УДК 519.87:621.3-049.7

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ

Петренко А. М., *асистент кафедри електротехнічних систем*
Черкаський державний технологічний університет
18006, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 460, petrenko1969@ukr.net

Анотація. *Розкриваються процеси, що відбуваються в моделі технічного обслуговування за станом електротехнічних виробів.*

Ключові слова: *система контролю, об'єкт контролю, технічне обслуговування, процес, надійність, відмова.*

THE RESEARCH OF THE MODEL OF TECHNICAL MAINTENANCE AFTER THE STATE OF ELECTRIC ENGINEERING WARES

Petrenko A. N., *assistant of the Department of Electrical Systems*
Cherkasy State Technological University
18006, Cherkasy, Shevchenko Boulevard, 460, petrenko1969@ukr.net

Abstract. *In the article the processes which take place in the model of technical maintenance after the state of electric engineering wares are considered.*

Keywords: *control system, control object, technical maintenance, process, reliability, failure.*

Вступ. Нині найбільш перспективною вважається стратегія експлуатації технічних виробів за технічним станом [1]. Така стратегія вперше була обґрунтована в американській програмі MSG-1 стосовно технічної експлуатації літаків цивільної авіації. На відміну від попередньої стратегії експлуатації літаків за технічним ресурсом, стратегія експлуатації за технічним станом була більш економною. Саме економічні міркування були головними під час введення нової стратегії. З часом програма MSG-1 (Maintenance Specification Guide) була удосконалена і поступово замінена на програму MSG-2, а потім і на MSG-3. Відповідно до програми MSG-3 стратегія експлуатації авіаційної техніки за технічним станом поділяється на стратегію експлуатації з контролем параметрів і стратегію експлуатації за рівнем надійності [1]. Слід відзначити, що програма MSG-3 є достатньо універсальною і вона широко застосовується не тільки для авіаційної техніки, а й для іншої техніки, де важлива увага приділяється можливим наслідкам відмови зразка техніки.

Постановка проблеми. Кожна стратегія експлуатації повинна мати свою математичну модель, за допомогою якої вдається встановити залежність критерію ефективності технічного обслуговування зразка техніки від найбільш впливових чинників.

Побудові математичної моделі передує фізичний опис технічного обслуговування обраного зразка техніки, під час якого визначаються основні чинники, що найбільш суттєво впливають на його роботу [2]. Для математичного опису процесу технічного обслуговування електротехнічного зразка техніки необхідно визначити основні параметри, які характеризують поведінку системи в певних умовах. Вибір основних параметрів займає важливе місце під час побудови математичної моделі. При цьому необхідно передбачити можливість спостереження зміни параметрів у ході моделювання.

Важливе місце під час фізичного опису системи обслуговування зразка техніки займає вибір станів системи. Під станом об'єкта будемо розуміти сукупність кількісних значень, що описують об'єкт, і якісних ознак об'єкта.

Сукупність різних станів прийнято називати фазовим простором системи (ФПС [2]). Як ФПС може бути використана будь-яка множина елементів, які можна спостерігати і вимірювати. Функціонування реальної системи означає зміну станів системи. Для переходу до кількісного опису системи будемо вважати, що вона змінюється з часом стохастич-

но. Це означає випадковий характер зміни станів системи і випадковість часу перебування у станах. Тобто, зміна станів системи відбувається з певними ймовірностями переходів, а час перебування у станах є випадковим. Стохастичність системи не виключає наявність детермінованих переходів та детермінованого часу перебування у станах.

Метою роботи є дослідження моделі та аналіз процесів, що відбуваються в електротехнічних виробах, який передує побудові математичної моделі їх технічного обслуговування і має ознаки наукової новизни.

Виклад основного матеріалу. Процес технічного обслуговування електротехнічного зразка можна представити як послідовну зміну в часі різних станів. Під станами процесу технічного обслуговування будемо розуміти відповідні етапи технічної експлуатації, що характеризуються впливом на зразок техніки обслуговуючого персоналу, а саме: використання за призначенням, різні види технічного обслуговування і ремонту, діагностування, збереження тощо.

Модельований процес зручно представляти як випадковий процес з дискретними станами, тобто як процес, можливі стани якого можна перерахувати. Для реального процесу технічного обслуговування перехід зразка техніки з одного стану до інших можливий у будь-який момент часу. В зв'язку з цим модельований процес будемо розглядати як випадковий процес із безперервним часом, для якого перехід зразка техніки з одного стану до інших може бути здійснений у довільний момент часу. Інакше кажучи, процес технічного обслуговування електротехнічних зразків техніки будемо описувати випадковим процесом з дискретними станами і безперервним часом.

Як базову математичну модель технічного обслуговування електротехнічних зразків техніки будемо використовувати модель, яка опублікована в роботі [3]. Така модель показана на рис. 1.

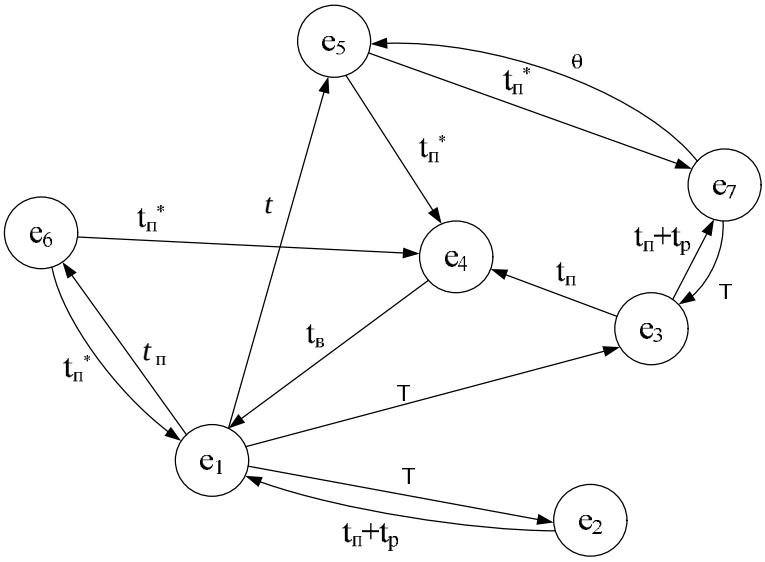

Рис. 1. Модель технічного обслуговування зразка електротехнічного обладнання

Розглянемо процес технічного обслуговування складного зразка електротехнічного обладнання за допомогою двох систем контролю (СК): СК-1 і СК-2. Система СК-1 призначена для проведення планового технічного обслуговування об'єкта контролю (ОК) з періодичністю *T*. Система СК-2 безперервно контролює працездатність ОК і подає сигнали про появу відмови. СК-2 порівняно з системою контролю СК-1 є простішою за своєю конструкцією і має нижчі показники достовірності контролю. В подальшому будемо використовувати такі показники достовірності:

1) достовірність контролю d – ймовірність правильного визначення технічного стану ОК;

2) достовірність прийняття рішення «ОК робочий» (справний) $d_г$ – ймовірність того, що визнаний робочим ОК дійсно робочий;

3) достовірність прийняття рішення «ОК неробочий» (несправний) $d_{нг}$ – ймовірність того, що визнаний неробочим ОК дійсно неробочий.

Зазначені показники достовірності можуть бути виражені через ймовірності появи

похибок контролю I і II роду a і b та апріорну ймовірність справного стану P_0 ОК:

$$d = (1-a)P_0 - (1-b)(1-P_0);$$

$$d_{\tilde{a}} = \frac{(1-a)P_0}{(1-a)+b(1-P_0)};$$

$$d_{\acute{i}\,\tilde{a}} = \frac{(1-b)(1-P_0)}{aP_0+(1-b)(1-P_0)}.$$

Модель, що показана на рис. 1, враховує такі стани ОК:

e_1 – ОК працює у справному стані;

e_2 – СК-1 використовується для проведення планового технічного обслуговування, яке розпочате при відсутності сигналу про відмову від системи контролю СК-2 (в ОК відмови немає);

e_3 – СК-1 використовується для проведення планового технічного обслуговування, яке розпочате при відсутності сигналу від системи контролю СК-2 (в ОК є відмова);

e_4 – системою обслуговування здійснюється позаплановий (аварійний) ремонт;

e_5 – СК-2 використовується для перевірки стану ОК: перевірка починається у випадковий момент часу t за сигналом від системи контролю (в ОК є відмова);

e_6 – СК-2 використовується для перевірки ОК: перевірка здійснюється у випадковий момент часу вступу $t_{\ddot{i}}$ надходження помилкового сигналу про відмову (в ОК відмови немає);

e_7 – ОК експлуатується за наявності прихованої відмови.

Стрілки вказують напрями переходів. Над стрілками позначені тривалості переходів з одного стану до іншого. На рис. 1 використано такі позначення:

T – період проведення технічного обслуговування;

$t_{пр}$ – тривалість перевірки ОК системою контролю СК-1;

t_n^* – тривалість перевірки ОК системою контролю СК-2;

$t_в$ – тривалість аварійного відновлення;

t_p – тривалість технічного обслуговування без урахування часу контролю;

t – випадковий час надходження сигналу від СК-2 про відмову, що з'явилася в ОК після стану e_1;

$t_п$ – випадковий час надходження помилкового сигналу від СК-2 про відмову, що з'явилася в ОК після стану e_1;

q – випадковий час надходження від СК-2 сигналу про відмову, що виникла в ОК після стану e_7.

Позначимо обмеження і припущення стосовно такої моделі:

1. Вважатимемо відомими функцію розподілу ймовірності безвідмовної роботи ОК $F(t)$, функцію розподілу ймовірності надходження помилкового сигналу про відмову $\hat{O}(t) = 1 - e^{-lt}$, де l – інтенсивність надходження сигналу про помилкову відмову.

2. Функція розподілу сигналів прояву прихованих відмов вважається експоненціальною з інтенсивністю $l_{пр}$.

3. Після появи відмови системного технічного обслуговування здійснюється повне відновлення ОК.

Для опису процесів, що відбуваються в системі обслуговування, припустимо, що в деякий початковий момент часу t_0 ОК знаходиться у стані e_1.

Існування стану e_7 пояснюється наявністю відмов, пропущених системами контролю СК-1 і СК-2 внаслідок того, що їх достовірності контролю відрізняються від одиниці. Приховані відмови через деякий час будуть проявлятися. Усі стани на рис. 1 сполучаються, поглинаючих станів немає. Математичний опис такої моделі здійснюється за допомогою напівмарківських випадкових процесів у їх класичному розумінні [2; 4].

Розглянемо випадковий процес $x(t)$, для якого відоме початкове значення $x(t_0)$. Будемо вважати, що процес $x(t)$ може набувати значення з деякої дискретної множини $E = \{e_0, e_1, \mathbf{K}\, e_n\}$. Розглянемо регенеративний процес. Нехай переходи зі стану e_i, $i = \overline{1,7}$, до e_j, $j = \overline{1,7}$, відбуваються з імовірністю $P_{ij} = P\{x_{n=1} = e_j / x_n = e_i\}$. Цей запис означає, що, якщо на n-му кроці випадковий процес буде у стані e_i, то на $n+1$-му кроці випадковий процес буде у стані e_j.

Вкладений в $x(t)$ марківський ланцюг має матрицю переходу P_{ij}. Крім імовірності переходів P_{ij}, задається випадкова величина x_{ij}, що являє собою час перебування процесу $x(t)$ у стані e_i, якщо наступним станом буде e_j, тобто $P = \{x_{ij} \le t\} = F_{ij}(t)$.

Такий випадковий процес $x(t)$, що визначається на дискретній множині станів за допомогою матриць P_{ij} та F_{ij}, будемо називати напівмарківським.

Тут доречно зазначити суттєву різницю між марківськими і напівмарківськими випадковими процесами. Для марківського випадкового процесу тривалість переходу зі стану e_i до стану e_j розподілена за експоненціальним законом. Для напівмарківського випадкового процесу тривалість переходу зі стану e_i до стану e_j може мати будь-який закон розподілу. Відмінність напівмарківського випадкового процесу від марківського полягає у вигляді функції тривалості переходу. Для напівмарківського випадкового процесу така функція може мати у загальному вигляді довільну функцію розподілу. Ця обставина суттєво покращує область застосування напівмарківського випадкового процесу. Наприклад, регламентом технічної експлуатації передбачається проводити профілактичні регламентні роботи через детерміновані інтервали часу. Цю обставину неможливо змоделювати в рамках марківського випадкового процесу, тому що для такого процесу тривалість переходу вважається розподіленою за експоненціальним значенням.

Нині напівмарківський випадковий процес вважається найбільш придатним для опису реального процесу експлуатації зразків техніки.

Покажемо траєкторію випадкового процесу, що моделює технічне обслуговування зразка електротехнічного обладнання. На рис. 2-3, що показані нижче, по осі ординат відкладені стани моделі, яка зображена на рис. 1. По осі абсцис відкладений поточний час. На рис. 2 показана реалізація випадкового процесу, що властива ідеальній системі технічного обслуговування.

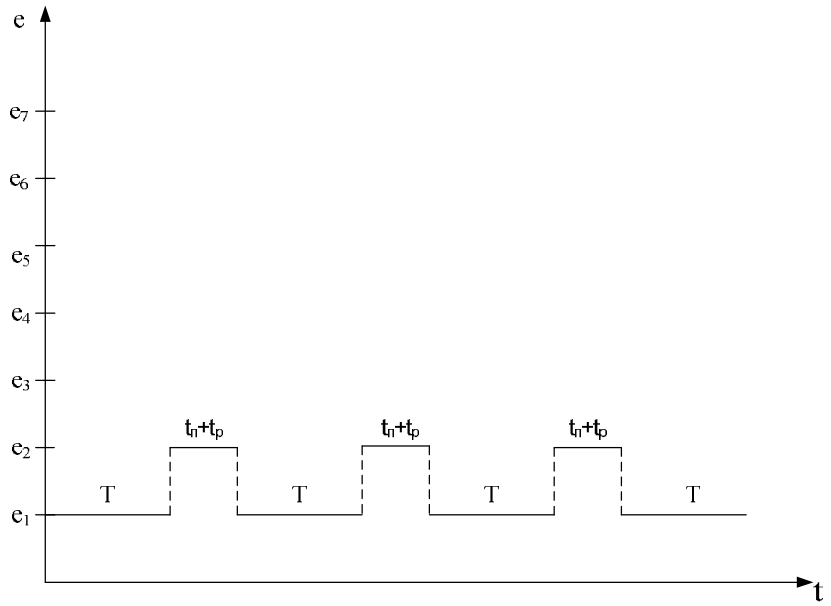

Рис. 2. Реалізація випадкового процесу для ідеальної системи технічного обслуговування зразка електротехнічного обладнання

В даній системі ОК протягом невипадкового часу T перебуває у стані e_1, далі відбувається контроль технічного стану з використанням СК-1 протягом часу $t_п$ та проведення профілактичних заходів тривалістю t_p. Після цього об'єкт експлуатується протягом часу T і ситуація повторюється багатократно. Введення моделі ідеальної системи технічно-

го обслуговування корисне тим, що показує, якою повинна бути така система в ідеальному вигляді. Реальна система технічного обслуговування суттєво відрізняється від ідеальної саме через урахування відмов, помилкових тривог, аварійне (а не заплановане) відновлення стану обладнання. Одна з можливих траєкторій випадкового процесу для реальної системи технічного обслуговування показана на рис. 3.

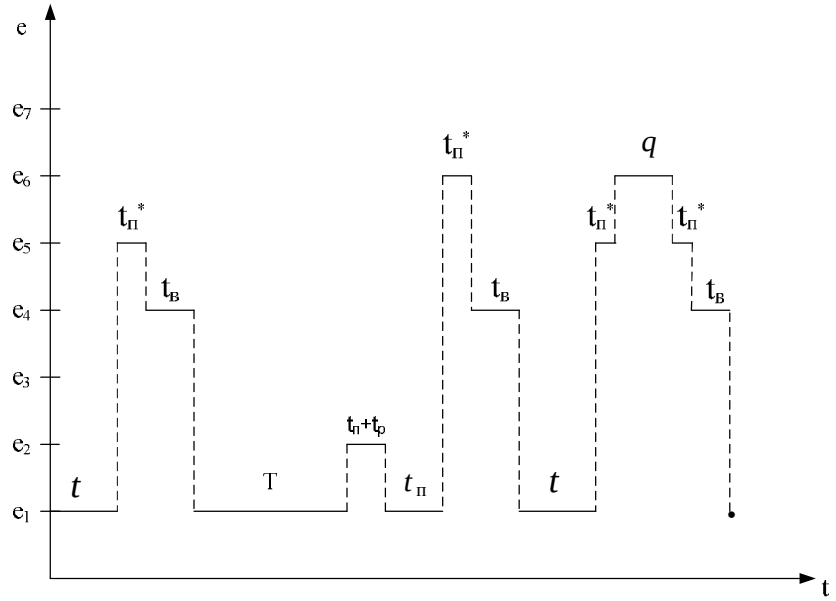

Рис. 3. Реалізація випадкового процесу, що властива для реальної системи технічного обслуговування

Пояснимо сутність траєкторії такого випадкового процесу. Вважаємо, що експлуатація ОК починається зі стану e_1. У випадкову мить t від вбудованої системи контролю (ВСК) надходить сигнал про ОК. Після цього миттєво відбувається перехід до стану e_5. За сигналом від ВСК підключається СК-2, яка протягом часу $t_п^*$ використовується для перевірки ОК. При цьому можуть використовуватися різні методи пошуку місця відмови. З досить високою ймовірністю СК-2 може встановити місце відмови. Далі відбувається перехід $e_5 \to e_4$. Після потрапляння випадкового процесу до стану e_4 відбувається повне відновлення ОК і здійснюється з ймовірністю одиниці перехід $e_4 \to e_1$. В системі технічного обслуговування відбувається регенерація ОК. Перехід випадкового процесу зі стану e_1 формально означає на часовій осі марківську точку. В цю мить вся попередня поведінка випадкового процесу не має жодного значення для майбутньої траєкторії випадкового процесу. Ця властивість випадкового процесу називається відсутністю післядії. Умова відсутності післядії – суттєва умова простішого потоку. Формально відсутність післядії означає можливість застосування напівмарківського випадкового процесу.

Слід зазначити, що в реальних зразках електрообладнання не відбувається повного відновлення його властивостей після відмови. Але це припущення дає можливість застосувати напівмарківський випадковий процес для отримання корисних для практики рекомендацій.

Після потрапляння випадкового процесу до стану e_1 ОК протягом часу T працює безвідмовно. Далі здійснюється контроль технічного стану ОК з використанням СК-1 протягом часу $t_п$ і виконання деяких профілактичних робіт протягом часу t_p. Випадковий процес знову приходить до стану e_1. Далі у мить $t_п$ від ВСК надходить сигнал про помилкову тривогу і ОК потрапляє до стану e_6. Після перевірки протягом часу $t_п^*$ СК-2 може бути прийнято помилкове рішення і відбудеться перехід $e_6 \to e_4$, а далі перехід протягом часу $t_в$ $e_4 \to e_1$.

Для наочності використання всіх станів моделі на рис. 2 показано, що через випадковий час t далі відбувається перехід $e_1 \to e_3$ зі стану e_3, після перевірки ОК системою контролю СК-2 може бути прийнято помилкове рішення, що ОК справний, тобто буде перехід $e_5 \to e_7$. Насправді ОК знаходиться у стані прихованої відмови, яка з'явиться у мить q. Зі стану e_7 може відбутися перехід до стану e_5 за час $t_{\text{п}}^*$, звідси до стану e_4, а потім до стану e_1.

Висновки:

1. У роботі викладено основні фізичні міркування щодо сутності процесу технічного обслуговування електротехнічного обладнання, які покладені в основу стратегії його експлуатації за технічним станом.

2. Досліджено процеси у моделі технічного обслуговування електротехнічного обладнання за технічним станом з використанням помилок першого і другого роду. Врахування помилок першого і другого роду пояснюється недосконалістю систем контролю.

3. Наведено результати щодо застосування напівмарківського випадкового процесу, що є найбільш сучасним апаратом дослідження складних технічних систем.

4. В подальших дослідженнях будуть розглянуті застосування дифузійно-немонотонного закону розподілу як моделі відмов зразків електротехнічного обладнання стосовно моделі, що показана на рис. 1.

Список літератури

1. Смирнов Н. Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / Н. Н. Смирнов, А. А. Ицкович. – [Изд 2-е, перераб. и дополн.]. – М. : Транспорт, 1987. – 272 с.
2. Королюк В. С. Полумарковские процессы и их приложения / В. С. Королюк, А. Ф. Турбин. – К. : Наукова думка, 1976.
3. Синица М. А. Об одной модели обслуживания технических объектов с помощью двух систем контроля / М. А. Синица, П. М. Яблонский // Основные вопросы теории и практики надежности : сб. трудов семинара Науч. совета по проблемам надежности Отд-ния механики и процессов управления АН СССР, Берг, [др.]. – М. : Советское радио, 1975. – 408 с.
4. Герцбах И. Б. Модели профилактики / И. Б. Герцбах – М. : Советское радио, 1969. – 214 с.

References

1. Smirnov, N. N. and Ickovich, A. A. (1987) Obsluzhivanie i remont aviacionnoj tehniki po sostojaniju. Izd 2-e, pererab. i dopoln. Moskva: Transport, 272 p. [in Russian]
2. Koroljuk, V. S. and Turbin, A. F. (1976) Polumarkovskie processy i ih prilozhenija. Kiev: Naukova dumka. [in Russian]
3. Sinica, M. A. and Jablonskij, P. M. (1975) Ob odnoj modeli obsluzhivanija tehnicheskih objektov s pomoshh'ju dvuh sistem kontrolja // *Osnovnye voprosy teorii i praktiki nadezhnosti*: Sbornik trudov seminara Nauch. soveta po problemam nadezhnosti Otd-nija mehaniki i processov upravlenija AN SSSR, Berg, [dr.]. Moskva: Sovetskoe radio, 408 p. [in Russian]
4. Gercbah, I. B. (1969) Modeli profilaktiki. Moskva: Sovetskoe radio, 214 p. [in Russian]