

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАСТРОЮВАННЯ СКЛАДНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ТА ЇЇ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН ПРИ ПРОВЕДЕННІ РЕМОНТУ У РЕМОНТНОМУ ОРГАНІ

В статті запропонована розроблена математична модель настроювання складної радіоелектронної техніки та її складових частин при проведенні ремонту в ремонтному органі. Модель дозволяє формалізувати процес настроювання складної радіоелектронної техніки та її складових частин враховуючи його особливості виконання у ремонтному органі в умовах впливу факторів, які знецінюють роботу.

In the article the offered is developed mathematical model of tuning and test of difficult radio electronic technique and its component parts during the leadthrough of repair in a repair organ. A model allows to formalize the process of tuning and test of difficult radio electronic technique and its component parts, taking into account him the feature of implementation in a repair organ in the conditions of influence of factors which cheapen work.

Ключові слова: складна радіоелектронна техніка, складові частини настроювання, ремонтний орган, ремонт.

Вступ

Виконання настроювання складної радіоелектронної техніки (РЕТ) та її складових частин (СЧ) при проведенні ремонту вирішується за допомогою ремонтних органів (РО). Час настроювання складної РЕТ та її СЧ у значній мірі залежить від низки факторів: характеристик і можливостей спеціального обладнання і устаткування та його готовності, від рівня підготовки та кваліфікації ремонтного персоналу, особливостей функціонування РО. Доведено, що вплив перелічених факторів носить ймовірнісний характер [1–3].

Аналіз показав, що процесу настроювання складної радіоелектронної техніки та її складових частин властиві великі часові втрати корисного часу, які дуже часто перевищують припустимі нормативні показники та в кінцевому разі можуть призводити до зриву вчасного виконання ремонту в цілому.

Це обумовлено недосконалістю процесу проведення настроювання та необхідністю врахування вказаних факторів та їх ймовірнісного впливу на процес настроювання складної РЕТ та її СЧ при його математичному описі. Існуючі математичні моделі процесу ремонту [4–6] не в повній мірі враховують їх ймовірнісний вплив та не можуть бути прийнятними для опису виконання настроювання складної РЕТ та її СЧ у РО.

Отже *метою статті* є розробка відповідної математичної моделі настроювання складної РЕТ та її СЧ при проведенні ремонту у РО яка враховує ймовірнісний вплив вказаних факторів на виконання настроювання з метою їх кількісної та якісної оцінки яка дозволить більш обґрунтовано підходити до виконання підвищити ефективність як настроювання так і ремонту складної РЕТ у цілому.

Постановка задачі дослідження. Для цього розробимо відповідну математичну модель настроювання складної РЕТ та її СЧ при проведенні ремонту у РО.

Процес виконання настроювання складної РЕТ та її СЧ при проведенні ремонту у РО представимо у вигляді відновленої системи з часовою надмірністю [2]. Для виконання завдання з настроювання надається понад мінімального необхідного (основного) часу $t_{3н}$ ще й резервний час $t_{рн}$, так що припустимий час $t_n = t_{3н} + t_{рн}$. Виходячи з нормативних документів припустимий час виконання настроювання t_n – відома, детермінована, постійна величина. При виконанні настроювання, тривалість якого в ідеальних умовах – $t_{3н}$, можлива поява затримок. Затримки при виконанні настроювання складної РЕТ та її СЧ виникають по причині збоїв та неготовності спеціального оснащення і устаткування, дефектів і невідповідності параметрів відремонтованої складної РЕТ і її СЧ нормативно-технічній та (або) конструкторській документації, недотримання або порушення технічних умов і вказівок щодо виконання настроювання, помилками ремонтно-експлуатаційного персоналу.

Зазначимо, що в цьому випадку вплив фактора, який викликає затримку при виконанні настроювання буде носити ймовірнісний характер, та створювати умови, які можуть привести до простоїв, пов'язаних з повторенням операцій настроювання складної РЕТ та її СЧ, яка виконана раніше. Порядок проведення операцій настроювання передбачає комплексне виконання всього переліку робіт відповідно до нормативних документів. Невиконання будь-якої операції буде спричиняти затримку та викликати знецінювання всієї виконаної раніше роботи та повторення настроювання складної РЕТ та її СЧ спочатку. Тоді наробіток між затримками при настроюванні $t_{0н}$ і час поновлення настроювання $t_{Вн}$ при впливі фактору i -го типу – взаємно незалежні ВВ із відомими або заданими ФР $F_n(t)$ та $F_{Вн}(t)$, що мають кінцеві МОЧ. Щодо продовження виконання настроювання після поновлення приймемо наступні припущення: у момент закінчення поновлення настроювання складної радіоелектронної техніки з імовірністю p_i ($0 \leq p_i \leq 1$) триває з урахуванням попередніх операцій або з імовірністю $1 - p_i$ починається із самого початку Резерв часу при цьому витрачається не тільки на поновлення настроювання складної РЕТ та її СЧ, але і на повторення знецінених операцій.

Настроювання вважається виконаним, якщо протягом часу t_{3H} у процесі виконання не буде виникати затримок або сумарний час простою при поновленні настроювання $t_{ПРН}$ виявиться меншим резервного часу $t_{РН}$, і настроювання буде проходити без затримок після поновлення протягом часу t_{3H} . Внаслідок виникнення затримок реальний час виконання настроювання стає ВВ $t_{В3H}$ із невідомою ФР.

В якості показника за яким буде оцінюватися якість виконання настроювання обрано ймовірність виконання настроювання за припустимий час $t_H \geq t_{3H}$ при її одноетапному виконанні, а також математичне сподівання реального часу виконання настроювання $t_{В3H}$.

Основна частина. Перейдемо до знаходження ФР $P\{t_{В3H} < t_H\}$ часу $t_{В3H}$ першого досягнення процесом $Z(t)$ фіксованого рівня $t_{В3H}$, що при заданих значеннях t_{3H} і t_H визначає шукану ймовірність виконання настроювання за припустимий час $t_H \geq t_{3H}$ $P_H = P(t_{3H}, t_H) = P\{t_{В3H} < t_H\}$.

З огляду на те, що час виконання настроювання $t_{В3H}$ пов'язаний із сумарним часом $t_{ПРН}$ простою на відновленні (затримці виконання настроювання РЕТ) очевидною рівністю $t_{В3H} = t_{3H} + t_{ПРН}$, представимо ймовірність виконання настроювання за припустимий час, як ймовірність $P(t_{3H}, t_{РН})$ того, що сумарний час простою $t_{ПРН}$ менше виділеного резерву часу $t_{РН} = t_H - t_{3H}$, тобто

$$P_H = P(t_{3H}, t_{РН}) = P\{t_{ПРН} < t_{РН}\}.$$

Отже, припустимо, що в ході виконання настроювання складної РЕТ та її СЧ виникають затримки, збої N типів $i = 1, N$, а наробіток між затримками при виконанні настроювання складної складної РЕТ та її

СЧ i -го типу розподілений за експоненціальним законом з параметром I_{Hi} , $I_H = \sum_{i \geq 1} I_{Hi}$, тобто для спрощення прийmemo $F_{Hi}(t) = 1 - \exp(-I_{Hi}t)$, $t > 0$, $p_i \neq 0$, ФР часу поновлення $F_{ВHi}(t)$. [1, 2, 3]. Введемо кілька позначень, необхідних надалі. Нехай є ряд невід'ємних чисел $C_i \geq 0$ таких, що $\sum_i C_i = 1$

($i \geq 1$), і послідовність ВВ q із ФР $A_i(t)$ ($i \geq 1$). Тоді під

$$\begin{cases} q_1 \text{ з ймовірністю } C_1 \\ q_2 \text{ з ймовірністю } C_1 \\ \dots \\ q_i \text{ з ймовірністю } C_i \end{cases} \quad (1)$$

будемо розуміти ВВ z із ФР

$$A_0(t) = P\{z < t\} = \sum_i C_i A_i(t), \quad i \geq 1. \quad (2)$$

У роботі [3] показано, що функціонування такої системи при виконанні робіт на j -му етапі може бути описано однорідним марковським процесом. Використовуючи це з врахуванням прийнятих вихідних передумов, а також вирази (1), (2) і формулу повної ймовірності, запишемо наступне стохастичне співвідношення:

$$t_{В3H}(x) = \Delta t + \begin{cases} t_{В3H}(x + \Delta t) \text{ з ймовірністю } (1 - I_H \Delta t) + O(\Delta t), \\ t_{В3H}(x) + t_{ВH} \text{ з ймовірністю } \sum_{i=1}^N p_i I_{Hi} \Delta t + O(\Delta t), \\ t_{В3H}(0) + t_{ВH} \text{ з ймовірністю } \sum_{i=1}^N (1 - p_i) I_{Hi} \Delta t + O(\Delta t), \end{cases} \quad (3)$$

де $t_{В3H}(x)$ – час виконання настроювання за умови, що у момент початку розгляду настроювання процес вже виконувався протягом часу x ($x \geq 0$);

$t_{В3H}(0) = t_{В3H}$ – час виконання операцій настроювання за умови, що $x = 0$;

$O(\Delta t)$ – величина другого порядку малості у порівнянні у Δt

Позначаючи

$$f(S, x) = M \exp(-St_{В3H}(x)), \quad f(S) = M \exp(-St_{В3H}),$$

і переходячи в (3) до перетворення Лапласа – Стілтьєса, одержуємо

$$f(S, x) = (1 - S\Delta t)\{f(S, x + \Delta t)(1 - I\Delta t) + f(S, x)\Delta t p I P_{\text{Вн}}^{\%}(S) + f(S)\Delta t(1 - p)I P_{\text{Вн}}^{\%}(S) + O(\Delta t)\}.$$

Звідки після нескладних перетворень приходимо до диференціального рівняння:

$$\frac{df(S, x)}{dx} = f(S, x)R(S) - f(S)W(S), \quad (4)$$

де

$$R(S) = S + I_{\text{н}} - \sum_{i \geq 1} p_i I_{\text{н}i} P_{\text{Вн}i}^{\%}(S), \quad (5)$$

$$W(S) = \sum_{i \geq 1} (1 - p_i) I_{\text{н}i} P_{\text{Вн}i}^{\%}(S), \quad (6)$$

$$P_{\text{Вн}i}^{\%}(S) = \int_0^{\infty} \exp(-St) dF_{\text{Вн}i}(t), \quad (7)$$

Застосовуючи метод варіації постійних [7] і враховуючи, що $f(S, t_{3\text{н}}) \equiv 1$, з (4) одержуємо співвідношення:

$$f(S, x) = \exp[R(x)(x - t_{3\text{н}})] + f(S)[1 - \exp(R(S)(x - t_{3\text{н}}))]W(S) / R(S),$$

з якого, вважаючи $x = 0$ й $f(S, 0) = f(S)$, знаходимо перетворення Лапласа – Стілтєса $f(S)$ ФР $P_1(t_{3\text{н}}, t_{\text{н}})$ ВВ $t_{3\text{н}}$ часу виконання настроювання за припустимий час у наступному виді:

$$f(S) = \exp[-(t_{3\text{н}})R(S)] \left\{ 1 - \frac{W(S)}{R(S)} [1 - \exp(-(t_{3\text{н}})R(S))] \right\}^{-1}. \quad (8)$$

У випадку, коли час поновлення настроювання складної РЕТ та її СЧ $t_{\text{Вн}i}$ після затримки при виконанні настроювання i -го типу розподілено за експоненціальним законом з параметром $m_{\text{н}i}$ одержимо:

$$P_{\text{Вн}i}^{\%}(S) = \frac{m_{\text{н}i}}{m_{\text{н}i} + S}, \quad (9)$$

Враховуючи (5), (6), (9) формула (8) приймає вигляд:

$$f(S) = \frac{\left[S + I_{\text{н}} - \sum_{i \geq 1} \frac{p_i I_{\text{н}i} m_{\text{н}i}}{m_{\text{н}i} + S} \right] \exp \left\{ -t_{3\text{н}} \left[S + I_{\text{н}} - \sum_{i \geq 1} \frac{p_i I_{\text{н}i} m_{\text{н}i}}{S + m_{\text{н}i}} \right] \right\}}{S + I_{\text{н}} - \sum_{i \geq 1} \frac{p_i I_{\text{н}i} m_{\text{н}i}}{S + m_{\text{н}i}} - \sum_{i \geq 1} \frac{(1 - p_i) I_{\text{н}i} m_{\text{н}i}}{S + m_{\text{н}i}} \left(1 - \exp \left\{ -t_{3\text{н}} \left[S + I_{\text{н}} - \sum_{i \geq 1} \frac{p_i I_{\text{н}i} m_{\text{н}i}}{S + m_{\text{н}i}} \right] \right\} \right)} \right)}. \quad (10)$$

Розкладаючи (10) у ряд за степенями експоненти і переходячи до оригіналу, можна одержати формулу для ймовірності виконання настроювання складної РЕТ та її СЧ за припустимий час – $P_{\text{д}}(t_{\text{д}})$, у явному вигляді. Однак ця формула дуже громізка і тут не наводиться. Одержимо відносно простий та зручний для розрахунків вираз, що викликає інтерес в інженерній практиці. Допустимо, час поновлення виконання настроювання складної радіоелектронної техніки настільки малий порівняно з мінімально необхідним часом $t_{3\text{н}}$ для виконання настроювання, що ним можна практично знехтувати. У цьому випадку у виразах (5) і (6) варто підставити $P_{\text{Вн}}^{\%}(S) \equiv 1$, $i > 0$, і формули (8) і (9) помітно спростяться:

$$f(S) = \frac{(S + a) \exp[-t_{3\text{н}}(S + a)]}{S + a \exp[-t_{3\text{н}}(S + a)]}, \quad a = I_{\text{н}} - \sum_{i \geq 1} p_i I_{\text{н}i}. \quad (11)$$

Розкладаючи (11) за ступенями експоненти і виконуючи зворотне перетворення, знаходимо формулу для $P_{\text{н}} = P(t_{3\text{н}}, t_{\text{н}}) = P\{t_{3\text{н}} < t_{\text{н}}\}$ ймовірності виконання настроювання за припустимий час

$$P(t_{3\text{н}}, t_{\text{н}}) = \sum_{i=0}^{\lfloor t_{\text{н}}/t_{3\text{н}} \rfloor - 1} (-1)^i e^{-(i+1)at_{3\text{н}}} \frac{a^i}{i!} [t_{\text{н}} - (i+1)t_{3\text{н}}]^i \times, \quad (12)$$

$$+ \{1 + a[t_{\text{н}} - (i+1)t_{3\text{н}}] / (i+1)\}, \quad 0 \leq p_i \leq 1.$$

де запис $\lfloor t_{\text{н}} / t_{3\text{н}} \rfloor$ означає операцію округлення частки $t_{\text{н}} / t_{3\text{н}}$ до цілого (меншого) числа.

При одному типі $i = 1$ затримок, що знецінюють, при виконанні настроювання складної РЕТ та її СЧ при проведенні ремонту у РО вираз для ймовірності виконання настроювання за припустимий $t_{\text{н}}$ час (3.13) набуде вигляду:

$$P(t_{3H}, t_H) = \sum_{i=0}^{\lfloor t_H/t_{3H} \rfloor - 1} (-1)^i e^{-(i+1)(1-p)I_H t_{3H}} \frac{[(1-p)I_H]^i}{i!} \times \\ \times [t_H - (i+1)t_{3H}]^i \{1 + (1-p)I_H [t_H - (i+1)t_{3H}] / (i+1)\}, \quad 0 \leq p \leq 1.$$

Використовуючи співвідношення:

$$\bar{t}_{B3H} = f'(S)|_{S=0},$$

і формулу (10), знайдемо МОЧ \bar{t}_{B3H} часу виконання настроювання.

Зокрема, для середнього часу виконання настроювання при затримках, що знецінюють, і одноетапному виконанні одержуємо наступну формулу для \bar{t}_{B3H} :

$$\bar{t}_{B3H} = \frac{1}{a} \left\{ 1 + \sum_{i \geq 1} I_{Hi} \bar{t}_{BHi} - e^{-at_{3H}} \left[\sum_{i \geq 1} I_{Hi} \bar{t}_{BHi} (1-p_i) + at_{3H} \left(1 + \sum_{i \geq 1} I_{Hi} p_i \bar{t}_{BHi} \right) \right] \right\} - \\ - \left(1 + \sum_{i \geq 1} I_{Hi} p_i \bar{t}_{BHi} \right) (1 - I t_{3H}) e^{-at_{3H}}, \quad 0 \leq p_i \leq 1 \quad (13)$$

При одному типі $i=1$ затримок, що знецінюють, у виконанні настроювання вираз для середнього часу виконання настроювання складної РЕТ та її СЧ при проведенні ремонту у РО (13) набуде вигляду:

$$\bar{t}_{B3H} = \frac{1}{I_H(1-p)} (1 + I_H \bar{t}_{BH}) (e^{I_H t_{3H} (1-p)} - 1), \quad 0 \leq p \leq 1, \quad (14)$$

Для випадку, коли час поновлення настроювання дуже малий порівняно з мінімальним часом виконання настроювання і ним можна практично знехтувати, формула (14) помітно спрощується

$$\bar{t}_{B3H} = \frac{1}{a} (e^{t_{3H} a} - 1),$$

Висновки. Таким чином, розроблено математичну модель настроювання складної РЕТ та її СЧ при проведенні ремонту у РО і одержано аналітичні вирази в явному вигляді для обраних показників ефективності виконання настроювання: ймовірності виконання настроювання за припустимий час t_H та середнього часу виконання настроювання \bar{t}_{B3H} . Математична модель дозволяє формалізувати процес настроювання складної РЕТ та її СЧ при проведенні ремонту у РО в умовах ймовірнісного впливу факторів, які можуть знецінюють виконану роботу. Модель може використовуватися для раціонального планування процесу настроювання складної РЕТ та її СЧ при проведенні ремонту у РО буд-якої складності (поточного, середнього, за технічним станом).

Література

1. Ковтуненко М.А., Шишанов В.В., Зубарев В.В. Основы теории восстановления эксплуатационных свойств технических систем / Ковтуненко М.А., Шишанов В.В., Зубарев В.В. – К. : Книжкове вид-во НАУ, 2007. – 296 с.
2. Надежность и эффективность в технике : справочник в 10 т. / Под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембезы. – М. : Машиностроение, 1988. – Т. 5. – 316 с.
3. Буяло О.В. Математичні моделі середнього ремонту сучасних радіоелектронних засобів озброєння, що проводиться у військових ремонтних органах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 20.02.14 / ВІКНУ – К., 2005. – 23 с.
4. Браун В.О. Методика оптимізації параметрів системи планових ремонтів радіоелектронної техніки / В.О. Браун, С.В. Ленков, М.І. Резніков // 36. наук. пр. Одеського ін-ту Сухопутних військ. – Одеса : ОІСВ, 2005. – № 10. – С. 17 – 21.
5. Ушаков И.А. Территориально-распределенная система технического обслуживания и ремонта / И.А. Ушаков, В. Пушер // Методы менеджмента качества. – 2002. – № 2. – С. 32–36.
6. Lenkov S.V. Formalization of process of carrying out of repair of components of radio-electronic equipment / S.V. Lenkov, V.V. Zubarev, R.M. Salimov, V.A. Protsenko // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси, 2009. – С. 20–22.
7. Справочник по математике: для научных сотрудников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн ; пер. с англ. – М. : Наука, 1978. – 832 с.

Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.
Надійшла 18.2.2012 р.