

УДК: 629.4.083

**Ю. Г. Козік**

*(інженер, керівник технічних проєктів, ТзОВ «Прикладні залізничні технології»)*

## **ОПТИМАЛЬНЕ ЗА ПИТОМИМИ ВИТРАТАМИ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ**

*Розглядається задача про визначення ресурсу корпусної ізоляції і відповідних моментів її відновлення для тягового електродвигуна ЕД-118А. Критерієм в задачі служить мінімум сумарних питомих витрат на виконання ПР-3 і КР-1 протягом періоду від останнього проведення КР-2 до наступного КР-2. Враховується ступінь відновлення ізоляції. Моделювання ресурсу ізоляції і періодів відновлення ПР-3 засновано на даних вимірів зворотної напруги в залежності від пробігу.*

**Ключові слова:** корпусна ізоляція, зворотна напруга, контроль стану ізоляції, система утримування тягового електродвигуна.

**Вступ.** 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 відповідності 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].

**Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.** Засоби і методи сучасного технічного обслуговування в змозі запобігти раптовому ушкодженню ізоляції тягового електродвигуна (ТЕД). Планування технічного обслуговування має життєво важливе значення для безпеки руху поїздів.

Робота [2] 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 [2, с. 54] дається таке визначення загальної задачі раціонального

**DOI: 10.32703/2617-9040-2019-34-1-3**

утримування технічних об'єктів: «необхідно визначити таку систему планових відновлень, щоб витрати коштів на проведення планових і аварійних відновлень були б мінімальними, а час перебування технічного об'єкта у всіх видах планових і аварійних відновлень не перебільшував наперед заданої величини». В роботі [2, с. 70-81] приводиться математична постановка задачі визначення раціональної системи утримування. В даній роботі використовується термін «раціональна» замість «оптимальна», розуміючи, що моделі, які використовуються при описі процесів відновлення, не можуть відображати усього різноманіття реальних ситуацій. Термін «оптимальна» використовується для характеристики розв'язання математичних задач.

Основними стратегіями профілактичного обслуговування ТЕД є: регламентне обслуговування (РО) і технічне обслуговування засноване на умовах експлуатації (ОУЕ) [3]. РО є основним методом обслуговування ізоляції. За РО обслуговування планується на основі заздалегідь певного вікового порога. Це, в свою чергу, має недоліки, такі як надмірне або недостатнє технічне обслуговування [4, 5].

Спираючись на статистичну обробку даних про відмови ізоляції, деякі дослідники намагалися встановити спільні оптимальні моделі РО і ОУЕ [6]. Такі моделі сьогодні є інноваційними, максимально використовують інформацію про «життєвий цикл» ізоляції і інформацію про її стан. Автори [7, 8], використовуючи авторегресію, запропонували модель для опису процесу деградації ізоляції. Автори [9] створили модель обслуговування ізоляції як системи з поступовими відмовами з урахуванням ефекту електричного ураження, в основу поклавши марковський процес. Деякі дослідники вдосконалили модель оптимального обслуговування «деградація-порог-удар», яка інтегрувала процес деградації ізоляції і ефекти руйнації, спираючись на стохастичні методи [10-13]. Як стверджують автори, інтегрована модель РО і ОУЕ остаточно не розроблена і визначення її є важливим завданням для дослідників.

У статті [14] аналізується надійність роботи тягових електродвигунів. Показано, що найбільшу кількість відмов припадає на ізоляцію обмотки якоря. Дослідження причин зносу ізоляції обмотки якоря проводилося з використанням динамічної теплової моделі електродвигуна. Перевірка моделі проводилася шляхом порівняння з результатами теплових випробувань електродвигунів серій НБ-406 і ЕД-118. В роботі показано, що ресурс електродвигуна в основному визначається зносом ізоляції.

Стаття [15] присвячена оптимальній стратегії обслуговування заснованій на умовах експлуатації ізоляції. Об'єднавши інформацію що отримана з періодичних перевірок з інформацією про стан ізоляції протягом експлуатації, в [15] запропонована комплексна математична модель технічного обслуговування. Запропоновано також модель, що заснована на пуассонівському потоці відмов (пробою) ізоляції. Вдосконалення систем утримування ТЕД, в тому числі і корпусної ізоляції, з необхідністю призводить до відповідних розробок пристроїв і систем діагностування, [16-18].

Як висновок може бути корисною публікація [19], 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.

На сьогоднішній день РО залишається основною політикою в обслуговуванні ізоляції, яка передбачає періодичне оцінювання стану ефективності ізоляції, визначає заходи щодо профілактичного обслуговування, ініціалізує перевищення критичного віку або перевищення заданого порогу огляду. Оптимізаційні моделі РО орієнтовані на мінімізацію витрат на обслуговування за одиницю часу, враховуючи інтервали перевірки і критичний вік.

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 і завдання 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 [18] в процесі експлуатації.

Задачі дослідження:

- дослідження залежності максимального значення зворотної напруги від інтегрального показника [18] якості стану корпусної ізоляції;
- розробка математичної моделі побудови моментів відновлення корпусної ізоляції в об'ємі ПР-3 та КР-1 з урахуванням ступені відновлення та інтегрального показника якості стану корпусної ізоляції;
- прогнозування ресурсу корпусної ізоляції за математичною моделлю.

**Матеріали та методи дослідження.** 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 нетривалого 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  $\Delta t$ , після чого знову розмикаються. За час  $\Delta t$  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  $U_{ret}$  [20]. В [18] наводиться пристрій, що дозволяє виміряти зворотну напругу ТЕД. На рис. 1 наведено приклад кривих зворотної напруги, що характеризують різні стани корпусної ізоляції ТЕД. За значенням і формою зворотної напруги можна судити про стан ізоляції.

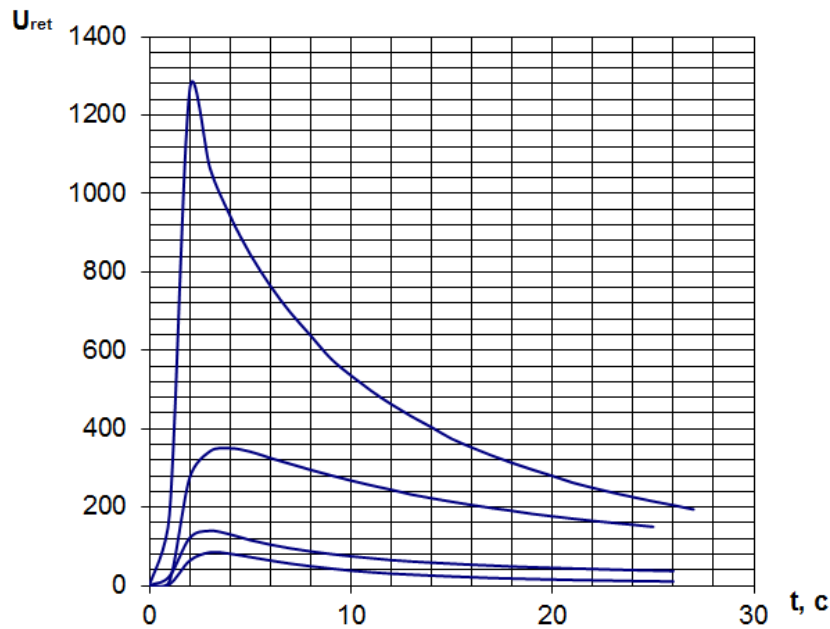


Рис. 1. Приклади вимірювань зворотної напруги.  $U_{ret}$  – зворотна напруга у вольтах,  $t$  – час в секундах. Верхня крива відповідає найкращому стану ізоляції, нижня – найгіршому стану

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 [18]

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

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 [9]. 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  $U_{ret}^{max}(l)$  для одного ТЕД від інтегральної оцінки  $A(l)$  приведено на рис. 2. Залежність значень інтегральної оцінки  $A(l)$  для одного ТЕД від пробігу приведено на рис. 3.

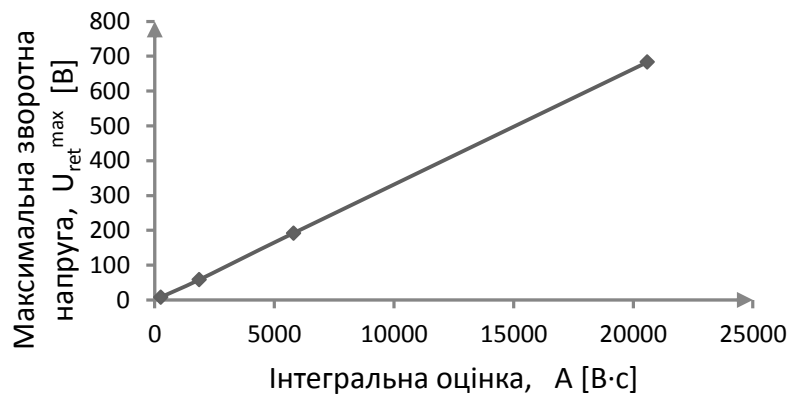


Рис. 2. Залежність значень вимірів  $U_{ret}^{max}(l)$  від інтегральної оцінки  $A(l)$  для одного ТЕД

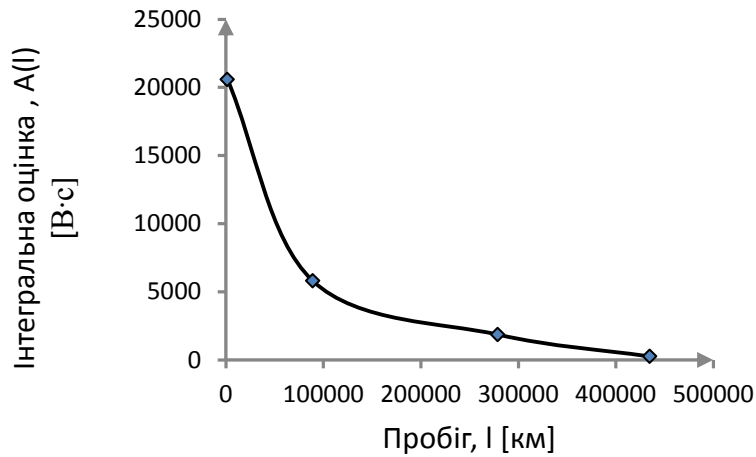


Рис. 3. Залежність значень інтегральної оцінки  $A(l)$  від пробігу для одного ТЕД

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 аналогічно [21]

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

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

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

Перевірка адекватності лінійної залежності між максимальними значеннями вимірів зворотної напруги  $U_{ret}^{\max}(l)$  від інтегральної оцінки  $A(l)$  за даними спостережень виконувалась за критерієм Колмогорова-Смірнова при рівні значущості 0.05. Критерій нормальності Колмогорова-Смірнова володіє достатньою чутливістю навіть при малому числі вибірки. З цього факту слідує що 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  $\tau$ , то

інтегральна оцінка  $A(l)$ , з урахуванням ступеня відновлення корпусної ізоляції, буде описуватися 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 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  $A(l)$ . 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 одне 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  $U_{ret}^{max}$ . Остаточна величина напрацювання до КР-1 визначається як

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

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

Значення  $L_{ren1} = L_{ren1}^*$  приймається коли різниця  $\theta = L_{ren1}^* - (n+1) \cdot \tau$  становить величину близьку до  $\tau$ . 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  $\theta$  економічно вигідна після проведення останнього ПР-3, то тоді  $L_{ren1} = L_{ren1}^*$ , в іншому випадку в момент напрацювання що відповідає останньому ПР-3 буде здійснено КР-1 і тоді  $L_{ren1} = (n+1) \cdot \tau$ .

**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]	$\gamma$	$b$	$g$	$C_{ПР3}$ [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

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 ПР-3 від моменту КР-1 до КР-2;  $\Delta l$  – приращення 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  $\Delta l$ . Остаточню величину напрацювання до КР-2 визначається як

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

Вираз (10) аналогічний виразу (7). Розглядається різниця  $\delta = L_{ren2}^* - L_{ren1} - (m+1) \cdot \tau$ . В цьому випадку, якщо величина пробігу  $\delta$



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

При фіксованій періодичності, коли  $\tau=180000$  км, [22], та з врахуванням обмеження на зворотну напругу, значення можливого пробігу  $L_{ren2}$  (напрацювання до КР-2) по заводах наводяться в 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 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 [18].

**Таблиця 2. Прогнозування напрацювання відновлення до КР-1 та до КР-2 по заводах при періодичності відновлення  $\tau = 180000$  км за Правилами [22]**

Завод відновлення ізоляції	Напрацювання до КР-1 $L_{ren1}, [км]$	Напрацювання до КР-2 $L_{ren2}, [км]$	Витрати коштів $C_{ПР3}(n,m) + C_{КР1}$ [грн]	Питомі витрати [коп/км]
«Завод 1»	513715	988164	38728	3,91
«Завод 2»	540000	1080000	40115	3,71
«Завод 3»	540000	1052015	43050	4,09

Як впливає з табл. 2 розрахунків, при однакових представлених періодах відновлення  $\tau$  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. 4-6. 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. На всіх рисунках прогнозування ресурсу корпусної ізоляції функція відновлень-зносу має синій колір, коридор з прямих ліній червоного та зеленого кольору відповідає прийнятому обмеженню в задачі оптимізації на величину зворотної напруги відповідно 25 В і 30 В.

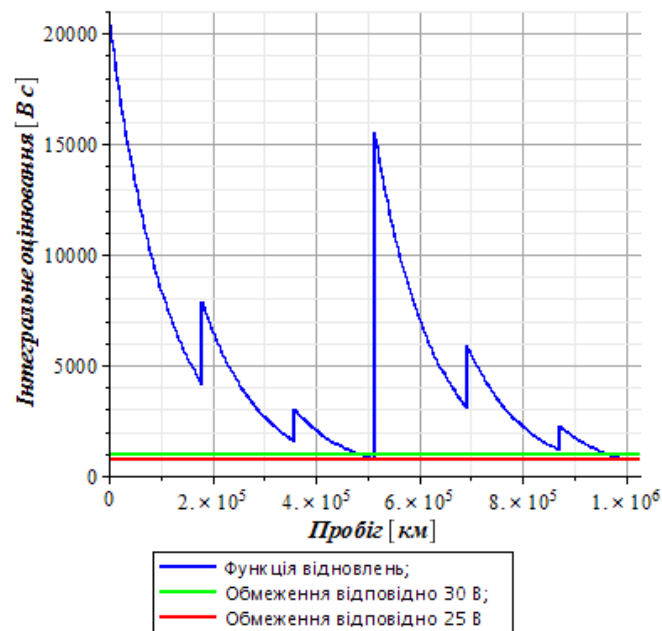


Рис. 4. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [22], технологія відновлення «Завод 1». Моменти відновлення, км: 180000 – ПР-3; 360000 – ПР-3; 513715 – КР-1; 693715 – ПР-3; 873715 – ПР-3; 988164 – КР-2

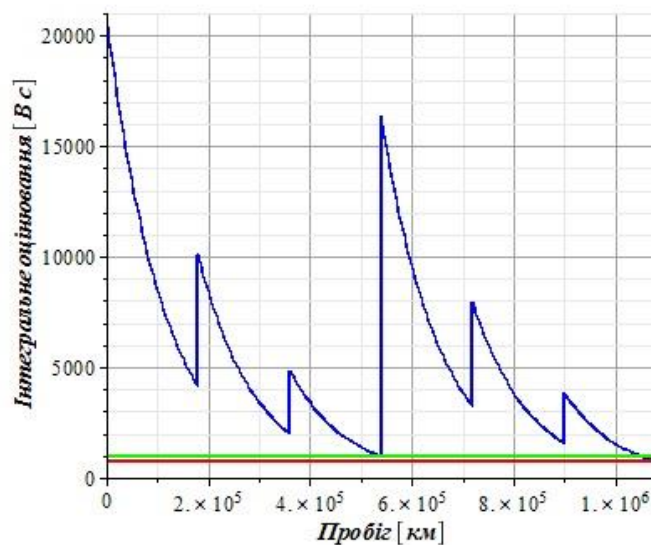
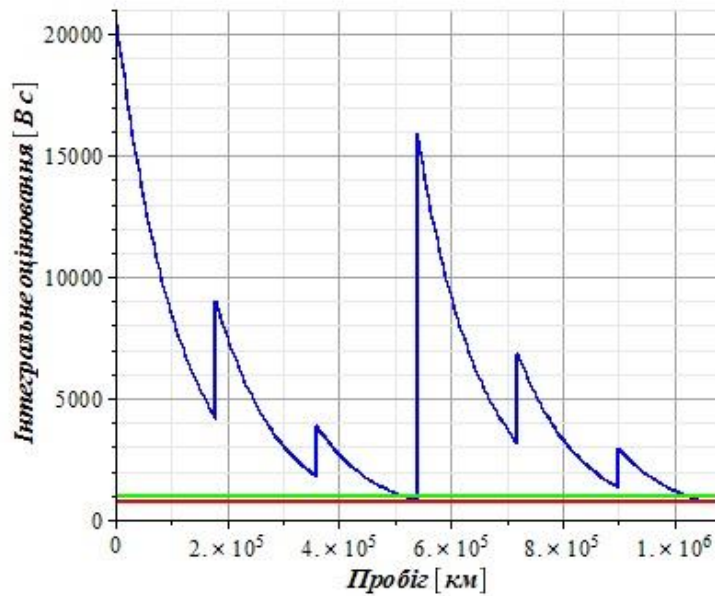


Рис. 5. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [22], технологія відновлення «Завод 2». Моменти відновлення, км: 180000 – ПР-3; 360000 – ПР-3; 540000 – КР-1; 720000 – ПР-3; 900000 – ПР-3; 1080000 – КР-2



**Рис. 6. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [14], 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  $\tau$  – 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 [22] 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,  $\tau_i$  – 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  $\tau_i$  для різних ремонтних заводів відрізняються.

Оптимізація питомих витрат з прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 1» проводилась для безлічі періодів відновлення  $T[\text{км}] = \{180000, 150000, 120000, 250000, 300000, 320000, 350000, 360000\}$ .

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

Оптимізація питомих витрат з прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 2» проводилась для безлічі періодів відновлення  $T[\text{км}] = \{180000, 250000, 150000, 350000, 120000, 300000, 240000, 360000\}$ .

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

Оптимізація питомих витрат з прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 3» проводилась для безлічі періодів відновлення  $T[\text{км}] = \{180000, 150000, 120000, 250000, 240000, 300000, 320000, 360000\}$ .

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

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

Таблиця 3. 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]
«Завод 1»	360000	1+1	990430	2,59
«Завод 2»	360000	1+1	1108430	2,32
«Завод 3»	360000	1+1	1049730	2,45

Порівнюючи, відповідно до поставленої задачі оптимізації, для величин питомих витрат на відновлення можна углядіти наступну тенденцію. На величини питомих витрат впливає технологія відновлення, що прийнята на відповідному заводі де відбувається відновлення. Як видно з табл. 3 найкращу технологією відновлення має «Завод 2». На рис. 7-9 відображено функції відновлень корпусної ізоляції для «Завод 1», «Завод 3», «Завод 2», що відповідають найменшим питомим витратам наданих в табл. 3.

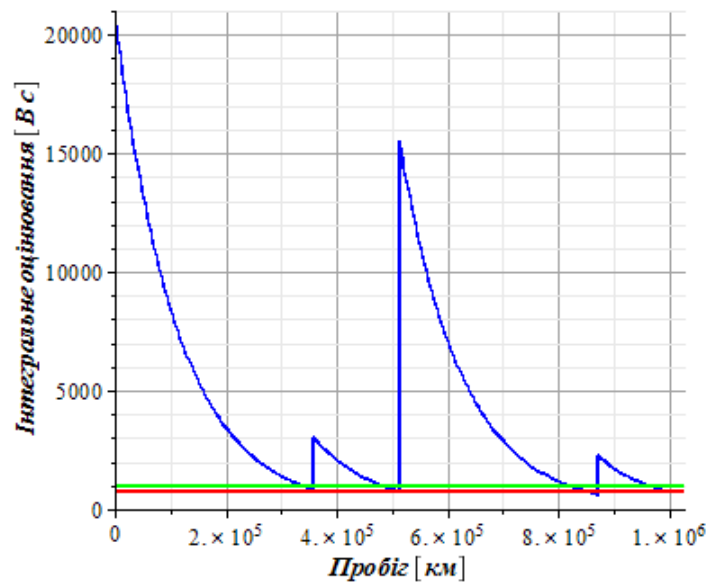


Рис. 7. Оптимальні за питомими витратами моменти відновлень до КР-2. Періодичність,  $\tau=360000$  км, «Завод 1». Моменти відновлення, км: 360000 – ПР-3; 513715 – КР-1; 873715 – ПР-3; 990430 – КР-2 ( $L_{ren2}$ ).

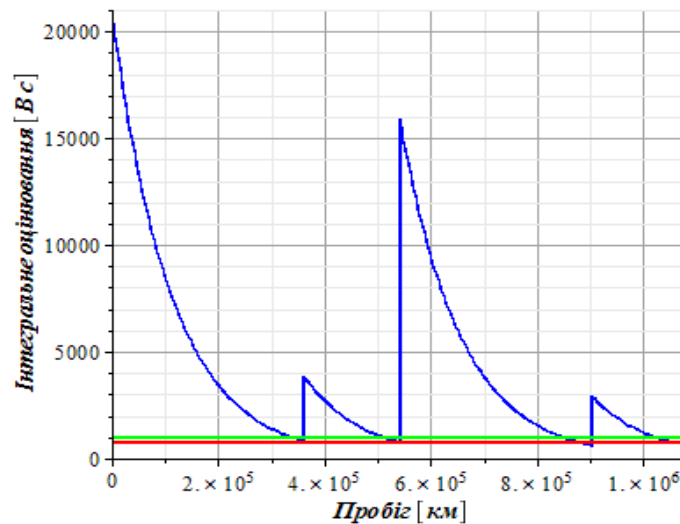


Рис. 8. Оптимальні за питомими витратами моменти відновлень до КР-2.  
Періодичність,  $\tau=360000$  км, «Завод 2». Моменти відновлення, км:  
360000 – ПР-3; 542515 – КР-1; 902515 – ПР-3; 1049730 – КР-2 ( $L_{ren2}$ )

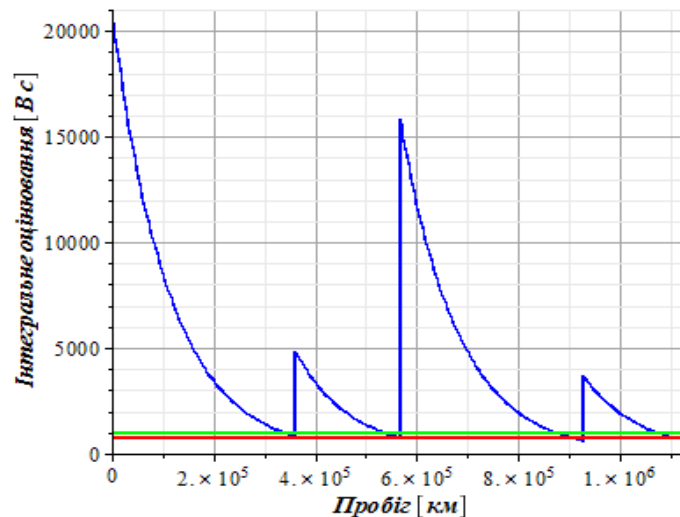


Рис. 9. Оптимальні за питомими витратами моменти відновлень до КР-2.  
Періодичність,  $\tau=360000$  км, «Завод 3». Моменти відновлення, км:  
360000 – ПР-3; 567715 – КР-1; 927715 – ПР-3; 1108430 – КР-2 ( $L_{ren2}$ )

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

**Висновки.** Визначено оптимальне напруження 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 напруження. Останнє означає, що вагові норми, полігон обороту і організація руху за період спостереження і збору інформації не змінювалися.

При застосуванні описаного методу прогнозування ресурсу корпусної ізоляції необхідна велика кількість даних про стан корпусної ізоляції ТЕД, який експлуатується тривалий час. Крім того, час, протягом якого виконується оцінка стану ізоляції двигуна, досить великий.

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

Показники стану ізоляції  $U_{ret}^{max}(l)$  і  $A(l)$ , які отримують при діагностуванні корпусної ізоляції методом зворотної напруги, еквівалентні.

## ЛІТЕРАТУРА

1. В.М. Самсонкін, О.М. Гончаров, С.Г. Грищенко та ін. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008 – 2020 роки. Укрзалізниця. К.:ДП ДНДЦ УЗ, 2009. 300 с.
2. А.А. Босов, П.А. Лоза. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог: Монография. Днепропетровск: Дриант, 2015. 252 с. ISBN 978-966-2394-15-3.
3. Asadzadeh, S.M., Azadeh, A., 2014. An integrated systemic model for optimization of condition-based maintenance with human error. *Reliability Engineering & System Safety*, 124:117-131. [doi:10.1016/j.ress.2013.11.008].
4. Lu, X.F., Liu, M., 2014. Hazard rate function in dynamic environment. *Reliability Engineering & System Safety*, 130:50-60. [doi:10.1016/j.ress.2014.04.020].
5. Shi, H., Zeng, J.C., 2014. Preventive maintenance strategy based on life prediction. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 20(5):1133-1140 (in Chinese).
6. Yin, H., Zhang, G.J., Zhu, H.P., et al., 2015. An integrated model of statistical process control and maintenance based on the delayed monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 33:323-333. [doi:10.1016/j.ress.2014.09.020].
7. Tang, D.Y., Makis, V., Jafari, L., et al., 2015. Optimal maintenance policy and residual life estimation for a slowly degrading system subject to condition monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 134:198-207. [doi:10.1016/j.ress.2014.10.015].
8. Shi, H., Zeng, J.C., 2014. Preventive maintenance strategy based on life prediction. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 20(5):1133-1140 (in Chinese).
9. Montoro-Cazorla, D., Pérez-Ocón, R., 2014. A reliability system under different types of shock governed by a Markovian process and maintenance policy. *European Journal of Operational Research*, 235(3):636-642. [doi:10.1016/j.ejor.2014.01.021].
10. Lin, Y.H., Li, Y.F., Zio, E., 2014. Multi-state physics model for the reliability assessment of a component under degradation processes and random shocks. ESREL, Amsterdam, the Netherlands, p.1-7.

11. Lin, Y.H., Li, Y.F., Zio, E., 2015. Integrating random shocks into multi-state physics models of degradation processes for component reliability assessment. *IEEE Transactions on Reliability*, 64(1):154-166. [doi:10.1109/TR.2014.2354874].
12. Caballé, N.C., Castro, I.T., Pérez, C.J., et al., 2015. A condition-based maintenance of a dependent degradation threshold-shock model in a system with multiple degradation processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 134:98-109. doi:10.1016/j.res.2014.09.024].
13. Castro, I.T., Caballé, N.C., Pérez, N.C., 2015. A condition based maintenance for a system subject to multiple degradation processes and external shocks. *International Journal of Systems Science*, 46(9):1692-1704. [doi:10.1080/00207721.2013.828796].
14. Nefedov, Roman & Loginova, Elena., 2018. Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation. ITM Web of Conferences. 18. 01006. [doi: 10.1051/itmconf/20181801006].
15. 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]
16. М.И. Капица, В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк. Определение системы диагностирования ТЭД с учетом выбора предпочтительных элементов с изменяющейся интенсивностью // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2017. № 4. Харків: Вид-во УкрДУЗТ. С. 9 –15.
17. Serdiuk T., Feliziani M., Serdiuk K., 2018. 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]
18. Michail Kapitsa, Vasily 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.
19. 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>
20. Методи контролю ізоляції по возвратному напругенню і кривой саморазряда. Контроль ізоляції по возвратному напругенню. Режим доступа: <http://prp-toz.pf/tehnika-vyisokih-napryazheniy/126-metody-kontrolya-izolyacii-po-vozvratnomu-napryazheniyu-i-krivoy-samorazryada.html>
21. И. М Меламедов. Физические основы надежности . Л., Энергия , 1970. С. 132-138.
22. Правила ремонту електричних машин тепловозів. № ЦТ-0064: Наказ Укрзалізниці від 23.02.03 р. № 53-Ц. / К., ТОВ Видавничий дім „САМ“, 2003. 148 с.

## REFERENCES

1. Samsonkin, V.M., Honcharov, O.M., Hryshchenko, S.H. ta in. (2009). Kompleksna prohrama ovolennia zaliznychnoho rukhomoho skladu Ukrainy na 2008 – 2020 roky [Comprehensive program of renovation of the railway rolling stock of Ukraine for 2008 - 2020]. Ukrzaliznytsia. – K.:DP DNDTs UZ. – 300 s. [in Russian]
2. Bosov, A. A., Loza, P. A. (2015). Teoretycheskiye osnovy ratsyonalnogo sodержaniya podvyzhnogo sostava zheleznykh dorog [Theoretical bases of rational maintenance of rolling stock of railways]: Monohrafiya. –Dnepropetrovsk: Dryant, – 252 s. ISBN 978-966-2394-15-3. [in Russian]
3. Asadzadeh, S.M., Azadeh, A., 2014. An integrated systemic model for optimization of condition-based maintenance with human error. *Reliability Engineering & System Safety*, 124:117-131. [doi:10.1016/j.res.2013.11.008].
4. Lu, X.F., Liu, M., (2014). Hazard rate function in dynamic environment. *Reliability Engineering & System Safety*, 130:50-60. [doi:10.1016/j.res.2014.04.020].
5. Shi, H., Zeng, J.C., (2014). Preventive maintenance strategy based on life prediction. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 20(5):1133-1140 (in Chinese).
6. Yin, H., Zhang, G.J., Zhu, H.P., et al., (2015). An integrated model of statistical process control and maintenance based on the delayed monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 33:323-333. [doi:10.1016/j.res.2014. 09.020].
7. Tang, D.Y., Makis, V., Jafari, L., et al., (2015). Optimal maintenance policy and residual life estimation for a slowly degrading system subject to condition monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 134:198-207. [doi:10.1016/j.res.2014.10.015].
8. Shi, H., Zeng, J.C., (2014). Preventive maintenance strategy based on life prediction. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 20(5):1133-1140 (in Chinese).



9. Montoro-Cazorla, D., Pérez-Ocón, R., (2014). A reliability system under different types of shock governed by a Markovian process and maintenance policy *K. European Journal of Operational Research*, 235(3):636-642. [doi:10.1016/j.ejor.2014.01.021].
10. Lin, Y.H., Li, Y.F., Zio, E., (2014). Multi-state physics model for the reliability assessment of a component under degradation processes and random shocks. *ESREL*, Amsterdam, the Netherlands, p.1-7.
11. Lin, Y.H., Li, Y.F., Zio, E., (2015). Integrating random shocks into multi-state physics models of degradation processes for component reliability assessment. *IEEE Transactions on Reliability*, 64(1):154-166. [doi:10.1109/TR.2014. 2354874].
12. Caballé, N.C., Castro, I.T., Pérez, C.J., *et al.*, (2015). A condition-based maintenance of a dependent degradation-threshold-shock model in a system with multiple degradation processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 134:98-109. doi:10.1016/j.ress.2014.09.024].
13. Castro, I.T., Caballé, N.C., Pérez, N.C., (2015). A conditionbased maintenance for a system subject to multiple degradation processes and external shocks. *International Journal of Systems Science*, 46(9):1692-1704. [doi:10.1080/00207721.2013.828796].
14. Nefedov, Roman & Loginova, Elena., (2018). Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation. *ITM Web of Conferences*. 18. 01006. [doi: 10.1051/itmconf/20181801006].
15. 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]
16. Kapytsa, M. I., Laguta, V. V., Serdiuk, T. N. (2017). Opredelenye systemy dyagnostirovaniya TED s uchetom vybora predpochtytelnykh elementov s yzmeniaiushcheisia yntensyvnostiu otkazov [Determination of the system for diagnosis of TM, taking into account the choice of preferred elements with varying failure rates]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti. – 4. – Kharkov: Vyd-vo UkrDUZT. – S. 9 –15.* [in Russian]
17. Serdiuk T., Feliziani M., Serdiuk K., (2018). 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]*
18. Michail Kapitsa, Vasilii 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.
19. Olivier Barré, Bellemain Napame. (2017). The Insulation for Machines Having a High Lifespan Expectancy, Design, Tests and Acceptance Criteria Issues. *Machines* , 5(1), 7; <https://doi.org/10.3390/machines5010007>
20. Metody kontrolya yzoliatsyy po vozvratnomu napriazheniyu y kryvoi samorazriada. Kontrol yzoliatsyy po vozvratnomu napriazheniyu [Insulation control methods for the return voltage and the self-discharge curve. Isolation voltage control]. (n.d.). Retrieved from <http://prp-roz.pf/tehnika-vyisokih-napryazheniy/126-metody-kontrolya-izolyacii-po-vozvratnomu-napryazheniyu-i-krivoy-samorazryada.html> [in Russian].
21. Melamedov, I. M. (1970). *Fyzycheskiye osnovy nadezhnosti* [Physical basis of reliability]. – L., Enerhiya. –S. 132-138.
22. Pravyla remontu elektrychnykh mashyn teplovoziv [Rules for repairing electric locomotives]. № TsT-0064: Nakaz Ukrzaliznytsi vid 23.02.03 r. № 53-Ts. –K., TOV Vydavnychiy dim „SAM“, -2003. -148 s. [in Russian].

**Юрий Козик,**  
**(инженер, руководитель технических проектов, ООО «Прикладные железнодородные технологии»)**

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПО УДЕЛЬНЫМ ЗАТРАТАМ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

*Рассматривается задача об определении ресурса корпусной изоляции и соответствующих моментов ее восстановления для тягового электродвигателя ЭД-118А. 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. Учитывается степень восстановления изоляции при выполнении ТР-3 и выполнении КР-1. Моделирование ресурса изоляции и периодов восстановления ТР-3 основано на данных измерений обратного напряжения в зависимости от пробега. Максимальное значение обратного напряжения и значение введенной интегральной оценки как показатели характеризующие состояние корпусной изоляции ТЭД эквивалентны. В качестве показателя состояния изоляции взята 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. Задача выбора локомотиворемонтного завода для восстановления изоляции рассматривалась именно в зависимости от качества восстановления без учета восстановления других элементов ТЭД. Совершенствование систем содержания ТПС нового поколения, и того, что находится в эксплуатации является актуальной задачей для железнодорожного транспорта Украины.

**Ключевые слова:** корпусная изоляция, обратное напряжение, контроль состояния изоляции, система содержания тягового электродвигателя

*Yuriy Kozik,*

*(Engineer, Head of Technical Projects, LLC "Applied Railway Technologies")*

#### **OPTIMAL FOR UNIT COSTS FORECASTING THE RESOURCE OF FRAME INSULATION OF A TRACTION MOTOR OF LOCOMOTIVES**

*The aim of the research is to improve the maintenance system of a traction motor (TM) ED-118A by predicting the life of frame insulation and determining recovery moments while ensuring the lowest unit costs for performing major repairs of volume 1 (MjR-1) and permanent repair of volume 3 (PR-3), taking into account the degree of recovery, using data on the insulation state by the return voltage method operation. In the research, the optimization of the unit costs for the overhaul of the MjR-1 and the repair of the PR-3 to restore the insulation properties, with restrictions on the value of the return voltage and the insulation mileage to MjR-2, taking into account the degree of restoration when performing the PR-3 and MjR-1. A method is proposed for predicting the life of frame insulation and determining moments of its recovery, taking into account the recovery factor when performing PR-3 and performing MjR-1 and data on observations of the return voltage. Researches were carried out in accordance with the "State Program for the Strategic Development of Ukrainian Railways", prepared by the State Research Center for Railway Transport of Ukraine in conjunction with Ukrzaliznytsya specialists and the Program for the renewal of railway rolling stock for the period up to 2020, where indicated by need for creation of modern systems maintenance and repair of traction rolling stock of a new generation and the development of appropriate regulatory documents.*

**Keywords:** frame insulation, return voltage, control of the insulation condition, traction motor maintenance system