

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 621.313.322

**ШЛЯХИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРІОДИЧНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ
ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ**

Кандидати техн. наук О. Д. Супрун, О. І. Семененко, Ю. О. Семененко,
магістранти С. С. Кузьмін, В. Р. Домарацький

**ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

Кандидаты техн. наук А. Д. Супрун, А. И. Семененко, Ю. А. Семененко,
магистранты С. С. Кузьмин, В. Р. Домарацкий

**WAYS OF OPTIMIZING THE PERIODICITY OF TECHNICAL SERVICE OF
EQUIPMENT OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS**

PhD (Tech.) O. Suprun, PhD (Tech.) O. Semenenko, PhD (Tech.) Y. Semenenko,
masters S. S. Kuzmin, V. R. Domaratskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156407>

У статті показано, що оптимальна періодичність проведення технічного обслуговування систем електричної тяги визначається її надійністю (наробітком на відмову T_0), а також середнім часом, що витрачається на виконання одного технічного обслуговування (ТО) $t_{\text{П}}$. Отримано математичні співвідношення для вибору періодичності ТО з умови максимальної імовірності виявлення несправності. Розроблено алгоритм послідовності проведення розрахунку оптимальних термінів проведення ТО. Отримано математичний опис оптимального значення періоду між обслуговуваннями з умови мінімального значення коефіцієнта непрацездатного стану. Запропоновано методику вибору періодичності технічного обслуговування з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання.

Ключові слова: електропостачання, наробіток на відмову, коефіцієнт непрацездатного стану, надійність обладнання.

В статье показано, что оптимальная периодичность проведения технического обслуживания систем электрической тяги определяется ее надежностью (наработкой на отказ T_0), а также средним временем, затрачиваемым на выполнение одного технического обслуживания (ТО) $t_{\text{П}}$. В результате получены математические соотношения для выбора периодичности ТО из условия максимальной вероятности обнаружения неисправности. Разработан алгоритм последовательности расчета оптимальных сроков проведения ТО. Получено математическое описание оптимального значения периода между обслуживаниями из условия минимального значения коэффициента неработоспособного состояния. Предложена методика выбора периодичности технического обслуживания из условия минимального коэффициента неработоспособного состояния оборудования.

Ключевые слова: электроснабжение, наработка на отказ, коэффициент неработоспособного состояния, надежность оборудования.

In the article it is shown that the optimal frequency of maintenance of systems of electric traction is determined by its reliability, as well as the average time spent on the performance of one maintenance (M). More reliable equipment should be serviced less frequently. In addition, the more time is spent on one service, one can deeply control the equipment and prevent more failures, and hence the maintenance period increases. Determination of the frequency of maintenance on the basis of the results of periodic control of the parameters of equipment and its elements allows you to determine the most expedient term of maintenance, as well as the elements used. A feature of standard methods for determining the frequency of maintenance is that they require the availability of certain statistical data on the operation of elements of equipment or equipment in general. This circumstance greatly complicates and increases the error of calculations, which is not unimportant factor in determining the methods of periodicity of maintenance. They also do not allow to judge the feasibility of carrying out maintenance on this particular equipment of electric traction systems. Unlike these methods, determining the frequency of maintenance based on the results of periodic monitoring of equipment parameters and its elements allows you to determine the most appropriate period of maintenance, as well as elements whose preventive replacement is most appropriate. Mathematical relations are obtained for the choice of periodicity of maintenance from the condition of maximum probability of detection of a malfunction. The algorithm of the sequence of the calculation of the optimal terms of the maintenance is developed. The mathematical description of the optimal value of the period between maintenance with the condition of the minimum value of the non-working condition factor is obtained. The method of the choice of periodicity of technical maintenance is offered from the condition of the minimum factor of the non-operating condition of the equipment.

Keywords: power supply, work time for failure, coefficient of inoperative condition, reliability of equipment.

Вступ. Організація технічного обслуговування (ТО), його зміст і методика проведення, вимоги до кількості обслуговуючого персоналу і його кваліфікації багато в чому залежать від якостей, закладених в обладнання при його конструюванні і виробництві [1]. Однак не можна вважати експлуатацію пасивним періодом у питаннях поліпшення якості проведення ТО. Пошук найбільш раціональних методів і способів проведення ТО є дуже важливим завданням. Правильна організація ТО вимагає ретельного вивчення цілого ряду питань [2-4]. До них можна віднести вибір системи технічного обслуговування; визначення параметрів ТО; оптимізацію параметрів ТО за різними критеріями; розроблення критеріїв кількісної оцінки якості ТО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання вибору оптимальної періодичності технічного обслуговування складається у визначенні такого його значення, при якому обраний якісний або кількісний показник набуває екстремального значення. Сутність методів [5, 6] визначення періодичності ТО, заснованих на використанні даних про експлуатаційну надійність обладнання в цілому, полягає у виборі інтервалу часу, протягом якого параметр, що характеризує реальний технічний стан обладнання, досягає граничного значення. Можливе визначення періодичності проведення ТО з умови забезпечення максимальних значень експлуатаційних характеристик [8], тобто вибір такого інтервалу часу, при якому необхідна характеристика в заданих умовах буде максимальною. Особливістю

викладених методів [4, 9] визначення періодичності ТО є те, що вони вимагають наявності визначених статистичних даних про експлуатацію елементів обладнання або обладнання в цілому. Також вони не дозволяють судити про доцільність проведення ТО на даному конкретному устаткуванні систем електричної тяги.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є обґрунтування оптимальної періодичності технічного обслуговування обладнання систем електричної тяги з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання. Завдання дослідження полягають в отриманні математичних співвідношень для вибору періодичності технічного обслуговування з умови максимальної імовірності виявлення несправності, розробленні алгоритму послідовності проведення розрахунку оптимальних термінів проведення ТО та методики вибору періодичності технічного обслуговування з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання.

Основна частина дослідження. У наш час найбільшого поширення знайшла змішана система ТО [6-10]. Її застосування доцільне для ТО обладнання, ушкодження і відмови якого обумовлені як процесом зносу, так і процесами старіння. Вибір системи ТО ґрунтується на урахуванні надійності експлуатованого обладнання. Критерієм вибору тієї чи іншої системи ТО може бути співвідношення

$$\varphi = \frac{n_{cp}(T_P)}{n_{cp}(T_{XP})} = \frac{\lambda_P \cdot T_P}{\lambda_{XP} \cdot T_{XP}} \quad (1)$$

де T_P , T_{XP} – відповідно сумарний час роботи і збереження обладнання;

$n_{cp}(T_P), n_{cp}(T_{XP})$ – середня кількість відмов обладнання при його роботі і збереженні;

λ_P, λ_{XP} – інтенсивності відмов обладнання відповідно під час роботи і при збереженні.

З цього виразу випливає, що, якщо $\varphi = 1$, то в однаковій мірі може бути обрана будь-яка система ТО (календарна чи за наробітком). Однак доцільно скористатися календарною системою як більш зручною для планування ТО. При $\varphi > 1$ вибирають систему за наробітком, при $\varphi < 1$ – календарну систему ТО. Вибір системи ТО ґрунтується на урахуванні надійності експлуатованого обладнання. За основу при обґрунтуванні періодичності ТО можуть бути узяті такі дані: статистичні характеристики комплектуючих елементів обладнання (наприклад, λ – характеристики щільності розподілу параметрів елементів як функції часу чи умов функціонування); характеристики експлуатаційної надійності обладнання в цілому; результати періодичного контролю вихідних параметрів обладнання і параметрів його комплектуючих елементів. За відомими λ – характеристиками елементів – визначається елемент (чи елементи), що має найменшу тривалість ділянки характеристики, на якому $\lambda = \text{const}$. Отриманий інтервал часу t_{\max} являє собою найбільший припустимий час між замінами цього елемента. Оскільки зазначений інтервал для інших елементів обладнання може бути іншим, доцільно періодичність замін цих елементів визначати з розумним обліком інтервалу t_{\max} , тобто таким чином, щоб одержати рівномірну за часом сітку профілактичних замін елементів. Недоліком цього методу призначення періодичності є те, що він не враховує можливі поступові відмови елементів, що обумовлені порівняно повільними змінами параметрів елементів.

На відміну від зазначених методів, визначення періодичності ТО на підставі результатів періодичного контролю параметрів обладнання і його елементів дозволяє визначити найбільш доцільний

термін проведення ТО, а також елементи, профілактична заміна яких найбільш доцільна.

При визначенні оптимального періоду технічного обслуговування з умови забезпечення максимального рівня безвідмовної роботи СЕП за кількісний критерій оптимальності приймаємо коефіцієнт експлуатаційної готовності

$$K_{EG}(t) = K_{тв} \cdot P(t), \quad (2)$$

де $K_{ТВ} = \frac{t_{\Sigma раб}}{t_{\Sigma раб} + t_{\Sigma П} + t_{\Sigma В}}$ – коефіцієнт

технічного використання;

$P(T_P) = \exp(-\frac{t_P}{T_{OPФ}})$ – імовірність

безвідмовної роботи апаратури за період обслуговування;

$t_{\Sigma раб}$ – сумарний час, протягом якого апаратура знаходиться в працездатному стані і вільна від технічного обслуговування і поточного ремонту;

$t_{\Sigma П}$ – сумарний час, затрачений на ТО за визначений календарний термін;

$t_{\Sigma В}$ – сумарний час, що затрачено на усунення відмов апаратури за той самий календарний термін;

$t_{\Sigma P}$ – період ТО апаратури.

Сумарний час $t_{\Sigma П}$ визначається як

$$t_{\Sigma П} = t_{П} \cdot m, \quad (3)$$

де t_n – середній час виконання одного ТО (тривалість одного обслуговування);

$m = \frac{T_{OPФ} + t_B}{t_P}$ – частота обслуговування;

$T_{OPФ}$ – наробіток обладнання, що обслуговується, на одну відмову;

t_B – середній час відновлення апаратури.

Сумарний час $t_{\Sigma В}$ визначається співвідношенням

$$t_{\Sigma В} = \sum t_{vi} = n \cdot t_e, \quad (4)$$

де t_{vi} – час усунення i -ї відмови;

n – кількість відмов за календарний термін.

Сумарний час перебування апаратури у працездатному стані $t_{\Sigma P}$ визначається за формулою

$$t_{\Sigma раб} = T_{OPФ} \cdot n \quad (5)$$

Підставимо вирази (2) і (3) у формулу (1) і одержимо загальний вираз для коефіцієнта експлуатаційної готовності

$$K_{EG} = \frac{t_{\Sigma раб}}{t_{\Sigma раб} + t_{\Sigma П} + T_{\Sigma В}} \cdot \exp(-\frac{T_P}{T_{OPФ}}). \quad (6)$$

У цьому виразі коефіцієнт експлуатаційної готовності є складною функцією періоду технічного обслуговування t_P . З одного боку, зі збільшенням t_P зменшується $t_{\Sigma П}$, тобто перший співмножник виразу (5) збільшується, з іншого боку, збільшення t_P неминуче призводить до зменшення ймовірності $P(t_P)$, тобто другий співмножник виразу (5) зменшується.

Існує якесь оптимальне значення t_{Popt} , що відповідає максимальному значенню K_{EGmax} . Графік залежності співмножників виразу (6), а також самого коефіцієнта K_{EG} від величини t_P наведені на рис. 1.

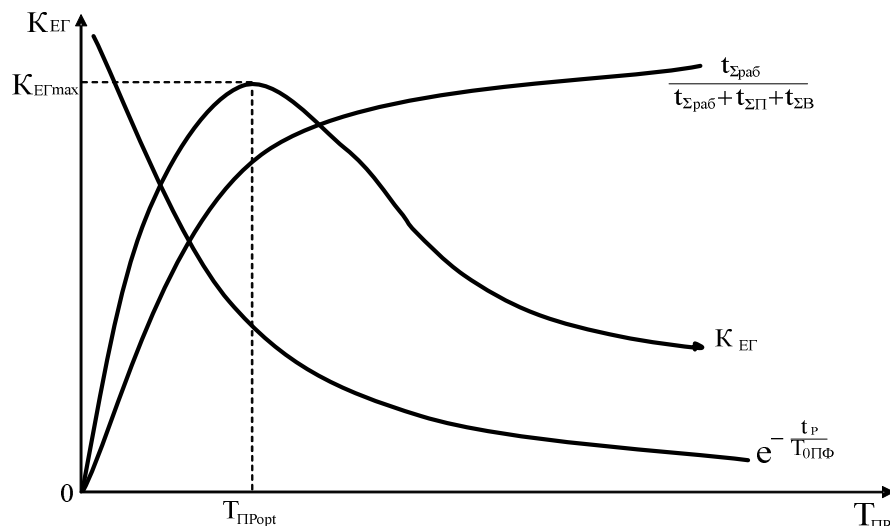


Рис. 1. Графік функції $K_{EG} = f(t_p)$

Знайдемо вираз для оптимального значення періоду проведення технічного обслуговування. Для цього зробимо такі припущення.

1. Система може знаходитися тільки на одному з трьох станів: або в робочому стані, або в стані обслуговування, або в стані відновлення після виникнення відмови, тобто $T_E = t_{\Sigma раб} + t_{\Sigma П} + t_{\Sigma В}$. З розгляду виключаються просто апарати, не зв'язані з поточним ремонтом і обслуговуванням (збереження, транспортування, доставка ЗП, плановий ремонт і інші простої).

2. Тривалість кожного обслуговування і його продуктивність заздалегідь визначені і від одного обслуговування до іншого не змінюються, тобто $t_{П} = \text{const}$.

3. Будемо вважати, що розгляд ведеться тільки на інтервалі між двома відмовами, тобто $m > n = 1$.

4. Відмовами апаратури контролю будемо нехтувати, а також будемо вважати, що апаратура контролю забезпечує абсолютну вірогідність контролю. Для спрощення поставленого завдання урахування прийнятих допущень і

позначень після підстановки виразів (3), (4), (5) у (6) одержимо:

$$K_{EG} = \frac{1}{1 + am + b} \exp\left(-\frac{1+b}{m}\right), \quad (7)$$

де $a = \frac{t_{П}}{T_{0ПФ}}$ – показник норми обслуговування;

$$b = \frac{t_{В}}{T_{0ПФ}} \text{ – показник норми надійності.}$$

Величина a характеризує частину часу обслуговування, що припадає на одну годину середнього часу безвідмовної роботи. Величина b показує співвідношення середніх величин простою апаратури під відновленням і її безвідмовною роботою.

Для того щоб визначити оптимальне значення періоду технічного обслуговування t_{Popt} , спочатку знайдемо оптимальне значення частоти обслуговування m_{opt} . Це завдання може бути визначено шляхом дослідження виразу (7) на екстремум, тобто

розв'язанням рівняння: $\frac{dK_{EG}}{dm} = 0$. Після диференціювання отримаємо

$$\frac{1+b}{m^2} \cdot (1+b+a \cdot m) \cdot \exp\left[-\left(\frac{1+b}{m}\right)\right] - a \cdot \exp\left[-\left(\frac{1+b}{m}\right)\right] = 0,$$

$$m \neq 0, 1+b \neq 0, \exp\left[-\left(\frac{1+b}{m}\right)\right] = 0,$$

після нескладних перетворень розв'язуючи це рівняння, знаходимо

$$m_{opt} = \frac{1+b}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4}{a}}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{t_B}{T_{0ПФ}}\right) \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{T_{0ПФ}}{t_{П}}}\right).$$

З огляду на те, що $m_{opt} = \frac{T_{0ПФ} + t_B}{t_{Popt}}$, з останнього виразу отримуємо формулу для оптимального значення періоду технічного обслуговування

$$t_{Popt} = \frac{2 \cdot T_{0ПФ}}{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{T_{0ПФ}}{t_{П}}}}. \quad (8)$$

Звичайно для СЕП виконується співвідношення $T_{0ПФ} \gg t_{П}$. Тому вираз (8)

без великих похибок можна перетворити до

$$\text{вигляду } t_{Popt} \approx \frac{2 \cdot T_{0ПФ}}{\sqrt{4 \cdot \frac{T_{0ПФ}}{t_{П}}}}.$$

Після визначення оптимального періоду технічного обслуговування можна знайти за даних умов максимальне значення коефіцієнта експлуатаційної готовності. Для цього у вираз (5) підставимо вираз (8):

$$K_{EGmax} = \frac{t_{\Sigma раб}}{t_{\Sigma раб} + t_{\Sigma Пopt} + t_{\Sigma B}} \cdot \exp\left(-\frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{T_{0ПФ}}{t_{П}}}}\right)$$

$$t_{\Sigma Popt} = \frac{T_{0ПФ} + t_B}{t_{Popt}} \cdot t_{П}. \quad (9)$$

З виразу (9) можливий очевидний висновок про те, що оптимальна періодичність проведення технічного обслуговування СЕП визначається надійністю системи (наробітком на відмову

T_0), а також середнім часом, затраченим на виконання одного технічного обслуговування $t_{П}$. Іншими словами, більш надійне обладнання (що має більше значення T_0) треба обслуговувати рідше.

Крім того, як впливає з виразу (9), чим більше витрачається часу на одне обслуговування, тим, мабуть, можна більш глибоко проконтролювати обладнання і запобігти більшим відмовам, а отже, зростає і період обслуговування.

При виборі періодичності технічного обслуговування з умови максимальної імовірності виявлення несправності з досвіду експлуатації встановлено, що будь-який технічний пристрій може знаходитися в трьох станах: справному (несправності нема), несправному (у пристрої виникла несправність, але відмови не наступило) і непрацездатному (пристрій відмовив і ремонтується). Два перших стани (справний і несправний) є працездатними. У випадку, коли несправність передусе відмові, між значеннями часу виникнення несправності і відмови (чи між значеннями відповідних параметрів потоків несправностей і відмов), може існувати вірогідна чи функціональна залежність. Розглянемо докладніше вірогідну залежність. Процес розвитку відмови розбивається на дві стадії. На першій стадії з моменту початку роботи $t = 0$ технічного пристрою розвивається несправність, що виявляється у випадковий момент часу T_1 .

З цього моменту починає розвиватися друга стадія, і в момент часу T_2 виникає відмова. Припустимо, що ТО проводиться з постійною періодичністю T_p , що не залежить від кількості відмов, що виникли за період між обслуговуваннями.

З початку експлуатації ($t = 0$) до моменту проведення першого ТО ($t = T_p$) параметр потоку відмов для всіх $t < T_p$ дорівнює:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau) \cdot f(t-\tau) d\tau, \quad (10)$$

де $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$ – щільність розподілу випадкового часу безвідмовної роботи пристрою (обладнання).

Значення $f(t)$ можна визначити через щільність розподілу часу розвитку несправності і часу розвитку відмови (часу розвитку першої і другої стадії), тобто

$$f(t) = \int_0^t f_1(\tau) \cdot f_2(t-\tau) d\tau, \quad (11)$$

де $f_1(t) = \frac{dF_1(t)}{dt}$ – щільність розподілу часу T_1 виникнення несправності;

$f_2(t) = \frac{dF_2(t)}{dt}$ – щільність розподілу часу T_2 розвитку відмови.

Знайдемо, як зміняться параметр потоку відмов у результаті проведення першого ТО. Крім того, визначимо верхню межу терміну проведення цього ТО, при якому параметр потоку відмов набуває мінімального значення (якщо термін призначити менше, то надійність обладнання не підвищиться, а готовність його знизиться). При проведенні ТО відмови усуваються шляхом виявлення й усунення несправностей. Отже, при виконанні цих робіт виробляється керуючий вплив на подальше поведіння функції $\omega(t)$. Для того щоб оцінити дію цього керуючого впливу на $\omega(t)$, розглянемо дві несумісні події, що виникають у момент початку виконання першої несправності; позначимо імовірність цієї події через $1 - P_n(t_{p1})$, несправність має місце й імовірність цієї події дорівнює $P_n(t_{p1})$. Відповідно до цих двох подій можна виділити дві складові потоку відмов $\omega_1(t)$ і $\omega_2(t)$ протягом часу роботи між першим і другим ТО. Перша подія відповідає випадку, коли керуючий

вплив на потік відмов не впливає. Тому перша складова потоку відмов дорівнює

$$\omega_1(t) = [1 - P_H(t_{p1})] \cdot \omega(t), \quad (12)$$

де $\omega(t)$ – параметр потоку відмов для випадку, коли ТО не проводиться.

Друга ж подія відповідає випадку, коли керуючий вплив був здійснений – несправність була виявлена й усунута.

Друга складова потоку відмов при $t_2 < t < t_{p1}$ дорівнює

$$\omega_2(t) = P_H(t_{p1}) \cdot \omega(t - t_{p1}), \quad (13)$$

де $t_2 = t_{p1} + t_{p2}$; t_{p2} – термін експлуатації (наробітку) між першим і другим ТО.

Таким чином, після проведення першого ТО виникає потік відмов з параметром

$$\varpi(t) = \omega_1(t) + \omega_2(t) = [1 - P_H(t_{p1})] \cdot \omega(t) + P_H(t_{p1}) \cdot \omega(t - t_{p1}) = \omega(t) - P_H(t_{p1}) \cdot [\omega(t) - \omega(t - t_{p1})] \quad (14)$$

На рис. 2 показано характер зміни функції $\varpi(t)$ за наробітком. Пунктиром

показана функція $\omega(t)$ для випадку, коли ТО не проводиться.

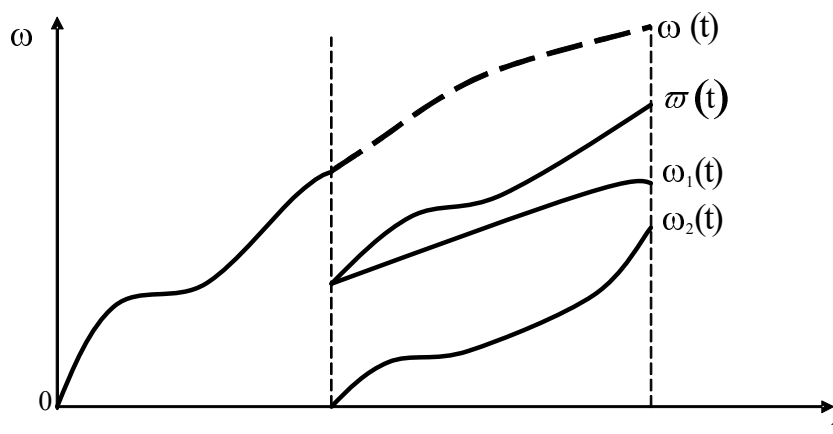


Рис. 2. Графік «розрідженого» потоку відмов

На рис. 2 позначено

$$\omega_1(t) = [1 - P_H(t_{p1})] \cdot \omega(t);$$

$$\omega_2(t) = P_H(t_{p1}) \cdot \omega(t - t_{p1}).$$

Таким чином, після проведення ТО виникає «розріджений» потік відмов з параметром $\varpi(t)$. Це розрідження пояснюється тим, що при проведенні ТО усуваються несправності, що виникли за період між обслуговуваннями. З формули (13)

випливає, що чим більше значення добутку $P_H(t_{p1}) \cdot [\omega(t) - \omega(t - t_{p1})]$, тим більше розрідження потоку відмов і менше значення його параметра $\varpi(t)$. Отже, для визначення терміну першого ТО, при якому значення параметра розрідженого потоку відмов мінімальне, необхідно виконати диференціювання виразу $P_H(t_{p1}) \cdot [\omega(t) - \omega(t - t_{p1})]$, прирівняти похідну до нуля і розв'язати відносно t_{p1} отримане рівняння. Однак на

практиці зазначені обчислення викликають значні труднощі і їх доцільно спростити. З цією метою проаналізуємо, наскільки відрізняються значення $t_{p1}^{(1)}$ і $t_{p1}^{(2)}$. При значеннях $t_{p1}^{(1)}$ і $t_{p1}^{(2)}$ імовірності $P_H(t_{p1}) \cdot [\omega(t) - \omega(t - t_{p1})]$ і $P_H(t_{p1})$ – максимальні. У таблиці наведено значення різниці $\Delta t = t_{p1}^{(1)} - t_{p1}^{(2)}$ для деяких розподілів часу T_1 і T_2 . З таблиці видно, що для всіх розподілів Δt не перевищує кілька відсотків (практично не перевищує точність розрахунку). Таким чином, з достатньою для практики точністю термін проведення першого ТО, при якому $\omega(t) = \min$, можна визначати з умови $P_H(t_{p1}) = \max$.

Визначимо залежність імовірності $P_H(p1)$ від терміну проведення першого ТО t_{p1} , при цьому вважаємо, що несправність буде мати місце в технічному пристрої до моменту проведення першого ТО у двох таких випадках: до початку проведення ТО виникла несправність, але не наступила відмова; пристрій відмовив протягом періоду між обслуговуваннями і його було відновлено; з моменту часу $t = t_p$ до початку проведення ТО в пристрої з'явилася несправність, але не наступила відмова. Позначивши

імовірності цих двох випадків відповідно через $P_{H,0}(t_{p1})$ і $P_1(t_{p1})$, запишемо

$$P_H(t_{p1}) = P_{H,0}(t_{p1}) + P_1(t_{p1}). \quad (15)$$

Визначимо імовірність $P_1(t_{p1})$. Для цього розглянемо інтервал часу $[\tau, \tau + d\tau]$, що передує початку проведення першого ТО. Імовірність відмови технічного пристрою протягом цього інтервалу часу дорівнює $\omega(\tau) d\tau$. Імовірність того, що протягом часу $(t_{p1} - \tau)$ з'явиться несправність і не наступить відмова, дорівнює $P_{H,0}(t_{p1} - \tau)$. Тоді елемент імовірності $dP_1(\tau)$ дорівнює добутку $dP_1(\tau) = \omega(\tau) \cdot P_{H,0}(t_{p1} - \tau) dt$. Підсумовуючи по усіх τ від 0 до t_{p1} , одержимо

$$P_1(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} \omega(\tau) \cdot P_{H,0}(t_{p1} - \tau) d\tau. \quad (16)$$

Підставляючи вираз (16) у вираз (15), одержимо рівняння для визначення імовірності наявності несправності в технічному пристрої до початку проведення першого ТО:

$$P_H(t_{p1}) = P_{H,0}(t_{p1}) + \int_0^{t_{p1}} \omega(\tau) \cdot P_{H,0}(t_{p1} - \tau) d\tau. \quad (17)$$

Звичайно параметр потоку відмов малий, а у виразі (17) до того ж використовується параметр розрідженого потоку відмов. Тому другим додатком можна знехтувати (розрахунки показують, що помилка в цьому випадку не перевищує декількох відсотків). Тоді $P_H(t_{p1}) \approx P_{H0}(t_{p1})$. Повторюючи мірку-

вання, аналогічні описаній вище для $P_H(t_{p1})$, запишемо

$$P_{H,0}(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} [1 - F_2(t_{p1} - \tau)] \cdot f_1(\tau) d\tau, \quad (18)$$

де $F_2(\tau)$ – функція розподілу часу T_2 другої стадії розвитку відмови.

Таблиця

Визначення інтервалу Δt , %

Розподілення і його щільність	T_{cp}	σ	$\frac{T_{cp}}{\sigma}$	$t_{p1}^{(2)}$						
				0,125	0,25	0,375	0,5	0,575	0,75	0,875
Експоненціальне $\lambda \cdot e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda}$	1	+1,6	+1,4	+0,8	0	-0,79	-1,39	-1,58
Рівномірне $\frac{1}{\beta - \alpha}$	При $\alpha = 0$	$\beta/2$		+4,9	+4,5	+3,0	0	-2,9	-4,3	-4,7
Нормальне $\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(t-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$	m	σ	1 0,5 0,33	+6,0 +4,5 +2,6	+5,0 +4,0 +2,1	+4,1 +2,8 +1,5	0 0 0	-4,1 -2,7 -1,5	-4,9 -3,8 -1,8	-5,8 -4,4 -2,1
Гамма-розподіл $\frac{\lambda^m}{\Gamma(m)} \cdot t^{m-1} \cdot e^{-\lambda t}$	$\frac{m}{\sigma}$	$\frac{m}{\sigma^2}$	0,5 0,33	+1,5 +1,2	+0,8 +0,6	+0,4 +0,3	0	-0,4 -0,3	-0,65 -0,55	-1,3 -1,1
Розподіл Вейбулла $\alpha \cdot C \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-Ct^\alpha}$	$\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$	$\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$	0,5	+1,4	+0,7	+0,4	0	-0,4	-0,6	-1,2
	$\frac{1}{C^\alpha}$	$\frac{2}{C^\alpha}$	0,33	+1,2	+0,6	+0,3	0	-0,3	-0,55	-1,1

Якщо між значеннями часів T_1 і T_2 існує кореляційна залежність, то

формула (18) буде мати такий вигляд

$$P_{n,0}(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} \left\{ 1 - F_2 \cdot \left[\frac{(t_{p1} - \tau)}{\tau} \right] \right\} \cdot f_1(\tau) d\tau, \quad (19)$$

де $F_2\left(\frac{t}{\tau}\right)$ – умовна функція розподілу часу другої стадії розвитку відмови за умови, що час T_1 набув значення τ .

розподіли з параметрами λ_1 і λ_2 відповідно, параметр потоку відмов $\omega(t)$ буде визначатися таким виразом:

$$\omega(t) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \right]. \quad (21)$$

Раніше було зазначено, що чим більше значення імовірності, тим більше розрідження потоку відмов і менше значення $\overline{\omega}_t$. Розглянемо, як вимірюються значення функції $P_{n,0}(t_{p1})$ при зміні терміну проведення першого ТО. Безпосередньо з формул (18) і (19) випливає, що при $t_{p1} = 0$ і при $t_{p1} = \infty$ $P_{n,0}(0) = P_{n,0}(\infty) = 0$. Це фізично пояснюється тим, що при $t_{p1} = 0$ ще не з'явилися несправності, а при $t_{p1} = \infty$ технічний пристрій відмовляє до початку проведення першого ТО. Оскільки функція $P_{n,0}(t_{p1})$ – невід'ємна і безупинна, то в інтервалі $[0, \infty]$ існує точка максимуму. Отже, існує такий термін проведення ТО t_{p1} , при якому імовірність $P_{n,0}(t_{p1}) = \max$ і значення розрідженого параметра потоку відмов мінімальне. Цей термін може бути знайдений як найменший позитивний корінь рівняння

$$\frac{dP_{n,0}(t_{p1})}{dt_{p1}} = 0. \quad (20)$$

У тому випадку, коли рівняння (20) не має аналітичного рішення, термін t_{p1} знаходиться безпосередньо з графіка функції $P_{n,0}(t_{p1})$. У випадку, якщо часи T_1 і T_2 незалежні і мають експонентні

На рис. 3 показана залежність параметра потоку відмов за наробітком. Якщо ТО не проводиться (крива 1), то $\omega(t)$, за виразом (21), зростає і наближається в межі при $t \rightarrow \infty$ до $\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$. Якщо ТО проводиться з періодичністю T_p , то після кожного ТО значення параметра потоку відмов стає рівним нулю, а в період між обслуговуваннями змінюється відповідно до виразу (21). Така функціональна залежність наведена на рис. 3 (крива 2). Для того щоб краще зрозуміти фізичний зміст імовірності $P_{n,0}(t_{p1})$, розглянемо три ситуації, можливі в момент початку проведення першого ТО. Перша ситуація – за період між обслуговуваннями не виникла несправність. Друга ситуація – за період між обслуговуваннями виникла несправність, але відмова не сталася. Тоді існує деякий момент часу виникнення відмови для випадку, якби ТО не проводилося. Третя ситуація – протягом періоду між обслуговуваннями наступила перша відмова. Позначимо імовірності зазначених вище ситуацій через $P_{n,0}(t_{p1})$, $P_{n,0}(t_{p1})$, $P_0(t_{p1})$ відповідно. Очевидно, що всі три ситуації утворюють повну групу подій:

$$P_{n,0}(t_{p1}) + P_{n,0}(t_{p1}) + P_0(t_{p1}) = 1. \quad (22)$$

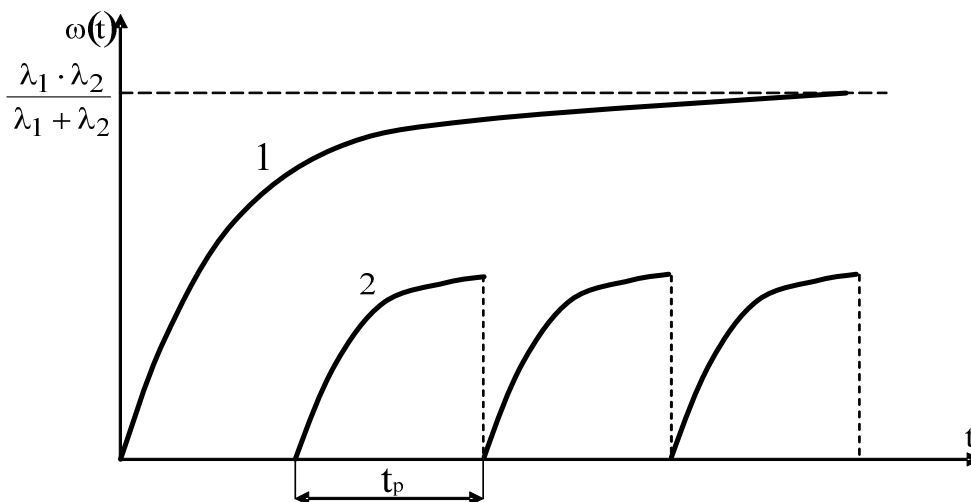


Рис. 3. Графік зміни параметра потоку відмов

Неважко побачити, що сума ймовірностей двох перших подій дорівнює значенню функції надійності при $t = t_{p1}$, тобто $P_{н,0}(t_{p1}) + P_{н,0}(t_{p1}) = P(t_{p1})$, а ймовірність третьої функції – значенню функції ненадійності, тобто

$Q(t_{p1}) = P_0(t_{p1})$. Визначимо залежність ймовірностей $P_{н,0}(t_{p1}), P_0(t_{p1})$ від щільності розподілу часів виникнення несправностей і відмов. Очевидно, що ймовірність першої ситуації визначається виразом

$$P_{н,0}(t_{p1}) = 1 - F_1(t_{p1}) = 1 - \int_0^{t_{p1}} f_1(\tau) d\tau. \quad (23)$$

Ймовірність третьої ситуації дорівнює

$$P_0(t_{p1}) = F(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} f(\tau) d\tau. \quad (24)$$

Формули (22), (23) та (24) можуть бути використані для визначення ймовірності $P_{н,0}(t_{p1})$ при всіх трьох типах залежностей часів T_1 і T_2 , при цьому порядок обчислень такий: знаходять щільність розподілу $f(t)$ часу; за формулами (23) і (24) визначають ймовірності $P_{н,0}(t_{p1})$ і $P_0(t_{p1})$; за формулою (22) знаходять

шукану ймовірність $P_{н,0}(t_{p1})$. Очевидно, що функція $P_{н,0}(t_{p1})$ – монотонно спадна, а функція $P_0(t_{p1})$ – неспадна. Характер зміни ймовірностей усіх трьох ситуацій наведено на рис. 4. З рис. 4 видно, що функція $P_{н,0}(t_{p1})$ в районі максимуму змінюється дуже полого, що дає можливість зсуву

терміну проведення ТО від оптимального значення і призначення допуску на цей термін.

З рис. 4 видно також, що ймовірність ситуації $P_0(t_{p1})$ є найбільш небезпечною, при $t = t_{p1}$ вона може мати значну величину.

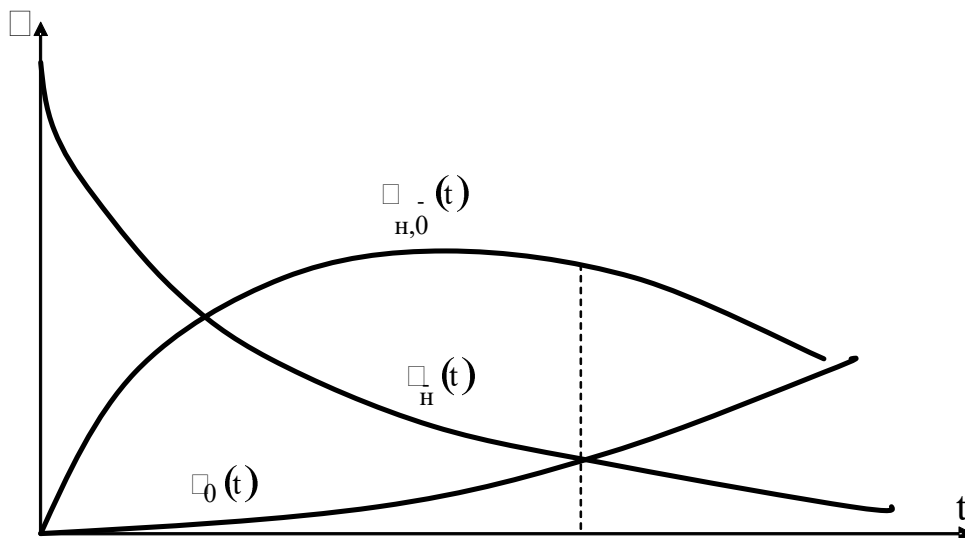


Рис. 4. Залежності ймовірностей $P_0, P_{H,0}, P_H$ від терміну проведення ТО t_p

Тому доцільно після визначення терміну t_{popt} обчислити $P_0(t_{popt})$ і скоригувати $P_0(t_{popt})$ з урахуванням цього значення. Крім того, якщо потрібно забезпечити ймовірність появи відмови не вище заданої $P_{зад}$, то термін першого ТО

повинний знаходитися з умови $P_0(t_{p1}) < P_{зад}$. Розглянемо випадок, коли значення часу T_1 і T_2 незалежні і мають експонентний розподіл з параметрами λ_1, λ_2 відповідно. При цьому вираз (21) запишеться у вигляді

$$P_{H,0}(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} e^{-\lambda_2(t_{p1}-\tau)} \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \tau} d\tau.$$

Обчислюючи інтеграл, одержимо

$$P_{H,0}(t_{p1}) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot (e^{-\lambda_2 t_{p1}} - e^{-\lambda_1 t_{p1}}). \quad (25)$$

Для визначення оптимального терміну проведення ТО знайдемо корінь рівняння (20). Після перетворення одержимо

$$t_{p1opt} = \frac{\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad \text{чи} \quad t_{p1opt} = \frac{\phi(\rho)}{\lambda_2}, \quad (26)$$

де $\rho = \frac{\lambda L_1}{\lambda_2}$; $\phi(\rho) = \frac{\ln \rho}{\rho - 1}$.

Визначимо імовірності двох інших ситуацій, можливих у момент початку виконання першого ТО: імовірність того, що за період між обслуговуваннями не виникне несправність, за виразом (26), дорівнює

$$P_{n,0}^-(t_{p1}) = e^{-\lambda_1 t_{p1}}. \quad (27)$$

Визначимо імовірність виникнення відмови $P_0(t_{p1})$. Підставивши відповідні функції у вираз (24), одержимо

$$P_{n,0}^-(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} [1 - e^{-\lambda_1(t_{p1}-\tau)}] \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \tau} d\tau.$$

Обчисливши інтеграл, маємо

$$P_0(t_{p1}) = 1 - e^{-\lambda_1 t_{p1}} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_1 t_{p1}} \cdot [1 - e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_{p1}}]. \quad (28)$$

При практичних розрахунках може бути також застосована отримана з виразу (22) формула

$$P_0(t_{p1}) = 1 - P_{n,0}^-(t_{p1}) - P_{n,0}^-(t_{p1}). \quad (29)$$

Підставивши вираз (26) у вирази (25) і (27), після перетворень одержимо

$$P_{n,0}^- = e^{-\rho \phi(\rho)}; \quad (30)$$

$$P_{n,0}^- = \frac{\rho}{\rho - 1} \cdot (e^{-\phi(\rho)} - e^{-\rho \phi(\rho)}). \quad (31)$$

Для обчислення імовірності P_0 можна скористатися виразом (29). Як показано раніше, для розрахунку оптимальних термінів проведення ТО необхідно знати щільність розподілу $f_1(t)$ і $f_2(t)$, а для розрахунку оптимальної періодичності (у стаціонарному режимі експлуатації) – параметри $\bar{\lambda}_1 = \frac{1}{T_{cp}}$; $\lambda_2 = \frac{1}{T_{cp}}$. Вихідні дані

для одержання $f_1(t)$, $f_2(t)$ $\bar{\lambda}_1$ (чи \bar{T}_{cp1}) і λ_2 (чи T_{cp2}) можуть бути отримані в результаті проведення спеціальних досліджень при реальній експлуатації. За статистичними даними за обстежуваний період експлуатації конкретних зразків обладнання можна підрахувати сумарну кількість $n_1^{(1)}$ несправностей визначеного типу, виявлених при проведенні ТО; кількість відмов n , яким передують несправності розглянутого типу. Несправності передують відмовам, тому загальна кількість несправностей, що проявилися в пристроях (агрегатах) за цей термін експлуатації, дорівнює $n_1 = n^{(1)} + n$. За цей же термін експлуатації відомо наробіток t_n усіх N обстежуваних виробів. Використовуючи ці дані, можна визначити оцінки математичних очікувань:

- часу настання несправності

$$\bar{T}_{cp}^* = \frac{t_n}{n_1} = \frac{t_n}{n_1^{(1)} + n}; \quad (32)$$

- часу виникнення відмови

$$T_{cp}^* = \frac{t_N}{n}. \quad (33)$$

Скориставшись виразом

$$T_{cp}^* = \bar{T}_{cp1}^* + T_{cp2}^*, \text{ за відомими значеннями}$$

T_{cp}^* і \bar{T}_{cp1}^* знаходимо оцінку для математичного очікування другої стадії розвитку відмови:

$$T_{cp2}^* = T_{cp}^* - \bar{T}_{cp1}^* = \frac{n_1^{(1)} \cdot t_n}{n \cdot (n_1^{(1)} + n)}. \quad (34)$$

Знаючи значення T_{cp}^* і \bar{T}_{cp} , визначаємо оцінки відповідних інтенсивностей, необхідних для знаходження оптимального періоду ТО:

$$\bar{\lambda}_1^* = \frac{1}{\bar{T}_{cp1}^*} = \frac{n_1^{(1)} + n}{t_N}; \quad (35)$$

$$\lambda_2^* = \frac{1}{T_{cp2}^*} = \frac{n(n_1^{(1)} + n)}{n_1^{(1)} \cdot t_n}.$$

Однак через недостатньо великий обсяг спостережень можливі випадкові помилки у визначенні середніх значень часу. Тому варто оцінювати точність цих оцінок за допомогою довірчих інтервалів. Оскільки при експлуатації наробіток t_N – фіксований, то випадкові числа n_1 несправностей і n відмов розподілені за законом Пуассона. Таким чином, оцінку точності формул (32) і (33) можна дати так само, як і для випадкової кількості подій, розподілених за законом Пуассона, при одержанні результатів декількох серій досвідів. При оцінюванні точності характеристик звичайно задаються значенням довірчої імовірності $\alpha=0,8-0,95$.

Довірчі границі для \bar{T}_{cp} і T_{cp} визначають за формулами:

$$T_{1n} = \frac{t_N \cdot r_2}{n_1} = r_2 \cdot \bar{T}_{cp1}^* \quad T_{1\sigma} = \frac{t_N \cdot r_1}{n_1} = r_1 \cdot \bar{T}_{cp1}^*, \quad (36)$$

де Γ_1, Γ_2 – коефіцієнти, визначені з роботи [11] за параметрами $\alpha_1, n_1(\alpha, n)$ розподілу Пуассона.

Таким чином, послідовність проведення розрахунку оптимальних термінів проведення ТО зводиться до такого:

1. Знаходять інтенсивності, що відповідають середнім значенням часів виникнення несправності і другої стадії розвитку відмови:

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{1}{T_{cp1}}; \quad \lambda_2 = \frac{1}{T_{cp2}}. \quad (37)$$

$$P_{n,0}^-(t_p) = \frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{\lambda}_1 - \lambda_2} \cdot \left(e^{-\lambda_2 t_p} - e^{-\bar{\lambda}_1 t_p} \right); \quad P_n^-(t_p) = e^{-\bar{\lambda}_1 t_p};$$

$$P_0(t_p) = 1 - P_n^-(t_p) - P_{n,0}^-(t_p). \quad (39)$$

4. На основі аналізу отриманого значення $t_{p_{opt}}$ графіків функцій $P_n^-(t_{p1}), P_{n,0}^-(t_{p1}), P_0(t_{p1})$ і особливостей організації і виконання ТО приймають остаточне рішення щодо періодичності ТО.

При виборі періодичності технічного обслуговування з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання особливістю роботи обладнання СЕП є те, що частину часу воно працездатне і виконує свої функції (готове до застосування чи включено в роботу), а іншу частину часу воно знаходиться в несправному чи непрацездатному стані (знаходиться в режимі технічного обслуговування). Крім того, після закінчення періоду між обслуговуваннями витрачається певний час на проведення технічного обслуговування.

Частка часу простою обладнання протягом періоду між обслуговуваннями

2. Обчислюють значення періодичності $t_{p_{opt}}$ ТО, при якій забезпечується найбільше розрідження потоку відмов (максимум імовірності $P_{n,0}^-(t_{p1})$),

$$t_{p_{opt}} = \frac{\ln \bar{\lambda}_1 - \ln \lambda_2}{\bar{\lambda}_2 - \lambda_2} = \frac{\phi(\rho)}{\lambda_2}, \quad (38)$$

де $\rho = \frac{\bar{\lambda}_1}{\lambda_2}$.

3. Будують графіки функцій

може бути оцінена так званим коефіцієнтом непрацездатного стану обладнання

$$K_H(t_{pi}) = \frac{\sum_{j=1}^n t_{bij} + t_{pi}}{t_{pi} + t_{\Pi i}}, \quad (40)$$

де t_{bij} – час, затрачуваний на усунення j -ї несправності (ушкодження, відмови) в i -му періоді між обслуговуваннями;

n – кількість виявлених усунутих несправностей (ушкоджень, відмов) протягом i -го періоду між обслуговуваннями;

$t_{\Pi i}$ – тривалість i -го ТО;

t_{pi} – величина i -го періоду між обслуговуваннями.

Із виразу (40) випливає, що коефіцієнт непрацездатного стану являє собою відношення сумарного часу усунення несправностей (ушкоджень, відмов) за i -й період між обслуговуваннями до

загального часу проведення і-го ТО та і-го періоду між обслуговуваннями. З визначення коефіцієнта непрацездатного стану також випливає, що максимальну готовність має те обладнання, у якого значення $K_H(t_{pi})$ – мінімальне. Зменшення коефіцієнта $K_H(t_{pi})$ можливо за рахунок збільшення значення періоду між обслуговуваннями і скорочення часу, затраченого на проведення ТО. Однак слід зазначити, що час, який відводиться на проведення ТО, залежить від таких факторів: обсягу технічного обслуговування; кількості обслуговуючого персоналу і його кваліфікації; складу засобів, що залучаються. Оскільки обсяг і порядок виконання ТО планується заздалегідь, то час, що відводиться на його виконання, є цілком визначеною величиною і залишається постійним для наступних обслуговувань. Тому надалі будемо вважати t_p величиною постійною, що дорівнює $t_p = t_{TO}$. Величина періоду між обслуговуваннями t_{pi} може змінюватися в найбільших межах. Однак при цьому варто мати на увазі, що при зменшенні t_{pi} буде значно скорочуватися час, затрачений на усунення несправностей (ушкоджень, відмов), що виявляються протягом періоду між обслуговуваннями. При збільшенні t_{pi} , навпаки, час на усунення несправностей і відмов буде збільшуватися. У зв'язку з цим не є можливим однозначно визначити тривалість періоду між обслуговуваннями, при якій значення коефіцієнта $K_H(t_{pi})$ буде мінімальним. Таким чином, для розв'язання зазначеної задачі необхідно знайти оптимальну величину t_{pi} , що відповідає мініимальному значенню коефіцієнта непрацездатного стану. Для розв'язання поставленої задачі введемо такі припущення: будемо вважати, що в межах періоду між обслуговуваннями кількість відмов в одиницю часу знаходиться в прямій пропорційній залежності від часу

експлуатації t , тобто $\bar{\lambda}(t) = q \cdot t$; кількість раптових відмов в одиницю часу залишається величиною постійною в усі періоди між обслуговуваннями і рівною $\lambda_b(t) = P$; сумарний час відновлення обладнання за один період між обслуговуваннями є випадковою величиною, що дорівнює її математичному

очікуванню $M(t) = T_B \cdot \int_0^{t_i} \bar{\lambda}(t) dt$, причому

$\bar{\lambda}(t) = \bar{\lambda}_n(t) + \bar{\lambda}_e(t)$ є сумарною кількістю поступових і раптових відмов в одиницю часу. Усі періоди між обслуговуваннями приймаємо рівними незалежно від тривалості експлуатації обладнання. Це означає, що в процесі проведення ТО обладнання відновлюється до рівня нового. З урахуванням зроблених припущень випливає, що математичне очікування часу усунення несправності обладнання дорівнює

$$M(t_p) = T_B \cdot \int_0^{t_p} (p \cdot q \cdot t) dt. \quad (41)$$

Підставляючи значення $M(t_p)$ у формулу (36), одержимо вираз для коефіцієнта $K_H(t_p)$:

$$K_H(t_p) = \frac{T_B \cdot \int_0^{t_p} (p \cdot q \cdot t) dt + T_{TO}}{t_p + T_{TO}}. \quad (42)$$

Після диференціювання виразу (42), прирівнявши похідну $K'_H(t_p)$ до нуля і розв'язуючи отримане рівняння відносно t_p , знаходимо оптимальне значення періоду між обслуговуваннями з умови мініимального значення коефіцієнта непрацездатного стану:

$$t_{P_{opt}} = T_{TO} \left[\sqrt{1 + 2 \cdot \left(\frac{1 - p \cdot T_B}{q \cdot T_B \cdot T_{TO}} \right)} - 1 \right]. \quad (43)$$

Висновки. Визначення періодичності ТО на підставі результатів періодичного контролю параметрів обладнання і його елементів дозволяє визначити найбільш доцільний термін проведення ТО, а також елементи, профілактична заміна яких найбільш доцільна. Отримано математичні співвідношення для вибору періодичності технічного обслуговування з умови максимальної ймовірності виявлення несправності. Розроблено алгоритм послідовності проведення розрахунку оптимальних термінів проведення ТО.

Запропоновано методику вибору періодичності ТО, за якою з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання отримано співвідношення, з якого випливає, що величина періоду між обслуговуваннями визначається часом обслуговування T_{TO} , середнім часом відновлення працездатності обладнання при одному відмовленні T_B , інтенсивністю раптових відмов p і коефіцієнтом постійних відмов q .

Список використаних джерел

1. ЦЕ-0045. Обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць технічне обслуговування та ремонт привила №441-Ц/од [Текст]. – К., 2014. – 120 с.
2. Gils, H. C. Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe [Text] / H. C. Gils // Energy. – 2017. – Vol. 123. – P. 173-188.
3. Lampasi, A. The DTT device: Power supplies and electrical distribution system [Text] / A. Lampasi // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 135. – P. 168-179.
4. Kim, S. Offset-Free Model Predictive Control for Output Voltage Regulation of Three-Phase Inverter for Uninterruptible Power Supply Applications [Text] / S. Kim, C. Park, Y. Lee // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Vol. 47. – P. 129-134.
5. Супрун, О. Д. Дослідження перехідних режимів роботи установок гарантованого живлення блочно-модульних тягових підстанцій [Текст] / О. Д. Супрун, О. В. Коваленко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 66-99.
6. Супрун, О. Д. Дослідження аварійних режимів роботи агрегатів безперебійного живлення блочно-модульних тягових підстанцій [Текст] / О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 77-84.
7. Супрун, О. Д. До питання впровадження джерел безперебійного живлення на тягових підстанціях при швидкісному русі [Текст] / О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко, О. В. Ушкалов // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 129-141.
8. Цихалевский, И. С. Определение оптимальных параметров технологического процесса ремонта тягового подвижного состава [Текст] / И. С. Цихалевский, О. И. Ветлугина, М. М. Кудаяров // Вестник УрГУПС. – 2011. – Вып. 4(12). – С. 31–38.

9. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования [Текст] / А. И. Ящура. – М. : Энас, 2008. – 360 с.

10. ЦЕ-0009. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № 1010-ЦЗ [Текст]. – К., 2004. – 82 с.

Супрун Олександр Данилович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: adsup@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>.

Семененко Олександр Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>.

Семененко Юрій Олександрович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>.

Кузьмін Станіслав Сергійович, магістрант, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.

Домарацький Вадим Ростиславович, магістрант, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.

Супрун Александр Данилович, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: adsup@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>.

Семененко Александр Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>.

Семененко Юрий Александрович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>.

Кузьмин Станислав Сергеевич, магистрант, кафедра электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Домарацкий Вадим Ростиславович, магистрант, кафедра электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Suprun Oleksandr Danylovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-74. E-mail: adsup@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>.

Semenenko Oleksandr Ivanovyvch, PhD (Tech.), associate professor, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>.

Semenenko Yurii Oleksandrovivch, PhD (Tech.), Senior lecturer, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>.

Kuzmin Stanislav Serhiyovych, master, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.

Domaratskyi Vadym Rostyslavovych, master, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 01.11.2018 р.