

## МОНИТОРИНГ, ДИЈАГНОСТИКА И ОДРЖУВАЊЕ НА ТРАНСФОРМАТОРИТЕ И МЕРНИТЕ ТРАНСФОРМАТОРИ СО АКЦЕНТ НА ИЗОЛАЦИЈАТА (компилација од литература)

Овде се изнесуваат методите кои се применуваат за мониторинг и дијагностицирање на состојбата на елементите на постројките со цел детектирање на дефектите во рана фаза на нивниот развој и одржување на посакуваното ниво на расположливост.

### 1.1 МЕТОДИ НА МОНИТОРИНГ И ДИЈАГНОСТИЦИРАЊЕ НА ЕНЕРГЕТСКИТЕ ТРАНСФОРМАТОРИ

#### 1.1.1 Општо

Цврстината на енергетските трансформатори, во механички и диелектричен поглед, опаѓа со тек на времето поради разни процеси ( *нормално стареење*). Под влијание на разни причини ( големо преоптоварување, присуство на влага, механички оштетувања на виталните делови и сл. ) или некои абнормални процеси ова опаѓање може да се одвива со поголем интензитет.

Пожелно е, но не и секогаш возможно, да се направи разлика помеѓу реверзибилните процеси, кои се означуваат како *дефекти*, и иреверзибилните, кои се означуваат како *неправилности* и *пореметувања*. Во идеални околности, сите дефекти и неисправности (пореметувања) можат да се детектираат со уреди за мониторинг и дијагностицирање. Под мониторинг се подразбира следење на параметрите важни за правилно функционирање на елементите. Дијагностицирање значи споредување на вредностите на измерените параметри со референтни вредности и донесување заклучок за видот, на евентуално настанатото пореметување.

Доминантните напрегања на кои во текот на експлоатацијата се изложени енергетските трансформатори, како и останатите елементи во постројката, се оние кои се јавуваат при атмосферско празнење и кратки споеви. Поради пробабилистичката природа на овие случувања, сосема е извесно дека не може да се предвиди кога ќе се случи дефект. Меѓутоа, ако цврстината и издржливоста на трансформаторот и погонското напрегање можат да бидат адекватно одредени, можно е да се утврди кога околностите ќе бидат такви да дефектот може да се случи.

Со оглед на тоа дека не е многу практично да се врши квантитативно одредување на издржливоста на енергетските трансформатори и погонски напрегања, се врши квалитативна проценка на исправноста на опремата, која се означува како *состојба*, и служи за процена на веродостојност на показателите на дадениот трансформатор. Во таа смисла, дефинирани се неколку состојби во кои може да се наоѓа опремата на трансформаторските станици :

Состојба на опремата	Дефиниција
Нормално	Нема видливи проблеми. Нема потреба за преземање на дополнителни мерки.
Дефектно	Нема значајни влијанија на краткорочната сигурност, но погонот може да биде загрозен во долгорочен поглед

Пореметено	Елементот може да работи, но сигурноста е сериозно смалена. Состојбата може да се отстрани со преземање на мерки од помал или поголем обем.
Дефект	Елементот не е во работна состојба. Потребна е поправка или замена.

Основна цел на примената на уредите за надзор или дијагностицирање е зголемување на нивото на расположливост на постројките со минимални трошоци. Искуството на големиот број корисници е следно:

-следењето на сите функционално важни параметри кое овозможува утврдување на неправилностите или грешки во функционирањето на елементите,

-брзо откривање на промените на функционалните параметри овозможува предвидување на дефектите и нивно прекинување во рана фаза, со што се смалува степенот на оштетување а со тоа и трошоците за отстранување на дефектот,

-врз основа на собраните податоци може да се утврди најповолниот термин за извршување ревизија на поодделни елементи. Употребата на уреди за надзор овозможува да елементот биде во погон се додека не се појават знаци на пореметување во неговото функционирање, со што се смалуваат трошоците на експлоатација со одложување на претходно планираните ревизии

-утврдување на исправноста на монтажата на постројките пред првото пуштање во погон или по отклонување на дефектот овозможува избегнување “детски болести” а со тоа и експлоатација без поголеми пореметувања

Техниките која се применуваат за надзор на работата на енергетските трансформатори се:

1. Мерење на температура на најтоплата точка
2. Анализа на растворените гасови во масло ( *dissolved gas analysis- DGA*) (*гасна хроматографија*)
3. Детекција на парцијални празнења ( PD-detection)
4. Надзор на проводни изолатори
5. Анализа на фурански компоненти
6. Мерење на ниво на влага во маслото
7. Снимање на функции на пренос
8. Дијагностицирање изолација со мерење струјна релаксација
9. Мерење акустична емисија или вибрација во текот на работењето на регулаторот на напон
10. Мерење контактен отпор и утврдување изеденост на контактите
11. Мерење момент на моторот на регулаторот на напон

Во следните излагања ќе бидат објаснети најважните карактеристики на методите кои се применуваат за мониторинг и дијагностицирање на пореметувањата во котелот на енергетскиот трансформатор, со оглед на тоа дека тоа е најскапиот дел на постројката и дека отстранување на дефектот во него е со најдолго времетраење.

### 1.1.2 Мерење температура на најтоплата точка

Термичките услови во внатрешноста на трансформаторот се главен причинител за деградационите процеси на хартиената изолација. Забрзаното термичко стареење е предизвикано од постојаното или повремениот преоптоварување, кое за последица има општо или локално прегревање на трансформаторот.

До тоа може да дојде и во услови на пониско оптеретување, ако системот за ладење не работи како што треба. Со оглед на тежнењето на електростопански компании за подобро да се искористат инсталационите капацитети, неопходно е прецизно следење на температурите, од колку што беше до сега пракса, за да се избегнат критичните погонски услови.

Еден од начините за контрола на температурните услови во трансформаторот е употреба на термовизиска камера. Овој начин не се покажа особено прецизен, поради што голем број на корисници во Европа во своите постројки применуваат фибер-оптички сензори. На овие сензори може да се врши мониторинг за мерење на температурата во одделни точки или мерење на температурата по целата должина на намотката. Точноста на двата начини на мерење е  $\pm 1\text{ K}$ . Од искуствата од Белгија, овие сензори се инсталирани на двете страни од енергетските трансформатори 70/15 kV/kV. По иницијалните проблеми со монтажата никакви проблеми не се воочени во текот на петогодишната експалтација. Наспроти тоа, забележани се бројни проблеми со електронската мерна опрема.

Температурата на најтоплата точка,  $\vartheta_H$ , може да пресмета преку изразот:

$$\vartheta_H = \vartheta_{0, \text{top}} + k \left( \frac{I}{I_n} \right)^y \cdot g_r \quad (1.1.1)$$

Каде :

$\vartheta_{0, \text{top}}$  - температура на маслото на врвот ;

k- “ hot spot” фактор ( има вредност k= 1,3);

I – струја на оптоварување;

$I_n$  - номинална струја ;

y – експонент на намотките од ИЕС : y = 1,6 , а од мерењата кои се извршени во разни лабаратории во Европа: y = 1,37  $\approx$  2.

$g_r$  - е градиент на температурата долж намотката. Овој податок се добива во текот на типските испитувања на трансформаторите во фабриката.

Стандардот ИЕС -354, *Упатство за оптеретување на трансформаторите со масло*, се базира на Монтсингеровото правило според кое трајното зголемување на температурата од  $60^\circ\text{C}$  над номиналната вредност го скратува очекуваниот век на експлатација за 50%. Ова правило важи во опсег  $(80 + 140)^\circ\text{C}$ . За енергетските трансформатори се дозволува да температурата на најтоплата точка изнесува  $98^\circ\text{C}$ .

За енергетските трансформатори со номинална моќност до 100 MVA релативниот интензитет на термичко стареење V може да се пресмета со користење на изразот:

$$V = 2^{\frac{\vartheta_H - 98^\circ\text{C}}{6^\circ\text{C}}} \quad (1.1.2)$$

### 1.1.3 Анализа на растворените гасови во маслото ( DGA-анализа)

Термичките и електрични пореметувања во опремата исполнета со масло доведуваат до разградување на маслото и /или изолационите материјали. Во текот на разградувањето, се создаваат гасови кои се раствораат во маслото. Со примената на DGA–техника на примерок од маслото, растворените гасови можат да се детектираат и квантификуваат. Концентрацијата и меѓусебната поврзаност на поедини гасови овозможуваат да се утврди дали е дојдено до пореметување и ако е, од кој тип е. Во стандардната процедура со DGA-анализа се утврдува присуство и концентрација на следните гасови: водород ( $\text{H}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), етан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), етилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), јаглен моноксид (CO), јаглен диоксид ( $\text{CO}_2$ ), и кислород ( $\text{O}_2$ ). Некои лаборатории, освен погоре наведените гасови, во истиот примерок на масло утврдуваат и присуство на пропилен, пропан и пропин.

Податоците од растворените гасови, сами за себе не претставуваат секогаш доволна информација за проценка на состојбата на трансформаторот. Познавањето на претходното погонско однесување на трансформаторот, во смисла на спроведените активности на одржувањето, на настанатите дефекти и условите на амбиентот во кои е инсталиран трансформаторот, е клучен податок за точната проценка. Критериумите на кои се заснова DGA-анализа се базираат на искуство во отстранувањето на дефектите на трансформаторите отстранувањето на пореметувањата во почетната фаза, со лабораториски симулации и статистички истражувања. Поради точна интерпретација на резултатите на DGA - анализата неопходна е примена на неколку методи.

Граничните вредности на концентрација на поодделните гасови мораат да бидат утврдени за секој тип на трансформатор. За концентрација на гасовите под одредено ниво веројатноста на дефектот е мала. Елементот тогаш се смета за исправен иако настанувањето на дефектот не може во потполност да се исклучи.

Дефектите во енергетските трансформатори можат да се поделат во 2 категории: моментални дефекти, кои се развиваат за многу кратко време и не можат да се детектираат со DGA - анализата и дефекти кои се развиваат во тек на одреден временски период, и во принцип, можат да се детектираат со DGA-анализа.

За интерпретација на резултатите од DGA - анализата се користат:

- Метода IEC 60599
- Метода IEEE
- Метода на утврдување на односот на важните гасови

#### 1.1.3.1 Метода IEC 60599

Оваа метода е развиена за енергетски трансформатори чии намотки се од бакарни проводници, изолирани со целиулозна хартија или цврста изолација и се наполнети со јаглеродоводородни минерални масла. Во принцип оваа метода е применлива и на мерни трансформатори, маслени кабли и други елементи, но нема доволно искуство за дефинирање на критериумите за интерпретација на резултатите од овие анализи.

Методата се базира на утврдување на концентрацијата на 5 гасови и пресметката на трите односи и тоа:

$$\frac{CH_4}{H_2}, \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6}, \quad \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$$

Пред спроведување на било која дијагностичка процедура неопходно е да се утврдат концентрациите на присутни гасови над нивото кое може да се смета за значајно. Осетливоста на аналитичните постапки е исто така многу важна.

Главниот недостаток на оваа метода е тоа што овие резултати можат да бидат двосмислени во случај да е дојдено до истовремен развој на неколку пореметувања. Предност на оваа метода во однос на останатите е во тоа што односот на концентрацијата на гасовите не зависи од волуменот на маслото и изборот на единицата за мерење на концентрацијата.

#### 1.1.3.2 Метода IEEE

Се разгледуваат 3 типа на пореметување: термички, електрични пореметувања со мала енергија, електрични пореметувања со голема енергија. Исто така, се земаат во предвид вкупната содржина на запаливи гасови, односот на концентрација и граничните вредности на концентрација на одделни гасови за 4 различни состојби. Односите кои се користат се исти како и во IEC 60599. Критериумите за карактеристичните нивоа на концентрација на растворените гасови можат да се применат без познавање на однесувањето на трансформаторот во претходниот период од експлоатација. Состојбата на

трансформаторот се одредува врз основа на највисокото ниво на концентрација на одделните гасови или вкупната содржина на запаливите гасови, при што второто служи за одредување на мерките кои ќе бидат превземени. За прецизно утврдување на типовите на настанатите пореметувања како дополнителна, се применува *Метода на утврдување на односот на важните гасови*, а како референтна се користи *Дорненберг* – овата метода. Методата за односот на важните гасови овозможува создавање основа за квантитативно одредување на типовите на пореметувања на основа на присуство на гасови кои се типични на различни температури. Промената на концентрацијата на гасовите е во функција од времето. Критериумите кои се применуваат за интерпретација на резултатите од DGA - анализата за утврдување на типот на настанатото пореметување, според IEEE Guide наведени се во табелата 1.1.1.

Овде е важно да се нагласи дека врз основа на искуствата, присуството и количината на одделни гасови често не зависат само од типот, локациите на пореметувањата и температурите, туку и од начинот на конзервација на маслата и применетиот циркулационен систем, растворливоста и степенот на заситување на гасови, а некогаш дури и од начинот на производство на трансформаторите.

### 1.1.3.3 Метода на утврдување на односите на важните гасови

Оваа метода го доведува во врска секој гас поединечно со можното пореметување на пр., водород може да се створи преку 2 механизма. Создавање на водородот на ниска температура е поврзано со настанувањето на корона или парцијално празнење. На повисоки температури до негово создавање доаѓа поради разградување на маслата. Извршените експериментални и теоретски истражувања создаваат основа за воспоставување корелација на создавања и концентрација на важните гасови со типот на пореметувањето. На пр. Создавањето на ацетиленот е поврзано со процесите кои се пратени со ослободување на голема енергија а појавата на јаглеродоводородот заедно со водородот е во врска со пиролиза (разградување под влијание на температурата).

Ниедно пореметување нема за последица создавање на само еден производ. Меѓутоа, комбинацијата на гасови кои се создаваат е единствена за секој тип на пореметување. При појава на лакот се развиваат сите важни гасови, а при појава на пиролиза - сите освен ацетиленот.

Табела 1.1.1 Критериуми за интерпретација на резултатите од DGA –анализата според IEEE Guide

Состојба на трансформаторот	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Нема пореметувања	< 0,1	0,1 ÷ 1,0	<0,1
Тешки пореметувања < 150° C	< 0,1	0,1 ÷ 1,0	0,1 + 3,0
Тешки пореметувања 150 + 300° C	< 0,1	>1,0	<1,0
Термички пореметувања 300 + 700° C	< 0,1	>1,0	0,1 + 3,0
Термички пореметувања > 700° C	< 0,1	>1,0	>3,0
Парцијално празнење Со мала енергија	< 0,1	<0,1	<1,0
Парцијално празнење Со голема енергија	0,1 + 3,0	<0,1	<1,0
Празнење со мала енергија	>0,1	0,1 ÷ 1,0	>1,0

Празнење со голема енергија	0,1 + 3,0	0,1 ÷ 1,0	>3,0
-----------------------------	-----------	-----------	------

#### 1.1.3.4 Останати методи на DGA анализа

##### Роџерсова метода

Оваа метода се базира на термодинамичко предвидување на производот кој се добива од разградување на јаглероводородните масла изложени на високи температури. Истражувањата покажуваат дека порастот на температурата на маслото доведува до зголемување на односот на концентрацијата на незаситените и заситените јагленоводороди, особено односот ацетилен/етилен и етилен/етан. Исто така, количината на одвоениот водород расте со температурата.

За дијагностицирање на пореметувањата се користат 4 вредности на односи на концентрација на гасови, и тоа

$$\frac{CH_4}{H_2}, \frac{C_2H_4}{C_2H_6}, \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \text{ и } \frac{C_2H_6}{CH_4}$$

##### Шлезингерова метода

Ова е метода на односи на концентрација на поодделни гасови во комбинација со гранични вредности на концентрација на тие гасови. Односите на концентрација кои се користат се:

$$\frac{C_2H_2}{H_2}, \frac{C_2H_2}{C_2H_6}, \frac{H_2}{CH_4}, \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \text{ и } \frac{CO_2}{CO}$$

Исто така се користат и гранични вредности на концентрација за  $C_2H_2$ ,  $H_2$ ,  $\sum C_xH_y$  и  $\sum CO_x$

##### Дорненбергова метода

Изворната метода дава графичка претстава на зависност на концентрацијата  $\frac{CH_4}{H_2} = f\left(\frac{C_2H_2}{C_2H_4}\right)$ , со користење на log-log хартија, на која се обележани областите кои одговараат на постоење термичко пореметување, постоење на лак и парцијално празнење.

Методата е модификувана и ги користи односите на концентрација на важните гасови.

##### Дувалова метода

Оваа метода е развиена 1989, во Hydro-Quebec за дијагностицирање на пореметувања при користење на триаголник. Методата се заснова на пресметка на концентрација на 3 гасови: метан, етилен и ацетилен. Во секое теме на триаголникот концентрацијата на едниот гас е 100%, а останатите два – 0%. Концентрацијата на гасови расте во насока на движење на стрелките на часовникот. Внатрешноста на триаголникот е поделена на 6 дела, при што секој е карактеристичен за еден тип на пореметување.

Графичката презентација ја прави оваа метода едноставна за употреба, но донекаде и гломазна.

### 1.1.3.5 Интерпретација на резултатите од DGA –анализата

Сите електростопански компании во Европа имаат шема за интерпретација на резултатите на DGA-анализа. Во помал или поголем обем, секоја шема опфаќа специфични искуства на корисниците на трансформатори, вид, место на вградување на трансформаторот, старост, напонско ниво, начин на регулирање на напонот. За илустрација, ќе наведеме некои од критериумите кои се користат во поодделни интерпретатиски шеми :

- ASINEL Шпанија : Зголемен однос на  $\text{CO}_2/\text{CO}$  укажува на разградување на хартиената изолација. Оваа претпоставка е делумно точна, бидејќи до создавање на овие гасови може да дојде и поради други причини, а не само поради разградување на хартијата. Односот  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$  укажува на развој на електричните процеси. Ако овој однос е поголем од 2 пореметувањето е лоцирано во комората на регулаторот на напон, а инаку во котелот на трансформаторот.

-LABORELEC Белгија: Трансформаторот се смета за исправен ако за концентрација на поодделни гасови е исполнето:  $\text{H}_2 < 200 \text{ ppm}$  ,  $\sum \text{C}_x\text{H}_y < 300 \text{ ppm}$  и  $\text{CO} < 800 \text{ ppm}$ , каде  $\text{ppm}$  е релативен волумен помножен со  $10^6$ .

Новата шема на интерпретација на резултатите на DGA – анализа е резултат на интензивни истражувања, кои ги спровела CIGRE, со цел дефинирање на соодветните состојби или , алтернативно, пореметувања кои се карактеризираат со соодветен однос и негови вредности:

-Клучен однос бр. 1

$$\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_6} \left( \frac{\text{ацетилен}}{\text{етан}} \right)$$

Укажува на постојано празнење ако е **бр. 1**  $> 1$  . IEC 60599 користи однос  $\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4} \left( \frac{\text{ацетилен}}{\text{етилен}} \right)$ . Причина за разликата е тоа што, во случај на празнење, етиленот и ацетиленот се формираат во голема количина, додека количината на етанот споро расте. Поради тој однос, **бр. 1** дава подоверлива информација.

-Клучен однос бр. 2

$$\frac{\text{H}_2}{\text{CH}_4} \left( \frac{\text{водород}}{\text{метан}} \right)$$

Укажува на постоење на парцијално празнење ако бр. 2  $> 10$ , IEC 60599 користи реципрочна вредност.

-Клучен однос бр.3

$$\frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6} \left( \frac{\text{етилен}}{\text{етан}} \right)$$

Укажува на термичко пореметување ако **бр. 3**  $> 1$  . Односот **бр. 3** е претставник на односите на незаситени јагленоводороди кон заситените. Незаситените јагленоводороди , најчесто се создаваат при развивање на термичките пореметувања во маслото.

## -Клучен однос бр.4

$$\frac{CO_2}{CO} \left( \frac{\text{Јаглендиоксид}}{\text{Јагленмоноксид}} \right)$$

Укажува на разградување на целулозните материјали и тоа:

- Ако е бр. 4 > 10 прегревањето е причина за разградување
- Ако е бр. 4 < 3 причина за разградување е постоење на електрични пореметувања

## -Клучен однос бр. 5

$$\frac{CO_2}{CO} \text{ (јаглен двеоксид/јаглен моноксид)}$$

Укажува на постоење пореметување во комората на регулаторот на напон ако е исполнето:

$$\text{бр.5} \geq 2 \text{ и } C_2H_2 \geq 30 \text{ ppm.}$$

## 1.1.3.6 Прогноза на нормална концентрација на најважните гасови

Не постои прецизно дефиниран пристап за одредување на нормална концентрација на поодделни гасови, бидејќи истите се многу зависни од климатските услови, оптоварувањето на трансформаторот, типот на употребеното масло и др. Работната група CIGRE ги утврдила вредностите на концентрација на поодделни гасови за блок и трансформатори во преносни мрежи, кои можат да послужат како ориентациони, но во никој случај не може да се сметаат за вредности кои конкретен тип на трансформатори се “декларираат” како употребливи или не, со дадениот тип на пореметување. Овие вредности се наведени во Табела 1.1.2.

Табела 1.1.2. Ориентациони критични концентрации на гасови во блок – трансформатори и трансформатори во преносни мрежи и можни пореметувања

Гас	Концентрација (ppm)	Можно пореметување
$C_2H_2$	>20	Парцијално празнење
$H_2$	>100	Парцијално празнење
$\sum C_xH_y$	>1000 >500	Термичко пореметување: - За $\sum C_xH_y$ x=1,2,3 - За $\sum C_xH_y$ x=1,2
$CO_x$ , x=1,2	>10000	Разградување на целулозата

Компаниите во Финска, врз основа на долгогодишни искуства во примена на DGA-анализа, утврдиле нормална концентрација на поодделни гасови во енергетски трансформатори 136 kV, а кои се наведени во Табела 1.1.3.

Во Германија DGA –анализата на трансформаторите во помалку важните постројки се спроведува 1 ÷ 2 пати годишно во безнапонска состојба, а кај стратешки важни единици - континуирано, односно под напон (on-line monitoring). Се користат комерцијално достапни сензори на база на



полупроводници, за детектирање на експлозивни гасови. Во принцип, се разликуваат две насоки на развој на овие сензори:

- Сензори за детектирање водород ( се смета дека водородот е најважен показател за постоење на внатрешни пореметувања) и
- Сензори за детектирање на сите важни гасови, кои се многу сложени и скапи.

Првспоменатите сензори овозможуваат детекција на трендот на развој на пореметувањата, а вторите овозможуваат реализација на on-line monitoring.

Што се однесува на тоа колку често се спроведува DGA –анализата, сите електростопански компании во Европа и Америка ги даваат истите податоци.

Табела 1.1.3 Горни граници на дозволена концентрација на поодделни гасови во енергетските трансформатори 136 kV

Гас	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_2H_4$	$C_2H_2$	$H_2$	CO	$CO_2$
Концентрација, (ppm)	200	200	300	20	150	1000	15000

#### 1.1.4 Детектирање на парцијалните празнења

Општо е прифатено дека детекцијата на парцијалните празнења, со употреба на електрични или акустични техники, е една од најефикасните методи за откривање на почетни облици на пореметувања и на локални дефекти во високо напонската изолација. Постои доволно силна врска помеѓу процесот на парцијални празнења и карактеристиките на изолациите на енергетските трансформатори која овозможува да техниките за детектирање на парцијалните празнења се применат на местото на поставување, поради проценување на состојбата и контрола на квалитетот по монтажата на новиот трансформатор, отстранување на дефектот или спроведената ревитализација на стариот трансформатор.

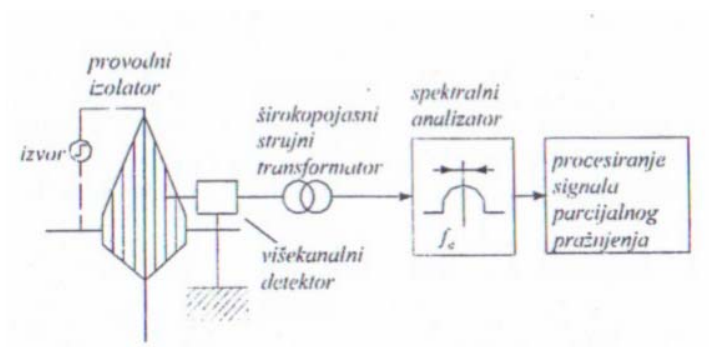
Конвенционалните системи за детекција на парцијалните празнења, според IEC 270, кои се користат во високонапонските лаборатории, не се погодни за употреба на местото на поставување на трансформаторот. Имено, електромагнетната интерференција (смеќавање) која потекнува од остатокот на постројките под напон или водовите под напон има изразено силно влијание на осетливоста, а со тоа и на точноста на мерењата. Принципиелната шема на современиот дијагностички систем, наменет за мерење на парцијални празнења во експлоатациони услови и во безнапонска состојба, прикажана е на слика 1.1.1

Системот се состои од следните делови:

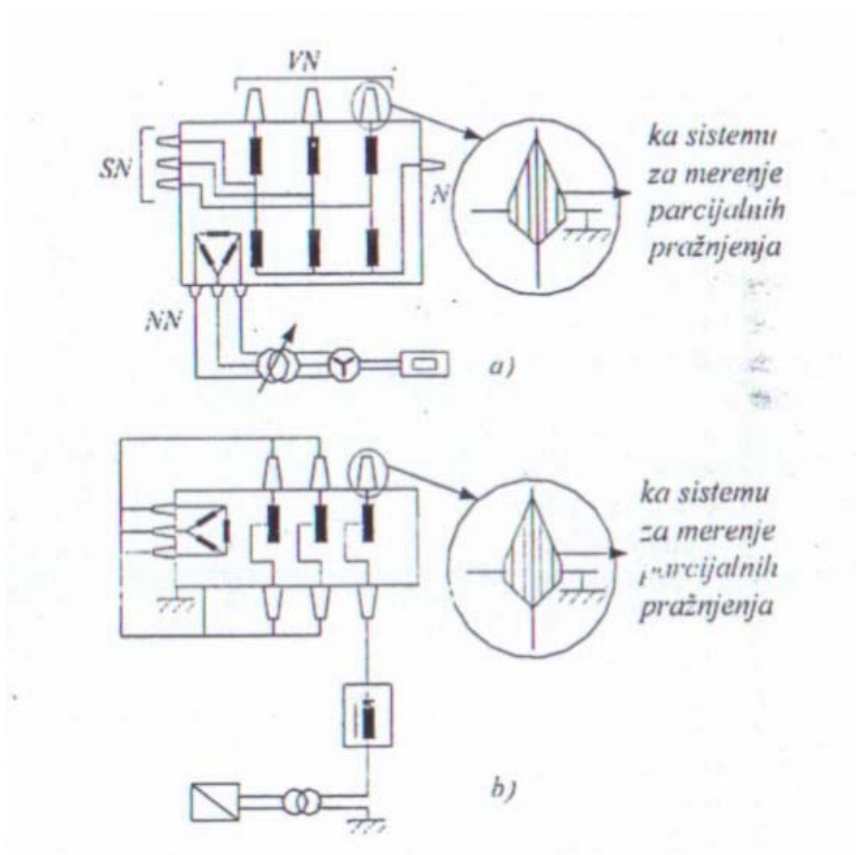
- Несинхронизиран напонски извор за возбуждување на трансформаторот;
- Повеќеканален детектор на сигналот за парцијални празнења. Преку специјалниот високо фреквенстен струен трансформатор ( 0,2 – 30) MHz, е поврзан детектор на краевите на сите проводни изолатори
- Придушница на шумот, која користи спектрален анализатор како селективен пропусен филтер со селектирање на влезните сигнали;
- РС за прибирање на податоците за парцијалните празнења и процесирања со употреба на анализатор со фазен резолвер.

Шумот кој се појавува во текот на мерењето е обично последица на корона.

На слика 1.1.2 прикажани се две различни шеми за генерирање на испитен напон: а) трифазно напојување на компензационата намотка, врзана во триаголник, и б) примена на сериска резонантна шема, фреквентно наместено еднофазно испитување.



Слика 1.1.1 Принципиелна шема на уредите за мерење на парцијални празнења



Слика 1.1.2 Уреди за генерирање на испитниот напон

а) трофазно напојување на компензационата намотка, врзана во триаголник

б) примена на сериска резонантна шема, фреквентно наместено - еднофазно испитување.

Мерење на интензитетот на парцијалните празнења се спроведува на трансформаторот кој е одвоен од мрежата, со тест – напон  $(1,1 \div 1,2) U_n$ , во траење од 60 мин, каде  $U_n$  е номинален напон на трансформаторот. Сеуште не постојат стандарди кои ги специфицираат граничните вредности на интензитетот на парцијалните празнења во текот на мерењата. Како практично правило, усвоено е да при тест - напон близок до номиналниот не треба да има парцијално празнење кое се мери.

Резултатот од мерењата на парцијалните празнења со употреба на анализатор со фазен резолвер е тродимензионална слика ( фазен агол, амплитуда на празнењата и број на примероци), која подоцна може да послужи како модел - референтна вредност – податок за типот “отпечаток од прстот“ (fingerprint) кога е во прашање парцијалното празнење за дадениот тип на пореметување во трансформаторот.

Осетливоста на мерење на парцијалните празнења во експлатационите услови треба да е 50 pC.

#### 1.1.4.1 Континуирано мерење на парцијалните празнења

Континуираното мерење на парцијалните празнења може да се врши на различни начини.

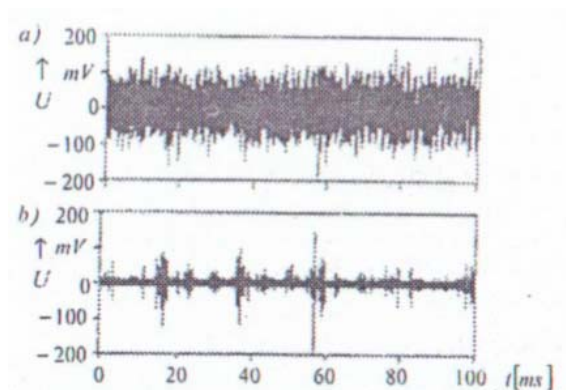
Акустичното мерење се базира на пиезо - електричен ефект кој овозможува мерење на компресирани бранови во фреквентен опсег ( 50 ÷ 350) kHz. Со оваа техника е можно во некои случаи, да се лоцира местото на парцијалното празнење. Меѓутоа за време на пригушувањето, поради изолација , проводниците, магнетното коло, и котелот, осетливоста е многу мала, така да лоцирањето на парцијалното празнење е можно во радиус од 20 cm. Тоа бара голем број на сензори за да се покрие целиот простор во внатрешноста на котелот на трансформаторот. Исто така, не е можно прецизно одредување на енергијата на празнењето.

Од погоре наведеното очигледно е дека електричното мерење на парцијалните празнења е погодно, затоа што овозможува и одредување на интензитетот и лоцирање на местото на празнењето. Електричното мерење може да се подели на тесен и широк фреквентен домен. Мерењето во тесен фреквентен домен се карактеризира со носечка фреквенција, а ширина на опсегот ( 9 ÷ 30 ) kHz . Ширината на доменот во широкиот фреквентен домен е (100 ÷ 400) kHz . Со мерење во тесниот фреквентен домен овозможено е да со адекватен избор на носечка фреквенција, се пригушат паразитните шумови. Поради соодветните пригушувања, носечката фреквенција може да биде од ред на неколку MHz. Според IEC 60270 носечката фреквенција е ограничена до 1 MHz , освен во случаи кога е фреквентниот спектар на парцијалното празнење скоро константен до вредноста на носечката фреквенција. Мерењето на повисоките фреквенции овозможува само да се констатира постоење на парцијалните празнења но не и интензитетот, така да ова мерење е со помала точност. Исто така, лоцирањето на парцијалните празнења и неговата карактеризација преку така наречениот  $\varphi - q - n$  образец е многу тешко и генерално , бара претходно големо искуство и постоење на експертски бази на податоци ( $\varphi$  — однос на проводноста пред и по настанувањето на пореметувањето, q- интензитет на парцијално празнење, n- број на празнења).

Мерењето во широкиот фреквентен опсег е многу погодно за мерења кои се под напон, иако истражувањата покажале за успешно лоцирање на парцијалните празнења неопходно е да ширината на опсегот биде околу 10 MHz. Оваа ширина на опсег е во согласност со предлогот за ревизија на стандардите IEC 60270 и е дефинирана како ултра широко мерење. Инаку , за утврдување на локацијата на празнење се користи методата на препознавање (преку шаблони–примероци).

Раздвојување на сигналот се врши со употреба на калеми Роговски, кои се монтираат на долниот дел на проводните изолатори, капацитивни делители или на мерните изводи кои се веќе вградени на проводните изолатори. Распрегатите сигнали најпрво се пропуштаат преку ниско - пропусен филтер и засилувач, а потоа во единица на меморирање и процесирање.

Во текот на мерењата во широк фреквентен домен се јавуваат различни шумови кои влијаат на мерењето и е неопходно да се пригушат. Континуалниот суносоидален сигнал, најпрво, се пригушува со употреба на филтер со дигитален адаптер. На сл. 1.1.3 е прикажан резултатот од мерењето на енергетскиот трансформатор пред пригушувањето ( а) и после пригушувањето ( б) на шумовите кои се следат. Ширината на фреквентниот опсег на ултра широкото мерење изнесува 20 kHz ÷ 10MHz .



Слика 1.1.3 Снимка на мерењето на парцијалните празнења на енергетскиот трансформатор  
а) пред пригушување на пратечките шумови ; б) после пригушување на пратечките шумови

После тоа потребно е да се пригушат периодичните импулси, предизвикани, на пример, од тиристорското побудување што ефикасно се извршува со употреба на адаптивни алгоритми или со филтери од непропусен фреквентен опсег. Останатиот сигнал содржи само сигнали на парцијално празнење и стохастички, изразени импулси, предизвикани, на пр. од корона. Затоа што се овие сигнали многу слични тешко се одвојуваат. Затоа директните техники на распрегнување се погодни, зошто овозможуваат сигналите кои потекнуваат од внатрешноста на трансформаторот да се разликуваат од оние кои потекнуваат од надворешноста.

### 1.1.5 Надзор на проводните изолатори

За континуиран надзор на проводните изолатори се применува мерење на збирот на струите низ сите три изолатори. Според праксата на европските корисници, ако вредноста на збирната струја е во опсег (  $10 + 50$  ) % од номиналната струја неопходно е да се исклучи трансформаторот и да се извршат дополнителни испитувања.

Периодичните проверки се состојат од спроведување на DGA - анализата и мерење на вредноста  $\tan \delta$  и мерење на капацитетот.

Резултатите на DGA-анализите спроведени на 2000 проводни изолатори укажуваат дека е зголемено присуството на водородот, најважниот индикатор на промените во изоляторот. Тие промени исто така можат да се детектираат со мерење на  $\tan \delta$  и со мерење на капацитетот. Постои општа согласност дека DGA-анализата мора да се спроведува многу внимателно бидејќи при земање на примероци од маслото постои голем ризик има од валкање на маслото во внатрешноста на трансформаторот.

Работната група IEC36A WG 3 ги утврди нормалните концентрации на одделните гасови во проводните изолатори. Овие вредности се дадени во табела 1.1.4

Табела 1.1.4 Нормални концентрации на поодделни гасови

Гас	Концентрација (ppm)
Водород	100
Метан	30
Етан	50
Етилен	300

Ацетилен	2
Јаглен - монооксид	1000
Јаглено - диоксид	3000

### 1.1.6 Анализа на фуранските компоненти

Изолацијата на енергетските трансформатори и останатите високонапонски опреми се состојат од комбинација на минерални масла и целулозна хартија. Кај овие органски материјали може да дојде до пропаѓање под дејство на погонските напрегања, поради што опремата станува неупотреблива за вршење на функциите за која е наменета и доаѓа до зголемување на ризикот од несаканите испади. Пропаѓањето на изолацијата на трансформаторот е во главно функција на температурата и времето, но зависи и од останатите фактори ( на пр., присуство на влага).

Анализата на примероците на масло, за утврдување на пореметувањата, не претставува голем проблем. Поголемиот дел од електричната опрема е опремена со вентили за земање на примероци, а најголемиот, на физичко – хемиските анализи можат да се спроведат во услови на експлоатација. Анализите на маслото често се спроведуваат во рамките на превентивното одржување. Анализата на присуство на растворените гасови со голема веројатност укажуваат на типот и тежината на пореметувањата. Меѓутоа оваа техника не може да се примени едноставно кога е во прашање испитувањето на состојбата на целулозната хартија, затоа што хартијата не е достапна од надворешната страна на електричната опрема, поради што неговата состојба мора да се одреди на индиректен начин. На пр. Англичаните дошле до заклучок дека разградувањето на целулозната хартија било главна причина за дефектите на 2 трансформатори 400/22 kV / kV. Температурите во опсег (110 + 120) °C довеле до попуштање на хартиените ленти што предизвикало блокада на каналите за ладење а со тоа и прекин на ладењето. Деталната анализа на маслото покажала присуство 2 -fur fur –aldehydi и пратечките компоненти. Овие компоненти, за разлика од јагленомонооксидот и јагленодиоксидот, се специфични за пропаѓање на целулозата и останатите состојки на хартијата. Затоа што не се последица на разградувањето на маслото тие не можат да послужат за индиректното утврдување на состојбата на цврста изолација.

Постапката за утврдување на присуството на фуранските компоненти може да биде дополнување на DGA-анализата во склоп на превентивното одржување, овозможувајќи на тој начин значителни финансиски заштеди. Вообичаено е да се вршат анализи за присуство на следните соединенија: 2 furfuraldehyd (2FAL), 5-hidroksimetilfurfuraldehyd (5HMF), acetilfuran (2ACF), 5-metilfurfuraldehyd ( 5MEF), furfuralkohol (2FOL) и furanska kiselina.

#### 1.1.6.1 Хемиски состав и типови хартија

Хартијата се состои од целулозни влакна, извадени од дрвото и други извори. Целулозата во природа никогаш не се наоѓа чиста. Памучните влакна се најверојатно најчистиот природен извор на целулоза но сепак како таква содржи 5 % други состојки. Вообичаено, целулозата е промешана со лигнин и хемицелулоза. Сувото дрво содржи 40 + 55 % целулоза. По преработката се добива хартија која содржи 89 % целулоза.

Во зависност од процесот на производство, постојат неколку врсти на хартија за употреба во електричните уреди, на пр.: Крафт - хартија , Манила - хартија, Манила / Крафт - мешавина на хартија и јапонска хартија.

Термичките карактеристики на целулозната хартија можат да бидат подобрани со додавање на термички стабилни агенси како што се urea-dician-diamid или melamin.

#### 1.1.6.2 Анализа на фуранските компоненти растворени во трансформаторското масло

Со оглед дека минералните изолациони масла содржат голем број хемиски поврзани состојки, многу е тешко директно да се одреди количината на било која растворена компонента. Една од можностите е екстракција на саканата компонента на физичка или хемиска постапка. Втората можност е употреба на селективните реагенси кои можат да ја олеснат анализата.

Првата аналитичка процедура користена за анализи на растворените фурани се базираше на екстракција на типот “течно - течно”, со користење на високо – осетливи течни хроматографи за анализа на екстрактираните супстанции. Процесот на екстракција подоцна е подобрен со преоѓање на екстракцијата во типот “цврсто - течно”. Двете методи се стандардизирани во ИЕС 1198. Гранична вредност на детекција за двете процедури е 0,05 mg/km.

### 1.1.7 Континуирано следење на нивото на влага во трансформаторите

Континуираното следење на нивото на влага на гасовите и течните диелектрици се покажало, дека е многу корисно за одржување на електричната опрема во задоволувачка состојба. За оваа цел се применуваат сензори базирани на технологијата на тенките филмови, кои во присуство на влага ги менуваат електричните карактеристики ( диелектрична константа – пермитивност и отпор).

Филмовите на база на алуминиум –оксид се во употреба од 1960 год. Користени се во сензорите за регистрирање на промените на притисокот на водената пара. Исто така овозможуваат добивање на информација за постоење на точките на роса, релативната влажност и содржина на влага [ppm]. Меѓутоа, употребата на овие сензори е ограничена со горна температурна граница од 50°C, со потреба за често калибрирање и со спор одзив.

Од 1980 во употреба се сензори за мерење на нивото на влага во диелектричните флуиди, базирани на тенки филмови кои можат да регистрираат многу мали промени на вредноста на диелектричната константа. За добивање на саканите податоци се спроведува фреквентна анализа во опсег ( 0,01 + 10000 ) Hz. Појавата на пикот кој се појавува на добиената карактеристика зависи од содржината на влага во флуидот. Спроведувањето на оваа постапка бара извесно време и расположивост на многу софистицирана опрема. Исто така воочено е поместување на калибрационата крива со текот на користењето. Од 1990-1991, испитувани се капацитивните сензори, исто така на база на тенките филмови, за мерење на нивото на влага во гасните средини. Меѓутоа не е докажано дека овие сензори стабилно би работеле во средина како што е загреано трансформаторско масло.

Материјалите кои производителите денес ги користат за изработка на тенките филмови се целулозни супстанции или високо температурни полимери ( полиамиди), при што овие другите се покажаа со многу добри карактеристики во експлационите услови. Дебелината на филмот е од редот на  $\mu\text{m}$ .

На пазарот најчесто се среќаваат сензори со трговски имиња Ultra-H и HUMICAP.

Ultra-H сензори имаат запчести електрооди и се монтираат на керамичка подлога. Надворешниот заштитен слој е од истиот материјал од кој е и сензорот.

HUMICAP сензорите имаат долна и горна електрода и се монтираат на стаклена подлога. Улогата на заштитен слој ја има горната електрода.

#### 1.1.7.1 Излезни величини на сензорите и мерење

Апсорпција на влагата на полиамидните филмови во целиот мерен опсег е околу 3,3 % додека вредноста на диелектричната константата се менува од 3 ÷ 4. Апсорпцијата на влага се контролира на основа на релативната влажност а не на основа на апсолутната содржина на влага, што значи дека сензорот директно ја мери релативната влажност. Излезната струја I на сензорот е во опсег ( 4 ÷ 20 ) A, што одговара на промена на релативната влажност RV во опсег ( 0 ÷ 100 ) %. Измеѓу овие две величини постои линеарна зависност, така да, за дадените податоци може да се напише:

$$RV_{\text{факт}} = (I - 4) \cdot 6,25 \quad (1.1.3)$$



Кога се користи во течност сензорот има релативно заситување со влага  $RS$ , дефинирано како:

$$RS_{\text{теч}} = \frac{\text{содржина на влага [ppm]} \cdot 100\%}{\text{растворливост на водата во течност [ppm]}} = \frac{m_c}{S} \cdot 100\% \quad (1.1.4)$$

Ќе наведеме некои податоци кои се однесуваат на трансформаторското масло и силиконското масло.

Растворливоста на водата во овие течности одредена е со изразот:

$$S = A \cdot e^{\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (1.1.5)$$

Каде :

$E_a$  -енергија на активација

T-апсолутна температура

R- гасна константа  $R=8,3 \frac{J}{K \cdot mol}$

A - константа

Изразот ( 1.1.5) овозможува да на основа на измерената вредност на  $RS_{\text{теч}}$  можеме да го пресметаме  $m_c$  (ppm). Вредностите на параметрите во (1.1.5) за наведените течности се:

Параметар	Трансформаторско масло	Силиконско масло
$E_a / R$	3609	2734
A	$12.323 \cdot 10^6$	$1.958 \cdot 10^6$

Важно е да се напомене дека и течните диелектрици од истиот тип се разликуваат кога е во прашање растворливоста на водата, поради разликата во составот и поради староста. Поради тоа е пожелно вредностите на понапред наведените параметри да се утврдат експериментално.

### 1.1.8 Снимање на фреквентните карактеристики на трансформаторот

За време на оптоварувањето, трансформаторот може да биде изложен на кратки споеви со големи струи на дефекти. Способноста на поднесување на кратките споеви е основна претпоставка за сигурна работа. На оваа способност влијаат термичките и преодните механички напрегања. Силите во текот на кратките споеви можат да предизвикаат деформација или поместување на намотката. Исто така, изолацијата на намотките на старите трансформатори може да стане осетлива на сили во текот на кратките споеви, поради намалената механичка издржливост и собирањето на хартијата.

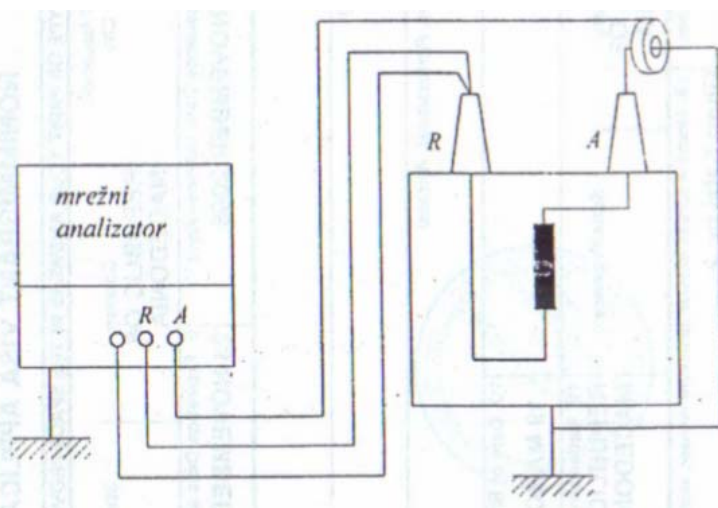
Во поголем број случаи, поместувањата на намотките по краткиот спој во мрежата не доаѓа веднаш до дефект на трансформаторот, но постои голем ризик да механичкото оштетување во изолацијата во намотката, и покрај нагизеноста и згмеченоста на старата хартија ќе предизвика пробој на изолацијата при следниот пренапонски удар или краток спој. Едноставни методи за детекција во безнапонската состојба на поместеноста на намотките овозможуваат значајни финансиски заштеди и скратување на времето на траење на отклонувањето на евентуалното пореметување.

Традиционалните електрични методи за мерење на преносниот однос, импеданси и индуктивности при 50Hz и 60Hz не се доволно осетливи за детекција на малите пореметувања на намотката. Бидејќи последица на деформацијата е промена на индуктивноста и капацитивноста на намотката, промена на карактеристичните фреквентни зависности ( импеданса, адмитанса) може да се

детектира на изводите на трансформаторот со анализа на функциите на преносот ( transfer function) , фреквентен одзив (frequent response anylisis) или со методата на низок напон во временскиот домен.

Функцијата на пренос е единствена карактеристика за секој трансформатор или трансформаторска намотка. Намотката на трансформаторот се однесува како сложено R-L-C коло; функција на преносот, која се одредува врз основа на правилото на теорија на електричните кола, претставува карактеристика на линеарен инваријантен систем. Малите промени во геометријата и навивката доведоа до промена на вредноста на индуктивноста и капацитивноста, а со тоа и до промена на фреквентните карактеристики. Одредувањето на функцијата на преносот, формално гледано, може да се изврши со користење на високо или ниско напонски импулси. Меѓутоа примената на овие методи во пракса е многу проблематична.

Фреквентниот одзив на намотката на трансформаторот може да се одреди со примена на комерцијално достапниот мрежен анализатор во безнапонска состојба. Принципот на мерење на фреквентниот одзив е шематски прикажан на слика 1.1.4.



Слика 1.1.4 Мерење на фреквентниот одзив на намотката на трансформаторот во безнапонска состојба со примена на мрежен анализатор.

Излезот “исчистениот” синусен сигнал (напон околу 2 V) и еден мерен влез (R) на анализаторот се поврзани преку коаксијални кабли со еден извод на тестираната намотка. Другиот крај – извод на намотката е преку струјниот трансформатор поврзан со другиот влез (A) на мрежниот анализатор. Во нормални околности намотките кои не се тестираат се заземјени.

Фреквентниот одзив на намотките се одредува како измерен однос на сигналот A/R, односно импедансата и /или адмитансата за секоја намотка се одредуваат по вредноста и фазната состојба за два фреквентни опсега: а) 50Hz ÷ 500kHz и б) 200 kHz до 2MHz .

Анализата на фреквентниот одзив на секоја намотка се состои од 3 чекори:

- Анализа на промени на резонантните услови,
- Анализа на разликите измеѓу одзивите на сите три фази на трансформаторот
- Анализа на разликите помеѓу фреквентните одзиви на трансформатори од ист тип

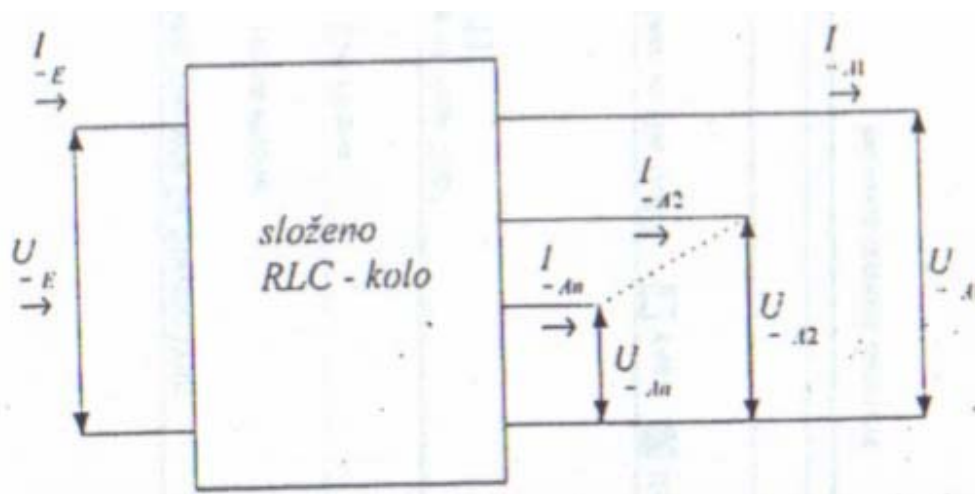
Методата на анализа на фреквентниот одзив е доволно осетлива да овозможи детекција на типичните пореметувања на навивката. Едноставна е за употреба во експлатациони услови и не е осетлива на електромагнетна интерференција.



Барањата кои енергетскиот трансформатор мора да ги исполни во поглед на издржливоста на кратките споеви и во текот на испитувањата дадени се во ИЕС стандардот 60076-5. Во овој стандард е опишано мерењето на реактансата, како дијагностичка метода за утврдување на целовитоста на намотката.

Во случај на пометување или деформирање на намотката, клучните мерливи девијации се промена на капацитивноста и индуктивноста помеѓу намотките. Во продолжение е изложена методата на снимање на фреквентниот одзив во временскиот домен.

Оваа метода се засновува на теоријата на елементите со два пара на краеве. Трансформаторот е линеарен, сложен, временски непроменлив и пасивен елемент, без вградените ZnO - одводници ( ова е модел за диелектрични и динамички испитувања). Со овој пристап е овозможено дефинирање на една влезна и неколку излезни величини како што е прикажано на слика 1.1.5.



Слика 1.1.5 Шема на трансформатор како елемент со два пара на краеве

Секој дефиниран излезен сигнал ( излезен напон  $U_{A,v}$  и излезната струја  $I_{A,v}$ ,  $v = 1,2,3..n$ ) генерира една преносна функција:

$$\text{-излезени напони: } TF_{A,v}(f) = \frac{U_{A,v}(f)}{U_E(f)}$$

$$\text{-излезни струи: } TF_{A,v}(f) = \frac{I_{A,v}(f)}{U_E(f)}$$

Каде :

$U_{A,v}(f) \cdot I_{A,v}(f)$  брзи Фуреови трансформации на излезните напони и струи

$U_E(f)$  - брза Фуерова трансформација на влезниот напон

### 1.1.8.1 Практични мерења на трансформаторите

Преносната функција може да се одреди во временски или фреквентен домен. Во фреквентниот домен се употребува фреквентен анализатор. Фреквенцијата на возбудниот напон, која е од синусоиден облик може да се контролира во зададениот опсег.

При одредување во временскиот домен испитуваниот објект се побудува со низок или висок импулсен напон. Анализата се спроведува на влезните и излезните транзиенти. Амплитудите на нискиот напон се обично  $(100 \div 2000)$  V. Обликот на напонскиот бран зависи од тестираниот објект и употребуваната апаратура. Ширината на фреквентниот опсег на возбудниот сигнал треба да е по можност поголема. Типични параметри на напонскиот бран се :

- **Времетраење на почетокот  $200\text{ ns} + 1\mu\text{s}$** , (челото)

- Времетраењето на крајот  $(40 \div 200)\text{ }\mu\text{s}$  (траењето)

Спектралната распределба на сигналот во временскиот домен се пресметува со брзата Фуриева трансформација. Количникот на излезниот и влезниот сигнал е функција на преносот во фреквентниот домен.

Во пракса, мерењето во временскиот домен може да се изврши побрзо отколку во фреквентниот домен. Траењето на една импулсна возбуда е до  $1\text{ms}$ , меморирање на примероци, процесирање на сигналот и пресметката траат неколку секунди. Во зависност од употребуваната апаратура и бројот на канали на дигиталниот мерен систем можно е истовремено мерење на неколку функции од преносот.

Траењето на мерењата во фреквентниот домен е неколку минути. Стандардните мрежни анализатори располагаат со два канали, така да едниот одзивен сигнал може да биде анализиран и една функција на преносот да пресмета за еден тест во фреквентниот домен. Амплитудата на возбудните хармоници при мерењето во фреквентниот домен се неколку волти. Дисторзијата за време на амбиенталните пречки може да влијае на точноста на мерењето.

Поради ограничената ширина на фреквентниот опсег на преодните напони грешката во пресметката на функцијата на преносот расте на повисоки зачестености во случајот на мерење во временскиот домен.

#### 1.1.8.2 Процесирање на сигналот и барања за хардвер и софтвер во случај на мерење во временски домен

- *Брзина на правење на примероци и должина на записи*

Брзината на правење на примероци покажува колку често се мери аналоген сигнал во секунда. Што е брзината поголема тоа повеќе зачестености можат прецизно да се мерат со дигитален регистратор. За брзината за правење на примероци  $f_{\text{sample}}$  максималната фреквенција која може да се регистрира е

дадена со Никвистовата теорема :  $f_{\text{Nikvist}} = \frac{f_{\text{sample}}}{2}$ .

Зачестеностите за повеќе од  $f_{\text{Nikvist}}$  се репродуцираат со многу изразени паразитни компоненти. Резолуцијата  $\Delta f$  на брзата фуриова трансформација е одредена со должината на записот од сигналот  $N$  во временскиот домен  $\Delta f = \frac{f_{\text{sample}}}{N}$

-Аналогно дигитална конверзија –вертикална резолуција

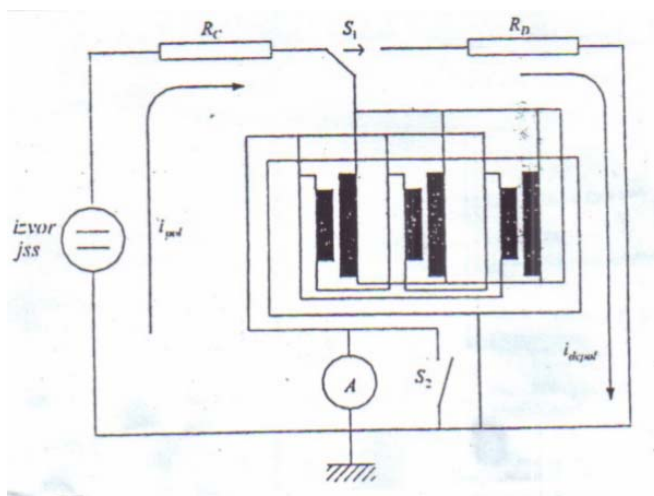
Амплитудата на резолуцијата  $\Delta a$  го опишува зголемувањето кое дигиталниот регистратор може да го препознае .

$$\Delta a = 2^{-k+1}$$

Каде  $k$  е број на битови на A/D конверторот.

#### 1.1.9 Дијагностицирање на изолациите со мерење на струи на релаксација

Мерењето на струјата на релаксација во временскиот домен е често користена метода, затоа што е едноставна за употреба и на големи трансформатори во експлатациони услови. Мерното коло е дадено на Сл.1.1.6 , а процедурата на мерење е следната:



Сл.1.1.6 Шема на колото за мерење на струјата на релаксација во временскиот домен.

Изворот на едномерниот напон (околу 1 KV) е приклучен на изолационен систем кој се тестира (високонпонска намотка на трансформаторот) во период  $(1 + 2)\tau$ . Изворот потоа се исклучува, а намотката кратко се спојува онолку време колку изворот бил приклучен. Во текот на двата периода се бележат вредностите на струјата на крајот на другиот крај на трансформаторот кој е заземјен. Слично на процедурата за мерење на  $\tan \delta$ , сложената структура на трансформаторот може да се подели на поединечни изолирани секции.

Струјата на поларизација  $i_{pol}$  е струја во периодот кога е приклучен напонскиот извор, а струја на деполаризација  $i_{dispol}$  е во текот на периодот кога намотката е кратко споена.

Иако слабењето на изолацијата се манифестира со пораст на амплитудата и со промена на временските зависности на струјата на релаксацијата, само многу искусни специјалисти се во состојба да донесат релевантен заклучок за порастот на диелектричната пропустливост (пермитивност) или загуби на основа на обличите на овие струи. Дијаграмите на овие струи можат да се трансформираат во фреквентен домен, каде може да се воочи јасна зависност на ефективните капацитивности и вредности  $\tan \delta$  од зачестеноста.

Кога геометријата на изолациониот систем е позната, струите на релаксација можат да се пресметаат на основа на диелектричните особини на главните компоненти, маслото и хартијата.

#### 1.4.10 Инструменти за тестирање на VN изолација во постројките

##### 1.1.10.1 Шерингов мост за мерење на $\tan \delta$

Мерењето на вредностите на  $\tan \delta$  овозможува рана детекција во изолационите системи хартија – масло: постоење на влага, интензивно парцијално празнење или термичко стареење на изолацијата.

Декадни отпорници, кондензатори и вибрационен галванометар, кои го формираат нисконапонскиот дел на Шеринговиот Мост, работат на ниво на  $mV$ . Дури и умерените паразитни капацитивности помеѓу нив и компонентите на постројките кои се под напон од неколку десетини до неколку стотини илјада волти, резултираат со појава на паразитни струи во осетливиот дел на мостот. Паразитните струи ја реметат рамнотежата на мостот и со тоа предизвикуваат погрешно отчитување.

Шеринговиот мост најпрвин бил предвиден за лабораториска употреба, каде може да се контролира капацитивната спрега на осетливите компоненти на мостот. Во класична форма, употребата на

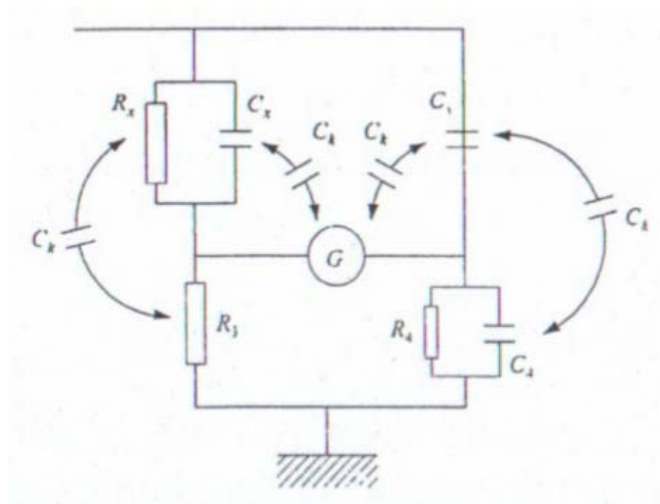
мостот во услови на експлоатација на постројките е многу тешка. Капацитивната спрега може да се ограничи со употреба на електростатичкиот екран, кој се поставува околу нисконапонското коло на мостот. Овој екран често се нарекува *Vagnerova granika*. Влијанието на капацитивната спрега може додатно да се ограничи со одржување на потенцијалот на екранот на одбраната вредност. Меѓутоа, наспроти внимателното подесување на потенцијалот на *Vagnerova granika*, не може во потполност да се елиминира силната интерференција(смеќавање) во постројките врз класичниот Шерингов Мост.

Овој уред овозможува доверливо мерење на  $\tan \delta$ , кога разликата на потенцијалот помеѓу аглите на нисконапонскиот мерен мост е од ред помал од  $mV$ . Шеринговиот мост и паразитната капацитивна спрега е прикажан на сл.1.1.7

#### 1.1.10.2 Аналогни инструменти за мерење на $\tan \delta$ на изолација на VN уредите во постројките под напон

Аналогниот инструмент е опремен со преносен трансформатор  $10\text{ kV}$ . Диелектричните загуби се мерат со ватметар (W), струја на растурање на изолацијата се мери со амперметар (I), а напонот со волтметар(V). Вредноста на  $\tan \delta$  се добива како :

$$\tan \delta = \frac{W}{V \cdot I} \quad (1.1.6)$$



Сл.1.1.7 Шема на Шеринговиот Мост

$R_x, C_x$  -отпор и капацитивност на испитуваната високонапонска изолација,

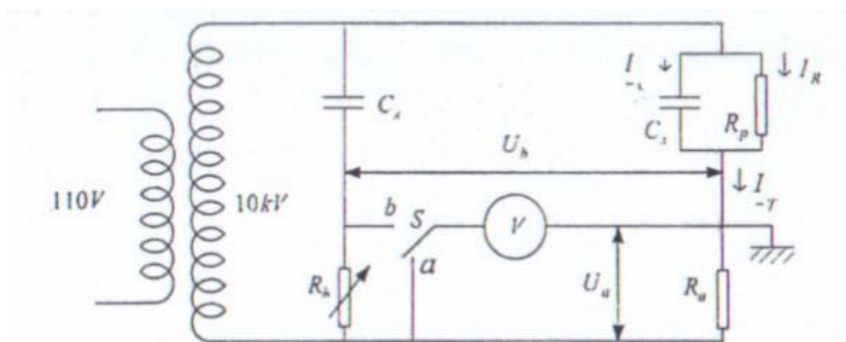
$C_1$  -високонапонски кондензатор кој е изолиран со гас.

$R_3, R_4, C_4$  -нисконапонски отпорници и кондензатор,

$G$  – галванометар,

$C_k$  - паразитна капацитивност помеѓу нисконапонското и високонапонското коло.

Поради намалувањето на интерференцијата со индустриска зачестеност, со склопка се менува поларитетот на испитуваниот напон, а се смета средната вредност на отчитувањето на инструментот пред и по промена на поларитетот. Подобра верзија на овој инструмент се нарекува модел М. Моделот користи само волтметар и склопка, како што е дадено на сл.1.1.8.



Сл.1.1.8 Шема М - модел

Кога склопката е во положба *a* се мери напонот  $U_a = R_a \cdot I_T$ , каде  $I_T$  е вредност на вкупната струја. Во положба *b* регулациониот отпорник  $R_b$  е подесен така да волтметарот *V* покажува најниска вредност. Тогаш капацитивниот пад на напонот се компензира со падот на напонот  $R_a I_T$ , така да волтметарот мери само пад на напонот  $U_b = R_p \cdot I_T$ , каде  $I_T$  е омска компонентна на струја и  $I_c$ . Бараната вредност за  $\tan \delta$  сега едноставно се пресметува врз основа на вредностите  $I_c$  и  $I_T$ .

### 1.1.10.3 Капацитивна спрега со високонапонските собирници

Електричното поле на соседните собирници во постројката под напон, индуцира сигнал на пречки во испитуваната изолација и во колата на мерниот инструмент. Интензитетот на пречки расте со напонот на собирницата, а е обратно пропорционален со растојанието.

Се додека струјата на пречки е стабилна, мерењето може да се изврши без употреба на трансформатор. Потоа мерењето се врши со тест - трансформатор и се врши пресметка на  $\tan \delta$ . (Ова е така наречен *MH* модел, кој се применува во постројките на многу висок напон)

### 1.1.10.4 Мост за мерење на $\tan \delta$ со струен компаратор

Струјниот компаратор го заменува декадниот отпорник и кондензаторот во Шеринговиот Мост, и го смалува влијанието на паразитните капацитивности на нисконапонското коло во мостот.

Примарната намотка  $N_1$  и секундарната намотка  $N_2$  се намотани на надорешното јадро, детектирачката намотка  $N_m$  на внатрешното јадро. Магнетизирачкиот флуks  $\Phi_m$  на јадрото е еднаков на нула кога е исполнето  $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$ . Навивката  $N_m$  служи за минимизирање на магнетната спрега на флуксовите  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Во рамнотежна положба нема да постои флуks на магнетизирање на јадрото. Струјниот компаратор има многу мала влезна импеданса ( $R_m$ -отпор на примарната и секундарната навивка,  $L_{12}$ -меѓусебна индуктивност на навивките). Овие две вредности можат да се занемарат со подесување на изборот на попречниот пресек на жицата и со добро намотување. Малата вредност на влезната импеданса го чини струјниот компаратор најосетлив на пречки поради постоењето на паразитната капацитивност.

Шеринговиот мост со струен компаратор има три предности: неосетлив е на влијанието на капацитивните спрега, има висока осетливост на мерењето на  $\tan \delta$  и има можност на мерења на загубите на празниот од на трансформаторот.

## 1.1.10 Мониторинг и одржување на регулаторот на напон

Од вкупниот број на дефекти кои се случуваат на енергетските трансформатор, околу 40% се припишуваат на регулаторите на напонот. Со методите за дијагностицирање и надзорот на регулаторот на напонот се посветува големо внимание, поради тежнението на корисникот да ги смали експлоатационите трошоци заедно со одржување на нивото на располагањето на овој дел од трансформаторот. Од вкупниот буџет наменет за планско одржување на трансформаторот, 60% се троши на одржувањето на регулаторот на напонот.

Со цел за остварување на очекуваните техно - економски подобрувања, неопходно е, пред се, да се направи разлика помеѓу три нивоа на очекуваното работење на системот за мониторинг, кои се разликуваат истовремено и по својата сложеност:

1. Исправна идентификација на пореметувањата, со доволно преостанато време за да се спречи настанувањето на сериозни дефекти.
2. Да се обезбеди висока сигурност и расположивоста на опремата.
3. Спроведување на потребни мерки на основа на утврдената состојба, со минимални издатоци.

Другиот важен фактор кој влијае на економскиот аспект е самиот регулатор кој треба да се следи, зошто голем број на денешните регулатори на напонот нема конструктивни можности за исправно инсталирање на сензорите за континуиран надзор.

Системот за мониторинг се состои од мерни уреди (сензори или индикатори), уреди за пренос на сигналот и хардверот, софтверот и база на референтни податоци за процесирање на собраните податоци.

Во принцип, механизмите на абеење и развојот на пореметувањата во текот на електричните, механичките и термичките напругања се добро познати. Меѓутоа овие сензори, или индикатори или не се расположливи за сите физички ефекти, или ако се расположливи не се применливи на постоечката опрема.

Преносот на собраните податоци не претставува некој проблем.

Сигурното дијагностицирање е можно само ако собраните вредности коректно се интерпретираат. Ова е значаен проблем: коректната проценка на актуелната состојба на регулаторот на напонот е можна само ако се расположливи споредбените вредности на поедини параметри кои ја карактеризираат новата состојба на новиот, исправен регулатор на напонот. Меѓутоа споредбените вредности најчесто не се расположливи. Од друга страна, кога се потребни споредбените вредности на поодделни расположливи параметри, се поставува прашањето: Колкаво и какво отстапување на собраните вредности во однос на референтните може да се смета за значајно? Ако тоа не е прецизно утврдено, одржувањето ќе биде спроведено или премногу често или премногу ретко.

#### 1.1.11.1 Актуелна стратегија на одржување

Превентивното одржување на регулаторот на напон се состои во извршувањето на периодичните прегледи, и ако е потребно, да се заменат поодделни делови. Интервалот на традиционалното одржување зависи од типот на регулаторот на напонот, номиналната струја, погонското искуство и експлоатационите услови. Одржувањето се спроведува после 20000-100000 операции, генерално, односно 150000 ако регулаторот има вграден филтер за масло. Без оглед на бројот на операции, одржувањето треба да се спроведе по 5-7 години за напони до 110 kV, а по 4 години за напони од 220 kV и 380 kV. Првиот преглед се врши 1 ± 2 години после поставувањето во погон.

Прегледот на регулаторот на напонот обично ги опфаќа следните активности:

- замена на диверторскиот прекинувач, ако е потребно,
- чистење на маслените комори на диверторскиот прекинувач, самиот диверторски прекинувач и коморите на маслениот конзерватор,
- смена на масло,
- проверка на механичката и диелектричната состојба на диверторскиот прекинувач и маслените комори,
- утврдување на изеденост на контактите и ако е потребно, замена на лачните контакти,
- мерење на вредности на пригушните отпорници,
- проверка на заштитните релеи, погонските осовини, моторот, и ако постојат, филтрите за масло.



Освен горе наведените активности, големиот број на европските корисници спроведува и периодична анализа на маслото, за утврдување на диелектричната цврстина и содржината на влага. Според критериумите кои се применуваат во Германија, пробојната цврстина на маслото во комората на регулаторот на напон треба да е  $\geq 40 \text{ kV}/2,5 \text{ mm}$ , а содржината на влагата да е  $\leq 30 \text{ ppm}$ .

Бирачкиот преклопник, обично, не подлегува на инспекција. Меѓутоа, во случаевите кога бројот на операциите преминува 1000000, мора да се консултира производителот, за спроведување на преглед.

По спроведувањето на горе наведената процедура, се добива потполна слика за состојбата на регулаторот на напонот. Добиените информации ја опфаќаат изеденоста на контактите, механичката состојба и состојбата на изолацијата.

#### 1.1.11.2 Акустично дијагностицирање на регулаторот на напонот

Прегледот на регулаторот на напон се извршува во пропишани временски интервали. Прегледот обично, трае 1-2 работни денови (еден човек). Поодделните проблеми можат тешко да се откријат во текот на овие прегледи. Примената на напредните техники на дијагностицирање овозможува остварување на значајни финансиски заштеди, со истовремено смалување на зачестеноста на прегледите и непроменета сигурност на регулаторот.

Обликот на акустичниот бран кој се прави во текот на работата на регулаторот на напон може да укаже на различни аспекти и фази на работата на регулаторот. Акустичните техники на дијагностицирање можат да бидат применети на еден од двата начина:

- техника на дијагностицирање на евентуалните пореметувања споредени со добиените резултати од референтните податоци кои се добиени од регулаторот на напонот со исти карактеристики кој се смета за исправен (податоци од типот отпечаток на прст - fingerprint)

- техника на утврдување кој дел на регулаторот и во која фаза создава невообичаени акустични бранови.

Двата пристапа имаат свои предности: првиот е од општ карактер и привидно е едноставен за употреба, а другиот се чини технички поисправен, затоа што овозможува утврдување на причинителот на промената. Тој, меѓутоа мора претходно да се потпре на големо искуство и истражувања.

Снимката на акустичниот бран може да се направи:

- со уреди осетливи на звучен притисок, како што е хидрофон потопен во масло;

- со претворувачи осетливи на поместување, како што се акцелерометри поставени на сидот на котелот.

Сепак овие две величини, притисок и забрзување различни по природа, тие се во блиска врска во широк фреквентен опсег. Споредувањето на снимените бранови на звукот и вибрациите се покажало дека тие се многу слични и дека двата содржат информации релевантни за дијагностицирање.

Добрите особини на акцелерометарот се големата сигурност и ниската цена. Клучната карактеристика на хидрофонот е да фреквентниот одзив многу малку зависи од секундарните фактори, како што се дебелината и конструкција на сидот на котелот.

Овие два типа на сензори потполно различно реагираат на надворешните фактори, како што се ехото(хидрофони), и структуралните резонантни зачестености (акцелометри). Хидрофоните се линеарно зависни во значително широк опсег (ширината на опсегот е поголема од 100 kHz), од акцелометрите (20-25 kHz).

Во лабораториски услови снимањето на акустичниот сигнал се врши со хидрофони поставени во внатрешноста на комората на регулаторот на напонот. Во реални услови акустичните сензори мораат да се постават на надворешниот сид.

Акустичните сензори кои се применуваат за контрола на регулаторот на напон не се осетливи на електромагнетна интерференција. Кога е во прашање влијанието на вибрациите кои потекнуваат од самиот трансформатор, мерењето покажале дека, зависно од местото на поставување на сензорот, снимката на акустичниот бран може да биде многу чиста и со силен интензитет, а може да биде и потполно прикриена од вибрациите на трансформаторот.

Примената на овие техники се заснова пред сè, на вистинскиот избор на опремата и местото на поставување на котелот.

Со цел да се оствари ефективност на мониторингот на регулаторот на напонот, потребно е да се направи разлика помеѓу наглите и постепените промени: наглите промени можат да доведат до електрични пробиви, што има за потреба за моментално преземање на методи што одговараат, додека отклонувањето на постепените методи може да се планира.

По проучувањето на голем број на акустични снимки, работата на регулаторот на напон, воочени се разлики во работата на два користени типа. Кај диверторските регулатори на напон забележена е разлика помеѓу преминот од непарен на парен отцеп и преминот од парен на непарен отцеп. Кај селекторскиот тип секоја промена на положбата има своја специфична снимка. Тоа во пракса значи да секоја снимка мора да се разгледува независно од другите.

Сите снимки се меѓусебно многу слични но не и идентични. За да се воочат промените, неопходно е да се има референтна снимка (fingerprint), и да се знае опсегот на интензитетот на варијации, во однос на референтната, која може да смета за прифатлива. Во тој поглед една од можностите е да се пресмета просечната снимка и стандардната девијација во однос на бројот на правилните операции. Средната вредност и стандардната девијација можат едноставно да се пресметаат со употреба на стандардни статистички формули во секоја точка од примероците. Резултатот на таквата процедура е прикажан на сл.1 1.20, каде статистичките величини се пресметани за 10 операции. Важно е да се воочи да девијациите се поголеми во моментите на кога настануваат пиковите, одношто во останатите точки.

#### 1.1.11.3 Мерење на контактниот отпор

Со создавање на цврсти карбонати на контактите на бирачкиот преклопник, така наречениот долгорочен ефект, доведува до зголемување на контактниот отпор.

Методата за мерење на контактниот отпор кој го развила КЕМА ги надминува проблемите кои се изразени кај голем број претходно користени системи за иста намена.

Методата се заснова на податокот дека струјата во текот на преодниот процес во високонапонската намотка е окарактеризирана со две временски константи. Помалата временска константа, околу 20 ms, е одредена на индуктивното разлагање, а поголемата со околу 100 ms, со индуктивноста на високонапонската намотка.

Во мерното коло, нисконапонската страна на трансформаторот е кратко споена. Изворот на едномерниот напон е приклучен на високонапонската страна преку отпорник.

Методата е тестирана во лабораториски и експлоатациони услови. Мерниот систем е поставен во кабина, кој едноставно се приклучува на трансформаторот. Осцилограмот се снима преку АС- конвертор споен преку лап топ - РС.

Кога се разгледува отпорот помеѓу фиксните и подвижните контакти треба да се има во предвид дека во нормални услови отпорноста е независна од вредноста на струјата. Ако на контактите постојат наслаги на цврсти карбонати, контактниот отпор покажува извесна зависност од јачината на струјата (отпорот при мали струи е поголем, отколку при големи струи).

Отпорот помеѓу фиксните и поместувачките контакти е од ред на  $\mu\Omega$ . Контактите прекриени со цврсти карбонати имаат отпор од ред на  $m\Omega$ . Со оглед да отпорот на навивките на енергетските трансформатори лежи во опсегот од неколку стотини  $m\Omega$  до неколку  $\Omega$ , неопходно е на мерното коло да се приклучи што помалку помал број на навивки, заради прецизно одредување на контактниот отпор.

Трансформаторот на кој се вршат мерењата мора да биде кратко споен и на примарната и на секундарната страна. Маслото од маслените комори на диверторскиот прекинувач мора се испушти, диверторскиот прекинувач да се отстрани и да се инсталира специјална мерна единица. После тоа, мерната единица се приклучува на подеслив извор на напојување и уред за мерење на отпорот.

#### 4.1.11.4 Утврдување на изеденоста на контактите со DGA анализа



Во случајот на утврдување на изеденоста на контактите со DGA анализата, не се анализираат гасови како во класичната DGA анализа, туку *benzen*, *toluen*, *etil-benzen* и *ksilen* (BTEX). Хемискиот мерен систем мора да има можност за детектирање на многу мали количини од овие гасови, од ред на  $10^{-10}$  /литар масло. Ова може да биде остварено со употреба на добро познатиот GC/MS мерен систем, комбиниран со процесот на чистење и со процесот на отклонување на гасовите од маслото со употреба на активен јаглен.

Основна идеја е дека ерозијата на контактите е одредена, помеѓу останатото, со енергијата на лакот помеѓу контактите на диверторскиот прекинувач. Напонот на лакот е приближно константен за даден контактен материјал, типот на маслото и брзината на склопната операција. Единствениот параметар кој влијае на промената на енергијата на лакот е струјата. За даден струен опсег, напонот на лакот може да се смета за константа.

Енергија на лакот се пресметува од изразот:

$$W = \int_0^t u \cdot i \cdot dt \quad (1.1.9)$$

Каде:  $u$  - напон на лакот,  $i$  - струја на лакот и  $t$  - времетраење на лакот

Во модерните регулатори на напон склопната операција се извршува преку опружниот механизам, а траењето на лакот е ограничено на  $t = (5 \div 7) \text{ ms}$ . Во првиот чекор може да се смета дека ова време е приближно константно. Тоа значи дека енергијата на лакот зависи само од производот  $N_{\text{op}} \cdot I$ , каде  $N_{\text{op}}$  број на операции на регулаторот на напонот.

Лачните контакти на регулаторот на напонот се проектирани за 200000 операции при номинално оптеретување. Во пракса, енергетските трансформатори се оптеретени до 80% од номиналното оптоварување, што значи и помалку абење на контактите, а со тоа и подолг век на експлоатација на главните контакти. Абењето на помошните контакти е приближно константно.

Анализата на примероците земени после 10000 операции покажува дека содржината на маслото е во полна корелација со новиот регулатор на напонот.

На тест моделот се анализирали 4 параметри кои се во врска со создавањето на специфичните гасови, BTEX, материјал на контактите (бакар и 3 различни легури, бакар/волфрам), брзината на склопната операција, типот на маслото, и интензитетот на струјата ( $200 \div 400 \text{ A}$ ). Резултатите покажуваат дека е потребно и доволно да се прати содржината на бензен и толуен. Нивното создавање е скоро пропорционално на вкупната енергија ослободена во маслото во текот на 10000 операции.

Параметарот “брзина на склопната операција” не е особено влијателен во опсегот ( $0,3 \div 0,6 \text{ m/s}$ ). Останатите параметри покажуваат големо влијание, особено типот на употребуваното масло и интензитетот на струјата.

Регулаторот на напон на трансформаторот од 110kV, 30MVA, после 90000 операции имал во еден литар масло 20 mg бензен.

### 1.1.12 Обновување на трансформаторите на местото на поставување

Одлуката за местото за спроведување на поправката зависи од сложеноста на дефектот, исполнетост на неопходните услови за тоа да се изврши на местото на вградување на трансформаторот, цена на транспортот од фабриката работилница и време за кое дефектот мора да се отстрани односно трансформаторот да се врати во погон.

Во случај на спроведување на конвенционално одржување, во многу случаи, исправен трансформатор се исклучува од погонот заради спроведување на планираните активности. Ако екипата за тимот за спроведување на ремонтот не е доволно обучена или не се исполнети сите потребни услови,

трансформаторот по ремонтот може да биде во полоша состојба од колку пред ремонтот. Најчеста последица на некоректно извршување на одржувањето на трансформаторите е присуство на недозволливо ниво на влага во изолацијата и заматеност на маслото поради сушење на многу висока температура.

Во зависност од погонот на активности кои е потребно да се спроведат, може да се класифицираат четири видови на обновување на трансформатори:

1) Отклонување на ситни дефекти, без или со строго ограничен пристап на внатрешноста на трансформаторот (замена на проводните изолатори, заптивки, изгорени проводни врски и сл...)

2) Поправки кои бараат отворање на котелот. Потребно е делумно или потполно испуштање на маслото и, според тоа, соодветна заштита на изолацијата на намотките од пробивот на влагата. Се препорачува загревање на намотките пред испуштање на маслото.

На пример, ако котелот се отвори во воздух со релативна влажност од  $80 \div 85\%$ , за да на хартиената изолација не дојде до создавање на влага, поради капиларна кондензација, потребно е да се изврши загревање до приближно  $60^{\circ}\text{C}$  (тоа е конвенционален начин). Новиот начин е со загревање со врел воздух.

Важноста на правилниот избор на заштита од пробив на влагата може да се илустрира на следниот пример. Во воздухот со релативна влажност од  $75\%$  хартиената изолација со површина од  $1000\text{ m}^2$ , за време од 16 h, впила 13 l вода. Доколку, при исти останати услови, температурата изолација се зголеми за  $10^{\circ}\text{C}$ , ќе се впије 6 l вода. Ако за загревање се користи врел воздух, а релативната влажност во котелот се одржува под  $10\%$ , изолацијата за 100 h, ќе впије околу 3 l вода.

3) Поправки кои бараат делумно извлекување на деловите да би се овозможил пристап на горните делови на јадрото ( $0,5 \div 1\text{ m}$ ). Нивото на масло мора да се спушти за ( $20 \div 30$ )cm.

4) Поправки кои бараат потполно извлекување на активните делови. Посебно внимание треба да се посвети на повторното полнење на котелот со масло и импрегнација. Оваа постапка се состои од две фази: фаза на сушење (во вакуум) и фаза на загревање.

Вакуум - системот е врзан за разладна комора, каде се контролира количината на издвоениот кондензат. Критериумите за завршување на фазата за сушење се:

- постигнување на специфична температура во највлажниот дел на изолација во согласност со пропишаните нивоа на влажност во рамнотежна состојба;

- прекин на одвојувањето на кондензаторот или негова стабилизација во разладната комора, на ниво  $3 \div 5\text{ ppm}$  или  $500\text{ g/ден}$ .

- стабилизација на притисокот на пареа во вакуум цевките;

- стабилизација на вредностите на отпорот на изолацијата на ниво кој одговара на пресметаната вредност на отпорот на сува изолација. Изолацијата се смета сува ако содржината на влага е во опсег ( $0,5 \div 1$ )%.

Постапката на сушење на енергетските трансформатори трае од  $10 \div 14$  денови.

При вакумирањето недоволната заптивеност може да преставува значаен проблем, затоа што при пробивот на воздухот во делумичниот вакуумиран простор доаѓа до негово нагло ширење, што доведува до создавање на кондензат. Трансформаторот се смета добро затнат ако промената на притисок не е поголема од  $5\text{ mm Hg/60 min}$ , односно  $6,58\text{ mbar/60 min}$ .

Независно од степеност на заптивеноста, вакумирањето не е дозволено во услови на дожд. На притисок од  $5\text{ mm Hg}$ , односно  $6,58\text{ mbar}$ , во котелот на трансформаторот останува  $0,65\%$  воздух, кој поради притиснатоста од сите страни може да се разложи.

Колку е вискозност на маслото помала, толку степенот на импрегнација е поголем, поради што е погодно да трансформаторот се наполни со масло чија температура што е можно поголема.

Погоре споменатите дејствија се спроведувале по  $10 \div 12$  години погон. Искуството покажува дека со обновување, ревитализација на местото на вградување може да се постигне квалитет многу близок до оној кој се постигнува во фабрика, освен во случај на необновлив дефект на цврста изолација.

Според новите практики, ревитализацијата се планира по  $20 \div 25$  години работа. Видот и обемот на работите се одредени од резултатите од претходно спроведените сложени испитувања, и вклучуваат отклонување на настанатите оштетувања и дефекти предизвикани од стареење.

Еднаш во 5 години се спроведува: фарбање на металните делови, промена на заптивките, (по потреба), замена на оштетените или изедени вентили, уредите и останатите делови.

По донесување на одлука за спроведување на ревитализација или отклонување на дефектите, пожелно е да се изврши консултација со произведувачот на трансформаторот. Произведувачот може да помогне во изработка на планот за спроведување на работата, со давање на информации за можните дефекти, сложеноста на неопходните активности, ризикот кој го носат различните алтернативи, цени и времетраење на обновувањето.

Кога е во прашање спроведување на обновувањето, постојат три алтернативи на извршување на неопходните работи:

- а) ревитализација или отклонување на дефектот ќе го врши произведувачот. Во овој случај улогата и одговорностите се јасни кога се во прашање работата и материјалот кој ќе биде употребен
- б) ревитализација или отклонување на дефектот ќе го врши корисникот заедно со произведувачот. Оваа можност бара јасен договор за поделба на работата и одговорностите
- в) ревитализација или отклонување на дефектот ќе ја извршува самиот корисник. Во овој случај произведувачот може да се користи како испорачател на цртежи, резервни делови и советодавец.

Цената на ревитализацијата на трансформаторот, вклучувајќи ги трошоците на транспорт изнесува  $(50 \div 60)\%$  од цената на новиот трансформатор. По ревитализацијата, трансформаторот ги има сите карактеристики како да е нов (as good as new).

Големите европски корисници имаат развиени стратегии за управување со експлоатацијата на големите енергетски трансформатори. Минималното потребно време за воспоставување на тие стратегии е 5 години, а клучен фактор претставуваат многу прецизни експлоатациони податоци, во преден план показателите на довербата.

Според податоците кои се презентирани од корисниците од Германија и Полска, основа за донесување на одлука за експлоатација на трансформаторот, претставува дефинирање на состојбата на трансформаторот кои, во нивните разгледувања ги има 5:

-*ниво А*: трансформаторот е во многу добра состојба. Во оваа група спаѓаат нови и трансформатори ревитализирани до пред 10 години, или исклучително, 15 години доколку биле помалку во погон, и послабо оптеретени. Сите резултати на DGA анализата се во специфицирани граници. На пример, вкупната содржина на гасови растворени во масло е под 500 ppm.

-*Ниво В*: трансформаторот е во добра состојба. Трансформаторот е во погон до 20 години, помалку модерен отколку на ниво А, и претрпел помалку технички промени. Исто така, овде спаѓаат новите трансформатори кај кои концентрацијата на растворени гасови ја преоѓа концентрација од нивото А, но е под дозволената горна граница. На пример, концентрација од 1000 ppm, запаливи гасови е поднесливо.

-*Ниво С*: Трансформаторот е во ослабната состојба. Во погонот е подолго од 20 години, и постојат одредени технички ограничувања. Доколку не постои можност на испомош овој трансформатор мора да се исклучи од погон. Концентрацијата на растворени гасови е помалку важна ако е само тоа параметар кој овој трансформатор не го пренесува на ниво D.

-*ниво D*: Состојбата на трансформаторот е незадоволителна. Неопходни се интензивни работи на ревитализација без оглед на староста на трансформаторот. Концентрацијата на растворени гасови е поголема од она што е утврдено за ниво С, но е пониска од концентрацијата од ниво Е. Концентрацијата на запаливи гасови е околу 2500 ppm, а доколку пореметувањето е надвор од намотките 4500 ppm. Во оваа група спаѓаат трансформатори произведени во педесетите и рани шеесети години, поради високиот степен на техничка изеденост, и старост на изолацијата.

-*ниво Е*: трансформаторот е во многу лоша состојба. Неопходен е постојан и интензивен надзор, без оглед на староста. Најверојатно е негово повлекување од погон.

Граничните вредности на пораст на концентрација на запаливи гасови се:

-за блок-трансформатори: 35 ppm/месец,

-за мрежни трансформатори: 45 ppm/месец.

Искуството покажува дека брзината на промена на концентрација на гасовите поединечно е многу важен податок, за состојбата на трансформаторите и трендовите на негова промена, дури и кога концентрацијата на гасови е во рамките на дозволеното.

### 1.1.13 Планирање на одржување на енергетските трансформатори

Генерално гледано, современото планирање на активности насочени на одржување на елементите на висконапонските постројки се заснова на:

- споредување на измерените податоци со податоците од водот на одпечаток од прсти
- податоци добиени со користење на уреди за континуиран надзор или –процена на состојба на елементите.

Тестирањата со кои се доаѓа до податоци од типот на одпечаток од прсти, се извршуваат во фабрика, во текот на производството, или на место на вградување на трансформаторите. Идеално, треба да се спроведе проверка на двете места и со комплетно монтирани трансформатори. Освен што даваат основна линија на неопходните податоци, овие тестови:

- а) претставуваат гаранција на квалитетот на производството
- б) обезбедуваат правремена елиминација на оштетувањата до кои евентуално е дојдено во текот на транспортот и поставувањето на трансформаторот,
- в) Претсатвуваат гаранција за исправно поставување на трансформаторот.

Податоците од типот одпечаток од прсти, односно референтните податоци, можат да се сметаат за податоци за интензитетот за парцијални празнења, вредности за  $\tan \delta$ , отпорот на навивката и капацитивноста.

Користењето на уредите за континуиран надзор варира во многу широк опсег од корисник до корисник и условено е во голема мерка, од експлатационите услови во отстранувањето на дефектите, староста на постројката, стратешката важност и расположливите финансиски средства.

### 1.1.14 Показатели на сигурноста на енергетскиот трансформатор

Студискиот комитет 12 CIGRE спроведе меѓународна анкета за дефектите на енергетските трансформатори и нивното траење. Главните резултати се наведени во табелите 1.1.6 и табела 1.1.7.

Табела 1.1.6 Зачестеност на дефектите на енергетските трансформатори во зависност од староста (дефекти/години)

Старост на енергетските трансформатори $t_s$ , [год]	Номинален напон на енергетскиот трансформатор $U_n$ , [кV]	
	110-220	380
$0 < t_s \leq 5$	0,017	0,019
$5 < t_s \leq 10$	0,019	0,025
$10 < t_s \leq 20$	0,022	0,032

## 1.2. МОНИТОРИНГ И ОДРЖУВАЊЕ НА МЕРНИТЕ ТРАНСФОРМАТОРИ

Мерните трансформатори се обично меѓу најдоверливите елементи на електроенергетскиот систем. Интензитетот на крупните дефекти е околу 0,005 1/год. Сепак, кога ќе се случи внатрешен дефект

последниците по соседната опрема и персонал во постројката можат да бидат значителни. Со цел превенција на катастрофалните дефекти предвидена е примена на различни методи на надзор.

За да детекцијата на пореметувањата во текот на работата биде ефикасна неопходен е адекватен избор на методи со кои е можно препознавање на механизмот на секој од пореметувањата поединечно. Дефектите на мерните трансформатори се по природа, најчесто, генерички, затоа што се пред се предизвикани од начинот на проектирање или производство.

Најефикасната метода за утврдување на состојбата на изолацијата е методата за мерење на парцијалните празнења. Дигиталната опрема развиена за оваа цел, овозможува прецизна анализа во условите на експлатација, забележување на резултатите и утврдување на дијагнозата.

Табела 1.1.7 Удел на пооделни компоненти во вкупниот број на дефекти

Компоненти	Удел во вкупниот број на дефекти, %	Удел во дефектите на компонентите, %, според должината на траење на дефектот	
Намотка и Јадро	28,8	До 30 денови	18,35
		> 30 денови	81,65
Проводни Изолатори	12,0	≤ 1 ден	15,83
		1 + 30 денови	54,16
		> 30 денови	30,01
Котел и Масло	7,9	≤ 1 ден	63,29
		1 + 30 денови	25,32
		> 30 денови	11,39
Регулатор на напон	40,7	≤ 1 ден	28,74
		1 + 30 денови	51,60
		> 30 денови	19,66
Останато	10,6	≤ 1 ден	66
		1 + 30 денови	34

Како и кај поголемиот број високонапонски елементи, дефектите можат да се поделат во 2 категории: дефекти кои се развиваат брзо и дефекти кои се развиваат споро. Овде треба да се направи разлика помеѓу дефектите која е единствена последица испадот на мерниот трансформатор од погон и дефектите кои се пропратени со експлозија (сериозни дефекти).

Востановено е дека постои корелација помеѓу дефектите намерните трансформатори и атмосферските празнења, во текот на денот со грмотевици вкупниот број на дефекти е три пати поголем, а бројот на озбилни дефекти дури 6 пати.

Во период на експлоатација од 5 ÷ 20 години интензитетот на дефекти подлегува на експоненцијална распределба. Деталната анализа на погонската статистика овозможува дефинирање на стратегија за замена на старата опрема, како и надзор на ризичната опрема, која може да претрпи озбилни дефекти пред истекот на очекуваниот век на експлоатација. Значи, неопходно е добро познавање на механизмот на развојот на дефектите, поединечно, и можноста на расположливите методи за мониторинг.

### 1.2.1 Механизми на дефекти на мерните трансформатори

Според причината, дефектите на мерните трансформатори можат да бидат диелектрични и заради топлотните напрегања.

Дефектите во текот на диелектричните напрегања се случуваат во текот на високо фреквентни преодни процеси предизвикани од склопните операции и лачните пробиви. Пренапоните се јавуваат во пооделните точки на изолација, затоа што распределбата на преодните пренапони не е линеарна.

До диелектричните напрегања може да дојде и при назначената зачестеност, во случаевите на постоење на други водови кои се опремени со компензациони пригушници.

Феромагнетната резонанса која се јавува во колото кое го сочинуваат капацитивноста на водовите и индуктивноста на напонските трансформатори, исто така може да причинат доволно високи пренапони кои можат да ја оштетат изолацијата.

Процесот на деградација за овој тип на дефекти е добро познат: се создаваат меурчиња во маслото, парцијални празнења, разградување на маслото, термичко разградување, појава на кратки споеви на оштетените делови и др.

Корисно е да се нагласи дека парцијалните празнења за овој тип на дефекти се случуваат приближно кога напонот ќе пројде низ 0.

Дефекти во текот на термичките напрегања се констатираат со детектирање на нестабилноста на изолацијата или продуктот на оксидација или присуство на вода. Клучно обележје е зголемување на вредноста на  $\tan \delta$ , што доведува до зголемување на Цулови загуби, а со тоа и до прегревање и конечно оштетување на опремата. Пореметувањето се развива без парцијално празнење. Детекцијата на овие типови на дефекти се врши со мерење на вредноста  $\tan \delta$ , било само на маслото или на елементот како целина.

### 1.2.2 Традиционални методи за надзор на мерните трансформатори

Во Европа, освен визуелна контрола во текот на инспекција на постројките, методите на надзорот на мерните трансформатори во погонот не се применуваат често. Овој факт не е потребно да се оправда со економските причини затоа што зачестеноста на дефектите на мерните трансформатори е исклучително ниска. Последица на тоа е да критериумите за дефинирање на состојбата на мерните трансформатори е крајно несигурно.

Компаниите кои вршат надзор најчесто спроведуваат анализа на маслото.

Тестирањето на маслото се врши во безнапонска состојба, согласно со одредбите IEC 567. Обично се извршува после :

- Детектирање на дефектите на опремата,
- Врзување на земја на опремата на соседната фаза,
- Детектирање на разликите во висините на дилатациите на елементите на трофазната конструкција,
- Детектирање на дефектот на опремата од иста серија .

Анализата на маслото може да се спроведе на неколку начини:

- Мерење на содржината на влага. Нормална содржина на влага на температура од  $20^{\circ}\text{C}$  е  $\leq 15 \text{ ppm}$ .
- Мерење на диелектричната цврстина и мерење на вредностите на  $\tan \delta$ . Се спроведува на примерок кој се зема во исто време кога и примерокот на маслото за гасна анализа. За температура од  $90^{\circ}\text{C}$  можат да се утврдат 4 групи на податоци кои ја опишуваат состојбата на изолација:
  - 1) Изолацијата е во добра состојба ако  $\tan \delta \leq 0,01$
  - 2) Изолацијата е во задоволувачка состојба ако е  $0,01 < \tan \delta \leq 0,025$
  - 3) Изолацијата е во лоша состојба ако е  $0,025 < \tan \delta \leq 0,05$



4) Изолацијата е во многу лоша состојба ако е  $\tan \delta > 0,05$

Овде е важно да се напомене дека горните вредности за  $\tan \delta$  се однесуваат на мерења спроведени на зачестености од 50 Hz. За мерење се користи Шерингов мост или негова модификација. Од скоро во употреба е Шеринговиот мост кој работи на зачестености од 80 Hz. Со мерењата кои се спроведени утврдено е да важи :  $\tan \delta_{80\text{Hz}} = 0,7 \cdot \tan \delta_{50\text{Hz}}$

- Анализа на растворените гасови. Се спроведува DGA - анализата. За секое напонско ниво на типот на мерните трансформатори утврдени се нормални и критични концентрации на поодделни гасови, во зависност од годините на експлоатација. Големiot број на корисници смета дека присуството на ацетилен ( $C_2H_2$ ) најважен идникатор на пореметувањата: до неговиот развој доаѓа поради постоење на празнење на голема енергија. Квантификацијата на водородот и неговото врзување за одреден тип на пореметување се крајно несигурни. Водородот многу лесно испарува а до неговото создавање може да дојде и поради присуство на некои материи, постапки и хемикалии кои се користени во процесот на производство.

### 1.3 МОНИТОРИНГ И ОДРЖУВАЊЕ НА $SF_6$ ПОСТРОЈКИТЕ

Планираните активности на одржување на  $SF_6$  постројките пред се се однесуваат на прекинувачите. Одржувањето се спроведува после одреден број на години во погон или број на извршени операции. Помалиот дел на активности се планираат за раставувачи и работни земјоспојници, додека за осатнатите елементи на  $SF_6$  постројките не е предвидено превентивно одржување. Искуството покажува дека елементите по истекот на предвидениот период на работа биле во значително подобра состојба отколку што се очекувало, што резултира со продолжување на периодот на експлоатација помеѓу две плански исклучувања поради одржување.

Кога е во прашање примената на уредите за следење на состојбата на пооделните елементи и функционалните целини на  $SF_6$  постројките мислењата на корисниците се спротивставени, пред се поради економската оправданост и погонската сигурност на самите уреди. Високата погонска расположливост на  $SF_6$  постројките бара спроведување на прецизни анализи на трошоците и користи поради проверка на економската оправданост за примена на уредите за надзор. Погонската сигурност на уредите за надзор треба да биде барем еднаква на погонската сигурност на  $SF_6$  постројките. Исто е и со очекуваниот век на експлоатација.

Пореметувањата кои можат да доведат до дефекти на елементите на  $SF_6$  можат да се класифицираат во 4 категории:

- Пореметена работа на механичките елементи. Овој тип на пореметување е најизразен кај прекинувачи, работни или брзи земјоспојници.

Голем број на механички дефекти се последица на зголемување на триењето или намалувањето на погонскиот елемент. Резултат на ова е смалување на брзината на склопната операција ( подолго времетраење) или непотполно движење на подвижните делови. Параметрите кои треба да се следат поради превенција на овој тип од пореметување се:

- \* ) притисок на флуидот во погонскиот механизам;
- \* ) брзина на движење на подвижните делови, со мерење на времетраење на циклусите;
- \* ) одот на подвижните делови со снимање на дијаграмот *простор-време*
- \* ) коефициент на триење на подвижните делови

- Изденоост на прекинувачките комори на прекинувачот. Последица на изеденоста на пооделните делови е да прекинувачот може да изврши помал број на операции од назначеното. Поради детектирање на оштетувањата, неопходна е примена на методата на дијагностицирање. Поради примерот, изеденоста на лачните контакти се утврдува на основа на положбата на

$$\sum I_i \cdot n_i$$

контактите во состојба *затворено*, на основа на величината  $\sum I_i \cdot n_i$ , каде  $I_i$  е вредносот на струјата која прекинувачот ја прекинал, а  $n_i$  е број на прекинувања, и на основа на содржината на субпродуктите на разлагање на  $SF_6$ .

- **Пореметувања во изолацијата.** Пробивите во внатрешноста на комората на постројките можат да се случат директно низ гас или на површината на цврстиот изолатор или во масата на цврстиот изолатор. Пробивите се последица на парцијалните празнења или постоењето на подвижни честички во внатрешноста на оклопот или присуството на влага и субпродукти од разлагањето на гасовите. Поради превенција на пореметувањата во изолацијата се применуваат уреди и методи за:

- \*) детекција за парцијални празнења
- \*) мерење на густината на гасот
- \*) детекција на струја на високи зачестености
- \*) детекција на ултра - звучни бранови
- \*) мерење на диелектрична цврстина
- \*) мерење на содржината на воздухот во гасот
- \*) мерење на содржината на влагата во гасот.

- **Прегревање.** Прегревањето укажува на изеденоста на контактите. Директното мерење на температурата на контактите не можно во  $SF_6$  постројките, па за проценка на нивната температура се врши мерење со користење на IC - камери.