

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTIC AND MANAGEMENT OF POWER PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.31

І.В. Притискач, канд. техн. наук, ст. викл., ORCID 0000-0002-1892-0054
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ УТОЧНЕНИХ ТЕПЛОВИХ МОДЕЛЕЙ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТУВАННЯ

Робота систем діагностування в робочих режимах потребує необхідного врахування впливу фізичних процесів у трансформаторі на результати вимірювань діагностичних параметрів. Це, перш за все, процеси, пов'язані зі зміною навантаження та відповідним нагріванням і охолодженням трансформатора. В роботі виконано дослідження та співставлення нових уточнених теплових моделей трансформатора та проаналізовано можливості їх використання для визначення базових значень діагностичних параметрів трансформатора. Показано, що найбільш доцільним є використання уточненої теплової моделі трансформатора, яка враховує вплив вологовмісту масла на теплові характеристики трансформатора при зміні режимів його роботи.

Ключові слова: силовий трансформатор, діагностичний параметр, температура масла у верхніх шарах, вологовміст масла, теплова модель, температура найбільш нагрітої точки обмотки.

Вступ. Надійне і ефективне функціонування систем електропостачання вимагає безвідмовної роботи основного обладнання електричних мереж, зокрема – силових трансформаторів. Зважаючи на значні показники термінів експлуатації діючого обладнання, спостерігається зростання кількості аварійних ситуацій, які спричинені старінням ізоляції та погіршенням технічного стану окремих вузлів трансформаторів [1]. Одним із основних шляхів зменшення кількості аварійних ситуацій, пов'язаних із виходом з ладу силових трансформаторів, є їх своєчасне технічне обслуговування та виведення обладнання з експлуатації до виникнення критичних пошкоджень [2]. Це завдання вирішується завдяки широкому впровадженню систем моніторингу силових трансформаторів, які виконують функції діагностування стану трансформаторів та виявлення розвитку дефектів на ранніх етапах [3].

Ефективне діагностування та оцінювання стану трансформаторів відіграє важливу роль для впровадження систем технічного обслуговування за станом, що забезпечує зменшення витрат на поточну експлуатацію електромережевого обладнання. Зважаючи на це, проблема ефективного діагностування трансформаторів із мінімальними витратами є актуальною та важливою для підвищення ефективності функціонування систем електропостачання.

Зважаючи на ринкові умови роботи електропостачальних компаній, перед ними постає завдання мінімізувати капітальні затрати на системи діагностування із одночасним забезпеченням високого рівня надійності виявлення дефектів. Таким вимогам відповідають системи діагностування із оптимально підібраним набором первинних датчиків відповідно до класу напруги та потужності трансформатора. Такий підхід вимагає вибору відповідних методів діагностування, кожен з яких обмежений певним набором діагностичних параметрів.

Перелік найбільш ефективних методів діагностування силових трансформаторів включає такі методи як хроматографічний аналіз газів, розчинених в маслі бака трансформатора, вимірювання рівня часткових розрядів в основних вузлах трансформатора, аналіз теплового стану трансформатора, що включає вимірювання температур масла у верхніх шарах та температури найбільш нагрітих точок обмоток, визначення стану високовольтних ввідів трансформатора на основі вимірювання струмів витоку та тангенса кутів діелектричних втрат ізоляції тощо [4]. Ефективність застосування кожного окремого методу діагностування визначається, перш за все, співвідношенням кількості дефектів, які може виявити метод, що можуть призвести до незворотного пошкодження трансформатора із спричиненням значних перерв у електропостачанні споживачів, та витрат коштів на застосування

методу, що включає вартість засобів вимірювання первинних діагностичних параметрів та систем обробки й аналізу інформації.

Сучасні підходи до діагностування силових трансформаторів орієнтовані на роботу без виведення обладнання з експлуатації [5]. Вимірювання діагностичних параметрів відбувається в робочих режимах під навантаженням. Це дає змогу виконувати діагностування безперервно та максимально швидко виявляти появу нових дефектів, що можуть спричинити вихід трансформатора з ладу.

З точки зору старіння ізоляції трансформатора, найбільш важливими діагностичними параметрами є температури найбільш нагрітої точки обмотки та масла у верхніх шарах. Тому для ефективної роботи системи діагностування необхідно використовувати найбільш повну теплову модель трансформатора, яка дає змогу отримувати точну оцінку цих параметрів. В літературі пропонуються різні підходи до визначення теплових параметрів трансформаторів, кожен із яких враховує набір номінальних значень і режимів роботи трансформатора. Доцільно оцінити можливості кожного з цих методів, та вибрати кращий із них для застосування в системі діагностування.

Мета та завдання. Метою дослідження є удосконалення методу оцінювання теплових діагностичних параметрів силового трансформатора із врахуванням особливостей режимів його роботи на основі використання уточнених теплових моделей трансформатора, що враховують вплив вологовмісту масла на теплові характеристики трансформатора, для підвищення достовірності оцінювання поточного стану трансформатора.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати дослідження та співставлення нових уточнених теплових моделей трансформатора та проаналізувати можливості їх використання для визначення базових значень діагностичних параметрів трансформатора. При цьому доцільно виконати моделювання характерних температур трансформатора для оцінювання відмінностей у результатах із використанням різни моделей та перевірити результати використання уточненої моделі при зміні режимів роботи трансформатора.

Матеріал і результати досліджень. Функціональна структура модулів аналізу діагностичних параметрів, яка реалізує метод порівняння поточних значень діагностичних параметрів з базовими представлена на рис.1. Розрахунок базових значень виконується за допомогою математичних моделей фізичних процесів у трансформаторі, які описують його роботу в нормальному стані за відсутності дефектів.

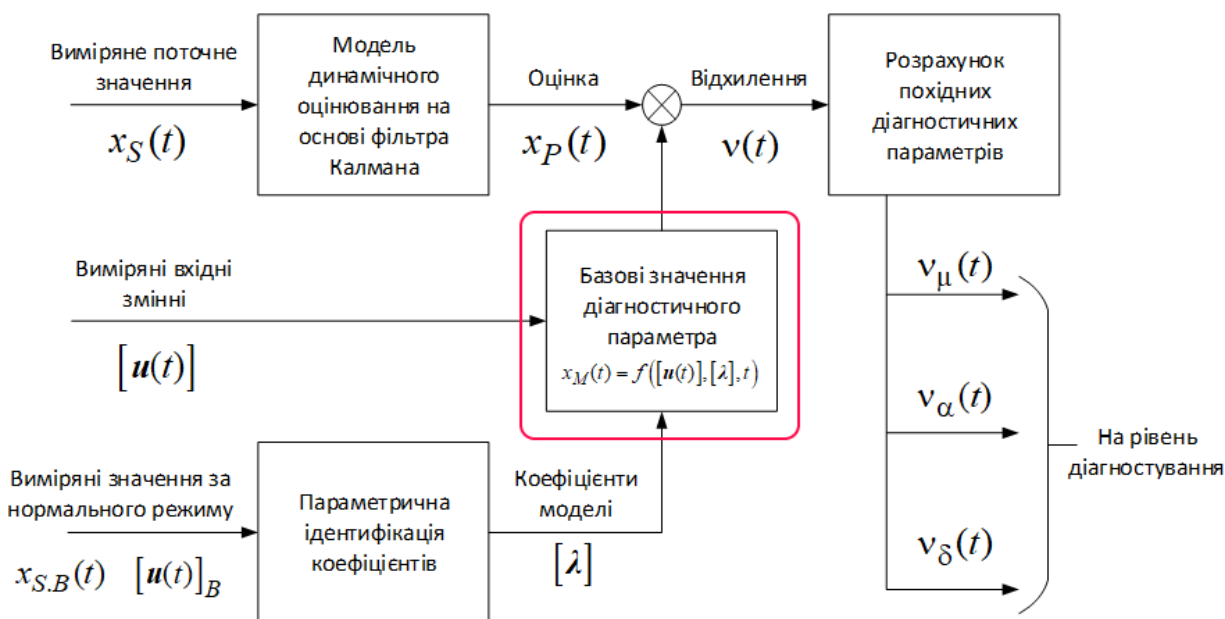


Рисунок 1 – Функціональна структура модулів аналізу діагностичних параметрів

Стандартна модель для визначення температури масла у верхніх шарах та температури найбільш нагрітої точки (ННТ) обмотки трансформатора описана в керівництві ІЕС 60076-7 [6]. Використання такої моделі розглянуто в [7].

В [8] запропоновано відмінну від стандартної еквівалентну теплову схему трансформатора для виконання теплового моделювання на основі теорії теплопередачі. У цій моделі температура ННТ визначається із врахуванням нелінійності термічного опору масла. Остаточна форма диференціальних рівнянь моделі має такий вигляд:

- для температури масла

$$\frac{1+RK^2}{1+R} \Delta\theta_{or}^n = \tau_0 \frac{d\theta_o}{dt} + (\theta_o - \theta_a) \frac{1}{n},$$

де θ_o – температура масла; θ_a – температура навколишнього середовища; τ_0 – постійна часу нагрівання масла; K – коефіцієнт завантаження трансформатора; $\Delta\theta_{or}$ – перевищення температури масла за номінального навантаження; R – відношення втрат; n – коефіцієнт, що залежить від типу трансформатора та режиму його роботи;

- для температури ННТ

$$K^2 \Delta\theta_{hr}^m = \tau_w \frac{d\theta_h}{dt} + (\theta_h - \theta_o) \frac{1}{m};$$

де $\Delta\theta_h$ – температура ННТ обмотки; $\Delta\theta_{hr}$ – усталене перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки за заданого навантаження; τ_w – постійна часу нагрівання обмотки; m – коефіцієнт, що залежить від типу трансформатора та режиму його роботи.

В [9] вдосконалено попередню модель завдяки врахуванню залежностей в'язкості масла і змінних втрат потужності в обмотках трансформатора від температури. Диференціальні рівняння, в цьому випадку, мають такий вигляд:

- для температури масла

$$\frac{1+RK^2}{1+R} \Delta\theta_{or} = \tau_0 \frac{d\theta_o}{dt} + \frac{(\theta_o - \theta_a)^{1+n}}{\Delta\theta_{or}^n \mu_{pu}^n},$$

де μ_{pu} – відношення в'язкості масла за певної температури масла до в'язкості масла за номінальної температури, що може бути обчислене за емпіричною залежністю:

$$\mu_{pu} = e^{2797.3 \left(\frac{1}{\theta_o} - \frac{1}{\theta_{or}} \right)},$$

де θ_{or} – номінальна температура масла в верхніх шарах

- для температури ННТ

$$K^2 P_{Cu.pu} \Delta\theta_{hr} = \tau_w \frac{d\theta_h}{dt} + \frac{(\theta_h - \theta_o)^{1+m}}{\Delta\theta_{hr}^m \mu_{pu}^m};$$

де $P_{Cu.pu}$ – відносні втрати в міді, що визначаються як:

$$P_{Cu.pu} = P_{DC.pu} \frac{\theta_h + 235}{\theta_{hr} + 235} + P_{Ed.pu} \frac{\theta_{hr} + 235}{\theta_h + 235},$$

де $P_{DC.pu}$ – відносні омичні втрати в міді, $P_{Ed.pu}$ – відносні втрати на вихрові струми.

Розглянуті теплові моделі враховують тільки теплові процеси в маслі. В них не враховується вплив на теплові характеристики трансформатора вмісту вологи в маслі та паперово-целюлозній ізоляції, що може впливати на точність розрахунку значень температур масла та ННТ. При значних величинах вологовмісту та температури, теплопровідність паперово-целюлозній ізоляції може збільшитися на 50% що варто враховувати при тепловому моделюванні. Відповідна модель представлена в [10]. Диференціальні рівняння для визначення температур мають такий вигляд:

- для температури масла

$$\frac{1 + RK^2}{1 + R} \Delta\theta_{or} = \tau_0 \frac{d\theta_o}{dt} + \frac{(\theta_o - \theta_a)^{1+n}}{\Delta\theta_{or}^n} \cdot \frac{1 + \lambda_R}{\mu_{pu}^n + \lambda_R k_{pu} \left(\frac{\Delta\theta_o}{\Delta\theta_{or}} \right)^n},$$

де λ_R – відношення між тепловим опором целюлозо-паперової ізоляції та конвективним тепловим опором масла; k_{pu} – коефіцієнт, що обчислюється за емпіричною формулою:

$$k_{pu} = \frac{\frac{4276,6}{0,9963 + \alpha e^{\theta_{ir} + 273}} + \beta(\theta_{ir} - 60)}{\frac{4276,6}{0,9963 + \alpha e^{\theta_i + 273}} + \beta(\theta_i - 60)},$$

де θ_i – температура паперово-целюлозної ізоляції, θ_{ir} – номінальна температура паперово-целюлозної ізоляції; α – величина, що залежить від вологовмісту паперово-целюлозної ізоляції, β – коефіцієнт.

- для температури ННТ

$$K^2 P_{Cu.pu} \Delta\theta_{hr} = \tau_w \frac{d\theta_h}{dt} + \frac{(\theta_h - \theta_o)^{1+m}}{\Delta\theta_{hr}^m} \cdot \frac{1 + \lambda_R}{\mu_{pu}^m + \lambda_R k_{pu} \left(\frac{\Delta\theta_o}{\Delta\theta_{or}} \right)^m}.$$

Використання кожної із розглянутих моделей передбачає визначення теплових характеристик трансформатора. Більш точні моделі вимагають наявності ширшого набору параметрів, що не завжди можна забезпечити. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є виконання параметричної ідентифікації моделей на основі вимірних значень температур, як описано в [7]. В табл.1 представлено список параметрів кожної із розглянутих моделей.

Таблиця 1 – Параметри теплових моделей трансформатора

		IEC 60076-7	Swift	Susa	Yi Cui
τ_0	постійна часу нагрівання масла	+	+	+	+
$\Delta\theta_{or}$	перевищення температури масла за номінального навантаження	+	+	+	+
τ_w	постійна часу нагрівання обмотки	+	+	+	+
$\Delta\theta_{hr}$	усталене перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки за заданого навантаження	+	+	+	+
k_{11}, k_{21}, k_{22}	коефіцієнт, який залежить від потужності та типу охолодження трансформатора	+	-	-	-

Продовження таблиці 1

η	показник степеня масла	+	-	-	-
R	відношення втрат	+	+	+	+
n, m	коефіцієнти, що залежить від типу трансформатора та режиму його роботи	-	+	+	+
$P_{DC.pu}$	відносні омичні втрати в міді	-	-	+	+
$P_{Ed.pu}$	відносні втрати на вихрові струми	-	-	+	+
	коефіцієнти функції для обчислення відносної в'язкості масла за даної температури	-	-	+	+
λ_R	відношення між тепловим опором целюлозо-паперової ізоляції та конвективним тепловим опором масла	-	-	-	+
α, β	коефіцієнти що характеризують процеси зміни вологовмісту целюлозо-паперової ізоляції	-	-	-	+

Для оцінювання роботи розглянутих моделей виконано моделювання теплових процесів в трансформаторі. Характеристики трансформатора, які використано в розрахунках представлено в табл. 2. Визначення температур із використанням всіх моделей, крім моделі IEC 60076-7, передбачає розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь. Для вирішення цієї задачі використано відповідні функції математичного пакету MATLAB.

Результати моделювання температур масла та ННТ в різних режимах роботи представлено на рис. 2. Видно, що у більшості випадків найбільші значення температури отримуємо із використанням моделі [8]. Крім цього, ця модель показує більш різке збільшення температури при зміні завантаження трансформатора. Також можна відмітити, що врахування впливу наявності вологи в целюлозо-паперовій ізоляції, згідно [10], досить сильно впливає на результуючі значення температур.

Таблиця 2 – Характеристики трансформатора

	Значення		Значення		Значення
Тип охолодження	OF	$\Delta\theta_{hr}$	22	n	0,8
τ_0	90	k_{11}	1,0	m	0,8
$\Delta\theta_{or}$	46	k_{21}	1,3	η	0,8
τ_w	6,5	k_{22}	1,0	R	6

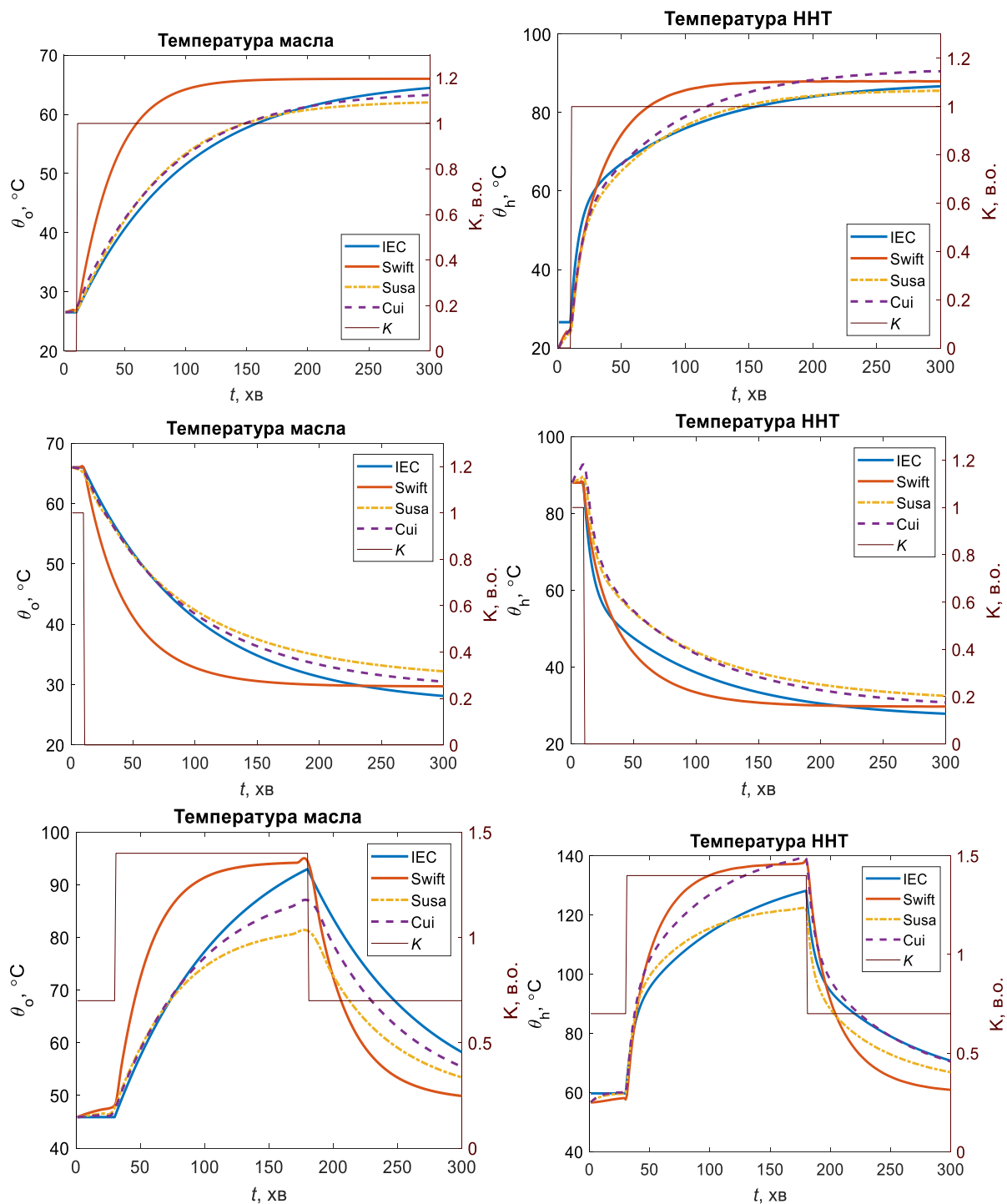


Рисунок 2 – Результати моделювання температури масла та ННТ обмотки трансформатора

Достовірність результатів розрахунків температур із використанням різних моделей перевірено із використанням експериментальних даних, отриманих на діючому трансформаторі. Виконано порівняння вимірених значень температур масла із розрахованими значеннями для кожної моделі. Вхідними змінними всіх моделей є значення коефіцієнта завантаження та температури навколишнього середовища, які зафіксовано для кожного інтервалу часу. Результати порівняння показано на рис. 3.

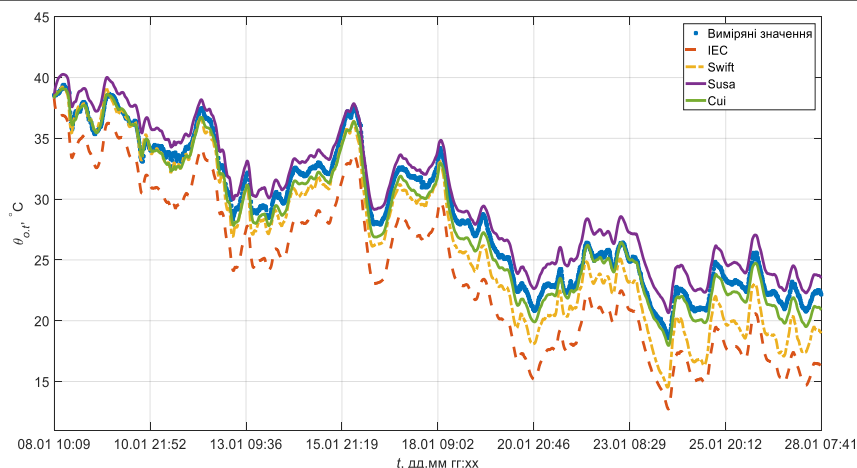


Рисунок 3 – Порівняння результатів моделювання із експериментальними даними

З рис. 3 видно, що найкраще співпадіння із експериментальними даними дає змогу отримати модель описана в [10]. Досить малу похибку забезпечує також використання моделі [9].

Висновки. Виконано порівняння уточнених теплових моделей трансформатора та показано можливість їх використання для визначення базових значень діагностичних параметрів трансформатора. Проведено моделювання температур масла у верхніх шарах та найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора для різних режимів роботи трансформатора. Виконана перевірка результатів, розрахованих за допомогою уточненої моделі із використанням експериментальних даних отриманих на діючому трансформаторі. Показано, що найбільш точні результати дає змогу отримати використання уточненої теплової моделі трансформатора, що враховує вплив вологовмісту масла на теплові характеристики трансформатора. Саме цю модель можна рекомендувати як основну для визначення базових значень температури масла в модулі аналізу системи діагностування.

Список використаної літератури

1. Сазыкикин В.Г. Организационные аспекты эксплуатации изношенного электрооборудования / В.Г. Сазыкин // Промышленная энергетика. – 2000. – №4 – С.28-35.
2. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б.А. Алексеев. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
3. Стогній Б.С. Интеллектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 20–31.
4. Wang M. Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service / M. Wang, A.J. Vandermaar, K.D. Srivastava // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2002. – Vol. 18. – No. 6.
5. Saha, Tapan K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers / Saha, Tapan K. // IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, – 2003. – Vol. 10. No. 5. – P. 903-917.
6. Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076–7:2005. – [Valid from 2010-12-31]. – Geneva: IEC, 2010. – 62 p. – (International standard).
7. Притискач І.В. Параметрична ідентифікація моделей діагностичних параметрів у системах діагностування силових трансформаторів / І.В. Притискач // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – № 2. – С. 82–87.
8. Swift G. A fundamental approach to transformer thermal modeling – Part I: Theory and equivalent circuit / G. Swift, T. S. Molinski, W. Lehn // IEEE Trans. Power Del. – Vol. 16, № 2. – 2001. – P. 171–175.
9. Susa D. Dynamic thermal modeling of power transformers / D. Susa, M. Lehtonen, H. Nordman. // IEEE Trans. Power Del. – Vol. 20, №. 1. – 2005. – P.197–204.
10. Cui Y. Moisture-Dependent Thermal Modelling of Power Transformer / Cui Y., Ma H., Saha T., Ekanayake C., Martin D. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – Vol. 31. – No.5. – P.2140-2150.

I. Prytyskach, Cand. Sc. (Eng.), Assis. Prof., ORCID 0000-0002-1892-0054
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

APPLICATION OF ADVANCED THERMAL MODELING OF POWER TRANSFORMER IN DIAGNOSTICS SYSTEMS

The work of diagnostic systems in operating modes leads to the need to take into account the influence of physical processes in the transformer on the results of measuring diagnostic parameters. This process is associated with a change in load and the corresponding heating and cooling of the transformer. The research and comparison of the new refined thermal models of the transformer is carried out and the possibilities of their use for determining the basic values of the diagnostic parameters of the transformer are analyzed. To evaluate the work of the models examined, the thermal processes in the transformer were modeled. Determination of temperatures using all models, except for model IEC 60076-7, provides for the solution of nonlinear differential equations. To solve this problem, the corresponding functions of the mathematical packages were used. It is shown that the most expedient is the use of the refined thermal model of the transformer, which takes into account the influence of the moisture content of the oil on the thermal characteristics of the transformer when the operating modes of the transformer change.

Keywords: power transformer, diagnostic parameter, oil temperature in the upper layers, moisture content of the oil, thermal model, hot spot temperature of the winding.

References

1. Sazyzkin V.G. "Organizational aspects of operation of worn-out electrical equipment", Industrial Power Engineering, 2000, No.4, P.28-35.
2. Alekseev B.A. "Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers", Moscow, 2002, 216 p.
3. Stogniy B.S., Kirilenko O.V., Denysyuk S.P. "Intelligent electrical network power systems and their technological support", Tekhnichna elektrodynamika, 2010, No. 6, P.20–31.
4. Wang, M., A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava. "Review of condition assessment of power transformers in service." IEEE Electrical Insulation Magazine 18.6 (2002): 12-25.
5. Saha, Tapan K. "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers." IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation 10.5 (2003): 903-917.
6. "Power Transformers—Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers", IEC standard 60076.7 (2005).
7. Prytyskach I. "Parametric identification of models of diagnostic parameters in systems of diagnostics of power transformers", Energy: economics, technology, ecology, 2016, No. 2, P. 82–87.
8. Swift, Glenn, Tom S. Molinski, and Waldemar Lehn. "A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. Theory and equivalent circuit." IEEE transactions on Power Delivery 16.2 (2001): 171-175.
9. Susa, Dejan, Matti Lehtonen, and Hasse Nordman. "Dynamic thermal modelling of power transformers." IEEE transactions on Power Delivery 20.1 (2005): 197-204.
10. Cui, Yi, et al. "Moisture-Dependent Thermal Modelling of Power Transformer." IEEE Transactions on Power Delivery 31.5 (2016): 2140-2150.

И.В. Прытыскач, канд. техн. наук, ст. преп., ORCID 0000-0002-1892-0054
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УТОЧНЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Работа систем диагностирования в рабочих режимах требует учета влияния физических процессов в трансформаторе на результаты измерений диагностических параметров. Это, прежде всего, процессы связанные с изменением нагрузки и соответствующими нагревом и охлаждением трансформатора. В работе выполнено исследование и сопоставление новых уточненных тепловых моделей трансформатора и проанализированы возможности их использования для определения базовых значений диагностических параметров трансформатора. Показано, что наиболее целесообразным является использование уточненной тепловой модели трансформатора, которая учитывает влияние влагосодержания масла на тепловые характеристики трансформатора при изменении его режимов работы.

Ключевые слова: силовой трансформатор, диагностический параметр, температура масла в верхних слоях, влагосодержание масла, тепловая модель, температура наиболее нагретой точки обмотки.

Надійшла 20.04.2017

Received 20.04.2017