

М.А. Денисенко, канд. техн. наук, професор; І.В. Притискач
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ОЦІНЮВАННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ МАСЛЯНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗА КРИТЕРІЄМ ТЕРМІЧНОГО ЗНОСУ ЇХ ІЗОЛЯЦІЇ

Значна частина діючого обладнання електропостачальних систем була введена в експлуатацію ще в 60-80-х роках ХХ століття. Тому вкрай важливо вміти правильно оцінювати стан силових трансформаторів, визначити допустимість певних режимів їх роботи, визначити ресурс їх ізоляції та прогнозувати допустимий термін служби. У роботі розглянута задача вибору силових масляних трансформаторів з використанням стохастичних моделей за різними критеріями, а саме – температури масла і ННТ обмотки трансформатора і зносу його ізоляції. Для цього виконувалося імітаційне моделювання температур масла і ННТ обмотки трансформатора, а також відносного зносу його ізоляції, з одержанням їх статистичних характеристик, насамперед, детермінованих функцій квантилів за відповідними ймовірностями.

Ключові слова: електропостачальна система, електричне навантаження, трансформатор, стохастична модель, термічна модель.

Вступ. Значна частина діючого обладнання електропостачальних систем була введена в експлуатацію ще в 60-80-х роках ХХ століття. Особливо це стосується силового електрообладнання, зокрема масляних трансформаторів. Їх відмова є однією з найбільш серйозних причин тривалих перерв в електропостачанні з значними наслідками для надійності електропостачальної системи. Тому вкрай важливо вміти правильно оцінювати стан силових трансформаторів, визначити допустимість певних режимів їх роботи, визначити ресурс їх ізоляції та прогнозувати допустимий термін служби.

Тепловий вплив, як правило, розглядається як один з найбільш важливих факторів, що впливає на термін служби силових масляних трансформаторів. На даний час розроблені численні математичні моделі цього процесу для оцінки можливих наслідків різних режимів навантаження, циклічних або систематичних, за різних температур охолоджувального середовища. Одна з таких моделей наведена в ГОСТ14209-97 [1], який містить методики розрахунку допустимої температури в трансформаторі, зокрема, температури найбільш нагрітої точки (ННТ). Температуру ННТ, у свою чергу, використовують для визначення відносної швидкості термічного зносу ізоляції.

Використання ГОСТ14209-97 в інженерній практиці зазвичай передбачає детермінований підхід до вибору трансформаторів та оцінки його навантажувальної здатності за різними критеріями. Проте з розвитком та впровадженням сучасних мікропроцесорних систем збору та обробки інформації про електричні навантаження на підстанціях з'являється можливість скористатися більш точними стохастичними моделями, які базуються на моделюванні випадкових фізичних процесів в трансформаторі з використанням ймовірнісної вихідної інформації.

Постановка задачі. У роботі ставилася задача порівняти результати вибору силових масляних трансформаторів з використанням стохастичних моделей за різними критеріями, а саме – температури масла і ННТ обмотки трансформатора і зносу його ізоляції. Також необхідно було виконати оцінку навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів за різними значеннями ймовірності перевищення допустимого зносу ізоляції та ймовірності скорочення терміну служби трансформаторів.

Також важливо було скласти рекомендації з використання різних критеріїв вибору силових масляних трансформаторів та отримати характеристики навантажувальної здатності трансформаторів за різними критеріями їх вибору, які можуть використовуватися в інженерних розрахунках при побудові та оцінці поточного стану електропостачальних систем різного функціонального призначення.

Термічні моделі зносу ізоляції трансформаторів. Оцінку термічного старіння ізоляції проводять за зміною її фізичних властивостей у часі. Зміна фізичних властивостей ізоляції обумовлена хімічною реакцією – термічним окисленням ізоляції згідно рівняння

$$-\frac{d(F_1)}{dt} = W(t)F_1, \quad (1)$$

де F_1 – характеристика стану ізоляції; $W(t)$ – характеристика швидкості реакції, для якої Арреніусом

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 $^{\circ}K$.

Термін служби ізоляції – це такий час t_c , за який її властивості знижуються від $F_{I,0}$ до критичного значення $F_{I,c}$, за яким експлуатація ізоляції стає небезпечною.

Для t_c можна отримати вираз [2]

$$t_c = A \exp(B/T), \quad (3)$$

$$\text{де } A = \frac{1}{W_m} \ln\left(\frac{F_{I,0}}{F_{I,c}}\right).$$

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

Окрім моделі згідно співвідношення (3) в інженерній практиці широко використовують модель, визначену експериментально Монтзінгером [3]

$$t_c \approx a \exp(-b\theta), \quad (4)$$

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

Однак ця модель дає прийнятне співпадіння з моделлю (3) тільки у вузькій області температур $\theta = 90-110^{\circ}C$. Якщо максимально допустимі температури лежать у межах $140-160^{\circ}C$ то модель згідно співвідношення (4) дає великі завищення значень t_c .

В інженерних розрахунках зручно використовувати відносний знос ізоляції

$$L(t) = \frac{F_{I,0} - F_I(t)}{F_{I,0} - F_{I,c}} = \frac{1 - F_I(t)/F_{I,0}}{1 - F_{I,c}/F_{I,0}}, \quad (5)$$

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

$$F_I(t) = F_{I,0} \exp\left(-W_m \int_0^t \exp\left[-\frac{B}{T_0 + \theta}\right] dt\right). \quad (6)$$

Якщо $t \leq t_{c,б}$, то виконується співвідношення $L(t) \leq 1$.

Спрощену модель термічного зносу можна подати у вигляді

$$L(\delta t_i) = \frac{1}{T_б} \int_0^{\delta t_i} 2^{[\theta_{hi}(t) - \theta_{hr}]/\Delta\theta} dt; \quad (7)$$

звідки

$$L(\delta t_i) = \frac{\delta t_i}{T_б} 2^{[\theta_{hi} - \theta_{hr}]/\Delta\theta}, \quad (8)$$

де θ_{hi} – температура ННТ обмотки для i -го моменту часу; θ_{hr} – граничне значення температури ННТ обмотки.

Саме модель (8) рекомендована МГОСТ 14209-97 для використання в інженерній практиці. Її використовують в припущенні незмінних значень θ_{hi} на інтервалах δt_i .

Відносний знос ізоляції за $T_б$ підраховують за виразом

$$L(T_б) = \sum_{i=1}^n L(\delta t_i). \quad (9)$$

Імітаційне моделювання відносного зносу та терміну служби ізоляції. Одержання сукупності реалізацій температур масла $\theta_o(t)$ і ННТ обмотки $\theta_h(t)$ трансформатора здійснюють в наступній послідовності:

1) Імітуємо сукупність реалізацій навантажувального струму $I(t)$ на інтервалі часу T_0 згідно [4]. При цьому може бути використана як більш складна, так і спрощена імітація струму, який підкоряється нормальному закону розподілу.

2) Для кожної реалізації навантажувального струму обчислюємо реалізації $\theta_{o,v}(t)$ і $\theta_{h,v}(t)$ з використанням термічної моделі трансформатора як показано у [5], а також реалізації його відносного зносу згідно ГОСТ 14209-97.

3) Проводимо статистичну обробку сукупностей реалізацій кожної з характеристик з одержанням їх статистичних характеристик, насамперед, детермінованих функцій квантилів $\theta_{o,\alpha_0}(t)$, $\theta_{h,\alpha_0}(t)$, $L_\beta(t)$, $t_{c,\beta}$ за відповідними ймовірностями α_0 (імовірність перевищення температурою масла або ННТ обмотки певного її значення) та β (імовірність перевищення зносом ізоляції певного значення).

У вище описаних розрахунках приймалися наступні спрощення і допущення:

1. Електричний струм $I(t)$ кожного кластера 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.

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

4. Кількість реалізацій N прийнята рівною 300.

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

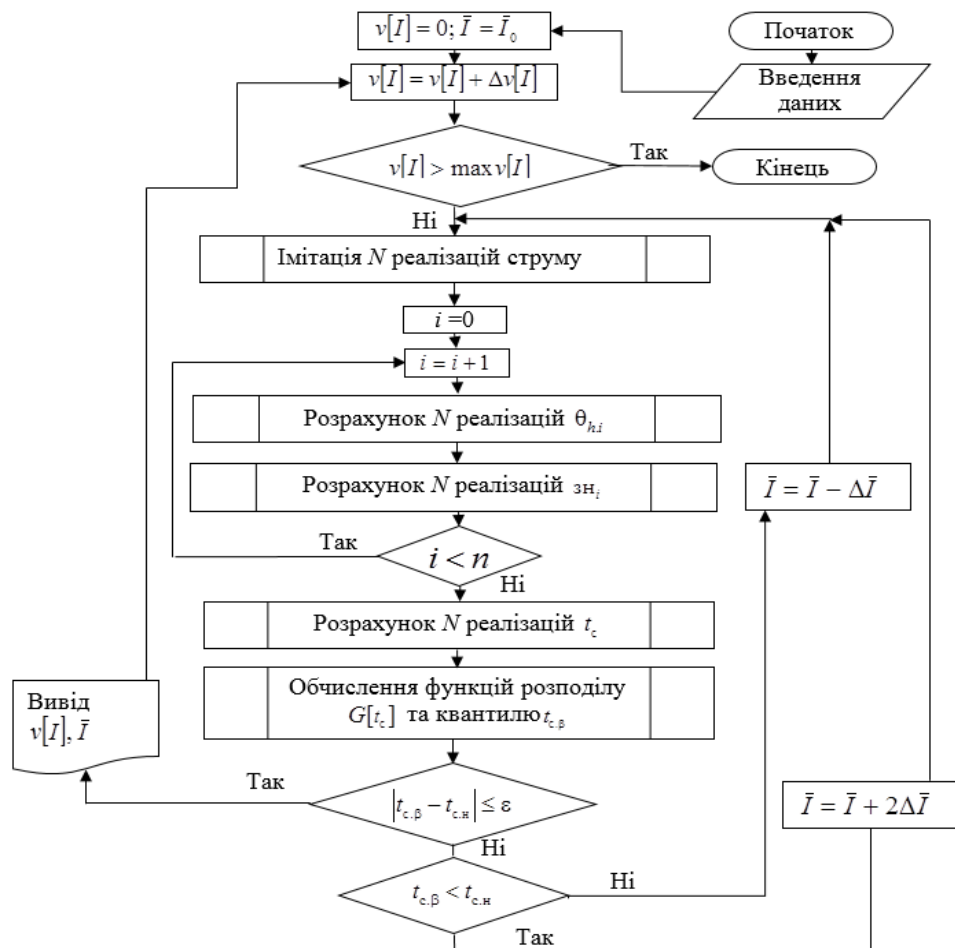


Рис. 1. Алгоритм визначення допустимих значень параметрів $v[I], \bar{I}$ для трансформаторів за умови $t_{c,\beta} = t_{c,n}$

Характеристики навантажувальної здатності будувалися для наступних систем охолодження трансформаторів ONAN (природна циркуляція масла і повітря); ON – вид охолодження ONAF

(примусова циркуляція повітря, природна – масла); OF – OFAF (примусова циркуляція масла і повітря) або OFWF (примусова циркуляція масла і води); OD – ODAF (природна циркуляція повітря, примусова – масла) або ODWE (примусова циркуляція води, природна – масла).

На рис. 2–5 наведено характеристики $\bar{I}/I_{\text{ном}} = f(v[I])$ для розподільних трансформаторів з типом охолодження ONAN, а також трансформаторів середньої і великої потужностей типів ON, OF та OD відповідно, які отримано за різними критеріями вибору. Характеристика 1 відповідає вибору за умовою $t_{c,\beta} \approx t_{c,h}$, якщо $\beta = 0,05$; характеристику 2 побудовано з використанням умов $\theta_{o,\alpha_0,\max} \approx \theta_o$ та $\theta_{h,\alpha_0,\max} \approx \theta_h$ за значенням імовірності $\alpha_0 = 0,05$. Характеристики 3 та 4 на рис. 2–5 побудовано відповідно за такими ж критеріями, але за значеннями ймовірностей $\alpha_0 = 0$ та $\beta = 0$.

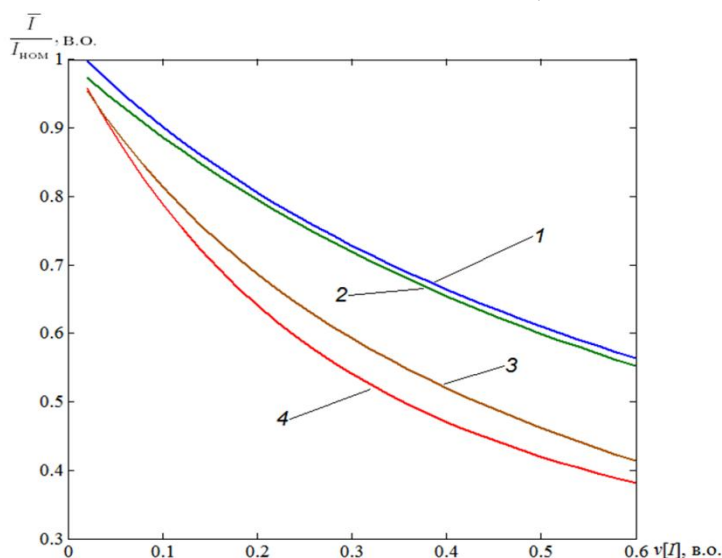


Рис. 2. Характеристики навантажувальної здатності розподільних трансформаторів з охолодженням

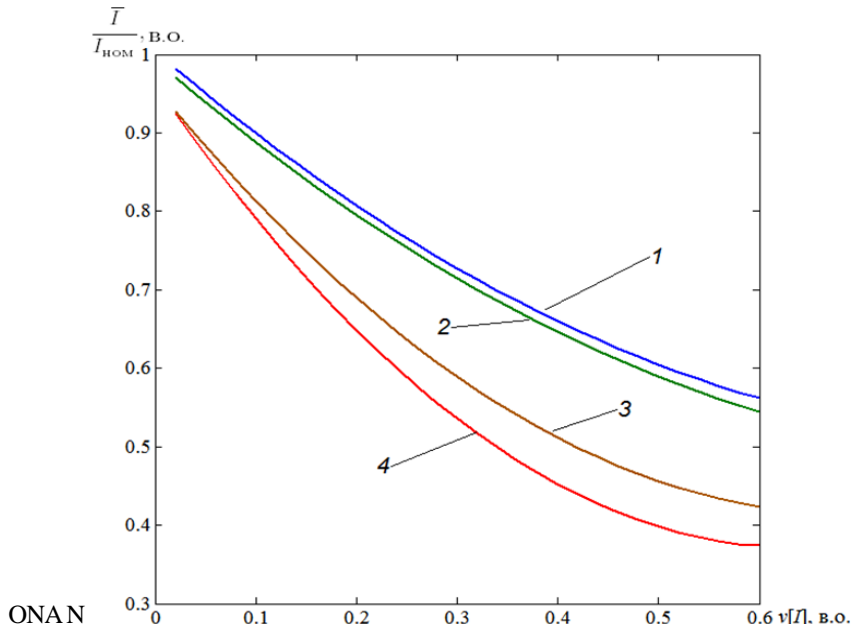


Рис. 3. Характеристики навантажувальної здатності трансформаторів з охолодженням ON

Розглянемо характеристики (рис. 2), отримані для трансформаторів з типом охолодження 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) зі значенням імовірності $\beta = 0,05$. Однак відмінності між цією характеристикою та характеристикою, отриманою за критерієм допустимих температур масла та ННТ, у всьому діапазоні зміни коефіцієнта варіації не перевищують 3%. З рис. 3 також видно, що використання ймовірностей α_0

$= 0$ 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 характеристики, 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. Дуже схожа відмінність параметрів \bar{I} , $v[I]$ спостерігається для трансформаторів з іншими типами охолодження (рис. 4–6).

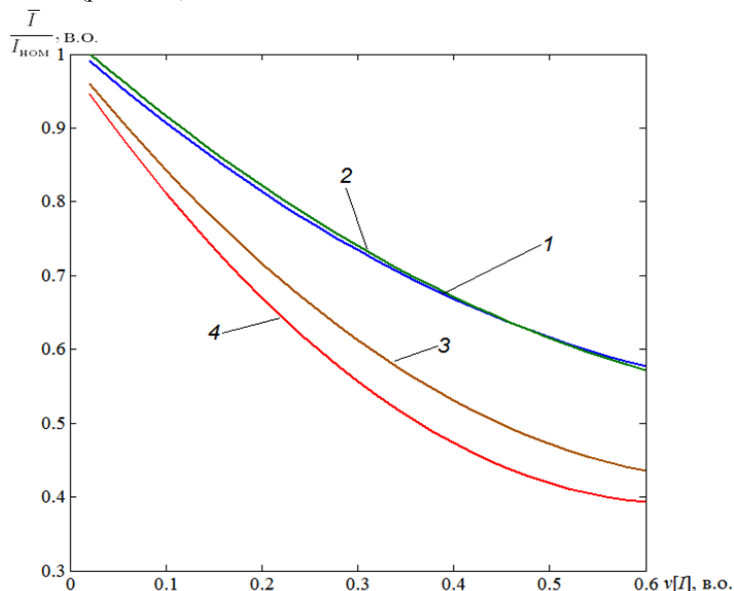


Рис. 4. Характеристики навантажувальної здатності трансформаторів з охолодженням OF

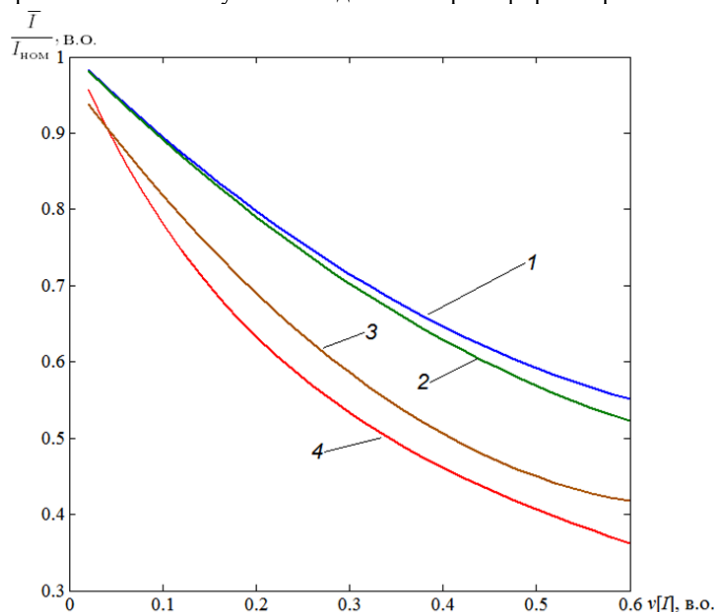


Рис. 5. Характеристики навантажувальної здатності трансформаторів з охолодженням OD

На рис. 6 наведено характеристики значень $\beta = f(v[I])$ для всіх типів трансформаторів в номінальному режимі систематичних перевантажень, які отримано ІМ за умов $\alpha_\theta = 0,05$, $\theta_{\text{олп}} = \theta_{\text{о,ном}} = \theta_{\text{н,с}} + \vartheta_{\text{о,ном}}$ і $\theta_{\text{л,доп}} = \theta_{\text{л,ном}} = \theta_{\text{н,с}} + \vartheta_{\text{л,ном}}$, де $\theta_{\text{н,с}}$ – температура навколишнього середовища; $\vartheta_{\text{о,ном}}$ – номінальний перегрів масла відносно навколишнього середовища; $\vartheta_{\text{л,ном}}$ – номінальний перегрів ННТ обмотки.

Розрахунок цих характеристик здійснювався наступним чином: для кожного значення коефіцієнту варіації $v[I]$ знаходилося таке значення струму \bar{I} , яке задовольняє наведені вище умови. За параметрами \bar{I} , $v[I]$ визначалась далі імовірність β .

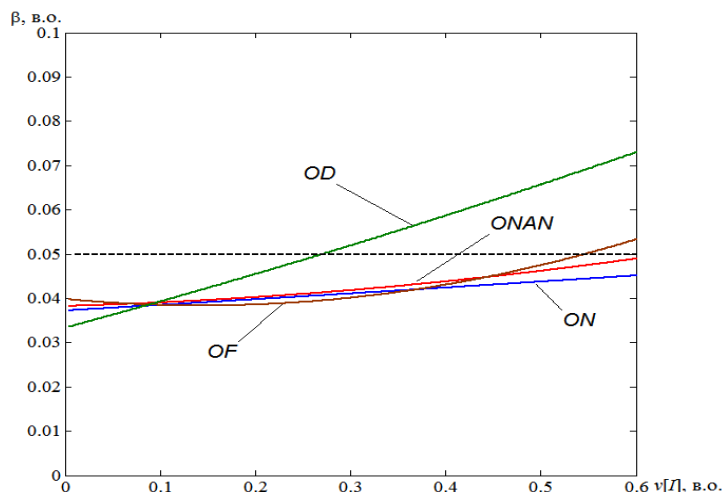


Рис. 6. Характеристики імовірності перевищення номінального зносу ізоляції для всіх типів трансформаторів

Як видно з рис. 6, для трансформаторів з типами охолодження ONAN, ON та OF значення імовірності β для більшості значень коефіцієнта варіації становить 4–4,5 %, тобто ця імовірність не перевищує прийняте значення для α_0 . Інша картина спостерігається для типу охолодження OD. Значення β зростає з збільшенням коефіцієнта варіації і за $\nu[T] \geq 0,28$ перевищує значення 0,05.

Висновки

В роботі розглянуто стохастичний підхід до оцінки навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів за критерієм зносу ізоляції на основі імітаційного моделювання параметрів режимів його роботи. Показано, що вибір силових масляних трансформаторів за критеріями нагрівання, виконаний з використанням термічних моделей, які наведені в ГОСТ 14209-97, з достатньою точністю забезпечує одночасне виконання критерію вибору за термічним зносом ізоляції. Одержані характеристики допустимих параметрів розподілу навантажувального струму трансформаторів (дивись рис. 2–5), які можуть використовуватися в інженерній практиці для вибору параметрів трансформаторів та параметрів їх режимів за умовами допустимих нагрівання та термічного старіння ізоляції, проведення різних енергетичних обстежень силових трансформаторів.

Список літератури

1. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. – Введенный з 01.01.202. – 82 с.
2. IEEE Standard, C57.91-1995, IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformer, 1996.
3. Montsinger V.M. Loading transformers by temperature // Trans.-Amer. Inst. electr. Eng. – 19(1930) – №3. – P. 776-790.
4. Денисенко М.А. Спеціальні питання електропостачання – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – Ч. 1.: Вибір елементів електропостачальних систем на основі стохастичного моделювання процесів, що відбуваються в них. – 288 с.
5. Денисенко М.А., Притискач І.В. Стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів // Промелектро. – 2011. – №1. – С. 25–31.

M. Denysenko, I. Prytskach

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

POWER OIL TRANSFORMERS LOAD CAPACITY EVALUATION BY THEIR ISOLATION THERMAL WEAR

Much of the existing electricity supply system equipment was put into operation in 60- 80s of the twentieth century. It is therefore important to be able to properly assess the condition of power transformers, to determine the admissibility of certain modes of operation, determine their resource isolation and predict the allowable lifetime. In this paper we consider the power oil transformers selection problem using stochastic models based on different criteria – namely, oil and most heated point temperature of transformer and it's insulation wear. For this task, simulation of transformer oil and most heated point temperature and the relative deterioration of its insulation was performed to provide their statistical characteristics primarily determined by quantile functions for corresponding probabilities.

Keywords: power supply system, electrical load, transformer, stochastic model, thermal model.

1. GOST 14209-97. Guide to load of power oil transformers. – Introduction date 2002.01.01. – 82 p.
2. IEEE Standard, C57.91-1995, IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformer, 1996.
3. Montsinger V.M. Loading transformers by temperature // Trans.-Amer. Inst. electr. Eng. – 19(1930) – №3. – P. 776-790.
4. Denysenko M.A. Special aspects of electric power supply. – К.: NTUU "KPI", 2009. – 288 p.
5. Denisenko M.A., Prytyskach I.V. Stochastic evaluation of load capacity power oil transformers // Promelektro. – 2011. – № 1. – P. 25–31.

УДК 621.314.222.6.004

Н.А. Денисенко, канд. техн. наук, профессор; **И.В. Прытыскач**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ОЦЕНКА НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ЗА КРИТЕРИЕМ ТЕРМИЧЕСКОГО ИЗНОСА ИХ ИЗОЛЯЦИИ

Значительная часть действующего оборудования систем электроснабжения была введена в эксплуатацию еще в 60-80-х годах XX века. Поэтому крайне важно уметь правильно оценивать состояние силовых трансформаторов, определять допустимость определенных режимов их работы, определять ресурс их изоляции и прогнозировать допустимый срок службы. В работе рассмотрена задача выбора силовых масляных трансформаторов с использованием стохастических моделей по различным критериям, а именно – температуры масла и ННТ обмотки трансформатора и износа его изоляции. Для этого выполнялось имитационное моделирование температур масла и ННТ обмотки трансформатора, а также относительного износа его изоляции, с получением их статистических характеристик, прежде всего, детерминированных функций квантилей по соответствующим вероятностям.

Ключевые слова: системы электроснабжения, электрическая нагрузка, трансформатор, стохастическая модель, термическая модель.

Надійшла 25.9.2013

Received 25.9.2013

УДК 621.039.58

В. Ю. Кравец, канд. техн. наук, доцент; **А. В. Сорока**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

АНАЛИЗ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОТРАБОТАВШЕГО
ТОПЛИВА В БАСЕЙНАХ ВЫДЕРЖКИ ХМЕЛЬНИЦКОЙ
АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) после выгрузки из реактора временно хранится в бассейне выдержки для обеспечения спада остаточного тепловыделения, которое обусловлено активностью продуктов деления.

Анализ безопасности систем хранения ОЯТ на Хмельницкой атомной электростанции (ХАЭС) показал их несоответствие требованиям действующих нормативных документов, что в значительной степени есть следствием заложенного в нормах избыточного консерватизма. Он может быть снижен при более точном моделировании систем хранения топлива, которое учитывает реальную геометрию размещения отработавшего топлива и условия эксплуатации бассейнов выдержки (БВ). Были проведены новые расчеты, позволившие обосновать ядерную безопасность бассейнов выдержки Хмельницкой АЭС. В исследованиях использовался пакет кодов SCALE, в котором были созданы 2 модели отсеков бассейнов выдержки. Эффективный коэффициент размножения нейтронов считался методом Монте-Карло. Моделирование показало, что для блоков ХАЭС требования ядерной безопасности выполняются при нормальных условиях эксплуатации и при проектных авариях.

Ключевые слова: бассейн выдержки, отработавшее ядерное топливо, консервативный подход, нормативные требования.