

## ІМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ СИЛОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОНТАКТОРІВ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Пропонується імовірнісна модель параметричної надійності силових електромагнітних клапанних контакторів рухомого складу залізниць, використання якої дозволяє визначити ймовірність порушення умови включення контактора (тягова сила протягом усього процесу включення повинна бути більшою за результуючу протидіючу силу).

*Ключові слова:* імовірнісна модель, силові електромагнітні клапанні контактори, тягова сила, результуюча протидіюча сила

Предлагается вероятностная модель параметрической надежности силовых электромагнитных клапанных контакторов подвижного состава железных дорог, использование которой позволяет определить вероятность нарушения условия включения контактора (тяговая сила на протяжении всего процесса включения должна быть больше результирующей противодействующей силы).

*Ключевые слова:* вероятностная модель, силовые электромагнитные клапанные контакторы, тяговая сила, результирующая противодействующая сила

The probabilistic model of parametric reliability of power electromagnetic valve contactors of rolling stock which helps to evaluate the probability of failures in condition of switching a contactor (the tractive force during the whole process of operation should be greater than the resulting counteracting force) is proposed in the paper.

*Keywords:* probabilistic model, power electromagnetic valve contactors, tractive force, resulting counteracting force

Як відомо [1 – 3], однією з необхідних умов справного стану силових електромагнітних контакторів рухомого складу залізниць при нормальних умовах експлуатації є забезпечення нерівності:

$$Q_{\Pi}' < Q_M, \quad (1)$$

де  $Q_M$  – сила тяги електромагнітного приводу;

$Q_{\Pi}'$  – результуюча протидіюча сила, приведена до осі дії сили  $Q_M$ .

При «справному» стані контактор відповідає усім вимогам нормативних документів.

Нерівність (1) виражає те, що в процесі включення значення протидіючої сили  $Q_{\Pi}'$  контактора повинно бути менше електромагнітної (тягової) сили  $Q_M$  за будь-якого зазору  $\delta$  між якорем та осердям. При наших дослідженнях маємо на увазі статичну тягову характеристику, яка відповідає сталому значенню струму в котушці електромагнітного приводу.

Кожна із величин  $Q_{\Pi}'$  та  $Q_M$  залежить від багатьох факторів і тому є випадковою. Таким чином, не існує повністю визначених значень  $Q_{\Pi}'$  та  $Q_M$ , які можна було б прийняти для розрахунку надійності контакторів. Тому абсолютна вимога виконання нерівності (1) не має сенсу. Можна лише поставити умову, щоб протя-

гом усього процесу експлуатації воно було виконано з тією або іншою ймовірністю.

Тобто задача оцінки експлуатаційної надійності (і працездатності, як однієї зі сторін надійності) контакторів повинна бути вирішена у ймовірному проектуванні. Застосовуємо для цього класичну модель параметричної надійності.

Класична модель відмов є моделлю типу «навантаження – міцність» [4, 5] і базується на використанні статистичних даних повних (вихідних) випадкових величин. У нашому випадку це випадкові величини  $Q_{\Pi}'$  та  $Q_M$ .

Виходячи із умови (1) введемо величину  $R$ , що дорівнює:

$$R = Q_M - Q_{\Pi}', \quad (2)$$

яку назовемо «функцією працездатності».

Тоді умовою працездатності контактора буде нерівність

$$R = Q_M - Q_{\Pi}' > 0. \quad (3)$$

Умова (3) повинна виконуватись і за мінімальної допустимої напруги на котушці контактора.

Оскільки величини  $Q_M$  та  $Q_{\Pi}'$  випадкові, то величина  $R$  має також випадковий характер, ймовірний закон розподілу  $R$  знайдемо корис-

туючись загальною лемою теорії ймовірності [6]. Остання стверджує, що, якщо  $z = \varphi(x, y)$  є функція двох незалежних випадкових величин  $x$  та  $y$  і якщо  $y$  буде взаємно однозначною зворотною функцією  $z$  та  $x$ , тобто  $y = \psi(z, x)$ , то густина розподілу величини  $z$  визначається як:

$$f(z) = f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi[z, x] f(x) \left| \frac{\partial \psi(z, x)}{\partial z} \right| dx, \quad (4)$$

де  $f(x)$ ,  $\varphi[\psi(z, x)]$  – одномірні закони розподілу величин  $x$  та  $y$ .

З використанням виразів (4) та (2) знайдемо густину розподілу функції  $R$  у вигляді:

$$f(R) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi[Q_M(R, Q'_\Pi)] f(Q'_\Pi) \left| \frac{\partial Q_M(R, Q'_\Pi)}{\partial R} \right| dQ'_\Pi, \quad (5)$$

де  $\varphi(Q_M)$ ,  $f(Q'_\Pi)$  – густини розподілу величин  $Q_M$  та  $Q'_\Pi$ .

Із виразу (2) витікає, що  $Q_M = R + Q'_\Pi$ .

Тоді  $\frac{\partial Q_M}{\partial R} = 1$ , внаслідок чого формула (5) закону розподілу величин  $R$  спрощується і набуває вигляду (рис. 1):

$$f(R) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(Q_M) f(Q'_\Pi) dQ'_\Pi. \quad (6)$$

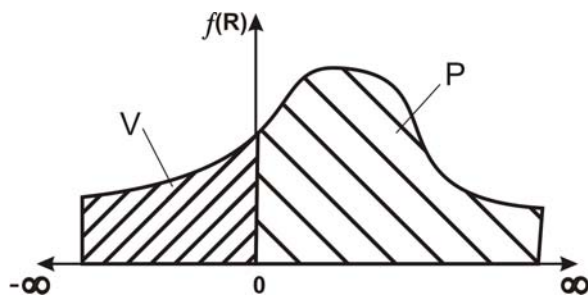


Рис. 1. Розподіл ймовірностей  $V$  та  $P$  функції  $f(R)$

Тоді ймовірність  $V$  порушення нерівності (3), тобто порушення справного стану контактора, визначиться як ймовірність попадання величини  $R$  на дільницю  $[-\infty, 0]$  [6]:

$$V = \int_{-\infty}^0 f(R) dR = \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(Q_M) f(Q'_\Pi) dQ_M dQ'_\Pi, \quad (7)$$

а ймовірність  $P$  виконання умови (3), тобто ймовірність справного стану контактора, буде (рис. 1):

$$P = 1 - V = 1 - \int_{-\infty}^0 f(R) dR = \int_0^{\infty} f(R) dR. \quad (8)$$

Введемо величину «коефіцієнт запасу із сили» контактора. При цьому будемо розглядати «дійсний»  $K_i$  та «умовний»  $K_p$  коефіцієнти, які відповідно дорівнюють:

$$K_i = \frac{Q_{M\delta_{\text{КР}}}}{Q'_{\Pi\delta_{\text{КР}}}}; \quad K_p = \frac{\bar{Q}_{M\delta_{\text{КР}}}}{\bar{Q}'_{\Pi\delta_{\text{КР}}}}, \quad (9)$$

де  $\bar{Q}_{M\delta_{\text{КР}}}$ ,  $\bar{Q}'_{\Pi\delta_{\text{КР}}}$  – середньостатистичні значення сил тягової та протидіючої при  $\delta = \delta_{\text{КР}}$ ;

$\delta = \delta_{\text{КР}}$  – повітряний зазор між якорем та осердиям в момент дотикання силових контактів.

Задача визначення ймовірностей  $V$  та  $P$ , а також коефіцієнта  $K_p$  спрощується, якщо розподіли  $\varphi(Q_M)$ ,  $f(Q'_\Pi)$  відповідають нормальному закону.

Тоді розподіл  $f(R)$  в (6) також буде відповідати закону Гауса з центром:

$$\bar{R} = \bar{Q}_M - \bar{Q}'_{\Pi} \quad (10)$$

і дисперсією (з урахуванням взаємної незалежності  $Q_M$  та  $Q'_\Pi$ ):

$$D_R = \sigma_R^2 = \sigma_{Q_M}^2 + \sigma_{Q'_\Pi}^2, \quad (11)$$

де  $\sigma_{Q_M}$ ,  $\sigma_{Q'_\Pi}$  – середньоквадратичні відхилення відповідно величин  $Q_M$  та  $Q'_\Pi$ . Ймовірності  $V$  та  $P$  визначаються через локальну функцію Лапласа  $L(\alpha)$  як:

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{1}{2} - L(\alpha); \\ P &= \frac{1}{2} + L(\alpha), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де  $\alpha = \frac{\bar{R}}{\sigma_R}$  назвемо «характеристикою резерву роботи контактора», що при  $\delta = \delta_{\text{КР}}$  дорівнює:

$$\alpha = \frac{\bar{Q}_{M\delta_{\text{КР}}} - \bar{Q}'_{\Pi\delta_{\text{КР}}}}{\sqrt{\sigma_{Q_M}^2 + \sigma_{Q'_\Pi}^2}}. \quad (13)$$

Чисельні значення величин  $K_p$ ,  $V$ ,  $P$  та  $\alpha$ , які визначаються відповідно за виразами (9), (12) та (13), дозволяють судити про ймовірність працездатного стану контакторів.

### Чисельний приклад

Спостереження за клапанними контакторами типу МК-310Б в кількості тридцяти екземплярів показали, що шістнадцять з них не ввімкнулись повністю при напрузі кіл керування 35 В. Результати спостережень наведені у табл. 1.

Таблиця 1

### Статистика значень напруги на котушці приводу контактора МК-310Б, за якої контактор надійно вмикається

$U$ , В	30,5	31,5	32,5	33	33,6	34	35,5	36
$n_k$	2	2	2	3	2	3	1	1
$U$ , В	37	37,5	38,5	39	40	40,5	42	44
$n_k$	3	3	2	2	1	1	1	1

Кількість контакторів при досліді:  $n = 30$ .

$n_k$  – кількість контакторів, які надійно вмикались при вказаній напрузі.

Під виразом «не ввімкнулись повністю» розуміємо, що після замикання силових контактів і зупинки якоря між осердям та якорем залишався зазор, який знаходився в межах 2...4,5 мм. Це пояснюється тим, що при критичному зазорі між якорем та осердям нерівність (1) не виконувалась. Такий стан контактора оцінюється як працездатний (силові контакти замикаються), але несправний (не вмикається повністю при напрузі 35 В, що не відповідає вимогам ДСТУ 2773-94 [7] до контакторів з номінальною напругою на котушці приводу 50 В). В результаті обробки статистичних даних по замірах параметрів контакторів отримані наступні значення [8]:

$$\sigma_{Q_M}^2 = 472,524 \text{ Н}^2; \quad \sigma_{Q_{II}} = 2,38 \text{ Н}^2.$$

Середні значення  $\bar{Q}_M$  та  $\bar{Q}'_{II}$  визначені при середньостатистичних значеннях аргументів функції  $Q_M$  та  $Q'_{II}$ . Формули для  $Q_M$  та  $Q'_{II}$  наведені у [8].

$$Q_M = C \frac{U^2 \cdot S_T}{R_K^2 \cdot \delta^2} + 2C \frac{U^2 \sqrt{S_T}}{R_K^2 \cdot \delta}, \text{ де } C = 1,471;$$

$$Q'_{II} = A + C_B K \frac{l_B}{l} + C_K \Delta x_K \frac{l_K}{l}.$$

Відповідно:

$$\bar{Q}_{M_{\delta_{KP}}} = C \frac{\bar{U}^2 \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}_{KP}^2} + 2C \frac{\bar{U}^2 \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}_{KP}};$$

$$\bar{Q}'_{II_{\delta_{KP}}} = A + \bar{C}_B \bar{K} \frac{l_B}{l} + \bar{C}_K \cdot \Delta \bar{x}_K \frac{l_K}{l}.$$

Значення  $A$  приймаємо таким, що дорівнює граничному значенню  $\bar{Q}_{M_{\delta_{вдп}}}$ , тобто  $A \leq \bar{Q}_{M_{\delta_{вдп}}}$ .

$$\bar{Q}_{M_{\delta_{вдп}}} = C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}_{вдп}^2} + 2C \frac{\bar{U}^2 \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}_{вдп}}.$$

В наведених формулах  $\bar{U}$ ,  $\bar{S}_T$ ,  $\bar{R}_K$ ,  $\bar{\delta}_{KP}$ ,  $\bar{\delta}_{вдп}$  – відповідно статичні значення напруги кіл керування, площі поверхні торця осердя, активного опору котушки електромагнітного приводу, критичного (в момент дотикання силових контактів) зазору між якорем та осердям, зазору між якорем та осердям при відпущеному якорі;

$\bar{C}_B$ ,  $\bar{K}$ ,  $\bar{C}_K$ ,  $\Delta \bar{x}_K$  – відповідно середньостатистичні значення жорсткості вимикальної пружини, різниці  $(\delta_{вдп} - \delta_{KP}) = K$ , жорсткості контактної пружини, початкового (до дотикання головних контактів) стиснення контактної пружини;

$l$ ,  $l_B$ ,  $l_K$  – відповідно плечі дії сил тягової  $Q_M$ , вимикальної пружини  $Q_B$ , контактної пружини  $Q_K$  (рис. 2).

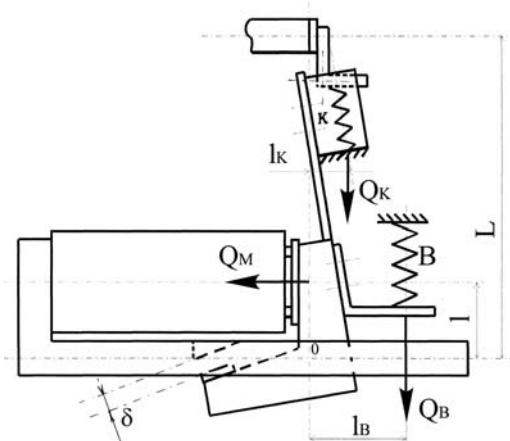


Рис. 2. Кінематична схема контактора МК-310Б

В результаті обробки статистичних даних за замірами значень параметрів – аргументів функції  $Q_M$  та  $Q'_{II}$  – отримано:

$$\bar{U} = 37 \text{ В}; \quad \bar{S}_T = 969,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \quad \bar{R}_K = 61,9 \text{ Ом};$$

$$\bar{\delta}_{KP} = 3,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \bar{\delta}_{вдп} = 11,48 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\bar{C}_B = 0,963 \text{ Н/мм}; \bar{K} = 8,49 \text{ мм};$$

$$\bar{C}_K = 3,15 \text{ Н/мм}; \Delta \bar{x}_K = 3,38 \text{ мм}; l_B = 73 \text{ мм};$$

$$l = 63 \text{ мм}; l_K = 26 \text{ мм}.$$

Розрахунки показали, що [8]:

$$\sigma_{Q_M}^2 = 472,524 \text{ Н}^2; \sigma_{Q_{II}}^2 = 2,38 \text{ Н}^2.$$

За вищенаведеними формулами:

$$\bar{Q}_{M_{\delta_{кр}}} = 1,471 \frac{37^2 \cdot 969,1 \cdot 10^{-6}}{61,9^2 \cdot 3,24^2 \cdot 10^{-6}} + 2 \times$$

$$\times 1,471 \frac{37^2 \sqrt{969,1 \cdot 10^{-6}}}{61,9^2 \cdot 3,24 \cdot 10^{-3}} = 58,624 \text{ Н};$$

$$A = \bar{Q}_{M_{\delta_{вип}}} = 1,471 \frac{37^2 \cdot 969,1 \cdot 10^{-6}}{61,9^2 \cdot 11,48 \cdot 10^{-6}} + 2 \times$$

$$\times 1,471 \frac{37^2 \sqrt{969,1 \cdot 10^{-6}}}{61,9^2 \cdot 11,48 \cdot 10^{-3}} = 6,71 \text{ Н};$$

$$\bar{Q}'_{II_{\delta_{кр}}} = 6,71 + 0,963 \cdot 8,49 \frac{73}{63} +$$

$$+ 3,15 \cdot 3,38 \frac{26}{63} = 20,57 \text{ Н}.$$

Тоді:

$$\alpha = \frac{58,624 - 20,57}{\sqrt{472,524 + 2,38}} \approx 1,75.$$

Відповідно додатку 1 [9] отримуємо значення функції Лапласа:  $L(\alpha) = 0,0863$ .

Тобто

$$V = \frac{1}{2} - 0,0863 = 0,4137;$$

$$P = \frac{1}{2} + 0,0863 = 0,5863.$$

Умовний коефіцієнт  $K_p$  дорівнює:

$$K_p = \frac{58,624}{20,57} = 2,85.$$

Значення  $K_p = 2,85$ , яке отримане в результаті обробки статистичних даних масиву контакторів, рекомендується забезпечувати при регулюванні контакторів. У теперішній час нормативні документи не передбачають перевірки і забезпечення певного значення цього коефіцієнта при регулюванні контактора після ремонту.

## Висновок

1. Запропонована модель параметричної надійності силових електромагнітних контакторів рухомого складу залізниць може застосовуватись для визначення ймовірності справного стану вказаних контакторів.

2. З метою підвищення ймовірності справного стану контакторів в експлуатації у діючу нормативну документацію потрібно внести вимогу, щоб після ремонту перевірявся істинний коефіцієнт запасу сили  $K_i$  кожного контактора.

Значення  $K_i$  при регулюванні клапанних електромагнітних контакторів повинно дорівнювати встановленому в результаті проведених автором досліджень  $K_p = 2,85$ , або перевищувати його на декілька процентів.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1991. – 471 с.
2. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические аппараты [Текст] / Д. Д. Захарченко. – М.: Транспорт, 1991. – 247 с.
3. Электрооборудование вагонов [Текст] / А. Е. Зорохович [и др.]. – М.: Транспорт, 1982. – 367 с.
4. Болотин, В. В. Статистические методы в строительной механике [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Изд-во по строительству, 1965. – 279 с.
5. Гумбель, Э. Статистика экстремальных значений [Текст] / Э. Гумбель. – М.: Мир, 1965. – 451 с.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
7. ДСТУ 2773-94 Апарати електричні тягові. Загальні технічні умови [Текст]. – 1996. – 82 с.
8. Маренич, А. А. Метод оценки технологической стабильности [Текст] / А. А. Маренич, Н. А. Костин // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 37. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 89-95.
9. Гмурман, В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике [Текст] / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2004. – 404 с.

Надійшла до редколегії 21.10.2010.

Прийнята до друку 27.10.2010.