

*М.О. Костін, д-р техн. наук, О.А. Тетерко, О.Г. Шейкіна, канд. техн. наук  
(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного  
транспорту імені академіка В.Лазаряна)*

## **КОНТАКТНИЙ ОПІР СИЛЬНОСТРУМОВИХ КОМУТАЦІЙНИХ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕКТРОАПАРАТУРИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Дефіцит, а нерідко і повна відсутність, кольорових металів вимагає застосування замість останніх нових, частіше композиційних, матеріалів для сильнострумівих контактів комутаційних апаратів електрорухомого складу (ЕРС) як магістрального залізничного, так і кар'єрного та міського транспортів. При цьому для розрахунку і надійності експлуатації контактів потрібно знання їх контактного опору  $R_k$ , який можна отримати експериментальним вимірюванням або розрахунком за аналітичним виразом. Натурне вимірювання величини  $R_k$  вимагає великої кількості "тонких" дослідів, які не завжди можливо виконати з достатньою точністю, а інколи неможливо їх виконати взагалі. А тому бажано мати достатньо точну формулу для визначення  $R_k$ , в якій будуть враховані особливості конструкції та експлуатації сильнострумівих комутаційних контактних з'єднань.

Існуючі формули, що отримані згідно з класичною теорією електричних контактів [1-5], у значно більшій степені придатні для слабкострумівих релейних контактних з'єднань. У той же час багато контактів, наприклад ЕРС залізниць (електровозів, тепловозів, електропоїздів, моторних вагонів метрополітенів та ін.), мають робочі струми до 1500А і напруги до 3000В. По-друге, застосовувані вирази  $R_k$  призначені, як правило, для контактів із "чистих" кольорових металів, у той час як в останні десятиріччя впроваджують контактні напайки із композиційних матеріалів (псевдосплавів), що містять три і більше компонентів. Виключенням із зазначеного є роботи [4, 6], однак отримані в них для  $R_k$  формули дуже громіздкі, а також не враховують особливостей роботи розривних (з дугогашенням) контактів у високовольтних сильнострумівих колах змінного струму.

Нижче подано доведення аналітичного виразу контактного опору  $R_k$ , а також результати теоретичного (за цією формулою) та експериментального визначення значень  $R_k$  для ряду нових електроконтактних матеріалів.

У загальному випадку електричний опір комутаційних з'єднань  $R_k$  силових кіл пристроїв електричного транспорту складається з опору матеріалу  $R_m$  власне контактів – губок і перехідного опору  $R_{nep}$ , який, у свою чергу, містить так званий опір стягування  $R_{cm}$  та опір пасивних поверхневих плівок  $R_{nl}$  [6]:

$$R_k = R_m + R_{cm} + R_{nl} \quad (1)$$

У розглядуваному випадку опір  $R_m$  – це опір провідника товщиною  $\delta$ , довжиною  $l$  (шлях протікання струму по контактах), з поперечним перерізом  $F_{np}$ , що виконаний із матеріалу з питомим електричним опором  $\rho$ . Згідно з [7], вели-

чина  $R_m$  може бути визначена як

$$R_m = 1,39 \cdot \rho \frac{l}{F_{np}} \cdot \ln \left( 1,43 + 1,43 \frac{\delta}{l} \right). \quad (2)$$

Опір стягування  $R_{cm}$  виникає внаслідок звуження (стягування) ліній електричного струму в місцях металевого контакту. Для його визначення запропоновано багато формул; всі вони базуються на теорії Хольма [1, 3]. Однак єдиної формули для  $R_{cm}$  не існує, різні автори подають різні величини з різними показниками степені у них. Тому для подальшого аналізу за базову візьмемо експериментально отриману формулу (9.04) із [1] або, що теж подібне, вираз (22) із [2]:

$$R_{cm} = \rho \cdot \frac{\sqrt{H_\mu}}{\sqrt{F_k}}, \quad (3)$$

де  $H_\mu$  – мікротвердість матеріалу контактів;  $F_k$  – контактний тиск контактів.

Розрахунки  $R_{cm}$  для досліджуваних контактів за виразом (3) показують, що теоретично отримані результати відрізняються від експериментальних даних  $R_{cm}$  у 1,5...2,0 рази. Наприклад, для псевдосплаву МДК [8] з  $\rho = 2,53 \cdot 10^{-5}$  Ом·мм і  $H_\mu = 247,0$  кгс/мм<sup>2</sup> при  $F_k = 16$  кг теоретична величина  $R_{cm}$  склала  $0,994 \cdot 10^{-3}$  Ом, а дослідно виміряна  $0,621 \cdot 10^{-3}$  Ом. Отже, вираз (3) повинен бути переопрацьований і уточнений.

Насамперед врахуємо те, що показник степені 0,5 при  $F_k$  є чинним лише для точкових контактів [9], а для лінійних контактів, які застосовують в електроапаратах ЕРС, цей показник буде іншим, позначимо його як  $m$ , тобто маємо  $F_k^m$ .

Далі, як уже зазначалось, однією з особливостей роботи комутаційних апаратів ЕРС електричного транспорту є великі значення струмів, внаслідок чого виникає сильний нагрів контактного з'єднання. Наприклад, перегрівання контактних деталей в електровозах досягає 59...61°C при допустимій 75°C при температурі навколишнього повітря +40°C. Тобто, при визначенні  $R_{cm}$  за виразом (3) необхідно враховувати вплив теплових процесів на  $\rho$  і  $H_\mu$ , тоді:

$$R_{cm} = \rho(T) \frac{\sqrt{H_\mu(T)}}{F_k^m}, \quad (4)$$

де  $T$  – поточне значення температури контактів.

В якості функції  $\rho(T)$  у виразі (4), а отже і в (2), може бути використана відома фізична залежність:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha_m (T - T_0)], \quad (5)$$

де  $T_0$  – температура "ненагрітих" контактів, "кімнатна", переважно  $+20^\circ\text{C}$ ;  $\rho_0$  – питомий електричний опір матеріалу контактів при  $T = T_0$ ;  $\alpha_m$  – температурний коефіцієнт матеріалу відносно електричного опору.

Температурну залежність мікротвердості приймемо згідно з [10, 6] у вигляді

$$H_{\mu}(T) = H_{\mu_0} \frac{1 - \sqrt[3]{\left(\frac{T}{T_{nl}}\right)^2}}{1 - \sqrt[3]{\left(\frac{T_0}{T_{nl}}\right)^2}}, \quad (6)$$

де  $H_{\mu_0}$  і  $T_{nl}$  – мікротвердість при  $T_0$  і, відповідно, температура плавлення матеріалу контактів.

Підставивши (5) та (6) в (4), отримаємо залежність опору стягування

$$R_{cm} = \rho_0 [1 + \alpha_m (T - T_0)] \cdot F_k^{-m} \cdot \sqrt{H_{\mu_0} \cdot \frac{1 - \sqrt[3]{\left(\frac{T}{T_{nl}}\right)^2}}{1 - \sqrt[3]{\left(\frac{T_0}{T_{nl}}\right)^2}}}. \quad (7)$$

Питання визначення опору  $R_{nl}$  поверхневої плівки для виразу (1) важке і автори усіх досліджень користуються формулою [1, 3]:

$$R_{nl} = \frac{\sigma}{S}, \quad (8)$$

де  $\sigma$  – питомий поверхневий опір;  $S$  – площа поверхні дотику контактів.

Виходячи із міркувань і даних роботи [6], опір  $\sigma$  у контактах електроапаратів ЕРС визначається тунельним ефектом і складає  $10^{-3}$  Ом·мм<sup>2</sup>. Одночасно, для тих же апаратів

$$S = (1 - \beta) \cdot b \cdot \Delta, \quad (9)$$

де  $(b \cdot \Delta)$  – площа прямокутника (з довжиною  $b$  і шириною  $\Delta$ ) взаємного торкання контактів при вмиканні;  $(1 - \beta)$  – частка площі зазначеного прямокутника, яку займає плівка.

Для оцінки коефіцієнта  $\beta$  у виразі (9) в [4] (частина 1, с.10-12) запропонована формула

$$\beta = 0,4 \left( \frac{R_a}{S_m} \right)^{2/3}, \quad (10)$$

де  $R_a$  – середнє арифметичне відхилення мікропрофілю поверхні контактів;  $S_m$  – середній крок нерівностей мікропрофілю поверхні.

Після підстановки (10) в (9) і далі в (8) опір поверхневої плівки

$$R_{nl} = \frac{\sigma}{\left( 1 - 0,43 \sqrt{\left( \frac{R_a}{S_m} \right)^2} \right) \cdot b \cdot \Delta}. \quad (11)$$

Підставивши формули (2), (7) та (11) в (1), отримаємо остаточний вираз контактного опору в функції довільної температури  $T$  контактів:

$$R_{\kappa}(T) = \rho_0 [1 + \alpha_m (T - T_0)] \left[ 1,39 \frac{l}{F_{np}} \cdot \ln \left( 1,43 + 1,43 \frac{\delta}{l} \right) + \right. \\ \left. + F_{\kappa}^{-m} \sqrt{H \mu_0} \cdot \frac{1 - \left( \frac{T}{T_{nl}} \right)^{2/3}}{1 - \left( \frac{T_0}{T_{nl}} \right)^{2/3}} \right] + \frac{\sigma}{\left[ 1 - 0,4 \cdot \left( \frac{R_a}{S_m} \right)^{2/3} \right] \cdot b \cdot \Delta}. \quad (12)$$

Для "ненагрітих" контактів, тобто при  $T = T_0$ , а отже і нових, щойно виготовлених, або контактів щойно капітально відремонтованих контакторів величина  $R_{\kappa}$  спрощується і має вигляд:

$$R_{\kappa}(T_0) = \rho_0 \left[ 1,39 \cdot \frac{l}{F_{np}} \cdot \ln \left( 1,43 + 1,43 \frac{\delta}{l} \right) + F_{\kappa}^{-m} \cdot \sqrt{H \mu_0} \right] + \\ + \frac{\sigma}{\left[ 1 - 0,4 \cdot \left( \frac{R_a}{S_m} \right)^{2/3} \right] \cdot b \cdot \Delta}. \quad (13)$$

За формулою (13) виконано числову оцінку контактного опору при  $T = T_0$  для силових розривних контактів групового перемикача ЕКГ-8 електровозів ВЛ80. Розрахунки здійснено для контактів із різних матеріалів (згідно з [8]) для таких значень ряду величин виразу (13):  $l = 69$  мм;  $F_{np} = 250$  мм<sup>2</sup>;  $\delta = 20$  мм;  $F_{\kappa} = 16$  кг;  $m = 0,55 \dots 0,6$ ;  $b = 25$  мм;  $\Delta = 0,3$  мм;  $\sigma = 10^{-3}$  Ом·мм<sup>2</sup>. Отримано сере-

дні  $\bar{R}_k$  і середньоквадратичні  $\sigma_{R_k}$  значення контактного опору. Для порівняння і підтвердження адекватності формул (12) і (13) значення  $\bar{R}_k$  було одержано також шляхом експериментального вимірювання при  $I = 50$  А величини  $R_k$  на натурних зразках контактів електровозів ВЛ80. Результати розрахунків і вимірювань величини  $R_k$  наведено в таблиці.

Таблиця

Матеріал контактів згідно з [8]	$\bar{\rho}_0 \cdot 10^{-5}$ , Ом·мм	$\bar{H}_{\mu_0}$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\bar{R}_a \cdot 10^{-3}$ , мм	$\bar{S}_m$ , мм	Величина контактної опору		
					Розрахована		Дослідно виміряна, $\bar{R}_k \cdot 10^{-3}$ , Ом
					Середнє значення, $\bar{R}_k \cdot 10^{-3}$ , Ом	Середньоквадратичне, $\sigma_{R_k} \cdot 10^{-3}$ , Ом	
МВ-70 (існуючий, заводський)	2,4	100	1,88	0,125	0,563	0,055	0,581
МДК-3	2,53	247	0,25	0,03	0,607	0,047	0,622
КМК-Б21	8,47	188	1,88	0,223	0,672	0,086	0,634
МВ-70 (запропонований)	8,4	162	1,79	0,235	0,651	0,085	0,614
КМК-Б25	8,0	194	0,36	0,06	0,642	0,062	0,610
Диском	1,65	114	0,47	0,043	0,591	0,049	0,552

Як випливає із таблиці, формули (12) і (13) є достатньо адекватними для визначення величини  $R_k$ : похибка між розрахованими і виміряними значеннями опору складає (4...7%). Найбільшим контактним опором (за середнім значенням  $\bar{R}_k$ ) володіють тільки що змонтовані контакти із композиційного матеріалу КМК-Б21 виробництва ПП "Власов", м. Запоріжжя. Ці контакти також мають найбільший розкид  $R_k$ : дисперсія опору складає  $7,4 \cdot 10^{-6}$  Ом<sup>2</sup>. Найменшим розкидом опору ( $\sigma_{R_k} = 0,047 \cdot 10^{-3}$  Ом), хоча і дещо більшим на (2,5...3%) значенням  $\bar{R}_k$  відносно до інших матеріалів, володіють контакти із матеріалу МДК-3 виробництва АТ "Геконт", м. Вінниця.

#### Список літератури

1. Хольм Р. Электрические контакты. – М.: Из-во иностр. лит-ры, 1961. – 464 с.
2. Мерл В. Электрический контакт. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 81 с.
3. Holm R. Electric Contact. Theory and Application. – Berlin: Springer Verlag, 1967. – 482 p.
4. Скользящие электрические контакты. – М.: Радио и связь, 1988. Часть 1 – 89 с. Часть 2 – 71 с.
5. Никитенко А.Г., Лобанова Л.С., Павленко А.В. Математическое моделирование и автоматизация проектирования тяговых электрических аппаратов. – М.: Высшая школа, 1996. – 532 с.
6. Баб'як М.О., Костін М.О. Контактний опір комутуючих контактів силових кіл електрорухомого складу. //Зб. наук. праць ДІТУ. Транспорт. - 2001. – Вип. 7. – С. 15-18.
7. Бойченко В.И., Дзекцер Н.Н. Контактные соединения токоведущих шин. – Л.: Энергия, 1978. – 144 с.

8. Баб'як М.О., Тетерко О.А., Мінакова Р.В., Крячко Л.А. Дослідження структури та деяких властивостей контактних матеріалів контакторів електроозів змінного струму // Електротехніка та електромеханіка. - 2005. – Вип. 1. – С. 93-96.
9. Захарченко Д.Д. Тяговые электрические аппараты. – М.: Транспорт, 1991. – 247 с.
10. Измайлов В.В. К разработке инженерной методики расчета электрического сопротивления контакта шероховатых поверхностей //В кн.: Механика и физика контактного взаимодействия: Межвуз. сб.. – Калинин: Калининский гос. ун-т, 1985. – С. 82-90.