

Jerzy JANISZEWSKI*
Ryszard BATURA*

BADANIA MODELOWE STANU CIEPLNEGO ZESTYKÓW ELEKTRYCZNYCH

Podstawową wielkością fizyczną, opisującą pracę przepustową łącznika elektroenergetycznego jest temperatura styków w stanie cieplnie ustalonym. Osiągana wartość temperatury zależy od ilości ciepła wydzielanej głównie na rezystancji zestyku. Dla obliczeń cieplnych układ zestykowy stanowi zawsze przypadek osiowego przepływu ciepła, które odpływa z niego przede wszystkim dzięki znacznej przewodności ciepłej torów prądowych. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych stanu cieplnego zestyków modelowych oraz ocenę stopnia ich zgodności z wynikami badań obiektów rzeczywistych.

SŁOWA KLUCZOWE: zestyki, nagrzewanie styków, temperatura styków

1. WPROWADZENIE

Zestyki rozłączne są jednym z podstawowych podzespołów funkcjonalnych stykowych łączników elektroenergetycznych. Umożliwiają one załączanie i wyłączanie obwodów prądowych i z tego powodu nazywa się je także zestykami łączeniowymi. Dwa styki tworzące taki zestyk dociśnięte są do siebie przez mechanizm łącznika, przy czym rzeczywisty obszar ich przylegania zależy zarówno od topografii powierzchni obydwu elektrod, jak i od siły docisku wywieranej przez napęd łącznika [1, 2]. Rzeczywista (całkowita) wielkość powierzchni styczności jest sumaryczną powierzchnią w punktach przylegania i stanowi zaledwie kilka procent powierzchni pozornej (wynikającej z wymiarów geometrycznych stykających się elektrod). Powierzchnia ta jest w znacznej mierze zależna od twardości materiałów stykowych oraz sposobu i dokładności ich obróbki [3, 4].

Dla przepływającego prądu obecność elementarnych (pseudopunktowych) powierzchni przylegania elektrod powoduje powstanie lokalnych obszarów wzrostu jego gęstości. Oznacza to powstanie w torze prądowym z zestykiem dodatkowej rezystancji (związanej z miejscowym ograniczeniem przekroju), którą określa się jako tzw. rezystancję przewężenia lub rezystancję kształtu.

* Politechnika Poznańska.

Rezystancja całkowita zestyku (nazywana także rezystancją przejścia) jest w rzeczywistości większa, ponieważ na powierzchniach elektrod występują zwykle dodatkowe warstwy adsorpcyjne i nalotowe (korozyjne). Rezystancja wypadkowa jest więc sumą rezystancji kształtu i rezystancji warstw powierzchniowych [2, 3].

Przepływ prądu przez tory prądowe z zestykami jest charakterystycznym stanem pracy przepustowej wszystkich łączników elektrycznych. W takich przypadkach, zgodnie z prawem Joule'a, przepływowi prądu towarzyszy wydzielanie się ciepła zarówno na rezystancjach torów prądowych jak i rezystancjach zestykowych. Powoduje to niekorzystne nagrzewanie się łączników, przy czym z uwagi na zwykle większą rezystancję zestyków niż samych torów zasilających [5], obciążenie cieplne połączeń stykowych jest głównym czynnikiem narażeniowym łącznika w jego warunkach roboczych.

Wymagania dla poprawnej pracy zestyku (w konsekwencji także łącznika) dotyczą nieprzekraczania jego dopuszczalnej temperatury. Niestety w większości przypadków zestyki łączników są niedostępne dla eksploatorów (zabudowane lub zamknięte w hermetycznych komorach gaszeniowych) i w większości przypadków nie ma możliwości wykonania pomiarów tej temperatury metodami bezpośrednimi. Potencjalną możliwość pokonania tej bariery umożliwi analityczne określenie temperatury styków na podstawie rozplywu ciepła i wykonanym pomiarze temperatury toru prądowego na jego wyjściu z komory gaszeniowej. Przedstawione w pracy badania modelowe wykonano z nakierowaniem na przewidywane badania stanu cieplnego zestyków w komorach gaszeniowych łączników próżniowych.

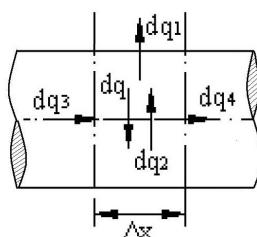
2. ANALITYCZNE UJĘCIE NAGRZEWANIA SIĘ STYKÓW

Przepływający przez tor prądowy prąd powoduje wzrost jego temperatury ponad temperaturę otaczającego środowiska. Gdy straty ciepła oddawanego do otoczenia zrównają się ciepłem wytwarzanym w przewodniku, osiągnąony zostaje tzw. stan ustalony (termicznie). Obecność dodatkowych źródeł ciepła np. w postaci rezystancji zestykowej powoduje powstanie dodatkowego, osiowego przepływu ciepła, wpływającego na zmianę wzdłużnego rozkładu temperatury przewodnika. Do obliczeń analitycznych takiego rozkładu temperatury wykorzystano model bilansu cieplnego, opisującego wymianę ciepła w dowolnym elemencie toru pokazanego na rysunku 1. Równanie bilansu ciepła w stanie ustalonym dla elementu Δx toru prądowego, przy przepływie prądu wyraża się wzorem:

$$dq_1 + dq_2 - dq_3 + dq_4 - dq = 0 \quad (1)$$

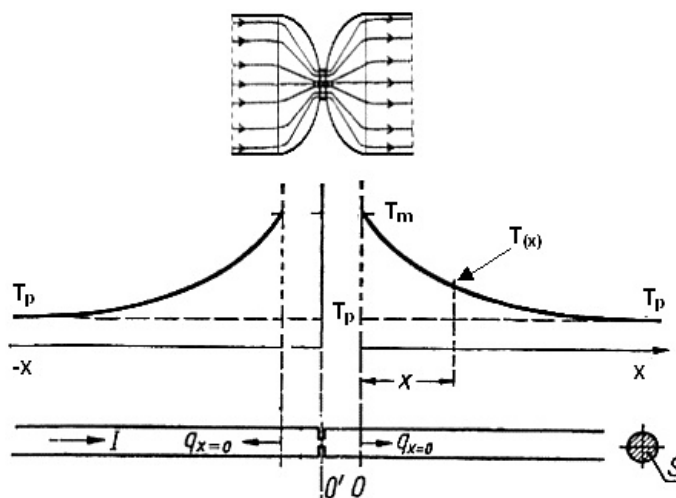
w którym: dq – ilość ciepła wytworzona w torze prądowym przez przepływający prąd, dq_1 – ilość ciepła przejmowana przez otoczenie z powierzchni toru, dq_2 –

ilość ciepła wykorzystana na nagrzanie toru, dq_3 – ilość ciepła przekazana przez przewodzenie do elementu dx toru, dq_4 – ilość ciepła przekazana przez przewodzenie z elementu dx toru.



Rys. 1. Model wymiany ciepła w elemencie toru prądowego

Do obliczeń uwzględniających w torze prądowym istnienie zestyku można założyć (ze względu na odpływ ciepła do obydwu styków), że dodatkowe źródło ciepła, scharakteryzowane rezystancją zestykową R_p , umiejscowione jest na początku toru – punkt „0” na rys. 2. Przyjmuje się, że cała powierzchnia przekroju przewodnika (S) przejmuje ciepło wydzielone w strefie stykowej.



Rys. 2. Idea wyznaczenia rozkładu temperatury wzdłuż toru prądowego z zestykiem

Wykonując podstawienia klasycznych zależności (przytoczonych m.in. w pracach [6, 7]), opisujących poszczególne składniki q_i równania (1), dla stanu cieplnie ustalonego otrzymuje się rozwiązanie równania różniczkowego o postaci:

$$T = T_p + \frac{I^2 R_{p9}}{2\sqrt{k\lambda SA}} e^{-x\sqrt{\frac{kA}{\lambda S}}} \quad (2)$$

gdzie: I – prąd płynący w torze prądowym o przekroju S , A – obwód toru prądowego, R_{pv} – rezystancja zestykowa, λ – współczynnik przewodności cieplnej przewodnika, k – współczynnik oddawania ciepła przez powierzchnię boczną toru prądowego, T – miejscowa temperatura przewodnika, T_p – temperatura ustalona toru prądowego.

Rezystancję zestykową można wyznaczyć doświadczalnie lub wyliczyć z zależności przedstawionych w pracach [2, 3, 5, 8].

Równanie (2) przedstawia rozkład temperatury $T_{(x)}$ wzdłuż przewodnika licząc od jego początku (współrzędna x) miejsca połączenia stykowego. Temperatura ustalona T_p przewodnika wynika z jego rezystywności, geometrii i wartości płynącego prądu:

$$T_p = T_0 + \frac{I^2 \rho_g k_w}{kAS} \quad (3)$$

gdzie: ρ_v – jest rezystywnością materiału toru prądowego (zależną od temperatury), k_w – współczynnik strat dodatkowych, wynikający z naskórkowości i efektów zbliżenia z innymi torami prądowymi.

Dla początku układu współrzędnych obliczeniowych ($x = 0$) wyznaczana jest wartość temperatury zestyku T_m , która odpowiada temperaturze styków mierzonej doświadczalnie [6]. W punktach rzeczywistej styczności występuje dodatkowy wzrost temperatury o wartości określonej zależnością [6, 8]:

$$\Delta T = \frac{U_p^2}{8\rho_g \lambda} \quad (4)$$

w której: U_p – spadek napięcia na rezystancji zestykowej ($U_p = I R_{pv}$)

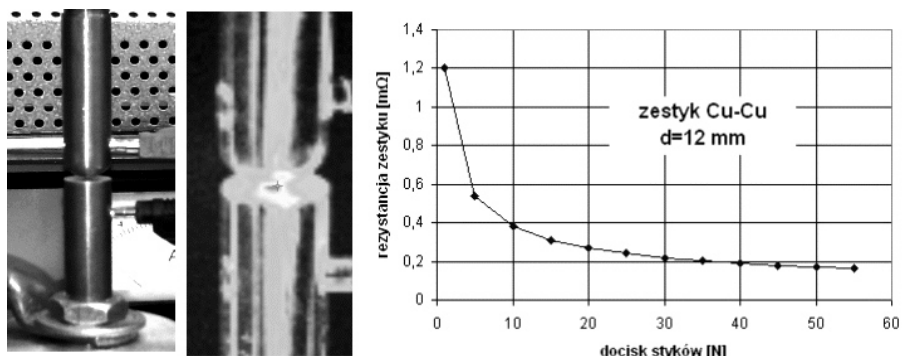
W konsekwencji wartość maksymalnej temperatury w punkcie styczności T_{max} może znacznie przewyższać temperaturę uznawaną powszechnie jako temperatura zestyku. Jest ona wyznaczana jako suma temperatury T_m oraz przyrostu ΔT :

$$T_{max} = T_m + \Delta T = T_0 + \frac{I^2 \rho_g k_w}{kAS} + \frac{I^2 R_{p9}}{2\sqrt{k\lambda SA}} + \frac{U_p^2}{8\rho_g \lambda} \quad (5)$$

3. REZULTATY OBLICZEŃ I BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

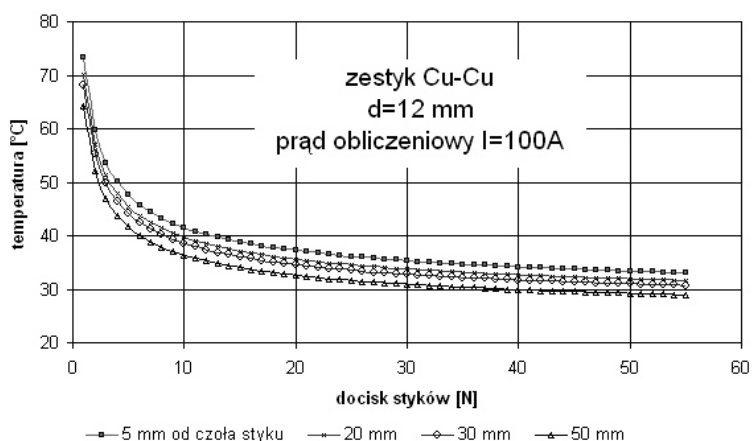
Obliczenia rozkładu temperatury w torach prądowych z zestykami wykonano dla układów modelowych, na których wykonano dodatkowo pomiary weryfikacyjne. Obiektem wyjściowym były elektrody miedziane o średnicy 12 mm z zestykiem punktowym, utworzonym przez dociśnięcie płaskiej i

półkulistej powierzchni czołowej prętów. Widok badanych elektrod, ich obraz termograficzny w próbie z obciążeniem prądem 100A oraz wyznaczoną analitycznie zależność ich rezystancji zestykowej od siły docisku zestyku pokazano na rys. 3.



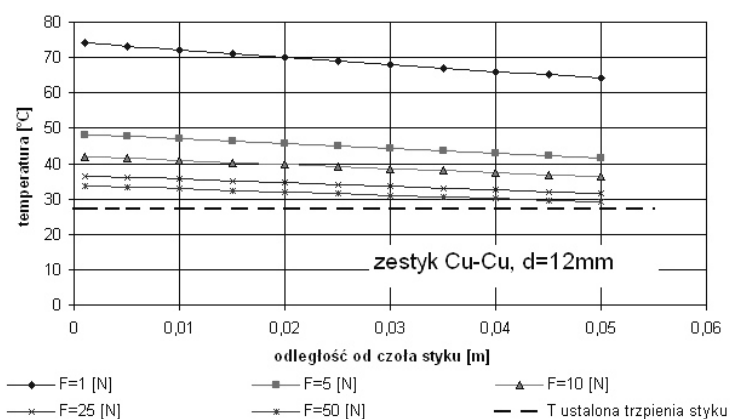
Rys. 3. Badane elektrody trzpieniowe i wyznaczona dla nich zależność rezystancji zestykowej od siły docisku styku punkowego

Na rysunku 4 przedstawiono wpływ siły docisku na rozkład wartości temperatury wzdłuż badanych elektrod. Obliczenia ograniczono do odległości realnie dostępnych w układach stykowych rzeczywistych obiektów, jakimi są niskonapięciowe łączniki elektroenergetyczne. Z przedstawionych danych wynika, że temperatury wyznaczonych dla punktów oddalonych od 5 do 55 mm od czoła styku (niezależnie od siły docisku elektrod) wykazują sukcesywny spadek wartości, jednak nie przekraczający 10 stopni.



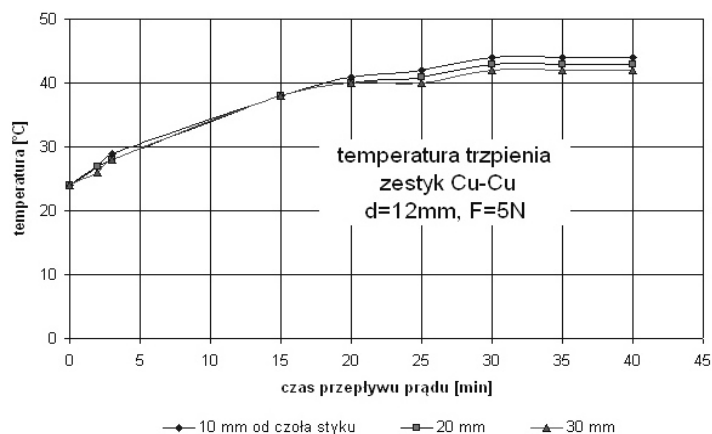
Rys. 4. Rozkład temperatury w trzpieniach miedzianych z zestykiem punktowym

Wniosek taki ilustruje również rysunek 5. Przy siłach docisku styków większych od 10 N, spadek temperatury na miedzianych trzpieniach nie przekracza $2\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{cm}$. Stwarza to przesłanki do wnioskowania o możliwości oszacowania temperatury styków na podstawie pomiaru temperatury elektrod na wypustach prądowych komór gaszeniowych łączników.



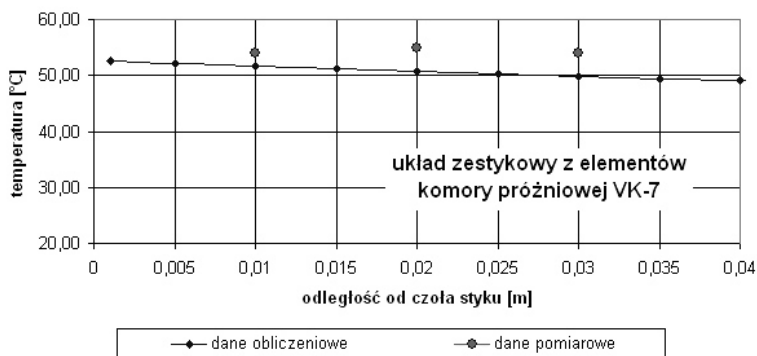
Rys. 5. Rozkład temperatury w trzpieniach miedzianych w funkcji odległości od czoła styku

Badania weryfikacyjne wykonano przy zasileniu elektrod prądem przemiennym o wartości 100 A. Wyniki ilustrujące przebieg nagrzewania elektrod z zestykiem punktowym pokazano na rys. 6. W stanie ustalonym temperatury w punktach odległych 10, 20 i 30 mm od czoła styku są zbliżone do wartości obliczeniowych (rys. 5) i wykazują zróżnicowanie ok. $1\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{cm}$.



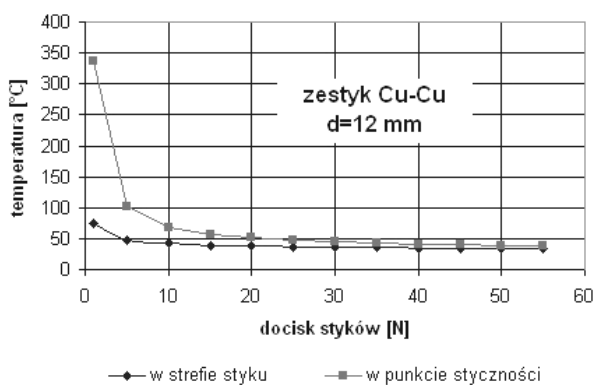
Rys. 6. Przebieg nagrzewania trzpieni miedzianych z zestykiem punktowym

Podobne rezultaty uzyskano dla obiektu modelowego zbudowanego z elementów tworzących zestyk próżniowej komory gaszeniowej stycznika SV-7. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Ustalona temperatura torów prądowych z zestykiem komory próżniowej VK-7 (stycznika próżniowego SV-7)

Na uzyskane niewielkie zróżnicowanie mierzonych temperatur w oddaleniu od czoła styku nie ma wpływu stosunkowo wysoka temperatura T_{max} w samym punkcie styczności elektrod. Jej wartość w porównaniu z wartością temperatury T_m w strefie styczności, w zależności od docisku elektrod przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Zależność temperatury w strefie stykowej i w punkcie styczności miedzianego zestyku punktowego w zależności od siły docisku elektrod

Przy okazji można stwierdzić, że nawet dla miękkich materiałów stykowych praca z małymi siłami docisku ($F < 10$ N) zdecydowanie podnosi temperaturę w miejscu przylegania elektrod, natomiast praca z dużymi dociskami ($F > 20$ N), z punktu widzenia ograniczenia nagrzewania nie jest uzasadniona.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania modelowe, zweryfikowane w pewnym zakresie wynikami badań na rzeczywistych obiektach, potwierdzają potencjalną możliwość wyznaczania temperatury rzeczywistej zestyków, w oparciu o pomiar temperatury w pewnym oddaleniu od styków i właściwe rozpoznany przebieg rozptyłu ciepła z obszaru stykowego. Jest to zagadnienie ważne z punktu widzenia diagnostyki zestyków łączników elektroenergetycznych będących w eksploatacji. W większości przypadków nie ma technicznych możliwości pomiaru temperatury powierzchni styków z uwagi na ich zabudowanie w komorach gaszeniowych łączników. Opracowanie metody wyznaczania temperatury styków w oparciu o sugerowane założenia umożliwi wykonywanie niektórych badań eksploatacyjnych łączników, bez ich demontażu z pracujących obwodów. Wykonywany dotychczas ewentualny pomiar spadku napięcia na zestykach zasilanych prądem przemiennym jest w przypadku wielu typów łączników (np. próżniowych) całkowicie niemiarodajny.

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] Johannet P., Study of a mathematical model representing the ageing of electrical contacts versus time, Trans. IEEE on Pas (1972), p. 1211-1219.
- [4] Kulas S., Tory prądowe i układy zestykowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, W-wa, 2008.
- [5] Janiszewski J, Książkiewicz A., Badania modelowe rezystancji zestykowej łączników próżniowych, Electrical Engineering, Poznan University of Technology Academic Journals, No78, 2014, pp: 167-174.
- [6] Au A., Maksymiuk J., Pochanke Z., Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych, WNT, W-Wa, 1976.
- [7] Ciok Z., Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych, WNT, W-wa, 1976.
- [8] Maksymiuk J., Aparaty elektryczne, WNT, Warszawa, 1992.

MODEL RESEARCH OF ELECTRICAL CONTACTS' THERMAL STATE

The temperature of switches in steady thermal state is the basic physical parameter, which describes the work of switch with connected contacts. The reached value of temperature depends on the amount of heat dissipated from the contacts surfaces. For thermal calculations, contact system is always a case of axial heat flow, which is transferred mainly via high thermal conductivity of current conductors. The results of simulation calculations of the thermal state for model contacts are presented. There was also made an evaluation of the compliance of theoretical results with inspections made on the real objects.