

УДК 621.314.222.600

Притискач І.В., аспірант, **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»**

ОЦІНЮВАННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИБОРУ

У статті вирішується задача вибору силових масляних трансформаторів за критеріями температури масла і найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора з використанням різних моделей цих процесів. Наведено стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів за критеріями допустимого їх нагрівання та термічного зносу ізоляції на основі термічних моделей їх нагрівання і моделей зносу ізоляції трансформаторів.

ОЦЕНКА НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЫБОРА

В статье решается задача выбора силовых масляных трансформаторов по критериям температуры масла и наиболее нагретой точки обмотки трансформатора с использованием различных моделей этих процессов. Приведено стохастическое оценивание нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов по критериям допустимого их нагрева и термической износа изоляции на основе термических моделей их нагрева и моделей износа изоляции трансформаторов.

EVALUATION OF POWER TRANSFORMERS LOAD CAPACITY USING STOCHASTIC CHOOSING MODELS

In this paper presented the solution of power oil transformers selection problem using the criteria for oil temperature and the most heated point of the transformer using different models of these processes. Presented stochastic estimation of load capacity of power oil transformers according to the criteria of acceptable heating and thermal insulation deterioration from thermal models of heating and insulation of transformers models wear.

1. Загальні відомості

Трансформатори є одним з найважливіших елементів електропостачальних систем (ЕПС). На даний час в ЕПС застосовують переважно силові масляні трансформатори. Їх висока ціна зумовлює необхідність якомога точнішого вибору трансформаторів, під яким розуміють вибір параметрів і параметрів режимів роботи трансформаторів. Існуючі детерміновані моделі вибору трансформаторів, які зараз використовують в інженерній практиці, часто приводить до неефективного їх використання (так, наприклад, завантаження діючих розподільних трансформаторів в нормальному режимі їх роботи рідко перевищує половину номінальної потужності трансформатора).

Загально визнано, що найбільш точними моделями вибору трансформаторів є стохастичні моделі, які базуються на моделюванні випадкових фізичних процесів в трансформаторі з використанням ймовірнісної вихідної інформації. Ці моделі розроблялись в кінці 80-х років минулого сторіччя, найбільш повно описані в [1] і успішно використовувались в проектній практиці [2]. Тому виникає доцільність оцінити навантажувальну здатність трансформаторів за різними критеріями з використанням нових термічних моделей і порівняти одержані результати з попередніми.

2. Постановка задачі досліджень

Задачі досліджень: порівняння результатів вибору силових масляних трансформаторів за критеріями температури масла і найбільш нагрітої точки (ННТ) обмотки трансформатора з використанням моделей цих процесів, наведених в ГОСТ 14209-85 та МГОСТ14209-97.

Мета досліджень: дослідити відмінності одержаних результатів і можливість узагальнення та уточнення результатів попередніх досліджень.

3. Розв'язання задачі досліджень

3.1 Термічні моделі нагрівання та зносу ізоляції трансформаторів

Загальним ГОСТ 14209-85 і МГОСТ14209-97 є спрощена триелементна термічна модель «обмотка – масло – навколишнє середовище». В загальному випадку для будь-якого i -го моменту часу пошук виразів для температур масла $\theta_o(t_i)$ та найбільш нагрітої точки обмотки (ННТ) $\theta_h(t_i)$ здійснюють у вигляді

$$\theta_o(t_i) = \theta_o(t_{i-1}) + \delta\theta_o(\delta t_i); \quad (1)$$

$$\theta_h(t_i) = \theta_o(t_i) + \delta\theta_{h-o}(\delta t_i), \quad (2)$$

де $\theta_o(t_{i-1})$ – значення температури масла в кінці попереднього $i-1$ часового інтервалу

$$\delta t_i = t_i - t_{i-1};$$

$\delta\theta_o(\delta t_i)$ – зміна температури масла на інтервалі δt_i ;

$\delta\theta_{h-o}(\delta t_i)$ – зміна перевищення температури ННТ обмотки над температурою масла на інтервалі δt_i .

У МГОСТ14209-97 [4] Постійна часу обмотки $\tau_{o,o}$, що в залежності від потужності трансформаторів змінюється від 3 до 15 хв., не береться в розрахунок, а значення коефіцієнта навантаження K^y миттєво досягає нового значення.

Також трансформатори за їх номінальною потужністю $S_{т.ном}$ поділено на три групи:

1) розподільні – номінальна напруга до 35 кВ, вид охолодження – ON;

2) середньої потужності – номінальна потужність трифазних трансформаторів $S_{т.ном} \leq 100$ МВ·А й однофазних $S_{т.ном} \leq 33,3$ МВ·А;

3) великої потужності, у яких $S_{т.ном} > 100$ МВ·А (трифазні).

Розрахункові формули температури ННТ трансформаторів у сталому тепловому режимі за будь-якого навантаження K залежать від виду охолодження.

Вид охолодження ON:

$$\theta_h = \theta_a + \vartheta_{o.ном}^B \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + \vartheta_{h-o.ном} K^y. \quad (3)$$

Вид охолодження OF:

$$\theta_h = \theta_a + \vartheta_{o.ном}^H \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + 2(\vartheta_{o.ном}^C - \vartheta_{o.ном}^H) K^y + \vartheta_{h-o.ном} K^y. \quad (4)$$

Вид охолодження OD: величина θ_h визначається аналогічно до виду охолодження OF

з поправкою на зміну омичного опору обмоток від температури (якщо $K > 1$) за формулою

$$\theta_{h.OD} = \theta_{h.OF} + 0,15(\theta_{h.OF} - \theta_{h.ном}). \quad (5)$$

Рекомендовані у стандарті [4] граничні значення температури і струму для різних режимів навантаження наведено в таблиці 1.

3.2 Імітація реалізацій температур трансформатора

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

Таблиця 1. Граничні значення температури та струму для режимів навантаження, що перевищує номінальне

Тип навантаження	Розподільні трансформатори	Трансформатори середньої потужності	Потужні силові трансформатори
1	2	3	4
<i>Номінальний режим систематичних перевантажень</i>			
Струм, в.о	1,5	1,5	1,3
Температура найбільш нагрітої точки та металевих частин, що стикаються з ізоляційним матеріалом, °С	140	140	120
Температура масла у верхніх шарах, °С	105	105	105
<i>Режим систематичних тривалих аварійних перевантажень</i>			
Струм, в.о	1,8	1,5	1,3
Температура найбільш нагрітої точки і металевих частин, що стикаються з ізоляційним матеріалом, °С	150	140	130
Температура масла у верхніх шарах, °С	115	115	115
<i>Режим коротких аварійних перевантажень</i>			
Струм, в.о	2,0	1,8	1,5
Температура найбільш нагрітої точки і металевих частин, що стикаються з ізоляційним матеріалом, °С	–	160	160
Температура масла у верхніх шарах, °С	–	115	115

1. Імітують сукупність реалізацій $I_v(t)$ навантажувального струму $I(t)$ на інтервалі часу T_{σ} згідно [1].

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

3. Проводиться статистична обробка ансамблів реалізацій кожної з характеристик з одержанням їхніх статистичних характеристик.

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

Вхідними даними для моделювання є:

- кількість реалізацій N . В даному дослідженні це значення рівне 200;

- кількість n дискретних моментів часу, на які розбивається T_6 ;
- час дискретизації δt_i ;
- ймовірність α_θ перевищення температурою масла і ННТ обмотки своїх допустимих максимальних значень $\alpha_\theta = 0,05$ згідно [1];
- точність ε ;
- тип охолодження трансформатора;
- параметри трансформаторів згідно [3, 4];
- параметри трансформаторів за таблицею 1:
 - максимально допустима температура найбільш нагрітої точки $\theta_{h,r,доп}$, °С;
 - максимально допустима температура масла у верхніх шарах $\theta_{o,r,доп}$, °С.

Під час виконання дослідження розглядалися 3 варіанти термічних моделей трансформатора:

- 1 –термічна модель з врахуванням сталої часу обмотки, рівної 10 хв, і параметрів трансформаторів, наведених в цьому стандарті;
- 2 –термічна модель з врахуванням сталої часу обмотки, рівної 10 хв, та параметрів трансформаторів, наведених в МГОСТ 14209-97;
- 3 – спрощена термічна модель трансформатора без врахування сталої часу обмотки та параметрів трансформаторів згідно МГОСТ 14209-97.

На рисунках 1–4 наведено криві $\frac{\bar{I}}{I_{ном}} = f(v[I])$ для розподільних трансформаторів з типом охолодження *ONAN*, а також трансформаторів середньої і великої потужностей типів *ON*, *OF* та *OD* відповідно, які отримано ІМ за $\alpha_\theta = 0,05$, $\theta_{o,доп} = \theta_{o,ном} = \theta_a + \vartheta_{o,ном}$ і $\theta_{h,доп} = \theta_{h,ном} = \theta_a + \vartheta_{h,ном}$. Номери кривих на цих рисунках відповідають вказаним номерам застосованих термічних моделей нагрівання. Вибір $\alpha_\theta = 0,05$ обґрунтовано в [1].

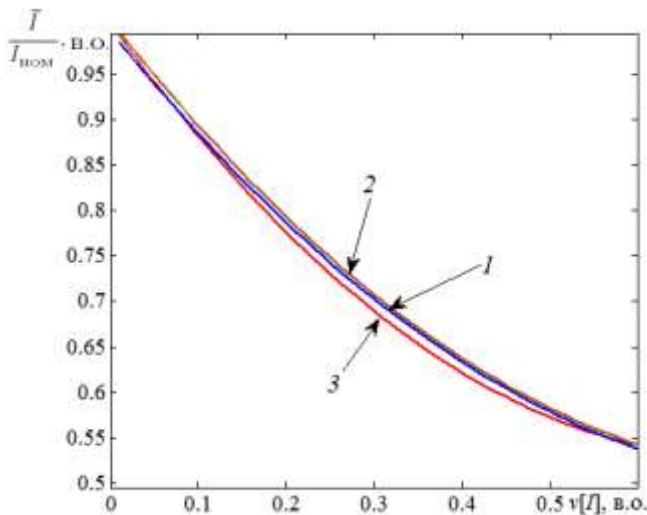


Рис.1. Криві навантажувальної здатності для трансформаторів з охолодженням *ONAN*

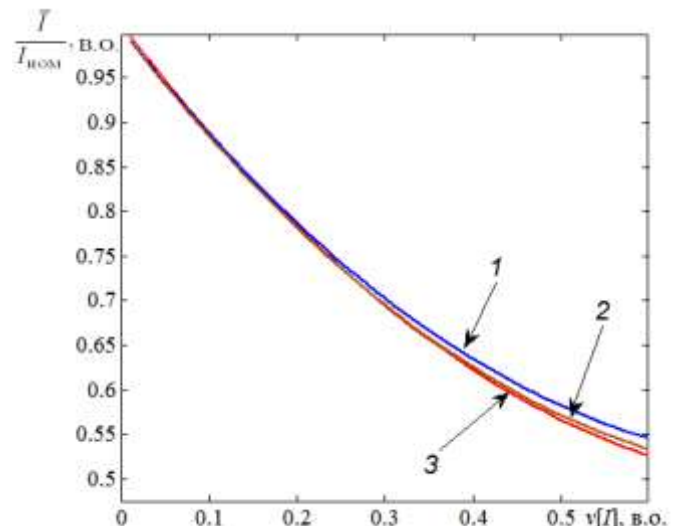


Рис.2. Криві навантажувальної здатності для трансформаторів з охолодженням *ON*

Розглянемо криві (рис. 1), отримані для трансформаторів з типом охолодження *ONAN*. Найбільші допустимі параметри розподілу навантажувального струму \bar{I} , $v[I]$ (найбільшу навантажувальну здатність трансформаторів) дає застосування 2-ої термічної моделі з

врахуванням сталої часу обмотки та параметрів трансформаторів, наведених в МГОСТ 14209-97. Однак відмінності між цими параметрами з застосуванням всіх трьох моделей у всьому діапазоні зміни коефіцієнта варіації не перевищують 2 %. Практично аналогічна відмінність параметрів \bar{I} , $\nu[I]$ спостерігається для трансформаторів з охолодженням типу *ON* (рис. 2).

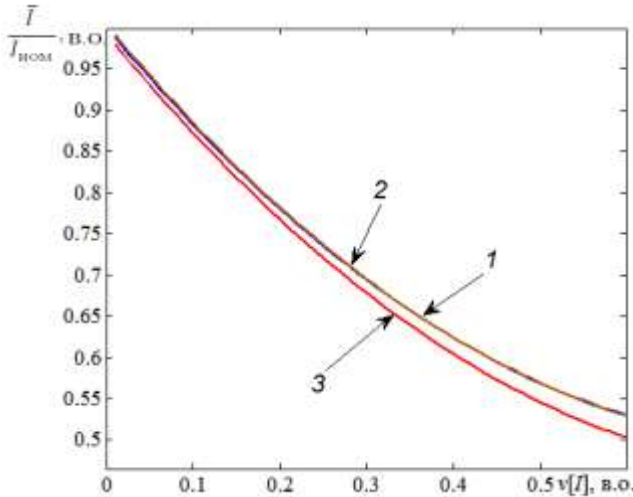


Рис.3. Криві навантажувальної здатності для трансформаторів з охолодженням *OF*

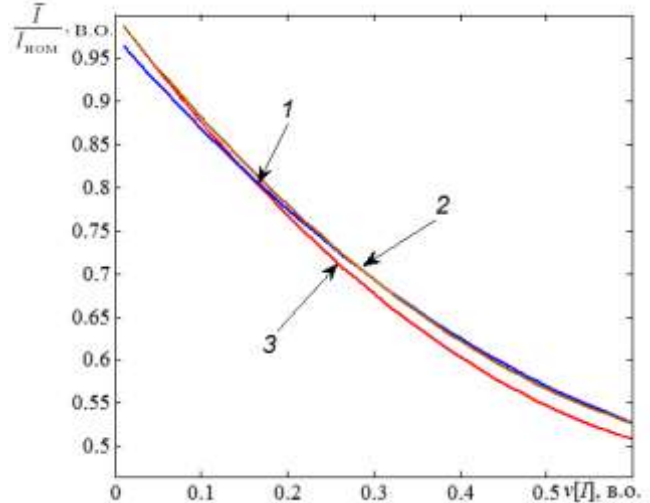


Рис.4. Криві навантажувальної здатності для трансформаторів з охолодженням *OD*

Для трансформаторів з типом охолодження *OF*(рис.3) відмінності параметрів \bar{I} , $\nu[I]$ у разі застосування різних термічних моделей трансформаторів становлять не більше 6% і збільшуються з збільшенням коефіцієнта варіації $\nu[I]$. Найбільшу навантажувальну спроможність отримуємо у разі використання 1-ої та 2-ої термічної моделі трансформаторів. Практично аналогічна відмінність параметрів \bar{I} , $\nu[I]$ спостерігається для трансформаторів з охолодженням типу *OD* (рис. 4), за винятком того, що ця відмінність досягає 5%. Причому найменшу навантажувальну спроможність цих трансформаторів забезпечує використання 3-ї спрощеної термічної моделі трансформатора без врахування сталої часу обмотки та параметрів трансформаторів згідно МГОСТ 14209-97.

На рис.5 наведено криві граничних значень $\frac{\bar{I}}{I_{ном}} = f(\nu[I])$ для всіх типів трансформаторів в номінальному режимі систематичних перевантажень, які отримано ІМ за $\alpha_{\theta} = 0,05$, $\theta_{о.доп} = \theta_{о.r}$ і $\theta_{h.доп} = \theta_{h.r}$ (величини $\theta_{о.r}$ і $\theta_{h.r}$ згідно таблиці 1).

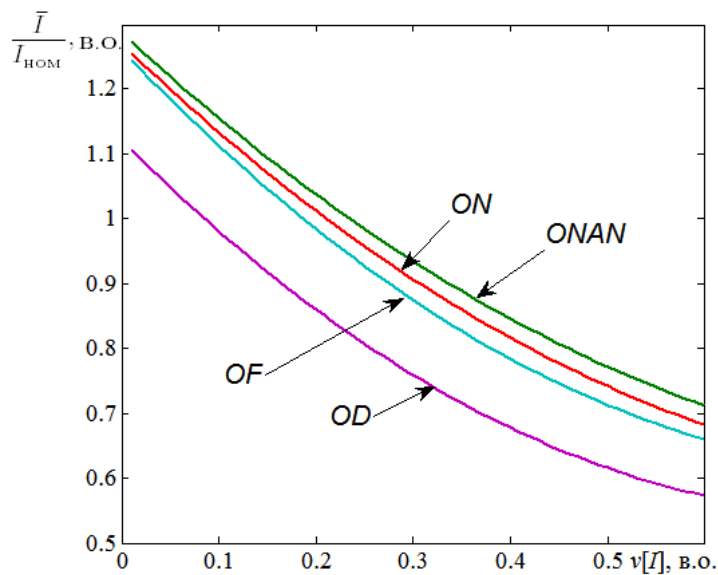


Рис.5. Криві навантажувальної здатності для всіх типів трансформаторів в номінальному режимі систематичних перевантажень

Висновки

1. Спрощена термічна модель нагрівання трансформатора (без врахування сталої часу їх обмоток), що наведена в МГОСТ 14209-97, забезпечує достатню точність (з незначним резервом) в розрахунках теплових балансів в трансформаторах.

2. Криві допустимих параметрів навантажувального струму трансформаторів (рис. 1–4) рекомендуються до використання в інженерній практиці для вибору параметрів розподільних трансформаторів та параметрів їх режимів за умовами допустимих нагрівання.

Перелік посилань

1. **Денисенко М.А.** Спеціальні питання електропостачання. Частина 1 [Текст] навч. посіб. / М.А. Денисенко. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 288 с.
2. **Projektierungsvorschrift** “Stochastische Bemessung von Drehstromoltransformatoren nach technische -ökonomischen Kriterien / J. Hoffmann, M.A. Denysenko, H. Mund. – HG: VEB Elektroprojekt und Anlagenbau, Berlin. – PV 1 – 14. 04.85.
3. **ГОСТ 14209-85.** Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки.
4. **МГОСТ 14209-97.** Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. Дата введения 2002.01.01.