

УДК 621.314.222.600

Денисенко М.А., докт техн. наук ФРН,

Притискач І.В., аспірант

Національний технічний університет України «КПІ», Україна, м. Київ

ОЦІНЮВАННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ ТЕРМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Наведено стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів за критеріями допустимого їх нагрівання за використання різних термічних моделей трансформаторів і порівняння результатів, отриманих для цих моделей.

Приведено стохастическое оценивание нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов за критериями допустимого их нагрева при использовании разных термических моделей трансформаторов и сравнение результатов, полученных для этих моделей.

Presented stochastic evaluation of load capacity for power oil transformers, using the criteria of their acceptable heating based on the different thermal models of transformers and comparing results obtained for this models.

1. Загальні відомості

Загально визнано, що найбільш точними моделями вибору трансформаторів (їх номінальної потужності або режимів роботи) є стохастичні моделі, які базуються на моделюванні випадкових фізичних процесів в трансформаторі з використанням ймовірнісної вихідної інформації.

Найбільш точною термічною моделлю трансформатора є модель кінцевих елементів[1]. Однак вихідні дані для її застосування проблематично одержати навіть у заводу виробника. Тому застосовують більш спрощені термічні моделі.

Підвищити точність оцінки навантажувальної здатності трансформатора дозволив перехід від спрощеної моделі трансформатора як однорідного тіла до триелементної термічної моделі, яка рекомендована МГОСТ 14209-97 [2]. Оцінку навантажувальної здатності трансформаторів на основі цієї моделі здійснено в [3].

Також зараз розробляються нові спрощені термічні моделі, які використовують більше інформації про теплові процеси в трансформаторі. Одна з них запропонована в [4]. Зважаючи на це, виникає доцільність оцінити навантажувальну здатність трансформаторів з використанням різних існуючих моделей.

2. Постановка задачі досліджень

Задачі досліджень: оцінка впливу врахування різних факторів в термічній моделі трансформатора на результати вибору силових масляних трансформаторів за критеріями їх температури масла і найбільш нагрітої точки (ННТ) обмотки, а також зносу їх ізоляції за використанням стохастичного моделювання цих параметрів.

Мета досліджень: дослідити відмінності одержаних результатів на основі різних термічних моделей трансформаторів та узагальнити рекомендації щодо їх навантажувальної здатності.

3. Розв'язання задачі досліджень

3.1 Уточнена термічна модель нагрівання трансформаторів

Теплова модель, запропонована Дежаном Суза та його співавторами[4], базується на теорії передачі тепла; в ній застосовують метод зосередженої ємності і визначення

нелінійних теплових опорів. Основний підхід був запропонований Свіфтом в [5]. В цій моделі особливу увагу приділяється нелінійним тепловим опорам трансформаторного масла. Вона була перевірена авторами з використанням експериментальних результатів.

Для побудови термічної моделі трансформатора використані основні аналогії між тепловими і електричними процесами. Для того щоб скористатися цією аналогією для розрахунку температури трансформатора, необхідно модифікувати метод зосередженої ємності шляхом введення нелінійних теплових опорів, які беруть до уваги зміни теплових параметрів у трансформаторному маслі з температурою.

Модель температури масла ґрунтується на основі теплової схеми (рис. 1), яка враховує відповідні уточнення.

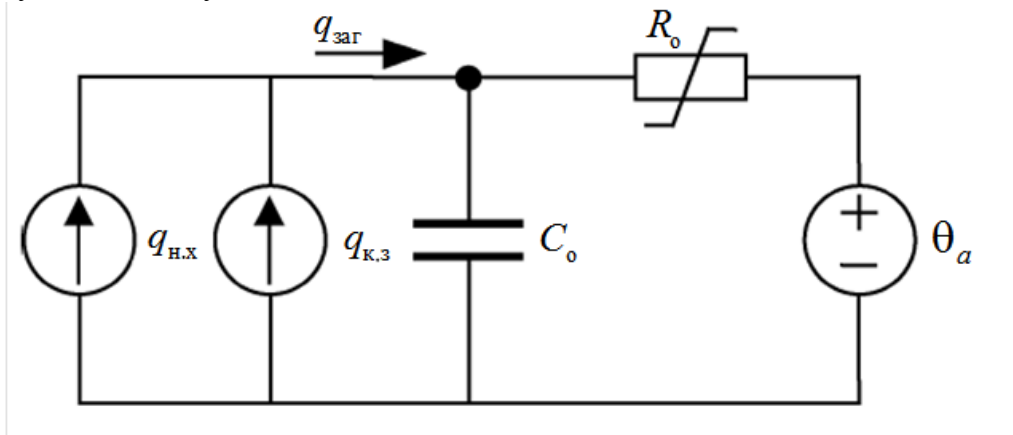


Рис. 1. Модель температури масла

На схемі використано наступні позначення:

$q_{заг}$ – тепло, генероване від загальних втрат потужності;

$q_{н.х}$ – тепло, генероване від втрат неробочого ходу;

$q_{к.з}$ – тепло, генероване від навантажувальних втрат;

C_o – теплова ємність масла;

R_o – нелінійний тепловий опір масла;

θ_a – температура навколишнього середовища.

Важливість врахування зміни в'язкості з температурою масла пов'язана з тим, що вона впливає як на тепловий опір, так і на теплову постійну часу.

Остаточне диференціальне рівняння для даної теплової моделі має вигляд [4]

$$\frac{1 + RK^2}{1 + R} \mu_{в.о}^n \Delta\theta_{о. ном} = \mu_{в.о}^n \tau_{о. ном} \frac{d\theta_o}{dt} + \frac{(\theta_o - \theta_a)^{1+n}}{\Delta\theta_{о. ном}^n}, \quad (1)$$

де $\Delta\theta_{о. ном}$ – номінальне перевищення температури масла;

$\tau_{о. ном}$ – номінальна теплова постійна часу масла;

$\mu_{в.о}$ – відносна в'язкість масла;

n – константа, яка залежить від режиму циркуляції масла;

R – відношення втрат

$$R = \frac{P_k}{P_{н.х}};$$

K – коефіцієнт завантаження

$$K = \frac{I}{I_{ном}}$$

Припускається, що циркуляція масла усередині бака трансформатора ламінарна, а постійна n для даного типу потоку дорівнює 0,25. Для холодного пуску трансформатора за швидкості масла всередині бака трансформатора, що дорівнює нулю, постійна n буде приймати різні значення для різних режимів охолодження.

Для розрахунку температури масла за рівнянням (1) необхідно використовувати чисельні методи аналізу, такі як метод Рунге-Кутта, а елементи рівняння необхідно класифікувати наступним чином:

– константи: $R, n, \tau_{о. ном}, \Delta\theta_{о. ном}$;

– вхідні змінні: $K, \mu_{в.о}, \theta_a$;

– вихідні змінні: θ_o ;

незалежна змінна: t .

Модель температури ННТ, як і модель температури масла, також представлена у вигляді теплового кола (рис. 2).

У цьому випадку диференційне рівняння має вигляд [4]

$$RK^2\mu_{в.о}^n\Delta\theta_{н. ном} = \mu_{в.о}^n\tau_{об. ном}\frac{d\theta_h}{dt} + \frac{(\theta_h - \theta_o)^{1+n}}{\Delta\theta_{н. ном}^n}, \quad (2)$$

де θ_h – температура ННТ;

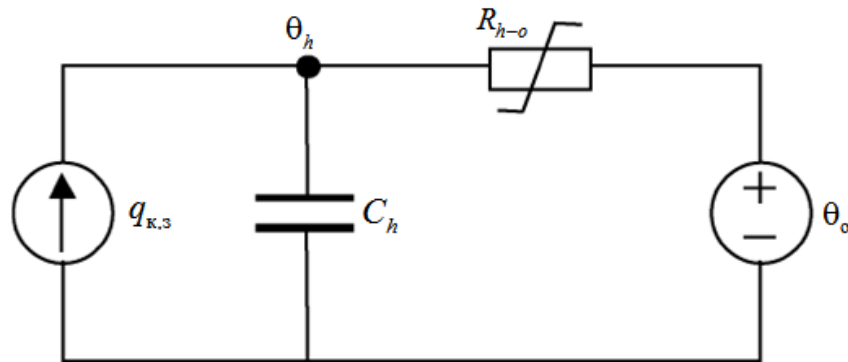


Рис. 2. Модель температури найбільш нагрітої точки обмотки

$\Delta\theta_{н. ном}$ – номінальне перевищення температури ННТ.

Використовуючи той же метод розрахунку, що і у моделі температури масла (метод Рунге-Кутта), температура ННТ може бути розрахована з диференціального рівняння (2), де елементи рівняння класифікують наступним способом:

– константи: $n, \tau_{об. ном}, \Delta\theta_{н. ном}$;

– вхідні змінні: $K, \mu_{в.о}, \theta_o$;

– вихідні змінні: θ_h ;

незалежна змінна: t .

Нормовані значення характеристик у рівняннях (1) та (2) згідно[2], які використовувалися для моделювання, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Теплові характеристики нагрівання трансформаторів

Характеристика	Позначення та одиниця виміру	Розподільні трансформатори	Трансформатори середньої та великої потужностей		
		ONAN	ON	OF	OD
1	2	3	4	5	6
Відношення втрат $\Delta P_{к.з} / \Delta P_{н.х}$	R	5	6	6	6
Теплова постійна часу масла	$\tau_o, \text{год}$	3,0	2,5	1,5	1,5
Температура охолоджувального середовища	$\theta_a, \text{°C}$	20	20	20	20
Номінальне перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки	$\Delta\theta_{h. \text{ном}}, \text{K}$	78	78	78	78
Номінальне перевищення температури масла на виході з обмотки	$\Delta\theta_{o. \text{ном}}, \text{K}$	55	52	56	49

3.2 Імітація реалізацій температур трансформатора

Одержання ансамблю реалізацій температур масла $\theta_o(t)$ і ННТ обмотки $\theta_h(t)$, трансформатора здійснюють в наступній послідовності:

1. Імітують ансамбль v -х реалізацій $I_v(t)$ навантажувального струму $I(t)$ на інтервалі часу T_6 згідно [1]. При цьому може бути використана як більш складна, так і спрощена імітація струму, який підкоряється нормальному закону розподілу.

2. Для кожної v -ої реалізації навантажувального струму обчислюють реалізації температур $\theta_{o,v}(t)$ і $\theta_{h,v}(t)$ з використанням тієї або тієї термічної моделі трансформатора.

2.3. В залежності від цілей досліджень проводиться статистична обробка ансамблів реалізацій кожного з параметрів з одержанням їхніх статистичних характеристик, насамперед детермінованих функцій квантилів $\theta_{o,\alpha_0}(t)$, $\theta_{h,\alpha_0}(t)$ за відповідною ймовірністю α_0 перевищення температурою масла і ННТ обмотки своїх допустимих (номінальних) значень:

Навпаки, задаючись певними величинами цих квантилів, у процесі імітаційного моделювання (ІМ) можна підібрати такі пари параметрів розподілу навантажувального струму \bar{I} , $v[I]$, що забезпечують ці квантилі.

На рис. 3 наведено алгоритм знаходження допустимих значень параметрів $v[I]$, \bar{I} для трансформаторів за умовами: $\theta_{o,\alpha_0,\text{max}} \approx \theta_{o,\text{доп}}$ та $\theta_{h,\alpha_0,\text{max}} \approx \theta_{h,\text{доп}}$.

В дослідженнях прийняті наступні спрощення і допущення:

1. Електричний струм $I(t)$ розглядався як нормально розподілений випадковий стаціонарний процес з еквівалентними параметрами розподілу \bar{I} , $v[I]$ і нормованою АФ $\rho(\tau)$

2. Застосовувалася спрощена імітація реалізацій навантажувального струму з дискретністю $\delta t_i = 5$ хв і значеннями нормованої автокореляційної функції $\rho(\tau) = 0,5$, якщо $\tau \neq 0$ і $\rho(\tau) = 1,0$, якщо $\tau = 0$ згідно [1].

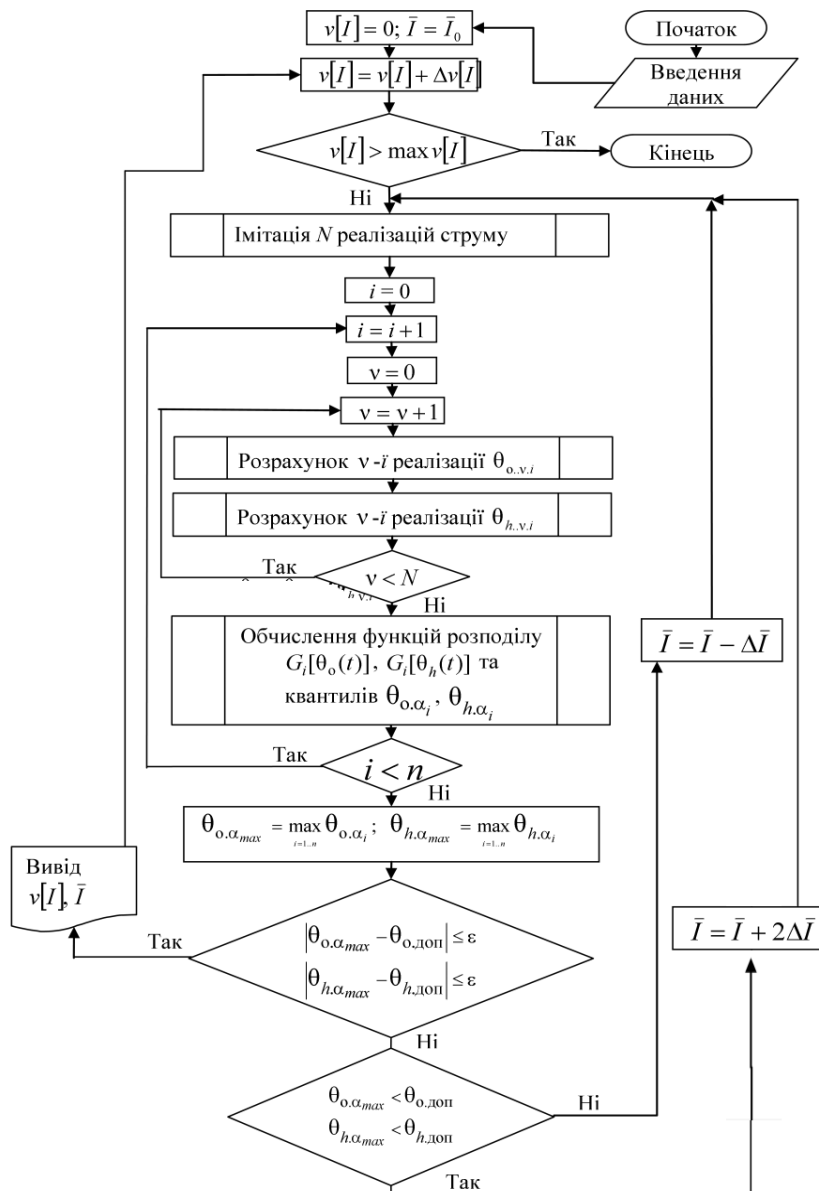


Рис. 3. Алгоритм визначення допустимих значень $v[I]$, \bar{I} для трансформаторів за умов

$$\theta_{o, \alpha_{0, \max}} = \theta_{o, \text{доп}} \text{ та } \theta_{h, \alpha_{0, \max}} = \theta_{h, \text{доп}}$$

3. Температура оточуючого середовища трансформатора θ_a приймалася постійною в

часі і рівною 20 °С.

4. Навантаження, що передувало режимові, що розглядається, приймалося тривало незмінним і рівним його ефективному значенню

$$I_e = \bar{I}(1 + v^2[I]). \quad (15)$$

5. Кількість реалізацій N прийнята рівною 100.

Використання спрощеної моделі ЕН у виді випадкового стаціонарного процесу обумовлене тим, що в інженерній практиці найчастіше відсутні вихідні дані про ЕН як нестационарного випадкового процесу.

Під час виконання дослідження розглядалися наступні термічні моделі трансформатора:

1 – термічна модель з врахуванням зміни в'язкості масла і навантажувальних втрат від температури [4];

2 – спрощена термічна модель трансформатора згідно МГОСТ 14209-97[2].

Також для розподільних трансформаторів з типом охолодження ONAN для порівняння наведено результати, отримані за використання найбільш адекватної шістнадцятиелементної термічної моделі (крива 3 на рис. 3) [1].

На рис. 4···5 наведено криві допустимих параметрів розподілу струму $\frac{\bar{I}}{I_{\text{ном}}} = f(v[I])$ для розподільних трансформаторів з типом охолодження ONAN, а також трансформаторів середньої і великої потужностей типу ON, які отримано ІМ за $\alpha_0 = 0,05$. Номери кривих на цих рисунках відповідають вказаним номерам застосованих термічних моделей.

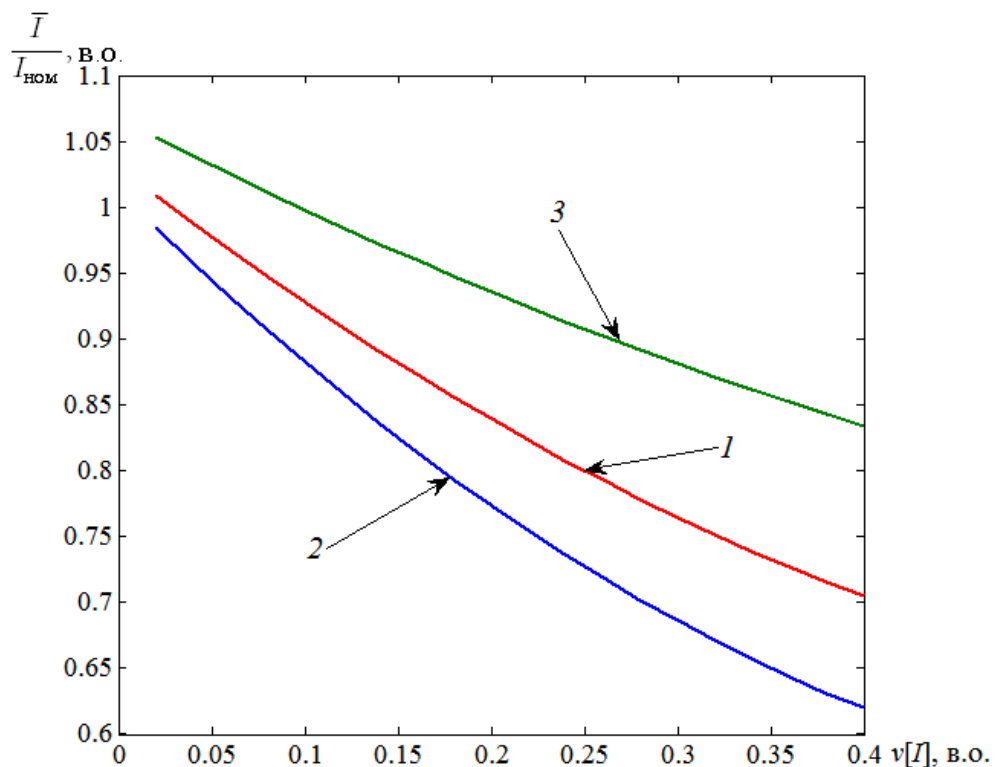


Рис.4. Криві навантажувальної здатності для розподільних трансформаторів з охолодженням

ONAN

Розглянемо криві (рис. 3), отримані для трансформаторів з типом охолодження ONAN. Найбільші допустимі значення параметрів розподілу \bar{I} , $\nu[I]$ навантажувального струму (найбільшу навантажувальну здатність трансформаторів) дає застосування найбільш адекватної термічної моделі трансформатора (крива 3). Збільшення навантажувальної здатності трансформаторів на основі цієї моделі зростає на 4...35% відносно другої спрощеної термічної моделі. Застосування спрощених термічних моделей з врахуванням зміни в'язкості масла і навантажувальних втрат від температури (крива 1) і без цього врахування (крива 2) за різних значень коефіцієнта варіації дозволяє отримати допустимі параметри розподілу навантажувального струму, які відрізняються на 5...18%. Ця відмінність збільшується з збільшенням коефіцієнта варіації. Практично аналогічна відмінність значень параметрів \bar{I} , $\nu[I]$ за різних спрощених термічних моделей спостерігається для трансформаторів з охолодженням типу ON (рис. 4).

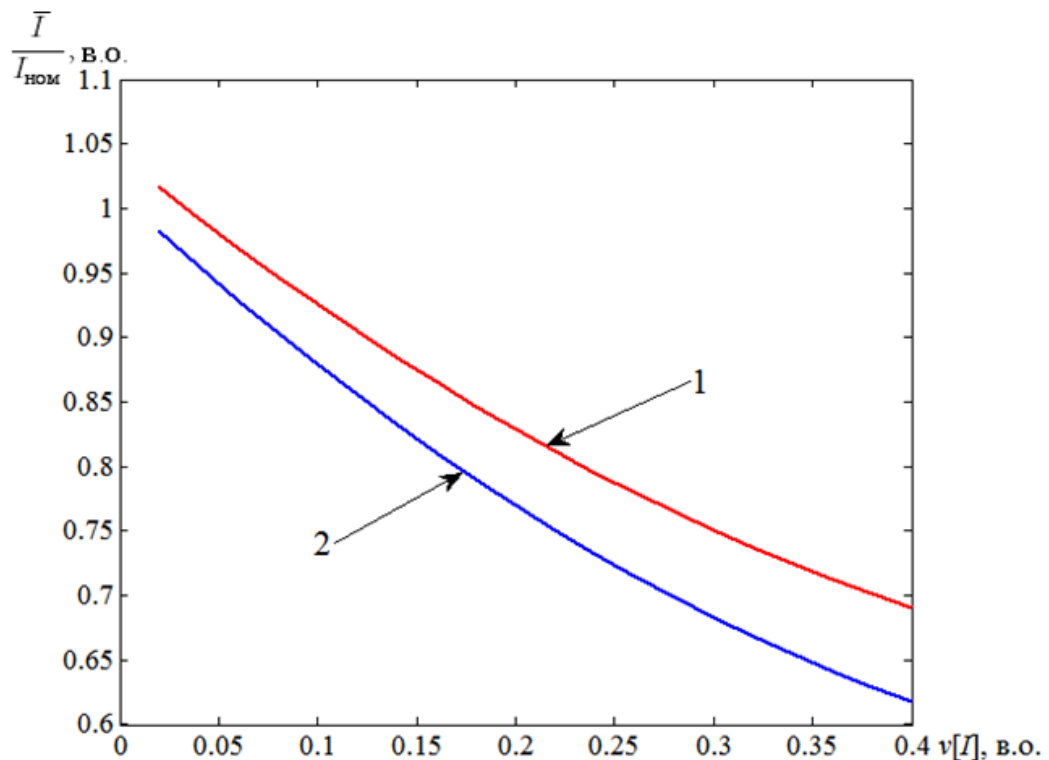


Рис. 5. Криві навантажувальної здатності для трансформаторів з охолодженням ON

Зважаючи на те, що наведені відмінності можуть досягати 15...18 %, можна зробити висновок, що використання уточненої спрощеної термічної моделі трансформаторів дає суттєве збільшення їх навантажувальної здатності.

Висновки

1. Використання уточненої спрощеної термічної моделі трансформатора, що враховує зміни в'язкості масла і навантажувальних втрат з температурою, для стохастичного вибору трансформаторів за критеріями допустимого нагрівання дозволяє виявити і використати більшу його навантажувальну здатність.

2. Рекомендується розглянути доцільність внесення відповідних змін в МГОСТ 14209-97 [2] на основі уточненої спрощеної термічної моделі трансформатора [4].

Перелік посилань

1. **Денисенко М.А.** Спеціальні питання електропостачання [Текст] навч. посіб. / М.А. Денисенко. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – Ч. 1.: Вибір елементів електропостачальних систем на основі стохастичного моделювання процесів, що відбуваються в них. – 288 с. – Бібліогр.: с. 273–283.
2. **МГОСТ 14209-97.** Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. Дата введения 2002.01.01.
3. **Денисенко М.А.** Стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів / М.А. Денисенко, І.В. Притискач // Промелектро. – 2011. – №1. – С. 25–31.
4. **Dejan Susa.** Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers / Dejan Susa, Matti Lehtonen, Hasse Nordman. – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 1, JANUARY 2005.
5. **G. Swift.** A fundamental approach to transformer thermal modeling, part I – theory and equivalent circuit / G. Swift, T. S. Molinski, and W. Lehn. – IEEE Trans. Power Del., vol. 16, – no. 2, – pp. 171–175, – Apr. 2001.