

УДК 631.83.004

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕРМІНІВ РЕМОНТНИХ РОБІТ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТРОКІВ СЛУЖБИ КОНТАКТІВ РОЗБІРНОГО ТИПУ ЗА УМОВ НЕПОВНОТИ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

В. В. Козирський¹, І. П. Ткачук², С. М. Волошин¹, І. І. Слушний³

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

²Науково-дослідний центр «Інноваційні технології», компанія «МЕГА СІБ груп», Україна.

³Регіональна філія «Південно-Західна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця», Україна.

Кореспонденція авторів: kozyskyivv@gmail.com, megacibgroup@gmail.com.

Історія статті: отримано – травень 2018, акцентовано – вересень 2018.

Бібл. 1, рис. 6, табл. 0.

Анотація. Розбірні контактні з'єднання є найбільш численними елементами електроустановок. Працездатність контактів, їх надійність у значній мірі залежить від режимів електричного струму і температури, контактного тиску та ін. Зміна режимів і тривалість експлуатації призводять до зростання перехідного опору контактів, температури їх нагрівання і можливого теплового руйнування. Традиційними засобами для регулювання тиску в контактах при зміні температурного режиму є сталі тарілчасті пружини. Попередніми дослідженнями встановлено, що ці засоби тільки частково вирішують проблему регулювання контактного тиску. Альтернативою традиційним засобам є інноваційна розробка засобів динамічного управління тиском на основі використання функціональних сплавів з ефектом пам'яті форми.

У роботі проведено математичний аналіз термінів проведення ремонтних робіт та строків служби контактів розбірного типу з використанням теорії ймовірності за умов неповноти вихідної інформації. Дослідженнями обґрунтовано, що застосування динамічного методу управління термомеханічним режимом розбірних контактів дозволяє стабілізувати тиск та подовжити термін експлуатації розбірних контактів у 3-4 рази.

Ключові слова: розбірні електричні контакти, перехідний опір, функціональні сплави з ефектом пам'яті форми, теорія ймовірності, нерівності Чебишева.

Постановка проблеми

Традиційні етапи ймовірного аналізу випадкових подій у технічних системах передбачають знання вихідних величин у вигляді статистичної інформації.

Однак отримати достатній об'єм достовірної інформації, яка дасть можливість визначити узагальнені коректні оцінки випадкових подій, практично неможливо.

Тому ймовірнісний аналіз пропонується здійснювати на основі таких положень:

- базуючись на численних результатах статистичного аналізу випадкових факторів, які будуть фігурувати у подальшому в математичних моделях, приймається ствердження, що розподіл ймовірності випадкових факторів визначається законом Гауса (нормальний закон розподілу);

- область можливих значень випадкових факторів задається інтервалами (наприклад, за методом експертних оцінок спеціалістів);

- ймовірнісна оцінка інтервалів функції випадкових факторів за прийнятих умов неповноти вихідної інформації визначається за нерівністю Чебишева;

- проводиться аналіз чутливості ймовірного значення функції при різних законах розподілу ймовірності випадкових факторів (з метою порівняння).

Аналіз останніх досліджень

Обґрунтування термінів ремонтних робіт та прогнозування строків служби контактів розбірного типу передбачає наступні узагальнені умови: граничні значення відносної величини перехідного опору для проведення ремонтних робіт контактів приймається $R_{\text{пер}}^* = 2$, строку служби контактів – $R_{\text{пер}}^* = 3$ [1]; врахування впливу на ймовірнісну величину термінів всіх факторів, що носять випадковий характер.

Результати досліджень

В основу аналізу задачі обґрунтування термінів доцільно покласти математичну модель, яка дає можливість моделювати процес старіння контактів у часі.

Після відповідних її перетворень відносно часу t , отримаємо:

$$t = \frac{9,006 \cdot 10^{-6} \cdot N^2 (R_{\text{пер}} - 1)^2 \left[1 - \left(\frac{x_3}{640} \right)^{0,666} \right]^2}{D \cdot R_{\text{пер}}^2 \left[\exp \left(\frac{-U}{K \cdot x_1} \right) \right]^3 \cdot x_2^2 \cdot x_4^2 \cdot x_5^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{x_1}{640} \right)^{0,666} \right]^2}, \quad (1)$$

де $x_1 = \theta$; $x_2 = t_m$; $x_3 = \theta_0$; $x_4 = S_{\text{мш}}$; $x_5 = H_{\text{окд}}$.
У подальшому дані чинники будуть представлені інтервалами:

$$\theta \in (\alpha_1; \beta_1); t_m \in (\alpha_2; \beta_2); \theta_0 \in (\alpha_3; \beta_3); \\ S_{\text{мш}} \in (\alpha_4; \beta_4); H_{\text{окд}} \in (\alpha_5; \beta_5).$$

Відповідно до запису рівняння (1) щільність ймовірності сумісного здійснення декількох незалежних факторів буде:

$$p(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \prod_{i=1}^5 p_i(x_i), \quad (2)$$

де щільність ймовірності випадкового фактору при нормальному законі розподілу (за законом Гауса):

$$p_i(x) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2 \cdot \pi} C_i} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(x - m_i)^2}{2 \sigma_i^2} \right] \right\}; \quad (3)$$

$$C_i = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \exp \left[-\frac{(x - m_i)^2}{2 \sigma_i^2} \right] \cdot dx; \quad (4)$$

$$m_i = \frac{\alpha_i + \beta_i}{2}; \sigma_i = \frac{k \cdot (\beta_i - \alpha_i)}{20}; i = \overline{1,5}; k = \overline{1,7}.$$

При рівномірному розподілі щільності ймовірності випадкових величин:

$$p(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \prod_{i=1}^5 p_i, \\ p_i = \frac{1}{\beta_i - \alpha_i}.$$

Математичне сподівання часу t :

$$Mt = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \int_{\alpha_3}^{\beta_3} \int_{\alpha_4}^{\beta_4} \int_{\alpha_5}^{\beta_5} t(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) p(x_1) p(x_2) p(x_3) p(x_4) p(x_5) dx_1 \dots dx_5 = \quad (5)$$

$$= \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \int_{\alpha_3}^{\beta_3} \int_{\alpha_4}^{\beta_4} \int_{\alpha_5}^{\beta_5} \frac{9,006 \cdot 10^{-6} \cdot N^2 (R_{\text{пер}} - 1)^2 \left[1 - \left(\frac{x_3}{640} \right)^{0,666} \right]^2}{D \cdot R_{\text{пер}}^2 \left[\exp \left(\frac{-U}{K \cdot x_1} \right) \right]^3 \cdot x_2^2 \cdot x_4^2 \cdot x_5^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{x_1}{640} \right)^{0,666} \right]^2} \times$$

$$\times p(x_1) p(x_2) p(x_3) p(x_4) p(x_5) dx_1 \dots dx_5$$

$$Mt^2 = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \int_{\alpha_3}^{\beta_3} \int_{\alpha_4}^{\beta_4} \int_{\alpha_5}^{\beta_5} t^2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) p(x_1) p(x_2) p(x_3) p(x_4) p(x_5) dx_1 \dots dx_5 =$$

$$\int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \int_{\alpha_3}^{\beta_3} \int_{\alpha_4}^{\beta_4} \int_{\alpha_5}^{\beta_5} \frac{9,006^2 \cdot 10^{-12} \cdot N^4 (R_{\text{пер}} - 1)^4 \left[1 - \left(\frac{x_3}{640} \right)^{0,666} \right]^4}{D^2 \cdot R_{\text{пер}}^4 \left[\exp \left(\frac{-U}{K \cdot x_1} \right) \right]^6 \cdot x_2^4 \cdot x_4^4 \cdot x_5^4 \cdot \left[1 - \left(\frac{x_1}{640} \right)^{0,666} \right]^4} \times$$

$$\times p(x_1) p(x_2) p(x_3) p(x_4) p(x_5) dx_1 \dots dx_5$$

Середнє квадратичне відхилення часу обчислюється за виразом:

$$\sigma_t = \sqrt{Mt^2 - (Mt)^2}. \quad (7)$$

Відповідно до прийнятих положень аналізу ймовірнісну чисельну оцінку інтервалів часу t за умов неповноти вихідної інформації отримаємо з використанням нерівності Чебишева.

Для умови:

$$P\{|t - Mt| \leq k \cdot \sigma_t\} \geq 1 - \frac{1}{k^2}, \quad P \geq 0,95 \Rightarrow k = \sqrt{20}, \quad (8)$$

інтервал часу (ймовірності $P \geq 0,95$) буде визначатись:

$$Mt - \sqrt{20} \cdot \sigma_t \leq t \leq Mt + \sqrt{20} \cdot \sigma_t. \quad (9)$$

Обчислювальний експеримент ймовірностей інтервалів часу t досягнення перехідним опором граничних значень $R_{\text{пер}}^* = 2$ та $R_{\text{пер}}^* = 3$, розглянуто на прикладі контактної системи розбірного типу алюмінієвих шин. При цьому передбачається врахування різного характеру вихідних даних: детерміновані; випадкові з нормальним законом розподілу; випадкові з рівномірним розподілом щільності; детерміновані і випадкові з різними законами розподілу. Вихідні дані: $N=16000$ Н; $K=1,33 \cdot 10^{-23}$; $D=10^{-4}$; $U=0,5 \cdot 10^{-21}$; $\theta \in [25; 100]$; $t_m \in [0,5; 0,55]$; $\theta_0 \in [5; 30]$; $S_m \in [0,25; 0,3]$; $H_0 \in [450; 550]$.

На рис. 1 представлено результати розрахунку інтервалів часу при умові нормального розподілу щільності ймовірності випадкових факторів. Із рис. 1 видно, що еволюція перехідного опору у часі (при умові стабілізації контактного тиску) з ймовірністю $P \geq 0,95$ досягне рівня $R_{\text{пер}}^* = 2$, на протязі відрізка часу $t = 6369 \dots 7871$ годин, та відповідно рівня $R_{\text{пер}}^* = 3$, – на протязі відрізка часу $t = 11323 \dots 13994$ годин.

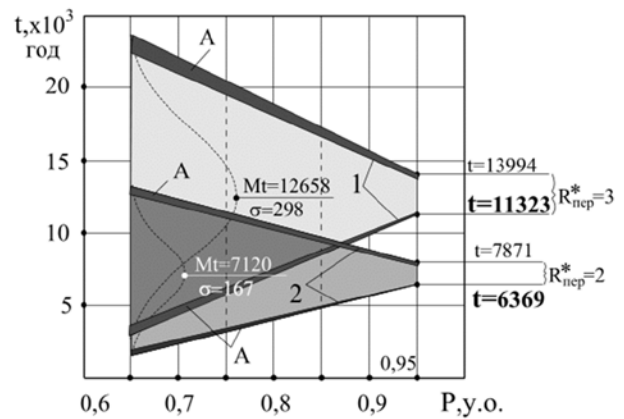


Рис. 1. Залежність інтервалу часу t від величини ймовірності для: 1 – $R_{\text{пер}}^* = 2$, 2 – $R_{\text{пер}}^* = 3$.

Для класичної моделі контакту без пристроїв управління тиском із сплаві з ефектом пам'яті форми аналогічні показники становлять, відповідно – 1993 годин та 3094 годин. У подальшому в якості експлуатаційних показників часу проведення ремонтних робіт та строку служби контактів необхідно прийняти нижчі крайні значення відповідних інтервалів часу, так як за межами даних термінів зростає ймовірність переходу контактного з'єднання до стану теплового руйнування.

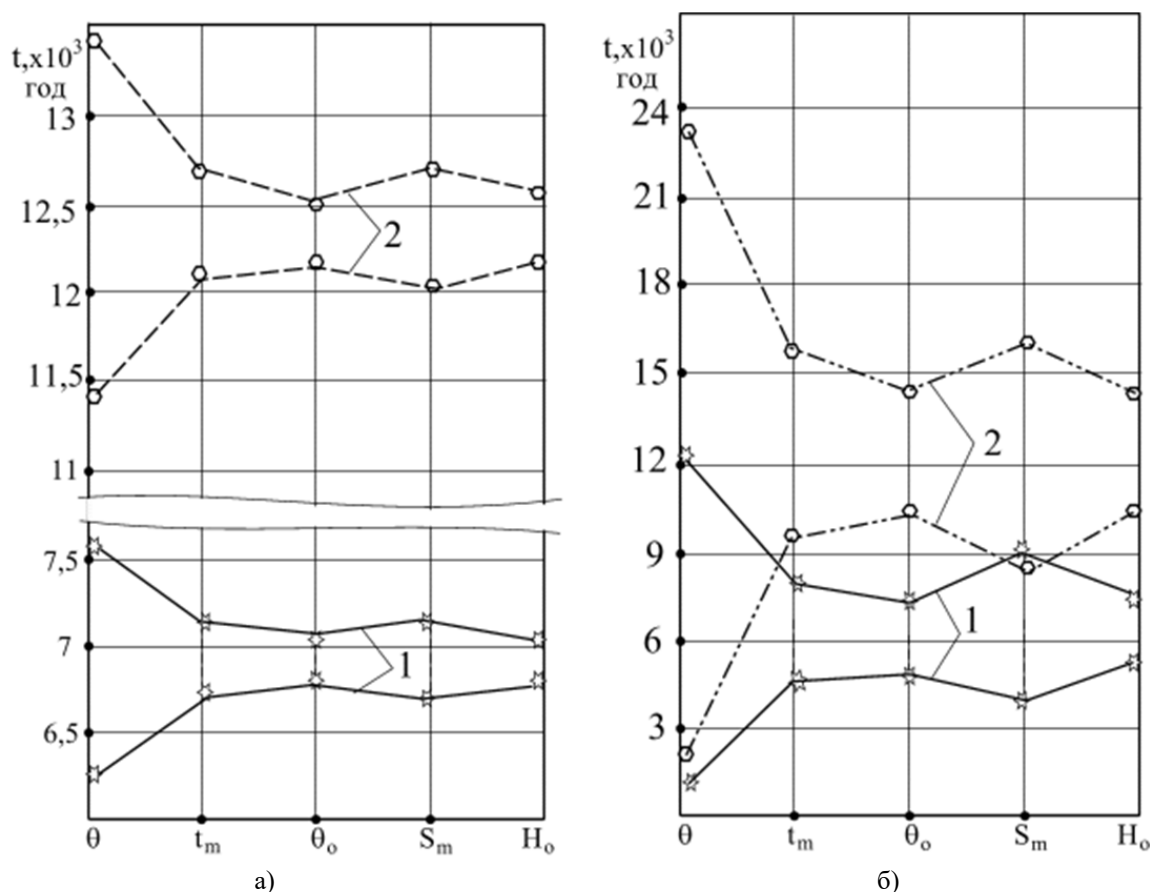


Рис. 2. Вплив інтервалу невизначеності вихідних чинників на ймовірнісну величину інтервалу часу: а – нормальний закон розподілу щільності випадкової величини; б – рівномірний закон розподілу щільності випадкової величини; 1 – $R_{\text{пер}}^* = 2$, 2 – $R_{\text{пер}}^* = 3$.

Таблиця 1. Результати обчислювального експерименту визначення ймовірнісних інтервалів часу еволюції перехідного опору до рівнів $R_{\text{пер}}^* = 2$ та $R_{\text{пер}}^* = 3$.

$R_{\text{пер}}^* = 2$	Вихідні фактори	$R_{\text{пер}}^* = 3$
1 6369 ≤ t ≤ 7871	x ₁ ...x ₅ – нормально розподілені величини	11323 ≤ t ≤ 13994
2 3872 ≤ t ≤ 10188	x ₁ – нормально розподілена величина x ₂ ...x ₅ – рівномірно розподілені	6883 ≤ t ≤ 18111
3 1150 ≤ t ≤ 16299	x ₂ ...x ₄ – нормально розподілені x ₁ , x ₅ – рівномірно розподілені	563 ≤ t ≤ 28977
4 6404 ≤ t ≤ 7532	x ₁ – нормально розподілена величина x ₂ ...x ₅ – детерміновані	11383 ≤ t ≤ 13391
5 6816 ≤ t ≤ 7112	x ₂ – нормально розподілена величина x ₁ , x ₃ ...x ₅ – детерміновані	12117 ≤ t ≤ 12644
6 6866 ≤ t ≤ 7062	x ₃ – нормально розподілена величина x ₁ , x ₂ , x ₄ , x ₅ – детерміновані	12207 ≤ t ≤ 12554
7 6788 ≤ t ≤ 7140	x ₄ – нормально розподілена величина x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₅ – детерміновані	12067 ≤ t ≤ 12694
8 6877 ≤ t ≤ 7051	x ₅ – нормально розподілена величина x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ – детерміновані	12225 ≤ t ≤ 12536
9 1405 ≤ t ≤ 13209	x ₁ – рівномірно розподілена величина x ₂ ...x ₅ – детерміновані	2656 ≤ t ≤ 23811
10 5261 ≤ t ≤ 8698	x ₂ – рівномірно розподілена величина x ₁ , x ₃ ...x ₅ – детерміновані	9354 ≤ t ≤ 15463
11 5830 ≤ t ≤ 8134	x ₃ – рівномірно розподілена величина x ₁ , x ₂ , x ₄ , x ₅ – детерміновані	10364 ≤ t ≤ 14460
12 4941 ≤ t ≤ 9032	x ₄ – рівномірно розподілена величина x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₅ – детерміновані	8784 ≤ t ≤ 16056
13 5960 ≤ t ≤ 7979	x ₅ – рівномірно розподілена величина x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ – детерміновані	10596 ≤ t ≤ 14185

На рис. 1 також наведено ілюстрацію впливу звуження інтервалу вихідних величин у 2,5 рази (див. рис. 1, зони А).

Обраний метод аналізу процесу старіння розбірних контактних систем дає можливість дати ймовірнісну оцінку впливу розміру інтервалу невизначеності вихідних факторів на розрахункові показники старіння контактів. Алгоритм даного аналізу наступний. Почергово вихідні показники (дивись попередній приклад) фіксуються на рівні математичного сподівання за виключенням одного, який умовно носить випадковий характер, має інтервал невизначеності, що встановлюється методом експертних оцінок та нормальний закон розподілу. Аналогічний обчислювальний експеримент було проведено за умови, що щільність імовірності випадкового фактору характеризується рівномірним розподілом. Результати розрахунків представлено на рис. 2 і табл. 1.

На основі результатів обчислювального експерименту (рис. 2 та табл. 1) необхідно зробити основний висновок, що процес старіння контактів найбільше пов'язаний з температурою контактного з'єднання.

Найбільший вплив на ймовірнісну величину інтервалу часу створює фактор температури контакту. Для умов ймовірнісного аналізу даний фактор не являється керованим, тобто його вихідні значення обумовлюються природними та технічними обмеженнями і можуть бути змінені при введенні нових нормативних документів, що стосуються температурних режимів контактних систем. Інші вихідні фактори можуть передбачати стадії уточнення і, відповідно, звуження інтервалів можливих значень. Наприклад, контактні системи можна класифікувати за певними ознаками – матеріалом контактів, технологією їх виготовлення, оснащенням додатковими елементами для управління контактним тиском, тощо. Для окремих підкласів контактів обґрунтування термінів проведення ремонтних робіт та строків служби матиме меншу похибку і носитиме більш коректний узагальнений характер.

Висновки

1. Дослідження процесу старіння контактів доцільно розглядати за умов неповноти вихідної інформації на базі застосування методів теорії ймовірності.

2. Граничним рівням перехідного опору за умови застосування управління контактним тиском на основі ефектів пам'яті форми та надпружності: $R_{\text{пер}}^* = 2$ відповідає ймовірнісний інтервал часу $t = 6369...7871$ годин необхідності проведення ремонту контакту; $R_{\text{пер}}^* = 3$ відповідає ймовірнісний інтервал часу $t = 11323...13994$ годин – строк служби контакту.

3. Збільшення граничних термінів проведення ремонтних робіт та строків служби контактів у порівнянні з класичною моделлю розбірного контакту складає 3-4 рази.

Список літератури

1. Дзекцер Н. Н., Висленев Ю. С. Многоамперные контактные соединения. Ленинград. Энергоатомиздат. Ленинградское отделение. 1987. 128 с.

References

1. Dzektser, N. N., Whilenew, Yu. S. (1987). Lot of ampers contact connections. Leningrad. Energoatomizdat. 128.

ОБОСНОВАНИЕ ТЕРМИНОВ РЕМОНТНЫХ РАБОТ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКОВ СЛУЖБЫ КОНТАКТОВ РАЗБОРНЫЕ ТИПА В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. В. Козырский, И. П. Ткачук, С. М. Волошин, И. И. Слушный

Аннотация. Разборные контактные соединения являются наиболее многочисленными элементами электроустановок. Работоспособность контактов, их надежность в значительной степени зависит от режимов электрического тока и температуры, контактного давления и др. Изменение режимов и продолжительность эксплуатации приводят к росту переходного сопротивления контактов, температуры их нагрева и возможного теплового разрушения. Традиционными средствами для регулирования давления в контактах при изменении температурного режима являются стальные тарельчатые пружины. Предварительным исследованием установлено, что эти средства только частично решают проблему регулирования контактного давления. Альтернативой традиционным средствам является инновационная разработка средств динамического управления давлением на основе использования функциональных сплавов с эффектом памяти формы.

В работе проведен математический анализ сроков проведения ремонтных работ и сроков службы контактов разборного типа с использованием теории вероятности в условиях неполноты исходной информации. Исследованиями обосновано, что применение динамического метода управления термомеханическим режимом разборных контактов позволяет стабилизировать давление и продлить срок эксплуатации разборных контактов в 3-4 раза.

Ключевые слова: разборные электрические контакты, переходное сопротивление, функциональные сплавы с эффектом памяти формы, теория вероятности, неровности Чебышева.

DYNAMIC CONTROL BY CONTACT TISK IN POWERED ELECTRIC CONTACTS WITH USE SHAPE MEMORY ALLOYS

Kozyrskyi V. V., Tkachuk I. P., Voloshin S. M., Slushnyi I. I.

Abstract. Collapsible contact joints are the most numerous elements of electrical installations. The efficiency of the contacts, their reliability to a large extent

depends on the modes of electric current and temperature, contact pressure, etc. Modification of modes and operation time lead to an increase in the resistance of the contacts, the temperature of their heating and possible thermal destruction. Traditional means for controlling the pressure in the contacts when changing the temperature regime are steel plate springs. Previous investigations have established that these means only partially solve the problem of regulation of contact pressure. An alternative to traditional means is the innovative development of dynamic pressure control tools based on the use of functional alloys with the shape memory effect.

The mathematical analysis of terms of carrying out repair works and service life of collision type contacts with the use of probability theory in the conditions of incompleteness of the initial information is carried out. The research substantiates that the use of dynamic method of control of the thermomechanical regime of collapsible contacts allows to stabilize pressure and extend the life of collapsible contacts by 3-4 times.

Key words: collapsible electrical contacts, transient resistance, functional alloys with memory effect of form, probability theory, Chebyshev inequalities.

