

## 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 – аспірант, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, kozik\_yuriy@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-5212-2953

# ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ З ОПТИМАЛЬНИМ ПРОБІГОМ

## Вступ

До особливостей ізоляційних систем електричних машин транспортних засобів залізничного транспорту слід віднести вимоги до їх системи утримування. Надійність роботи тягових електричних двигунів (ТЕД) відбивається в статистиці відмов локомотивів під час перевезень і подальшого відновлення. Встановлено, що внаслідок інтенсивного теплового і електричного старіння, а також втрати механічних властивостей в умовах експлуатації багато тягових двигунів не виробляють свій ресурс передбачений нормами і надходять в заводський ремонт завчасно.

Електричні машини (ЕМ) тягового рухомого складу (ТРС) відносяться до гранично навантаженого обладнання, і тому з позиції комплексного впливу на них теплових, електромагнітних, механічних і кліматичних чинників, незважаючи на постійні заходи конструктивно-технологічного характеру при виготовленні і ремонті, рівень пошкоджуваності їх в експлуатації залишається помітним.

У відповідність з «Державною програмою стратегічного розвитку залізниць України», що підготовлена Державним науково-дослідним центром залізничного транспорту України сумісно із фахівцями Укрзалізниці, розроблено галузеву Програму оновлення тягового рухомого складу залізниць на період до 2020 року, де вказано на необхідність створення сучасних систем обслуговування та ремонту ТРС нового

покоління та розробка відповідної нормативної документації [1].

Удосконалення систем утримування ТРС нового покоління, та того, що знаходиться в експлуатації є актуальною задачею для залізничного транспорту України.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням дослідження надійності, визначення залишкового ресурсу та продовження ресурсу тягового рухомого складу залізниць, системам технічного утримування ТРС, і зокрема ТЕД, приділяється постійна увага науковими колективами. В даний час сучасні системи утримування ТЕД базуються на використанні спостережень про раптові відмови. Фундаментальні теоретичні дослідження з вдосконалення систем утримування об'єктів залізничного транспорту розглянуто в роботі [2]. Питанням дослідження надійності, визначення залишкового ресурсу та продовження ресурсу тягового рухомого складу (ТРС), в тому числі і ТЕД, розглядаються в роботах [3-5]. Підвищення функціональної надійності тягових електричних машин, ізоляційних систем і колекторно-щіткового вузла тягових двигунів знайшли відображення в роботах [4, 6]. Удосконалення систем утримування ізоляційних систем з необхідністю призводить до розробки пристроїв і систем діагностування [5, 7-9].

Моделі відновлення корпусної ізоляції, що пропонуються в проаналізованих публі-

каціях, базуються в основному на випадкових потоках відмов (пробій ізоляції) і не враховують поточний стан ізоляції і якість її відновлення.

### Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є покращення системи утримування ТЕД ЭД-118А за рахунок прогнозування ресурсу корпусної ізоляції та визначення раціональних моментів її відновлення з забезпеченням оптимального пробігу з врахуванням ступені відновлення, використовуючи дані про стан ізоляції за методом зворотної напруги в процесі експлуатації локомотива.

Задачі дослідження:

– розробка математичної моделі побудови моментів відновлення корпусної ізоляції в об'ємі ПР-3 та КР-1 за максимальним напрацюванням (пробіг) корпусної ізоляції з урахуванням ступеня відновлення та інтегрального показника якості стану корпусної ізоляції;

– прогнозування ресурсу корпусної ізоляції за математичною моделлю.

### Методика

В якості оцінки стану корпусної ізоляції ТЕД ЭД-118А в роботі використовувались данні замірів значень зворотної напруги  $U_{ret}(t)$ ,  $t$  – час, для різних значень пробігу локомотиву. Якість стану ізоляції будемо оцінювати показником  $U_{ret}^{max}(l)$  – максимальне значення зворотної напруги в поточній процедурі вимірювання відповідно до пробігу локомотиву  $l$

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

та інтегральним показником [9]

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

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

$t_{eval}$  – час оцінювання зворотної напруги і 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 опис якого надано в [11]. Спостереження проводились для групи ТЕД, що встановлені на тепловозах серії 2ТЭ-116 депо «М» Придніпровської залізниці при різних значеннях пробігу  $l$  (напрацювання).

Заміри зворотної напруги  $U_{ret}(t)$  та відповідної величини інтегральної оцінки (2) проводились для ТЕД, що проходили капітальний ремонт КР-1 на Львівському локомотиворемонтному заводі (ЛЛРЗ), Запорізькому електровозоремонтному заводі (ЗЕРЗ) та Смілянському електромеханічному ремонтному заводі (СЕМРЗ). Для окремо взятого локомотива значення максимальної зворотної напруги та інтегральна оцінка усереднювались при проведенні одного діагностування по всім 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 аналогічно [10]

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

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

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

Стан корпусної ізоляції при проведенні її діагностування методом зворотної напруги [9] можна характеризувати як максимальним значенням зворотної напруги  $U_{ret}^{max}(l)$ , так й інтегральним показником  $A(l)$ . Залежність середніх значень інтегра-

льної оцінки  $A(l)$  зворотної напруги та залежність середніх максимальних значень  $U_{ret}^{max}(l)$  зворотної напруги ізоляції від пробігу по всім ТЕД для одного локомотива приведено на рис. 1, 2.

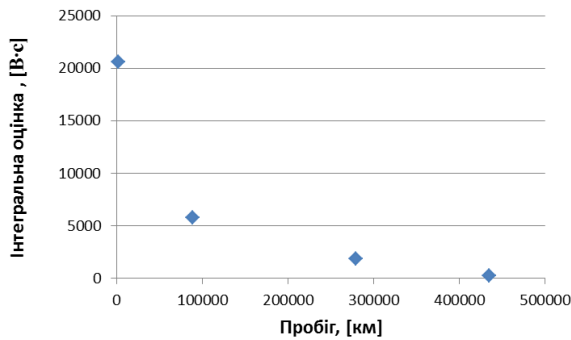


Рис. 1. Залежність середніх значень інтегральної оцінки якості ізоляції від пробігу по всім ТЕД для одного локомотива

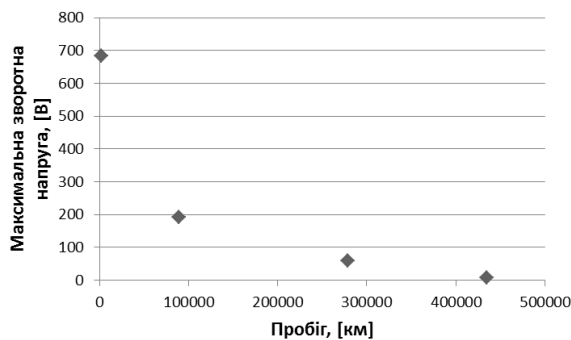


Рис. 2. Залежність середніх максимальних значень зворотної напруги ізоляції від пробігу по всім ТЕД для одного локомотива

Побудова математичної моделі визначення моментів відновлення корпусної ізоляції та прогнозування напрацювання корпусної ізоляції відбувалось за залежностями середніх значень величин  $A(l)$  та  $U_{ret}^{max}(l)$ , що приведені на рис. 1, 2.

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  $\tau$ , то інтегральна оцінка  $A(l)$ , з урахуванням ступеня відновлення корпусної ізоляції, будемо описувати функціональною залежністю в вигляді [2]

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

де  $\left[ \frac{l}{\tau} \right]$  – ціла частина від  $\left( \frac{l}{\tau} \right)$ ;  $\gamma$  – 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 напрацювання коли ізоляція нова).

Параметри залежності інтегральної оцінки  $A$ , зворотної напруги  $U_{ret}^{max}$  з урахуванням початкової якості ізоляції (або якості ремонту ТЕД ЭД-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  $A(l)$ . В звичайній ситуації і в проведених експериментах справжнє значення величин  $A(0)$  після відновлення КР-2 для ТЕД невідомо.

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

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

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

відносно  $L_{ren1}^*$ . В рівнянні (6) величина  $A_{min2}$  є значення інтегральної оцінки  $A$ , що відповідає обмеженню знизу для значень зворотної напруги  $U_{ret}^{max}$ . Остаточо вели-

чина напрацювання до КР-1 визначається експертом в інтерактивному режимі в процесі оптимізації на ПЕОМ як

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

де  $n$  – кількість відновлень до КР-1.

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

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

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

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

відносно  $\Delta l$ . Остаточна величина напрацювання до КР-2 визначається також в інтерактивному режимі в процесі оптимізації на ПЕОМ як

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

Моделювання моментів відновлень ПР-3 до КР-1 та від КР-1 до КР-2 і, відповідно отримання величин напрацювання, що прогнозуються, виконувалось в середовищі математичної оболонки *MAPLE*.

### Результати і обговорення

При фіксованій періодичності, коли  $\tau=180000$  км, [11], та з врахуванням обмеження на зворотну напругу, значення можливого пробігу  $L_{ren2}$  (напрацювання до КР-2) по заводах складо, табл. 2.

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 В, а величина  $A_{min2} = 750 [B \cdot c]$  – величині в 25 В. Величини  $A_{min1}, A_{min2}$  обирались виходячи з досвіду експлуатації і точки зору безпеки руху.

Таблиця 1

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

Завод	$U_{ret}^{max}$ , В	$A(0)$ , [В·с]	$\gamma$	$b$	$g$	$C_{ПР3}$ , [грн]	$C_{КР1}$ , [грн]
ЛЛРЗ	955	20540	0,40	0,00000900	0,71	6520	12648
ЗЕРЗ	1100	20900	0,55	0,00000947	0,78	6520	14055
СЕМРЗ	1270	21180	0,49	0,00001015	0,75	6520	16970

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 $C_{ПР3} + C_{КР1}$ , грн	Питомі витрати, коп/км
ЛЛРЗ	513715	988164	38728	3,91
ЗЕРЗ	540000	1080000	40115	3,71
СемРЗ	540000	1052015	43050	4,09

Як слідкує з табл. 2 розрахунків, при однакових представлених періодах відновлення  $\tau$  і кількості відновлень, на якість корпусної ізоляції впливає і прийнята технологія відновлення на що вказує пробіг. 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, наступні:

– Технологія відновлення ЛЛРЗ. Прогнозований ресурс 988164 км. Моменти відновлень до КР-2 за Правилами [11]: 180000 км – ПР-3; 360000 км – ПР-3; 513715 – КР-1; 693715 км – ПР-3; 873715 км – ПР-3; 988164 км – КР-2.

– Технологія відновлення ЗЕРЗ. Прогнозований ресурс 1080000 км. Моменти відновлень до КР-2 за Правилами [11]: 180000 км – ПР-3; 360000 км – ПР-3; 540000 км – КР-1; 720000 км – ПР-3; 900000 км – ПР-3; 1080000 км – КР-2.

– Технологія відновлення СЕМРЗ. Прогнозований ресурс 1052015 км. Моменти відновлень до КР-2 за Правилами [11]: 180000 км – ПР-3; 360000 км – ПР-3; 540000 км – КР-1; 720000 км – ПР-3; 900000 км – ПР-3; 1052015 км – 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 забезпечують максимальне напрацювання (пробіг) ізоляції до КР-2. Сформулюємо задачу. Нехай  $\tau$  – період відновлення ізоляції,  $n$  – кількість відновлень до КР-1,  $m$  – кількість відновлень від КР-1 до КР-2, тоді

$$\max_{\tau, n, m} L_{ren2}(\tau, n, m), \tau > 0, \\ \tau \in T; n, m \in M, \quad (10)$$

при обмеженні

$$L_{ren2}(\tau, n, m) \geq L_{min}, \quad (10')$$

де  $M$  – обмежена множина натуральних чисел;  $T$  – множина періодів відновлення ізоляції;  $L_{ren2}(\tau, n, m)$  – напрацювання ізоляції до КР2;  $L_{min}$  – мінімально допустимий пробіг (напрацювання) ТЕД, приймається відповідно [11] величиною 990000 км.

Функція цілі  $L_{ren2}(\tau, n, m)$  являє собою пробіг ТЕД за період експлуатації від одного КР-2 до наступного КР-2.

В задачі прийнято  $M = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ;  $T = \{\tau_i\}, i = \overline{1, K}$  – дискретна множина періодів відновлення,  $\tau_i$  – періоди відновлення ізоляції, що задаються наперед при розв’язанні задачі. Розв’язання задачі значно спрощується тим, що оптимізація виконується на рахункових, обмежених множинах  $T$  і  $M$ . Дискретна множина періодів відновлення вибрана в зв’язку з тим, що функція цілі  $L_{ren2}(\tau, n, m)$  має розриви, що ускладнює використання методів типу градієнтних при вирішенні поставленої оптимізаційної задачі. Значення періодів відновлення  $\tau_i$  для різних ремонтних заводів можуть відрізнятися.

Оптимізація варіантів відновлень ізоляції проводилась для отриманих результатів прогнозування напрацювання  $L_{ren2}(\tau, n, m)$ , табл. 3, 4, 5. В таблицях символом (^), стовпчик «Напрацювання до КР-2», позначено варіанти відновлення, які не задовольняють Правилам [11] – пробіг локомотива до КР-2 менше мінімально допустимого пробігу 990000 км. Символом (\*), стовпчик «Напрацювання...», позначено варіант відновлення ізоляції що відповідає найбільшому напрацюванню.

Варіанти оптимальних відновлень ізоляції, для поставленої задачі оптимізації, зведемо в загальну таблицю для подальшого аналізу, табл. 6.

Таблиця 3

**Аналіз напрацювання ізоляції  
та питомих витрат на відновлення  
в залежності від періоду відновлення,  
технологія відновлення ЛЛРЗ**

Періодичність відновлення, $\tau$ км	Кількість відновлень ПР-3, $(n+m)$	Напрацювання до КР-2, $L_{ren2}$ км	Питомі витрати, коп/км
180000	2+2	988164	3,91
150000	3+2	^999715	4,53
150000	2+2	^900000	4,30
120000	3+3	^960000	5,39
<b>120000</b>	<b>4+3</b>	<b>*1041715</b>	<b>5,60</b>
250000	1+1	^906430	2,83
300000	1+1	^926430	2,77
320000	1+1	^954430	2,69
350000	1+1	^974430	2,64
360000	1+1	990430	2,59

Таблиця 4

**Аналіз напрацювання ізоляції  
та питомих витрат на відновлення  
в залежності від періоду відновлення,  
технологія відновлення ЗЕРЗ**

Періодичність відновлення, $\tau$ км	Кількість відновлень ПР-3, $(n+m)$	Напрацювання до КР-2, $L_{ren2}$ км	Питомі витрати, коп/км
180000	2+2	1080000	3,71
<b>180000</b>	<b>3+3</b>	<b>*1306430</b>	<b>3,96</b>
180000	3+2	1206715	3,75
250000	1+1	1000000	2,57
250000	2+1	1124930	2,86
350000	1+1	1097430	2,34
150000	3+3	1200000	4,31
150000	3+2	1040000	4,35
150000	4+3	1300000	4,48
120000	4+3	1080000	5,39
120000	4+4	1200000	5,40
120000	5+4	1300000	5,49
300000	1+1	1042430	2,46
360000	1+1	1108430	2,32
240000	1+1	^960000	2,68
240000	1+2	1086715	2,96
240000	2+1	1103715	2,92
240000	2+2	1240430	3,12

Порівнюючи, відповідно до поставленої задачі оптимізації, для величин напрацювання ізоляції ТЕД можна углядіти наступну тенденцію. На величини напрацювання ізоляції впливає технологія відновлення, що прийнята на відповідному заводі де відбувається ремонт, а саме для найкращих напрацювань ізоляції маємо

$$1041715 (\text{ЛЛРЗ}) < 1169615 (\text{СЕМРЗ}) < < 1306430 (\text{ЗЕРЗ}). \quad (13)$$

Як видно з виразу (13) найкращу технологією відновлення має ЗЕРЗ. На рис. 3-5 відображено функції відновлень корпусної ізоляції для ЛЛРЗ, СЕМРЗ, ЗЕРЗ, що відповідають максимальному напрацюванню корпусної ізоляції ТЕД відповідно до розрахованих моментів відновлень, що надані в табл. 6.

Таблиця 5

**Аналіз напрацювання ізоляції  
та питомих витрат на відновлення  
в залежності від періоду відновлення,  
технологія відновлення СЕМРЗ**

Періодичність відновлення, $\tau$ км	Кількість відновлень ПР-3, $(n+m)$	Напрацювання до КР-2, $L_{ren2}$ км	Питомі витрати, коп/км
180000	2+2	1052015	4,09
150000	2+2	^900000	4,30
150000	3+3	1140930	4,54
150000	3+2	1009450	4,48
120000	3+3	^960000	5,39
120000	4+3	1080000	5,40
<b>120000</b>	<b>4+4</b>	<b>*1169615</b>	<b>5,54</b>
250000	1+1	^948930	2,71
240000	1+1	^934415	2,75
240000	2+1	1054530	3,05
300000	1+1	^972930	2,64
320000	1+1	1006530	2,55
350000	1+1	1030530	2,50
360000	1+1	1049730	2,45

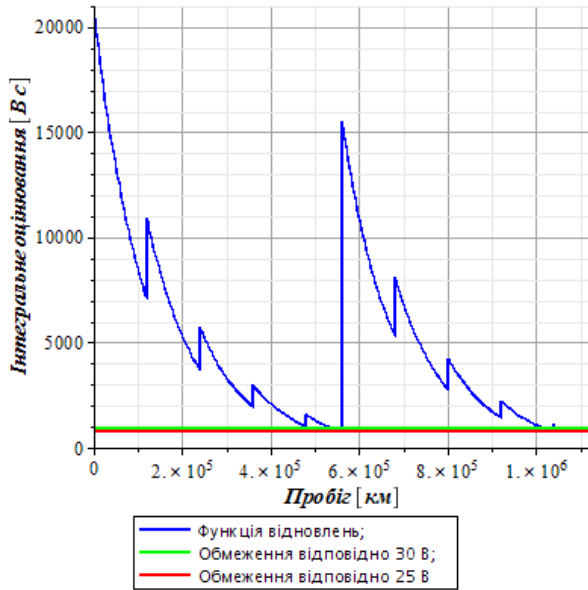


Рис. 3. Оптимальні за пробігом моменти відновлень до КР-2, ЛЛРЗ. Періодичність,  $\tau=120000$  км. Моменти відновлення: 120000, 240000, 360000, 480000 км – ПР-3; 561000 км – КР-1; 681000, 801000, 921000 км – ПР-3; 1041715 км – КР-2 ( $L_{ren2}$ )

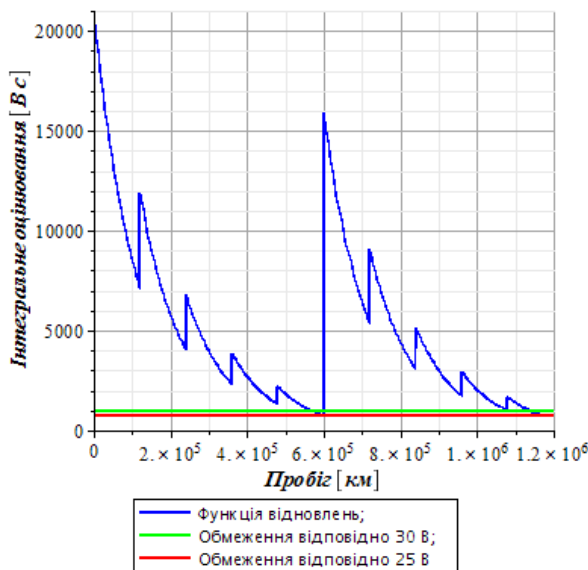


Рис. 4. Оптимальні за пробігом моменти відновлень до КР-2, СЕМРЗ. Періодичність,  $\tau=120000$  км. Моменти відновлення: 120000, 240000, 360000, 480000 км – ПР-3; 600000 км – КР-1; 720000, 840000, 960000, 1080000 км – ПР-3; 1169615 км – КР-2 ( $L_{ren2}$ )

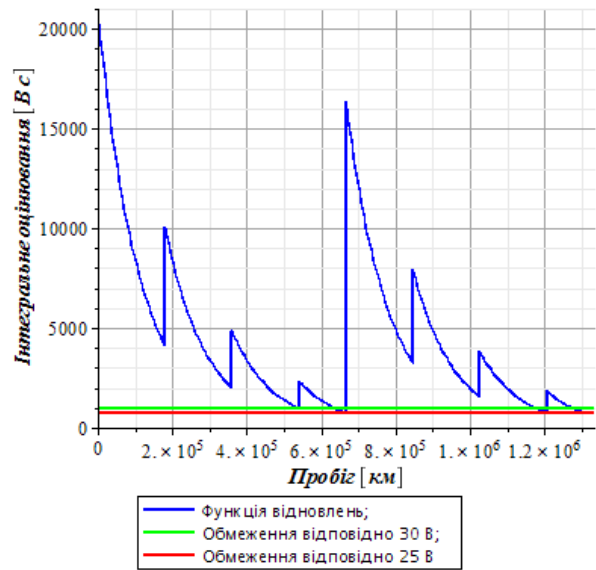


Рис. 5. Оптимальні за пробігом моменти відновлень до КР-2, ЗЕРЗ. Періодичність,  $\tau=180000$  км. Моменти відновлення: 180000, 360000, 540000 км – ПР-3; 666715 км – КР-1; 846715, 1026715, 1206715 км – ПР-3; 1306430 км – КР-2 ( $L_{ren2}$ )

Наведені результати розрахунків придатні для локомотивного депо «М», для якого була зібрана статистична інформація. Для інших локомотивних депо обчислення необхідно виконати заново.

*Примітка.* Моделювання моментів відновлення та прогнозування ресурсу корпусної ізоляції здійснювалося без урахування впливів випадкових відмов ізоляції.

### Наукова новизна і практичне значення

Для корпусної ізоляції ТЕД ЭД-118А рекомендовано періоди її відновлення з забезпеченням найбільшого напруження з урахуванням ступені відновлення. Надано рекомендації стосовно вибору ремонтного заводу для проведення відновлених робіт корпусної ізоляції.

Таблиця 6

**Зведена таблиця аналізу оптимальних варіантів  
 технологій відновлення корпусної ізоляції по заводам**

Завод відновлення КР-1, КР-2	Періодичність відновлення, $\tau$ км	Кількість відновлень ПР-3, ( $n+m$ )	Напрацювання до КР-2, $L_{ren2}$ км	Питомі витрати, коп/км
ЛЛРЗ	120000	4+3	1041715	5,60
ЗЕРЗ	180000	3+3	1306430	3,96
СЕМРЗ	120000	4+4	1169615	5,54

**Висновки**

Величини інтегрального показника  $A(l)$  якості корпусної ізоляції ТЕД можуть бути використані для прогнозування ресурсу та моделювання моментів відновлення ізоляції.

Запропонована методика визначення моментів відновлення корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів з забезпеченням максимального напрацювання, з урахуванням початкового її стану дає можливість локомотивному депо рекомендувати виконавця для проведення відновлювальних робіт.

**Бібліографічний список**

1. Самсонкін, В.М. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008 – 2020 роки [Текст]/ В.М. Самсонкін, О.М. Гончаров, С.Г. Грищенко та ін., Укрзалізниця. – К.:ДП ДНДЦ УЗ 2009. – 300 с.
2. Босов, А. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог [Текст]: Монография /А. А. Босов, П. А. Лоза. –Днепропетровск: Дри-ант, 2015. – 252 с. ISBN 978-966-2394-15-3
3. Капіца, М. І. Розвиток наукових основ удосконалення систем утримування тягового рухомого складу [Текст]: Дис. д-ра техн. наук: 05.22.07 / М. І. Капіца // Дніпропетровський нац. ун-т залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – 349 с.
4. Оленцевич, Д. А. Совершенствование системы технического содержания изоляции

тяговых двигателей электровозов [Текст]: Дис. канд. техн. наук: 05.22.07/ Д. А. Оленцевич // ИрГУПС, 2010. – 192 с.

5. Jian ZHANG, Ji-en MA, Xiao-yan HUANG, et al., 2015. Optimal condition-based maintenance strategy under periodic inspections for traction motor insulations. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 16(8):597-606. [doi:10.1631/jzus.A1400311]
6. Капица, М. И. Определение системы диагностирования ТЭД с учетом выбора предпочтительных элементов с изменяющейся интенсивностью отказов [Текст] / М. И. Капица, В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2017. – № 4. – Харьков: Вид-во УкрДУЗТ, 2017. – С. 9 –15.
7. Бабанин, А. Б. Научные основы совершенствования технологии контроля, диагностирования и материально-технического обеспечения при техническом обслуживании локомотивов [Текст]: Дис. д-ра техн. наук: 05.22.07 / А. Б. Бабанин. – Х: УкрДУЗТ, 2001. – 376 с.
8. Serdiuk T., Feliziani M., Serdiuk K. About electromagnetic compatibility of track circuits with the traction supply system of railway [Text]/ Proc. of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility -EMC EUROPE 2018. – DOI: 10.1109/EMCEurope.2018.8485034. - Publisher: IEEE. Conference Location: Amsterdam, Nehterlands. - 27-30 Aug. 2018. - Pages: 242 – 247.
9. Michail Kapitsa, Vasilij 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

10. Меламедов, И. М. Физические основы надежности [Текст]: / И. М. Меламедов – Л., Энергия, 1970. –С. 132-138
11. Правила ремонту електричних машин тепловозів. № ЦТ-0064 [Текст]: Наказ Укрзалізниці від 23.02.03 р. № 53-Ц. –К., ТОВ Видавничий дім „САМ”, -2003. -148 с.

**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.т.н., проф. А. А. Босов,  
д.т.н., проф. М. І. Капіца.

Надійшла до редколегії 10.01.2019.  
Прийнята до друку 23.01.2019.