

УДК [(621.314.222.6:538.7).004.17:621.365.5].001.2 DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.067>**ТЕПЛОВА СТІЙКІСТЬ ТРАНСФОРМАТОРА ДО ДІЇ ГЕОМАГНІТНИХ СТРУМІВ****В.Ф. Іванков**¹, канд. техн. наук, **А.В. Басова**², канд. техн. наук, **І.В. Хімюк**³, канд. техн. наук^{1,2} – ПрАТ «Запоріжтрансформатор»,
Дніпровське шосе, 3, Запоріжжя, 69600, Україна
³ – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Українаe-mail: vcpkpi@ied.org.ua

Визначено частотний спектр струму намагнічування, який збуджується додатково до номінального струму в обмотці вищої напруги. Розрахунками магнітного поля, втрат, а також нагрівів обмоток, елементів конструкції та бака підтверджено теплову стійкість п'ятистріжневого трансформатора потужністю 630 МВА до дії геомагнітних індукованих струмів. Бібл. 6, рис. 3.

Ключові слова: трансформатори, геомагнітні індуквані струми, втрати, нагрів, розрахунки.

Вступ. Змінна сонячна магнітна активність викликає зміни магнітного поля Землі, які індукують в її провідних шарах електричні потенціали. При значних відстанях між точками заземлення нейтралей обмоток трансформаторів протяжних високовольтних ліній, особливо при їхньому меридіанному розташуванні, приєднаними до електроустановки дротами протікають квазіпостійні геомагнітні індуквані струми (ГІС) $I_{ГІС}$ [1–3]. Якщо не застосовуються так звані методи активного блокування або компенсації постійних струмів, то виникає можливість насичення магнітних систем (МС) за рахунок накладення змінного і постійного магнітних потоків. Замикання в обмотках вищої напруги (ВН) трифазних трансформаторів постійного струму $I_{DC}=I_{ГІС}/3$ спричиняє у ВН появу незбалансованого несинусоїдального струму намагнічування (СТН) додатково до номінальних змінних струмів. Це може призводити до підвищення нагріву елементів конструкції [1–3], особливо на стрижнях МС та баку.

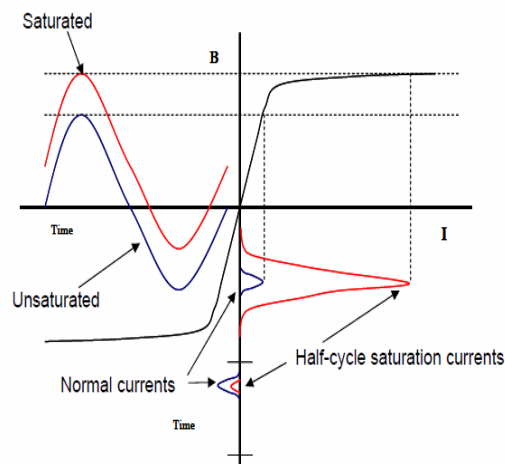
Індукцію в ненасиченому й насиченому стрижнях і виникнення СТН з півперіодним максимумом ілюструє рис. 1 [3]. Найбільші СТН є характерними для трифазних п'ятистріжневих або однофазних одностріжневих трансформаторів з боковими ярами.

Метою роботи є визначення теплової стійкості потужного силового трансформатора до дій геомагнітних струмів.

Об'єкт. У цій роботі об'єктом досліджень є п'ятистріжневий трансформатор типу ТДЦ-630000/500 з фазною номінальною напругою $U=525/\sqrt{3}$ кВ, частотою $f_1=50$ Гц, номінальним струмом 346,4 А і з масляним охолодженням виду OFAF. У специфікації на трансформатор обумовлено струм $I_{DC}=30/3=10$ тривалістю 30 хв.

Струм намагнічування. Визначення амплітуд, гармонічного спектра СТН проводиться аналітичним методом [4]. Прийmemo, що активний опір обмотки ВН набагато менший за її динамічний індуктивний опір, який через насичення МС визначається індуктивністю L_{sat} обмотки без стрижня $x_{sat} = \omega L_{sat}$, $\omega = 2\pi f$.

Пікоподібний СТН за кута насичення α виникає на інтервалі $\pi - \alpha \leq \omega t \leq \pi + \alpha$ і визначається формулою [4] $i_{mag}(t, \alpha) = -A(\cos \omega t + \cos \alpha)$, де $A = \sqrt{2} U / x_{sat}$, а кут насичення знаходиться з умови рівності постійного струму і нульової гармоніки розкладення СТН: $I_{DC} = i_0 = A(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) / \pi$. Максимальне значення СТН дорівнює $i_{max} = A(1 - \cos \alpha)$. Фаза СТН визначається фазою

**Рис. 1**

прикладеної напруги, тому максимуми збалансованих робочих струмів обмоток НН і ВН зсунуті на кут $\pi/2$ чи на інший так званий кут навантаження φ .

Для досліджуваного трансформатора визначено індуктивність $L_{sat}=1,8$ Гн і, наслідуючи наведені вище алгоритми, параметри СТН. Результати розрахунків представлено на рис. 2. Часові залежності СТН показано для струмів I_{DC} 10, 20, 30 А відповідно точками, пунктирною і суцільною лініями. Співвідношення струмів гармонік та першої гармоніки $i_n / i_1, n = 2, \dots$ надано в табл. 1

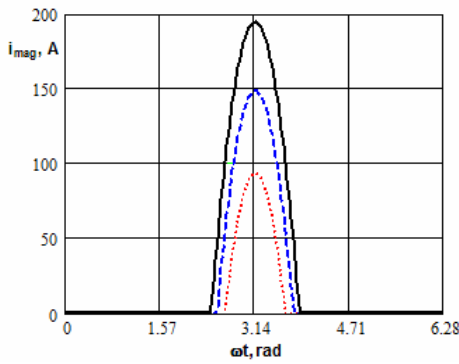


Рис. 2

Таблиця 1

n	I _{DC} , А		
	10	20	30
2	0,93	0,88	0,85
3	0,81	0,71	0,63
4	0,67	0,51	0,39
5	0,51	0,31	0,18
6	0,35	0,14	0,02
7	0,21	0,01	0,07
8	0,09	0,06	0,09
9	0,00	0,09	0,06
10	0,06	0,07	0,02

Втрати. У більшості відомих робіт приймається умова навантаження, коли кут між векторами струму та напруги дорівнює 90° , тобто коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)=1$. Тому номінальний струм в обмотках досягає максимуму в момент $\pi/2$, а СТН – у момент π , тобто із зсувом також на 90° . Тому джоулеві (теплові) втрати від сумарного первинного струму i_p у ВН, який

визначається номінальним первинним струмом I_{np} і струмом намагнічування i_{mag} , є сумою втрат від їхніх діючих (середніх квадратичних – *rms*) значень: $i_p^2(rms) = I_{np}^2 + i_{mag}^2(rms-DC)$. При цьому для визначення омичних втрат у ВН додатково враховуються втрати від струму I_{DC} , які в наведеній формулі вилучені із значення *rms* струму намагнічення. Для умов, коли $\cos(\varphi) \neq 1$, втрати необхідно визначити векторною сумою з врахуванням кута φ .

Якщо кут навантаження дорівнює 90° , вектори номінальних струмів в обмотках і вектори вищих гармонік розкладення СНТ є ортогональними. Тому в цій роботі наведену вище формулу використовуємо і для визначення омичних втрат та додаткових втрат на вихрові струми в обмотках, у деталях конструкції з немагнітної та з феромагнітної сталі, які зумовлю-

ються відповідними магнітними полями (МП).

Коефіцієнти збільшення втрат від вищих гармонік. Застосуємо відомий метод визначення втрат від несинусоїдальних струмів (полів) за втратами від першої гармоніки і коефіцієнтами k збільшення втрат від вищих гармонік відповідно для омичних втрат в обмотках,

у немагнітних і феромагнітних частинах конструкції: $k_{i^2R} = \sum_n^K i_n'^2, k_N = \sum_n^K i_n'^2 \cdot n^2,$

$$k_F = \sum_n^K i_n'^2 \cdot n^{0.85}.$$

У табл. 2 для низки значень струмів I_{DC} наведено значення кутів насичення, струмів i_{max} , діючі значення першої i_1 гармоніки косинус-розкладення СТН і значення вказаних коефіцієнтів збільшення втрат k .

Таким чином, розрахунок втрат у трансформаторі при ГІС зводиться до трьох етапів. На першому етапі виконується розрахунок МП і втрат P_n за номінальних, збалансованих струмів у обмотках з ненасиченою МС. На другому – розрахунок МП і втрат $P_{mag,1}$ від струму першої гармоніки СТН у ВН у разі насиченої МС. На третьому – складання втрат за раніш наведеним виразом для джоулевих втрат з використанням коефіцієнтів k на вищі гармоніки: $P_{ГІС} = P_n + kP_{mag,1}$

Таблиця 2

I _{DC} , А	α , rad	i_{max} , А	i_1 , А	k_{i^2R}	k_N	k_F
10	0,503	94,0	19,5	3,4	31,0	7,5
20	0,637	148,9	38,4	2,7	16,7	5,1
30	0,733	194,7	57,0	2,3	11,8	4,0

Розрахунки МП, втрат, нагрівів виконано за галузевими чисельно-аналітичними,

розрахунково-емпіричними методиками і методами чисельного моделювання [5], застосування яких для досягнення мети досліджень детально представлено в [6].

Магнітне поле в активній частині.

З використанням 2D FEM-моделі виконано розрахунок МП у перерізі за поперечною віссю фази трансформатора. У режимі номінальних струмів стрижень ненасичений, тому зазвичай силові лінії концентруються (рис. 3 а) у головному каналі розсіяння, при цьому осьова складова індукції МП дорівнює 310 мТл.

Нескомпенсоване МП першої гармоніки СТН $I_1 = i_1 / \sqrt{2} = 13,8$ А має виражений соленоїдальний характер (рис. 3 б). Стрижень МС насичений до значення відносної магнітної проникності 3 о.е. Осьова складова індукції МП на внутрішній вертикальній твірній обмотки ВН дорівнює 12 мТл і приблизно такої ж інтенсивності (10 мТл) досягає на поверхні стрижня.

Зауважимо, що у випадку номінальних струмів ця складова на поверхні ідеального феромагнітного стрижня відсутня.

На рис. 3 в червоною лінією показано знакозмінну нормальну складову індукції МП до поверхні стрижня МС у номінальному режимі, синьою лінією з точками – для струму СТН. Значення приведено у в.о. до максимальних відповідно 147 і 34 мТл. Також на рис. 3 в чорною лінією у в.о. показано розподіл за висотою стрижня осьового поля СТН, приведенного до 10 мТл.

Зауважимо, що наведений підхід є дещо спрощеним відносно врахування струмів третьої і кратних їй (непарних) гармонік СТН, які з обмотки ВН трансформуються і замикаються в обмотці НН за схемою з'єднання «трикутник» [2]. МП вказаних гармонік необхідно було б визначити за умови насиченого стрижня, але від струмів цих гармонік як в НН, так і у ВН.

При цьому слід врахувати, що їх ампервитки не рівні між собою через неідеальний магнітний зв'язок обмоток, розташованих на насиченому стрижні. Такі струми визначили б деякий середній розподіл силових ліній між рис. 3 а і б. За цим полем необхідно було б визначити і відповідні втрати. У цій роботі вказане явище не враховано через малі значення СТН.

Сумарні втрати, нагрів масла у баку. Для номінального режиму досліджуваного трансформатора розраховано сумарні втрати: в МС, в обмотках, в елементах конструкції активної частини, в баку і за їхнім значенням – перевищення температур (ПТ) середнього і верхнього масла у баку над температурою охолодного середовища (ТОС).

Постійні часу нагріву обмоток, елементів конструкції активної частини, бака, як і задана тривалість дії ГІС (30 хв), менші, ніж постійна часу нагріву масла у баку трансформатора (декілька годин). Це дозволяє припустити незмінність температур масла під час дії ГІС, а також визначити перевищення температур обмоток та елементів конструкції в умовах усталеного теплового режиму з використанням галузевих методик [5].

Вказані умови відповідають так званому «базовому ГІС: струми з амплітудами від низьких до помірних, які підтримуються протягом від долей години до декількох годин» [2].

У стандарті [2] рекомендовано також визначити термічну реакцію трансформаторів при «імпульсах ГІС: імпульси струмів великої амплітуди тривалістю від долей хвилини до декількох хвилин». При таких умовах теплові процеси не є усталеними, можливо їх слід розглядати як діабатичні, тобто без теплообміну з охолодним маслом. Вказані режими ГІС по-

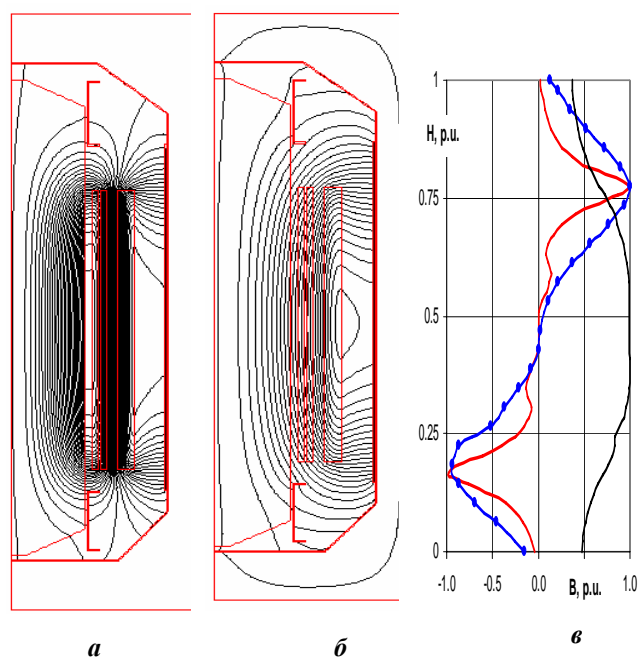


Рис. 3

винні бути визначені в специфікації замовника трансформатора, які необхідно визначати за експериментальними та теоретичними дослідженнями для відповідних мереж експлуатації устаткування [2, 3].

Втрати, нагрів в обмотках. Розрахунок додаткових втрат на вихрові струми виконано за відомими виразами Фільда. Розрахунки нагрівів котушкових обмоток трансформатора проведено за галузевою розрахунково-емпіричною методикою для виду охолодження OFAF. Для номінального режиму визначено, що найбільш нагрітою є обмотка ВН.

Втрати, нагрів в елементах конструкції.

Пресувальна (підйомна) пластина з немагнітної сталі на стрижні МС. Розрахунок проведено за значеннями розподілу нормальної складової МП до поверхні стрижня по рис. 3 в чисельним методом з урахуванням осьових вирізів по висоті пластини для зниження вихрових струмів і втрат. Найбільших значень нагріву досягають на краях пластини в зоні максимального МП навпроти верхніх торців обмоток. У режимі ГС враховуються додаткові втрати в пластині від осьового поля за рис. 3 в.

Крайній пакет стрижня МС. Розрахунок виконувався за моделлю немагнітної пластини, товщина якої визначалася емпіричною залежністю для шару листів електротехнічної сталі з врахуванням розмірів пакета і амплітуди нормальної до поверхні складової індукції МП за рис. 3 в. Для крайнього пакета додатково враховувалися втрати від магнітного потоку в стрижні МС.

Ярмова балка (верхня). Із застосуванням чисельної тривимірної FEM-моделі трансформатора визначено, що найбільш нагрітим є місце зварювання немагнітної горизонтальної полиці з виступами для пресування обмоток і вертикальної феромагнітної стінки балки.

Бак з магнітними шунтами. Для розрахунків використано чисельно-аналітичну квазітривимірну розрахункову модель трансформатора. На першому етапі суперпозицією МП обмоток окремих стрижнів моделі розраховується просторово-часовий розподіл тривимірного первинного МП у повітрі по контуру, який співпадає з поверхнею бака, без бака. На другому – поле та втрати на імпедансній поверхні феромагнітного бака і, зрештою, – нагрів бака.

Із застосуванням чисельної тривимірної моделі трансформатора також досліджено втрати і нагрів немагнітної вставки в кришці бака від сумарного МП обмоток і відведень НН для номінального режиму роботи. За значних СТН слід врахувати можливе збільшення втрат у кришці бака за рахунок трансформування третьої і кратних їй гармонік у обмотку НН.

Внутрішні пакети стрижня МС. Втрати в МС трансформатора в номінальному режимі визначаються через питомі втрати електротехнічної сталі в однорідних ділянках, а в зонах шихтування пластин – з відповідними коефіцієнтами підвищення втрат. Розрахунок втрат при ГС ускладнений через недостатню вивченість складного півперіодного перемагнічування сталі по «зсунутій» частковій петлі гістерезису. За відомими експериментальними даними збільшення втрат в МС при струмах DC може досягати близько 30 %. При теплових розрахунках групи пакетів, відокремлені охолодними каналами, замінюються еквівалентними прямокутниками з рівномірними втратами в перерізі, з анізотропною тепловою провідністю і з неоднорідними умовами теплообміну.

Висновок. [6] ПТ над ТОС найбільш нагрітої обмотки ВН складає 63 К, а найбільш нагрітої точки – 77 К, що не перевищує відповідні нормовані значення 65 і 78 К при ТОС 20° С [1]. Визначено, що вже при струмі I_{DC} 50 А вказані ПТ досягають недопустимих значень 67 і 82 К. ПТ над ТОС в немагнітних пресувальних пластинах зростає з 50 К у номінальному режимі до 63 К у разі дії ГС, у крайніх пакетах стрижнів МС – з 41 до 52 К, внутрішнього пакета стрижня – з 68 до 74 К, верхньої ярмової балки – з 58 до 67 К, стінки бака – з 47 до 57 К, не перевищуючи, однак, нормованого значення 95 К.

Таким чином, підтверджено термічну стійкість досліджуваного трансформатора до дії заданого рівня геомагнітних індуктованих струмів.

1. IEC 60076-7. 2018. Power transformers-Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers. 89.
2. IEEE Std C57.163–2015. IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances. 38.
3. Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System. GMDTF Interim report: Norton American Electric Reliability Corporation. 2012. 137 p.
4. Bolduc L., Aubin J. Effect of direct currents in power transformers. Part I. A general theoretical approach. Part II. Simplified calculations for large transformers. *Electric Power Systems Research*, 1977–1978. No 1. Pp. 291–304.
5. Іванков В.Ф., Басова А.В., Хімюк І.В. Методи моделювання трансформаторів та реакторів. Київ: Наш формат, 2017. 490 с.
6. Ivankov V.F., Basova A.V. Calculation of geomagnetic induced currents effecting on the high-power transformer. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2019. No 4. Pp. 8–21.

УДК [(621.314.222.6:538.7).004.17:621.365.5].001.2

ТЕПЛОВАЯ СТОЙКОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРА К ДЕЙСТВИЮ ГЕОМАГНИТНЫХ ТОКОВ

В.Ф. Иванков¹, канд. техн. наук, **А.В. Басова**², канд. техн. наук, **И.В. Химюк**³, канд. техн. наук,

1,2 – ЧАО «Запорожтрансформатор»,

Днепровское шоссе, 3, Запорожье, 69600, Украина

3 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Определен частотный спектр тока намагничивания, который возбуждается дополнительно к номинальному току в обмотке высшего напряжения. Расчетами магнитного поля, потерь, а также нагревов обмоток, элементов конструкции и бака подтверждена тепловая стойкость пятистержневого трансформатора мощностью 630 МВА к действию геомагнитных индуктируемых токов. Библиограф. 6, рис. 3.

Ключевые слова: трансформаторы, геомагнитные индуктируемые токи, потери, нагрев, расчеты.

HEAT RESISTANCE OF THE TRANSFORMER TO ACTION OF GEOMAGNETIC CURRENTS

V.F. Ivankov¹, **A.V. Basova**², **I.V. Khimjk**³,

1,2 – PrJSC «ZTR»,

Dniprovskre shose, 3, Zaporizhya, 69600, Ukraine

3 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The frequency spectrum of magnetization current, which is excited in addition to the nominal current in the winding of the higher voltage, were defined. Calculations of the magnetic field, losses, as well as heating of windings, structural elements and tank confirmed the thermal resistance of the five-core transformer with a capacity of 630 MBA to the action of geomagnetic inducted currents. References 6, figures 3.

Key words: transformers; geomagnetic induced currents; losses; temperature rises; calculations.

1. IEC 60076-7. 2018. Power transformers-Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers, 89.
2. IEEE Std C57.163–2015. IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances. 38.
3. Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System. 2012. GMDTF Interim report: Norton American Electric Reliability Corporation, 137.
4. Bolduc L., Aubin J. 1977/1978. Effect of direct currents in power transformers. Part I. A general theoretical approach. Part II. Simplified calculations for large transformers. *Electric Power Systems Research*. No 1. Pp. 291–304.
5. Ivankov V.F., Basova A.V., Khimiuk I.V. Metody modeling of transformers and reactors. Kyiv: Nash format, 2017. 490 p. (Ukr)
6. Ivankov V.F., Basova A.V. Calculation of geomagnetic induced currents effecting on the high-power transformer. *Electrical Engineering And Power Engineering*. 2019. No 4. Pp. 8–21.

Надійшла 05.01.2020

Received 05.01.2020