

УДК: 629.4.083

В. В. ЛАГУТА^{1*}, Ю. Г. КОЗИК^{2*}

^{1*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта vasilij.laguta@gmail.com, ORCID 0000-0002-4957-9178

^{2*}ТзОВ «Прикладні залізничні технології», вул. Адам-Кляйн-штрассе, 26, Нюрнберг, Німеччина, 90429, тел. +49 (176) 7820 17 35, ел. пошта kozik_yuriy@yahoo.com, ORCID 0000-0002-5212-2953

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

Мета. За основу мети дослідження ми ставимо поліпшення системи утримання тягового електродвигуна (ТЕД) ЕД-118А за рахунок прогнозування ресурсу корпусної ізоляції та визначення моментів її відновлення, із забезпеченням найменших питомих витрат на ПР–3 та КР–1, з врахуванням ступеня відновлення, використанням даних про стан ізоляції за методом зворотної напруги в процесі експлуатації. **Методика.** Задачу, щодо визначення ресурсу корпусної ізоляції та відповідних моментів її відновлення для тягового електродвигуна сформульовано як задачу оптимізації. Критерієм у задачі служить мінімум питомих витрат на виконання ПР–3 та КР–1 протягом періоду від останнього проведення КР–2 до наступного КР–2. **Результати.** Максимальне значення зворотної напруги та значення введеної інтегральної оцінки кривої зворотної напруги є показниками, що можуть характеризувати стан корпусної ізоляції ТЕД. За показник стану ізоляції взято інтегральну оцінку, яка будується за вимірами зворотної напруги. Заводи, що здійснюють ремонт корпусної ізоляції, мають різну якість відновлення, що впливає на питомі витрати відновлення та ресурс ізоляції. **Наукова новизна.** Процедура оптимізації враховує ступінь відновлення ізоляції під час виконання ПР–3 та КР–1. Моделювання ресурсу ізоляції й періоду відновлення ПР–3 засновано на даних вимірів зворотної напруги корпусної ізоляції залежно від пробігу. **Практична значимість.** Величини інтегрального показника зміни зворотної напруги корпусної ізоляції в поточній процедурі вимірювання, за якого виконують діагностування ТЕД, можуть бути використані для прогнозування ресурсу та моделювання моментів відновлення ізоляції, як і максимальні значення зворотної напруги в поточній процедурі вимірювання відповідно до пробігу локомотива.

Ключові слова: корпусна ізоляція; зворотна напруга; контроль стану ізоляції; система утримання тягового електродвигуна

Вступ

Відмови тягових електричних двигунів (ТЕД) мають різну природу, але відмови тягових двигунів через незадовільний стан ізоляції трапляються досить часто. Особливу увагу, під час обслуговування ТЕД, приділяють корпусній ізоляції. Програма оновлення тягового рухомого складу (ТРС) залізниць на період до 2020 року передбачає необхідність створення сучасних систем обслуговування та ремонту ТРС нового покоління та розробку відповідної нормативної документації, [5].

Серед сучасних досліджень слід відзначити роботи М. Д. Глушенка, М. Г. Дурандіна, В. Н. Попова й А. С. Серебрякова, у яких розг-

лянуто проблеми експлуатаційної діагностики тягових електродвигунів, методи прогнозування стану ізоляції електричних машин та ін. Особливий інтерес викликає робота А. С. Серебрякова в галузі розробки пристрою контролю ізоляції тягових двигунів за зворотною напругою [8].

У роботах [1, 9, 10] розглянуто методи діагностування стану тягових електродвигунів, вплив відмов вузлів локомотивів на вибір системи утримання, використання інтелектуальних технологій під час визначення періодичності проведення технічних оглядів і ремонту рухомого складу.

Нові підходи з питань утримування ізоляції ТЕД знайшли відображення в роботі [3]. У роботі [4] описано основні види старіння ізоляції й дефекти, що в ній виникають, наведено основні методи контролю ізоляції електрообладнання.

Фундаментальною є робота [2] аз теоретичних основ ремонтних впливів на надійність технічних об'єктів, у якій сформульовано ряд задач із визначення їх раціонального утримування. Запропонований у роботі підхід можна застосовувати як для окремих елементів рухомого складу, так і для об'єктів у цілому.

У роботі [12] показано, що ресурс електродвигуна в основному визначається зносом ізоляції.

Удосконалення систем утримування ТЕД. У тому числі й корпусної ізоляції, необхідно призводить до відповідних розробок пристроїв і систем діагностування, [6, 11, 14].

Корисною є публікація [13], у якій автори проводять поетапний вичерпний огляд однієї схеми ізоляції, й дають детальний звіт про стандарти, пов'язані з системами ізоляції. У статті звертається увага на те, що жоден стандарт не може забезпечити гарантію на термін служби й ніякі випробування ізоляції не включають усі робочі умови: термічні, механічні, вплив вологи та хімічний вплив. Як замовник, так і виробники будуть використовувати стандарти, знаючи, що такі документи не можуть повністю задовольнити їхні побажання. Автори підкреслюють, що протягом останніх 20-ти років спостерігається тенденція поліпшення якості ізоляції й деякі досягнення в удосконаленні стандартів.

Моделі, що стосуються прогнозування ресурсу ізоляції ТЕД, дослідники однозначно не визначають. Ресурс (життєвий цикл) моделюють як напрацювання (час) між сусідніми неусувними відмовами. Вихідними даними при цьому є інформація про відмови протягом деякого часу експлуатації.

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

Мета

За основну мету дослідження ми ставимо покращення системи утримування ТЕД ЕД–118А за рахунок прогнозування ресурсу корпусної ізоляції та визначення моментів її відновлення, із забезпеченням найменших питомих витрат на ПР–3 та КР–1, з урахуванням ступеня відновлення, використання даних про стан ізоляції за методом зворотної напруги [12] в процесі експлуатації.

Методика

Одним з ефективних неруйнівних методів контролю стану корпусної ізоляції ТЕД є метод, заснований на використанні явища абсорбції. Відомо, що про стан ізоляції та ступінь її старіння судять за струмом абсорбції. Контроль заряду абсорбції за струмом не дуже зручний, оскільки струм абсорбції малий, через що створюється довокількома промисловими перешкодами. Тому на практиці застосовують метод вимірювання напруги саморозряду та зворотної напруги.

За вимірними значеннями напруги саморозряду та зворотної напруги можна судити про стан корпусної ізоляції безпосередньо. За рахунок різної поляризації шарів від джерела напруги до ізоляції протягом нетривалого часу протікає струм абсорбції. За рахунок струму абсорбції на границі розділу шарів накопичується об'ємний заряд внутрішнього поглинання (заряд абсорбції). Про процес абсорбції можна судити не тільки за струмом абсорбції, але й за накопиченим (поглиненим) зарядом абсорбції, який утворює зворотну напругу.

Дослідження, у якому спостерігається зворотна напруга, полягає в тому, що неоднорідна ізоляція заряджається протягом деякого часу за постійної (номінальної) напруги U_0 , щоб у ній накопичився заряд абсорбції. Потім ізоляція відключається від джерела постійної напруги, і її електроди (провід та «корпус») коротко замикаються на малий проміжок часу Δt , після чого знову розмикаються. За час Δt геометрична ємність ізоляції повністю розряджається, а заряд абсорбції, накопичений на границі шарів, залишається практично незмінним. Цей

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

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 й називають зворотною напругою U_{ret} . У [11] наведено пристрій, що дозволяє виміряти зворотну напругу ТЕД.

За оцінку стану корпусної ізоляції ТЕД ЕД–118А в роботі використано дані 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 :

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

та інтегральним показником [11]

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

де l – пробіг локомотива, за якого виконують 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 $A(l)$ виконано приладом [11]. Спостереження проведено для групи ТЕД, що встановлені на тепловозах серії 2ТЕ–116 депо «М» РФ «Придніпровська залізниця» за різних значень пробігу l (напрацювання).

Заміри зворотної напруги $U_{ret}(t)$ та відповідної величини інтегральної оцінки (2) проведено для ТЕД, що проходили капітальний ремонт КР–1 на локомотиворемонтному заводі «Завод 1», електровозоремонтному заводі «Завод 2» та електромеханічному ремонтному заводі «За-

вод 3». Залежність значень інтегральної оцінки $A(l)$ для одного ТЕД від пробігу наведено на рис. 1.

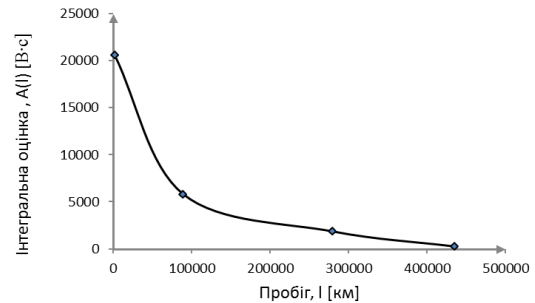


Рис. 1. Залежність значень інтегральної оцінки $A(l)$ від пробігу для одного ТЕД

Fig. 1. Dependence of values of integral estimate $A(l)$ on mileage for one TM

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 виразами:

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

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

у яких параметри a і b визначають із задачі апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів.

Стан корпусної ізоляції під час проведення її діагностування методом зворотної напруги можна характеризувати як максимальним значенням зворотної напруги $U_{ret}^{max}(l)$, так і 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 під час проведення капітального ремонту КР–1 та КР–2.

Якщо відновлення властивостей ізоляції буде здійснюватися після КР–2 або нова під час виконання ПР–3 коли ізоляція з періодом відновлення τ , то інтегральну оцінку $A(l)$, з ураху-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ванням ступеня відновлення корпусної ізоляції, будемо описувати функціональною залежністю у вигляді [2]:

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

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.

Надалі вважатимемо, 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 визначено з розв’язання задачі апроксимації за даними спостережень величин інтегральних оцінок $A(l)$. У звичайній ситуації і в проведених експериментах справжнє значення величин $A(0)$ після відновлення КР–2 для ТЕД невідоме.

У 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 одне відновлення для певного заводу.

Таблиця 1

Початкові дані: параметри залежності інтегральної оцінки $A(l)$ та витрати коштів на відновлення за ПР–3, КР–1

Table 1

Initial data: dependence parameters of the of the integral estimate $A(l)$ and the cost of restoration for PR-3, MjR-1

Завод	$A(0)$, В·с	γ	b	g	$C_{ПР3}$, грн	$C_{КР1}$, 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

Первинно величину L_{ren1}^* напрацювання до КР–1 визначимо з розв’язання рівняння

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

відносно L_{ren1}^* . У рівнянні (6) величина A_{min2} є значенням інтегральної оцінки A , що відповідає обмеженню знизу для значень зворотної напруги U_{ret}^{max} . Остаточну величину напрацювання до КР–1 визначимо так:

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

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

Значення $L_{ren1} = L_{ren1}^*$ беремо, коли різниця $\theta = L_{ren1}^* - (n+1) \cdot \tau$ становить величину, близьку до τ . Термін «близька» не означає «приблизно дорівнює» і залежить більше від людського фактора. Задачу про прийняття рішення, що стосується вибору значення L_{ren1} , у статті не розглядаємо. Інакше кажучи, якщо величина пробігу θ економічно вигідна після проведення

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

останнього ПР–3, тоді $L_{ren1} = L_{ren1}^*$, в іншому випадку в момент напрацювання, що відповідає останньому ПР–3, буде здійснено КР–1, і тоді $L_{ren1} = (n+1) \cdot \tau$.

Моделювання моментів відновлення до КР–2 відбувається з урахуванням отриманих результатів моделювання відновлення до КР–1. Первинно величину напрацювання до КР–2 L_{ren2}^* визначаємо з рівняння

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

відносно L_{ren2}^* . У рівнянні (8) m – кількість відновлень ПР–3 від моменту КР–1 до КР–2; Δl – прирощення за пробігом відповідно до рівня відновлення під час виконання КР–1 (залежить від коефіцієнта відновлення ізоляції g). Величину Δl визначаємо з розв'язання рівняння

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

відносно Δl . Остаточну величину напрацювання до КР–2 визначається так:

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

Вираз (10) аналогічний виразу (7). Розглянемо різницю $\delta = L_{ren2}^* - L_{ren1} - (m+1) \cdot \tau$. У випадку, якщо величина пробігу δ економічно вигідна після проведення останнього ПР–3 після КР–1, то $L_{ren2} = L_{ren2}^*$, в іншому випадку в момент напрацювання, що відповідає останньому ПР–3, буде здійснено КР–2 і

$$L_{ren2} = L_{ren1} + (m+1) \cdot \tau. \quad (10')$$

Результати

За фіксованої періодичності, коли $\tau = 180\,000$ км [7], та з урахуванням обмеження на зворотну напругу значення можливого пробігу L_{ren2} (напрацювання до КР–2) по заводах наведено в табл. 2.

Під час моделювання моментів відновлення (табл. 2) вводиться обмеження знизу у вигляді зони (A_{min1}, A_{min2}), що є обмеженням значень

інтегрального показника якості ізоляції в розрахунках. Величина $A_{min1} = 950$ [В·с] відповідає величині зворотної напруги в 30 В, а величина $A_{min2} = 750$ [В·с] – величині в 25 В. Величини A_{min1}, A_{min2} було обрано з урахуванням досвіду експлуатації, безпеки руху й досліджень [11].

Як бачимо з розрахунків (табл. 2), за однакових представлених періодів відновлення τ й кількості відновлень, на якість корпусної ізоляції впливає й обрана технологія відновлення. Перед замовником (депо) постає задача про прийняття рішення щодо вибору виконавця для проведення відновлювальних робіт. Результати моделювання (послідовність відновлень та прогнозування ресурсу), що відповідають табл. 2, подано на рис. 2–4.

Таблиця 2

Прогнозування напрацювання відновлення до КР–1 та до КР–2 заводах за періодичності відновлення $\tau = 180\,000$ км (за Правилами [7])

Table 2

Forecasting the work to restoration to OR-1 and OR-2 factories with the frequency of restoration $\tau = 180\,000$ km (according to the Rules [7])

Завод відновлення ізоляції	Напрацювання до КР–1 L_{ren1} , км	Напрацювання до КР–2 L_{ren2} , км	Витрати коштів $C_{прз}(n,m) + C_{кр1}$, грн	Питомі витрати, коп/км
«1»	513 715	988 164	38 728	3,91
«2»	540 000	1 080 000	40 115	3,71
«3»	540 000	1 052 015	43 050	4,09

На рис. 3 й 4 зображено функцію відновлень-зносу корпусної ізоляції. Функція відновлень-зносу є залежністю інтегрального показника стану ізоляції від напрацювання. У точках, що відповідають моментам відновлення, функція має розриви першого роду. Коридор із прямих ліній відповідає прийнятому обмеженню в задачі оптимізації на величину зворотної напруги відповідно 25 і 30 В.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

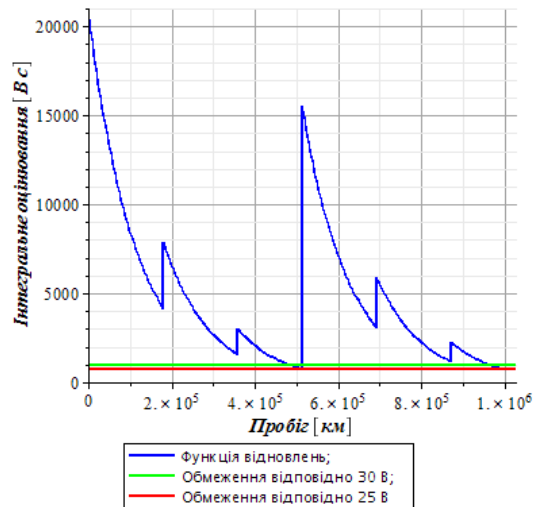


Рис. 2. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [7], технологія відновлення – «Завод 1». Моменти відновлення, км: 180 000 – ПР-3; 360 000 – ПР-3; 513 715 – КР-1; 693 715 – ПР-3; 873 715 – ПР-3; 988 164 – КР-2

Fig. 2. Forecasting the service life and moments of restoration to MjR-2 according to the Rules [7], restoration technology – «Factory 1». Moments of recovery, km: 180 000 – PR-3; 360 000 – PR-3; 513 715 – MjR-1; 693 715 – PR-3; 873 715 – PR-3; 988 164 – MjR-2

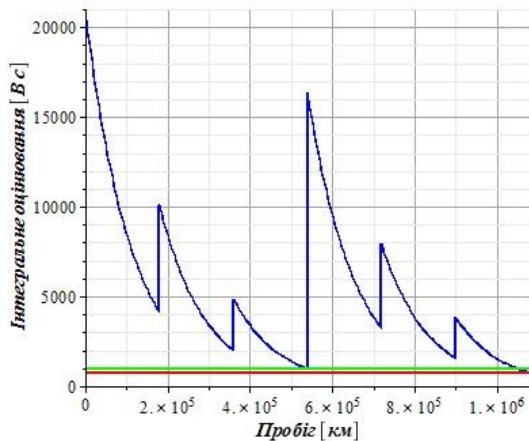


Рис. 3. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [7], технологія відновлення – «Завод 2». Моменти відновлення, км: 180 000 – ПР-3; 360 000 – ПР-3; 540 000 – КР-1; 720 000 – ПР-3; 900 000 – ПР-3; 1 080 000 – КР-2

Fig. 3. Forecasting the service life and moments of restoration to MjR-2 according to the Rules [7], restoration technology – «Factory 1». Moments of recovery, km: 180 000 – PR-3; 360 000 – PR-3; 540 000 – MjR-1; 720 000 – PR-3; 900 000 – PR-3; 1 080 000 – MjR-2

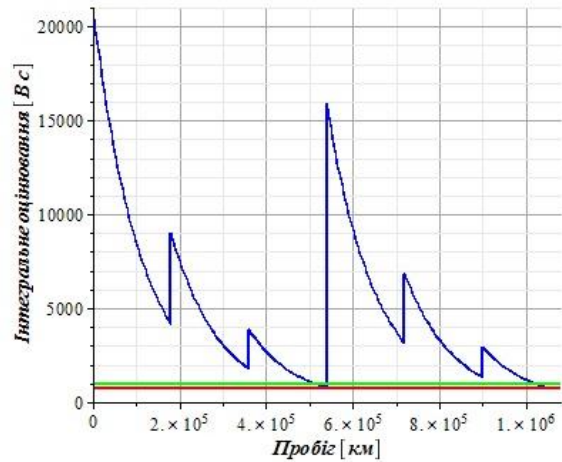


Рис. 4. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [7], технологія відновлення – «Завод 3». Моменти відновлення, км: 180 000 – ПР-3; 360 000 – ПР-3; 540 000 – КР-1; 720 000 – ПР-3; 900 000 – ПР-3; 1 052 015 – КР-2

Fig. 4. Forecasting the service life and moments of restoration to MjR-2 according to the Rules [7], restoration technology – «Factory 3». Moments of recovery, km: 180 000 – PR-3; 360 000 – PR-3; 540 000 – MjR-1; 720 000 – PR-3; 900 000 – PR-3; 1 052 015 – MjR-2

Рішення щодо вибору моментів відновлення корпусної ізоляції й 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

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

за обмеження:

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

де $C(\tau, n, m)$ – сума витрат на виконання відновлень усіх 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} – мініма-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

льно допустимий пробіг (напрацювання) ТЕД, беремо відповідно до [7] як величину 990 000 км.

Функція цілі $C(\tau, n, m)$ є сумою витрат на всі визначені під час моделювання 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.

У задачі взято: $M = \{1, 2, 3, 4, 5\}$; $T = \{\tau_i\}, i = \overline{1, K}$ – дискретна безліч періодів відновлення, τ_i – періоди відновлення ізоляції, що задаються наперед під час розв’язання задачі. Розв’язання задачі значно спрощується тим, що оптимізацію виконують на рахункових, обмежених безлічах T і M . Дискретна безліч періодів відновлення вибрана тому, що функція цілі $C(\tau, n, m)$ не є безперервною функцією, що ускладнює використання методів типу градієнтних під час розв’язання поставленої оптимізаційної задачі. Значення періодів відновлення τ_i для різних ремонтних заводів відрізняються.

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

Отримано такий результат із мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР–3 $(n+m) = (1+1)$; напрацювання до КР–2 $L_{ren2} = 990\,430$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m) = 25\,688$ грн; найменші питомі витрати склали 2,59 коп/км; період відновлення $\tau = 360\,000$ км. Моменти відновлення, км: 360 000 – ПР–3; 513 715 – КР–1; 873 715 – ПР–3.

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

Отримано такий результат із мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР–3 $(n+m) = (1+1)$; напрацювання до КР–2 $L_{ren2} = 1\,108\,430$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m) = 25\,688$ грн; найменші питомі

витрати склали 2,32 коп/км; період відновлення $\tau = 360\,000$ км. Моменти відновлення, км: 360 000 – ПР–3; 542 515 – КР–1; 902 515 – ПР–3.

Оптимізацію питомих витрат із прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 3» проведено 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 $L_{ren2} = 1\,049\,730$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m) = 25\,688$ грн; найменші питомі витрати склали 2,45 коп/км; період відновлення $\tau = 360\,000$ км. Моменти відновлення, км:

360 000 – ПР–3; 567 715 – КР–1; 927 715 – ПР–3;

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

Порівнюючи, відповідно до поставленої задачі оптимізації, величини питомих витрат на відновлення, можна побачити певну тенденцію. На величини питомих витрат впливає технологія відновлення, прийнята на відповідному заводі, де відбувається відновлення. Як видно з табл. 3, найкращу технологію відновлення має «Завод 2».

Таблиця 3

Зведена таблиця аналізу оптимальних варіантів технологій відновлення корпусної ізоляції по заводах

Table 3

Summary table of analysis of optimal variants of restoration technologies of case isolation on factories

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»	360 000	1+1	990 430	2,59
«2»	360 000	1+1	1 108 430	2,32
«3»	360 000	1+1	1 049 730	2,45

Наукова новизна та практична значимість

Процедура оптимізації враховує ступінь відновлення ізоляції під час виконання ПР–3 та КР–1. Моделювання ресурсу ізоляції й періоду відновлення ПР–3 засновано на даних вимірів зворотної напруги корпусної ізоляції залежно від пробігу. Максимальне значення зворотної напруги та значення введеної інтегральної оцінки можуть бути використані як показники, що характеризують стан корпусної ізоляції ТЕД.

Величини інтегрального показника $A(l)$ зміни зворотної напруги корпусної ізоляції в поточній процедурі вимірювання, де l – пробіг локомотива, за якого виконують діагностування ТЕД, можуть бути використані для прогнозування ресурсу та моделювання моментів відновлення ізоляції, як і величини зворотної напруги $U_{ret}^{max}(l)$ – максимальне значення зворотної напруги в поточній процедурі вимірювання відповідно до пробігу локомотива l .

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 здійснено без урахування впливів випадкових відмов ізоляції. За статистичними даними та обраним методом прогнозування ресурсу визначено, що найкращу технологію відновлення має «Завод 2». Отримані результати прийнятні до конкретних умов експлуатації. Важливо дотримуватися припущення, що умови експлуатації ТЕД не змінювалися зі зміною напрацювання. Останнє означає, що вагові норми, полігон обороту й організація руху за період спостереження та збору інформації не змінювалися.

Під час застосування описаного методу прогнозування ресурсу корпусної ізоляції необхідна велика кількість даних про стан корпусної ізоляції ТЕД, який експлуатується тривалий час. Крім того, час, протягом якого виконують оцінку стану ізоляції двигуна, досить значний.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Черняєв Д. В., Шевченко І. Я. Діагностування тягових електродвигунів за нерівномірністю обертання якоря. *Наука та прогрес транспорту*, 2013. № 3 (45). С. 13–21.
2. Босов А. А., Лоза П. А. *Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог* : монография. Днепропетровск : Дриант, 2015. 252 с.
3. Гиоев З. Г. *Основы виброакустической диагностики тяговых приводов локомотивов*: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов-на Дону, 1998. 367 с.
4. Касаткин Г. С., Федотов В. В. *Контроль изоляции электро-технических устройств* : учебное пособие. Москва : МИИТ, 2009. 56 с.
5. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу на 2008–2020 роки. URL: <http://pravda.tis.ua/pravda/?p=2200> (дата звернення 16.03.2020).
6. Лагута В. В., Сердюк Т. Н. Моделирование эффективной системы диагностирования тягового электродвигателя с учетом выбора вариантов комплектации его элементов. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2017. № 13. С. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2017/110769>
7. *Правила ремонту электрических машин тепловозів* : № ЦТ-0064 : затв. наказ Укрзалізниці від 23.02.03 р. № 53-Ц. Київ, ТОВ Видавничий дім «САМ», 2003. 148 с.
8. Серебряков А. С. *Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы* : учебное пособие для вузов ж. д. транспорта. Москва : Маршрут, 2005. 280 с.
9. Barré O., Napame B. The Insulation for Machines Having a High Lifespan Expectancy, Design, Tests and Acceptance Criteria Issues. *Machines*. 2017. Vol. 5. Iss. 1. P. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines5010007>

10. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Hryshechkina T. S., Bodnar E. B. Choosing the system of locomotive maintenance in view of the effect of dependent failures. *Science and Transport Progress*. 2018. № 6 (78). P. 47–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154823>
11. Kapitsa M., Laguta V., Kozik Y. Selecting the Parameters of The Diagnosis of Frame Insulation Condition in Electrical Machines of Locomotives. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4. 3. P. 110–114. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19718>
12. Nefedov R., Loginov E. Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation. *ITM Web of Conferences*. 2018. Vol. 18. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20181801006>
13. Ochkasov O., Shvets O., Cerniauskaite L. Usage of intelligent technologies in choosing the strategy of technical maintenance of locomotives. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*. 2017. № 8. P. 68–71.
14. Serdiuk T., Feliziani M., Serdiuk K. About electromagnetic compatibility of track circuits with the traction supply system of railway. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. 2018. P. 242–247. DOI: <https://doi.org/10.1109/emceurope.2018.8485034>

В. В. ЛАГУТА^{1*}, Ю. Г. КОЗИК^{2*}

^{1*}Каф. «Автоматика и телекоммуникации», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта vasilij.laguta@gmail.com, ORCID 0000-0002-4957-9178

^{2*}ООО «Прикладные железнодорожные технологии», ул. Адам-Кляйн-штрассе, 26, Нюрнберг, Германия, 90429, тел. +49 (176) 782 01 735, эл. почта kozik_yuriy@yahoo.com, ORCID 0000-0002-5212-2953

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЭД ЭД-118А ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ВОЗВРАТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель. В качестве основной цели исследования мы ставим улучшение системы содержания тягового электродвигателя (ТЭД) ЭД–118А за счет прогнозирования ресурса корпусной изоляции и определения моментов ее восстановления, с обеспечением наименьших удельных затрат на ТР–3 и КР–1, с учетом степени восстановления, использованных данных о состоянии изоляции в соответствии с методом возвратного напряжения в процессе эксплуатации. **Методика.** Задача по определению ресурса корпусной изоляции и соответствующих моментов ее восстановления для тягового электродвигателя сформулирована как задача оптимизации. Критерием в задаче служит минимум суммарных удельных затрат на выполнение ТР–3 и КР–1 на протяжении периода от последнего проведения КР–2 до следующего КР–2. **Результаты.** Максимальное значение возвратного напряжения и значение введенной интегральной оценки кривой возвратного напряжения являются показателями, которые могут характеризовать состояние корпусной изоляции ТЭД. В качестве показателя состояния изоляции принята интегральная оценка, которая строится по замерам возвратного напряжения. Заводы, осуществляющие ремонт корпусной изоляции, имеют разное качество ее восстановления, что влияет на удельные затраты восстановления и ресурс изоляции. **Научная новизна.** Процедура оптимизации учитывает степень восстановления изоляции при выполнении ТР–3 и КР–1. Моделирование ресурса изоляции и периода восстановления ТР–3 основано на данных измерений возвратного напряжения корпусной изоляции в зависимости от пробега. **Практическая значимость.** Величины интегрального показателя изменения возвратного напряжения корпусной изоляции в текущей процедуре измерения, при котором выполняют диагностирование ТЭД, могут быть использованы для прогнозирования ресурса и моделирования моментов восстановления изоляции, как и максимальные значения возвратного напряжения в текущей процедуре измерения в соответствии с пробегом локомотива.

Ключевые слова: корпусная изоляция; возвратное напряжение; контроль состояния изоляции; система содержания тягового электродвигателя

V. V. LAGUTA^{1*}, Y. H. KOZIK^{2*}

^{1*}Dep. «Automation and Telecommunications», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 373 15 04, e-mail vasilij.laguta@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{2*}LLC «Applied Railway Technologies», Adam-Klein St., 26, Nürnberg D-90429, Germany, tel. +49 (176) 782 01 735, e-mail kozik_yuriy@yahoo.com, ORCID 0000-0002-5212-2953

DETERMINATION OF A RESTORATION PERIODS OF A FRAME INSULATION OF TM ED-118A BY RECOVERY VOLTAGE OBSERVATIONS

Purpose. The aim of the research is to improve the maintenance system of a traction motor (TM) ED-118A by predicting the life of a frame insulation and determining recovery moments while ensuring the lowest unit costs for performing a major repairs of a volume 1 (MjR-1) and permanent repair of a volume 3 (PR-3), taking into account the degree of recovery, using data on the insulation state by the recovery voltage method in the operation process. **Methodology.** The problem of determining the service life of the frame insulation and the corresponding moments of its recovery for the traction motor is formulated as an optimization problem. The criterion in the task is the minimum of the total unit costs for the implementation of PR-3 and MjR-1 during the period from the last MjR-2 (a major repairs of a volume 2) to the next MjR-2. **Findings.** The maximum value of the recovery voltage and the value of the integral estimate introduced are indicators characterizing the state of the frame insulation of the TM. As an indicator of the insulation state, an integral estimate is adopted, which is constructed by measuring the recovery voltage. Factories carrying out repairs of frame insulation have different quality of its restoration, which affects the unit cost of restoration and insulation service life. **Originality.** The optimization procedure takes into account the degree of insulation recovery when performing PR-3 and performing MjR-1. Modeling of the insulation service life and the recovery period of the PR-3 is based on measurements of the recovery voltage of the casing insulation, depending on the mileage. **Practical value.** The values of the integral indicator considered in the problem, changes in the recovery voltage of the casing insulation in the current measurement procedure, at which MT diagnostics are performed, can be used to predict the service life and simulate the moments of insulation recovery, as well as the maximum values of the recovery voltage in the current measurement procedure in accordance with mileage of a locomotive.

Keywords: frame insulation; return voltage; insulation state control; traction motor maintenance system

REFERENCES

1. Bodnar, B. Ye., Ochkasov, A. B., Chernyayev, D. V., & Shevchenko, Ya. I. (2013). Diagnosis of traction electric motor at irregularity in speed of anchor rotation. *Science and Transport Progress*, 3(45), 13-21. (in Ukrainian)
2. Bosov, A. A., & Loza, P. A. (2015). *Teoriticheskie osnovy ratsionalnogo sodержaniya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Driant. (in Russian)
3. Gioev, Z. G. (1998). *Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki tyagovykh privodov lokomotivov*. (Dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk). Rostov-on-Don. (in Russian)
4. Kasatkin, G. S., & Fedotov, V. V. (2009). *Kontrol izolyatsii elektro-tekhnicheskikh ustroystv: uchebnoe posobie*. Moscow: MIIT (in Russian)
5. Kompleksna prohrama onovlennja zaliznychnogho rukhomogho skladu na 2008-2020 roky. Retrieved from <http://pravda.tis.ua/pravda/?p=2200> (in Russian)
6. Laguta, V. V., & Serdyuk, T. N. (2017). *Modeling an effective system for diagnosing a traction motor with accounting for selection of its elements assembly options*. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 13, 52-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/tsst2017/110769> (in Russian)
7. *Pravyla remontu elektrychnykh mashyn teplovoziv*. (2003). TsT-0064: nakaz Ukrzaliznytsi No 53-Ts. Kiev, TOV Vydavnychj dim «SAM». (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Serebryakov, A. S. (2005). *Elektrotekhnicheskoe materialovedenie. Elektroizolyatsionnye materialy: uchebnoe posobie dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta*. Moscow: Marshrut.
9. Barré, O., & Napame, B. (2017). The Insulation for Machines Having a High Lifespan Expectancy, Design, Tests and Acceptance Criteria Issues. *Machines*, 5(1), 1-34. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines5010007> (in English)
10. Bodnar, V. E., Ochkasov, O. B., Hryshechka, T. S., & Bodnar, E. B. (2018). Choosing the system of locomotive maintenance in view of the effect of dependent failures. *Science and Transport Progress*, 6(78), 47-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154823> (in English)
11. Kapitsa, M., Laguta, V., & Kozik, Y. (2018). Selecting the Parameters of the Diagnosis of Frame Insulation Condition in Electrical Machines of Locomotives. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 110-114. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19718> (in English)
12. Nefedov, R., & Loginova, E. (2018). Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation. *ITM Web of Conferences*, 18, 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20181801006> (in English)
13. Ochkasov, O., Shvets, O., & Cerniauskaite, L. (2017). Usage of intelligent technologies in choosing the strategy of technical maintenance of locomotives. *Technologijos ir Menas=Technology and Art*, 8, 68-71. (in English)
14. Serdiuk, T., Feliziani, M., & Serdiuk, K. (2018). About Electromagnetic Compatibility of Track Circuits with the Traction Supply System of Railway. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/emceurope.2018.8485034> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.01.2020

Прийнята до друку: 01.06.2020