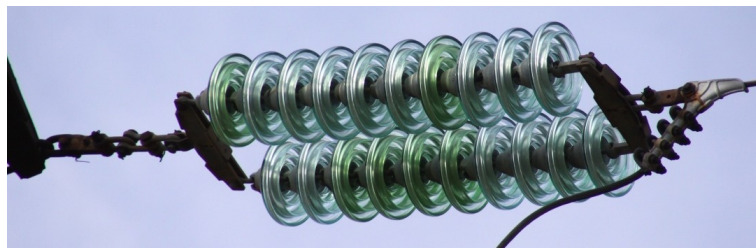
(в) антимаглен стаклен

Слика 9.5. Изглед на типични капести изолатори

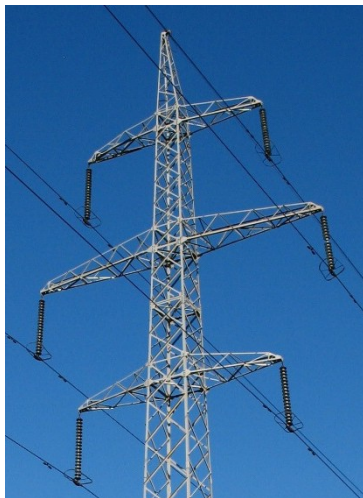
Капестите изолатори на горниот и долниот дел имаат металени држачи кои се така обликувани што долниот дел (наречен толчник) може да се вметне во горниот дел (наречен гнездо) од друг капест изолатор со што е овозможено механички да се поврзуваат повеќе изолатори во низа. Таквата низа од изолатори

се нарекува изолаторски синџир или изолаторска верига (слика 9.6). Тие се применуваат кај надземните водови за обесување и затегање на фазните спроводници, како и во трафостаниците за затегање на висечките собирници (слика 9.7). Изолаторските синџири се составени од поголем број капести изолатори во зависност од номиналниот напон на водот или постројката за која се наменети. Нивниот ориентационен број е даден во табелата 9.1.

Примената на изолаторските синџири, составени од повеќе изолаторски капи има низа добри страни. Изолаторите се механички напрегнати само на истегање, а не и на свивање. Ако еден член во синџирот биде електрички пробиеен или оштетен, останатите членови ќе бидат доволни да ги издржат електричните напрегања до првата прилика кога оштетениот елемент ќе биде заменет со нов. Замената е едноставна и брза и во многу земји таа се изведува во текот на погонот, т.е. под напон.



Слика 9.6. Изглед на изолаторски синџир



(а) надземен вод



(б) трафостаница

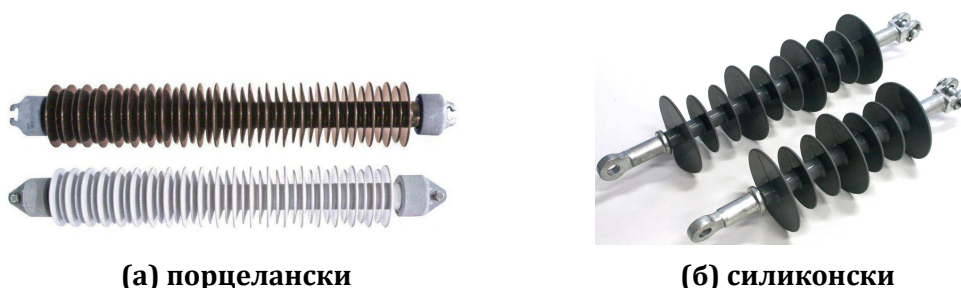
Слика 9.7. Примена на изолаторски синџири

Кај надземните водови често пати се употребуваат и стапести изолатори (слика 9.8). Овие изолатори имаат предност во однос на другите, поради својата голема цврстина во поглед на внатрешните пробои. Недостаток е што порцеланот кај овие изолатори може да биде силно напрегнат на истегање (цврстината на истегање на порцеланот е значително помала од цврстината на притисок) што обично доведува до механички оштетувања на изолаторот. Затоа овие изолатори обично се изработуваат од материјали со поголема механичка цврстина (на пример од стеатит). Освен тоа се користат и силиконски изолатори кои имаат јадро од

**Табела 9.1. Број на капести изолатори во изолаторски синџир за различни номинални напони**

$U_n$ (kV)	Изолатори
10	1
20	1÷2
35	2÷4
110	5÷7
220	9÷13
400	17÷22

композилен материјал кој е многу отпорен на истегање, а воедно е доста полесен од порцеланот. Негативна страна на стапестите изолатори е што при оштетување треба да се смени целиот изолатор, додека кај синџирите од капести изолатори може да се направи поправка со промена на само една до две капи.



(а) порцелански

(б) силиконски

**Слика 9.8. Стапести изолатори за надземни водови**

### Распределба на напонот вдоль низа од капести изолатори

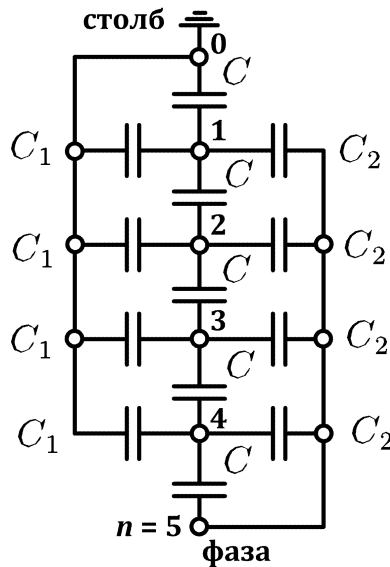
Изолаторскиот синџир е подложен на дејство на фазниот напон на водот  $U_f$ . Тој нерамномерно се распределува на одделните елементи од синџирот така што некои од нив ќе имаат напон повисок од  $U_f/n$ , каде што  $n$  е број на елементи.

За да ја одредиме распределбата на напон на низата од капести изолатори ќе ја користиме еквивалентната шема од сликата 9.9. На неа со  $C$  е означен е означен сопствениот капацитет на изолаторот, со  $C_1$  е означен капацитетот на изолаторот во однос на заземјените делови на конструкцијата, а со  $C_2$  е означен капацитетот во однос на фазниот спроводник. Вредностите на овие капацитети се  $C = 50 \div 70$  pF,  $C_1 = 4 \div 5$  pF и  $C_2 = 0,5 \div 1$  pF.

Шемата е нацртана за изолаторски синџир со  $n = 5$  капести изолатори чии краеве се нумерирани со броеви од 0 до  $n$ . Од начинот на нумерација е очигледно дека  $U_0 = 0$  и  $U_n = U_f$ , што значи дека треба да се одредат напоните во однос на земјата во точките со индекси од 1 до  $n - 1$ . Распределбата на напони може да се одреди третирајќи ја еквивалентната шема како вод со распределени параметри чиј подолжен параметар е  $C$ , а напречни  $C_1$  и  $C_2$ . За да се дојде до решение во тој случај потребно е да се реши диференцијална равенка со константни коефициенти од втор ред и ние тука само ќе го наведеме решението кое гласи

$$U_i = \frac{U_f}{C_1 + C_2} \left\{ C_2 + C_1 \frac{\sinh(\alpha i)}{\sinh(\alpha n)} - C_2 \frac{\sinh[\alpha(n - i)]}{\sinh(\alpha n)} \right\} \quad (9.4)$$

каде што  $i$  е реден број на јазелот (од 0 до  $n$ ).



Слика 9.9. Еквивалентна шема на изолаторска низа

Еквивалентната шема од сликата 9.9, која претставува линеарно електрично коло, можеме да ја решиме и со методот на независни напони кој во матрична форма гласи

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{0}$$

и е со големина  $n \times n$ , а од десната страна имаме вектор со нули затоа што во ниту еден јазел нема струјна инјекција.

Системот равенки ќе го поделиме на два потсистеми на следниот начин

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}' & \underline{Y}'' \\ (\underline{Y}'')^T & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}' \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{0} \\ 0 \end{bmatrix}$$

при што првиот потсистем е со големина  $(n-1) \times (n-1)$  и тој ќе се однесува на напоните на јазлите  $1, 2, \dots, n-1$ , додека вториот потсистем го содржи само јазелот  $n$  чиј напон е однапред познат. Според тоа за да ги добиеме непознатите напони треба да го решиме следниот систем равенки

$$\underline{Y}' \cdot \underline{U}' + \underline{Y}'' \cdot U_f = \underline{0}$$

од каде што добиваме

$$\underline{U}' = -(\underline{Y}')^{-1} \cdot \underline{Y}'' \cdot U_f \quad (9.5)$$

Во горната равенка со  $\underline{U}'$  е означен векторот со напони на јазлите  $1, 2, \dots, n-1$ , додека  $\underline{Y}'$  и  $\underline{Y}''$  се подматрици од матрицата на адмитанции на јазлите. За случајот со 5 јазли тие се

$$\underline{Y}' = j\omega \begin{bmatrix} 2C + C_1 + C_2 & -C & 0 & 0 \\ -C & 2C + C_1 + C_2 & -C & 0 \\ 0 & -C & 2C + C_1 + C_2 & -C \\ 0 & 0 & -C & 2C + C_1 + C_2 \end{bmatrix}$$

$$\underline{Y}'' = -j\omega [ C_2 \ C_2 \ C_2 \ C + C_2 ]^T$$

Ако капестите изолатори ги нумерираме со броеви од 1 до  $n$ , почнувајќи од столбот надолу, за напоните на нивните краеви важат следните релации

$$\underline{U}_{C,1} = \underline{U}_1 \quad (9.6)$$

$$\underline{U}_{C,i} = \underline{U}_i - \underline{U}_{i-1} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (9.7)$$

каде што

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} \underline{U}' \\ \underline{U}_f \end{bmatrix}$$

Со програмата 9.1, со помош на Matlab, може да се добие решение за распределбата на напони на изолаторскиот синџир.

### Програма 9.1. Пресметка на распределба на напони на низа од капести изолатори

```

1 function [U, Uc] = lanec(Uf, C, C1, C2, n)
2 Y = zeros(n, n);
3 for i = 1:n-1
4     Y(i, i) = 2*C + C1 + C2;
5     Y(i, i+1) = Y(i, i+1) - C;
6     Y(i+1, i) = Y(i+1, i) - C;
7     Y(i, n) = Y(i, n) - C2;
8     Y(n, i) = Y(n, i) - C2;
9 end
10 Y(n, n) = C + (n-1)*C2;
11 Y1 = Y(1:n-1, 1:n-1);
12 Y2 = Y(1:n-1, n);
13 U = -Y1 \ (Y2*Uf);
14 U = [U; Uf];
15 Uc = zeros(n, 1);
16 Uc(1) = U(1);
17 for i = 2:n
18     Uc(i) = U(i) - U(i-1);
19 end

```

Ќе разгледаме случај на 110 kV вод со синџир од 5 капести изолатори со следните параметри  $C = 50$  pF,  $C_1 = 4$  pF и  $C_2 = 0,5$  pF. Со извршување на командата

```
[U, Uc] = lanec(110/sqrt(3), 50e-12, 4e-12, 0.5e-12, 5);
```

го добиваме следното решение

$$\underline{U} = [ 10,14 \ 20,56 \ 32,20 \ 46,10 \ 63,51 ]^T$$

$$\underline{U}_C = [ 10,14 \ 10,42 \ 11,64 \ 13,90 \ 17,41 ]^T$$

од каде што можеме да одредиме колкав дел од фазниот напон, изразен во проценти, отпаѓа на секој елемент од изолаторскиот синџир

$$100 \cdot \underline{U}_C / \underline{U}_f = [ 16,0 \ 16,4 \ 18,3 \ 21,9 \ 27,4 ] \quad (9.8)$$

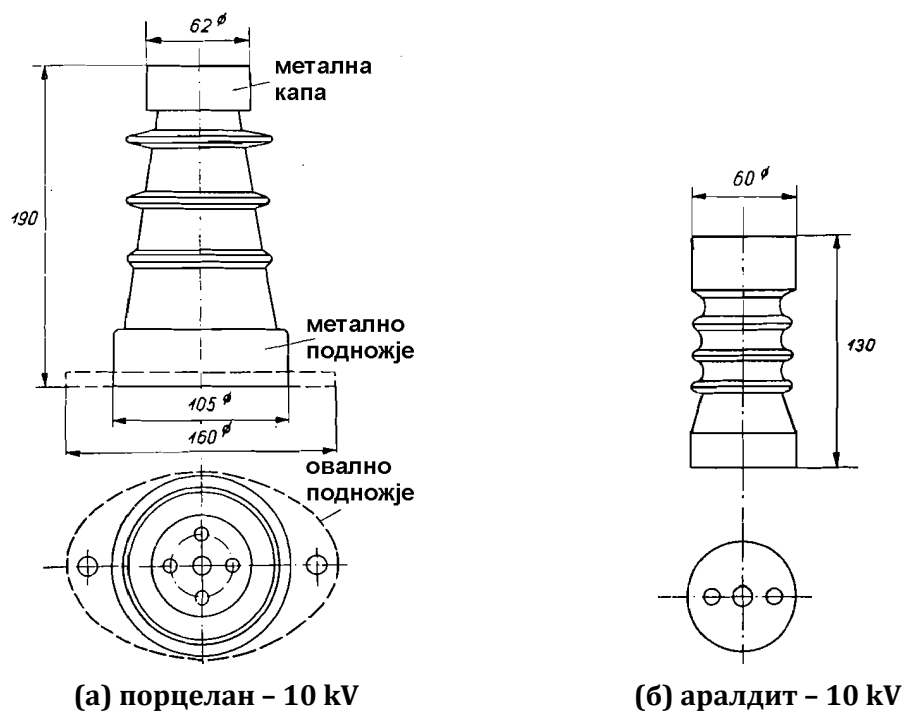


Од резултатите се забележува дека изолаторот на врвот од синџирот има само 16% од фазниот напон, додека изолаторот што е најдолу и е поврзан за фазниот спроводник има 27,4% од фазниот напон (во идеален случај сите изолатори би требало да имаат по 20% од фазниот напон). Доколку изолаторскиот синџир е со повеќе елементи најдолниот каpest изолатор повторно ќе има  $25 \div 27\%$  од фазниот напон, додека најгорните елементи ќе имаат помалку од 10% од фазниот напон. Со таква нерамномерна распределба на напонот може да се јави корона на долните елементи од изолаторскиот синџир, посебно во лоши временски услови, дури и при номинален работен напон. За да воедначи распределбата на напонот на крајот од изолаторскиот синџир, кај фазниот спроводник, се поставува прстен со што се зголемува капацитетот  $C_2$  и напоните на најблиските изолатори се намалуваат.

### 9.1.3 Потпорни изолатори кај разводните постројки

Потпорните изолатори ги носат собирниците и останатите неизолирани спроводници во разводните постројки. Потпорните изолатори се поставуваат на хоризонтални метални портали, а може да бидат поставени и на сид или на таван. Тие ги изолираат спроводните делови под напон од заземјените конструкции во постројките и ги превземаат силите кои делуваат на собирниците. Тие треба да имаат значителна механичка цврстина затоа што при куси врски на нив делуваат многу големи сили поради течењето на големи струи на не многу големи растојанија.

Со оглед на изведбата и механичката цврстина се потпорните изолатори се прават од порцелан и од вештачки смоли (на пример аралдит). Нивниот изглед е прикажан на сликата 9.10 каде што се дадени и димензии во mm за 10 kV изолатори.



Слика 9.10. Потпорни изолатори за среднонапонски собирници

Порцеланските изолатори имаат метални делови на подножјето и на врвот и токму на тие места се механички најслаби на сили на свивање. За разлика од нив

изолаторите од вештачки смоли немаат метални делови и имаат еднаква механичка цврстина и во горниот и во долниот дел.

На следните слики се прикажани три фотографии на кои се гледаат потпорни изолатори за различна намена.



**Слика 9.11. Потпорни изолатори за собирници поставени на таван**



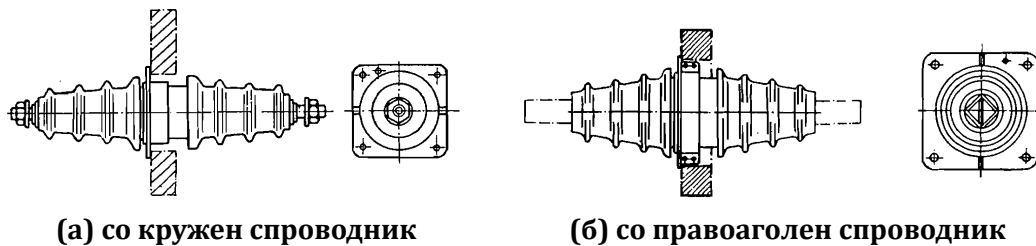
**Слика 9.12. Потпорни изолатори кај приклучоци на трансформатор**  
(горе десно се видливи и воведни изолатори со кои се влегува во внатрешноста на постројката)



**Слика 9.13. Потпорни изолатори за високонапонски собирници со форма на цевки**

### 9.1.4 Воведни изолатори

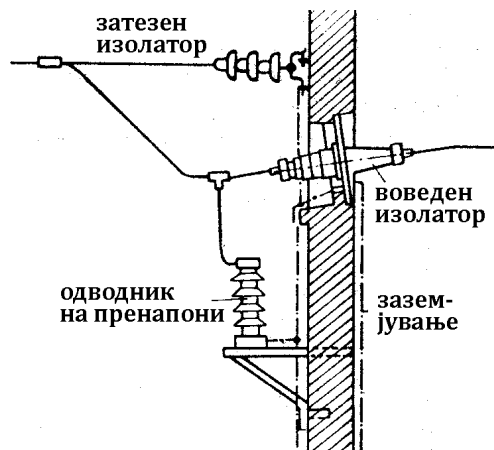
Воведните изолатори имаат задача да ги изолираат спроводниците при нивното поминување преку ѕид од една во друга просторија, од еден во друг дел на оклопена разводна постројка или при излез во отворен простор од затворена разводна постројка. Тие исто така се користат и при влез во високонапонски уреди (енергетски и мерни трансформатори, кондензатори и друго). Според обликот на спроводниот дел кој се наоѓа во средина на изолаторот разликуваме воведни изолатори со спроводници со кружен и правоаголен напречен пресек (слика 9.14). На сликата (9.15) е прикажано како се применува воведен изолатор во комбинација со други елементи за случај на влез со надземен вод во постројка во затворен простор.



(а) со кружен спроводник

(б) со правоаголен спроводник

Слика 9.14. Воведни изолатори за преминување преку ѕид

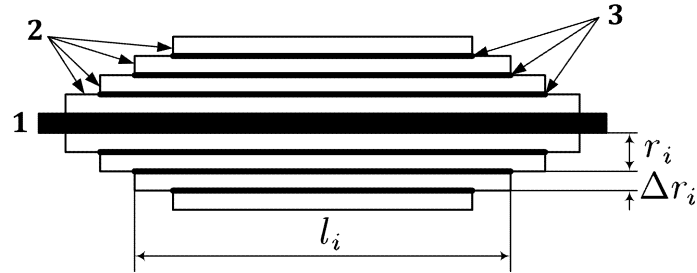


Слика 9.15. Детаљ на влез на надземен вод во зграда

Изборот на воведните изолатори се врши според номиналниот напон и според максимално дозволената трајна струја во нормален работен режим. Освен тоа се прави и проверка за степенот на прегревање на изолаторот во случај на куси врски кога низ него течат многу големи струи кои можат да го оштетат термички што доведува до пробив во изолацијата. Струите на куса врска можат да направат и механички оштетувања кои во краен случај доведуваат до разрушување на изолаторот.

За регулација на електричното поле во воведните изолатори помеѓу изолационите слоеви во хартија на одредено растојание се поставуваат метализирани слоеви (слика 9.16). На таков начин воведниот изолатор постанува многуслоен цилиндричен кондензатор. Должината и растојанието меѓу метализираните слоеви се бираат така што капацитетот на секој од слоевите

да биде еднаков  $C_1 = C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n$  со што приложениот напон на изолаторот рамномерно ќе се подели по слоевите.



**Слика 9.16. Регулација на електричното поле кај вovedни изолатори**

1) спроводник, 2) изолација, 3) метализиран слој.

Бидејќи е исполнет условот  $r_i \gg \Delta r_i$  за капацитетот на слојот  $i$ , со занемарлива грешка, можеме да напишеме

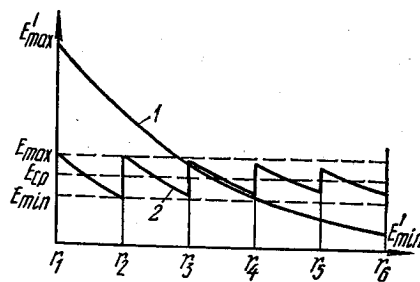
$$C_i = \frac{2\pi\epsilon r_i l_i}{\Delta r_i}$$

и ако сметаме дека растојанието меѓу метализираните слоеви е еднакво ( $\Delta r_i = \text{const}$ ) тогаш условот за еднаквост на капацитетите на слоевите ќе биде исполнет ако важи

$$l_i r_i = \text{const}$$

што значи дека должината на металниот слој треба да е обратно пропорционална на растојанието од него до спроводникот.

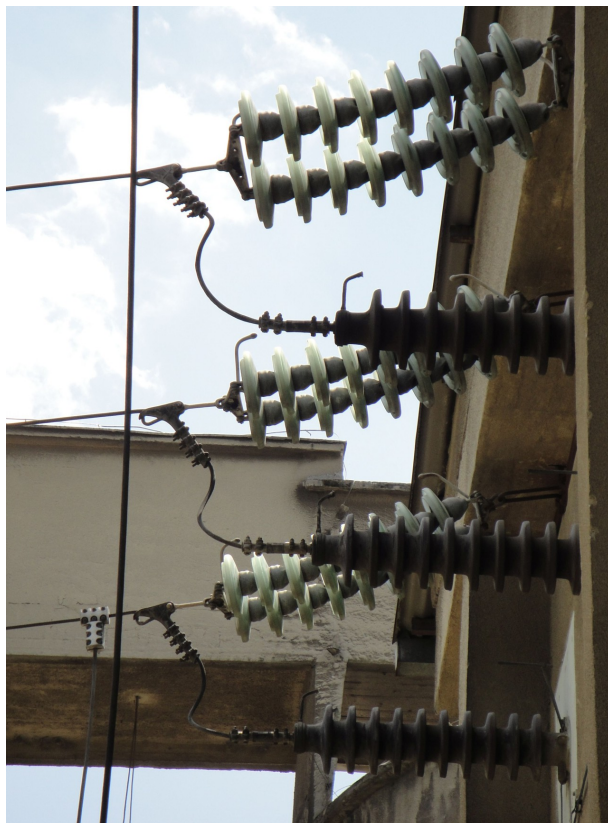
Распределбата на јачината на електричното поле во радијален правец на вovedниот изолатор е дадена на сликата 9.17 од каде што се забележува дека со примената на метализираните слоеви се добива многу порамномерна јачина на полето насекаде во изолаторот. Со тоа изолацијата ќе биде рамномерно напрегната и ќе може да биде направена со помала дебелина без да има опасност од пробив.



**Слика 9.17. Јачина на електричното поле во радијален правец кај вovedни изолатори**

1) без метализирани слоеви, 2) со метализирани слоеви.

На следните слики се прикажани неколку карактеристични примени на вovedните изолатори во разводните постројки и кај високонапонските уреди.



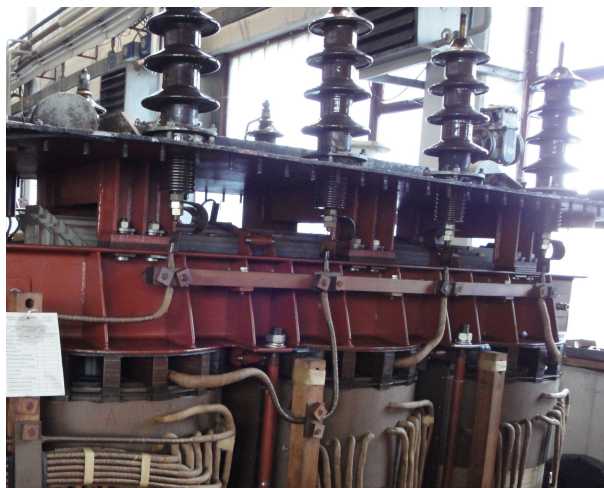
**Слика 9.18. Воведни изолатори за влез на надземен вод во зграда**



**Слика 9.19. Воведни изолатори за влез на кабелски вод во зграда**



**Слика 9.20. Воведни изолатори за премин од една во друга ќелија**  
(во средината се гледа раставувач поставен на потрпони изолатори од вештачка смола)

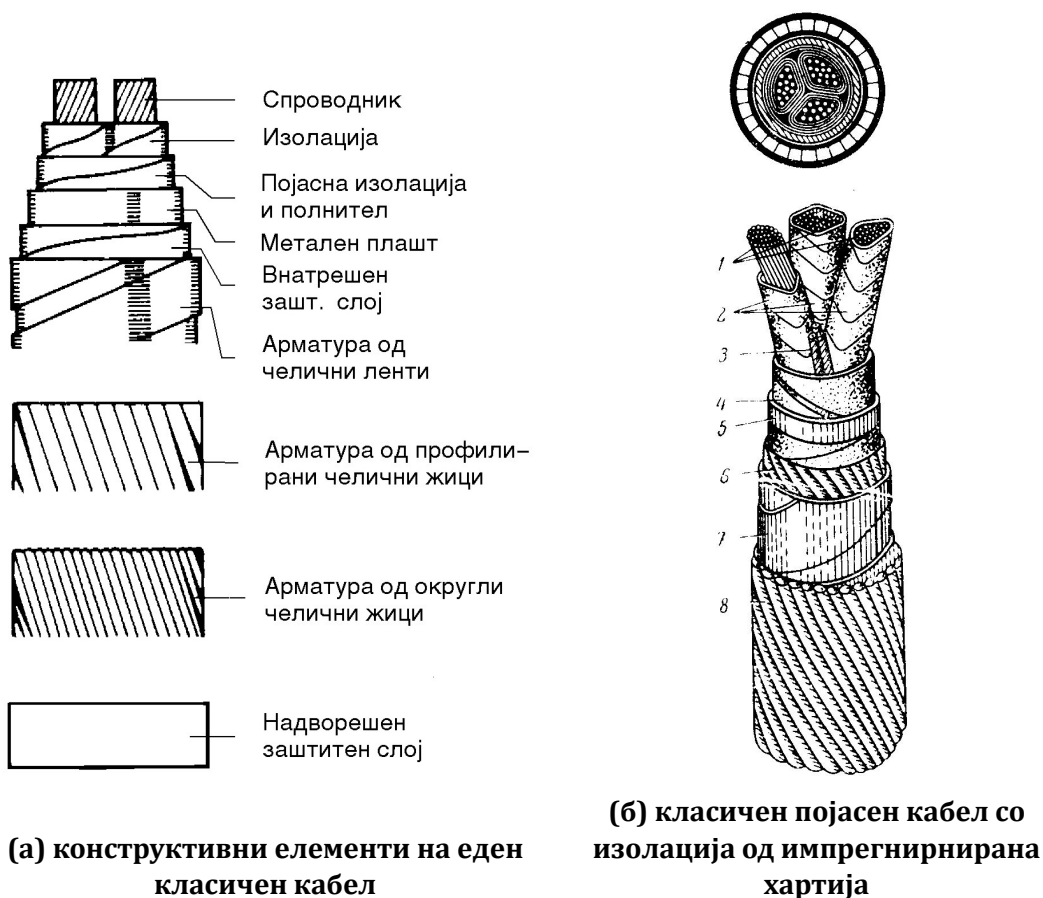


**Слика 9.21. Воведни изолатори кај трансформатор**  
(во долниот дел се гледа дел од намотките)

## 9.2 Внатрешна изолација

### 9.2.1 Изолација на енергетски кабли

Енергетските кабли се со релативно сложена структура. Гледано од внатрешноста (средиштето) на кабелот кон неговата периферија тие се состојат од следните елементи: спроводник (спроводници), изолација, електрична заштита (екран), пополнување, внатрешен плашт, внатрешна заштита од корозија, арматура и надворешен плашт за заштита од корозија (слика 9.22а). Некои типови кабли ги немаат сите наведени елементи во својата конструкција. За илустрација на сликата 9.22б е прикажан изглед на трифазен класичен појасен кабел за напон од 10 kV со изолација од импрегнирана хартија.



Слика 9.22. Изглед на кабли

1) бакарни или алуминиумски жили; 2) фазна изолација од импрегнирана хартија; 3) полнител од јута; 4) појасна изолација од импрегнирана хартија; 5) оловен (алуминиумски) плашт; 6) заштитен слој од јута; 7) арматура (оклоп од челични ленти); 8) надворешен заштитен слој од јута.

Околу спроводниците се поставува слој од изолационен материјал (импрегнирана хартија, поливинил-хлорид, полиетилен, вмрежен полиетилен и друго) кој се нарекува изолација на кабелот. Хартијата е прв изолационен материјал кој бил употребуван не само кај каблите туку и кај останатите високонапонски уреди. Нејзините извонредни изолациони својства прават и денес, кога има многу квалитетни изолациони материјали од вештачко потекло, хартијата и

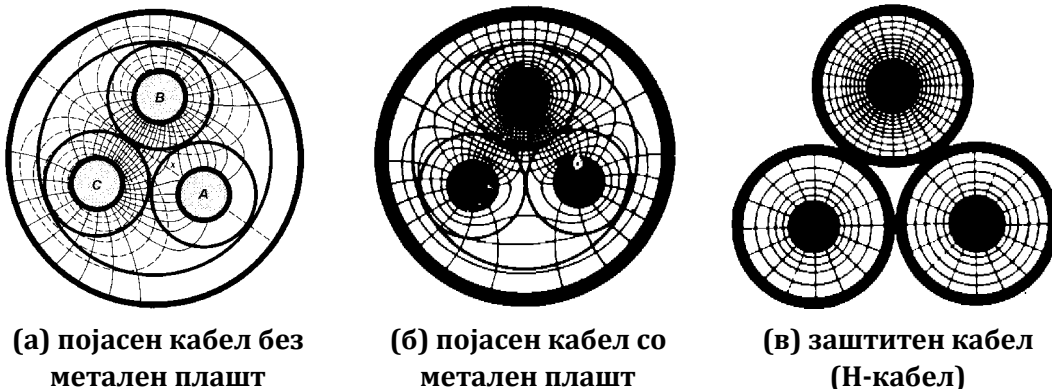
понатаму да биде на врвот меѓу употребуваните изолациони материјали, особено за највисоките.

Изолацијата има определена дебелина од која зависи нејзината диелектрична цврстина, која се димензионира во склад со номиналниот напон на кабелот. Спроводникот заедно со изолацијата се нарекува жила на кабелот и тој може да има една (едножилен кабел) или повеќе жили (повеќежилен кабел). Пополнувањето од соодветен материјал се вметнува во празниот простор од кабелската конструкција и служи за постигнување кружен облик на напречниот пресек на кабелот.

Електричната изолација што се употребува кај енергетските кабели нема иста диелектрична цврстина во сите правци. Притоа, нејзината цврстина во радијален правец може да биде поголема од цврстината во тангенцијален или аксијален правец. Оваа особина ја имаат практично сите врсти изолација, но тоа првенствено се однесува на изолацијата од импрегнирана хартија. Затоа, обликот на електричното поле што владее во изолацијата има големо значење на карактеристиките на кабелот во поглед на неговата пробојна цврстина од која зависи највисокиот напон што може да го поднесе кабелот.

Обликот на електричното поле зависи од конструкцијата на кабелот и според неа каблите ги делиме во три основни групи (слика 9.23):

- кабли без метален плашт,
- повеќежилни кабли со заеднички метален плашт (појасни кабли),
- кабли со метален плашт или метален екран околу секоја жила (заштитени кабли).



(а) појасен кабел без метален плашт

(б) појасен кабел со метален плашт

(в) заштитен кабел (Н-кабел)

Слика 9.23. Облици на електричното поле кај енергетските кабли

Доколку кабелот нема метален плашт или има еден заеднички метален плашт електричното поле е силно нехомогено. Кај каблите со посебен плашт на секоја жила, како и кај каблите кои поседуваат електрична заштита (екран) која е направена од карбонизирана хартија која е слабоспроводна, електричното поле во изолацијата има чисто радијален облик. Ваквиот вид на електрична заштита за прв пат е применет од Хохштетер (Hochstädter) и затоа таквите кабли се нарекуваат Н-кабли.

Поради наведените проблеми со обликот на електричното поле, каблите со номинален напон од 20 kV и повеќе се изведуваат како заштитени. Заштитата се состои од:

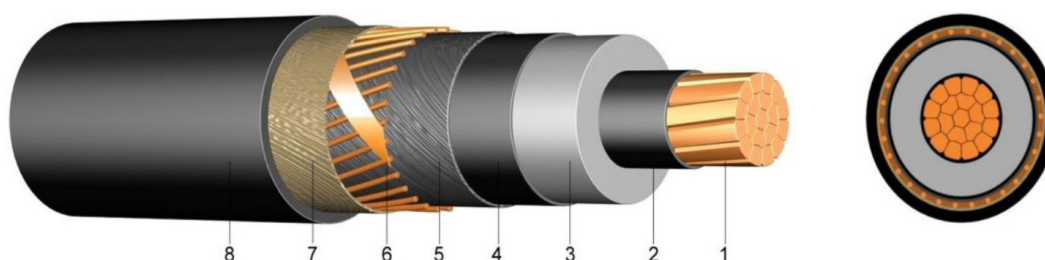
- слој слабоспроводен материјал (карбонизирана хартија) кој се поставува преку спроводникот и има задача да го хомогенизира електричното поле



на површината од спроводникот, бидејќи спроводникот поради својата повеќежична структура има нерамна површина;

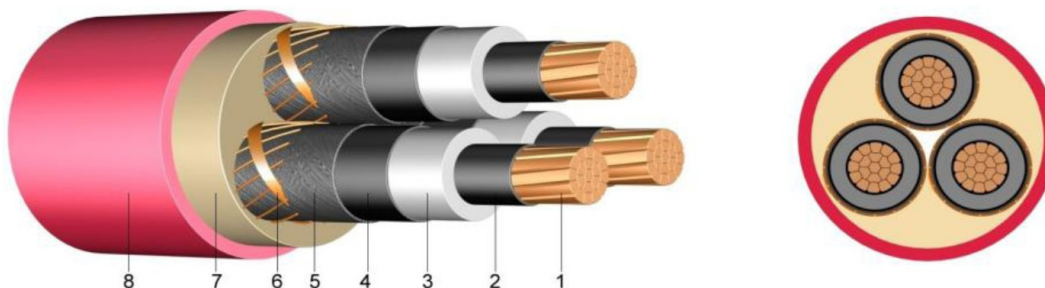
- слој од спроводен материјал кој се поставува преку самата изолација на жилата.

Надворешниот слој од електричната заштита што се поставува преку изолацијата кај Н-каблите најчесто се изработува од тенка метална фолија направена од немагнетен материјал или пак од метализирана хартија.



**Слика 9.24. Едножилен енергетски кабел за 10 kV (XHE49/N2XS(F)2Y)**

- 1) спроводник (бакар/алуминиум), 2) полупроводен слој околу спроводникот, 3) изолација од вмрежен полиетилен, 4) полупроводен слој околу изолацијата, 5) проводна лента, 6) електрична заштита од бакарни жици, 7) изолациона лента, 8) плашт од полиетилен

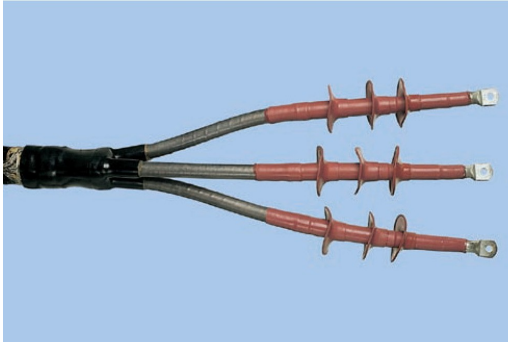


**Слика 9.25. Триожилен енергетски кабел за 10 kV (XHP48/N2XSY)**

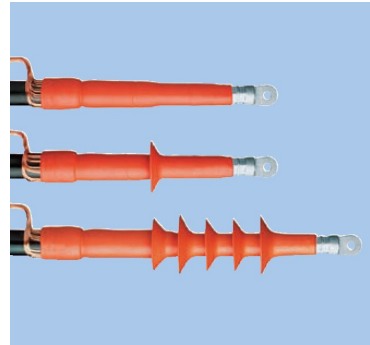
- 1) спроводник (бакар/алуминиум), 2) полупроводен слој околу спроводникот, 3) изолација од вмрежен полиетилен, 4) полупроводен слој околу изолацијата, 5) лента за раздвојување, 6) електрична заштита од бакарни ленти околу секоја жила посебно, 7) исполнување од поливинил-хлорид, 8) плашт од поливинил-хлорид

За поврзување на каблите се користи дополнителен прибор во кој спаѓаат: кабелски завршетоци за внатрешна и надворешна примена, спојници и системи за заптивање. При конструкцијата на кабелскиот прибор се води сметка за регулација на јачината на електричното поле за да се намали можноста за појава на електрични празнења. Освен тоа кабелските завршетоци и спојници се отпорни на површински струи и имаат соодветна конструкција за нивно елиминирање.

На сликата 9.26 се прикажани неколку кабелски завршетоци. Тие со загревање се собираат и херметички се прилепуваат кон жилите на кабелот. Нивната монтажа се прави со помош на пламеник кој користи пропан-бутан (слика 9.27). Приказ на кабел со соодветни кабелски завршетоци кои се прицврстени на потпорни изолатори при влез во ќелија во трафостаница е даден на сликата 9.28.



(а) трижилен за 35 kV



(б) едножилни за 10, 20 и 35 kV

Слика 9.26. Кабелски завршетоци за надворешна употреба



Слика 9.27. Монтажа на кабелски завршеток



Слика 9.28. Влез на кабел со кабелски завршеток во трафостаница со оклопена ќелија

## 9.2.2 Изолација на енергетски трансформатори

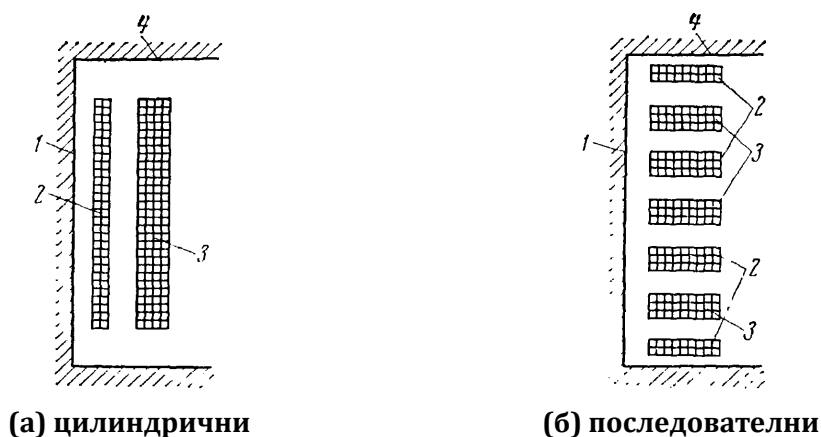
### Поделба на изолацијата кај енергетски трансформатори

Намотките на трансформаторите, заедно со нивните краеве, регулационите преклопки и проводниците кои ги спојуваат се наоѓаат во затворен трансформаторски сад кој е наполнет со масло. Краевите од намотките излегуваат во надворешниот простор преку воведни изолатори кои со долниот дел (кој е пократок) се наоѓаат во маслото, додека горниот дел се наоѓа во воздух надвор од трансформаторскиот сад. Според тоа изолацијата на трансформаторите можеме да ја подела на внатрешна (во масло) и надворешна (во воздух).

Внатрешната изолација се дели на главна (или напречна) и надолжна. Во главната изолација спаѓа изолацијата на намотката од една фаза спрема намотките од другите фази и од фазните намотки кон заземјените делови на трансформаторот (јадрото, јаремот, казанот). Во надолжната изолација на трансформаторот спаѓа изолацијата помеѓу навивките, слоевите, секциите и одводите од една иста фаза.

Кај енергетските трансформатори како внатрешна изолација се користи минералното масло во комбинација со цврст диелектрик (електричен картон, хартија или ткаенина). Маслото освен што служи за изолација се користи и како средство за ладење на намотките и намотките и магнетното јадро.

Намотките на енергетските трансформатори се прават со цилиндрична форма и во зависност од намената на трансформаторот, неговата моќност и номиналните напони намотките околу јадрото може да бидат поставени концентрично (слика 9.29а) или последователно (слика 9.29б). Кај цилиндричните намотки секогаш намотката за низок напон е поблиску до јадрото, додека кај последователните намотки низата од намотки започнува со дел од нисконапонската намотка со тоа таа повторно е поблиску до железото (овој пат до јаремот).



Слика 9.29. Распоред на намотките на јадрото на трансформаторот

1) јадро, 2) намотка за низок напон, 3) намотка за висок напон, 4) јарем

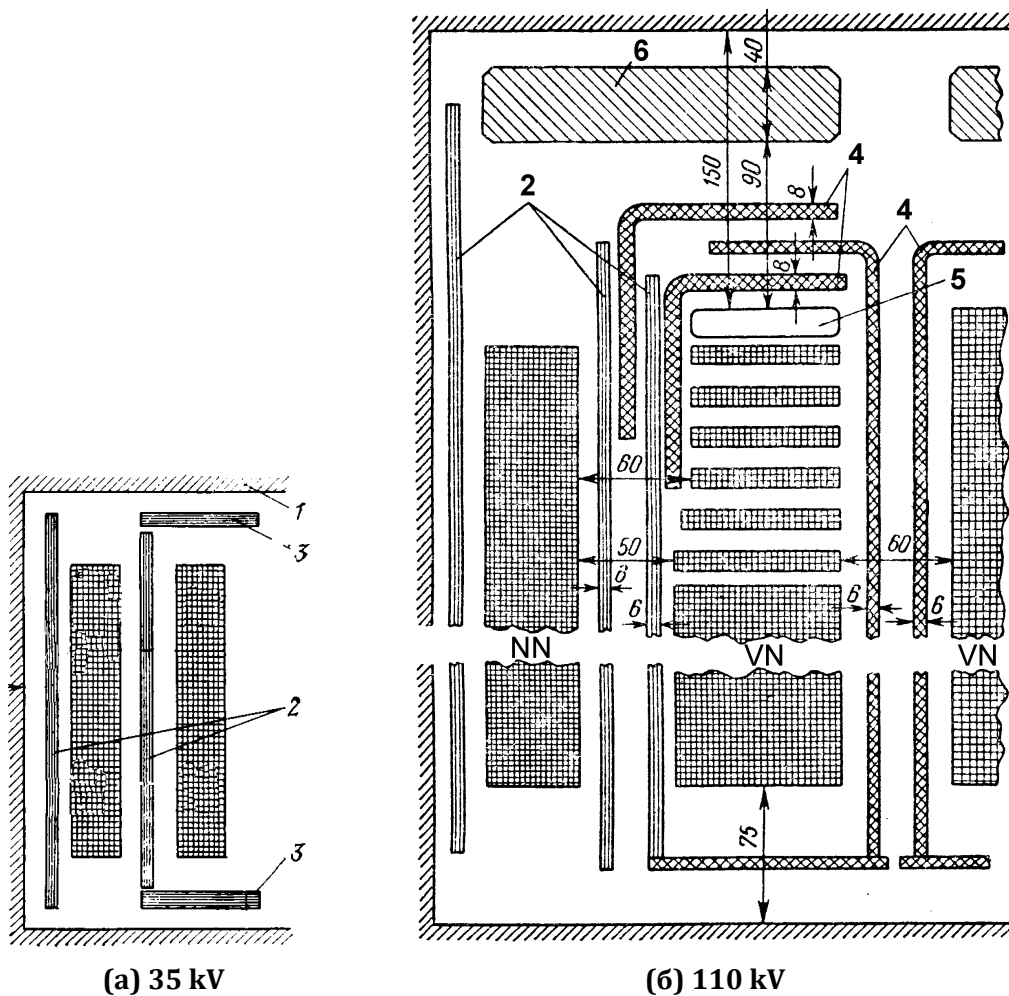
Кај трансформаторите со номинален напон до 35 kV се користат едноставни цилиндрични намотки кои се состојат од спирално намотани жици во неколку слоеви на цилиндар од бакелитна хартија (пертинакс). За подобро ладење меѓу слоевите од намотката се оставаат канали низ кои циркулира масло.

Кај трансформаторите со повисоки номинални напони (110 kV и повеќе) напонот меѓу слоевите на намотката може да биде доста висок со што се отежнуваат условите за постигнување доволна електрична на изолацијата. Во тој случај

цилиндричната намотка се дели на повеќе редно поврзани секции кои се, повторно, повеќеслојни цилиндрични намотки. Проблемот со разликата на напони меѓу слоевите тука е олеснет затоа што напонот на една секција е многу помал од напонот на непрекината цилиндрична намотка (тој е толку пати помал колку што има редно поврзани секции).

На сликата 9.30а е прикажана главната изолација на еден трансформатор за 35 kV. Во изолационата конструкција постојат цилиндрични картонски бариери меѓу јадрото и нисконапонската намотка, потоа меѓу нисконапонската и високонапонската намотка. Освен тоа бариери се поставуваат меѓу високонапонската намотка и јаремот, како и меѓу намотките од две различни фази. Ваквата изолациона конструкција се нарекува масло-бариерна.

Изолацијата на спроводниците е направена од тенка хартиена лента со дебелина 0,25 mm.



**Слика 9.30. Конфигурација на изолацијата на трансформатор**

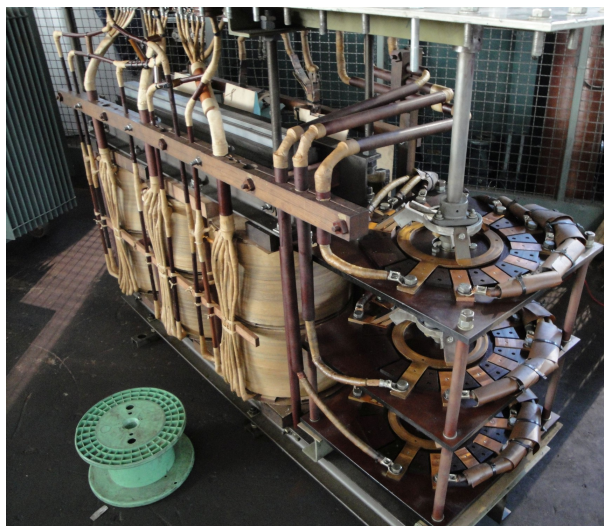
1) магнетно јадро, 2) цилиндри од картон, 3) бариери од картон, 4) аголни бариери, 5) капацитивен екран, 6) притискачки прстен

Главната изолација на трансформатори и автотрансформатори за номинален напон 110 kV и повеќе е исто така масло-бариерна. Кај нив бариерите се поставени на повеќе (слика 9.30б). Освен претходно споменатите бариери тука се користат и аголни бариери спрема јаремот како и капацитивни екрани кои служат за заштита од пренапони.

На места каде што постои опасност од пожар и експлозија за изолација на енергетските трансформатори се користи гасна изолација, при што се користи SF<sub>6</sub> или воздух. Таквите трансформатори се нарекуваат трансформатори во сува изведба и се применуваат во рудници, за подземни железници, во внатрешноста на згради и на други места.



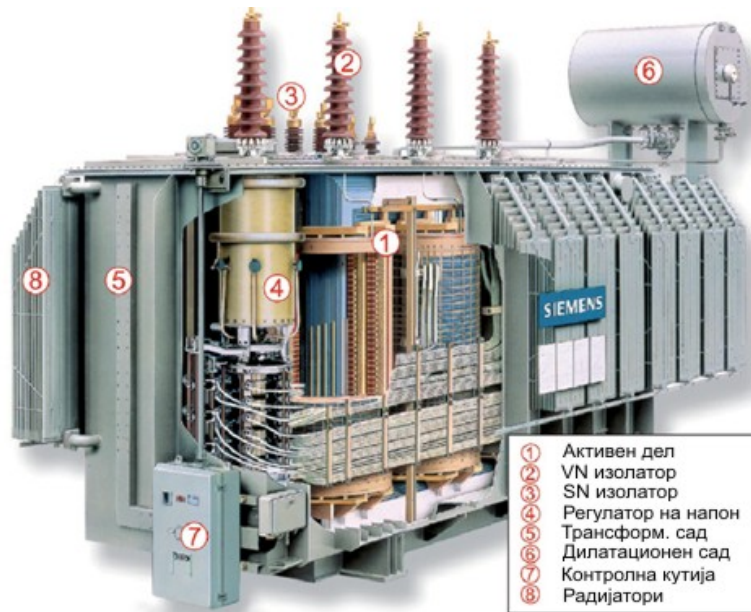
**Слика 9.31. Изглед на дистрибутивен трансформатор 10(20)/0,4 kV**  
(во средината се видливи прекинувача за регулација на напон и прекинувача за бирање на примарен напон 10 или 20 kV)



**Слика 9.32. Изглед на намотките и на прекинувача за регулација на напон на среднонапонски трансформатор**

### Пренапони во намотките на трансформаторите

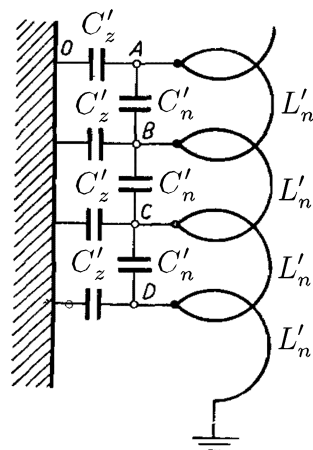
Голема опасност од пренапони во намотките на трансформаторите се јавуваат во случај на атмосферски празнења. Во тие ситуации при удар на гром во фазен спроводник од надземен во по него се движат напонски бранови со голема амплитуда кои ако не се елиминираат со помош на заштитни средства (одводници



Слика 9.33. Изглед на високонапонски трансформатор

на пренапони и искришта) може да влезат во намотките на трансформаторот. При тоа распределбата на напонскиот бран во внатрешноста на намотката не е рамномерна поради што на одредени места може да се појават значителни електрични напрегања на изолацијата кои може да ја оштетат.

Еквивалентата шема според која може да се анализира простирањето на напонските бранови во намотката на трансформаторот е дадена на сликата 9.34. На неа со  $C'_n$  е означен капацитетот помеѓу две навивки од намотката, со  $C'_z$  е означен капацитетот помеѓу една навивка и трансформаторскиот сад кој е заземјен. Со  $L'_n$  е означена индуктивноста на една навивка.

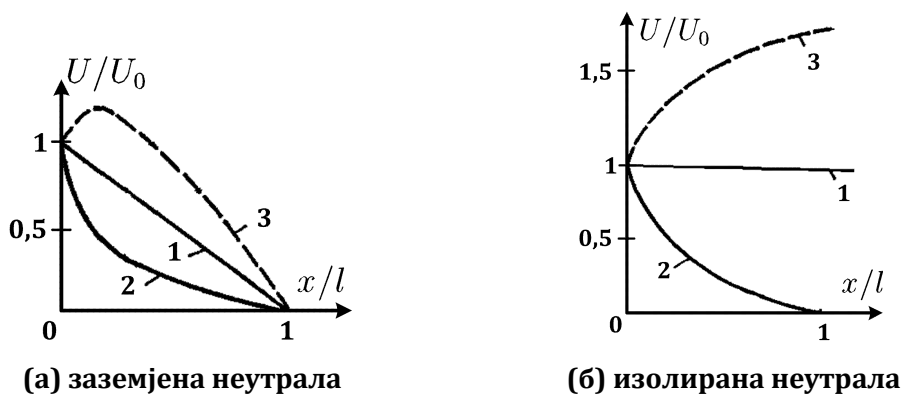


Слика 9.34. Еквивалентна шема на намотка на трансформатор

Бидејќи во трансформаторите намотките имаат голем број навивки шемата од сликата 9.34 содржи голем број елементи и обично се третира како коло со распределени параметри чии подолжни и напречни параметри ги наведоме претходно. Како што е познато колата со распределени параметри, се всушност водови, за кои распределбата на напони се добива со решавање на диференцијални

равенки со константи коефициенти. Тука ќе го разгледаме само решението на таквите равенки кое е прикажано на сликата 9.35.

На сликата се прикажани по три криви за распределба на напоните по должина на намотката и тоа за случај кога намотката е заземјена на крајот и кога таа е изолирана. На сликата на вертикалната оска е даден напонот, а на хоризонталната оска е дадено растојанието од почетокот на намотката. Двете величини се дадени со релативни вредности при што напонот е изразен во однос на вредноста  $U_0$  која е амплитуда на упадниот напонски бран, а растојанието е изразено во однос на должината на намотката  $l$ .



Слика 9.35. Распределба на напонот по должината на намотка на трансформатор

Кривата 2 во двата случаја е права линија која што ја претставува распределбата на напонот во случај кога не би постоел капацитетот  $C'_z$  или би бил занемариво помал од капацитетот  $C'_n$ . Во тој случај напонот би се распределил рамномерно на сите капацитети  $C'_n$ . При заземјена намотка напонот на нејзиниот крај е еднаков на нула, што значи распределбата на напонот линеарно ќе опаѓа од 1 до 0 (на пример на половина од намотката напонот би бил  $U_0/2$ ). Ако намотката е незаземјена таа по целата должина ќе биде на напон еднаков на  $U_0$ .

Меѓутоа, во реалноста распределбата на напонот е поинаква. Во првиот момент низ индуктивностите нема да тече струја, затоа што тие се спротивставуваат на нагла промена на струјата, така што почетната распределба на напоните ќе биде зависна само од капацитивностите и таа е прикажана со кривата 1 (таа има облик на хипербола). Како што може да се забележи стрмнината на кривата е најголема на почетокот на намотката што значи дека разликата на напон меѓу две соседни навивки на почетокот на намотката ќе биде многу голема. Високите напони помеѓу навивките може да предизвикаат оштетување на подолжната изолација меѓу нив.

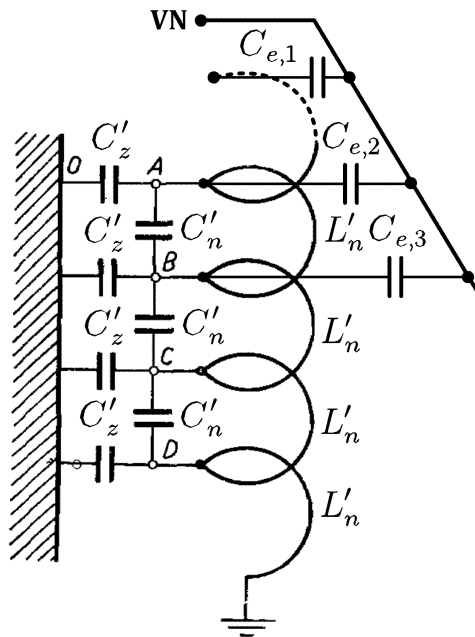
Поради претходно наведените причини првите 10-15% од навивките се прават со засилена подолжна изолација.

Откако кондензаторите ќе се наполнат со електрицитет тие ќе почнат се празнат преку индуктивностите така што напоните ќе добијат осцилаторен карактер и за многу кусо време струјата во индуктивностите  $L'_n$  ќе постигне максимална вредност и распределбата на напоните ќе биде дадена според кривата 3. Осцилаторниот процес потоа пролжува така што струјата индуктивностите опаѓа и повторно ги полни кондензаторите. Поинаку кажано енергија која упаѓа со напонскиот бран осцилаторно се претвора од енергија во електрично поле кај капацитивностите во енергија во магнетно поле кај индуктивностите и обратно. Во

текот на оцилаторниот процес распределбата на напоните на сликата 9.35 осцилира меѓу кривите 1 и 3. Поради активните отпорности осцилациите постепено се придушуваат и исчезнуваат. Најопасни за изолацијата се првите неколку осцилации кои траат неколку  $\mu s$ .

Трансформаторите кај коишто се случуваат наведените осцилации на напонот по должината на намотката се нарекуваат резонантни трансформатори.

За да се избегне оштетување на изолацијата покрај наведеното засилување на изолацијата на почетокот од намотката се превзема уште една мерка со која се постигнува конструкција на тнр. нерезонантен трансформатор. Кај него се поставува капацитивен екран кој е поврзан со високонапонскиот приклучок, т.е. со почетокот на намотката, а е изолиран од намотката. Екранот е во форма на концентрични прстени поставени околу намотката кои како се оди подлабоко во неа се шират така што можеме да сметаме дека формираат геометриско тело што наликува на конус (слика 9.36). Капацитивниот екран воведува дополнителни капацитети  $C_{e,1}, C_{e,2}, C_{e,3}, \dots$  во еквивалентното коло со што распределбата на напони по должината на намотката се менува така што станува порамномерна. Тоа значи дека кривите 2 и 3 од сликата 9.35 стануваат поблиски до кривата 1.



Слика 9.36. Екранизирана намотка на трансформатор

Сличен ефект се постигнува доколку наместо намотка во форма на соленид се користи намотка поделена на повеќе секции во форма на концентрирани намотки (намотани на цилиндрична макара). Во овој случај капацитетот помеѓу одделните слоеви од намотката е многу поголем од капацитетот помеѓу слоевите и трансформаторскиот сад (земјата). Како што претходно кажавме доколку капацитетот спрема земјата е занемарлив тогаш распределбата на напони е скоро рамномерна.

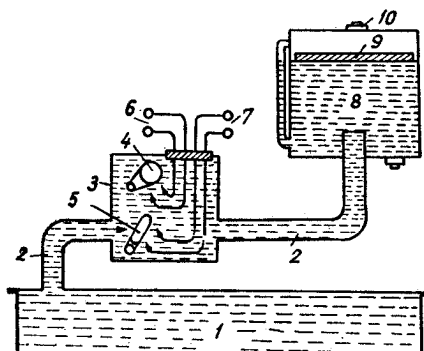
Со експериментални мерења е дојдено до заклучок дека во случај на намотка со изолирана неутрална точка максималните напони кои се јавуваат на крајот од намотката изнесуваат  $(1,8 \div 2)U_0$ . Затоа во тој случај за заштита на намотката во неутралната точка се поставува одводник на пренапони кој со другиот крај е



поврзан на земја. Кај трансформатори со заземјена неутрална точка максималните напони се појавуваат на почетокот на намотката и тие изнесуваат  $(1, 2 \div 1, 3)U_0$ .

### Бухолцово реле

За сигнализација и исклучување на енергетски трансформатори во случај на искрења во маслото со различен интензитет се користи Бухолцово реле. Тоа се поставува на цевката која го поврзува трансформаторскиот сад со дилатациониот сад (конзерваторот), како што е прикажано на сликата 9.37.



**Слика 9.37. Принципно решение на заштита на трансформатор со Бухолцово реле**

- 1) трансформаторски сад, 2) спојна цевка, 3) Бухолцово реле, 4) горна пловка, 5) долна пловка, 6) врска за сигналот за предупредување, 7) врска за прекинувачот, 8) дилатационен сад (конзерватор), 9) поклопец во облик на пловка, 10) вентил за воздух.

Бухолцовото реле е исполнето со масло во кое се наоѓаат две пловки. Ако во трансформаторот поради дефект дојде до искрење во маслото ќе почнат да се развиваат гасни меури кои се искачуваат нагоре и поминуваат низ релето. Гасните меури го истиснуваат маслото од релето така што горната пловка 4 спаднува и ги затвора контактите б кои вклучуваат коло за сигнализација со што оператерите на трансформаторот се информирани дека во него има проблем. Во случај на поголем дефект или куса врска гасовите во маслото се развиваат нагло така што млазот од гасови при поминување низ релето ја спушта и долната пловка 5. Тој делува на исклучување на прекинувачите на трансформаторот така што тој за многу кусо време се доведува во безнапонска состојба.

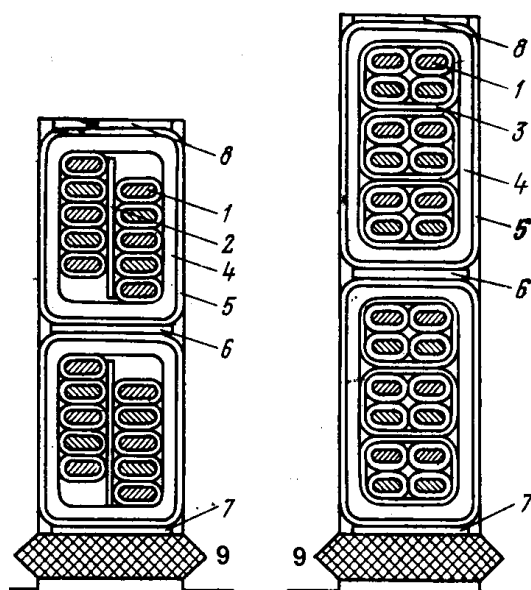
Заштитата со Бухолцово реле, која се базира на развојот на гасови во трансформаторот, во однос на другите видови релејна заштита има предност во тоа што таа реагира и на сосема мали дефекти во трансформаторот кои по подолго време на постоење создаваат доволно гасови за релето да реагира.

Бухолцовото реле ќе реагира и во случај кога од трансформаторскиот сад истекува масло и тоа кога нивото на масло ќе се спушти под одредено ниво кое е всушност нивото на пловките во релето.

### 9.2.3 Изолација на вртливи електрични машини

Како и кај трансформаторите изолацијата на намотките на вртливите електрични машини се дели на главна и надолжна. Главната изолација ги изолира намотките во однос на железното јадро на статорот, како и намотките од една фаза во однос на друга. Надолжната изолација е изолацијата меѓу навивките и секциите.

Кај електричните машини со голема моќност намотката се состои од секции кои имаат само по една навивка што значи дека се состојат само од еден спроводник со голем напречен пресек. Затоа делот наменет за полагање во еден канал на статорот заедно со челните врски (краеви) кои излегуваат од каналот се нарекува стап од намотка. Заради рамномерна распределба на струјата по напречниот пресек на спроводникот при поголеми напречни пресеци тој се состои од повеќе потенки спроводници кои се меѓусебно изолирани. Тенките спроводници по должината на стапот се пермутираат така што заземаат различни позиции во однос на сидот на статорскиот канал. На излезот од каналот при лемењето на челните врски сите спроводници галвански се сврзани. Во еден канал на статорот се сместуваат по 2 стапа, што значи намотката е во два слоја кои можат да бидат од иста или различни фази (слика 9.38).



Слика 9.38. Изолација во статорски канал

- 1) спроводник, 2) подлошка од миканит, 3) изолација на навивка, 4) изолација на секција или на стап, 5) полупроводна покривка, 6, 7, 8) подлошки од миканит, 9) клин од стаклолит.

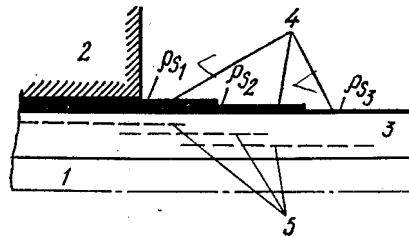
Изолацијата се прави од компаундирана микалента, а нејзината дебелина зависи од номиналниот напон. Дебелината изнесува  $4 \div 7$  mm за номинални напони во опсегот  $10 \div 20$  kV. За пониски напони е потенка, но не помалку од 2 mm.

Пред импрегнирањето микалентата суши прво под нормален атмосферски притисок, а потоа во вакуум со цел да се отстрани влагата. Потоа се врши импрегнација со течен компаунд при притисок од  $0,6 \div 0,8$  MPa ( $6 \text{ dim } 8 \text{ bar}$ ) со цел тој да продре и да ги исполни сите шуплини. Ако изолацијата се состои од повеќе слоеви микалента процесот се повторува повеќе пати за секој слој посебно.

Ако намотката е за напон повисок од 6 kV се користи завршен слој од полупроводна лента (азбест измешан со железо) и површина се лакира со проводлив лак врз база на графит. Ова се врши со цел да се спречат парцијални празнења во воздушните процепи меѓу намотката и сидот на каналот.

Полупроводниот слој излегува на извесно растојание надвор од каналот со цел да се спречи појава на корона во воздухот или водородот кој се користи за ладење на машината. На излезот од каналот електричното поле е нехомогено и посилено поради тнр. ефект на краевите. За изедначување на полето и намалување на

неговата тангенцијалната компонента се применуваат полупроводни слоеви со различна отпорност степенувани во 2 – 3 степени (слика 9.39). Првиот степен е продолжение на полупроводната покривка од каналниот дел, тој има површински отпор  $\rho = 10^3 \div 10^5 \Omega$  и должина  $40 \div 60 \text{ mm}$  од излезот од каналот. Потоа следува дел со  $\rho = 10^7 \div 10^9 \Omega$  и на крајот останува целата површина на челните врски со  $\rho = 10^{12} \div 10^{13} \Omega$ . Со тоа густината на површинските струи се намалува одејќи подалеку од каналот и на тој начин распределбата на јачината на полето долж намотката во челните врски се изедначува.

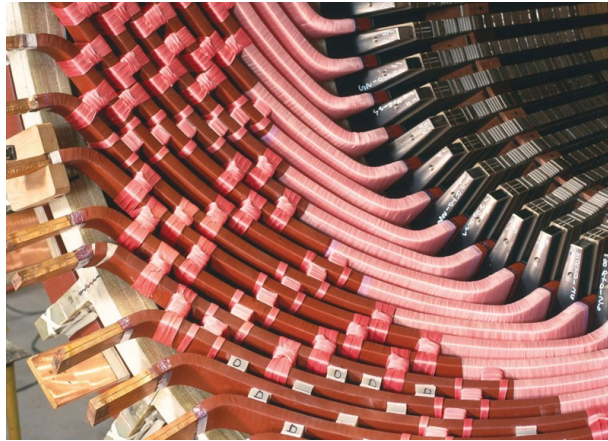


**Слика 9.39. Противкоронска заштита на излезот на стапот од каналот од статорот**

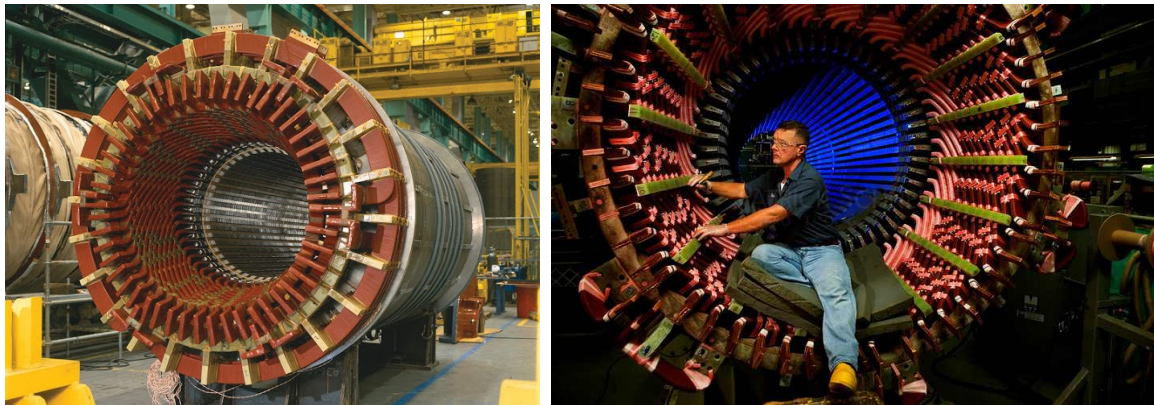
1) спроводник, 2) железо, 3) изолација, 4) полупроводни слоеви, 5) полупроводни екрани во изолацијата.

Регулацијата на електричното поле на излезот на стапот од каналот може да се постигне со ставање на полупроводни екрани во внатрешноста на изолацијата (означени со 5 на сликата 9.39). Ваквиот начин се нарекува градирање на изолацијата која во тој случај можеме да ја третираме како сериска врска на повеќе кондензатори. Ако должината на екраните се одбере соодветно на дебелината на слоевите меѓу нив тогаш може да се постигне капацитетите на кондензаторските слоеви да бидат еднакви што ќе доведе до рамномерна распределба на напонот меѓу нив.

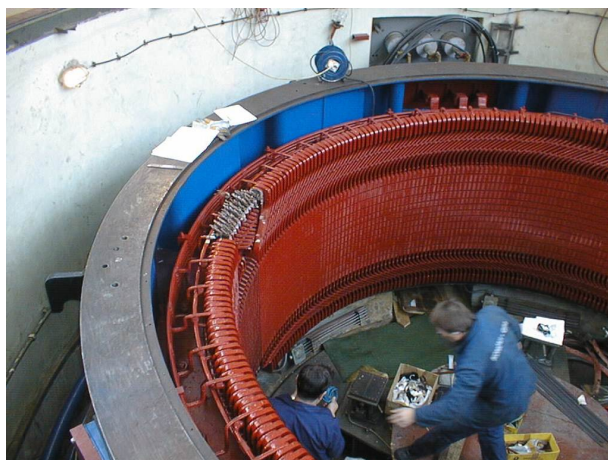
Основен недостаток на непрекинатата микалентова изолација импрегнирана со термо-пластичен битуменски компаунд е што при температури поголеми од  $100^\circ\text{C}$  компаундот омекнува и истекува. Со тоа се формираат гасни шуплини во кои се јавуваат парцијални празнења кои со текот на времето ја деградираат изолацијата. Затоа во последно време се пошироко се применуваат нови типови на изолација со стакломикалента (основата е стаклена волна) и импрегнација од терморективни врзивни средства врз основа на епоксиди, полиестери и силиконски смоли. Таквите импрегнациони маси полимеризираат и образуваат цврсти изолации практично без шуплини. Недостаток на терморективните компаунди е преголемата крутост на изолацијата што ја прави осетлива на силите при куса врска.



Слика 9.40. Излез на генераторски стапови од каналите на статорот



Слика 9.41. Изглед на статор кај турбогенератор



Слика 9.42. Изглед на статор кај хидрогенератор (ХЕЦ Тиквеш)

# 10

## МЕТОДИ ЗА ИСПИТУВАЊЕ НА ИЗОЛАЦИЈАТА – ПРОФИЛАКТИКА НА ИЗОЛАЦИЈАТА

Контролата на изолацијата во текот на експлоатацијата се нарекува *профилактика на изолацијата*. Таа служи за откривање на дефекти во изолационите конструкции и донесување одлуки за нивна замена или поправка на местото каде што се инсталирани.

Развојот на дефекти во изолацијата во најголем дел е поврзано со продирање на влага во неа. Влагата во изолацијата може да се појави поради механички повреди на изолационите конструкции или значителни промени во температурните услови на работа. Процесот на образување на дефектот и уништувањето на изолацијата во почетокот оди многу споро и дури во последните стадиуми има скоковит карактер кој се завршува со пробој на изолацијата.

Правилната експлоатација со која што изолацијата се штити од штетни надворешни дејства е задолжителна за доверлива работа на високонапонската опрема. Рокот на траење на изолацијата во голем степен зависи од привилниот надзор во текот на експлоатацијата во што се вклучени нејзините редовни контроли. Профилактиката на изолацијата е само еден од елементите на контролата. Освен тоа задача на профилактиката е и установување на типични дефекти на изолацијата за различни изолациони конструкции, разработка на ефективни начини за отстранување на тие дефекти и препораки за изработка на рационални изолациони конструкции кои би им биле од корист на производителите.

Методите за контрола на изолацијата може да се поделат на две категории: деструктивни и недеструктивни. Во првата група спаѓаат методи за испитување со повишен напон кој може да доведе до пробој во изолацијата. Во втората група се сите други методи кои се прават со таков напон којшто не може да доведе до пробој во изолацијата. Поради тоа сите видови на недеструктивни методи за испитување на изолацијата се индиректни бидејќи не ја напрегаат изолацијата до нејзината граничка цврстина туку врз основа на одредени измерени параметри можат да доведат до заклучоци за цврстината на изолацијата.

За откривање на дефекти во изолацијата се применуваат следните недеструктивни методи за испитување:

- мерење на отпорноста на изолацијата;
- мерење на аголот на диелектрични загуби;
- мерење на капацитетот;

- мерење на распределбата на напонот;
- мерење на парцијалните празнење во изолацијата;
- снимање со рентгенски зраци или со ултразвук.

На почетокот ќе ги разгледаме методите за недеструктивно испитување на изолацијата, а потоа и методите за испитување со повишен напон.

## 10.1 Недеструктивни методи за контрола на изолацијата

### 10.1.1 Појави кои се користат за недеструктивни методи за контрола на изолацијата

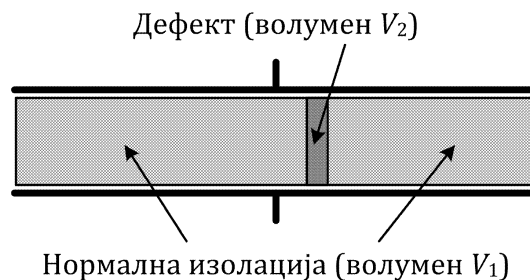
За контрола на состојбата главно се применуваат електричните методи на недеструктивните испитувања кои се базираат врз две основни појави во диелектриците под влијание на слабите електрични полиња: *електрична спроводливост* и *електрична поларизација*.

### 10.1.2 Контрола според аголот на диелектрични загуби

Мерењето на аголот<sup>1</sup> на диелектрични загуби  $\text{tg}\delta$  е еден од најраспространетите методи. Мерејќи ја големината на  $\text{tg}\delta$  може да се установи дали во изолацијата постојат дефекти од различен карактер. Меѓутоа, дефект од еден ист тип но со различен размер на опфатеност на изолацијата може значително да влијае на вредноста на  $\text{tg}\delta$  поради што осетливоста на детектирање на дефектите е променлива. Ова се објаснува со фактот што измерената вредност на  $\text{tg}\delta$  во изолација која што се состои од неколку различни материјали е усреднета величина. На пример, за најпрост модел на изолација во вид на плочест кондензатор со дефектен дел (слика 10.1) изразот за измерената вредност на  $\text{tg}\delta$  ќе биде

$$\text{tg}\delta = \frac{\varepsilon_1 V_1 \text{tg}\delta_1 + \varepsilon_2 V_2 \text{tg}\delta_2}{\varepsilon_1 V_1 + \varepsilon_2 V_2} \quad (10.1)$$

каде што  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  се вредности на  $\text{tg}\delta$  за исправната изолација и нејзиниот дефектен дел, додека  $V_1$  и  $V_2$  се волумени на истите два дела од изолацијата.



Слика 10.1. Изолација со дефект

<sup>1</sup>При мерењата, всушност, не се мери аголот  $\delta$ , туку тангесот од тој агол. Меѓутоа, бидејќи аголот  $\delta$  е многу мал важи дека  $\text{tg}\delta \approx \delta$ .

Во многу случаи кога ќе се појават дефекти, диелектричната константа на изолацијата малку се менува и може да се смета дека е  $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ , така што од (10.1) се добива

$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_1 \left[ 1 + \frac{V_2}{V} \left( \frac{\operatorname{tg}\delta_1}{\operatorname{tg}\delta_2} - 1 \right) \right] \quad (10.2)$$

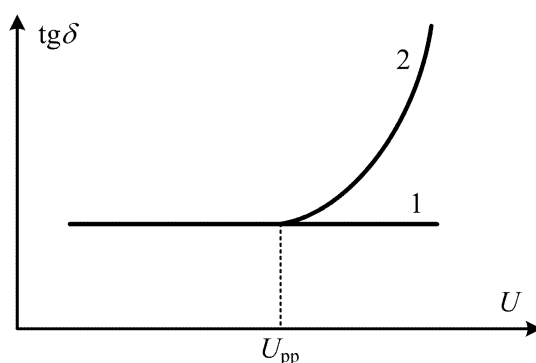
каде што  $V$  е вкупен волумен на изолацијата.

Да разгледаме пример со грешка во изолацијата при што е  $V_2 = 0,005V_1$  и  $\operatorname{tg}\delta_2 = 10\operatorname{tg}\delta_1$ . Од (10.2) може да се пресмета дека зголемувањето на  $\operatorname{tg}\delta$  е само 5% во однос на нормалната величина, што е споредливо со точноста при мерењата во експлоатациони услови и со можните случајни промени на вредноста на  $\operatorname{tg}\delta_1$  во волуменот на нормалната изолација.

Од тука се гледа дека при мали димензии на делот со грешка измерената вредност на  $\operatorname{tg}\delta$  многу малку се разликува од  $\operatorname{tg}\delta_1$  и грешката останува неоткриена. Според тоа, мерењето на  $\operatorname{tg}\delta$  на изолацијата овозможува да се откријат распределени грешки, а не грешки кои опфаќаат само мал дел од изолацијата.

### Крива на јонизација

Често пати мерењето на  $\operatorname{tg}\delta$  се прави за повеќе различни вредности на напонот и се црта зависноста  $\operatorname{tg}\delta = f(U)$  од која што може да се суди не само за појавата туку и за карактертот на дефекти во изолацијата.



Слика 10.2. Крива на јонизација

1) изолација со нормален квалитет, 2) изолација со гасни шуплини

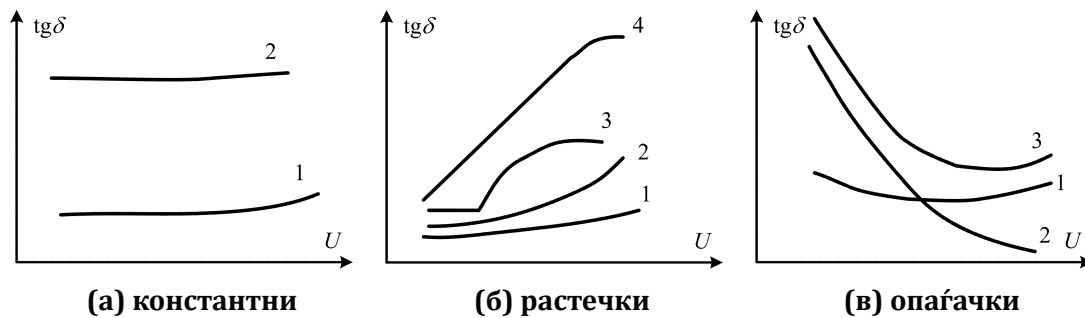
Кај изолација со нормален квалитет  $\operatorname{tg}\delta$  останува практично непроменлив понекогаш дури и при напони до  $1,5U_n$  (крива 1 на слика 10.2).

Во случај на изолација со гасни шуплини со порастот на напонот се појавуваат парцијални празнења со што доаѓа до зголемување на  $\operatorname{tg}\delta$  поради губење на дополнителна енергија која се троши за одржување на празнењата (крива 2 на слика 10.2). Поради тоа зависноста  $\operatorname{tg}\delta = f(U)$  е наречена *крива на јонизација* и од неа може ориентационо да се одреди вредноста на напонот  $U_{pp}$  при којшто започнуваат парцијалните празнења. Меѓутоа определувањето на таа точка многу зависи од осетливоста на методот со кој се мери затоа што во првите моменти кога се појавуваат парцијалните празнења нивните моќности се мали и тешко мерливи. Бидејќи  $\operatorname{tg}\delta$  ја карактеризира општата состојба на изолацијата, нејзини значителни промени можат да се забележат дури при интензивни парцијални празнења.

### Типични криви на јонизација

Снимањето на кривите на јонизација е корисно бидејќи тие даваат информација за парцијалните празнења и за другите видови грешки на изолацијата. За илустрација на сликата 10.3 се прикажани неколку зависности  $\text{tg}\delta = f(U)$ . Прикажани се три типа на зависности (означени со а, б и в на сликата) во коишто функцијата  $\text{tg}\delta = f(U)$  е константна, растечка и опаѓачка.

За секој од трите типа на зависности во табелите од 10.1 до 10.3 дадени се особеностите кои се присутни кај секоја од типичните криви на јонизација, како и генерална оценка на изолацијата во поглед на нејзиниот квалитет. Со тоа е прикажано практичното значење на кривата на јонизација  $\text{tg}\delta = f(U)$ .



Слика 10.3. Типични криви на јонизација

Табела 10.1. Состојба на изолација со константни криви на јонизација (според слика 10.3а)

Крива	Особености	Состојба на изолацијата
1	мала вредност на $\text{tg}\delta$	добра
2	голема вредност на $\text{tg}\delta$ голема спроводливост	лоша (влага во целата изолација, загадување на изолацијата)
2	голема вредност на $\text{tg}\delta$ голема капацитивност	пробиен дел од изолацијата (кратко- споени делови)

Табела 10.2. Состојба на изолација со растечки криви на јонизација (според слика 10.3б)

Крива	Особености	Состојба на изолацијата
1	$\text{tg}\delta$ расте според квадра- тен закон	добра доколку порастот на $\text{tg}\delta$ почнува при напон доста помал од $U_n$ , во спротивно лоша
2	интензивни парцијални празнења	лоша (бројот на парцијални празнења се зголемува)
3	јако загадување голема содржина на влага парцијални празнења	лоша
4	почетната вредност на $\text{tg}\delta$ е голема со натамошен раст	лоша (навлажнета изолација со голема спроводливост)

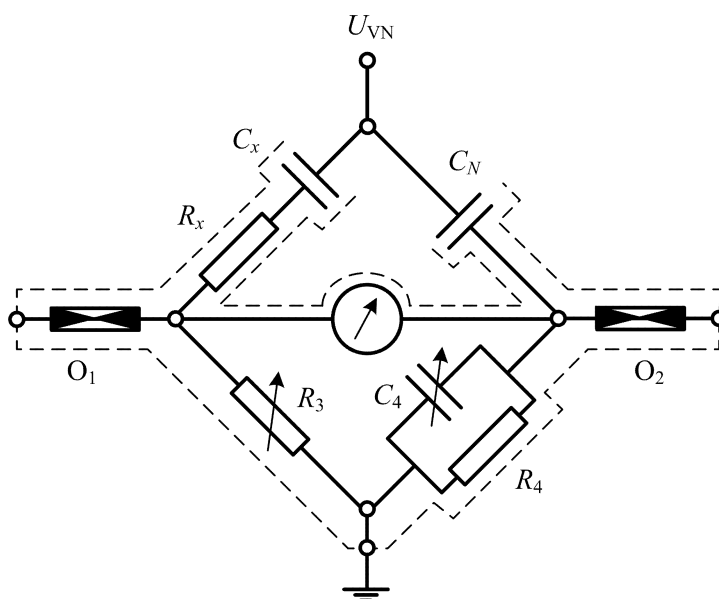


**Табела 10.3. Состојба на изолација со опаѓачки криви на јонизација (според слика 10.3в)**

Крива	Особености	Состојба на изолацијата
1	$\text{tg}\delta$ малку опаѓа, а потоа расте	лош квалитет на електричните врски во делови од изолацијата
2	наглото зголемување на капацитивноста	парцијален пробој, јагленисани или полупроводни делови
3	наглото опаѓање на $\text{tg}\delta$ следен со пораст	стареене на оштетениот дел од изолацијата

### Методи за мерење на $\text{tg}\delta$

**Шерингов мост.** Капацитивноста и  $\text{tg}\delta$  на изолацијата се мерат со помош на Шерингов мост, чија шема е прикажана на сликата 10.4. На шемата се изолацијата која што се мери е прикажана со редна врска од отпорност  $R_x$  и капацитивност  $C_x$ . Со  $C_N$  е означен еталонскиот кондензатор кој е со многу мали диелектрични загуби и е направен со гасна изолација. Нисконапонските гранки се сотојат од отпорноста  $R_3$  и паралелната комбинација на отпорноста  $R_4$  и капацитивноста  $C_4$ . Во мостот се поставени и два одводници на пренапони, означени со  $O_1$  и  $O_2$  коишто ги штитат мерните гранки на мостот од можен пробој на испитуваната изолација. Со црткани линии на сликата се означени метални екрани со кои е оклопен мостот со цел да се избегнат пречките од надворешните полиња.



**Слика 10.4. Нормална шема на Шерингов мост за мерење на капацитет и  $\text{tg}\delta$**

Импеданцијата на гранката во која што е поставена испитуваната изолација изнесува

$$\underline{Z}_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = \frac{1 + j\omega R_x C_x}{j\omega C_x}. \quad (10.3)$$

За да ја изразиме вредноста на  $\text{tg}\delta$  како функција од  $R_x$  и  $C_x$  нека претпоставиме дека импеданцијата  $Z_x$  е подложена на напон со ефективна вредност  $U$  и фазен агол

еднаков на нула. Во тој случај струјата во гранката е

$$\underline{I} = \frac{Ue^{j0}}{\underline{Z}_x} = \frac{j\omega C_x U}{1 + j\omega R_x C_x}. \quad (10.4)$$

додека нејзиниот фазен агол, кој можеме да го одредиме како разлика на фазните агли на комплексните броеви во броителот и именителот на (10.4), изнесува

$$\varphi = 90^\circ - \arctg(\omega R_x C_x). \quad (10.5)$$

Со замена на (10.5) во (2.18) добиваме

$$\delta = \arctg(\omega R_x C_x), \quad \operatorname{tg}\delta = \omega R_x C_x. \quad (10.6)$$

Како што е познато рамнотежа на мостот се постигнува при исполнување на следниот услов:

$$\underline{Z}_x \underline{Z}_4 = \underline{Z}_N \underline{Z}_3, \quad (10.7)$$

каде што  $\underline{Z}_x$ ,  $\underline{Z}_N$ ,  $\underline{Z}_3$ , и  $\underline{Z}_4$  се импеданции на гранките на мостот.

За импеданцијата  $\underline{Z}_4$  можеме да напишеме

$$\underline{Z}_4 = \frac{R_4 \cdot 1/j\omega C_4}{R_4 + 1/j\omega C_4} = \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 C_4}. \quad (10.8)$$

Со замена на (10.3) и (10.8), како и вредностите  $\underline{Z}_3 = R_3$  и  $\underline{Z}_N = 1/(j\omega C_N)$  во (10.7) добиваме

$$\frac{1 + j\omega R_x C_x}{j\omega C_x} \cdot \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 C_4} = \frac{R_3}{j\omega C_N}, \quad (10.9)$$

од каде што со изедначување на реалните и имагинарните делови на двете страни од равенката ги добиваме следните два условия за рамнотежа на мостот

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3}, \quad R_x = R_3 \frac{C_4}{C_N}. \quad (10.10)$$

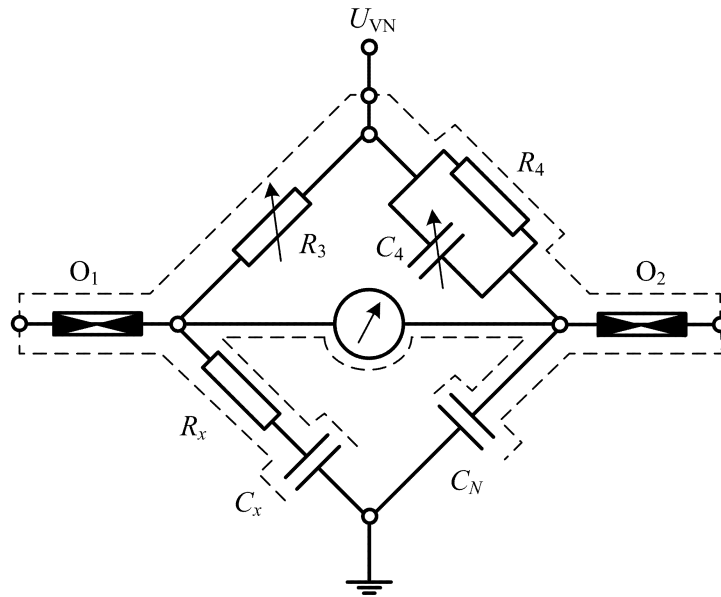
Конечно, со замена на (10.10) во (10.6) за  $\operatorname{tg}\delta$  имаме

$$\operatorname{tg}\delta = \omega R_x C_x = \omega R_4 C_4. \quad (10.11)$$

Отпорноста  $R_4$  во мостовите со фреквенција од 50Hz обично се избира еднаква на  $10^3/\pi \Omega$  или  $10^3/\pi \Omega$  и тогаш е  $\operatorname{tg}\delta = 10^5 C_4$  или  $\operatorname{tg}\delta = 10^6 C_4$ . Ако  $C_4$  се изрази во  $\mu\text{F}$  тогаш ќе биде  $\operatorname{tg}\delta = 0,1 C_4$ , односно  $\operatorname{tg}\delta = C_4$ .

Во условите на терен, при експлоатација на високонапонската опрема, често пати еден од приклучоците на испитуваната изолациона конструкција е во директна врска со земјата и не може да биде одвоен од неа. Во таквите случаи за мерење се користи превртена шема на Шеринговиот мост (слика 10.5).

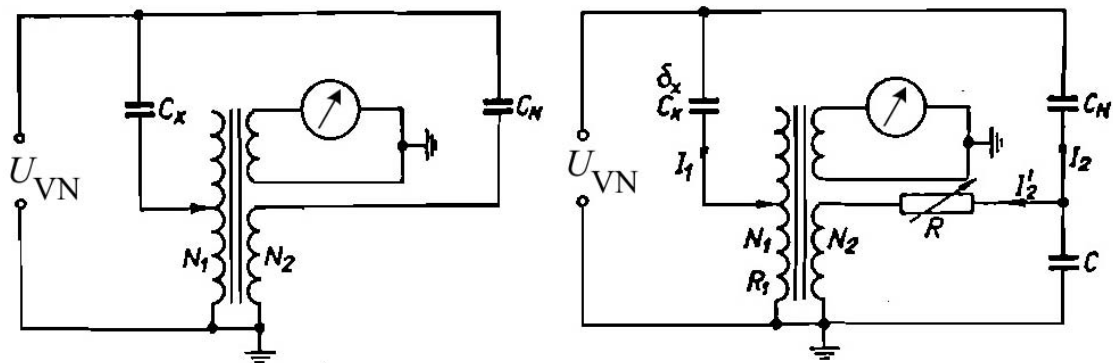
Превртената шема се разликува од нормалната по тоа што високиот напон се доведува до точката на соединување на елементите  $R_3$  и  $R_4$ , а се заземјува точката каде што се поврзани  $C_x$  и  $C_N$ . Во тој случај двата регулациони елементи ( $R_3$  и  $C_4$ ) се поврзани на изворот на висок напон поради што е потребно да се превземат посебни мерки при ракувањето со нив за да се избеген ризикот од контакт со изворот на висок напон.



Слика 10.5. Превртена шема на Шерингов мост за мерење на капацитет и  $\text{tg}\delta$

**Глинов мост - трансформаторски мост.** Споредбата на мерниот ( $C_x$ ) и еталонскиот кондензатор ( $C_N$ ) може да се оствари и ако во долниот дел од мерниот мост се постави посебен струен трансформатор со три намотки. Таквото решение се одликува со голема осетливост и многу мали напони во долниот дел на мостот. Една варијанта на трансформаторски мерен мост е Глиновиот мост (слика 10.6).

Првата намотка има поголем број навивки  $N_1$  чијшто број може да се менува со помош на преклопка. Низ неа тече струјата на кондензаторот  $C_x$  којшто треба да се измери. Втората намотка има помал број навивки  $N_2$  и низ неа тече струјата на еталонскиот кондензатор  $C_N$ . На третата намотка е поврзан нулиндикаторот (слика 10.6a).



(а) упростена шема

(б) комплетна шема

Слика 10.6. Глинов мост

Ако претпоставиме дека  $\text{tg}\delta = 0$  за двата кондензатора тогаш низ двете намотки ќе течат чисто капацитивни струи кои ќе го магнетизираат јадрото на трансформаторот и ќе индуцираат еквивалентен напон во третата намотка. Дополнително, ако се постигне да важи  $N_1 I_1 = N_2 I_2$  и струите да создаваат спротивно насочени магнетни полиња во јадрото на трансформаторот (тоа може да

се постигне со насоката на мотање на намотките) тогаш вкупното магнето поле во јадрото ќе биде еднакво на нула и во третата намотка нема да се индуцира напон, т.е. мостот ќе биде во рамнотежа. Имајќи предвид дека струите во намотките зависат само од капацитетите на кондензаторите (импеданциите на намотките се занемарливи) и изнесуваат  $I_1 = \omega C_x U$  и  $I_2 = \omega C_N U$  условот за рамнотежа на мостот ќе биде

$$N_1 \omega C_x U = N_2 \omega C_N U,$$

од каде што следува

$$C_x = C_N \frac{N_2}{N_1}. \quad (10.12)$$

Мерењето на  $\text{tg}\delta$  може да се постигне со воведување на променлив отпорник  $R$  и капацитет  $C$  во втората гранка на мостот (слика 10.6б). Во овој случај низ втората намотка тече струја  $I'_2$  така што условот за рамнотежа на мостот ќе гласи  $N_1 I_1 = N_2 I'_2$ . Струите во двете намотки се

$$I_1 = \frac{U}{1/(j\omega C) + R_x + R_1}$$

$$I'_2 = \frac{U}{1/(j\omega C_N) + RC/C_N + R}$$

со што условот за рамнотежа на мостот станува

$$\frac{N_1}{1/(j\omega C) + R_x + R_1} = \frac{N_2}{1/(j\omega C_N) + RC/C_N + R}$$

од каде што со изедначување на реалните и имагинарните делови на двете страни од равенката добиваме

$$C_x = C_N \frac{N_2}{N_1},$$

$$\text{tg}\delta = \omega(C_N + C)R - \omega C_N R_1 \frac{N_2}{N_1}. \quad (10.13)$$

Бидејќи  $C_N \ll C$  и  $R_1 \ll R$  изразот станува многу поедноставен и гласи

$$\text{tg}\delta = \omega RC. \quad (10.14)$$

Отпорите  $R_1$  и  $R$  изнесуваат само неколку Оми, така што влијанието на паразитните капацитети врз работата на мостот е многу помало отколку кај Шеринговиот мост. Осетливоста на Глиновиот мост може да се зголеми ако јадрото на трансформаторот се направи од материјал со голема магнетна пермеабилност. Тогаш и најмала разлика во производите на бројот на навивки и струјата во двете намотки ќе предизвика доволен индуциран напон во третата намотка кој лесно може да се детектира со нулиндикаторот.

**Практични аспекти.** Во практиката мерењето на  $\text{tg}\delta$  се врши со напон од 10 kV при фреквенција од 50 Hz. Ако номиналниот напон на опремата е помал од 10 kV, тогаш мерењето се врши мерење со напон еднаков на номиналниот напон.

Мерењето на  $\text{tg}\delta$  обично се прави помеѓу секоја од намотките и заземјениот дел од високонапонскиот уред (казан на трансформатор, статор на генератор или

мотор и слично). Но можни се и мерења помеѓу две одделни намотки (или фази) кај вртливите машини или трансформаторите. Во сите случаи краевите на намотките кои не се поврзани на мостот за мерење се заземјуваат.

Резултатите од мерењата на  $\text{tg}\delta$  треба да се споредат со резултатите од претходните мерења или со мерењата извршени при изработката на апаратот во фабриката.

Современите изведби на мерни системи за теренско мерење на факторот на диелектричните загуби имаат вградено специјални електронски кола кои го мерат нивото на електромагнетните пречки и генерираат контранaponи кои ги отстрануваат напоните индуцирани од пречките. Истовремено тие имаат и автоматика за самостојно урамнотежување, како и високонапонски извори и еталонски кондензатор  $C_N$ . Целокупната работа на таквиот систем е управувана од микропроцесор, а резултатите од мерењата кои се претходно комплетно обработени се добиваат на соодветен дисплеј. На сликата 10.7 е прикажан современ компактен преносен мост за мерење на многу мали диелектрични загуби кој има и екран на допир.

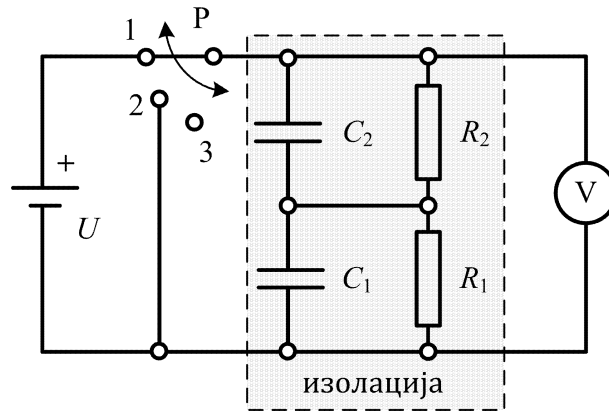


Слика 10.7. Компактен преносен мост за мерење многу мали диелектрични загуби (Tettex 2840)

### 10.1.3 Контрола според повратниот напон

Контролата на изолацијата според повратниот напон се применува кај изолација која се состои од два или повеќе слоеви. Пример за таква изолациона конструкција се каблите изолирани со импрегнирана хартија, трансформаторите (енергетски и мерни) и кондензатори. Во сите случаи едниот слој од изолацијата е хартија (трансформаторски картон), додека другиот слој е масло. Принципот на мерење е прикажан на сликата 10.8 и тој се состои од три чекори кои се симулираат со поставување на преклопката Р во една од трите можни позиции.

Во првиот чекор на изолацијата се приложува еднонасочен напон со вредност  $U = 1 \text{ kV}$  или  $U = 2 \text{ kV}$  со времетраење од  $t_p = 15 \text{ min}$  или  $t_p = 30 \text{ min}$  што е доволно за да се наполнат со електрицитет кондензаторите со кои се претставени двата слоја од изолацијата. На крајот од овој чекор на разделната површина помеѓу диелектриците се акумулира полнежот на апсорпција којшто можеме да го пресметаме со изразот (2.20, стр. 20).



Слика 10.8. Електрично коло за мерење на повратниот напон

Во вториот чекор, со поставување на прекинувачот P на позицијата 2, за кратко време  $t_d = 2\text{ s}$  накусо ги врзуваме двата краја од изолацијата со што кондензаторите  $C_1$  и  $C_2$  се поврзани паралелно така што тие ќе добијат напон

$$U_s = \frac{Q_{abs}}{C_1 + C_2}$$

што со оглед на (2.20) станува

$$U_s = \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)} U \quad (10.15)$$

Во третиот чекор изолацијата се остава отворена и се мери промена на напонот на нејзините краеве со инструмент со многу голема внатрешна отпорност, при што тоа е најчесто електронски волтметар или осцилоскоп кој уште може да има и можност за меморање на обликот на кривата на напонот којшто го мери<sup>2</sup>.

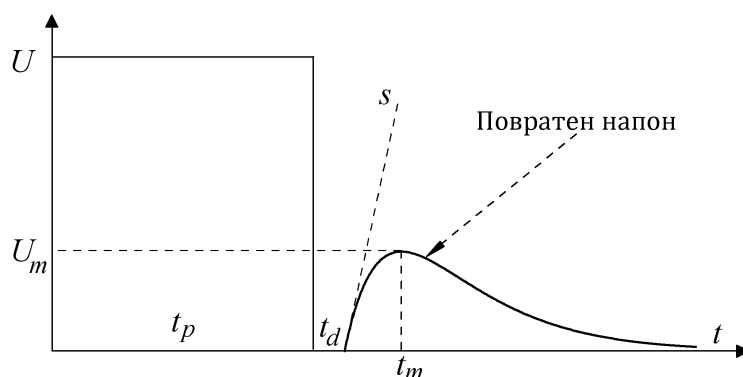
Повраниот напон  $u_r(t)$  е сума од напоните на двата кондензатори ( $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ ) кои се празнат преку паралелно поврзаните отпорници  $R_1$  и  $R_2$ . За повратниот напон важи релацијата

$$u_r(t) = u_1(t) + u_2(t) = U_s (e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1}) \quad (10.16)$$

додека неговиот облик, како и промената на напонот на краевите на изолацијата за време на целото мерење се дадени на сликата 10.9.

Временските константи со кои се карактеризира промената на повратниот напон се  $T_1 = R_1 C_1$  и  $T_2 = R_2 C_2$ . Овде треба да нагласиме дека овие временски константи иако навидум би требало да зависат од геометријата на изолациониот систем (затоа што зависат од отпорности и капацитети) тоа воопшто не е така.

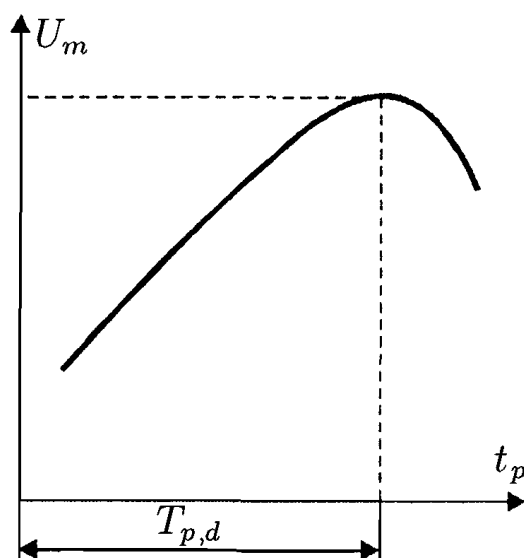
<sup>2</sup>Често пати се случувало луѓе коишто работат со високонапонска опрема да треба да интервенираат на некој кондензатор. Знаејќи дека тој може да е полн со електрицитет откако е исклучен од напојувањето тие накусо ги поврзуваат неговите краеве со што тој добива напон еднаков на нула. Потоа, верувајќи дека кондензаторот е празен допирајќи ги неговите приклучоци може да се изложат на непријатен струен удар кој се појавува токму поради постоењето на повратниот напон од поларизационите процеси во диелектрикот. Тоа значи дека пред да се допре високонапонска опрема иако нејзиниот капацитет е испразнет треба да се почека уште некое време да дојде до празнење на поларизациониот електрицитет кој е заробен во внатрешноста на изолацијата, т.е. да се почека повратниот напон да падне на вредност блиска до нула.



Слика 10.9. Изглед на кривата на повратниот напон

Временските константи зависат само од карактеристиките на материјалот и за нив важат следните релации  $T_1 = \varepsilon_1/\gamma_1$  и  $T_2 = \varepsilon_2/\gamma_2$ , каде што  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  се диелектрични константи на материјалите, додека  $\gamma_1, \gamma_2$  се нивни специфични електрични спроводности.

**Поларизационен спектар.** Често пати мерењата на повратниот напон се прават повеќе пати со различно време  $t_p$  при што напонот на изворот  $U$  се одржува константен. Со тоа се добиваат различни криви на повратниот напон кај кои се прави споредба на зависноста на максималниот повратен напон  $U_m$  од времето  $t_p$ , т.е. се црта зависноста  $U_m = f(t_p)$  која што се нарекува поларизационен спектар (слика 10.10).



Слика 10.10. Поларизационен спектар  $U_m = f(t_p)$

Од обликот на кривата се определува глобалниот максимум на повратниот напон кој се постигнува при времето на полнење кое се вика доминантна временска константа  $T_{p,d}$ . Карактеристично за оваа крива е тоа што нејзиниот максимум се поместува налево ( $T_{p,d}$  се намалува) доколку содржината на влага во изолацијата се зголемува или ако се појават продукти од разложување на изолацијата (од хартијата или маслото) што е знак за стареење на изолацијата.

За снимање на поларизациониот спектар постројат специјализирани инструменти кои се потполно автоматизирани и контролирани од микропроцесор. Еден таков инструмент е прикажан на сликата 10.11. Тој инструмент, како и слични инструменти од други производители, не само што го снима поларизациониот спектар туку дава и информација за количеството на влага во изолацијата и препорака за максималната работна температура на трансформаторот со цел да се продолжи неговиот работен век. Освен тоа инструментот ги одредува и величините  $s$  и  $t_m$ . Шемата за неговото поврзување е мошне едноставна и е прикажана на сликата 10.12. При мерењето  $t_p$  се менува од 10 ms до 1000 ÷ 2000 s, додека односот  $t_p/t_d$  може да се менува од 0,1 до 10. Обично се зема  $t_p/t_d = 2$  со што се овозможува доминантната временска константа  $T_{p,d}$  да биде приближно еднаква на поларизационата временска константа  $T_p$  која што се пресметува според изразот (2.25).



**Слика 10.11. Мереен инструмент за мерење на повратниот напон на масло-хартиена изолација (Tettex RVM 5462)**

На сликата 10.13 е прикажана зависноста на доминантната временска константа од количеството на влага при што температурата е параметар.

Линиите на сликата се прави, но бидејќи вертикалната оска е дадена во логаритамска скала зависноста на доминантната временска константа од количеството на влага може да биде изразена на следниот начин

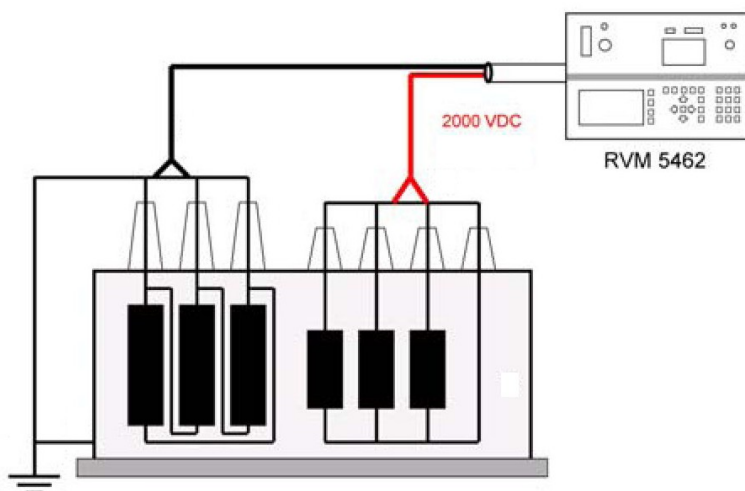
$$\log T_{p,d} = k_1 - k_2 h$$

со што може да се пресмета релативното количество на влага во изолацијата

$$h = \frac{k_1 - \log T_{p,d}}{k_2}$$

каде што  $k_1$  и  $k_2$  се константи. Двете константи се определуваат експериментално со повеќекратни испитувања и тие заедно со функција  $h = f(\theta, T_{p,d})$  се сместува





**Слика 10.12. Шема на поврзување за мерење на повратниот напон на  
изолационен систем на трансформатор**

**Табела 10.4. Стареење на масло-хартиена изолација кај трансформатори**

категорија	релативна влажност
нов трансформатор	до 0,5%
годишно стареење	0,05 – 0,1%
горна граница $U_n \leq 110 \text{ kV}$	3,0%
$U_n \leq 220 \text{ kV}$	2,8%
$U_n > 220 \text{ kV}$	2,6%

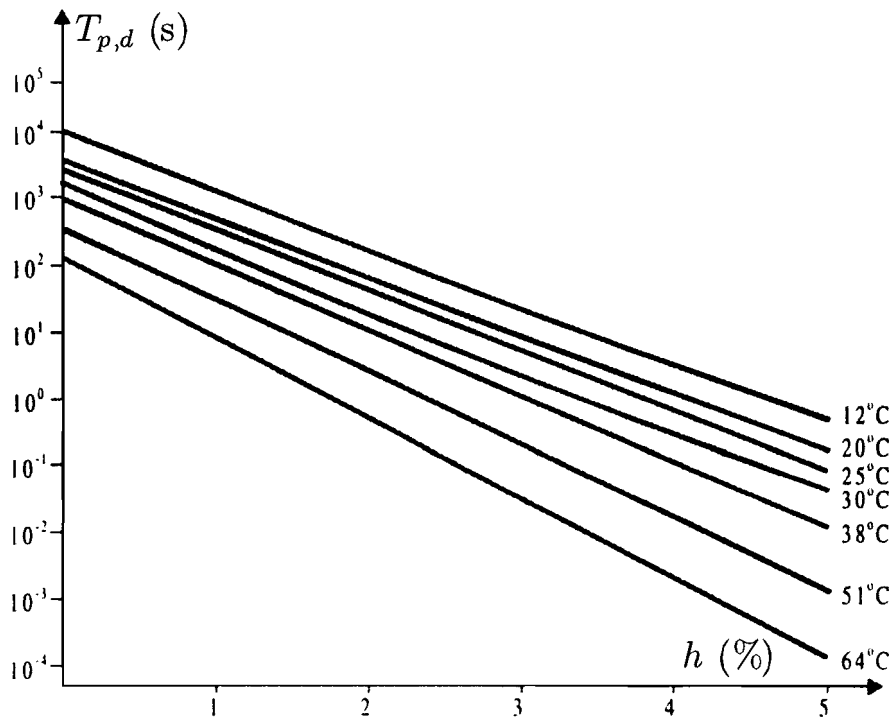
во софтверот на мерниот уред. Тоа значи дека за да се одреди релативното количество на влага во изолацијата треба да се измерат доминантната временска константа  $T_{p,d}$  и температурата  $\theta$ .

Интерпретацијата на резултатите од испитувањето со овој метод се спроведува земајќи ги предвид сите расположливи информации од тековните и претходните резултати од испитувањето според истиот метод.

Во хомогено остарената изолација повратниот напон има само еден глобален максимум, а релативното количество на влажност кај новите трансформатори може да изнесува до 0,5%. Просечните работни услови создаваат зголемување на количеството на влажност од 0,05 до 0,1% годишно. Често, стареењето на изолацијата започнува со повисока стапка за нови трансформатори, а по неколку години тоа се успорува.

Во табелата 10.4 се дадени некои ограничувања на содржината на влагата на енергетските трансформатори.

На крајот само ќе спомене дека ако температурата во изолацијата е нерамномерна ќе доведе до забрзано стареење на потоплите делови и во овие места процесот на стареење ќе создаде повеќе вода. Во тој случај поларизациониот спектар ќе содржи повеќе од еден глобален максимум на повратниот напон (во најголем број случаи се среќава само еден дополнителен максимум) и ќе создаде друга доминантна временска константа, десно од временската константа која го преставува просечниот поларизационен ефект на влажноста во изолационата хартија. Изолацијата во оваа состојба е нехомогено остарена.



Слика 10.13. Зависност на доминантната временска константа од влажноста и од температурата

**Фактори за оценка на изолацијата според повратниот напон.** Во последно време, покрај следењето на поларизациониот спектар на изолацијата, за дијагностика се користат и други параметри со кои се оценува остареноста на изолацијата. Во продолжение се наведени два такви параметри кои се применуваат за оценување на изолација на кабли и трансформатори.

**Фактор  $p$  за кабли.** На сликата 10.9 се прикажани параметрите кои треба да се измерат, а тоа се: максималната вредност  $U_m$  и почетната стрмнина на повратниот напон  $s$  како и времето од почетокот на третиот процес до постигнување на максимална вредност на повратниот напон  $t_m$ .

Користејќи го изразот (10.16) лесно може да се покаже дека за наведените величини се добива

$$U_m = U_s [\lambda^{1/(1-\lambda)} - \lambda^{\lambda/(1-\lambda)}] \quad (10.17)$$

$$s = \frac{U_s}{T_1} \frac{\lambda}{\lambda - 1} \quad (10.18)$$

$$t_m = T_1 \frac{\lambda}{\lambda - 1} \ln \lambda \quad (10.19)$$

каде што  $\lambda = T_2/T_1$ .

Напонот  $U_s$ , од кој зависат наведените величини, зависи од повеќе параметри но најважно е да се истакне дека тој зависи од  $R_1$  и  $R_2$ , кои пак зависат од температурата така што и напонот  $U_s$  зависи од температурата. Тоа значи дека мерењата направени на еден ист примерок во различни временски услови се неспоредливи едни со други и тоа само поради различната амбиентна температура

на кабелот. За да се избегне овој проблем се воведува следниот фактор

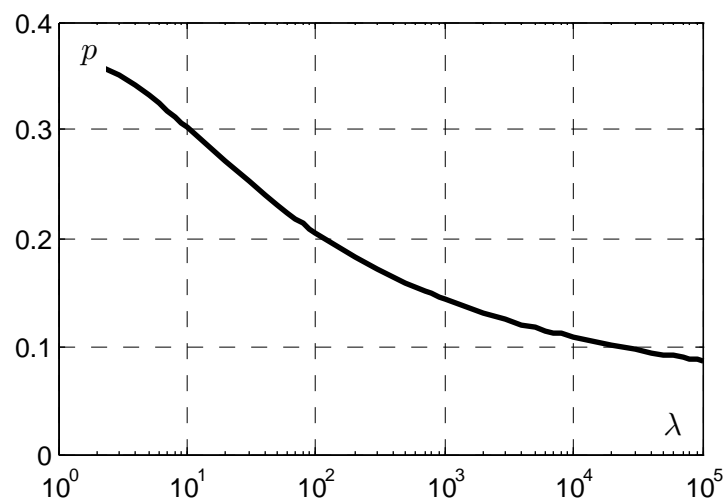
$$p = \frac{U_m}{s \cdot t_m} = \frac{\lambda^{1/(1-\lambda)} - \lambda^{\lambda/(1-\lambda)}}{\ln \lambda} \quad (10.20)$$

Предноста на факторот  $p$  е што тој зависи само од  $\lambda$ , т.е. зависи само од временските константи  $T_1$  и  $T_2$ . Со тоа неговата зависност од температурата е минимизирана поради тоа што двете временски константи зависат од температурата скоро на ист начин од каде што следува дека  $\lambda$  е приближно константна за различни температури.

Зависноста  $p(\lambda)$  е прикажана на сликата 10.14, додека оценка за состојбата на изолацијата според вредноста на  $p$  е дадена во табелата 10.5.

**Табела 10.5. Оценка на состојбата на изолацијата според вредноста на факторот  $p$**

$p$	$p \leq 0,1$	$0,1 < p \leq 0,2$	$0,2 < p \leq 0,3$	$> 0,3$
Оценка	добра	остарена	сериозно остарена	критична



**Слика 10.14. Зависност  $p(\lambda)$**

Често пати факторот  $p$  се мери за еден ист кабел во текот на неговиот работен век со цел да се добијат сознанија за тоа како тој се менува со текот на годините и при која вредност може да се очекува дека одреден кабел ќе постане неупотреблив поради дотраеност на изолацијата. Тоа не значи дека мерењета се правени со години, на пример 30-40 години колку што трае работниот век на еден кабел, со цел да се соберат податоци за одреден тип на кабел. Таквиот начин на прибирање на податоци за оценка на дотраеноста на каблите и очекуваниот преостанат работен век би бил предолг и практично неупотреблив. Наместо тоа се прават мерења кај кабли кои се подложени на вештачки предизвикано забрзано стареење кое се симулира со тоа што кабелот намерно се држи на повисока работна температура во лабораториски услови. Со тоа се добиваат податоци за менувањето на факторот  $p$  во зависност од рокот на остареност на каблите за многу пократок период, со што се овозможува при мерења на терен на конкретен случај од измерената вредност на  $p$  да се процени уште колкав работен век му преостанува на некој кабел.

**Фактор  $r$  за трансформатори.** Кај трансформаторите факторот  $p$  не се користи затоа што кај нив течниот и цврстиот дел од изолацијата треба да се третираат посебно бидејќи тука не се работи за случај со импрегнирана хартија како кај каблите туку тоа се два потополно одделени изолациони елементи (иако се практично од ист материјал).

Со анализа на кривата на повратен напон кај трансформатори може да се пресметаат временските константи  $T_1$  и  $T_2$  на двете компоненти на изолацијата со кои се дефинира факторот  $r$  којшто се користи за карактеризација на степенот на остареност и деградација на изолацијата на трансформаторите:

$$r = \log T_1 \cdot \log T_2 \quad (10.21)$$

Вредностите на константите  $T_1$  и  $T_2$  можеме да ги пресметаме со помош на (10.20) и (10.19). При позната вредност за  $p$  од (10.20) можеме да ја пресметаме величината  $\lambda$  при што бидејќи равенката е нелинеарна ќе користиме итеративна постапка за која што е потребна почетно решение кое можеме грубо да го процениме од кривата од сликата 10.14. Знаејќи ја величината  $\lambda$  од (10.19) следува

$$T_1 = \frac{(\lambda - 1)t_m}{\lambda \ln \lambda}$$

и потоа

$$T_2 = \lambda T_1$$

#### 10.1.4 Контрола според отпорот на изолацијата

Отпорот на изолацијата се мери со мегаомметри кои работат со еднонасочен напон. Испитните еднонасочни напони се стандардизирани и изнесуваат 500, 1000, 2500 и 5000 V. На пример, вообичаено е роторската намотка (возбудната намотка) кај генераторите да се мери со 500 V, статорската со 1000 V, а кај енергетските трансформатори и кабли се користи напон од 2500 V или 5000 V.

Доколку приклучиме еднонасочен напон во колото од сликата 2.16 (стр. 20) со кое е моделирана изолацијата можеме да заклучиме дека струјата ќе се менува со текот на времето според следниот израз

$$i(t) = \frac{U}{R_g} + \frac{U}{R_p} e^{-t/T_p} \quad (10.22)$$

каде што  $U$  е напонот на еднонасочниот извор, а  $T_p$  е поларизационата временска константа која изнесува  $T_p = R_p C_p$ . Во изразот за струјата не е земен членот кој се однесува на полнење на кондензаторот  $C_g$  кој е краткотраен импулс (Дираков импулс) од редот на микросекунди или помалку.

Според тоа, отпорот на изолацијата кој е дефиниран како однос меѓу приложениот напон и струјата зависи од времето поминато од моментот на приклучувањето на напонот и за него можеме да напишеме

$$R(t) = \frac{U}{i(t)} = \frac{R_p R_g}{R_p + R_g e^{-t/T_p}} \quad (10.23)$$

од каде што е очигледно дека при  $t \rightarrow \infty$  се добива  $R(t) = R_g$ , што значи дека ако сакаме да го измериме отпорот  $R_g$  ќе треба да почекаме одредено време

(вообичаено една минута) за да дојде до стабилизација на струјата во колото на вредност  $U/R_g$ .

На сликата 10.15а се прикажани зависностите  $i(t)$  и  $R(t)$  за нормална, т.е. сува изолација. Од кривите се забележува дека струјата на почетокот има многу поголема вредност од струјата во стационарен режим која изнесува  $U/R_g$ . При тоа отпорот на изолацијата се запишува по изминати 15 и 60 секунди од почетокот на мерењето. Тие две отпорности се означени со  $R_{15}$  и  $R_{60}$ . Со нив се дефинира коефициентот на апсорпција на следниот начин

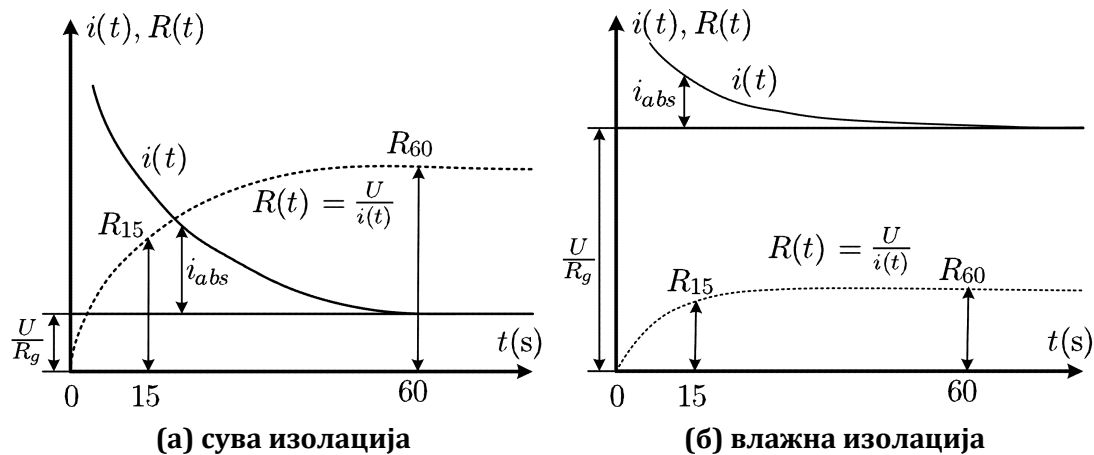
$$K_{abs} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (10.24)$$

за објекти со големи капацитивности овој коефициент се дефинира како однос на отпорностите измерени при 1 и 10 минути.

За коефициентот на апсорпција може да се смета дека во голема мерка е независен од геометријата на изолацијата иако отпорностите  $R_{15}$  и  $R_{60}$  зависат од неа. Претходната констатација може да не важи кај нехомогените материјали.

Ако изолацијата е многу навлажнета или загадена струјата во стационарен режим е многу голема и разликата меѓу почетната и крајната струја е мала (слика 10.15б). Во тој случај отпорите  $R_{15}$  и  $R_{60}$  се многу блиски така што е  $K_{abs} \approx 1$ .

Тоа значи дека колку повеќе  $K_{abs}$  се доближува до 1 толку повеќе влага содржи изолацијата и е потребно да се интервенира така што ќе се направи нејзино сушење. Ефикасноста на процесот на сушење може да се процени преку  $K_{abs}$  затоа што при квалитетно изведено сушење  $K_{abs}$  значително ќе порасне над 1.



Слика 10.15. Зависност на струјата низ изолацијата и отпорите од времето по вклучувањето на еднонасочниот напон

Резултатите од мерењето на отпорот на изолацијата се споредуваат со резултатите од претходни мерење на истиот објект или со препораките од соодветни стандарди (најчесто од ИЕС). Бидејќи отпорот на изолацијата многу зависи од температурата, произлегува дека мерењата треба да се прават при приближно иста температура што е многу тешко да се постигне. Поради тоа за да може да се споредуваат резултати од мерења при различни температури отпорностите на изолацијата треба да се сведат на иста температура (обично тоа е  $20^\circ \text{C}$ ). Освен тоа, во секој случај и напонот при кој се врши мерењето треба да е ист.

Со порастот на температурата отпорот на изолацијата се намалува, при што сведувањето на отпорот на изолацијата од една на друга температура може да се направи со помош на следниот израз

$$R' = R e^{-K \cdot \Delta\theta} \quad (10.25)$$

каде што  $\Delta\theta$  е разлика во температурата помеѓу тековното мерење и некое поранешно со коешто сакаме да се споредиме,  $R$  е отпорност измерена во тековното мерење која што сакаме да ја сведеме на вредноста  $R'$  што одговара на температурата од поранешното мерење, додека  $K$  е константа која изнесува  $K = 0,04078$  за масло-хартиена изолација и  $K = 0,03842$  за цврста изолација.

Нека за некој уред со масло-хартиена изолација некогаш сме измериле отпорност на изолацијата од  $100 \text{ G}\Omega$  при температура од  $35^\circ \text{C}$ , а потоа по неколку месеци сме го повториле мерењето и сме измериле  $145 \text{ G}\Omega$  при температура од  $25^\circ \text{C}$ . Се поставува прашањето: дали изолацијата на тој уред се влошила во поглед на отпорноста на изолацијата или не? За да можеме да одговориме на тоа прашање треба отпорноста од второто мерење да ја сведеме на температура од  $35^\circ \text{C}$ . Тоа значи дека е  $\Delta\theta = 10^\circ \text{C}$ , така што добиваме

$$R' = 145 \cdot e^{-0,04078 \cdot 10} = 96 \text{ G}\Omega$$

од каде што заклучуваме дека изолацијата скоро воопшто не се променила во поглед на нејзиниот отпор. Доколку сакаме двете измерени отпорности да ги сведеме на температура од  $20^\circ \text{C}$  ќе имаме

$$R'_1 = 100 \cdot e^{-0,04078 \cdot (-15)} = 184 \text{ G}\Omega$$

$$R'_2 = 145 \cdot e^{-0,04078 \cdot (-5)} = 178 \text{ G}\Omega$$

со што уште еднаш се потврдува претходниот заклучок дека отпорноста не е многу променета.

Доколку за соодветниот тип изолација не го знаеме прецизно коефициентот  $K$  сведувањето на отпорите на иста температура ќе биде несигурно и тогаш треба да се настојува мерењата да се прават секогаш при приближно иста температура. Друга можност е да се користат табели или криви со соодветни корекциони фактори.

Врз основа на голем број мерења може да се дадат препораки за минималната вредност на отпорноста на изолацијата. Отпорноста на изолација може да се смета како непогодна само ако е многу (за еден ред) пониска од препорачаната вредност. Намалување на отпорноста во однос на резултатите од порано извршените мерења (при исти услови) се дозволува до 50%, а според некои препораки 25–30%. Ако отпорноста на изолацијата не е многу ниска, изолацијата може да се смета за слаба само под услов резултатите и од другите мерења да покажуваат влошување на нејзините вредности.

Инструментите за мерење на отпорот на изолацијата се нарекуваат мегаомметрите, при што современите изведби имаат вградено батерии од кои со помош инвертор се добива потребниот висок еднонасочен напон. Со тоа овие инструменти на терен се независни од напојувањето од мрежа што е голема предност.

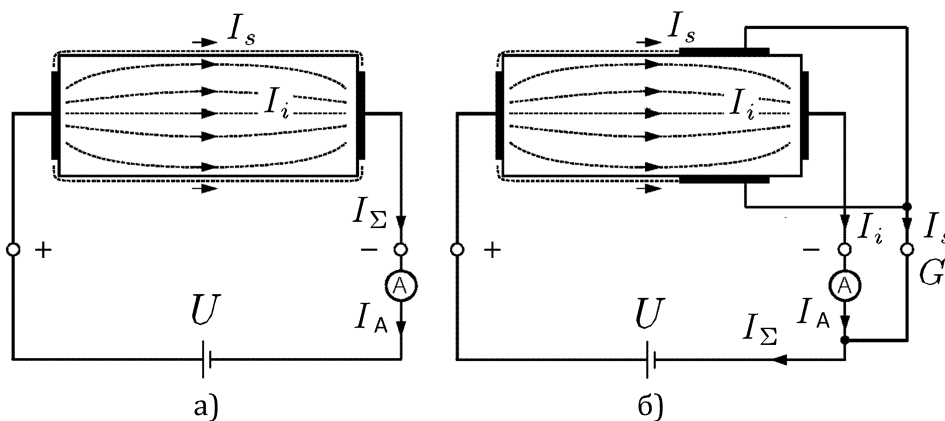
Мегаомметрите имаат три приклучоци: позитивен, негативен и приклучок за одвод на ползечки или површинските струи (тие се означени со +, – и G). Позитивниот и негативниот приклучок се поврзуваат на двете електроди на уредот меѓу кои е испитуваната изолација, додека третиот приклучок се врзува на

специјално направен екран за прифаќање на површинските струи со цел тие да не влијаат врз мерењето. Изгледот на еден таков инструмент е прикажан на сликата 10.16.



**Слика 10.16. Мереен инструмент за мерење на отпорот на изолација – мегаомметар (Megger MIT 515)**

Преку сликата 10.17 ќе го објасниме начинот на поврзување и функционирање на приклучокот за прифаќање на површинските (ползечки) струи, кој како што се гледа е на ист потенцијал со негативниот приклучок на инструментот. Низ испитуваниот дел од изолацијата тече струјата  $I_i$ , додека по нејзината површина поради нечистотиите на неа тече струјата  $I_s$ . Вкупната струја која што тече во испитното коло е  $I_\Sigma = I_i + I_s$ .



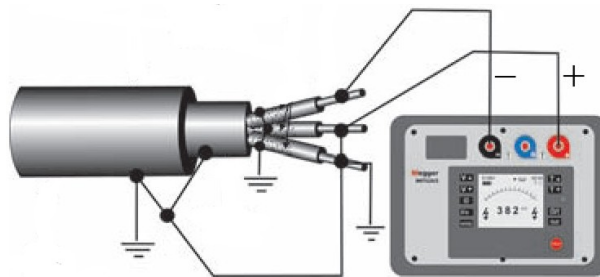
**Слика 10.17. Поврзување на приклучокот за прифаќање на површинските струи**

Во случајот под а) кога приклучокот  $G$  не се користи струјата што тече низ амперметарот е  $I_A = I_\Sigma > I_i$ , а бидејќи отпорот на изолацијата е всушност однос на напонот  $U$  и струјата  $I_A$  ќе добиеме отпорност  $U/I_A$  која што е помала од посакуваната вредност  $R_g = U/I_i$ . Всушност во овој случај сме измериле отпорност која што е паралелна врска од отпорноста на изолацијата  $R_g$  и површинската отпорност  $R_s$  низ која минува струјата  $I_s$ . Во некои случаи  $R_s$  е од ист ред на

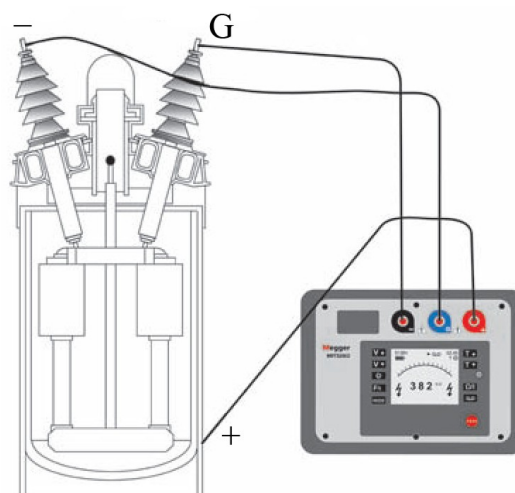
големина како  $R_g$ , па дури и помал, така што отпорноста што ќе ја измериме ќе биде далеку помала од вистинската вредноста  $R_g$ .

Во случајот под б) приклучокот  $G$  е поврзан на посебни метални екрани кои се поставени на површината на изолацијата така што тие ја прифаќаат површинската струја  $I_s$  и ја спроведуваат зад амперметарот така што низ него тече струја  $I_A = I_i$ . Во овој случај очигледно е дека односот  $U/I_A$  е еднаков на  $U/I_i = R_g$  што значи дека ќе ја измериме вистинската вредност на отпорноста на изолацијата. Ваквиот начин на мерење е препорачлив во случаи кога очекуваме да измериме многу големи отпорности на изолацијата кога дури и голема површинска отпорност  $R_s$  може значително да влијае на резултатите. Ако не сме сигурни дали треба да се направи мерење со користење на приклучокот  $G$  или без него, можеме да направиме две мерења (со и без приклучокот  $G$ ) и да ги споредиме резултатите.

Во продолжение се дадени неколку шеми за начин на поврзување на мегаомметар при мерење на отпорност на изолација на одредени видови високонапонска опрема.

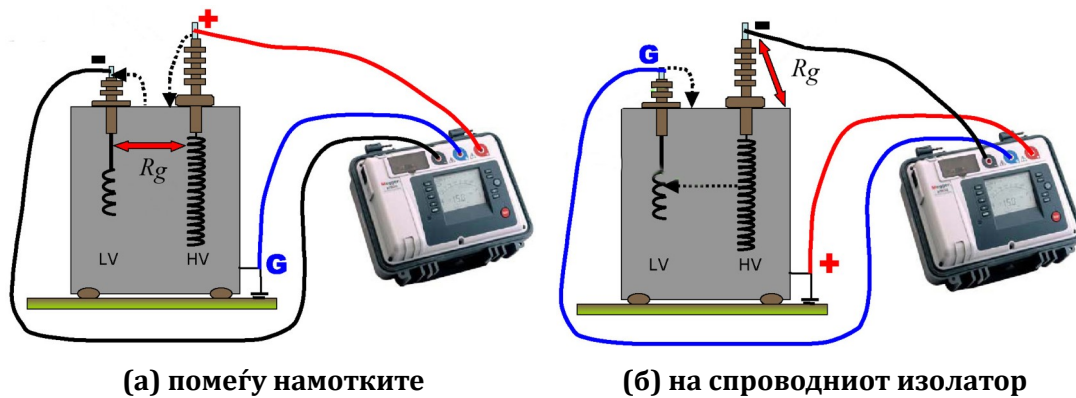


Слика 10.18. Мерење на отпорот на изолација на една фаза од трифазен кабел со метален плашт



Слика 10.19. Мерење на отпорот на изолација на спроводен изолатор кај прекинувач





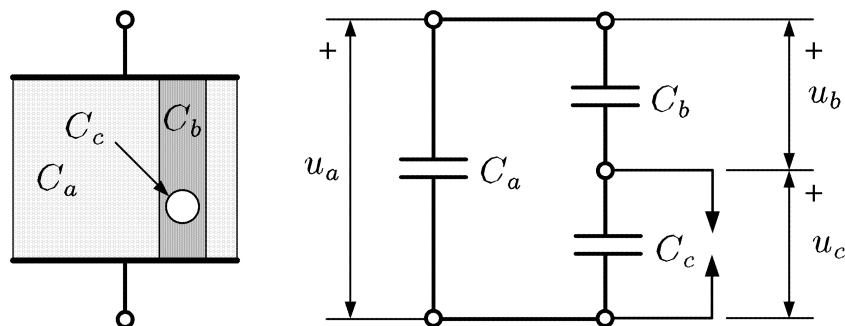
Слика 10.20. Мерење на отпорот на изолација на трансформатор  
(со испрекинати линии се означени патеките на ползечките струи)

### 10.1.5 Контрола според парцијалните празнења

Во поглавјето 2.3.3 (стр. 15) разгледавме неколку случаи на диелектрици со шуплини во нив и при тоа констатиравме дека електричното поле во нив е појако од полето во околниот диелектрик. Многу често полето во воздушните шуплини е толку јако што ќе предизвика искрење во нив кое е познато под името парцијални празнења кои не поминуваат од едната до другата електрода.

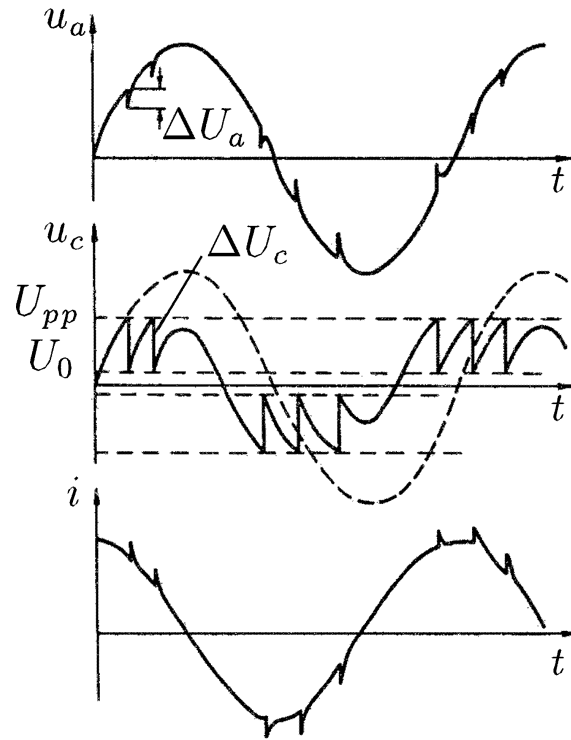
Иако оваа појава не претставува целосен пробив, сепак е многу штетна за изолацијата, особено онаа од органско потекло. Парцијалните празнења многу го забрзуваат стареењето на изолацијата и физичко-хемиски ја менуваат. Парцијалните празнења обично настануваат во мали шуплини останати во внатрешноста на изолацијата по нејзиното леење или импрегнирање, како и во разни примеси (нечистотии).

Појавата на парцијални празнења може упросто да се прикаже според шемата на сликата 10.21. Во изолацијата има гасна шуплина со капацитет  $C_c$ , додека капацитетот под и над неа е означен со  $C_b$ . Капацитетот на хомогената изолација лево и десно од шуплината е означен со  $C_a$ . Празнењето во гасната шуплина е моделирано со искриште кое е поврзано паралелно со капацитетот  $C_c$ .



Слика 10.21. Воздушна шуплина во изолацијата и нејзина еквивалентна шема

При поврзување на изолацијата на наизменичен напон во гасната шуплина јачината на електричното поле достигнува висока вредност дури и при напони доста помали од максималната вредност (слика 10.22). При напон еднаков на  $U_{pp}$  доаѓа до празнење во шуплината (т.е. пробив на искриштето од сликата 10.21) при што напонот скоро моментално (за  $10^{-7}$  секунди) паѓа до вредност  $U_0$  (слика 10.22).



Слика 10.22. Облици на напонот на изолацијата  $u_a$ , напонот во гасната шуплина  $u_x$  и струјата во изолацијата  $i$

Поради индуктивноста на врските помеѓу изолацијата и напојниот напон во првиот струјата останува непроменета поради што се прави прераспределба на полнежите меѓу капацитетите  $C_a$  и  $C_b$ . Во тој случај падот на напонот  $u_a$  е

$$\Delta U_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \Delta U_c \approx \frac{C_b}{C_a} \Delta U_c \quad (10.26)$$

каде што последниот приближен израз важи затоа што е  $C_a \gg C_b$ .

Празнењето во шуплината неутрализира полнеж  $q_c = C_c \Delta U_c$  којшто се нарекува активен полнеж.

Парцијалните празнење се во внатрешноста на изолацијата поради што не се достапни за директно мерење. Тие се манифестираат на изводите од објектот со капацитет  $C_a$  како краткотрајни импулсни падови на напон  $\Delta U_a$ . Преку падот на напонот и капацитетот на изолацијата, според стандардот IEC 60270, се дефинира поимот на привиден полнеж на парцијалното празнење

$$q_a = C_a \Delta U_a \quad (10.27)$$

т.е. се дефинира полнеж кој кога би се инјектирал во изолација со капацитет  $C_a$  ќе предизвика ист пад на напон  $\Delta U_a$  како и самото празнење на полнежот  $q_c$  во внатрешноста на изолацијата. Привидниот полнеж се изразува во pC.

Имајќи го предвид изразот (10.26) за привидниот полнеж можеме да напишеме

$$q_a = C_a \Delta U_a = C_a \frac{C_b}{C_a} \Delta U_c = C_b \Delta U_c = \frac{C_b}{C_c} q_c \quad (10.28)$$

Покрај привидниот полнеж со IEC 60270 е дефиниран бројот на импулси  $N$  во единица време  $T$  (најчесто 1 секунда), кој е дефиниран како број на парцијални празнења кај кои привидниот полнеж надминува одредена вредност.

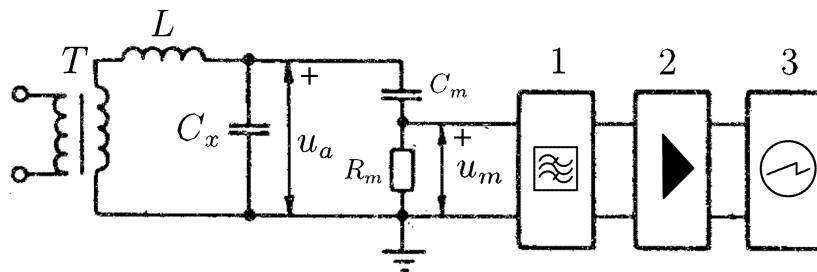
Од основните величини со кои се дефинираат парцијалните празнења може да се пресмета средната струја на парцијалните празнења

$$I_{pp} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n q_{x,i} N_i \quad (10.29)$$

која во случај празнења со еднаков привиден полнеж е

$$I_{pp} = \frac{Nq_x}{T} \quad (10.30)$$

Мерењето на парцијалните празнења најчесто се прави според шемата прикажана на сликата 10.23. Од испитниот трансформатор  $T$  високиот напон преку индуктивитетот  $L$  се носи до испитниот објект којшто има капацитет  $C_x$ . Мерната отпорност  $R_m$  преку кондензаторот  $C_m$  се поврзува паралелно со испитниот објект и во суштина се мери напонот на отпорникот  $R_m$ .



Слика 10.23. Шема за мерење на парцијални празнења

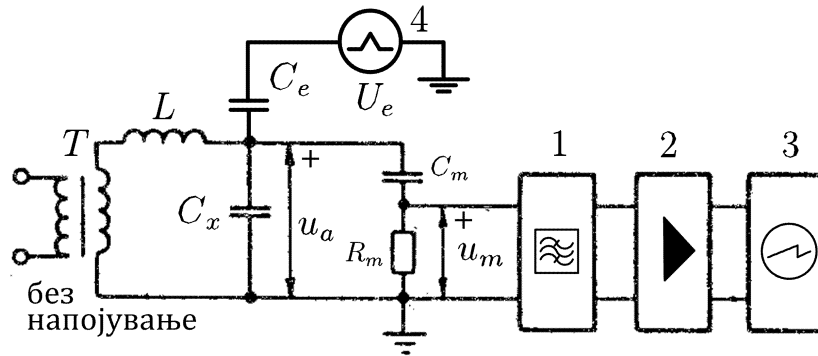
1) филтер, 2) засилувач, 3) осцилоскоп

При секое парцијално празнење се појавуваат струјни импулси со стрмно чело и кратко време на траење. Тие поминуваат низ контурата  $C_x - C_m - R_m$  така што на отпорникот  $R_m$  се појавува напон  $u_m$  кој се мери. Улогата на индуктивитетот  $L$  е да спречи течење на струјните импулси кон напојниот трансформатор, како и да спречи високофреквентни пречки кои би дошле од изворот на напојување.

За да се отстрани компонентата со фреквенција од 50 Hz од напонот  $u_m$  паралелно со отпорникот  $R_m$  е поврзан филтер кој ги пропушта само високите фреквенции од струјниот импулс генериран со парцијалното празнење. Овој напон има многу мала вредност ( $10^{-4} \div 10^{-6}$ ) и за да може да се измери прво се зголемува со засилувач со фактор на засилување од редот  $10^4 \div 10^6$ . За таа цел се употребуваат широкопојасни засилувачи (во поглед на фреквенцискиот опсег).

Од основно значење при мерењето на парцијалните празнења е воспоставување на врска помеѓу амплитудата на измерениот напон  $U_m$  и големината на привидниот полнеж на испитуваниот објект ( $q_a$ ). За таа цел, во согласност со ИЕС 60270 се врши калибрација на мерното коло според шемата дадена на сликата 10.24.

При калибрирањето испитното коло треба да е исклучено од изворот на висок напон, а главна улога игра импулсниот генератор (означен со 4) којшто генерира импулси со позната амплитуда  $U_e$  со форма која е блиска до формата на импулсите од парцијалните празнења. Импулсите од генераторот преку кондензатор со познат капацитет  $C_e$  се поврзуваат паралелно со изводите на испитуваниот објект ( $C_x$ ). Овие импулси предизвикуваат промена на електричниот полнеж на изводите на испитуваниот објект за вредност



Слика 10.24. Калибрација на шемата за мерење на парцијални празнења

1) филтер, 2) засилувач, 3) осцилоскоп, 4) импулсен генератор

$$q_e = \frac{C_e C_x}{C_e + C_x} U_e \quad (10.31)$$

во повеќето случаи е  $C_e \ll C_x$  така што важи  $q_e \approx C_e U_e$ .

Бидејќи  $C_e$  и  $U_e$  се познати, познат е и електричниот полнеж на калибрирање  $q_e$ . Потоа се забележува покажувањето на осцилоскопот предизвикано од  $q_e$ .

Откако колото е калибрирано, мерењето на непознатиот привиден полнеж  $q_a$  се прави според шемата од сликата 10.23. При тоа покажувањето на осцилоскопот се споредува со покажувањето од мерењето при калибрирањето и од односот на тие две величини може да се одреди колкав е односот  $q_a/q_e$ , т.е. може да се одреди  $q_a$ .

Квалитетот на измерените парцијални празнења зависи од чувствителноста на мерното коло. Таа е дефинирана според минималниот привиден полнеж што може да се измери без врз резултатот да имаат влијанија надворешните пречки. Обично се зема дека колото треба да е така направено за измерениот сигнал да биде најмалку два пати поголем од надворешните пречки.

При мерењето се вклучува изворот на висок напон и вредноста на напонот постепено се зголемува се додека не се појават првите импулси на екранот на осцилоскопот. Вредноста на тој напон се нарекува почетен напон на парцијални празнења  $U_{pp}^{(0)}$ . Понатаму напонот постепено се зголемува до  $3U_{pp}^{(0)}$ , а потоа се намалува се додека не исчезнат парцијалните празнења со што се одредува напонот на нивно гасење. Во текот на мерењето се одредува привидниот полнеж на парцијалните празнења и се црта зависноста  $q_a = f(U)$ . По потреба може да се одреди и струјата на парцијалните празнења  $I_{pp}$  според (10.29), односно (10.30).

Изгледот на еден современ инструмент за мерење на парцијалните празнења е прикажан на сликата 10.25. Тој е целосно дигитализиран (содржи персонален компјутер во себе) и процесот на мерење на парцијалните празнења го прави целосно автоматски, почнувајќи од управувањето со изворот на висок напон, калибрацијата и завршувајќи со генерирање на извештаи. За одбележување е што инструментите од оваа категорија покрај основните функции имаат и софтвер кој извршува специјални операции. На пример тие се во состојба со релативно голема точност да одредат во кој дел од одреден високонапонски кабел се јавуваат парцијални празнења. Тоа е важно за производителите на кабли, кои со таков инструмент ќе го детектираат оштетеното место во кабелот и на тоа место ќе отсечат дел од него и потоа ќе го продадат на парчиња. Претходно местото со парцијални празнења се одредувало така што кабелот се сечел на половинки и се

испитувало во која од двете половинки се наоѓа местото со парцијални празнења. На таков начин се губи доста време (многукратно сечење на кабелот на половинки), а и голем дел од кабелот се фрла така што останува помал дел на исправен кабел кој може да се испорача на корисниците.



**Слика 10.25. Мереен инструмент за мерење на парцијални празнења (Hipotronics DDX 7000)**

Во последно време, со цел да се откријат дефекти кај одредена високонапонска опрема (на пример кај надземни водови), се користат инструменти кои работат на принцип на радиоприемник. Во близината на изворот на парцијални празнења има засилени електромагнетни пречки предизвикани од нив кои приемникот ги детектира преку антена без никаков контакт со испитуваниот објект.

Освен електрични методи сè повеќе се користат и други ефекти кои се предизвикани од парцијалните празнења како што се: оптички ефекти (светкање), механички ефекти (звучен притисок), хемиски ефекти (разложени гасови во изолационата опрема) и топлински ефекти. За секо од нив постојат специјализирани инструменти со посебни сензори кои во некои случаи се и трајно монтирани во изолационата опрема што е посебно случај во постројките со изолација од гас под притисок или големи енергетски трансформатори во кои има вградено посебни сонди кои постојано го мерат нивото на парцијални празнења.

## 10.2 Испитување на изолацијата со зголемен напон

Основната идеја врз основа на која се проверува изолацијата со зголемен напон е сосема едноставна. На изолацијата се приложува испитен напон, кој е поголем од работниот. Ако изолацијата е со нормален квалитет, тогаш таа ќе го издржи испитувањето, а ако во неа е присутна некоја грешка, таа ќе пробие. Недостаток на овие испитувања е што изолацијата со грешка неповратно се разрушува.

### 10.2.1 Испитување со импулсен напон

Електричната цврстина на изолацијата во однос на атмосферските пренапони се проверува со приложување на полни и отсечени напонски импулси.

Полниот импулс треба да има траење на челото  $1,2 \pm 0,36 \mu s$  и траењето на импулсот  $50 \pm 10 \mu s$ . Испитувањата со отсечен импулс ги симулираат можните случаи на пробој на воздушните растојанија во близина на трансформатор за време на кои настанува слом на импулсниот напон. Преодните процеси кои притоа се јавуваат во намотките на трансформаторот се проследени со опасни пренапони за подолжната изолација.

Испитувањата со отсечени импулси се спроведуваат така што полниот стандарден импулс на напонот, кој е генериран од импулсен генератор, се отсекува со помош на искриште кое е поврзано паралелно со испитуваниот објект. Отсекувањето на импулсот се прави при време од  $2 - 3 \mu s$ .

### 10.2.2 Испитување со наизменичен напон

Способноста на изолацијата да ги издржи внатрешните пренапони се проверува со краткотрајно приложување на испитен напон со индустриска фреквенција. Утврдено е дека за многу видови изолација овој вид на испитување е многу поопасно од дејството на поголем број пренапони кои се јавуваат во реални услови. Затоа денес се наметнува тенденција да се премине од испитување со 50 Hz на испитување со импулси кои се еквивалентни на внатрешните пренапони.

Вредностите на испитните напони со индустриска фреквенција и методите на испитувањата се дефинирани во стандардот IEC-60071-1 и соодветните стандарди за секој вид опрема. Изборот на величината на испитниот напон зависи не само од техничките туку и од економските фактори. Колку е поголем напонот толку е поефикасно испитувањето и на тој начин се открива поголем број на слаби места. Меѓутоа, зголемувањето на напонот повлекува и зголемување на веројатноста за пробој на исправната изолација. До кое ниво на напонот е целисходно да се проверува доверливоста на изолацијата, зависи од начинот на експлоатација, величината на очекуваните пренапони, состојбата на изолацијата, можноста да се изврши капитален ремонт, неговата цена итн.

Испитувањето најчесто трае една минута, што е доволно време за следење на опитот. Во некои случаи стандардите дозволуваат испитувањата да траат и подолго време.

Испитувањата со наизменичен напон се користат како приемни испитувања за сите видови високонапонска опрема. Контролата на изолацијата со зголемен напон во услови на експлоатација се спроведува за секоја опрема (вртливи машини, енергетски кабли) со номинален напон до 35 kV. За опремата од повисоки напонски нивоа таквата контрола е отежната, бидејќи изворите на испитниот напон се гломазни и тешки за транспортирање.

### 10.2.3 Испитување со еднонасочен напон

За профилатички испитувања се користи и еднонасочен напон кој има низа предности пред наизменичниот:

- нема опасност од појава на моќни пращијални празнења, затоа испитниот напон може да биде зголемен за полесно утврдување на грешките;

- за време на испитувањата може да се измери струјата на одведување и со тоа може да се добие дополнителна информација;
- поефикасно се испитува изолацијата на челните делови од статорската намотка на големите машини бидејќи распределба на напонот по површината на изолацијата во овој дел е порамномерна во однос на оној предизвикан од капацитивната струја;
- за испитување со еднонасочен напон може да се користат компактни испитни постројки со релативно мала моќност затоа што има мали струи на одведување. Кај наизменичниот напон потребна е значителна реактивна моќност поради големите капацитивни струи низ испитуваната изолација.

Недостаток на еднонасочниот испитен напон е што тој се распределува по изолацијата зависно од специфичните отпорности, а не од диелектричните константи на изолационите материјали, како што е тоа при работен напон или пренапони. Поради тоа јачината на електричното поле при испитувањата со еднонасочен напон не е еднаква со јачината на електричното поле кое се појавува во текот на работа на испитуваниот уред при наизменичен напон. Во случаи кога се користи хомогена изолација распределбата на напонот е иста како и при наизменичниот напон. Во други случаи распределбата на напонот не е битна, како на пример во изолацијата на стаповите на намотката на генераторите каде што електричната цврстина зависи од лискунот, а поради поголемата специфична отпорност на лискунот на него отпаѓа поголемиот дел од напонот.

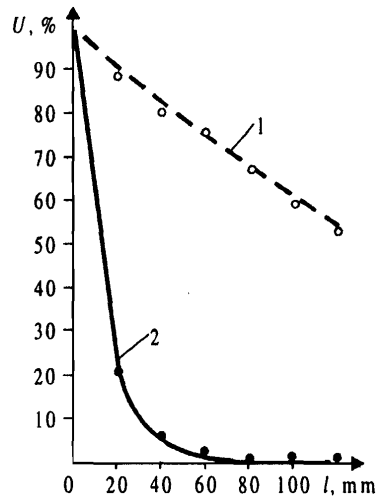
Големината на испитниот еднонасочен напон не е прецизно дефинирана затоа што прободот при еднонасочен или наизменичен напон настанува при различни вредности кои зависат од особеностите на уредот кој се испитува. Односот на големината на еднонасочниот кон наизменичниот напон за цврстите и течните диелектрици е во граници од 1,4 до 5. Со влошување на особините на изолацијата односот се намалува, а како ориентациона вредност може да се усвои вредноста 2,2.

Од посебен интерес е испитувањето со еднонасочен напон на изолациониот систем на статорите на големите машини. Ако сметаме дека распределбата на напонот  $U_x$  по должината на еден стап од секција на намотка на голема машина е идентична со распределбата на напон по должината на еден долг вод тогаш можеме да сметаме дека напонот се менува според изразот

$$U_x = U_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

каде што  $U_0$  е напон на почеток на стапот;  $\alpha = \sqrt{r/R}$  за еднонасочен напон;  $\alpha = \sqrt{r/(2X_c)}$  за наизменичен напон;  $r$  е површинска отпорност на изолацијата на единица должина од стапот;  $R$  е отпорност на изолацијата на единица должина од стапот;  $X_c$  е капацитивна отпорност на изолацијата на единица должина од стапот при дадена фреквенција.

На сликата 10.26 е прикажана распределбата на напонот вдоль еден стап. Како што се гледа веќе на растојание 30 mm од излезот на каналот, во случај на напон со индустриска фреквенција, вредноста на напонот опаѓа под 10% од испитниот напон. Таков напон може да не биде доволен за да се пробие слабо место во изолацијата. При еднонасочен напон, напонот во таа точка изнесува скоро 90% од испитниот напон.



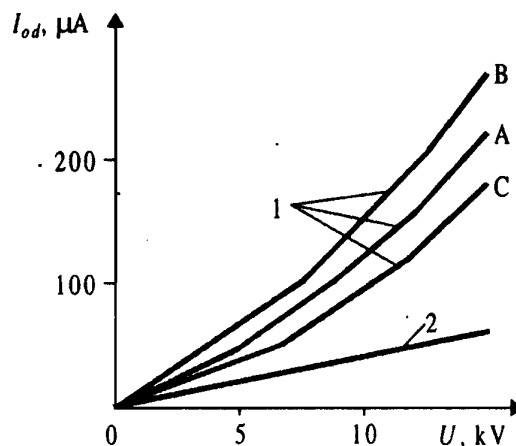
Слика 10.26. Распределба на напонот по должината на генераторски стап

1) со еднонасочен напон, 2) со напон со фреквенција од 50 Hz при  $R = 400r$  и  $X_c \approx r$

### 10.2.4 Крива на струјата на одведување

Наглиот пораст на струите на одведување на една од фазите во споредба со вредностите, добиени за време на претходните мерења сведочи за постоење на некоја грешка.

Добар дел од кривата на струјата на одведување, која што ја дава нејзината зависност од напонот  $i_{od} = f(u)$  е праволиниска или малку искривена (слика 10.27). Ако струјата на одведување почнува да расте изразито непропорционално во однос на приложениот напон, тоа обично значи дека има грешки или навлажнување на изолацијата. Во низа случаи таков непропорционален пораст на струите на одведување се согледува само на последните точки од кривата, односно при напони  $(2 \div 5)U_n$ .



Слика 10.27. Зависност  $i_{od} = f(u)$  за еден синхрон компензатор

1) По монтажа на компензаторот, 2) По една година на работа

Зависноста  $i_{od} = f(u)$  во двата случаи има различен карактер. Кога струјата минува низ некој цврст диелектрик, каков што е лискулот, се воочува нејзин нелинеарен пораст со порастот на напонот. Меѓутоа таа нелинеарност не е многу голема и спроводливоста на изолацијата до нејзиниот пробој расте не повеќе од



десет пати.

Ако струјата тече по површината од изолацијата, на пример при трајна грешка на челните делови од намотката, зависноста на спроводливоста од приложениот напон ќе зависи од процесите во слојот од воздух, на површината од изолацијата. Зависноста  $i_{od} = f(u)$  добива карактеристичен превој, кој е определен со почетокот на ударната јонизација, после кој почнува изразено непропорционален пораст на струјата од напонот.

### 10.2.5 Влажност на изолацијата на генераторите

Ако изолацијата е силно навлажнета, тогаш на кривата  $i_{od} = f(u)$  нема превојни точки, и при некој напон, на челните врски се јавува чад поради тлеење на делови од изолацијата. Ако навлажнувањето е од привремен карактер, во кривата  $i_{od} = f(u)$  се забележува превојна точка, после која во некои случаи почнува тлеење на изолацијата.

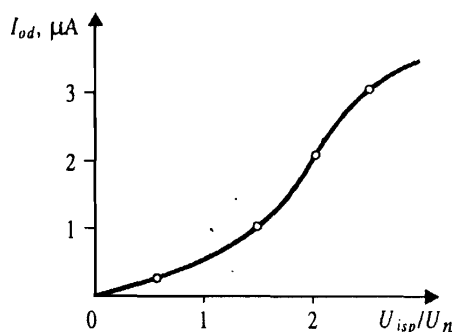
Ако изолацијата не е навлажнета и нема грешки, тогаш струите на одведување се пропорционални на напонот (во дијапазон на нормалните испитни напони). Нелинеарноста на кривата  $i_{od} = f(u)$  при навлажнета изолација може да се објасни со јонизацијата на воздухот во процепите кои се наоѓаат на патот на одведување на струјата.

Прашањето за сушење на генераторите се решава поаѓајќи од степенот на нелинеарност на кривата  $i_{od} = f(u)$ . Критериум за навлажнување претставува коефициентот на нелинеарност како однос на отпорностите на изолацијата при напон близок до  $0,5 \cdot U_n$  и при нормиран испитен напон, односно

$$K_u = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \cdot \frac{U_{\min}}{U_{\max}},$$

каде што  $U_{\max}, I_{\max}$  се полн испитен напон и струја на одведување при тој напон, додека  $U_{\min}, I_{\min}$  се напон и струја при првиот степен и струја на одведување при тој напон (близок до  $0,5 \cdot U_n$ ).

Ако изолацијата е силно навлажнета, тогаш коефициентот на нелинеарност е близок на единица и при испитување со еднонасочен напон таа почнува да тлее. Од тие причини се утврдени граничните вредности на струите на одведување над кои не се препорачува да се продолжи со испитувањето (слика 10.28). Граничните вредности на струите на одведување, утврдени за првите степени на напонот (до  $1,5 \cdot U_n$ ), сами по себе се уште се неопасни, меѓутоа укажуваат на можноста струјата на одведување да расте до опасни вредности во случај на понатамошен пораст на напонот.



Слика 10.28. Гранични вредности на струите на одведување

# 11

## НЕДЕСТРУКТИВНИ НЕЕЛЕКТРИЧНИ МЕТОДИ ЗА КОНТРОЛА НА ИЗОЛАЦИЈАТА

Меѓу многуте можни неелектрични методи за контрола (акустични, оптички, хемиски и други) денес се најефикасни и најширока примена имаат методите за контрола на изолацијата на опремата наполнета со масло, а кои се базираат врз анализа на пробите на маслото. Тие методи се применливи за многу видови опрема: енергетски и мерни трансформатори, шантирачки реактори, спроводни изолатори, кабли наполнети со масло за различни класи на напон. Најбитната особина на овие методи е во тоа што нема потреба да се исклучи од работа испитуваната опрема.

### 11.1 Физичко-хемиска анализа на маслото

За откривање на доволно груби грешки на изолацијата пробите на масло се подложуваат на проста физичко-хемиска анализа, при која се вршат мерења главно на:

- диелектричната цврстина (kV/cm);
- специфичната електрична отпорност при 90°C ( $\Omega\text{m}$ );
- факторот на диелектричните загуби при 90°C;
- неутрализациониот број (mgKOH/g);
- површински напон (N/m);
- талог во маслото и др.

Врз основа на резултатите од мерењата на горните величини маслото со сврстува во четири групи. Секоја од нив има посебна оценка од добра состојба до неупотреблива состојба.

### 11.2 Анализа на гасовите кои се содржат во маслото

Најсовершена контрола претставува контролата на составот и концентрацијата на гасовите, кои се растворени во маслото. Во тој случај од испитуваниот трансформатор се земаат два-три примероци на масло со содржина околу 10 ml. Потоа анализата на гасовите на примероците се врши во лабораториски услови со методот на гасната хроматографија со која што се определуваат концентрациите на следните гасови: водород  $\text{H}_2$ , метан  $\text{CH}_4$ , етилен  $\text{C}_2\text{H}_4$ , етан  $\text{C}_2\text{H}_6$ , ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ , јаглерод-моноксид  $\text{CO}$  и јаглерод-диоксид  $\text{CO}_2$ .

Утврдено е дека според составот и концентрацијата на гасовите растворени во маслото, може со доволна доверливост да се суди за карактерот на грешката, а според динамиката на промената на концентрацијата за степенот на опасност на таа грешка. Критериумите во вид на односи на концентрацијата на гасовите и нивните вредности, се карактеристични за електричните и термичките грешки на изолацијата на енергетските трансформатори.

Грешките во трансформаторите може да се класифицираат во повеќе видови. Во продолжение за секој вид е даден составот на гасови кои се појавуваат во трансформаторското масло.

1. Лак во маслото без учество на цврсти изолациони материјали.
  - водород:  $60 \div 80\%$ ,
  - ацетилен:  $10 \div 25\%$ ,
  - метан:  $1, 5 \div 3, 5\%$ ,
  - етилен:  $1 \div 2\%$ ,
  - остатокот се состои од воздух,
  - отсуството на значајни количества на јаглерод-диоксид и јаглерод-моноксид.
2. Искрични празнења во маслобариерната изолација.
  - големо количество водород, ацетилен, метан (нешто повеќе од случајот 1),
  - оксиди на јаглерод  $15 \div 25\%$ .
3. Слаби парцијални празнења во маслобариерната изолација.
  - поради пониската температурата се формира во основа водород со додатоци на метан, јаглеродни оксиди и јаглерод-диоксид,
  - отсуствува ацетилен.
4. Термичкото разложување на маслото, кое започнува при температура поголема од  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
  - се формираат нискомолекуларни јаглеводороди, етан, етилен и водород,
  - при температура поголема од  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  гасот се состои главно од метан и водород (во присуство на воздух се формира и јаглерод-диоксид).
5. Термичко разложување на маслобариерна изолација.
  - при температура повисока од  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  се формира во основа јаглерод-диоксид (во помала количина јаглерод-моноксид и водород).

Во сите случаи, особено при грешка која брзо се развива, гасовите кои слабо се раствораат во маслото (водород, јаглерод-моноксид), се откриваат во просторот над површината од маслото (на пример во гасното реле), а гасовите кои имаат особина подобро да се раствораат (јаглерод-диоксид, метан, ацетилен) се откриваат во маслото.

Во случај да се појават грешки со трајно, но слабо ослободување на гасови може да се направат следните заклучоци во однос на гасот, растворен во маслото. Релативното поголемо количество на заситени јагленоводороди (но не и ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ ) во комбинација со незначително количество водород укажуваат на топлоотно разлагање на маслото како резултат на прегревање на металните делови. Постоењето на  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  сведочи за разложувањето на целулозата на цврстата изолација. Притоа обично се намалува содржината на кислород и азот.

Ако составот на гасот е ист со претходно кажаното, но има поголема содржина  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$ , тоа укажува на силно локално прегревање пратено со термичко разложување на маслото.

Ако количеството на  $\text{CO}_2$  е  $10 \div 20$  пати поголемо од количеството на  $\text{CO}$ , а не се присутни други гасови на разлагањето, тогаш настанува термичко разложување на целулозата. При високи температури е присутно и некое количество на водород.

Појавата на  $\text{H}_2$  и релативно мали количества на  $\text{C}_2\text{H}_4$  и  $\text{CO}_2$  е карактеристично за парцијални празнења. Во случај на слабо искрење се открива мало количество на  $\text{C}_2\text{H}_2$ .

Посебен квалитет на овој метод е високата чувствителност бидејќи се откриваат гасови со релативна волуменска концентрација поголема од  $10^{-4}$ . Благодареејќи на тоа грешките можат да бидат откриени во најраните стадиуми.

Сложеноста на контролата според анализата на гасовите растворени во маслото е условена со поголем број фактори, кои влијаат врз концентрацијата и составот на гасовите.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] F.A.M. Rizk и G.N. Trinh. *High Voltage Engineering*. CRC Press, Boca Raton, 2014.
- [2] Р. Ачковски. *Надземни и кабелски водови: предавања*. ФЕИТ, Скопје, 2012.
- [3] J.P. Holtzhausen и W Vosloo. *High Voltage Engineering - Practice and Theory*. Faculty of Engineering at Stellenbosch University, Johannesburg, 2010.
- [4] А. С. Серебряков. *Материаловедение. Электроизоляционные материалы*. РОАТ, Москва, 2009.
- [5] В. Ф. Важов и В. А. Лавринович. *Техника высоких напряжений: курс лекций*. Издательство Томский политехнический университет, Томск, 2008.
- [6] Н. Ацевски. *Електротехнички материјали*. ТФ-Битола, Битола, 2006.
- [7] В. Г. Басманов. *Изоляция и перенапряжение*. Вятский государственный университет, Кафедра электроснабжения, Киров, 2006.
- [8] В. П. Закарюкин. *Техника высоких напряжений: Конспект лекций для студентов специальности Электроснабжение железнодорожного транспорта*. Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, 2005.
- [9] I. Uglešić. *Tehnika visokog napona*. FER, Zagreb, 2002.
- [10] Р. Миновски и В. Јанков. *Методи за испитување на изолацијата*. ЕТФ, Скопје, 2002.
- [11] J. R. Lucas. *High Voltage Engineering*. Department of Electrical Engineering, University of Moratuwa, Sri Lanka, 2001.
- [12] E. Kuffel, W.S. Zaengl, и J. Kuffel. *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Newnes, Elsevier, Oxford, 2000.
- [13] Љ. Николоски. *Лабораториски практикум по техниката на висок напон*. ЕТФ, Скопје, 2000.
- [14] M.S. Naidu и Kamaraju V. *High Voltage Engineering*. McGraw-Hill, New York, 1996.
- [15] М. Георгиев, Н. Кандев, П. Наков, и Б. Миндов. *Ръководство по техника на високите напрежения*. Техника, София, 1992.
- [16] В. Н. Бородулин, А. С. Воробьев, С. Я. Попов, И. П. Спирихин, В. А. Филиков, и В. П. Чепарин. *Конструкционные и электротехнические материалы*. Высшая школа, Москва, 1990.

- [17] Р. Миновски. *Техника на висок напон*. ЕТФ, Скопје, 1982.
- [18] К. Ф. Степанчук и Н. А. Тиняков. *Техника высоких напряжений*. Высшейшая школа, Минск, 1982.
- [19] V. Vego. *Mjerenja u elektrotehnici*. Tehnička knjiga, Zagreb, 1979.
- [20] Н. Požar. *Visokonaponska rasklopna postrojenja*. Tehnička knjiga, Zagreb, 1978.
- [21] М. А. Аронов, В. В. Базуткин, П. В. Борисоглебский, Г. М. Гончаренко, Л. Ф. Дмоховская, Е. М. Жаков, Е. С. Колечицкий, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь, Д. В. Разевиг, Е. Я. Рябкова, и Ю. Г. Сергеев. *Лабораторные работы по технике высоких напряжений*. Энергия, Москва, 1974.
- [22] Л. М. Пиотровски. *Електричне машине*. Техничка књига, Загреб, 1974.
- [23] L. Lazarević. *Elektrane i razvodna postrojenja*. Tehnička knjiga, Beograd, 1972.
- [24] J. Surutka. *Elektromagnetika*. Građevinska knjiga, Beograd, 1966.