

УДК 621.314.222.600

Денисенко М.А., докт. техн. наук ФРН,
Притискач І.В., магістрант.
Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна.

СТОХАСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ТЕРМІЧНОГО ЗНОСУ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ МАСЛЯНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Наведено стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів за критерієм термічного зносу ізоляції та порівняння її з навантажувальною здатністю трансформатора за критерієм допустимого їх нагрівання на основі термічних моделей нагрівання і моделей зносу ізоляції трансформаторів згідно МГОСТ14209-97.

Приведено стохастическое оценивание нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов по критерию термического износа изоляции и сравнение ее с нагрузочной способностью трансформатора по критерию допустимого их нагрева на основе термических моделей нагрева и моделей износа изоляции трансформаторов по МГОСТ14209-97.

Presented stochastic evaluation of load capacity of power oil transformers on the criterion of thermal insulation deterioration and its comparison with a loading capacity of the transformer on the criterion of acceptable heating models based on thermal heating and wear patterns of transformers isolation according MGOST14209-97.

1. Загальні відомості

Відмова силових трансформаторів є однією з найбільш частих причин тривалих перерв в електропостачанні з серйозними наслідками для надійності електропостачальної системи. Тому вкрай важливо вміти прогнозувати стан обладнання з метою виявлення його майбутньої відмови в стадії її формування.

У сучасних силових трансформаторах застосовують тверду ізоляцію в поєднанні з електроізоляційним маслом. В якості основної твердої ізоляції масляних трансформаторів в даний час застосовують волокнисті матеріали з целюлози. До них відносяться електроізоляційні картони і папір. Однак, така система зазнає значної деградації через теплові, електричні та механічні впливи. Ці впливи, як по одинці так і в сукупності, впливають на швидкий знос ізоляційних матеріалів. Тепловий вплив, як правило, розглядається як найбільш важливий фактор, що впливає на термін служби трансформаторів. Серед всіх параметрів, що використовуються як показники старіння ізоляції, температура найбільш нагрітої точки обмотки (ННТ) надає найбільше інформації щодо цього процесу.

Математичні моделі для оцінки можливих наслідків різних режимів навантаження, циклічних або систематичних, за різних температур охолоджувальної середовища наведено у МГОСТ14209-97 [1]. Ці моделі включають методики розрахунку допустимої температури в трансформаторі, зокрема, температури ННТ. Ця температура, у свою чергу, використовується для визначення відносної швидкості термічного зносу ізоляції. Найбільш точними моделями вибору трансформаторів є стохастичні моделі, які базуються на моделюванні випадкових фізичних процесів в трансформаторі з використанням ймовірнісної вихідної інформації. Тому виникає необхідність в проведенні досліджень методики вибору трансформаторів за критерієм зносу ізоляції з використанням цих моделей.

2. Постановка задачі досліджень

Задачі досліджень: порівняння результатів вибору силових масляних трансформаторів з використанням різних критеріїв, а саме – температури масла і найбільш нагрітої точки (ННТ) обмотки трансформатора і зносу його ізоляції. Оцінка

навантажувальної спроможності силових трансформаторів за різними значеннями імовірності перевищення допустимої швидкості зносу ізоляції та терміну служби.

Мета досліджень: дослідити відмінності одержаних результатів і можливість узагальнення та уточнення результатів досліджень. Скласти рекомендації з використання різних критеріїв вибору силових масляних трансформаторів. Отримати криві навантажувальної здатності трансформаторів для різних критеріїв їх вибору.

3. Розв'язання задачі досліджень

3.1 Термічні моделі зносу ізоляції трансформаторів

Оцінку термічного старіння ізоляції проводять за зміною її фізичних властивостей у часі, наприклад міцності до напруги, механічної міцності, опору ізоляції (потрібно відмітити, що у порівнянні із зносом, викликаним перевищенням температури, механічний знос майже не впливає на властивості ізоляції) [2].

Зміна фізичних властивостей ізоляції обумовлена хімічною реакцією – термічним окисленням ізоляції згідно рівняння

$$-\frac{d(Z_H)}{dt} = W(t)Z_H, \quad (1)$$

де $W(t)$ – характеристика швидкості реакції, для якої Ареніусом встановлена залежність

$$W(t) = W_m \exp\left(-\frac{E}{RT(t)}\right), \quad (2)$$

де W_m – максимальне значення характеристики $W(t)$;

E – енергія активації;

R – газова стала;

T – функція температури в $^{\circ}K$.

Ввівши позначення

$$B = E/R, \quad (3)$$

отримаємо

$$\int_{-Z_{H_0}}^{Z_H(t)} \frac{d(Z_H)}{dt} = W_m \int_0^t \exp\left(-\frac{B}{T(t)}\right) dt, \quad (4)$$

де Z_{H_0} , $Z_H(t)$ – характеристики відповідно початкового (за $t=0$) і поточного стану ізоляції.

Якщо $T = \text{const}$ і дорівнює усталеній температурі провідника і, відповідно, ізоляції, $I = \text{const}$ та температура навколишнього середовища $\theta_{н.с.} = \text{const}$, то рівняння (4) перетворюється до виду

$$Z_H(t) = Z_H \exp\left(-W_m t \exp[-B/T]\right). \quad (5)$$

Термін служби (довговічності) ізоляції – це такий час служби t_c , за який її властивості знижуються від Z_{H_0} до критичного значення Z_{H_c} , за яким експлуатація ізоляції стає небезпечною.

З рівняння (5) за $t = t_c$ і $Z_H(t) = Z_{H_c}$ отримуємо вираз для t_c

$$t_c = A \exp(B/T), \quad (6)$$

де $A = \frac{1}{W_m} \ln\left(\frac{Z_{H_0}}{Z_{H_c}}\right)$.

Якщо прийняти $I = I_n$, $\theta_{н.с.} = \theta_{н.с.б}$, $\theta(t) = \theta_{\delta}$, то строк служби t_c буде рівним базисному (номінальному) $t_{c.б}$. Наприклад, для трансформатора за $I = I_n$, $\theta_{н.с.} = 20^{\circ}C$, $\theta(t) = 90^{\circ}C$ строк служби $t_{c.б} = 25$ років.

Окрім цієї моделі в інженерній практиці широко використовують модель, визначену

Монтзінгером

$$t_c \approx a \exp(-b\Theta), \quad (7)$$

де $a = \exp(\ln A + B/T_0) = Ae^{B/T_0}$;

$$b = B/T_0.$$

Однак ця модель дає прийнятне співпадіння з моделлю (6) тільки у вузькій області температур $\theta = 90-110$ °С. Якщо максимально допустимі температури лежать в межах $140-160$ °С, модель (7) дає великі завищення значень t_c .

Перехід від моделі (6) до моделі (7) можливий, якщо в моделі (7) прийняти замість b величину b_p згідно виразу

$$b_p = B / [T_0(T_0 + \Theta)] = b - B\theta / [T_0^2(T_0 + \theta)]. \quad (8)$$

Можна отримати величину відхилення температури, за якої величина зносу зміниться в 2 рази:

$$\Delta\theta = \frac{\ln 2(T_0 + \theta)^2}{B}. \quad (9)$$

Згідно рекомендацій МЕК $\Delta\theta = 6$ °С.

В інженерних розрахунках зручно використовувати зміну відносного зносу ізоляції згідно виразу

$$zn(t) = \frac{zn_0 - zn(t)}{zn_0 - zn_c} = \frac{1 - zn(t)/zn_0}{1 - zn(t)/zn_c}, \quad (10)$$

де $zn(t)$ – функція зносу ізоляції за змінними $I(t)$ та $\theta_{н.с.}(t)$:

$$zn(t) = zn_0 \cdot \exp\left(-W_m \int_0^t \exp\left[-\frac{B}{T_0 + \Theta}\right] dt\right). \quad (11)$$

Якщо $t \leq t_{c.6}$ виконується співвідношення $zn(t) \leq 1$.

Отримаємо:

якщо $\theta = \text{const}$ –

$$zn(t) = \frac{1}{1 - zn(t)/zn_0} \left[1 - \exp\left(-W_m \exp\left[-\frac{B}{T_0 + \theta}\right] t\right) \right]; \quad (12)$$

якщо $\Theta = \Theta(t)$ –

$$zn(t) = \frac{1}{1 - zn(t)/zn_0} \left[1 - \exp\left(-W_m \int_0^t \exp\left[-\frac{B}{T_0 + \theta}\right] dt\right) \right]. \quad (13)$$

Обчислення інтеграла в (13) досить важко здійснити навіть у разі періодично змінного графіку електричних навантажень (ЕН), тому базисний час $T_6 = (3-4)\tau_0$ доцільно розбити на n малих проміжків δt_i , в межах яких приймають температуру сталою і рівною більшій температурі на початку або в кінці інтервалу δt_i .

Прийнявши, що через T_6 закон зміни струму повторюється, модель перетворюємо до виду

$$zn(t) = zn(zT_6) = \frac{1}{1 - zn(t)/zn_0} \left[1 - \exp\left(-W_m z \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{B}{T_0 + \theta}\right] \Delta t_i\right) \right], \quad (14)$$

де z – кількість інтервалів T_6 .

Приймаючи $zn(zT_6) = 1$ за $t = t_{c.6}$, отримуємо:

$$t_c = \frac{n \ln(3N_0 / 3N_c)}{W_M \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{B}{T_0 + \theta}\right] \Delta t_i}. \quad (15)$$

Моделі можна умовно вважати адекватними моделями термічного старіння ізоляції. Спрощену модель термічного зносу за час δt_i на основі виразу (14) можна подати у вигляді

$$ЗН(\delta t_i) = \frac{1}{T_0} \int_0^{\delta t_i} 2^{[\theta_{h,i}(t) - \theta_{h,r}]/\Delta\theta} dt; \quad (16)$$

звідки:

$$ЗН(\delta t_i) = \frac{\delta t_i}{T_0} 2^{[\theta_{h,i}(t) - \theta_{h,r}]/\Delta\theta}, \quad (17)$$

де $\theta_{h,i}(t)$ – температура найбільш нагрітої точки обмотки для i -го моменту часу;
 $\theta_{h,r}$ – граничне значення температури найбільш нагрітої точки обмотки.

Саме модель (17) рекомендована МГОСТ14209-97 для використання в інженерній практиці. Її використовують в припущенні незмінних значень $\theta_{h,i}$ на інтервалах δt_i .

Відносний знос ізоляції за T_0 підраховують за виразом

$$ЗН(T_0) = \sum_{i=1}^n ЗН(\delta t_i). \quad (18)$$

3.2 Імітація реалізацій відносного зносу та терміну служби ізоляції трансформатора

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

1. Імітують ансамбль реалізацій $I_v(t)$ навантажувального струму $I(t)$ на інтервалі часу T_0 згідно [2]. При цьому може бути використана як більш складна, так і спрощена імітація струму, який підкоряється нормальному закону розподілу.

2. Для кожної реалізації навантажувального струму обчислюють:

2.1 Реалізації $\theta_{o,v}(t)$ і $\theta_{h,v}(t)$ з використанням більш адекватної або спрощеної термічної моделі трансформатора [3].

2.2. Реалізації $ЗН(t)$ за формулою (14).

2.3. t_c за формулою (15).

2.3. В залежності від цілей досліджень проводиться статистична обробка ансамблів реалізацій кожної з характеристик з одержанням їхніх статистичних характеристик, насамперед, детермінованих функцій квантилів $\theta_{o,\alpha_0}(t)$, $\theta_{h,\alpha_0}(t)$, $ЗН_\beta(t)$, $t_{c,\beta}$ за відповідними ймовірностями перевищення α_0 та β .

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

На рис.1 наведено алгоритми знаходження допустимих значень параметрів $v[I]$, \bar{I} для трансформаторів за умов $t_{c,\beta} = t_{c,n}$.

В дослідженнях прийняті наступні спрощення і допущення:

1. Електричний струм $I(t)$ розглядався як 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 [2].

3. Температура охолодження трансформатора θ_a приймалась постійною в часі і рівною 20°C .

4. Навантаження, що передувало аварійному режимові, 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.

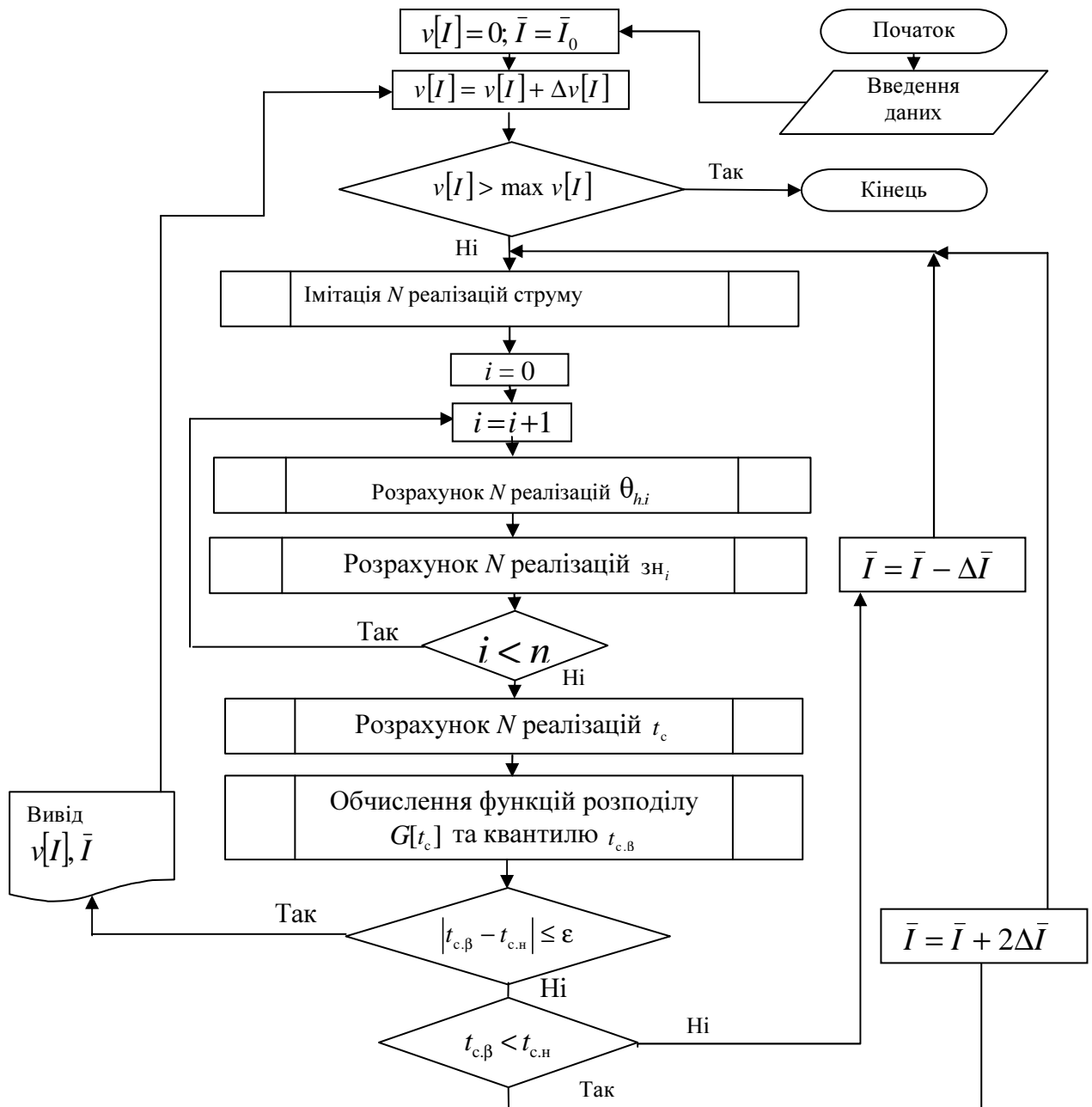


Рис.1. Алгоритм визначення допустимих значень $v[I], \bar{I}$ для трансформаторів за умови $t_{c,\beta} = t_{c,n}$

Вхідними даними для моделювання є:

- кількість реалізацій N ;

- кількість n дискретних моментів часу, на які розбивається T_c ;
- час дискретизації δt_i ;
- ймовірність α_θ перевищення температурою масла і ННТ обмотки своїх допустимих максимальних значень $\alpha_\theta = 0,05$ згідно [2];
- точність ε ;
- тип охолодження трансформатора;
- параметри трансформаторів згідно МГОСТ14209-97.

Використання спрощеної моделі ЕН у виді випадкового стаціонарного процесу обумовлене тим, що в інженерній практиці найчастіше відсутні вихідні дані про ЕН як нестаціонарного випадкового процесу. Параметри ж розподілу стаціонарного випадкового процесу $\bar{I}, v[I]$ можуть бути визначені експериментальним або розрахунковим шляхом [2].

На рис. 2 наведено криві $\frac{\bar{I}}{I_{\text{ном}}} = f(v[I])$ для розподільних трансформаторів з типом охолодження *ONAN*, які отримано для різних критеріїв вибору. Крива 1 відповідає вибору за умовою $t_{c,\beta} \approx t_{c,h}$, якщо $\beta = 0,05$; криву 2 побудовано з використанням умов $\theta_{o,\alpha_{\theta,\max}} \approx \theta_{o,\text{доп}}$ та $\theta_{h,\alpha_{\theta,\max}} \approx \theta_{h,\text{доп}}$ за значенням імовірності $\alpha_\theta = 0,05$. Криві 3 та 4 побудовано відповідно за такими ж критеріями, але за значеннями ймовірностей $\alpha_\theta = 0$ та $\beta = 0$.

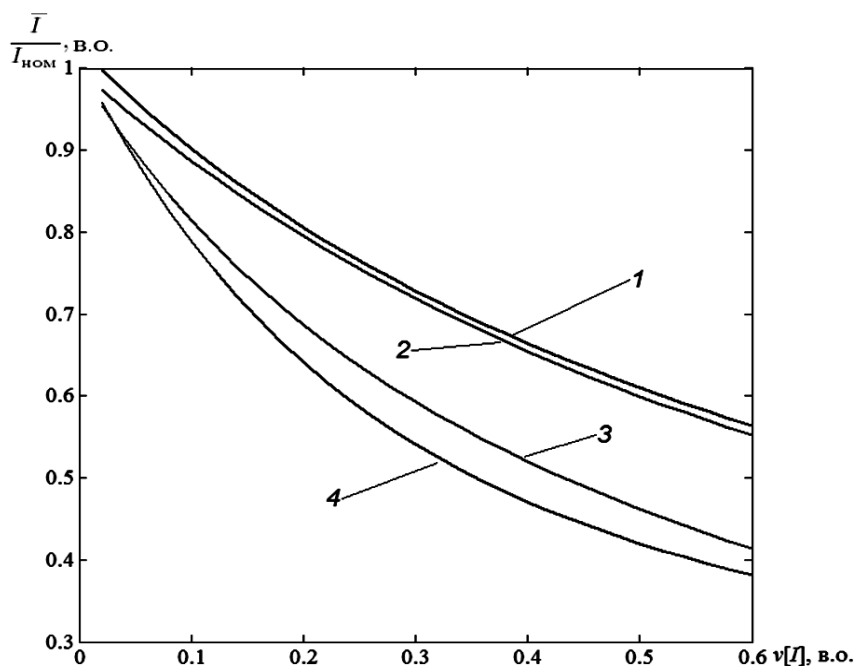


Рис.2. Криві навантажувальної здатності для розподільних трансформаторів з охолодженням *ONAN*

Найбільші допустимі параметри розподілу навантажувального струму $\bar{I}, v[I]$ (найбільшу навантажувальну здатність трансформаторів) дає застосування критерію вибору за допустимим терміном служби (крива 1) за значенням імовірності перевищення допустимого значення $\beta = 0,05$. Однак відмінності між цією кривою та кривою, отриманою за критерієм допустимих температур масла та ННТ, у всьому діапазоні зміни коефіцієнта варіації не перевищують 3 %. З рисунка також видно, що використання імовірності $\alpha_\theta = 0$ та $\beta = 0$ призводить до зменшення навантажувальної здатності трансформатора на 20–25 % у разі значних величин коефіцієнту варіації. Також необхідно відмітити, що в обох випадках криві, отримані за критерієм нагрівання масла та обмотки, лежать нижче отриманих за

критерієм терміну служби, тобто у разі вибору трансформатора за першим критерієм одночасно задовольняються умови другого критерію.

Така ж закономірність була одержана і для трансформаторів з іншими видами охолодження.

Також в роботі проведено дослідження навантажувальної здатності трансформатора в залежності від його бажаного терміну служби. На рис. 3 наведено криві $\frac{\bar{I}}{I_{\text{ном}}} = f(t_c)$, отримані за умов $\beta = 0,05$, $\theta_o < \theta_{o,\text{доп}}$ і $\theta_h < \theta_{h,\text{доп}}$ (де $\theta_{h,\text{доп}}$ – максимально допустима температура найбільш нагрітої точки, °С; $\theta_{o,\text{доп}}$ – максимально допустима температура масла у верхніх шарах, °С) для значень коефіцієнта варіації 0,1.

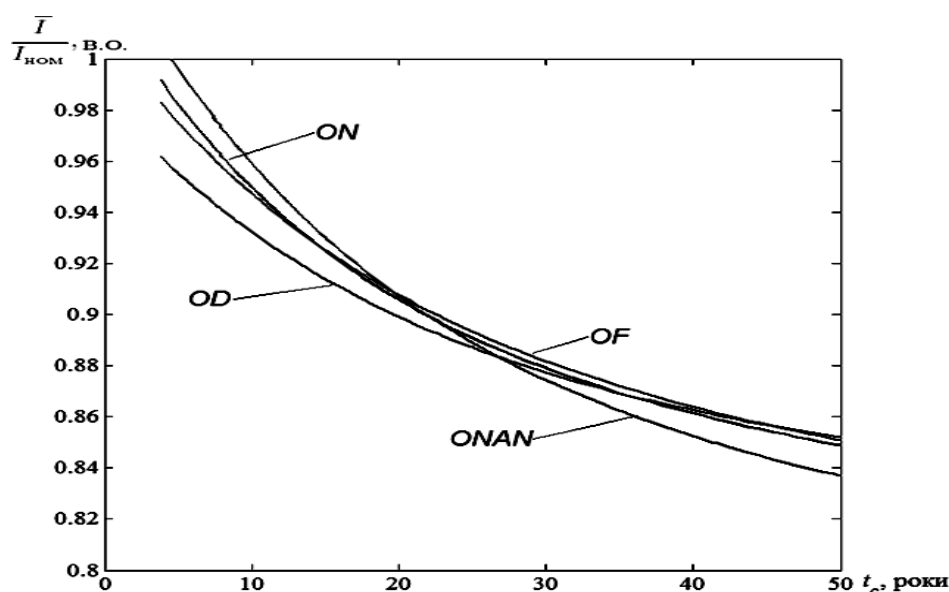


Рис.3. Криві навантажувальної здатності для всіх типів трансформаторів в залежності від бажаного терміну служби за $\nu[I] = 0,1$

Висновки

1. Вибір силових масляних трансформаторів за критеріями нагрівання, виконаний з використанням термічних моделей, що наведені в МГОСТ 14209-97, з достатньою точністю забезпечує одночасне виконання критерію вибору за термічним зносом ізоляції.

2. Криві допустимих параметрів навантажувального струму трансформаторів (рис. 2) рекомендуються до використання в інженерній практиці для вибору параметрів розподільних трансформаторів та параметрів їх режимів за умовами допустимих нагрівання та термічного старіння ізоляції, а криві (рис. 3) – і для вибору параметрів трансформаторів та параметрів їх режимів за бажаним часом експлуатації, відмінним від номінального.

Перелік посилань

1. МГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. Дата введения 2002.01.01.
2. 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.
3. Денисенко М.А., Притискач І.В. Стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів // Промелектро. – 2011. – №1. – С. 25–31.