

УДК 621.565

В. А. Матухно¹, Ю. В. Байдак², П. Томлейн³¹ Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченко, 1, Одеса, 65044, Україна² Одеська національна академія харчових технологій, Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна³ Slovak Association for Cooling and Air Conditioning Technology, Hlavná 325, 900 41 Rovinka, Slovak Republic**ТЕПЛОВА ПІДСИСТЕМА РОЗПОДІЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ**

Результатом роботи є обґрунтування доцільності впровадження результатів моделювання рівнянь теплового балансу, складених для активної частини розподільчого трансформатора напруги, на стадії його завершального і уточнюючого етапу проектування. Активна частина знаходиться в середовищі трансформаторного масла, а тепловіддача здійснюється теплопередачею та конвекцією. Математична модель теплового балансу відповідає еквівалентній тепловій схемі заміщення, складеної з двох суміжних вузлів зі стоками тепла - узагальненої обмотки і феромагнітного стрижня та третього суміжного з ними вузла - рухомої речовини з масла, яке додатково контактує з оточуючим середовищем нескінченної теплоємності. Рішення рівнянь, отримані для середнього значення температур обмотки, стрижня магнітопроводу і масла в функції часу, що дозволяє встановити очікувані їх значення упродовж роботи трансформатора і, особливо, з нерівномірним графіком його навантаження, а також здійснювати обґрунтований вибір магнітної індукції в стрижні магнітопроводу і густини струму в обмотках за показником припустимих в них температур нагріву.

Ключові слова: Моделювання; Розподільчий трансформатор; Тепловий баланс; Часові діаграми температур; Графік навантаження; Теплова підсистема.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

I. ВСТУП

Удосконалення технічного рівня сучасного розподільчого трансформатора (РТ) шляхом зменшення їх ваги і габаритних розмірів, збільшенням питомої потужності тощо неодмінно пов'язують з розробкою методу урахування теплових процесів і технічних засобів щодо інтенсифікації існуючих та нових систем їх охолодження. Особливо важливим постає питання ефективного охолодження РТ малої та середньої потужності, які складають основну частку комплектних розподільчих пристроїв в системах електрозабезпечення. Не дивлячись на те, що їх спільна встановлена потужність суттєво перевищує потужність електричної енергії, яка виробляється в Україні, вони мають недостатню економічність і надійність, частіше працюють в режимі неузгодженому з графіком споживання навантаження, що призводить до вагомих втрат матеріальних ресурсів. Пояснюється це тим, що при проектуванні РТ питанням нагріву і охолодження не приділяється достатньої уваги на завершальному і уточнюючому етапі проектування - електромагнітного розрахунку.

Перетворення трансформатором електричної енергії супроводжується її частковими необоротними втратами у вигляді теплоти, виділення якої в активних частинах, і по-перше в обмотках, порушує їх теплову однорідність, та суттєво впливає на термін придатності ізоляції в найбільш гарячих ділянках. Це явище призводить до обміну теплотою активної частини трансформатора з елементами конструкції та, за їх допомогою, із зовнішнім середовищем. Відтак,

трансформатор слід розглядати не тільки як електромагнітну і гідравлічну підсистему, але і як теплову підсистему.

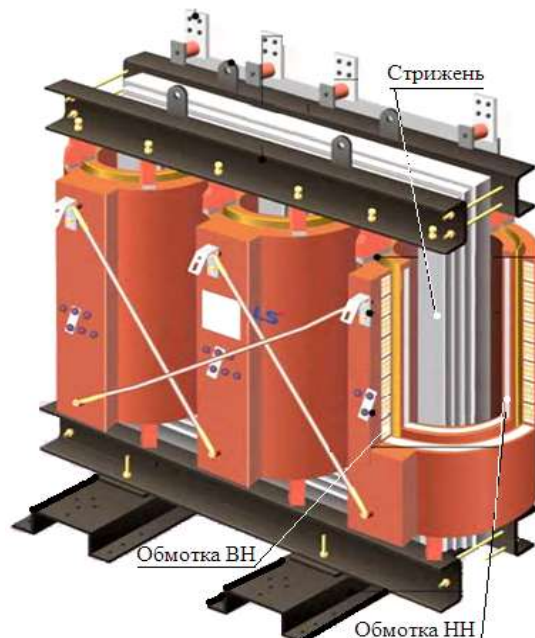


Рисунок 1 – Активна частина трифазного розподільчого трансформатора з джерелами теплоти – обмотками і стрижнями магнітопроводу

Забезпечення бажаного температурного режиму в трансформаторі є основною задачею організації

оохолодження. Вирішення цієї задачі передбачає узгодження доцільного співвідношення джерел виділення теплоти з її стоками та мінімізації втрат електричної енергії під час її трансформації для будь-якого характеру і рівнів навантаження.

Джерелами теплоти в трансформаторі, рис.1, є активна частина - трифазна первинна і вторинна обмотки та трьох стрижневий магнітопровід. Для того щоб раціонально розташувати елементи стікання тепла, застосовують усереднені у часі показники втрат короткого замикання і холостого ходу. На практиці втрати у трансформаторі поділяють на три групи - електричні (в обмотках ВН і НН) і магнітні (від гістерезису і вихрових струмів) та додаткові (до 5% в сталі і обмотках). Основна частина втрат визначається на етапі електромагнітного розрахунку і під час аналізу трансформатора як теплової підсистеми вважається відомою. Враховуючи, що РТ є ланцюгом в системі багатократної передачі електричної енергії від генеруючого обладнання до кінцевого споживача, головним фактором його надійності і довговічності є застосування ефективного відводу втрат частини енергії, що трансформується. Із поняттям ефективності тепловідводу тісно пов'язані питання технічного характеру на етапі проектування, масо габаритні і економічні показники трансформатора - магнітна індукція у стрижні магнітопроводу та густина струму у обмотках та, навіть, умови його надійної роботи при перенавантаженні.

II. МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ

Відповідно до узагальненої але спрощеної еквівалентної теплової схеми заміщення розподільчого трансформатора, наведеної на рис.2, система неоднорідних диференціальних рівнянь (НДУ) теплового балансу для трьох головних середовищ – узагальненої обмотки (1), феромагнітного стрижня (2) і рухомої речовини – масла (3), яке додатково контактує з оточуючим середовищем, що має нескінченну теплоємність, матиме вигляд другого правила Кірхгофа для миттєвих значень величин з яких та,що утримує теплопровідність є активною, а з теплоємністю - реактивною [1]:

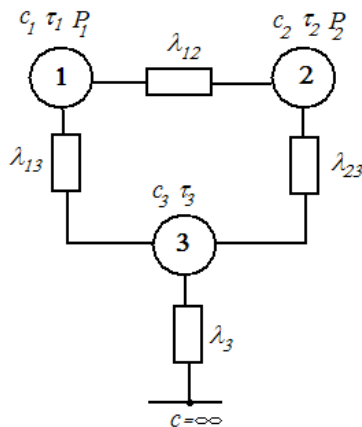


Рисунок 2 – Еквівалентна теплова схема заміщення розподільчого трансформатора за [2]

$$C_1 d\theta_1 + \Lambda_{12}\theta_1 dt + \Lambda_{13}\theta_1 dt - \Lambda_{12}\theta_2 dt - \Lambda_{13}\theta_3 dt = P_{10}(1 + \alpha\theta_1)dt,$$

$$C_2 d\theta_2 + \Lambda_{12}\theta_2 dt + \Lambda_{23}\theta_2 dt - \Lambda_{12}\theta_1 dt - \Lambda_{23}\theta_3 dt = P_2 dt,$$

$$C_3 d\theta_3 + \Lambda_3\theta_3 dt + \Lambda_{13}\theta_3 dt + \Lambda_{13}\theta_1 dt - \Lambda_{23}\theta_2 dt = 0,$$

де α – температурний коефіцієнт опору матеріалу обмотки, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – температура середовища, θ_0 – температура оточуючого середовища, $P_{10} = 3I^2 r_0$ – втрати у обмотці без урахування додаткових втрат, I – струм навантаження, r_0 – опір обмотки при температурі зовнішнього середовища, P_2 – втрати потужності в магнітному колі трансформатора. Теплові провідності в гілках теплової схеми заміщення визначаються тотожностями:

$\Lambda_{12} = \Lambda_{21} = \lambda_{12} \frac{S'_1}{\delta_{12}}$, де λ_{12} – теплопровідність середовища на ділянці обмотка - магнітопровід, S'_1 – площа внутрішньої поверхні охолодження обмотки НН, δ_{12} – відстань між обмоткою і магнітопроводом;

$\Lambda_{13} = \Lambda_{31} = \lambda_{13} \frac{S_1}{\delta_{13}}$, де λ_{13} – теплопровідність середовища на ділянці обмотка - масло, δ_{13} – відстань між обмоткою і маслом (ізоляції обмотувального дроту);

$\Lambda_{23} = \Lambda_{32} = \lambda_{23} \frac{S_2}{\delta_{23}}$, де λ_{23} – теплопровідність середовища на ділянці магнітопровід - масло, S_2 – площа поверхні охолодження магнітопроводу, δ_{23} – відстань між магнітопроводом і маслом; $\Lambda_{23} = \Lambda_{32} = \lambda_{23} \frac{S_2}{\delta_{23}}$.

Зазвичай, при проектуванні трансформаторів, нехтують повним рішенням системи неоднорідних диференціальних рівнянь теплового балансу, не дивлячись на те, що саме воно дозволить визначити сталі часу нагріву середовищ, а, отже, встановити динаміку нагріву трансформатора у часі, що актуально в умовах змінного добового навантаження і з точки зору максимального використання потужності за показником існуючого рівня навантаження. Отже, часткові рішення системи рівнянь, які надані авторами тільки для обмотки і в сталому режимі роботи трансформатора, мають бути доповнені загальними рішеннями однорідних рівнянь системи і, в тому числі, для осереддя магнітопроводу та охолоджуючого масла.

III. ПОВНЕ РІШЕННЯ РІВНЯНЬ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ

Вирішення знаходять класичним методом у вигляді суми часткового і загального рішення однорідного диференціального рівняння, а саме:

$$\begin{aligned} \theta_1(t) &= \theta_{1пр.} + A_1 e^{p_1 t}, \\ \theta_2(t) &= \theta_{2пр.} + A_2 e^{p_2 t}, \\ \theta_3(t) &= \theta_{3пр.} + A_3 e^{p_3 t}, \end{aligned}$$

де $\theta_{1пр.}$, $\theta_{2пр.}$, $\theta_{3пр.}$ – значення температур обмоток, магнітопроводу і масла у системі охолодження для сталого режиму роботи трансформатора з номінальним навантаженням; A_1, A_2, A_3 – сталі інтегрування, які визначають виходячи з нульових або ненульових початкових незалежних умов; p_1, p_2, p_3 – корені характеристичних рівнянь.

В сталому режимі роботи трансформатора температури обмоток, магнітопроводу і масла системи охолодження сягнуть примусових значень для яких $\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{d\theta_3}{dt} = 0$, а відтак система НДР при частковому вирішенні спрощується до виду:

$$(\lambda_{12} + \lambda_{13} - P_{10}\alpha)\theta_{1пр.} - \lambda_{12}\theta_{2пр.} - \lambda_{13}\theta_{3пр.} = P_{10},$$

$$-\lambda_{12}\theta_{1пр.} + (\lambda_{12} + \lambda_{23})\theta_{2пр.} - \lambda_{23}\theta_{3пр.} = P_2,$$

$$-\lambda_{13}\theta_{1пр.} - \lambda_{23}\theta_{2пр.} + (\lambda_3 + \lambda_{13} + \lambda_{23})\theta_{3пр.} = 0.$$

Рішення рівнянь для сталого (примусового) режиму отримуємо у вигляді виразів:

- для масла у системі охолодження

$$\theta_{3пр.} = \frac{\frac{P_{10}\lambda_{13}}{B} + \frac{GP_2}{F} + \frac{GP_{10}\lambda_{12}}{FB}}{H - \frac{G^2}{F}};$$

- для стрижня магнітопроводу

$$\theta_{2пр.} = \frac{P_2}{F} + \frac{P_{10}\lambda_{12}}{FB} + \frac{G\theta_{3пр.}}{F};$$

- для обмоток трансформатора

$$\theta_{1пр.} = \frac{P_{10}}{B} + \frac{\lambda_{12}\theta_{2пр.}}{B} + \frac{\lambda_{13}\theta_{3пр.}}{B},$$

в яких коефіцієнти

$$B = \lambda_{12} + \lambda_{13} - P_{01}\alpha, \quad D = \lambda_{12} + \lambda_{23}, \quad C = \lambda_{33} + \lambda_{13} + \lambda_{23}, \quad F = D - \frac{\lambda_{12}^2}{B}, \quad G = \frac{\lambda_{12}\lambda_{13}}{B} + \lambda_{23}, \quad H = C - \frac{\lambda_{13}^2}{B}.$$

В перехідному режимі нагріву або охолодження трансформатора однорідні диференційні рівняння матимуть вигляд характеристичних

$$C_1 p_1 + \lambda_{12} + \lambda_{13} = 0,$$

$$C_2 p_2 + \lambda_{12} + \lambda_{23} = 0,$$

$$C_3 p_3 + \lambda_3 + \lambda_{13} + \lambda_{23} = 0,$$

корені яких становлять

$$p_1 = -\frac{\lambda_{12} + \lambda_{13}}{C_1}, \quad p_2 = -\frac{\lambda_{12} + \lambda_{23}}{C_2},$$

$$p_3 = -\frac{\lambda_3 + \lambda_{13} + \lambda_{23}}{C_3},$$

а застосовані в них позначення $C_1 = c_1 G_{об.}$, $C_2 = c_2 G_{маг.}$, $C_3 = c_3 G_{мас.}$ - теплоємності обмоток, магнітопроводу і масла в яких c_1, c_2, c_3 їх питомі теплоємності, а $G_{об.}$, $G_{маг.}$, $G_{мас.}$ відповідна вага.

Таким чином, маючи часткові і загальні рішення, отримуємо повні рішення НДУ у вигляді додатку:

- при увімкненні трансформатора до роботи с незмінним у часі номінальним навантаженням

$$\theta_1(t) = \theta_{1пр}(1 - e^{p_1 t}) + \theta_0 e^{p_1 t},$$

$$\theta_2(t) = \theta_{2пр}(1 - e^{p_2 t}) + \theta_0 e^{p_2 t}, \quad (1)$$

$$\theta_3(t) = \theta_{3пр}(1 - e^{p_3 t}) + \theta_0 e^{p_3 t};$$

- при збільшенні або зменшенні навантаження при ненульових початкових умовах

$$\theta_1(t) = \theta_1(\tau) e^{p_1 t} + \theta_{10}(1 - e^{p_1 t}),$$

$$\theta_2(t) = \theta_2(\tau) e^{p_2 t} + \theta_{20}(1 - e^{p_2 t}), \quad (2)$$

$$\theta_3(t) = \theta_3(\tau) e^{p_3 t} + \theta_{30}(1 - e^{p_3 t}),$$

де τ – поточний час зміни навантаження.

IV. АПРОБАЦІЯ ТЕПЛОВОЇ ПІДСИСТЕМИ

Силові трансформатори найважливіші пристрої у електропостачанні. Вони виконують багатократні перетворення електричної енергії і у вартості електричних мереж складають значну долю. Приблизно до 40% від сумарних втрат електричної енергії в електричних мережах складають втрати у трансформаторах.

Апробацію наведеного чисельного аналізу рівнянь теплового балансу виконаємо на прикладі однієї фази РТ типу ТМ 10000 10/0,4 кВ для тривалого і коротко часового режимів навантаження, початкові дані якого, відповідно до еквівалентної теплової схеми заміщення на рис.2 та результатів проектування, викладені у [2] та становлять:

- питомі теплопровідності трансформаторного масла, інтегральна для обох обмоток, ізоляції провідників обмоток і лаку феромагнітного осереддя, магнітопроводу та оточуючого повітря, а саме: $\lambda_3 = 0,103$ Вт/(м·К), $\lambda_1 = 300$ Вт/(м·К), $\lambda_0 = \lambda_{23} = 0,17$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 74,4$ Вт/(м·К), $\lambda_{33} = 0,028$ Вт/(м·К);

- питомі теплоємності трансформаторного масла, заліза осереддя та обмоткового матеріалу $c_3 = 2144$ Дж/(кг·К), $c_2 = 460$ Дж/(кг·К), $c_1 = 700$ Дж/(кг·К);

- середня вага трансформаторного масла, стрижня магнітопроводу, обмоткового матеріалу $G_{мас} = 83,6$ кг, $G_{ст} = 740$ кг, $G_{об} = 83,6$ кг;

- площі поверхонь охолодження обмоток НН відносно стрижня магнітопроводу, обмоток НН і ВН і стрижня магнітопроводу по відношенню до масла системи охолодження конвекцією $S_{12} = 0,564$ м²,

$S_{13} = 7,43 \text{ м}^2$, $S_{23} = 0,2 \text{ м}^2$ та третина поверхні баку з радіаторами (на фазу) $SB = 18 \text{ м}^2$;

- відстані між обмоткою НН і стрижнем $\delta_{12} = 0,03 \text{ м}$, товщина ізоляції обмотувального дроту обмоток (телефонної папири) $\delta_{13} = 0,0005 \text{ м}$, товщина лаку на магнітопроводі $\delta_{23} = 0,0005 \text{ м}$;

- втрати потужності в фазі обмоток НН $P_1 = 1736 \text{ Вт}$ і ВН $P_1 = 2114 \text{ Вт}$, у стрижні площинного магнітопроводу $P_{20} = 467 \text{ Вт}$;

- температурний коефіцієнт опору обмотувального дроту $\alpha = 0.004 \text{ 1/К}$.

Теплопровідності на ділянках теплопередачі між взаємодіючими середовищами розраховано як теплові опори, тобто у вигляді:

$$\Lambda_{12} = 0,5(\lambda_3 + \lambda_0) \frac{S_{12}}{\delta_{12}},$$

$$\Lambda_{13} = \lambda_0 \frac{S_{13}}{\delta_{13}},$$

$$\Lambda_{23} = \lambda_{23} \frac{S_{23}}{\delta_{23}},$$

$$\Lambda_{33} = \lambda_{33} \frac{SB}{\delta_{33}}.$$

Тривалий режим нагріву РТ

Алгоритм вирішення рівнянь теплового балансу реалізовано у програмному середовищі MathCAD за яким виконані розрахунки часових залежностей усереднених температур нагріву обмоток, магнітопроводу та масла у системі охолодження, а на рис.3 побудовано їх часові діаграми за рівняннями (1) в яких прийнято температуру оточуючого середовища $\theta_0 = 0$. Примусові значення температур середовищ, яких вони сягають після встановлення теплового балансу складають відповідно: для обмоток $\theta_{1пр} = 49,42 \text{ }^\circ\text{C}$, для магнітопроводу $\theta_{2пр} = 47,20 \text{ }^\circ\text{C}$, для охолоджуючого масла $\theta_{3пр} = 40,30 \text{ }^\circ\text{C}$.

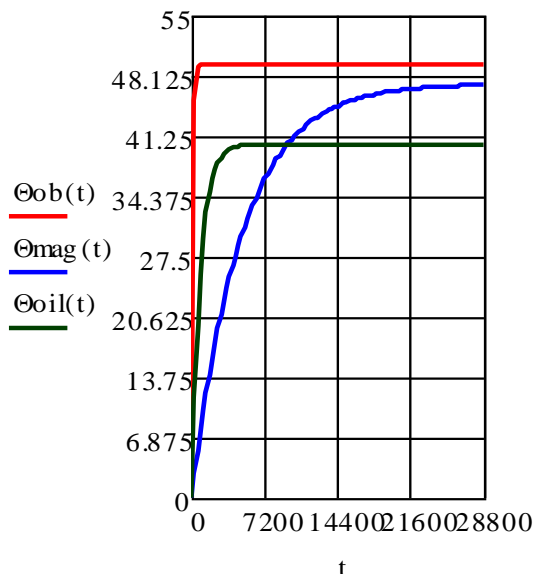


Рисунок 3 – Часові діаграми температур на протязі 8 годин після увімкнення РТ на повну потужність (обмотки – вища, магнітопровід – нижча, масло – середня)

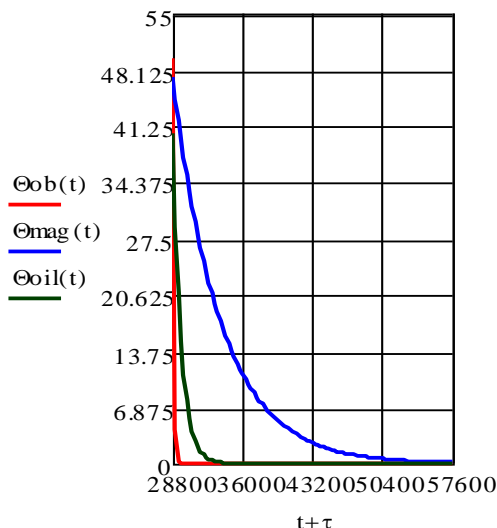


Рисунок 4 – Часові діаграми температур на протязі 8 годин охолодження РТ (обмотки – нижча, магнітопровід – вища, масло – середня)

Часові діаграми охолодження трансформатора розраховано і побудовано на рис.4 згідно з рішенням рівнянь теплового балансу у вигляді (1) але при умові, що кінцеві температури нульові, а початкові – ті, що були встановлені під час нагріву, отже

$$\theta_1(t) = \theta_{1пр} e^{p_1 t},$$

$$\theta_2(t) = \theta_{2пр} e^{p_2 t}, \quad \theta_3(t) = \theta_{3пр} e^{p_3 t}.$$

Короткочасовий режим роботи РТ

Враховуючи, що найчастіше РТ працюють при добовій зміні навантаження із відповідною зміною втрат короткого замикання $P_{10}(1 + \alpha\theta_1)$ при незмінних втратах холостого ходу P_2 , доцільно простежити часові діаграми температур при скороченій тривалості циклу нагріву і охолодження.

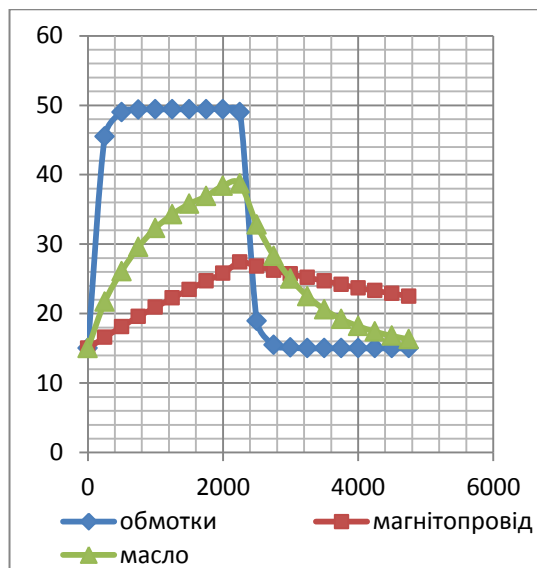


Рисунок 5 – Часова діаграма нагрів-охолодження РТ у кратко строковому режимі роботи

Даний режим роботи простежимо на тривалості циклу нагріву - охолодження у 40 хвилин при температурі оточуючого середовища $\theta_0 = 15^\circ\text{C}$, з метою підтвердити адекватність розробленої математичної моделі теплообміну. На рис.5 наведено зведена часова діаграма нагрів - охолодження, яка відповідає кратко строкковому режиму роботи і охолодження трансформатора.

Повторно-короткочасовий режим роботи РТ

Припустимо, що РТ (математичну модель теплового балансу якого апробовано вище) працює за гіпотетичним графіком навантажень на рис.6 при середній річній температурі оточуючого середовища $\theta_0 = +15^\circ\text{C}$. Відтак з 00.00 до 07.00 (вночі) трансформатор працює на пів потужності, з 07.00 ранку і до 14.00 (вдень) трансформатор працює з потужністю яка відповідає номінальним втратам короткого замикання, від 14.00 і до 18.00 потужність трансформатора зменшується на 25%, а з 18.00 і до 00.00 він перевантажений на 40%. Після цього добовий цикл навантаження повторюється. Теоретично, перегріву трансформатора відповідатиме часова характеристика $\tau(t)$ на рис.7, поруч з якою наведено часову характеристику $\tau_{iP_k}(t)$, що відповідає навантаженню трансформатора на протязі доби.

Вочевидь, що при короткочасному режиму ро-

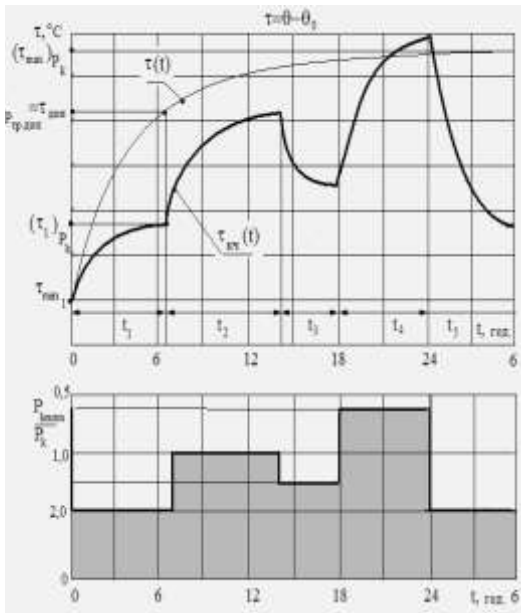


Рисунок 6 – Навантажувальна характеристика РТ упродовж доби

боти допустима величина потужності може бути встановлена більшою, ніж при тривалому режимі. Якщо є відомим допустиме перевищення температури $\tau_{\text{доп}}(t)$, тривало допустима потужність $P_{\text{тр,доп}}$ і стала часу нагріву трансформатора $T = -1/p$, встановимо коефіцієнт його припустимого перевантаження по потужності при роботі у короткочасному режимі для кожного проміжку часу та узагальнений коефіцієнт - мультиплікативно.

Протягом часу першого циклу t_1 трансформатор нагрівається до перевищення температури τ_1 , часу t_2 другого циклу - до τ_2 тощо. Якщо добовий цикл буде повторюватись періодично, то матимемо так званий квазівстановлений режим. Для повного використання активної частини трансформатора повинна виконуватись умова $\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{доп}}$ за умов нагріву та термічної стійкості ізоляції дротів в котушках обмоток. Величина $\tau_{\text{доп}}$ визначається рівняннями (1) або узагальнено для перевищень температури як

$$\tau_i = (\tau_{\text{пр}})_{P_{\text{тр,доп}}} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right) + \tau_{\text{min}} e^{-\frac{t_1}{T}}, \quad (3)$$

де $\tau_{\text{min}} = \tau_{\text{max}} \cdot e^{-\frac{t_1}{T}}$.

Якщо потужність P_k буде незмінною тривалий час $t > 4T$, то у відповідності до рівняння (3) перевищення температури становить

$$(\tau_{\text{max}})_{P_k} = \frac{\left(\frac{P_{k\text{ном}}}{P_k}\right)P_k}{k_T S_{\text{ох}}}. \quad (4)$$

Протягом часу t_1 максимальне перевищення температури становить

$$(\tau_{\text{max}})_{P_k} = \frac{\left(\frac{P_{k\text{ном}}}{P_k}\right)P_k}{k_T S_{\text{ох}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right). \quad (5)$$

Однією з умов роботи трансформатора без перегріву є виконання нерівності

$$(\tau_{\text{max}})_{P_k} \leq (\tau_{\text{пр}})_{P_{\text{тр,доп}}},$$

$$(\tau_{\text{пр}})_{P_{\text{тр,доп}}} = \frac{P_{\text{тр,доп}}}{k_T S_{\text{ох}}},$$

з яких витікає

$$\frac{P_{\text{тр,доп}}}{k_T S_{\text{ох}}} = \frac{\left(\frac{P_{k\text{ном}}}{P_k}\right)P_k}{k_T S_{\text{ох}}} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right) = \frac{k_{\text{нав.}}}{k_T S_{\text{ох}}} P_k \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right),$$

де коефіцієнт навантаження $k_{\text{нав.}} = \frac{P_{k\text{ном}}}{P_k}$.

Звідси коефіцієнт допустимого перевантаження трансформатора по потужності у короткочасному режимі

$$k_p = k_{\text{нав.}} \frac{P_k}{P_{\text{тр,доп}}} = \frac{k_{\text{нав.}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{T}}}. \quad (6)$$

Якщо припустити, що потужність трансформатора пропорційна квадрату струму, то коефіцієнт перевантаження за струмом у короткочасному режимі становить

$$k_i = \sqrt{k_p} = \sqrt{\frac{k_{\text{нав.}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{T}}}}. \quad (7)$$

Із виразів (6) і (7) витікає, що при конструюванні трансформаторів призначених для роботи у коротко часовому режимі роботи, слід збільшувати його сталу часу нагріву, так як при цьому збільшується коефіцієнт перевантаження за потужністю і струмом. Збільшення сталої часу досягається застосуванням конструкційних матеріалів з підвищеною теплоємністю.

На рис.7 наведені часові діаграми температур обмоток, магнітопроводу і охолоджуючого масла РТ типу ТМ-10000 10/0,4 кВ, які побудовані на підставі розробленої вище математичної моделі теплового балансу і її розрахунків у програмному середовищі MathCAD для коротко часового режиму роботи упродовж доби та відповідно до навантажувальної характеристики на рис.6

На першій ділянці навантажувальної діаграми тривалістю $t_1 = 25200$ с, при половинному навантаженні трансформатора, найвищу температуру має магнітопровід. Його стала часу нагріву $T_2 = 4912$ с і коефіцієнт допустимого перевантаження трансформатора по потужності $k_{1p} = \frac{2}{1 - e^{-\frac{25200}{4912}}} = 2,012$. На другій ділянці навантажувальної діаграми $t_2 = 25200$ с, домінуючою є узагальнена обмотка зі сталою навантаження $T_1 = 115,53$ с, трансформатор має повне навантаження а отже $k_{2p} = 1$. На третій ділянці тривалістю $t_3 = 14400$ с домінує магнітопровід із сталою часу $T_2 = 4912$ с при навантаженні 0,75 від номінального, а отже $k_{3p} = 1,333$. Четверта ділянка тривалістю $t_4 = 21600$ с домінуючими є обмотки із сталою часу $T_1 = 115,53$ с при навантаженні на 40% більшому за номінальне, а отже $k_{4p} = 0,714$.

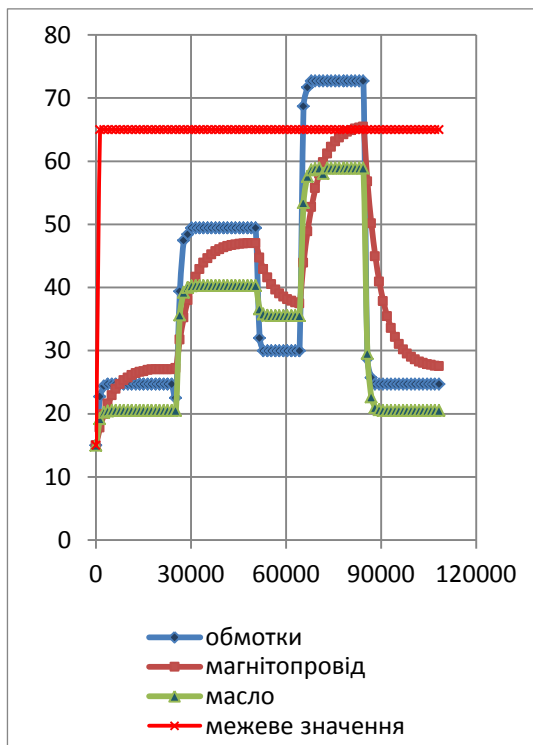


Рисунок 7 – Часові діаграми температур РТ типу ТМ-10000 10/0,4 кВ відповідно до навантажувальної характеристики на рис.6

Розглядаючи трансформатор в цілому можливо припустити, що його коефіцієнт допустимого перевантаження по потужності у короткочасному режимі визначається мультиплікативно

$$k_p = \sqrt{k_{1p}k_{2p}k_{3p}k_{4p}} = \sqrt{2,012 \cdot 1,0 \cdot 1,333 \cdot 0,714} = 1,384.$$

Розрахунок часу утримання трансформатора у стані перевищеного навантаження $t_{пс}$ здійсним зворотним рішенням рівняння (1), звідки

$$e^{-\frac{t_{пс}}{T}} = 1 - \frac{k_{наб.}}{k_p},$$

$$-\frac{t_{пс}}{T} \ln(e) = \ln 1 - \ln k_{наб.} + \ln k_p$$

або

$$-t_{пс} = T (\ln 1 - \ln k_{наб.} + \ln k_p). \quad (8)$$

Для прикладу, що розглядається, час утримання трансформатора у стані перевищеного навантаження з коефіцієнтом перевантаження $k_p = 1,384$ складає

$$t_{пс} = T_{max} (-2,718 + 3,42 - 3,991) = 4912 \cdot 3,289 = 16156 \text{ с} = 4,5 \text{ години.}$$

ВИСНОВКИ

1. Оцінювання теплового стану найважливіших елементів структури трансформатора - дротів і їх ізоляції особливо в динаміці під час роботи у повторно - коротко часовому режимі дозволяє встановити не тільки допустиме перевищення в них температури, час її дії, а отже і вплив нагріву на термін гідності трансформатора за виразом $\tau = 7,15 \cdot 10^4 \cdot e^{-0,088\theta}$, де θ – температура ізоляції або дроту та такого, що працює в електричній мережі.

2. Часові діаграми температур дозволяють впритул наблизитись до вибору оптимального за потужністю трансформатора, який працює у повторно – коротко часовому режимі за умови, що навантажувальна характеристика є відомою. Для прикладу, що розглядався припустиме навантаження складає 13840 кВА на протязі 4,5 годин. Перевищення температури ізоляції обмоток класу А у 10°C над допустимою суттєво не вплине на термін її гідності.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Беляев, Н. М.** Термодинамика. – К.; Вища школа. Головное изд-во, 1987. – 344 с.
2. **Байдак, Ю. В.** Энергоэффективные трансформаторы для электропотребителей с различными графиками нагрузки [Текст] / Ю. В. Байдак, В. П. Чайковский, В. А. Матухно // Холодильна техніка та технологія. — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 34-39

V. Matukhno¹, Yu. Baidak², P. Tomlein³

¹ Odessa National Polytechnic University, 1 Shevchenko av., Odessa, 65044, Ukraine

² Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

³ Slovak Association for Cooling and Air Conditioning Technology, Hlavná 325, 900 41 Rovinka, Slovak Republic

THERMAL SUBSYSTEM OF VOLTAGE DISTRIBUTION TRANSFORMER

Improving of the technical level of modern distribution transformers (DT) by reducing of their weight and dimensions, increasing of specific power are inevitably associated with the development of method which takes into account the thermal processes and technical means of intensifying the existing and new systems of their cooling. Particularly important rises the question of effective cooling of small and medium power distribution transformers, which constitute the bulk of the complete switchgear in power supply systems. The result of the study is the substantiation of expediency for simulation results implementation of heat balance equations drawn up for the active part of the voltage distribution transformer, at the stage of its final and qualifying design. The active part is located in the transformer oil environment, and heat emission is carried out by heat transfer and convection. The heat balance mathematical model corresponds to the equivalent thermal equivalent circuit, consisting of two adjacent units with heat sinks - generalized coils and ferromagnetic core and of the third node adjacent to them - moving matter from the oil, which additionally contact with the infinite heat capacity environment. The solution of equations obtained for the mean temperatures of the winding, magnetic conductor rod and oil in function of time, allows setting of their expected values during transformer operation and especially with the uneven schedule of its loading, and to exercise grounded choice of magnetic induction in the magnetic rod and the current density in the windings according to the parameters of allowable for them heating temperatures

Keywords: Simulation; Distribution Transformer; Thermal balance; Time Diagrams of Temperatures; Chart load; Thermal Subsystem

REFERENCES

1. **Beliaev, N. M.** (1987). *Termodynamika*. Kyiv, Vyshcha shkola, 344 p.

2. **Baidak Yu., Matukhno V., Chaikovskiy V.** (2016). Energy efficient transformers with various load graphics for the consumers of electric power. *Refrigeration Engineering and Technology*, 52(2), 34-39.

Received 17 September 2016

Approved 01 November 2016

Available in Internet 30 November 2016