

УДК 629.4.083

В. В. ЛАГУТА – к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, vasilij.laguta@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-4957-9178

Ю. Г. КОЗИК – ТзОВ «Прикладні залізничні технології» AEbt Angewandte Eisenbahntechnik GmbH (original name), Нюрнберг D-90429, Німеччина, kozik_yuriy@yahoo.com,
ORCID: 0000-0002-5212-2953

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТЕД ЕД-118А ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ ЗВОРОТНОЇ НАПРУГИ

Вступ

Відмови тягових електричних двигунів (ТЕД) мають різну природу, але відмови тягових двигунів з причини незадовільного стану ізоляції відбуваються досить часто. Особливої уваги, при обслуговуванні ТЕД, приділяється корпусній ізоляції. Програма оновлення тягового рухомого складу залізниць на період до 2020 року передбачає необхідність створення сучасних систем обслуговування та ремонту ТРС нового покоління та розробка відповідної нормативної документації [6].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Серед сучасних досліджень слід відзначити роботи М. Д. Глущенко, М. Г. Дурандіна, В. Н. Попова і А. С. Серебрякова, в яких розглянуті проблеми експлуатаційної діагностики тягових електродвигунів, методи прогнозування стану ізоляції електричних машин та ін. Особливий інтерес викликає робота А. С. Серебрякова в області розробки пристрою контролю ізоляції тягових двигунів по зворотній напрузі [7].

Нові підходи з питань утримування ізоляції ТЕД знайшли відображення в роботах З. Г. Гіоева, С. В. Кучерова, О. Т. Осяєва та ін. [2]. У роботі [4] описано основні види старіння ізоляції і дефекти, що в ній виникають; наведені основні методи контролю ізоляції електрообладнання

Робота [1] є фундаментальною роботою з теоретичних основ ремонтних впливів на

надійність технічних об'єктів. В роботі сформульовано ряд задач по визначенню раціонального утримування технічних об'єктів. Запропонований в роботі підхід можна застосовувати як для окремих елементів рухомого складу, так і для об'єктів в цілому.

В роботі [9] показано, що ресурс електродвигуна в основному визначається зносом ізоляції.

Вдосконалення систем утримування ТЕД, в тому числі і корпусної ізоляції, з необхідністю призводить до відповідних розробок пристроїв і систем діагностування, [3, 11, 8].

Як висновок може бути корисною публікація [10], в якій автори проводять поетапний вичерпний огляд однієї схеми ізоляції, і дають детальний звіт про стандарти, що пов'язані з системами ізоляції. У статті звертається увага на те, що жоден стандарт не може забезпечити гарантію на термін служби, і ніякі випробування ізоляції не включають всі робочі умови: термічні, механічні, вплив вологи і хімічний вплив. Як замовник, так і виробники будуть використовувати стандарти, знаючи, що такі документи не можуть повністю задовольнити їхні побажання. Автори підкреслюють, що протягом 20-ти років спостерігаються тенденція поліпшення якості ізоляції і деякі досягнення в удосконаленні стандартів.

Моделі, що стосуються прогнозуванню ресурсу ізоляції ТЕД, дослідниками однозначно не визначаються. Ресурс (життєвий

цикл) моделюється як напрацювання (час) між сусідніми неусувними відмовами. Вихідними даними, при цьому, є інформація про відмови протягом деякого часу експлуатації.

Моделі відновлення корпусної ізоляції, що пропонуються в проаналізованих публікаціях, базуються на випадкових потоках відмов (пробій ізоляції) і не враховують поточний стан ізоляції та ступінь відновлення (технологію відновлення).

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – покращення системи утримування ТЕД ЕД-118А за рахунок прогнозування ресурсу корпусної ізоляції та визначення моментів її відновлення з забезпеченням найменших питомих витрат на ПР-3 і КР-1 з врахуванням ступені відновлення, використовуючи дані про стан ізоляції за методом зворотної напруги в процесі експлуатації. [9]

Методика

Одним з ефективних неруйнівних методів контролю стану корпусної ізоляції ТЕД є метод, заснований на використанні явища абсорбції. Відомо, що про стан ізоляції і ступені її старіння судять по струму абсорбції. Контроль заряду абсорбції по струму абсорбції не дуже зручний, оскільки струм абсорбції малий і з цієї причини спотворюється оточуючими промисловими перешкодами. Тому на практиці застосовують метод вимірювання напруги саморозряду і зворотної напруги.

За вимірними значеннями напруги саморозряду і зворотної напруги можна судити про стан корпусної ізоляції безпосередньо. За рахунок різної поляризації шарів від джерела напруги до ізоляції протягом не тривалого часу протікає струм абсорбції. За рахунок струму абсорбції на кордоні розділу шарів накопичується об'ємний заряд внутрішнього поглинання (заряд абсорбції). Про процес абсорбції можна судити не

тільки по струму абсорбції, але і по накопиченому (поглиненому) заряду абсорбції, який створює зворотну напругу.

Дослід, в якому спостерігається зворотна напруга, полягає в наступному. Неоднорідна ізоляція заряджається протягом деякого часу при постійній (номінальній) напрузі U_0 , щоб в ній накопичився заряд абсорбції. Потім ізоляція відключається від джерела постійної напруги і її електроди (провід та «корпус») замикаються на коротко на малий проміжок часу Δt , після чого знову розмикаються. За час Δt геометрична ємність ізоляції повністю розряджається, а заряд абсорбції, накопичений на кордоні шарів, залишається практично незмінним. Цей заряд розподіляється на ємність ізоляції і заряджає її. Після розмикання зовнішніх електродів ізоляція буде розряджатися на опір своїх шарів. На ізоляції з'явиться напруга. Цю напругу і називають зворотною напругою U_{ret} . В наводиться пристрій, що дозволяє виміряти зворотну напругу ТЕД. [8]

В якості оцінки стану корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А в роботі використовувались данні замірів значень зворотної напруги $U_{ret}(t)$, t – час, для різних значень пробігу локомотива.

Якість стану ізоляції будемо оцінювати показником $U_{ret}^{max}(l)$ – максимальне значення зворотної напруги в поточній процедурі вимірювання відповідно до пробігу локомотива l

$$U_{ret}^{max}(l) = \max_t U_{ret}(t), t \in [0, t_{eval}], \quad (1)$$

та інтегральним показником [8]

$$A(l) = \int_0^{t_{eval}} U_{ret}(t) dt, t_{eval} = t_r + t_{midl}, \quad (2)$$

де l – пробіг локомотива, при якому виконується діагностування ТЕД;

t_{eval} – час оцінювання зворотної напруги, визначається з рівняння

$$U_{ret}(t_{eval}) = 0.5 \cdot U_{ret}^{max}(l), \quad (3)$$

де t_r – час наростання зворотної напруги до величини $U_{ret}^{max}(l)$;

t_{midl} – значення часу саморозрядження від часу t_r до величини зворотної напруги $0.5 \cdot U_{ret}^{max}(l)$.

Заміри величин зворотної напруги $U_{ret}(t)$, інтегральної оцінки $A(l)$ виконувались приладом [8]. Спостереження проводились для групи ТЕД, що встановлені на тепловозах серії 2ТЕ-116 депо «М» РФ «Придніпровська залізниця» при різних значеннях пробігу l (напрацювання).

Заміри зворотної напруги $U_{ret}(t)$ та відповідної величини інтегральної оцінки (2) проводилися для ТЕД, що проходили капітальний ремонт КР-1 на локомотиворемонтному заводі «Завод 1», електровозоремонтному заводі «Завод 2» та електромеханічному ремонтному заводі «Завод 3». Залежність значень інтегральної оцінки $A(l)$ для одного ТЕД від пробігу приведено на рис. 1.

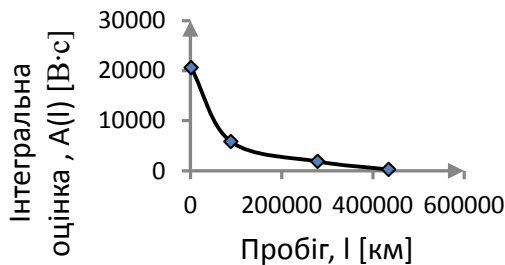


Рис. 1. Залежність значень інтегральної оцінки $A(l)$ від пробігу для одного ТЕД

Якщо величину зворотної напруги $U_{ret}^{max}(l)$ та інтегральну оцінку $A(l)$ розглядати як характеристики процесу старіння корпусної ізоляції (або як показники поступової відмови), то їх можна описати співвідношеннями

$$U_{ret}^{max}(l) = U_{ret}^{max}(0) \cdot e^{-a \cdot l}, \quad a = const; \quad (4)$$

$$A(l) = A(0) \cdot e^{-b \cdot l}, \quad b = const, \quad (4')$$

параметри a і b визначаються з задачі апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів.

Стан корпусної ізоляції при проведенні її діагностування методом зворотної напруги можна характеризувати як максимальним значенням зворотної напруги $U_{ret}^{max}(l)$, так й інтегральним показником $A(l)$.

Відновлення якості корпусної ізоляції можливе в умовах локомотивного депо під час виконання поточного ремонту ПР-3 та в умовах локомотиворемонтного заводу при проведенні капітального ремонту КР-1, та капітального ремонту КР-2.

Якщо відновлення властивостей ізоляції буде здійснюватися після КР-2 (або коли ізоляція нова) під час виконання ПР-3 з періодом відновлення τ , то інтегральна оцінка $A(l)$, з урахуванням ступеня відновлення корпусної ізоляції, буде описуватися функціональною залежністю в вигляді [5]

$$A(l) = A(0) \cdot e^{-b \cdot \left(l - \gamma \cdot \tau \cdot \left[\frac{l}{\tau} \right] \right)}, \quad (5)$$

де $\left[\frac{l}{\tau} \right]$ – ціла частина від $\left(\frac{l}{\tau} \right)$;

γ – коефіцієнт (число), що характеризує рівень відновлення ізоляції під час виконання ПР-3.

В подальшому вважаємо, що відлік напрацювання l починається від ремонту КР-2 (або з моменту початку напрацювання коли ізоляція нова).

Параметри залежності інтегральної оцінки A , зворотної напруги U_{ret}^{max} з урахуванням початкової якості ізоляції (або якості ремонту ТЕД ЕД-118А локомотиворемонтними заводами) наведено в табл. 1. Параметр b і значення величини $A(0)$ в табл. 1 визначались з розв'язання задачі апроксимації за даними спостережень величин інтегральних оцінок $A(l)$.

Таблиця 1

Початкові данні: параметри залежності інтегральної оцінки $A(l)$ і витрати коштів на відновлення за ПР-3, КР-1

Завод	$A(0)$, В·с	γ	b	g	$C_{\text{ПР3}}$, грн.	$C_{\text{КР1}}$, грн.
«Завод 1»	20540	0,40	0,00000900	0,71	6520	12648
«Завод 2»	20900	0,55	0,00000947	0,78	6520	14055
«Завод 3»	21180	0,49	0,00001015	0,75	6520	16970

В звичайній ситуації і в проведених експериментах справжнє значення величин A 0 після відновлення КР-2 для ТЕД невідомо.

В табл. 1: $C_{\text{ПР3}}$ – витрати коштів на одне відновлення за ПР-3; $C_{\text{КР1}}$ – витрати коштів на відновлення за КР-1; g – коефіцієнт, що характеризує рівень відновлення ізоляції під час виконання КР-1. Величини $C_{\text{ПР3}}$ і $C_{\text{КР1}}$ це середні витрати на одне відновлення для певного заводу.

Первинно величина L_{ren1}^* напрацювання до КР-1 визначається з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \left(L_{\text{ren1}}^* - \gamma \cdot \tau \cdot \left[\frac{L_{\text{ren1}}^*}{\tau} \right] \right)} = A_{\text{min2}} \quad (6)$$

відносно L_{ren1}^* . В рівнянні (6) величина A_{min2} є значення інтегральної оцінки A , що відповідає обмеженню знизу для значень зворотної напруги $U_{\text{ret}}^{\text{max}}$. Остаточна величина напрацювання до КР-1 визначається як

$$L_{\text{ren1}} = \begin{cases} L_{\text{ren1}}^* \\ n+1 \cdot \tau \end{cases}, \quad (7)$$

де n – кількість відновлень ПР-3 до моменту КР-1.

Значення $L_{\text{ren1}} = L_{\text{ren1}}^*$ приймається коли різниця $\theta = L_{\text{ren1}}^* - (n+1) \cdot \tau$ становить величину близьку до τ . Термін «близька» не означає «приблизно дорівнює» і залежить більше від людського фактору. Задача про прийняття рішення що стосується вибору значення L_{ren1} в статті не розглядається.

Іншими словами: якщо величина пробігу θ економічно вигідна після проведення останнього ПР-3, то тоді $L_{\text{ren1}} = L_{\text{ren1}}^*$, в іншому випадку в момент напрацювання що відповідає останньому ПР-3 буде здійснено КР-1 і тоді $L_{\text{ren1}} = (n+1) \cdot \tau$.

Моделювання моментів відновлення до КР-2 відбувається з урахуванням отриманих результатів моделювання відновлення до КР-1. Первинно величина напрацювання до КР-2 L_{ren2}^* визначається з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \cdot (L_{\text{ren2}}^* - L_{\text{ren1}} + \Delta l - \tau \cdot g \cdot m)} = A_{\text{min2}}, \quad (8)$$

відносно L_{ren2}^* . В рівнянні (8) m – кількість відновлень ПР-3 від моменту КР-1 до КР-2; Δl – прирощення по пробігу відповідно до рівня відновлення при виконанні КР-1 (залежить від коефіцієнту відновлення ізоляції g). Величина Δl визначається з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \cdot \Delta l} = g \cdot A(0) \quad (9)$$

відносно Δl . Остаточна величина напрацювання до КР-2 визначається як

$$L_{\text{ren2}} = \begin{cases} L_{\text{ren2}}^* \\ L_{\text{ren1}} + (m+1) \cdot \tau \end{cases} \quad (10)$$

Вираз (10) аналогічний виразу (7). Розглянемо різницю $\delta = L_{\text{ren2}}^* - L_{\text{ren1}} - (m+1) \cdot \tau$. В випадку, якщо величина пробігу δ економічно вигідна після проведення останнього ПР-3 після КР-1, то $L_{\text{ren2}} = L_{\text{ren2}}^*$, в іншому випадку в момент напрацювання, що відповідає останньому ПР-3, буде здійснено КР-

2 і

$$L_{ren2} = L_{ren1} + (m+1) \cdot \tau. \quad (11)$$

Результати і обговорення

При фіксованій періодичності, коли $\tau=180000$ км та з врахуванням обмеження на зворотну напругу, значення можливого пробігу L_{ren2} (напрацювання до КР-2) по заводах наводяться в табл. 2. [5]

Таблиця 2

Прогнозування напрацювання відновлення до КР-1 та до КР-2 по заводах при періодичності відновлення $\tau = 180000$ км за Правилами [11]

Завод відновлення ізоляції	Напрацювання до КР-1 L_{ren1} , км	Напрацювання до КР-2 L_{ren2} , км	Витрати коштів $C_{прз}(n,m) + C_{срл}$, Грн.	Питомі витрати, Коп./км
«1»	513715	988164	38728	3,91
«2»	540000	1080000	40115	3,71
«3»	540000	1052015	43050	4,09

При моделюванні моментів відновлення, табл. 2, вводиться обмеження знизу в вигляді зони (A_{min1}, A_{min2}), що є обмеженням значень інтегрального показника якості ізоляції в розрахунках. Величина $A_{min1} = 950 [B \cdot c]$ відповідає величині зворотної напруги в 30 вольт, а величина $A_{min2} = 750 [B \cdot c]$ – величині в 25 вольт. Величини A_{min1}, A_{min2} обирались виходячи з досвіду експлуатації, точки зору безпеки руху і досліджень [8].

Як слідує з табл. 2 розрахунків, при однакових представлених періодах відновлення τ і кількості відновлень, на якість корпусної ізоляції впливає і прийнята технологія відновлення. Перед замовником (депо) виникає задача про прийняття рішення стосовно вибору виконавця для проведення відновлювальних робіт. Результати моделювання (послідовність відновлень та прогнозування ресурсу), що відповідають

табл. 2, надано на рис. 2 - 4.

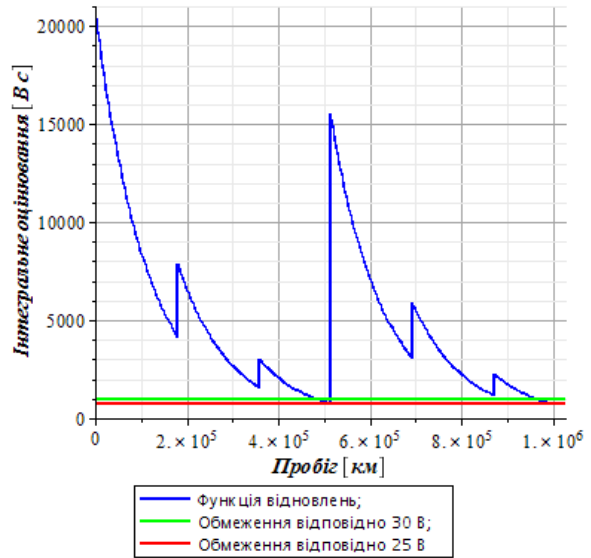


Рис. 2. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [5], технологія відновлення «Завод 1».

Моменти відновлення, км:
180000 – ПР-3; 360000 – ПР-3; 513715 – КР-1;
693715 – ПР-3; 873715 – ПР-3; 988164 – КР-2

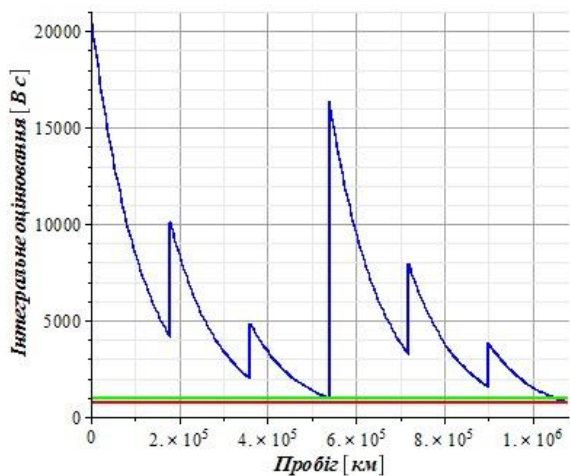


Рис. 3. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [5], технологія відновлення «Завод 2».

Моменти відновлення, км:
180000 – ПР-3; 360000 – ПР-3; 540000 – КР-1;
720000 – ПР-3; 900000 – ПР-3; 1080000 – КР-2

На рисунках зображено функцію відновлень-зносу корпусної ізоляції. Функція відновлень-зносу являє собою залежність інтегрального показника стану ізоляції від

напрацювання. У точках, що відповідають моментам відновлення, функція має розриви першого роду. Коридор з прямих ліній відповідає прийнятому обмеженню в задачі оптимізації на величину зворотної напруги відповідно 25 В і 30 В.

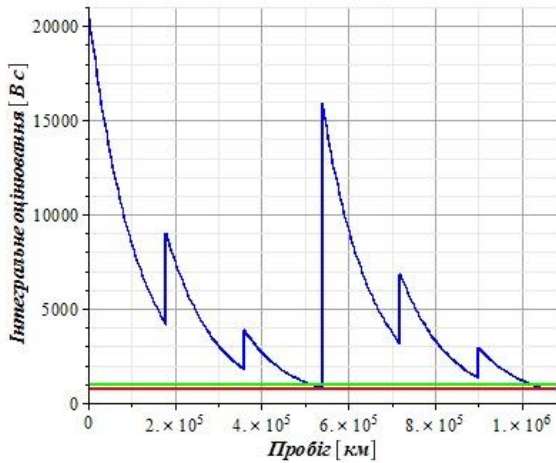


Рис. 4. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [5], технологія відновлення «Завод 3».

Моменти відновлення, км:

180000 – ПР-3; 360000 – ПР-3; 540000 – КР-1;
 720000 – ПР-3; 900000 – ПР-3; 1052015 – КР-2

Рішення стосовно вибору моментів відновлення корпусної ізоляції і відповідного ресурсу визначимо з розв’язання наступної задачі оптимізації. Для ремонтних заводів визначимо варіанти відновлення такі, які мінімізують суму питомих витрат на відновлення ПР-3 та КР-1 за період експлуатації від КР-2 (або новий ТЕД) до наступного КР-2. Сформулюємо задачу. Нехай τ – період відновлення ізоляції, n – кількість відновлень ПР-3 до КР-1, m – кількість відновлень ПР-3 від КР-1 до КР-2, тоді

$$\min_{\tau, n, m} \frac{C(\tau, n, m)}{L_{ren2}(\tau, n, m)}, \quad \tau \in T, \quad n, m \in M, \quad (11)$$

при обмеженні

$$L_{ren2}(\tau, n, m) \geq L_{min}, \quad (12)$$

де $C(\tau, n, m)$ – сума витрат на виконання відновлень всіх ПР-3 та КР-1;

M – обмежена безліч натуральних чисел;
 T – безліч наперед заданих періодів відновлення ізоляції;

$L_{ren2}(\tau, n, m)$ – напрацювання ізоляції до КР-2;

L_{min} – мінімально допустимий пробіг (напрацювання) ТЕД, приймається відповідно [5] величиною 990000 км.

Функція цілі $C(\tau, n, m)$ є сума витрат на всі визначені при моделюванні відновлення всіх ПР-3 і КР-1 за період експлуатації від КР-2 (або новий ТЕД) до наступного КР-2. Мова йде про загальні питомі витрати на відновлення тільки корпусної ізоляції одного ТЕД.

В задачі прийнято $M = \{1, 2, 3, 4, 5\}$;

$T = \{\tau_i\}, i = \overline{1, K}$ – дискретна безліч періодів відновлення, τ_i – періоди відновлення ізоляції, що задаються наперед при розв’язанні задачі. Розв’язання задачі значно спрощується тим, що оптимізація виконується на рахункових, обмежених безлічах T і M . Дискретна безліч періодів відновлення вибрана в зв’язку з тим, що функція цілі $C(\tau, n, m)$ не є безперервною функцією, що ускладнює використання методів типу градієнтних при вирішенні поставленої оптимізаційної задачі. Значення періодів відновлення τ_i для різних ремонтних заводів відрізняються.

Оптимізація питомих витрат з прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 1» проводилась для безлічі періодів відновлення, тис. км, $T = \{180, 150, 120, 250, 300, 320, 350, 360\}$.

Отримано наступний результат з мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР-3 $(n+m)=(1+1)$; напрацювання до КР-2 $L_{ren2} = 990430$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m) = 25688$ грн.; найменші питомі витрати склали 2,59 коп./км; період відновлення $\tau = 360000$ км. Моменти відновлення, км: 360000 – ПР-3; 513715 – КР-1; 873715 – ПР-3.

Оптимізація питомих витрат з прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 2» проводилась для безлічі періодів відновлення, тис. км, $T=\{120, 150, 180, 240, 250, 300, 350, 360\}$.

Отримано наступний результат з мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР-3 $(n+m)=(1+1)$; напрацювання до КР-2 $L_{ren2} = 1108430$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m)=25688$ грн.; найменші питомі витрати склали 2,32 коп./км; період відновлення $\tau = 360000$ км. Моменти відновлення, км: 360000 – ПР-3; 542515 – КР-1; 902515 – ПР-3.

Оптимізація питомих витрат з прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 3» проводилась для безлічі періодів відновлення, тис. км, $T=\{120, 150, 180, 240, 250, 300, 320, 360\}$.

Отримано наступний результат з мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР-3 $(n+m)=(1+1)$; напрацювання до КР-2 $L_{ren2} = 1049730$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m)=25688$ грн.; найменші питомі витрати склали 2,45 коп./км; період відновлення $\tau = 360000$ км. Моменти відновлення, км: 360000 – ПР-3; 567715 – КР-1; 927715 – ПР-3.

Варіанти оптимальних відновлень ізоляції, для поставленої задачі оптимізації, зведено в загальну таблицю для подальшого аналізу, табл. 3.

Як видно з табл. 3, найкращу технологію відновлення має «Завод 2».

Наукова новизна і практичне значення

Процедура оптимізації враховує ступінь відновлення ізоляції при виконанні ПР-3 і виконанні КР-1. Моделювання ресурсу ізоляції і періоду відновлення ПР-3 засновано на даних вимірів зворотної напруги корпусної ізоляції в залежності від пробігу. Максимальне значення зворотної напруги та значення введеної інтегральної оцінки мо-

жуть бути використані як показники що характеризують стан корпусної ізоляції ТЕД.

Таблиця 3

Зведена таблиця аналізу оптимальних варіантів технологій відновлення корпусної ізоляції по заводам

Завод відновлення КР-1, КР-2	Періодичність відновлення τ , км	Кількість відновлень ПР-3 $(n+m)$	Напрацювання до КР-2 L_{ren2} , км	Питомі витрати коп/км
«1»	360000	1+1	990430	2,59
«2»	360000	1+1	1108430	2,32
«3»	360000	1+1	1049730	2,45

Висновки

Визначено оптимальне напрацювання корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А за питомими витратами на відновлення як технічного об'єкта з поступовими відмовами з урахуванням технології відновлення. Отримано відповідні моменти відновлення. Моделювання моментів відновлення та прогнозування ресурсу корпусної ізоляції здійснювалося без урахування впливів випадкових відмов ізоляції. За статистичними даними та обраним методом прогнозування ресурсу визначено що найкращу технологією відновлення має «Завод 2». Отримані результати прийнятні до конкретних умов експлуатації. Важливо дотримання припущення, що умови експлуатації ТЕД не змінювалися зі зміною напрацювання. Останнє означає, що вагові норми, полігон обороту і організація руху за період спостереження і збору інформації не змінювалися.

Бібліографічний список

1. Босов, А. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог: Монография / А. А. Босов, П. А. Лоза // – Днепр: Дри-ант, 2015. – 252 с. ISBN 978-966-2394-15-3.
2. Гиев, З.Г. Основы виброакустической

- диагностики тяговых приводов локомотивов: Дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Ростов-на Дону, 1998. – 367 с.
3. Капица, М. И. Определение системы диагностирования ТЭД с учетом выбора предпочтительных элементов с изменяющейся интенсивностью отказов / М. И. Капица, В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2017. – № 4. – Харків: Вид-во УкрДУЗТ. – С. 9-15.
 4. Касаткин, Г.С. Контроль изоляции электро-технических устройств: Учебное пособие / Г. С. Касаткин, В. В. Федотов. – М.: МИИТ, 2009. – 56 с.
 5. Правила ремонту электрических машин тепловозів. № ЦТ-0064: Наказ Укрзалізниці від 23.02.03 р. № 53-Ц. // – К., ТОВ Видавничий дім «САМ», 2003. – 148 с.
 6. Самсонкін, В.М. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки / В. М. Самсонкін, О. М. Гончаров, С. Г. Грищенко та ін. // Укрзалізниці. – К.: ДП ДНДЦ УЗ, 2009. – 300 с.
 7. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учебное пособие для вузов ж.д. транспорта / А. С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2005. - 280 с.
 8. Michail Kapitsa, Vasiliy Laguta, Yuriy Kozik. Selecting the Parameters of The Diagnosis of Frame Insulation Condition in Electrical Machines of Locomotives // *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7 (4.3) (2018), pp. 110-114. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19718.
 9. Nefedov, R. Loginova, E. Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation // ITM Web of Conferences. 18. 01006. [doi: 10.1051/itmconf/20181801006].
 10. Olivier Barré, Bellemain Napame. The Insulation for Machines Having a High Lifespan Expectancy // Design, Tests and Acceptance Criteria Issues. *Machines*, 2017, 5(1), 7; <https://doi.org/10.3390/machines5010007>
 11. Serdiuk T., Feliziani M., Serdiuk K. About electromagnetic compatibility of track circuits with the traction supply system of railway // Proc. of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility -EMC EUROPE 2018. - Publisher: IEEE. Conference Location: Amsterdam, Netherlands. - 27-30 Aug. 2018. - Pages: 242-247. [DOI: 10.1109 / EMCEurope.2018.8485034]
- Ключові слова:** корпусна ізоляція, зворотна напруга, контроль стану ізоляції, система утримування тягового електродвигуна.
- Ключевые слова:** корпусная изоляция, обратное напряжение, контроль состояния изоляции, система содержания тягового электродвигателя.
- Keywords:** frame insulation, return voltage, control of the insulation condition, traction motor maintenance system.
- Рецензенти:**
д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк,
д.т.н., проф. А. В. Сохацький.
- Надійшла до редколегії 15.10.2019.
Прийнята до друку 28.10.2019.