

Jerzy JANISZEWSKI*
Andrzej KSIAŹKIEWICZ*

BADANIA MODELOWE REZYSTANCJI ZESTYKOWEJ ŁĄCZNIKÓW PRÓŹNIOWYCH

Rezystancja przejścia połączonych elektrod, w tym w szczególności zestyków łączników elektroenergetycznych, jest podstawowym parametrem determinującym ich obciążalność prądową znamionową (w warunkach pracy długotrwałej) oraz graniczną obciążalność zwarciovą (powyżej której zestyki ulegają szczieniu). W pracy przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych wartości rezystancji przejścia wybranych typów zestyków, wykonane dla różnych modeli matematycznych oraz ocenę stopnia ich zgodności z wynikami badań obiektów rzeczywistych.

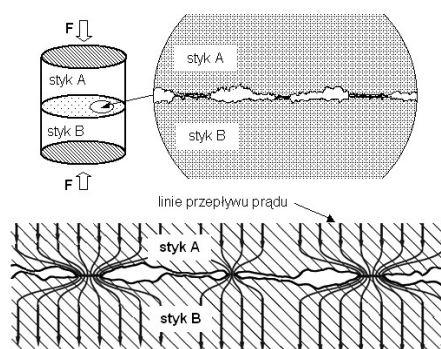
SŁOWA KLUCZOWE: zestyki, rezystancja zestykowa, materiały stykowe

1. WPROWADZENIE

Fragment toru prądowego, zawierający miejsce styczności dwóch przewodników, nazywany jest zestykiem, przy czym ze względu na rodzaj pracy może to być element rozłączny lub nierozłączny. Zestyki rozłączne stanowią główny podzespół funkcjonalny stykowych łączników elektroenergetycznych, umożliwiając załączanie i wyłączanie obwodów prądowych. Z tego powodu nazywa się je także zestykami łączeniowymi. Ze względu na kształt obszaru przylegania do siebie pary styków tworzących zestyk wyróżnia się zazwyczaj formy wyidealizowane w postaci zestyku punktowego, liniowego lub powierzchniowego [1]. W praktyce za zestyk punktowy uznaje się konfigurację przylegania styków, w której powierzchnia styczności jest zbliżona do koła o bardzo małym promieniu. Ze względów technologicznych topografia powierzchni stykowych posiada zawsze mikrowzniesienia i mikrozagłębienia (chropowatość), tak więc w przypadku zestyków liniowych i powierzchniowych rzeczywiste powierzchnie ich przylegania są sumą powierzchni elementarnych zestyków punktowych. Układają się one odpowiednio albo w formie zbliżonej do odcinka (zestyk liniowy), albo z losowym rozkładem rozmieszczone są na pozornej (wynikającej z geometrii zestyku) powierzchni przylegania. Wielkość rzeczywistej (całkowitej) powierzchni styczności stanowi zaledwie kilka procent powierzchni pozornej i w znacznej mierze zależna jest od twardości materiału styków oraz sposobu i dokładności ich wykonania.

* Politechnika Poznańska.

Istnienie w strefie przylegania styków obszarów styczności o elementarnych powierzchniach wielokrotnie mniejszych od powierzchni pozornej zestyku powoduje lokalne zmniejszenie przekroju przewodnika dla przepływającego prądu, a więc lokalny wzrost jego gęstości. W ujęciu makroskopowym oznacza to powstanie w torze prądowym dodatkowej rezystancji, związanej z przewężeniem jego przekroju, którą określa się jako tzw. rezystancję przewężenia lub rezystancję kształtu. Istotę modelowego ujęcia rezystancji przewężenia przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Model struktury powierzchni styczności zestyku płaskiego

Rzeczywista (całkowita) rezystancja zestyku, nazywana także rezystancją przejścia jest w rzeczywistości większa, ponieważ na powierzchniach materiałów stykowych adsorbowane są cząsteczki gazowe oraz łatwo tworzą się warstwy nalotowe. Ich znaczenie może być mniej istotne lub nawet pomijalne w przypadku zestyków łączników próżniowych. O ile jednak w środowisku próżniowym lub w otoczeniu gazów nieaktywnych warstwy nalotowe mogą się nie tworzyć, o tyle warstwa adsorpcyjna występuje zawsze. Podsumowując, rezystancja przejścia zestyków jest sumą rezystancji przewężenia oraz rezystancji niemetalicznych warstw powierzchniowych [2, 3]. Ocena jej wartości, odniesiona do wartości rezystancji minimalnej (wyznaczonej dla ekwiwalentnych, czystych i nieznacznie zdeformowanych powierzchni stykowych) powinna stanowić ważny wskaźnik stanu technicznego zestyków łączników znajdujących się w eksploatacji.

2. REZYSTANCJA ZESTYKOWA W UJĘCIU ANALITYCZNYM

Styki tworzące zestyk łączeniowy dociśnięte są do siebie przez mechanizm łącznika, wskutek czego mikropowierzchnie przylegania (Rys.1) podlegają odkształceniom sprężystym (przy małych siłach docisku) lub plastycznym (przy siłach dużych, powodujących przekroczenie granicy plastyczności materiału stykowego). W przypadku dużych sił ściskających, wytrzymałość na zginięcie poszczególnych mikrowzniesień okazuje się być mniejsza niż wynikająca wprost z

twardości materiałów (określonych np. metodami Brinella lub Vickersa). Ze wzrostem docisku styków, wskutek spłaszczenia początkowych miejsc styczności, wzrasta nie tylko rzeczywista powierzchnia ich przylegania, ale także pojawiają się kolejne punkty połączeń międzyelektrodowych. Wymiary i liczba punktów styczności są więc nieliniowymi funkcjami siły zgniatającej, można je jednak ocenić na podstawie zależności [2, 4]:

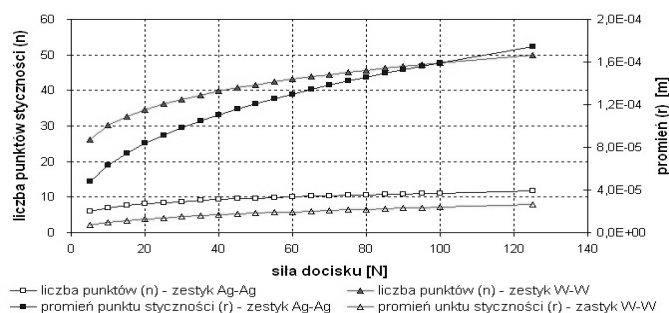
$$n = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot H^{0,625} \cdot F^{0,2} \quad (1)$$

w której: n – liczba punktów styczności, H – twardość materiału stykowego (wg Brinella lub Vickersa, N/m^2), F – siła docisku styków, N , oraz:

$$r = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}} \quad (2)$$

w której: r – promień (uśredniony) punktu styczności, m , ξ – współczynnik empiryczny o wartości 0,3-0,6 [4].

Przykładową zależność liczby punktów styczności i ich średniego promienia od siły docisku styków, wykonanych ze srebra i wolframu, przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Zależność liczby i wielkości (promienia) punktów styczności w funkcji siły docisku styków dla przykładowych materiałów o znacznie zróżnicowanej twardości

Materiały stykowe, stosowane w łącznikach elektroenergetycznych, muszą spełniać wiele (często wzajemnie sprzecznych) wymagań użytkowych, z których najważniejszymi są: dobra przewodność elektryczna i cieplna oraz wysoka odporność na erozyjne działanie łuku elektrycznego. W aktualnie produkowanych łącznikach próżniowych są to zazwyczaj spieki i stopy srebra lub miedzi z wolframem (w stycznikach) oraz miedzi i chromu (w wyłącznikach).

Gdyby rezystancja przejścia zależała wyłącznie od liczby punktów styczności w zestyku, to zgodnie z rysunkiem 2, do wykonania nakładek stykowych korzystnie byłoby stosować materiały twarde. Niestety punkty styczności mają wówczas niewielkie wymiary. Dodatkowo na rezystancję zestykową wpływa także

rezystywność materiału stykowego i rezystancja warstw powierzchniowych, tak więc w konsekwencji:

$$R = R_k + R_p \quad (3)$$

gdzie R_n są odpowiednio rezystancjami: R – zestykowej, R_k – kształtu, R_p – warstw powierzchniowych.

Rezystancję zestykową opisuje zależność [4]:

$$R = \frac{\rho}{2na} + \frac{\rho_p}{n\pi a^2} \quad (4)$$

w której: ρ – rezystywność materiału stykowego, $\Omega \cdot m$, ρ_p – rezystywność warstw powierzchniowych, $\Omega \cdot m^2$.

Przy założeniu, że warstwy powierzchniowe w komorze próżniowej można zaniedbać, po uwzględnieniu zależności (1) i (2):

$$R = \left(\frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi \zeta}{2,5 \cdot 10^{-5}}} \cdot H^{0,1875} \right) \cdot F^{-0,6} \quad (5)$$

Wychodząc z zależności opracowanych przez Holma [1], w pracy [5] przedstawiono zależność opisującą rezystancję styków płaskich, poddanych działaniu sił ściskających, powodujących odkształcenia plastyczne:

$$R = \frac{\rho}{2n} \sqrt{\frac{\pi \sigma}{F}} \quad (6)$$

w której: σ – naprężenia odkształceń plastycznych materiału styków, N/m^2 .

Na prostą postać wzoru opisującego rezystancję zestyków wykonanych m.in. z różnych materiałów wskazuje Rachowski [3]:

$$R = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{2} \sqrt{\frac{H}{F}} \quad (7)$$

gdzie ρ_1 i ρ_2 są rezystywnościami poszczególnych materiałów, natomiast H jest twardością styku bardziej miękkiego.

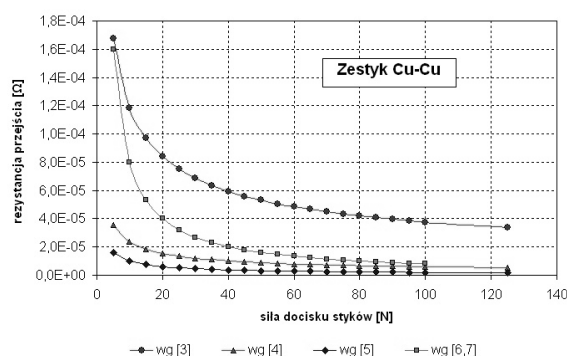
Prostą interpretacyjnie formułę, ale ograniczoną do bardzo skromnego zestawu metali (w zasadzie niewykorzystywanych obecnie w konstrukcjach zestyków) przedstawiają prace [6] i [7]:

$$R = \frac{c\rho}{(0,1F)^m} \quad (8)$$

przy czym nieliczne wartości dla parametrów ($c \cdot \rho$) i (m) zamieszczono w [5, 6, 7].

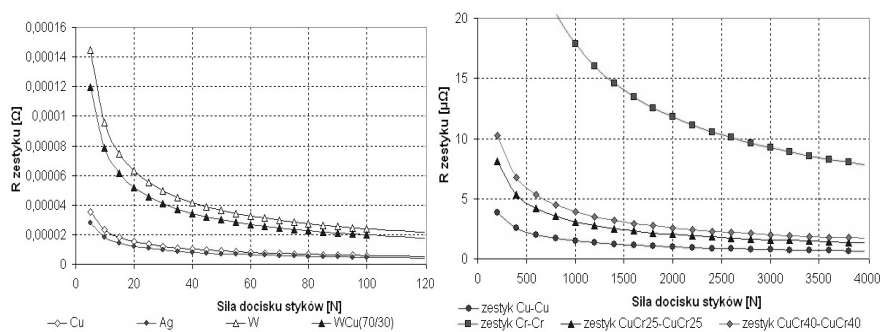
Przykładowe wartości rezystancji zestykowej, wyznaczone dla zestyku miedzianego (Cu-Cu) przedstawia rysunek 3.

Z uwagi na ograniczenia zakresu stosowalności i dostępności danych dla części z wykorzystanych wcześniej wzorów, w dalszych obliczeniach wykorzystano przede wszystkim uniwersalną zależność zaproponowaną przez Johannet'a [4].



Rys. 3. Wartości obliczeniowe rezystancji przejścia dla zestyku miedzianego wyznaczone na podstawie zależności literaturowych

Na rysunku 4 pokazano obliczeniową zależność rezystancji przejścia od siły docisku elektrod, dla materiałów wykorzystywanych w konstrukcjach zestyków styczników i wyłączników próżniowych. Wprawdzie metale jednoskładnikowe nie mają zastosowania praktycznego, ale uzyskane dla nich dane tworzą obwiednie spodziewanych wartości rezystancji zestykowych kompozytów miedzi i srebra z wolframem i chromem. Materiał WCu70/30 jest kompozytem proszkowym, powszechnie stosowanym w stycznikach próżniowych, m.in. w komorach gaszeniowych VK-7, produkowanych w Polsce styczników SV-7. Zakres obliczeniowy dla materiałów stycznikowych ograniczono do 125 N z uwagi na stosowanie w stycznikach próżniowych sił dociskowych nie przekraczających wartości 100 N. W wyłącznikach próżniowych średniego napięcia powszechnie stosowanymi materiałami stykowymi są spieki CuCr o względnie dużej odporności na skutki erozyjne działania łuku wielkopądowego. Siły docisku takich styków są znaczne i osiągają wartości kilku kiloniutonów. Dla takich warunków obliczeniowych wyznaczono rezystancje zestykowe kompozytów CuCr25 oraz CuCr40. Uzyskane wartości zilustrowano na rysunku 4, w otoczeniu przebiegów charakterystyk wyliczonych dla czystej miedzi i chromu.

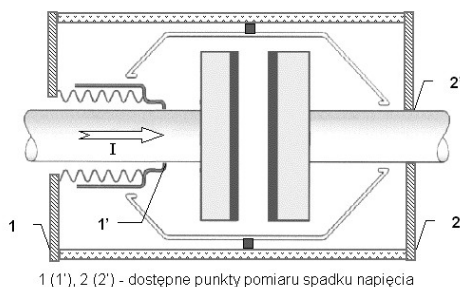


Rys. 4. Rezystancja przejścia czystych zestyków dla przykładowych materiałów i typowych sił docisku, stosowanych w stycznikach i wyłącznikach próżniowych

Zgodnie z przewidywaniami przewaga miedzi w kompozytach CuCr25 i CuCr40 wpływa na umiejscowienie przebiegu zmian ich rezystancji zestykowej w sąsiedztwie charakterystyki zmian rezystancji zestyku miedzianego.

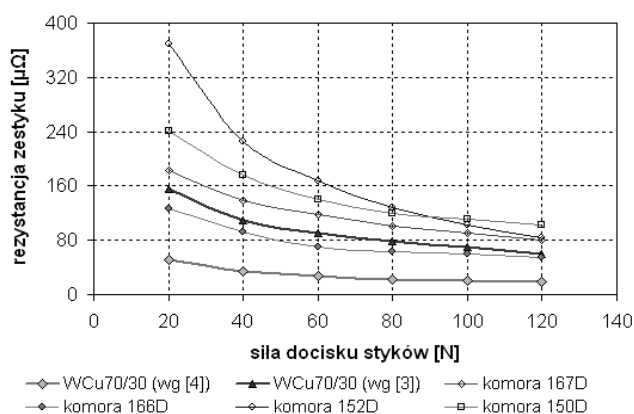
3. WYNIKI OBLICZEŃ W ODNIESIENIU DO BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Pomiary weryfikacyjne wykonano dla próżniowych komór gaszeniowych stycznikowych (typu VK-7) oraz wyłącznikowych (typu PKG i KG). Formę poglądową takich komór przedstawiono na rysunku 5, natomiast informacje dotyczące konstrukcji i materiałów stykowych zawierają prace [8 i 9].

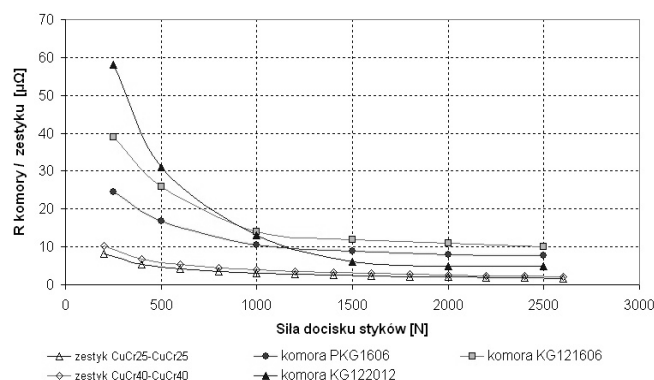


Rys. 5. Poglądowa konstrukcja próżniowej komory gaszeniowej z zaznaczeniem miejsc pomiaru rezystancji

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów rezystancji komór gaszeniowych w porównaniu z obliczeniowymi rezystancjami przejścia ich zestyków, wyznaczonymi z wzorów (5) i (7).



Rys. 6. Wyznaczone doświadczalnie wartości rezystancji dla przykładowych, stycznikowych komór próżniowych typu VK-7



Rys. 7. Wartości rezystancji dla przykładowych wyłącznikowych komór próżniowych

Z uwagi na hermetyczność użytkowej komory gaszeniowej pomiar rezystancji w bezpośrednim pobliżu jej zestyku nie jest możliwy. W komorach stycznych dostępne punkty pomiarowe 1' i 2' (Rys. 5) znajdują się w odległościach poniżej 5 mm od punktu styczności zestyku, zatem rezystancja torów prądowych ma mały udział w całkowitej rezystancji pomierzonej. Mimo to, z szeregu badanych komór tylko oznaczona numerem 166 D posiada rezystancje przejścia zbliżoną do wartości obliczeniowych (zawartych między wynikami obliczeń wg [3] i [4] – Rys. 6) Dla komór wyłącznikowych rezystancja torów zasilających ma wartość zbliżoną do rezystancji zestykowej i zdecydowanie wpływa na zwiększenie zmierzonej wartości całkowitej. Zwraca również uwagę duże zróżnicowanie nachylenia charakterystyk zmian rezystancji dla poszczególnych komór gaszeniowych.

4. PODSUMOWANIE

Wyniki obliczeń i pomiarów wskazują na znaczne zróżnicowanie uzyskanych danych. Dla komór stycznych pomiary, porównane z wynikami analitycznymi, mogą być bezpośrednim punktem odniesienia do oceny stanu technicznego komór eksploatowanych. W przypadku komór wyłącznikowych, (o bardzo małych rezystancjach przejścia), przy takiej ocenie wymagane jest uwzględnienie rezystancji torów prądowych. Wartości tych rezystancji są bowiem zbliżone do wartości rezystancji zestykowych.

LITERATURA

- [1] Kryński J., Elektryczne aparaty rozdzielcze, cz.I, PWN, Łódź – Warszawa, 1963.
- [2] Holm R., Electric Contacts - Theory and Application, Springer-Verlag, Berlin, 1967.
- [3] Rachowski W. I., Fizyczne osnowy komutacji elektrycznego toka w wakuumie, Nauka, Moskwa 1970.

- [4] Johannet P., Study of a mathematical model representing the ageing of electrical contacts versus time, *Trans. IEEE on PAS* (1972), p. 1211-1219.
- [5] Ciok Z., *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*, WNT, W-wa, 1976.
- [6] Maksymiuk J., *Aparaty elektryczne*, WNT, W-wa, 1995.
- [7] Kulas S., *Tory prądowe i układy zestykowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, W-wa, 2008.
- [8] *Materials for Vacuum Applications*, Doduco, <http://www.doduco.net/en/doduco.aspx>.
- [9] Janiszewski J., Batura R., *Konstrukcje łączników próżniowych i próżniowych komór gaszeniowych opracowane w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej, Przegląd Elektrotechniczny (PL ISSN 033-2097)*, nr 11b, 2010, s. 229-232.

MODEL RESEARCH OF VACUUM SWITCHES' CONTACT RESISTANCE

Transition resistance of coupled electrodes, including in particular the power switches electrical contacts, is the basic parameter which determines current capacity of the plate (in the long term operating conditions) and a short-circuit load limit (above which the contacts get welded). The results of simulation calculations of the transition resistance for selected types of contacts made for different mathematical models are presented. There was also made an evaluation of the compliance of theoretical results with ones got from inspections of the real objects.