

МЕТРОЛОГИЧНИ ИЗИСКВАНИЯ КЪМ СИСТЕМИТЕ ЗА МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА НА СИЛОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Евтим Кърцелин ¹, Александър Владимиров ¹, Георги Велев ², Ангел Зъбчев ¹

¹ Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, e-mail: snd242@abv.bg

² ТУ Габрово

РЕЗЮМЕ. Изследвано е влиянието на точността на първичните датчици за измерване на тока и напрежението на относителната грешка за определяне на импеданса на късо съединение на силов трансформатор в експлоатация.

METROLOGICAL REQUIREMENTS TO MONITORING AND DIAGNOSTIC SYSTEMS ON POWER TRANSFORMERS

Evtim Kartselin ¹, Aleksandar Vladimirov ¹, Georgi Veleve ², Angel Zabchev ¹

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: snd242@abv.bg

² TU Gabrovo

ABSTRACT. A study has been done on the impact of the accuracy of the primary sensors measuring current and voltage on the relative error while determining short circuit impedance of power transformer in service.

1. Въведение

Способността на трансформаторите да издържат режими на къси съединения се явява тяхна основна характеристика. Затова международни стандарти на организациите IEC, IEEE, както и други международни стандарти определят, че силовият трансформатор трябва да бъде устойчив на къси съединения, също така и как да бъде проверена устойчивостта им.

Въпреки това има достатъчно много доказателства, че проблемът не е толкова елементарен, както се описва в стандартите. Повредите причинени от внезапни къси съединения са все още основна причина за многобройни извънпланови извеждания на трансформатори от експлоатация.

Развитието на световната икономика непрекъснато повишава нуждите от електрическа енергия, това води до инсталиране на нови генераторни мощности и непрекъснато увеличава мощността на късо съединение на системите за електроснабдяване. Увеличаващата се мощност на късо съединение води до утежняване на работата на инсталираното електрооборудване в режим на късо съединение, поради факта, че то е изчислено да работи при по-ниски нива на токове на късо съединение.

Основен параметър на силовия трансформатор се явява импедансът на късо съединение Z_k . Непрекъснатото му наблюдаване, измерване и оценка може да покаже

наличието на деформации в намотките на трансформатора получени в следствие на електро-динамичното действие на токовете на късо съединение.

В доклада са разгледани някои въпроси, свързани с определяне на метрологичните изисквания към системите за автоматизиран мониторинг на силови трансформатори в експлоатация, (САМСТ).

2. Метрологични характеристики на средствата за измерване

Средствата за измерване (СИ) са технически средства, които са:

- Предназначени за измерване;
- Имат нормирани метрологични характеристики;
- Възпроизвеждат и съхраняват единицата на физичната величина, размера на която се приема за неизменна (в границите на приетата точност) в границите на определен интервал от време.

Под метрологични характеристики се разбира (МХ) такива характеристики на СИ, които позволяват да се прави оценка за тяхната приложимост за измерване в известен обхват и с известна точност. За разлика от СИ приборите или веществата, които нямат нормирани МХ, се наричат индикатори. СИ – това е техническата основа на метрологичното осигуряване.

Измервателни преобразуватели – това са СИ, предназначени за формирането (генерирането) на сигнал за измерваната информация във форма, удобна за предаване (пренасяне), по-нататъшно преобразуване, обработка и съхраняване, но не е достатъчна за непосредствено възприемане от наблюдателя. Това са например токови и напрежителни измервателни трансформатори, термодвойки, шунтове, преобразуватели на налягане. Не трябва да се отъждествяват измервателните преобразуватели (датчици на първична информация) с преобразувателните елементи.

Измервателен прибор – това е система за измерване, предназначена за преработка на сигнала на измервателна информация в друга, достъпна за непосредствена оценка от наблюдателя.

Измерителна система – това е комплекс от системи за измерване (СИ) и спомагателни устройства с компоненти за свързка (проводници, телевизионни и др.), предназначени за формирането на сигнал за измерваната информация във форма, удобна за автоматична обработка предаване и използване в автоматични системи за управление.

Измервателната система е предназначена само за събиране и съхраняване на информация.

2.1. Изчисляване на грешката на измервателна система

Измервателната система по определение е предназначена за възприемане, преработка и съхраняване на измервателната информация в най-общият случай на разнородни физични величини по различни измервателни канали (ИК). Ето защо изчисляването на грешката на измервателната система се свежда до оценка на грешките на нейните отделни ИК.

Резултантната относителна грешка на ИК се определя с израз

$$\delta_{ИК}(x) = \pm \left(\delta_K + \delta_H \left(\left| \frac{x_2}{x} \right| - 1 \right) \right), \quad (1)$$

където

x – текуща стойност на измерваната величина;

x_2 – горна граница на даден обхват на измерване на канала, при който относителната грешка е минимална;

δ_H и δ_K – относителни грешки, изчислени съответно в началото и края на обхвата.

Тъй като ИК е верига от различни възприемачи, преобразуващи и регистриращи звена, то за определянето на $\delta_{ИК}(x)$ е необходимо преди всичко да се оцени средноквадратичното отклонение на грешката на тези m звена σ_i . Резултантното СКО на грешката на ИК ще бъде

$$\sigma_{ИК} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \sigma_{i\partial\partial\partial}^2}, \quad (2)$$

където

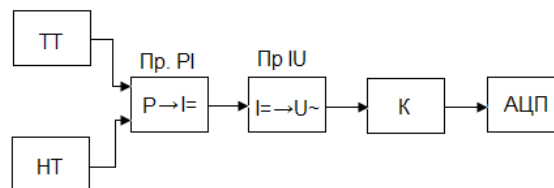
$\sigma_{\partial\partial\partial}$ – допълнителните грешки от n влияещи фактори;

$$\sigma_i = \frac{\delta_i}{k_i};$$

δ_i – допустима граница на основната грешка;

k_i – квантилен коефициент, който се определя от закона за разпределение на доверителната вероятност за определяне на грешката в зададен интервал.

На фиг.1 е представена структурната схема на канал за измерване на мощност.



Фиг.1 Структурната схема на канал за измерване на мощност.

На фиг. 1 са приети следните означения

ТТ и НТ – съответно токов и напрежителен трансформатор;

Пр. PI, Пр. IU – преобразуватели съответно на мощност и ток;

К – комутатор;

АЦП – аналогово-цифров преобразувател.

СКО на грешката при преобразуване на мощността се състои от пет съставлящи

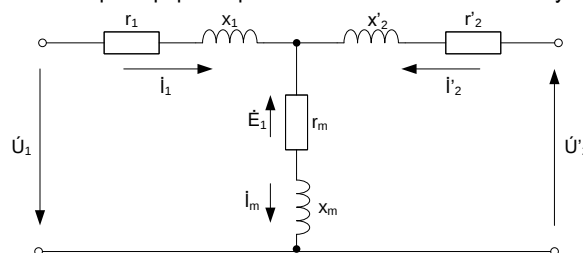
- Основна грешка - 1%;
- Грешка от пулсациите - 0,2%;
- Допълнителна грешка от измерване на $\cos\varphi$ - 0,15%;
- Грешка в следствие колебанията на захранващото напрежение - 0,1%;
- Грешка в следствие колебанията на температурата на обкръжаващата среда - 0,6%;
- Грешката на комутатор със 128 канала има три съставлящи:
 - грешка от спада на напрежението на отворен ключ - 0,4%;
 - грешка от утечката на ток във всеки от 127 затворени ключове на каналите - 0,13%;
 - грешка от пулсациите на носещата честота - 0,06%;

$$\delta_{КАЦП} = 0,3\%.$$

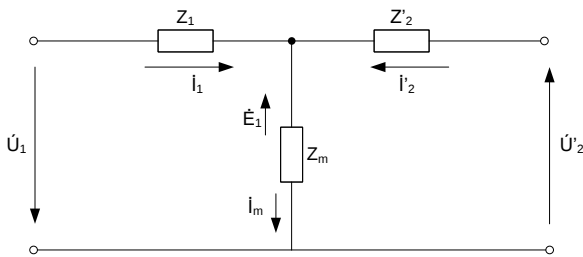
По формула 2 се изчислява $СКО \approx 1,31\%$.

3. Заместваща схема на силов трансформатор

Обектът на измерване – силов трансформатор, се представя най-често с неговата заместваща схема. От тази заместваща схема се изчислява импеданса на обекта за различни режими на работа по измерени параметри. На фиг. 2а е представена заместващата схема на двунамотъчен трансформатор с отчитане на магнитните загуби.



Фиг. 2а



Фиг. 26

На фиг. 2а са приети следните означения

- $\dot{U}_1, \dot{I}_1$ – първични стойности на напрежението и тока;
- $\dot{U}'_2, \dot{I}'_2$ – приведени стойности на вторичните напрежение и ток на трансформатора;
- $\dot{U}'_2 = k\dot{U}_2$; $\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}$;

където k – коефициент на привеждане или коефициент на трансформация.

- r'_2, x'_2 – приведени активно и индуктивно съпротивление на вторичната намотка;
 $r'_2 = k^2 \cdot r_2$; $x'_2 = k^2 \cdot x_2$;
- r_2, x_2 – активно и индуктивно съпротивление на реалната вторичната намотка;
- r_m, x_m – активно и индуктивно съпротивление на намагнитващата верига на трансформатора.

Намагнитващият ток I_m на трансформатора се определя с израза

$$\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$$

Ако се приемат означенията

$$\begin{aligned} Z_1 &= r_1 + jx_1; \\ Z'_2 &= r'_2 + jx'_2; \\ Z_M &= r_M + jx_M, \end{aligned}$$

то заместващата схема от фиг. 2а се представя с по компактна заместваща схема, показана на фиг. 2б, която представлява по същество пасивен четириполюсник.

Съпротивлението на намагнитващата верига Z_M в тази схема (фиг 2б) отразява явленията във феромагнитната сърцевина на трансформатора.

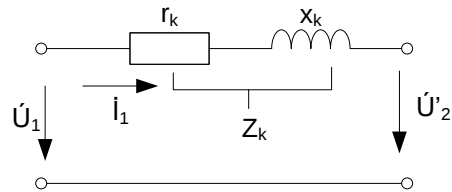
Стойността на Z_M е значително по-голяма от стойността на съпротивленията Z_1 и Z'_2 , които включват в себе си активните и индуктивните съпротивления на разсейване на намотките. За силови трансформатори в относителни единици стойностите на Z_M , Z_1 и Z'_2 се намират в следните граници

$$Z_M = 25 \div 200; Z_1 \approx Z'_2 = 0,025 \div 0,10.$$

3.1. Опростена заместваща схема на трансформатор

Тъй като $Z_M \gg Z_1 \sim Z'_2$, то в много случаи може да се положи, че $Z_M \approx \infty$, което означава прекъсване на намагнитващата верига в заместващата схема на трансформатора, показана на фиг. 2. При $Z_M \approx \infty$, токът $I_m = 0$, т.е. такова допускане е еквивалентно на пренебрегване на намагнитващият ток или на тока на празен ход, което при малката стойност на I_m в много случаи е допустимо. При това условие се получава, че $I_1 = -I'_2 = I$.

При $Z_M \approx \infty$ и $I_m = 0$ заместващата схема на трансформатора приема вида, показан на фиг. 3.



Фиг.3 Опростена заместваща схема на трансформатор

Параметрите на заместващата схема от фиг. 3 се определят с изразите

$$\begin{aligned} Z_k &= Z_1 + Z'_2; \\ r_k &= r_1 + r'_2; \\ x_k &= x_1 + x'_2; \end{aligned} \quad (3)$$

където Z_k, r_k и x_k се наричат импеданс, активно и индуктивно съпротивление на късо съединение на трансформатор. Съгласно заместващата схема на фиг. 3 трансформаторът е еквивалентен на съпротивлението Z_k . Обикновено за силови трансформатори стойността на Z_k в относителни единици се намира в границите $Z_k = 0,05 \div 0,15$.

3.1. Опитно определяне на параметрите на заместващата схема на трансформатора

За трифазен трансформатор при свързване на първичната намотка в звезда, параметрите на късо съединение се определят с изразите

$$Z_k = \frac{U_{k.\Delta}}{\sqrt{3}I_{k.\Delta}}; r_k = \frac{P_k}{3I_{k.\Delta}^2}; x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}.$$

При свързване на първичната намотка на трансформатора в триъгълник, параметрите на късо съединение се определят с изразите

$$Z_k = \frac{\sqrt{3}U_{k.\Delta}}{I_{k.\Delta}}; r_k = \frac{P_k}{I_{k.\Delta}^2}; x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}.$$

Съгласно заместващата схема на фиг. 2 импеданса на късо съединение се определя с израза

$$Z_k = Z_1 + \frac{Z_M Z'_2}{Z_M + Z'_2} \quad (4)$$

Тъй като Z_M е многократно по-голямо от Z'_2 , т.е. $Z_M \gg Z'_2$, то в знаменателя на израза (4) е възможно да се пренебрегне Z'_2 . Ето защо за Z_k се записват изразите (3).

Зависимостите (3) съответстват на заместващата схема на фиг. 3 при накъсо свързани вторични изводи ($U'_2 = 0$).

Напрежението $U_k = U_{k.H}$, при което токът на късо съединение е равен на номиналния, се нарича напрежение на късо съединение и се означава с U_k .

Стойността на напрежението на късо съединение U_k в относителни единици е равна на импеданса на късо съединение, т.е.,

$$U_{k*} = \frac{U_{k.H}}{U_H} = \frac{Z_k I_H}{U_H} = \frac{Z_k}{\frac{U_H}{I_H}} = \frac{Z_k}{Z_H} = Z_{k*}$$

Стойността на U_k на трансформатора се дава в проценти, т.е.

$$U_k \% = \frac{U_{kH}}{U_H} \cdot 100 = 100 \cdot U_{k*} = 100 \cdot Z_{k*}$$

Ако късото съединение възникне при номинално захранващо напрежение, то

$$I_k = \frac{U_H}{Z_k}$$

или в относителни единици

$$I_{k*} = \frac{1}{Z_{k*}} = \frac{100}{U_k \%}$$

Ако например, $U_k\% = 10\%$, то $I_k = 10 \cdot I_H$.

Диагностичен признак за наличие на деформации в намотките на силов трансформатор.

За разработването, производството и внедряването на системи за автоматизиран мониторинг на силови трансформатори в експлоатация е необходимо решаването на следните основни задачи:

- Определяне на минимално необходимия брой диагностични параметри, които трябва да се измерват и границите на тяхното изменение в зависимост от изменението на техническото състояние на трансформатора.
- Разработване на необходимите датчици за измерване на минимално необходимия брой диагностични параметри.
- Определяне на метрологичните изисквания към елементите на каналите за измерване.
- Избор на решение за техническите средства за измерване (датчици, средства за преобразуватели, предаване, събиране и обработка на информацията).
- Определяне на надеждността на автоматизираната система за мониторинг на силови трансформатори.

При разработването на САМСТ една от най-трудните задачи за решаване е свързана с определяне на необходимите диагностични параметри, по измерените стойности на които е възможно с достатъчна мощност да се определи текущото състояние и прогнозира остатъчния ресурс на трансформатор в експлоатация.

Един от най-познатите и използвани параметри на силовите трансформатори е импеданса на късо съединение Z_k . Редица изследвания показват и доказват, че импеданса на късо съединение Z_k на силови трансформатори е възможно да се използва, като диагностичен показател за определяне техническото му състояние.

Действието на електродинамичните сили, които възникват в тоководещите части на трансформатора при късо съединение (К.С.) в редица случаи е съпроводено с възникването на определени измествания и деформации на отделни проводници, в бобинните намотки, а също така и в самите бобини или токопроводители, намаляване на усилията на осево пресоване на намотките и др. което в крайна сметка води до възникването на аварии в трансформатора.

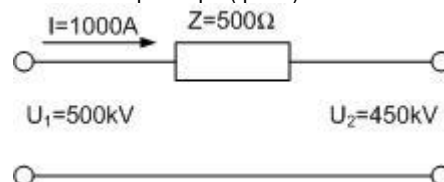
Простата зависимост на импеданса на късо съединение Z_k на трансформатора от вътрешния обем на намотките, които участват при опита на късо съединение позволява да се установи достатъчно точна връзка и зависимост между обема на механичните повреди с големината на изменението на импеданса ΔZ_k . Значителна част от осевите деформации и изместване на намотките е възможно също така да се открият по изменението на Z_k (U_k). Стойността на ΔZ_k зависи от конструкцията на намотките, от съотношението на геометричните размери на намотките, от технологията на изработване на намотките. На основата на резултатите от проведени изпитания на различни по мощност и конструкция силови трансформатори са определени допустимите норми за изменение на Z_k . Стойността на допустимото отклонение Z_k се определя в границите $\Delta Z_k = 1,5-3\%$

4. Анализ на точността на информационен измервателен сигнал

Към опасните дефекти в силовите трансформатори се отнасят осевото изместване на отделните бобини и радиалните им деформации. Над 80% от възникналите повреди в мощни силови трансформатори при къси съединения са свързани с загубата на радиална устойчивост на намотките. Основен параметър, който характеризира деформацията на намотките, се явява стойността на импеданса на късо съединение на трансформатора, Z_k . По изменението на Z_k е възможно да се определи степента на деформация на намотките. Периодичното измерване, в режим "on-line", позволява своевременно да се открият възникнали повреди в трансформатора и да се предприемат мерки за неговото извеждане от експлоатация и провеждане на ремонт.

За да се използват измененията на импеданса на късото съединение Z_k като информационен (диагностичен) показател за техническото състояние на намотките на силов трансформатор (възникване на деформации и изменения в конструкцията) е необходимо да се определи с каква точност трябва да се измерва стойността на импеданса Z_k . За да се отговори на този въпрос, се разглежда един пример със следните изходни данни: даден е силов трансформатор със следните паспортни (изходни) данни

- Напрежение на късо съединение $U_k = 10\%$
- Използва се заместващата схема на фиг.3., с нанесени параметри (фиг.4)



Фиг.4 Опростена заместваща схема на силов трансформатор с нанесени изходни данни.

- Параметри на измервателните трансформатори:
Напреженов трансформатор НТ с $U_H = 500000V$ и клас на точност – 0,5
Токов трансформатор ТТ с $I_H = 1000A$ и клас на точност – 0,2

Изчисляването на импеданса на намотките, за трансформатор с номинално напрежение 500 kV, по измерените стойности на тока и напрежението, се извършва с израз

$$Z = \frac{U_1 - U_2}{I_1} = \frac{500000 - 450000}{1000} = 50 \Omega$$

Средната стойност на съпротивлението се определя по израз

$$\langle Z \rangle = \frac{\langle U_1 \rangle - \langle U_2 \rangle}{\langle I_1 \rangle}$$

Изчисляване на ширината доверителния интервал на измервателните трансформатори

$$\text{за НТ: } \Delta U = U_H \frac{\text{кл.т.}}{100} = 500000 \frac{0,5}{100} = 2500 \text{ V};$$

$$\text{за ТТ: } \Delta I = I_H \frac{\text{кл.т.}}{100} = 1000 \frac{0,2}{100} = 2 \text{ A},$$

където кл.т – клас на точност; I_H , U_H – номинални ток и напрежение; ΔU , ΔI – широчини на доверителния интервал.

Определяне на точността на преките измервания тока и напрежението:

$$U_1 = (500000 \pm 2500) \text{ V}; U_2 = (450000 \pm 2500) \text{ V}; I_1 = (1000 \pm 2) \text{ A}.$$

Определяне на частните производни и на техните стойности при средни стойности на аргументите

$$\frac{\partial Z}{\partial U_1} = \frac{I}{I_1} = \frac{1}{1000} = 10^{-3};$$

$$\frac{\partial Z}{\partial U_2} = -\frac{I}{I_1} = -\frac{1}{1000} = -10^{-3};$$

$$\frac{\partial Z}{\partial I_1} = -(U_1 - U_2) \frac{1}{I_1^2} = -\frac{50000}{1000^2} = -0,05.$$

Определяне на съставлящите на грешката от всеки аргумент

$$\Delta Z_{U1} = \Delta U \cdot \frac{\partial Z}{\partial U_1} = 2500 \cdot 10^{-3} = 2,5;$$

$$\Delta Z_{U2} = \Delta U \cdot \frac{\partial Z}{\partial U_2} = -2500 \cdot 10^{-3} = -2,5;$$

$$\Delta Z_{I1} = \Delta I \cdot \frac{\partial Z}{\partial I_1} = -2 \cdot 0,05 = -0,1.$$

Определяне на абсолютната грешка при изчисляване на импеданса Z_k по измерените стойности на напрежението и тока

$$\Delta Z = \sqrt{(\Delta Z_{U1})^2 + (\Delta Z_{U2})^2 + (\Delta Z_{I1})^2} = \sqrt{2,5^2 + (-2,5)^2 + (-0,1)^2} = 3,537.$$

Определяне на относителната грешка при изчисляването на импеданса Z_k по измерените стойности на напрежението и тока

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{3,537}{50} \cdot 100\% = 7,074\%.$$

Извършва се проверка за вътрешните загуби в трансформатора в режим „on-line” по мощността на трансформатора.

Определяне на мощността на трансформатора

$$S = U_1 I_1 - U_2 I_2 = (U_1 - U_2) I_1 = 50000 \cdot 1000 = 50000 \text{ kVA}.$$

Определяне на средната мощност на трансформатора:

$$\langle S \rangle = (\langle U_1 \rangle - \langle U_2 \rangle) \langle I_1 \rangle.$$

Определяне на частните производни и на техните стойности при средна стойност на аргументите:

$$\frac{\partial S}{\partial U_1} = I_2 = 1000;$$

$$\frac{\partial S}{\partial U_2} = -I_2 = -1000;$$

$$\frac{\partial S}{\partial I_1} = -(U_1 - U_2) = -50000.$$

Определяне на съставлящите на грешките от всеки аргумент

$$\Delta S_{U1} = \Delta U \cdot \frac{\partial S}{\partial U_1} = 2500 \cdot 1000 = 2,5 \cdot 10^6;$$

$$\Delta S_{U2} = \Delta U \cdot \frac{\partial S}{\partial U_2} = -2500 \cdot 1000 = -2,5 \cdot 10^6;$$

$$\Delta S_{I1} = \Delta I \cdot \frac{\partial S}{\partial I_1} = 2 \cdot (-50000) = -10^5.$$

Определяне на абсолютната грешка

$$\Delta S = \sqrt{(\Delta S_{U1})^2 + (\Delta S_{U2})^2 + (\Delta S_{I1})^2} = \sqrt{(2,5 \cdot 10^6)^2 + (-2,5 \cdot 10^6)^2 + (-10^5)^2} \approx 3,537 \cdot 10^6$$

Определяне на относителната грешка при изчисляване на вътрешните загуби в трансформатора

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{3,537}{50} \cdot 100\% = 7,074\%.$$

5. Заключение

1. Относителната грешка при определяне на стойността на импеданса Z_k по измерените стойности на напрежението и тока е 7,074%.

Относителната грешка при определяне на мощността на вътрешните загуби е също 7,074%.

Получените стойности на грешките са изчислени с отчитане класа на точност само на първичните преобразуватели с клас на точност за НТ - 0,5 и за ТТ - 0,2. Ако се отчете и грешката на измервателните прибори, и ако се направи опит да се отчете и влиянието на намагнитващите токове, то грешката на измерване ще бъде още по-голяма.

2. За определяне на деформацията на намотките за целите на диагностиката е необходимо да се знае изменението на Z_k дори с 1%, тъй като е важно да се определи и установи именно възникването на началните (първите) деформации на намотките, за да може своевременно да се предотврати аварийното излизане на трансформатора с разрушения, които значително повишават стойността на ремонта от една страна и от друга страна затрудняват определянето на причините за аварии.

Получаването на стойности за $\Delta Z_k \geq 3\%$ са информация и за наличието в намотките на трансформатора на недопустими деформации.

3. В съответствие със заводските протоколи за изпитване на нагряване, вътрешните загуби на трансформатора (сумата от загубите на празен ход и загубите при късо съединение) се намират в следните граници

- за трансформатори с мощност $S=50 \div 100$ MVA $\Delta S\%=(0,4 \div 0,5).S_N$;
- за трансформатори с мощност $S=100 \div 300$ MVA $\Delta S\%=(0,3 \div 0,4).S_N$;
- за трансформатори с мощност $S=300 \div 500$ MVA $\Delta S\%=(0,2 \div 0,3).S_N$;
- за трансформатори с мощност $S>500$ MVA $\Delta S\%=(0,1 \div 0,2).S_N$;

4. От получените резултати следва, че класът на точност на измервателните трансформатори (НТ-0,5 и ТТ-0,2S) е недостатъчен за реализирането на методика за определяне на вътрешните загуби в трансформатора в режим „on-line“.

6. Литература

- [1]. Сегреев А.Г. Метрология. Стандартизация. Сертификация. Москва, Логос, 2005
- [2]. Вольдек А.И. Электрические машины, Ленинград, Энергия, 1974.
- [3] Наредба №3 за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии (Обн. в ДВ бр. 90 и 91 от 2004 г.)
- [4] Василев А. Системи за непрекъснат контрол на силовите трансформатори, *Енергетика*, 2010, №3
- [5] Вопросы трансформаторостроения на 43-и сесии СИГРЭ (22-27. Август 2010 г., г. Париж), *Електричество*, 2011, №1
- [6] IEC 60422 ed3.0, Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance, 2005
- [7] ГОСТ 14209-97 Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов, 2002
- [8] Sergio Bertagnolli, The ABB approach to short-circuit duty of power transformers, Third revised edition, ABB Management Services Ltd Transfromers, Zurich, 2007