

*Встановлено, що і після нормативного терміну служби значна частина силових трансформаторів тягових підстанцій залізниць зберігає працездатність за умов дотримання допустимих навантажувальних режимів, своєчасного проведення випробувань, діагностування та обслуговування. Удосконалено метод прогнозування ресурсу трансформатора, який дозволяє більш точно визначити ресурс, що залишився при впливі різних факторів і умов експлуатації для забезпечення повного його використання, продовження терміну служби трансформатора і зниження витрат на експлуатацію*

*Ключові слова: трансформатор, технічне обслуговування, життєвий цикл, швидкість відносного зносу ізоляції*

*Установлено, что и после нормативного срока службы значительная часть силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог сохраняет работоспособность при соблюдении допустимых нагрузочных режимов, своевременного проведения испытаний, диагностирования и обслуживания. Усовершенствован метод прогнозирования ресурса трансформатора, который позволяет более точно определять оставшийся ресурс при воздействии разных факторов и условий эксплуатации для обеспечения полного его использования, продления срока службы трансформатора и снижения расходов на эксплуатацию*

*Ключевые слова: трансформатор, техническое обслуживание, жизненный цикл, скорость относительного износа изоляции*

# МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

**О. О. Матусевич**

Доктор технічних наук, доцент, проректор  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010  
E-mail: al\_m0452@meta.ua

**М. В. Хворост**

Доктор технічних наук,  
професор, завідувач кафедри\*  
E-mail: bgd@kname.edu.ua

**В. В. Малишева**

Кандидат технічних наук, асистент\*  
E-mail: bgd@kname.edu.ua

\*Кафедра «Охорона праці та  
безпека життєдіяльності»

Харківський національний університет  
міського господарства ім. О. М. Бекетова  
вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, Україна, 61002

## 1. Вступ

Утримання технічних засобів залізничного транспорту на високому експлуатаційному рівні, який забезпечує безпеку руху поїздів і високу ефективність процесу перевезень, неможливе без об'єктивної інформації про технічний стан обладнання. Об'єкти залізничного транспорту мають велику кількість пристроїв. Тривала експлуатація даних пристроїв може привести до виходу з ладу та значних матеріальних збитків. Поступове старіння парку устаткування, зниження запасів міцності в обладнанні останніх поколінь гостро поставили питання оцінки його стану і ступеня ризику експлуатації за межами нормованого терміну служби.

За останні 20 років у багатьох країнах відбулася приватизація великого числа електротехнічних компаній які виробляють, передають і розподіляють електроенергію. Розвиток вільного ринку електроенергії та збільшення фінансових витрат стали додатковими чинниками максимально можливого продовження термінів служби устаткування. Прагнення власників ком-

паній максимально використовувати ресурс наявного обладнання, який дозволяє мінімізувати або відкласти інвестиції на придбання нового, за умови всебічного забезпечення його надійної роботи і зведення до мінімуму числа аварійних ситуацій обумовлене тим, що електрифікованими залізницями та електротехнічними компаніями виконується подача, перетворення, передача та розподілення електроенергії на незалежному ринку електроенергії. Вирішення цієї проблеми неможливе без створення сучасної системи ТО і Р.

Аналіз світового досвіду показує, що, за рахунок використання більш передових технологій у країнах ЄС та США, ефективна експлуатація, наприклад, зношених трансформаторів, можлива на основі розвинених систем моніторингу та діагностування технічного стану, виконаних на базі сучасних комп'ютерних та інформаційних технологій. У цьому напрямі нові умови функціонування енергетики в Німеччині, США, Бразилії та інших країнах змусили звернути найбільш увагу на експлуатацію електрообладнання, яке відпрацювало нормативний ресурс. Головним завданням утримання технічних засобів залізничного

транспорту на високому експлуатаційному рівні надійності, є створення сучасної системи ТО і Р на основі інтелектуальних мереж Smart Grid [1].

Головним завданням сучасної інтелектуальної системи ТО і Р технічних засобів залізничного транспорту є визначення (прогнозування) залишкового ресурсу з подальшою метою забезпечення обґрунтованої періодичності і обсягу відновлення працездатності протягом усього життєвого циклу. А також максимально можливого продовження терміну служби обладнання та зниження витрат на експлуатацію.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Однією з основних проблем електропостачання електрифікованих залізниць, які вимагають невідкладного вирішення, ставиться проблема використання силового електротехнічного обладнання (СЕО) тягових підстанцій (ТП), термін служби якого перевищує встановлений. Вже сьогодні для ряду дистанцій електропостачання кількість старіючого силового обладнання ТП перевищує 50 % [2, 3]. Гострота проблеми обумовлюється реальним співвідношенням темпів наростання обсягів старіючого обладнання і можливостей його оновлення. Наслідком зростання темпів наростання обсягів старіючого обладнання є додаткові матеріально-технічні і фінансові втрати. В даний час, відповідно до вимог нормативно-технічної документації, застосовується система планово-попереджувальних ремонтів (ППР), де основним техніко-економічним критерієм є мінімум простоїв обладнання на основі жорсткої регламентації ремонтних циклів. Однак система ППР в умовах розвитку ринкових відносин в галузі ремонту у багатьох випадках не забезпечує прийняття оптимальних рішень з причини недостатнього фінансування. В цих умовах основним напрямком підтримки експлуатаційної надійності силового електрообладнання ТП є розробка сучасних методів, заснованих на індивідуальному спостереженні за реальними змінами технічного стану обладнання в процесі експлуатації.

Проведене дослідження технічного стану обладнання ТП, якому необхідно приділити першочергову увагу при проведенні моніторингу, діагностуванні та ТО і Р показує, що основні порушення нормальної роботи системи електропостачання відбуваються за рахунок виходу з ладу силових трансформаторів [4]. Силові трансформатори є основними елементами електричних мереж та систем, які визначають надійність і економічність функціонування. На цей час на залізницях України перебувають в експлуатації 422 тягові трансформатори з них 337 трансформаторів зі строком служби понад 25 років. Досвід експлуатації силових трансформаторів показує, що і після нормативного терміну служби значна частина трансформаторів зберігає працездатність за умов дотримання допустимих навантажувальних режимів, своєчасного проведення випробувань та діагностування [4]. З іншого боку, термін служби трансформатора залежить від його залишкового ресурсу [5]. Точна інформація про термін служби силового трансформатора дозволяє застосовувати найбільш ефективну стратегію технічного обслуговування та діагностики з метою повного

використання його ресурсу і тим самим продовження терміну служби.

Підтвердженням цього є результати обстежень більше двохсот трансформаторів потужністю від 6,3 до 1000 МВт, виготовлених в Україні, Росії, Швеції й Бельгії та встановлених у різних кліматичних зонах. Майже 70 % з обстежених трансформаторів мали напрацювання більше 25 років. Близько половини з них є великими (більше 100 МВт). Результати обстежень показують, що 30 % обстежених трансформаторів можуть продовжувати експлуатуватися без будь-яких обмежень, та лише 2 % мають бути замінені. Інші трансформатори вимагають або капітального ремонту (15 %), або відносно невеликих та недорогих відновних ремонтів (23 %), або просто підвищеного контролю (30 %) [6].

Тому, поряд з плановою заміною застарілого обладнання, найважливішим завданням є використання повного робочого ресурсу трансформаторів за рахунок комплексного застосування сучасних методів діагностування та технологій ремонту за фактичним технічним станом обладнання. Складність вирішення даної проблеми полягає в тому, що методи оцінки залишкового строку служби для силових трансформаторів на цей час вивчені недостатньо повно.

Також необхідно враховувати, що відхилення будь-якого параметра сприяє переходу трансформатора в новий режим роботи, якому відповідає нова швидкість спрацьовування ресурсу за і-м визначальним параметром. Напрямом урахування цього чинника є удосконалення методів відстежування механізму динаміки старіння ізоляції масляних силових трансформаторів на протязі всього періоду експлуатації.

## 3. Ціль та задачі дослідження

Метою дослідження є удосконалення методу визначення залишкового технічного ресурсу і очікуваного терміну служби силового трансформатора тягових підстанцій в умовах експлуатації та дії різних факторів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- проведення дослідження технічного стану силового електрообладнання тягових підстанцій, на яке необхідно приділити першочергову увагу;
- вивчення досвіду експлуатації силових трансформаторів після нормативного терміну служби;
- удосконалення методу визначення залишкового ресурсу силового трансформатора.

## 4. Матеріали та методи дослідження оцінки строку служби силового електрообладнання тягових підстанцій

### 4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

На сьогодні основною проблемою експлуатації трансформаторного парку ТП є експлуатація значної кількості трансформаторів, які вже відпрацювали свій нормативний термін служби. На цей час процес старіння парку ТП та його силового електрообладнання практично не знижує своїх темпів. У цих умовах вдо-

Таблиця 1

Основні дефекти силових трансформаторів  
(35кВ, 110кВ, 150кВ, 220 кВ)

Обладнання та вид дефекту	Кількість випадків	Частка, %
Система охолодження	146	23.1
Високовольтні вводи	92	14.5
Виділення газів в масло	58	9.2
Старіння масла	48	7.6
Дефекти в пристрої РПН (регулювання під навантаженням)	46	7.3
Витік по ущільненням обладнання трансформатора	44	7
Розпресування обмоток	42	6.6
Забруднення твердої ізоляції	34	5.4
Зволоження твердої ізоляції	26	4.1
Розпресування магнітопроводу	26	4.1
Забруднення масла	14	2.2
Деформація обмоток	10	1.6
Пошкодження в шафі автоматичного управління охолодженням трансформаторів	8	1.3
Підвищена вібрація	8	1.3
Пошкодження відводів	7	1.1
Пошкодження магнітних шунтів	6	0.9
Пошкодження пристроїв ПБЗ (перемикання без збудження)	6	0.9
Окислювання масла	4	0.6
Перегрів роз'єму	4	0.6
Порушення герметичності	4	0.6

сконалення системи сервісного обслуговування старіючого електрообладнання ТП стає основним завданням підтримки його працездатності.

Ключовими в цій ситуації стають наступні питання:

– який фактичний або залишковий ресурс працездатності ТП та конкретної групи або одиниці електроустаткування?

– які фактичні характеристики надійності конкретної групи або одиниці електроустаткування ТП, термін служби якого істотно перевищує зазначений в технічній документації?

Однак в даний час абсолютно точних і однозначних відповідей на ці питання майже не існує. Це обумовлено, перш за все, відсутністю достовірних вихідних даних і складністю здобуття в реальних умовах експлуатації. Досвід експлуатації силових трансформаторів показує, що і після нормативного терміну служби значна частина трансформаторів зберігає свою працездатність при дотриманні допустимих навантажувальних режимів та своєчасному і якісному обслуговуванні. Термін служби трансформатора залежить від його залишкового ресурсу. У понятті ресурс трансформатора необхідно виділити основні дві складові [7]:

– перша складова – це поновлюваний ресурс. Це в першу чергу ресурс ізоляційної системи. До поновлюваного ресурсу можна також віднести ремонт або заміну окремих компонентів трансформатора, таких як вводи, перемикаючі пристрої, насоси та вентилятори системи охолодження, тощо;

– друга складова ресурсу – це ресурс целюлозної ізоляції, який не може бути відновлений, що, в кінцевому рахунку, він і визначає залишковий ресурс трансформатора в цілому.

Дослідження проводилось на трансформаторі ТДТН- 25000/150-70 У1.

#### 4. 2. Методика оцінки зносу ізоляції силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць

Проведені в останні роки дослідження силових трансформаторів [8, 9], з напрацюванням понад 20 років, дозволили виявити основні дефекти, які наведено в табл. 1. Обсяг вибірки склав 216 одиниць.

Як бачимо з табл. 1, основними дефектами силових трансформаторів є: пошкодження системи охолодження, виділення газів в масло, витік масла по ущільненням, забруднення масла. Результат цих процесів – знос ізоляції. Оцінку зносу ізоляції силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць можна виконувати за наступними основними факторами: підвищена температура, зволоження ізоляції, окиснення масла та зростання концентрації кисню, розчиненого в маслі бака трансформатора, тощо.

Поки не існує єдиного і простого критерію закінчення терміну служби, який міг би бути використаний для кількісної оцінки корисного терміну служби ізоляції трансформатора, однак можна зробити порівняння, засновані на швидкості зносу ізоляції. Найбільш простий спосіб опису динаміки зносу ізоляції дає формула Монтзінгера [8, 10]. Для розглянутого в даній роботі діапазону температур використання відносини Монтзінгера можна вважати достатнім і таким, яке дає оцінку термічного зносу з запасом міцності.

Формула Монтзінгера для розрахунку відносного зносу ізоляції, для інтервалу часу  $(t_0, t_0 + T)$ , має вигляд:

$$L(t_0, t_0 + T) = \int_{t_0}^{t_0 + T} V(\theta_h, K_w, K_a, K_{O_2}), \quad (1)$$

де  $V$  – швидкість відносного зносу ізоляції, в. о.;  $\theta_h$  – температура найбільше нагрітої точки обмотки, °С;  $K_w$ ,  $K_a$ ,  $K_{O_2}$  – коефіцієнти впливу вологості, розчинених кислот та кисню відповідно, в.о.

При цьому швидкість відносного зносу ізоляції з урахуванням впливу розглянутих експлуатаційних чинників матиме наступний вигляд [10]:

$$V = \left( \frac{C_w}{C_{w,b}} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{C_a}{C_{a,b}} \right)^\beta \cdot \left( \frac{C_{O_2}}{C_{O_2,b}} \right)^\gamma \cdot 2^{\frac{\theta_h - 98}{6}}, \quad (2)$$

де  $C_w$ ,  $C_a$ ,  $C_{O_2}$  – вміст вологості твердої ізоляції, вміст кислот та кисню в маслі відповідно, г/т;  $C_{w,b}$ ,  $C_{a,b}$ ,  $C_{O_2,b}$  – базові значення вмісту вологості твердої ізоляції, вмісту кислот та кисню в маслі відповідно, г/т;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – показники, які визначені в [11];  $\theta_h$  – температура найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора, °С.

Проведений розрахунок для різних показників складових виразу (2) за допомогою програми Mathcad показує, що при урахуванні вмісту вологості твердої ізоляції, вмісту кислот та кисню в маслі, підвищується точність визначення показника швидкості відносного зносу ізоляції, результати розрахунку наведено на рис. 1.

Як бачимо з рис. 1, визначення швидкості відносного зносу ізоляції трансформатора без урахування вмісту вологості твердої ізоляції, вмісту кислот та кисню в маслі надає похибку (при зростанні ННТ похибка збільшується) та збільшення вмісту вологості твердої ізоляції, вмісту кислот та кисню в маслі призводить до зростання швидкості відносного зносу ізоляції трансформатора.

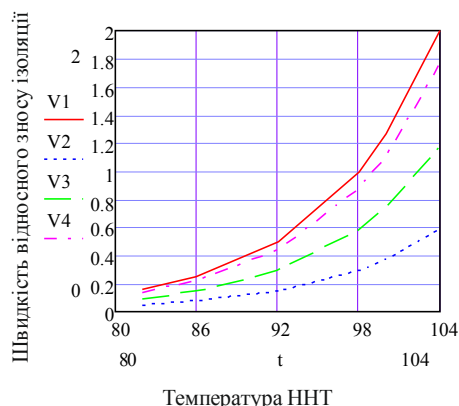


Рис. 1. Залежність швидкості відносного зносу ізоляції від вмісту вологості твердої ізоляції, вмісту кислот та кисню в маслі: V1 — швидкість відносного зносу ізоляції (відносні одиниці, в. о.) без урахування вмісту вологості твердої ізоляції, вмісту кислот та кисню в маслі; V2, V3, V4 — швидкість відносного зносу ізоляції з урахуванням змісту вологості твердої ізоляції, вмісту кислот та кисню в маслі (наприклад для значень узагальненого коефіцієнта  $K_{w,a,O2}=0.005; 0.01; 0.015$  відповідно), ННТ — температура найбільш нагрітої точки трансформатора

Також основним експлуатаційним чинником, який впливає на термін служби трансформаторів, є температура (ГОСТ 14209-85 Трансформатори силові масляні). Вважається, що при збільшенні температури найбільш нагрітої точки (ННТ) на кожні  $\Delta=6^{\circ}\text{C}$  термін служби трансформатора зменшується майже у 2 рази (ГОСТ 14209-85). Ця величина є абсолютним відхиленням фактору температури  $\Delta\theta$  для основи ступеню 2. Перерахуємо  $\Delta\theta$  для основи ступеню e та отримаємо  $\Delta\theta=8.154^{\circ}\text{C}$ . Також, згідно ГОСТ 14209-85, температура найбільш нагрітої точки (ННТ) обмотки трансформатора при якій швидкість розрахункового зносу ізоляції відповідає терміну служби трансформатора, є величина  $98^{\circ}\text{C}$ . З урахуванням цього поняття ресурсу приймемо еквівалентним поняття термін служби трансформатора. Розрахуємо відносне відхилення від ННТ  $98^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\theta^*=0.083$  в. о. Нормативний термін служби трансформатора приймемо  $T_0=25$  років. Очевидно, що чинник температури є не єдиним, однак сила впливу інших чинників незначна в порівнянні з ним, як це видно з рис. 1 на графіку порівняння швидкості відносного зносу ізоляції трансформатора при різних температурах найбільш нагрітої точки трансформатора.

Враховуючи визначення фактичного спрацьованого ресурсу силового електрообладнання ТП згідно розробленої математичної моделі в роботі [12] та з урахуванням швидкості зміни відносного зносу ізоля-

ції (2), пропонується проведення розрахунку фактичного спрацьованого ресурсу трансформатора за допомогою модифікації математичної моделі [12], вираз (3):

$$R_{\phi}^* = 1 - \frac{T_1 \left[ e^{-\frac{(\theta_1^*-1)}{\Delta\theta^*}} - 1 \right] + T_2 \left[ e^{-\frac{(\theta_2^*-1)}{\Delta\theta^*}} - 1 \right] + T_3 \left[ e^{-\frac{(\theta_3^*-1)}{\Delta\theta^*}} - 1 \right] + T_4 \left[ e^{-\frac{(\theta_4^*-1)}{\Delta\theta^*}} - 1 \right]}{T_0}, \quad (3)$$

де  $T_1, T_2, T_3, T_4$  — час роботи трансформатора в кожному з температурних режимів (роки), які характеризуються температурами ННТ  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  з урахуванням швидкості відносного зносу ізоляції  $\theta^*$  (для відповідних ННТ).

Для апробації моделі розглянемо декілька варіантів температурних режимів роботи трансформатора:

Варіант 1:  $T_1=17, T_2=3, T_3=4, T_4=1; \theta_1=98^{\circ}\text{C}, \theta_2=90^{\circ}\text{C}, \theta_3=82^{\circ}\text{C}, \theta_4=100^{\circ}\text{C}$ .

Варіант 2:  $T_1=10, T_2=6, T_3=0, T_4=9; \theta_1=98^{\circ}\text{C}, \theta_2=90^{\circ}\text{C}, \theta_3=82^{\circ}\text{C}, \theta_4=100^{\circ}\text{C}$ .

Варіант 3:  $T_1=1, T_2=3, T_3=4, T_4=17; \theta_1=98^{\circ}\text{C}, \theta_2=90^{\circ}\text{C}, \theta_3=82^{\circ}\text{C}, \theta_4=100^{\circ}\text{C}$ .

Відносне значення чинника температури  $\theta^*$  по відношенню до базисного  $\theta_1=98^{\circ}\text{C}$  в. о. для всіх варіантів складе:

$$\theta_1^*=1, \theta_2^*=0.918, \theta_3^*=0.836, \theta_4^*=1.020.$$

Розрахунок спрацьовання ресурсу трансформатора для прийнятих вхідних даних експлуатації (варіанти 1–3) проведемо згідно виразу (3) за допомогою програми Mathcad.

## 5. Результати досліджень відносного зносу ізоляції та визначення терміну служби трансформатора

Розрахунок швидкості відносного зносу ізоляції здійснено за виразом (2).

**Варіант 1:** в результаті розрахунку використовуючи вираз (3) отримаємо  $R_{\phi}^*=0.924$  в. о. Отримане значення  $R_{\phi}^*$  показує, що експлуатація трансформатора здійснювалась у полегшеному режимі та очікуваний фактичний термін служби збільшено на 8% ( $25 \cdot 0.076$  в. о. = 2 роки). Графічно спрацьовання ресурсу трансформатора для вхідних даних експлуатації (варіант 1) проведено згідно виразу (3) за допомогою програми Mathcad та представлено на рис. 2.

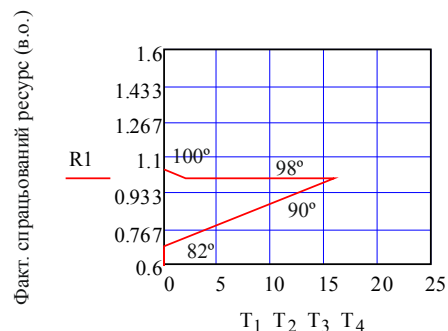


Рис. 2. Фактичне спрацьовання ресурсу трансформатора (варіант 1)



Результати розрахунку фактичного спрацьованого ресурсу трансформатора для інших варіантів експлуатації трансформатора показують:

**Варіант 2:**  $R_{\phi}^* = 1.231$  в. о. Отримане значення  $R_{\phi}^*$  показує, що експлуатація трансформатора здійснювалась не ефективно та очікуваний фактичний термін служби зменшено на 23.2 % (25 р.:0.231 в. о.=5.8 років). Графічно спрацювання ресурсу трансформатора для вхідних даних експлуатації (варіант 2) проведено згідно виразу (3) за допомогою програми Mathcad, представлено на рис. 3.

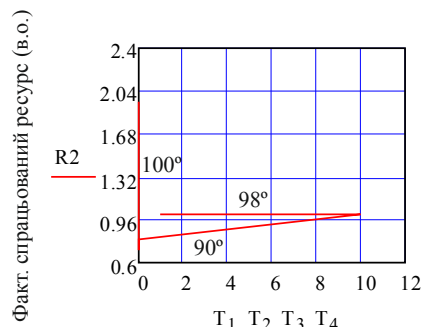


Рис. 3. Фактичне спрацювання ресурсу трансформатора (варіант 2)

**Варіант 3:**  $R_{\phi}^* = 1.533$  в. о. Отримане значення  $R_{\phi}^*$  показує, що експлуатація трансформатора здійснювалась не ефективно та очікуваний фактичний термін служби зменшено на 53.3 % (25 р.:0.533 в. о.=13.325 років). Графічно спрацювання ресурсу трансформатора для вхідних даних експлуатації (варіант 3) проведено згідно виразу (3) за допомогою програми Mathcad, представлено на рис. 4.

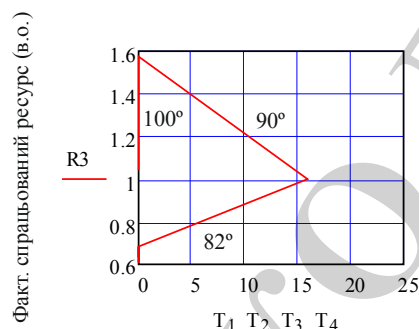


Рис. 4. Фактичне спрацювання ресурсу трансформатора (варіант 3)

Розрахунок спрацювання ресурсу трансформатора для температури ННТ 98 °С, за час експлуатації склав 25 років (Т) (рис. 5).

На рис. 6, 7 відображено спрацювання ресурсу трансформатора для температур ННТ 82 °С, 100 °С з урахуванням швидкості відносного зносу ізоляції (R5, R6) та без урахування швидкості відносного зносу ізоляції (R5a, R6a). Графічно спрацювання ресурсу трансформатора для вхідних даних експлуатації проведено згідно виразу (3) за допомогою програми Mathcad (рис 6, 7).

Як бачимо з рис. 6, 7, точність розрахунку збільшується при урахуванні швидкості відносного зносу ізоляції.

Результати розрахунків за допомогою програми Mathcad (рис. 2–7) та пропонуємо виразом (3) вказують на адекватність даного підходу.

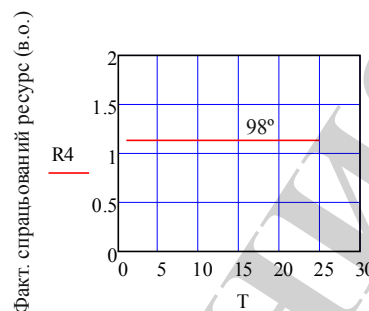


Рис. 5. Фактичне спрацювання ресурсу трансформатора при ННТ 98 °С

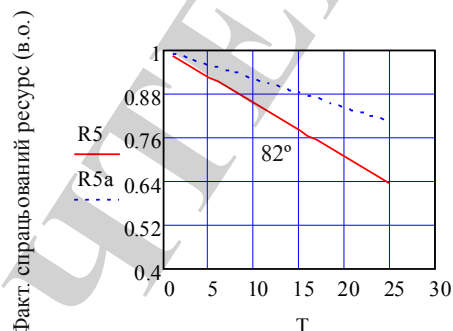


Рис. 6. Фактичне спрацювання ресурсу трансформатора (ННТ 82 °С)

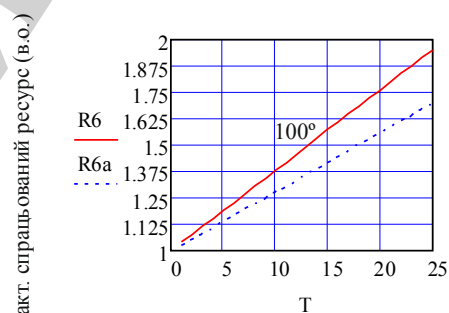


Рис. 7. Фактичне спрацювання ресурсу трансформатора (ННТ 100 °С)

## 6. Обговорення результатів досліджень

Удосконалено метод визначення технічного ресурсу силового трансформатора тягової підстанції за допомогою розробленого виразу (3) який дозволяє більш точно (на 10...12 %) виконувати розрахунок залишкового ресурсу трансформатора при дії різних факторів та умов експлуатації.

Таке рішення проблеми дозволяє визначати та прогнозувати фактичний термін служби трансформатора. Наприклад, при експлуатації трансформатора при ННТ 82 °С (рис. 6), значення  $R_{\phi}^*$  показує, що очікуваний фактичний термін служби трансформатора можна збільшити на 64 % (16 років). При експлуатації трансформатора при ННТ 100 °С (рис. 7), значення  $R_{\phi}^*$  показує, що очікуваний фактичний термін служби трансформатора зменшується на 50 % (12,5 років).

Результати досліджень впроваджено у службі електропостачання Південної залізниці, дистанції електро-

постачання Нижньодніпровськ-Вузол (ЕЧ-2) Придніпровської залізниці.

Визначення технічного ресурсу силового трансформатора дозволяє встановити його фактичний технічний стан та здійснити ефективне планування обслуговування і ремонтів в бік збільшення термінів між обслуговуваннями (зменшення кількості обслуговувань), зменшення фінансових та праце витрат. Так, оплата праці працівників ТП при обслуговуванні трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 тягової підстанції Синельникове ЕЧ-2 Придніпровської залізниці була зменшена за рік на:  $C_{пт}=50$  у. о. (США) – поточний ремонт;  $C_{мв}=18$  у. о. (США) – міжремонтні випробування;  $C_{то}=17.4$  у. о. (США) – Зменшення оплати праці працівникам за обслуговування трансформатора за 1 рік експлуатації склало:  $C=C_{пт}+C_{мв}+C_{то}=85.4$  у. о. (США)

Зменшення витрат на матеріали для проведення планового ремонту трансформатора за 1 рік склало:  $C_m=95.24$  у. о. (США)

Сумарне зменшення витрат на обслуговування трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 за 1 рік експлуатації склало:  $C_c=C+C_m=180.64$  у. о. (США). Враховуючі що на залізницях України перебувають в експлуатації більше 422 тягових трансформаторів можна отримати значний економічний ефект.

Цей метод може бути використаний для прогнозування технічного стану іншого силового обладнання тягових підстанцій.

Дане дослідження є продовженням дослідження роботи [12]. У подальшому планується дослідити відносну важливість впливу вологи, розчинених кислот та кисню відповідно на швидкість зносу ізоляції силового масла наповненого обладнання.

## 7. Висновки

1. Встановлено, що на сьогодні значна частина устаткування інфраструктури залізничного транспорту України вже вичерпала свій технічний ресурс. Проведене дослідження технічного стану обладнання ТП показує, що основні порушення нормальної роботи системи електропостачання відбуваються за рахунок виходу з ладу трансформаторів. На цей час на залізницях України перебувають в експлуатації 422 тягові трансформатори з них 337 трансформаторів зі строком служби понад 25 років. Також цю проблему ускладнює недостатнє фінансування для виконання ППР та відсутніх сучасних інтелектуальних систем діагностування і обслуговування.

2. Досвід експлуатації силових трансформаторів показує, що і після нормативного терміну служби значна частина трансформаторів зберігає працездатність за умов дотримання допустимих навантажувальних режимів, своєчасного проведення випробувань та діагностування. Результати обстежень показують, що 30 % обстежених трансформаторів можуть продовжувати експлуатуватися без будь-яких обмежень. І усього лише 2 % мають бути замінені. Інші трансформатори вимагають або капітального ремонту (15 %), або відносно невеликих і недорогих відновних ремонтів (23 %), або просто підвищеного контролю (30 %).

3. Удосконалено метод визначення залишкового технічного ресурсу силового трансформатора тягової підстанції при оцінці динаміки старіння обладнання за рахунок введення показника швидкості зносу ресурсу ізоляції під дією різних факторів. Це дозволило більш якісно визначати залишковий ресурс трансформатора (точність розрахунку збільшено на 10...12 %).

## Література

1. Potocvnik, J. European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future [Text] / J. Potocvnik. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006. – 44 p. – Available at: [http://cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids\\_en.pdf](http://cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids_en.pdf)
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році [Текст]. – Київ: Вид-во ТОВ «Девалта», 2014. – 251 с.
3. Матусевич, О. О. Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць [Текст] / О. О. Матусевич, Д. В. Міронов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2015. – № 1 (55). – С. 62–77. doi: 10.15802/stp2015/38245
4. Gockenbach, E. Condition monitoring and diagnosis of power transformers [Text] / E. Gockenbach, H. Borsi // 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. – 2008. doi: 10.1109/cmd.2008.4580427
5. Sun, H.-C. Fault Diagnosis of Power Transformers Using Computational Intelligence: A Review [Text] / H.-C. Sun, Y.-C. Huang, C.-M. Huang // Energy Procedia. – 2012. – Vol. 14. – P. 1226–1231. doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.1080
6. Смекалов, В. В. Оценка состояния и продление срока службы силовых трансформаторов [Электронный ресурс] / В. В. Смекалов, А. П. Долин, Н. Ф. Першина // SIGRE2002. – 2011. – 10 с. – Режим доступа: <http://www.ts-electro.ru/publication.php?k=2>
7. Долин, А. П. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов [Текст] / А. П. Долин, Н. Ф. Першина, В. В. Смекалов // Электрические станции. – 2000. – № 6. – С. 46–52.
8. Матусевич, О. О. Удосконалення системи діагностування силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць [Текст] / О. О. Матусевич // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2014. – № 92. – С. 31–36.
9. Leibfried, T. Online monitors keep transformers in service [Text] / T. Leibfried // IEEE Computer Applications in Power. – 1998. – Vol. 11, Issue 3. – P. 36–42. doi: 10.1109/67.694934
10. Конограй, С. П. Применение модели старения твердой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации [Текст] / С. П. Конограй // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 1. – С. 43–45.
11. Силовые трансформаторы. Справочная книга [Текст] / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – Москва: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
12. Матусевич, А. А. Математическая модель интегрального показателя потери ресурса силового электрооборудования тяговых подстанций в условиях эксплуатации [Текст] / А. А. Матусевич // Problemy Kolejnictwa. – 2015. – Issue 169. – P. 29–36.