

# Obciążenia i narażenia podstawowe układów stykowych łączników elektrycznych

*Układy izolacyjne oraz stykowe łączników elektroenergetycznych należą do podzespołów, które najczęściej ulegają uszkodzeniu. Miarą wytrzymałości elektrycznej na przebicie przerwy (przestrzeni) międzystykowej łącznika jest natężenie pola elektrycznego i odpowiadające mu napięcie, przy którym następuje przebicie układu. Przebicciu przerwy międzystykowej sprzyja występująca tam niejednorodność naprężeń elektrycznych. Układy stykowe w stanie przewodzenia prądów lub w procesie ich łączenia są z kolei najbardziej obciążonymi cieplnie elementami torów prądowych. Powinny być tak zaprojektowane, wykonane i eksploatowane, aby w stanie przewodzenia prądów roboczych nie były przekroczone przepisowe wartości przyrostów temperatury i żeby styki się nie szepiały, ani trwale nie odkształcały podczas przewodzenia prądów zakłóceniovych. W pracy przedstawiono przykłady wykorzystania metod analitycznych i numerycznych do oceny stopnia niejednorodności pola elektrycznego w przestrzeni międzystykowej oraz podano odpowiednie zależności matematyczne, umożliwiające oszacowanie wartości napięcia przebicia przerwy międzystykowej. W opracowaniu tym omówiono również czynniki wpływające na obciążalność prądową układów stykowych w stanie przewodzenia prądów roboczych oraz zakłóceniovych.*

Słowa kluczowe: *Wytrzymałość elektryczna na przebicie przerwy międzystykowej, narażenia prądowe układów stykowych*

## 1. WPROWADZENIE

---

Układy stykowe są podstawowymi podzespołami torów prądowych aparatów elektrycznych, w szczególności łączników elektrycznych oraz przewodów szynowych. Umożliwiają łączenie prądów roboczych i zakłóceniovych, zapewniają połączenie torów prądowych poszczególnych aparatów, a także przesył i rozdział energii elektrycznej. Powinny być tak zaprojektowane, wykonane i eksploatowane, aby w procesie załączania i wyłączania prądów przez zestyki łączeniowe była w szczególności zachowana w jak największym stopniu jednorodność naprężeń elektrycznych w obszarze międzystykowym. W stanie przewodzenia prądów roboczych, od układów stykowych wymaga się, aby dopuszczalne przyrosty temperatury w zestykach nie były przekraczane, natomiast podczas przewodzenia prądów zakłóceniovych

stych styki ich się nie szepiały, ani trwale nie odkształcały [2, 4, 7, 9].

W pracy przedstawiono przykłady wykorzystania metod analitycznych i numerycznych do oceny stopnia niejednorodności pola elektrycznego w przestrzeni międzystykowej. Omówiono również czynniki wpływające na obciążalność prądową układów stykowych w stanie przewodzenia prądów roboczych oraz zakłóceniovych.

## 2. ANALIZA NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO

---

Najważniejszą cechą charakterystyczną izolacji układów stykowych jest jej wytrzymałość elektryczna na przebicie. Wytrzymałość dielektryczna zależy od temperatury dielektryka, kształtu przebiegu napię-

cia przyłożonego do elektrod, ciśnienia, konfiguracji i materiału elektrod, stanu powierzchni elektrod, zanieczyszczeń itd. Miarą wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego jest natężenie pola elektrycznego lub odpowiadające mu napięcie, przy którym następuje przebicie układu. Przebiciu przerwy międzystykowej układu stykowego sprzyja niejednorodność rozkładu naprężeń elektrycznych w omawianej przestrzeni.

Analizę pól elektrycznych w przypadku nieskomplikowanych układów izolacyjnych przeprowadza się przy pomocy analitycznych metod. Do analizy pól elektrycznych w złożonych układach izolacyjnych stosuje się cyfrową technikę obliczeniową, wykorzystującą metodę elementów skończonych, metody równań całkowych czy innych.

Wśród metod analitycznych użytecznych do określania wartości natężenia pola elektrycznego w wybranych układach izolacyjnych styków np. odłączników, rozłączników należy wyróżnić metodę wykorzystującą współczynniki Schwaigera  $\eta$  (zwane także współczynnikami wykorzystania izolacji). Współczynniki te są miarą stopnia niejednorodności pola w przestrzeni międzyelektrodowej i opisują wpływ geometrii elektrod, na wytrzymałość dielektryczną

odstępu izolacyjnego [1, 4]. Dla pola jednorodnego wartość współczynnika  $\eta = 1$ :

$$\eta = \frac{U}{E_k d} \tag{1}$$

gdzie:

- $U$  – napięcie przyłożone do układu elektrod, w kV,
- $E_k$  – natężenie krytyczne pola elektrycznego, przy którym następuje przebicie przerwy izolacyjnej, w kV/cm,
- $d$  – odstęp międzyelektrodowy, w cm.

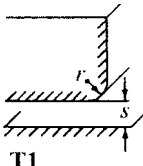
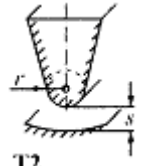
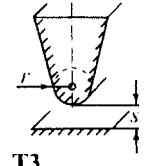
Ogólnie biorąc, współczynnik  $\eta$  jest dla danego kształtu układu elektrod zależny od geometrycznego współczynnika charakterystycznego  $p$ . Wartość tego współczynnika wyznaczamy z zależności

$$p = \frac{s+r}{r} \tag{2}$$

gdzie:

- $s$  – odstęp międzyelektrodowy, cm
- $r$  – elektrody o większej krzywiznie, cm.

Na rys. 1 podano dla kilku wybranych kształtów i konfiguracji elektrod, związek współczynnika  $\eta$  z parametrem charakterystycznym  $p$  [1, 4].

<p>Układ elektrod</p>	 <p>T1</p> <p>krawędź zaokrąglona - płaszczyzna</p>	 <p>T2</p> <p>współosiowe, paraboliczne cylindry</p>	 <p>T3</p> <p>krawędź hiperboloidalna - płaszczyzna</p>
<p>Współczynnik <math>\eta = f(p)</math></p>	$\frac{2}{1 + \sqrt{2p - 3}}$	$\frac{2}{1 + \sqrt{2p - 1}}$	$\frac{\text{arc ctg } \frac{1}{\sqrt{p-1}}}{\sqrt{p-1}}$

Rys. 1. Zależność współczynnika  $\eta$  od kształtu elektrod

Wartość napięcia przebicia przerwy izolacyjnej, dla wyznaczonej uprzednio wartości współczynnika  $\eta$  charakterystycznej dla analizowanego kształtu układu elektrod, oblicza się ze wzoru:

$$U_p = E_k d \eta \tag{3}$$

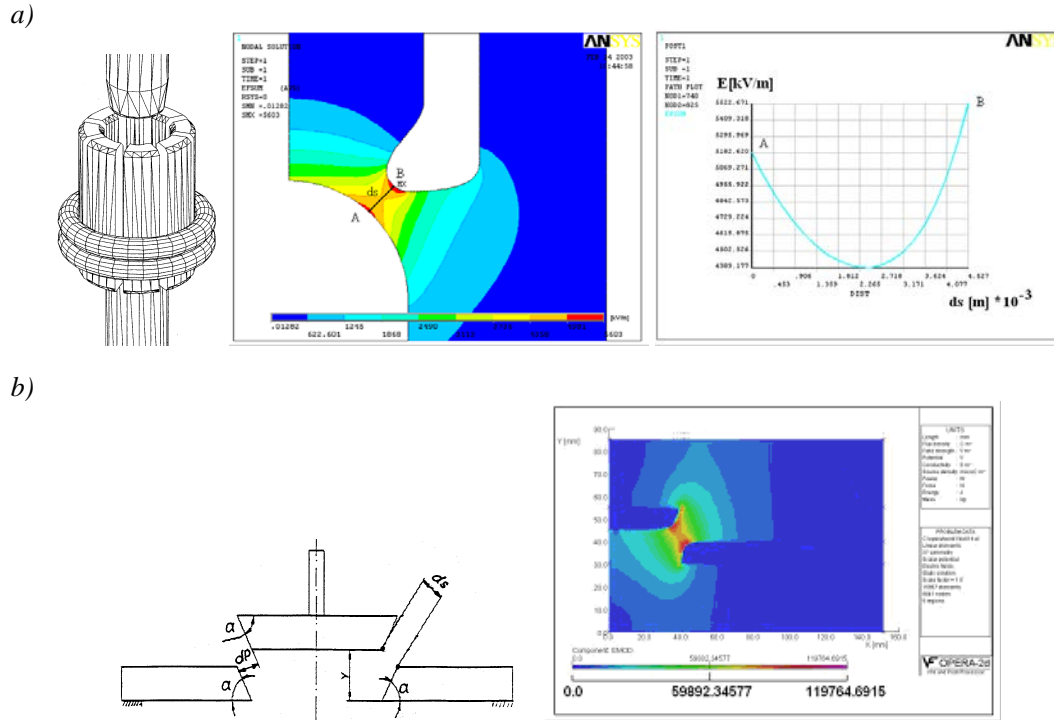
Metody analityczne okazują się użyteczne zwłaszcza w przypadkach porównywania wytrzymałości

elektrycznej przerwy izolacyjnej oraz wyznaczonych uprzednio cech konstrukcyjnych układu izolacyjnego.

Do analizy rozkładu pola elektrycznego w przestrzeniach międzystykowych łączników elektrycznych wysokiego napięcia, z uwagi na bardziej skomplikowaną geometrię styków i większą złożoność obliczeń teoretycznych natężenia pola, stosowane są metody numeryczne. W tym celu, do wyznaczania rozkładu natężenia pola elektrycznego w przestrzeni

międzystrykowej, a także do lokalizacji obszarów stykowych o największym narażeniu na przebicie, stosowana jest na ogół metoda elementów skończonych i wykorzystywane są programy np.: ANSYS, SolidWorks, Quick Field oraz OPERA.

Na rys. 2a i 2b przedstawione są przykładowe wyniki analizy natężenia pola elektrycznego w przestrzeni międzystrykowej układów stykowych tulipanowych i stożkowych [4, 6].

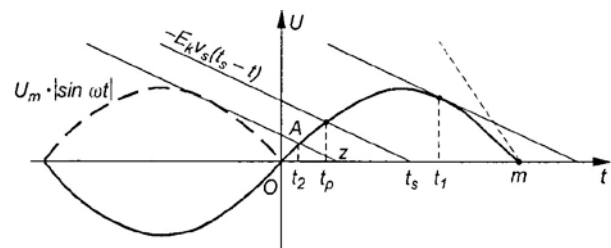


Rys. 2. Przykładowe rozkłady natężenia pola elektrycznego w przerwie międzystrykowej styków: a) tulipanowych, b) stożkowych

Przeprowadzona analiza numeryczna pola elektrycznego w przestrzeni międzystrykowej, potwierdziła przydatność jej do wyznaczania obszarów styków o największej wrażliwości na przebicie. Stwierdzono przy tym, że istotnymi cechami konstrukcyjnymi wpływającymi na rozkład pola elektrycznego w przestrzeni międzystrykowej układu stykowego są promienie zaokrążeń czoła końcówki styku ruchomego, promienie brzegu wewnętrznej powierzchni styczności styków nieruchomych.

Ustalono także, że stosunkowo niewielki wpływ na wytrzymałość elektryczną przerwy międzystrykowej, ma kąt styczności styków stożkowych. Jak wynika z tych badań, pewien wzrost wartości natężenia pola elektrycznego w obszarze stykowym, obserwuje się praktycznie dopiero w końcowej fazie ruchu styków, przed ich zetknięciem się.

Ograniczona wytrzymałość dielektryczna środowiska, otaczająca styki zamykanego wyłącznika elektrycznego wysokiego napięcia, powoduje, że załączenie prądu w obwodzie elektrycznym następuje najczęściej nie w wyniku uzyskania styczności styków, a w wyniku przebicia elektrycznego danego środowiska (rys. 3).



Rys. 3. Przykład określania chwili zapłonu łuku podczas załączania prądu przemiennego

W założeniu, że napięcie przebicia jest proporcjonalne do odległości między stykami, można wyznaczyć chwilę  $t_p$ , w której następuje przebicie podczas załączania prądu, przy napięciu  $u = U_m \sin \omega t$ , z zależności [4]:

$$U_m |\sin \omega t| = E_k n v_s (t_s - t_p) \quad (4)$$

$E_k$  – wartość natężenia pola elektrycznego, przy którym następuje przebicie;

$v_s$  – wartość prędkości schodzenia się styków (zmniejszania się odstępów międzystrykowych), w chwili zapłonu łuku elektrycznego w przerwie stykowej,

$n$  – liczba przerw w biegunie,  
 $t_p$  – chwila przebiecia przerwy,  
 $t_s$  – chwila zetknięcia się styków.

Załączenie prądu jest zatem możliwe przy dowolnym kącie fazowym napięcia, włącznie z kątem fazowym, odpowiadającym chwili przejścia napięcia przez wartość zerową, jeżeli spełniony jest warunek

$$k = \frac{nE_k v_s}{\omega U_m} \geq 1 \quad (5)$$

Minimalną wartość prędkości styków w chwili mechanicznego ich zetknięcia się, przy której nie nastąpi przebiecie przerwy międzystykowej podczas załączania prądu w obwodzie elektrycznym, można więc określić z zależności:

$$v_s \geq \frac{\omega U_m}{nE_k} \quad (6)$$

Im większa jest wartość prędkości  $v_s$  schodzenia się styków wyłącznika elektrycznego oraz im większa jest wartość natężenia pola elektrycznego  $E_k$ , tym krótszy jest czas palenia się łuku elektrycznego.

Faza załączania prądu w obwodzie elektrycznym, prędkość schodzenia się styków wyłącznika oraz rozrzuty czasów własnych jego działania mają istotny

wpływ na przetężenia i przepięcia w załączanym obwodzie.

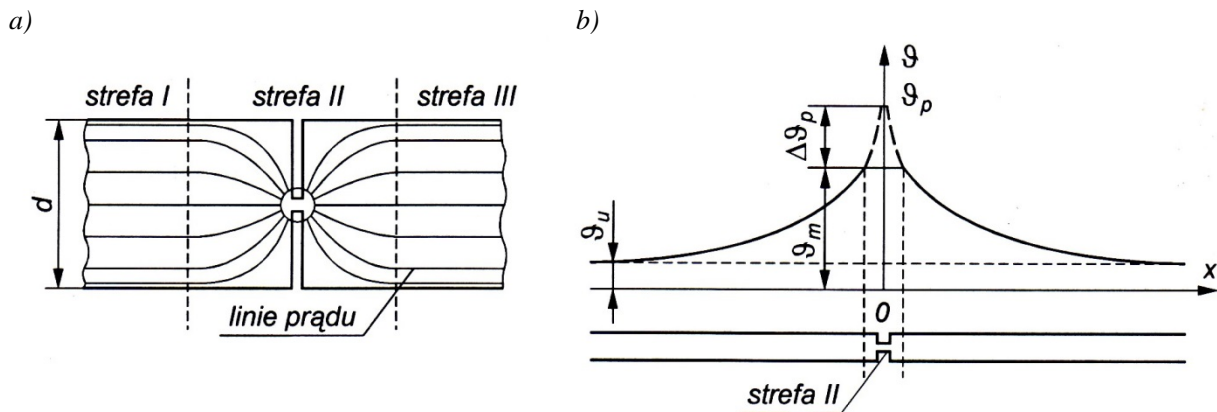
### 3. OBCIĄŻENIA I NARAŻENIA PRĄDOWE

#### 3.1. Obciążalność prądowa ciągła zestyków

Obciążalność prądowa ciągła zestyków zależy od ilości ciepła wydzielonego w zestyku oraz od stopnia intensywności odprowadzenia ciepła z nagrzanego zestyku. Podstawowymi źródłami strat ciepłych w układach stykowych z prądem  $i(t)$  są straty ciepłne (ciepło Joule'a) powstałe w przewodniku o odpowiednio ukształtowanych elementach układu stykowego oraz straty wydzielone w rezystancji zestykowej ( $R_p$ ), która jest zależna między innymi od siły docisku styków i stanu ich powierzchni oraz grubości i struktury warstw nalotowych [1, 3, 4, 8, 10].

Analiza teoretyczna nagrzewania powierzchni styczności zestyków przez prąd ciągły jest w zasadzie opracowana dla zestyków punktowych. Dla innych rodzajów zestyków obliczenia są prowadzone przy pewnych uproszczeniach, a więc w przybliżeniu opisują proces nagrzewania zestyków.

Przykładowy rozkład temperatury w zestyku punktowym jest przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4. Nagrzewanie toru prądowego z zestykiem jednopunktowym: a) model zestyku, b) rozkład temperatury wzdłuż toru prądowego

Temperatura maksymalna  $g_m$  występująca w miejscu zestyku punktowego (rys. 3.1b) wynosi

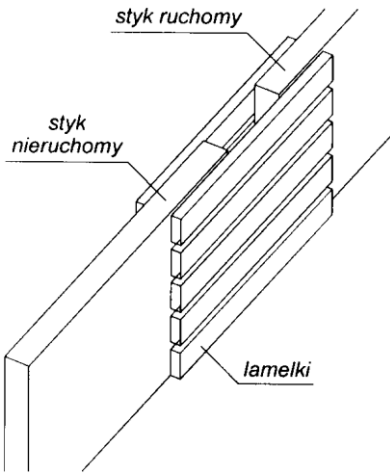
$$g_m = I^2 \left( \frac{1}{2} R_p \frac{1}{\sqrt{\lambda A k_s}} + \frac{\rho_g k_w}{S k A} \right) + g_0 \quad (7)$$

gdzie:

$k_w = k_0 k_z$  – współczynnik wypierania prądu równy iloczynowi współczynnika naskórkowości  $k_0$  i współczynnika zbliżenia  $k_z$ ;  
 $k$  – współczynnik oddawania ciepła w drodze unoszenia i promieniowania,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

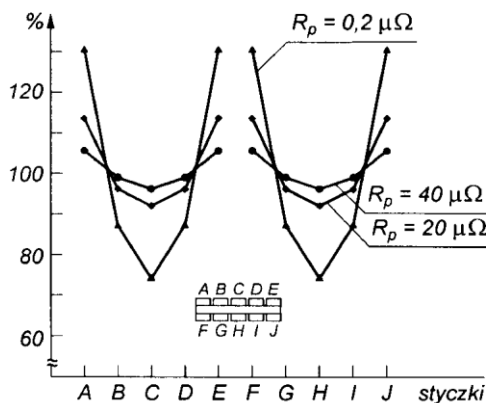
$\rho_g$  – rezystywność materiału przewodu w temperaturze  $g$ ,  $\Omega \cdot m$ ;  
 $g_p$  – temperatura rzeczywistej powierzchni styczności zestyku w stanie ustalonym, K;  
 $g_u$  – temperatura w stanie ustalonym toru prądowego, K;  
 $g_0$  – temperatura otoczenia, K;  
 $\lambda$  – współczynnik przewodności cieplnej,  $W/m \cdot K$ ;  
 $S$  – powierzchnia przekroju przewodu,  $m^2$ ;  
 $A$  – obwód przekroju poprzecznego przewodu, m.

Zestyki przyłączone łączników elektrycznych (szynoprzewodów) przystosowane do przewodzenia dużych wartości prądów roboczych lub chwilowych, budowane są na ogół ze zbioru wielu pojedynczych równoległych styczek (rys. 5).



Rys. 5. Zestyk z równoległymi styczkami zestyku

Przykładowy rozptyw prądu w poszczególnych styczkach zestyku utworzonego z 10 styczek równoległych, podany w wartościach % w stosunku do założonego równomiernego rozptywu prądu w styczkach i określony dla różnych wartości rezystancji przejścia  $R_p$ , podano na rys. 6.



Rys. 6. Rozptyw prądu w zestyku o 10 styczkach

Rezystancja przejścia  $R_p$  zestyku ma znaczący wpływ na nierównomierność rozptywu prądu w poszczególnych styczkach. Jeśli w fazie projektowej, zwłaszcza zestyków posrebrzanych o stosunkowo małej rezystancji zestykowej nie uwzględniono tego wpływu, może to prowadzić do przegrzewania się skrajnych styczek układu stykowego.

Dodatkowy (praktycznie niemierzalny) przyrost temperatury  $\Delta\vartheta_p$ , występujący w obszarze rzeczywistej powierzchni styczności styków, a która jest wielokrotnie mniejsza od ich powierzchni pozornej, jest

wyznaczany dla temperatur  $\vartheta_p \leq 150^\circ\text{C}$  na podstawie zależności podanej przez Kohlrauscha-Holma [7,10]:

$$\vartheta_p - \vartheta_m = \Delta\vartheta_p = \frac{\Delta U_p^2}{8\lambda\rho\vartheta} \quad (8)$$

gdzie:

$\Delta U_p = IR_p$  – spadek napięcia na rezystancji zestykowej, V;

Kryteria doboru temperatury dopuszczalnej  $\vartheta_m$  w zestykach wynikają przede wszystkim:

- ze znacznego obniżania się wytrzymałości mechanicznej styków wraz ze wzrostem temperatury (np. rekrytalizacja miedzi);
- ze zmniejszania się siły docisku w zestykach;
- z destabilizacji rezystancji zestykowej;
- ze skrócenia czasu życia izolacji otaczającej zestyki;
- ze wzrostu upływności w elementach izolacji.

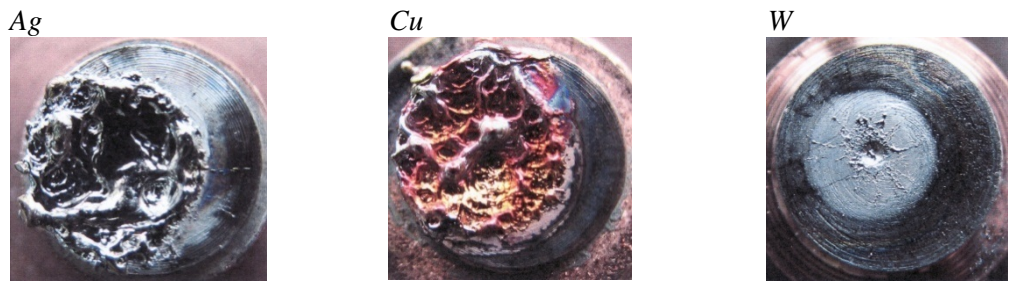
### 3.2. Obciążalność zwarciova cieplna zestyków

Podczas przepływu prądu zwarciowego czas nagrzewania jest ograniczony do kilkuset milisekund. Związany z bardzo małą masą mikrostryfki styczności (o stałej czasowej pojedynczych mikrosekund) przyrost temperatury  $\Delta\vartheta_p$  praktycznie nadąża za zmianami prądu zwarciowego [4, 11], przekraczając kolejno temperaturę mięknięcia  $\vartheta_{mk}$  i topnienia  $\vartheta$ , materiału styków.

Przekroczenie temperatury topnienia w miejscu styczności styków prowadzi nie tylko do powiększenia jego powierzchni, zmniejszenia rezystancji przewężenia, ale i spowolnienia stopnia nadążania temperatury w miejscu styczności za zmianami prądu, a w końcu do szepienia (zespawania) styków [2, 5].

Każdy przepływ prądu zwarciowego przez zestyk lub przez układ stykowy w procesie jego łączenia, pozostawia w miejscach galwanicznej styczności ślady od lokalnych wytopień o rozmiarach i liczbie zależnych od natężenia prądu i czasu jego przepływu oraz intensywności oddziaływania łuku elektrycznego na powierzchnie styków (rys. 7).

Analiza warunków przewodzenia prądów zwarciowych przez wieloprądowe układy stykowe wskazuje, że zestyki są coraz częściej obciążane udarami prądowymi, impulsowymi o dużej stromości ich narastania. Przebieg czasowy tych prądów, a zwłaszcza stromość udarów prądowych zwiększająca efekt naskórkowości, istotnie wpływają na wartość prądu szepienia zestyków. Badania eksperymentalne dotyczące szepienia różnego rodzaju zestyków [5], potwierdziły ten wpływ.

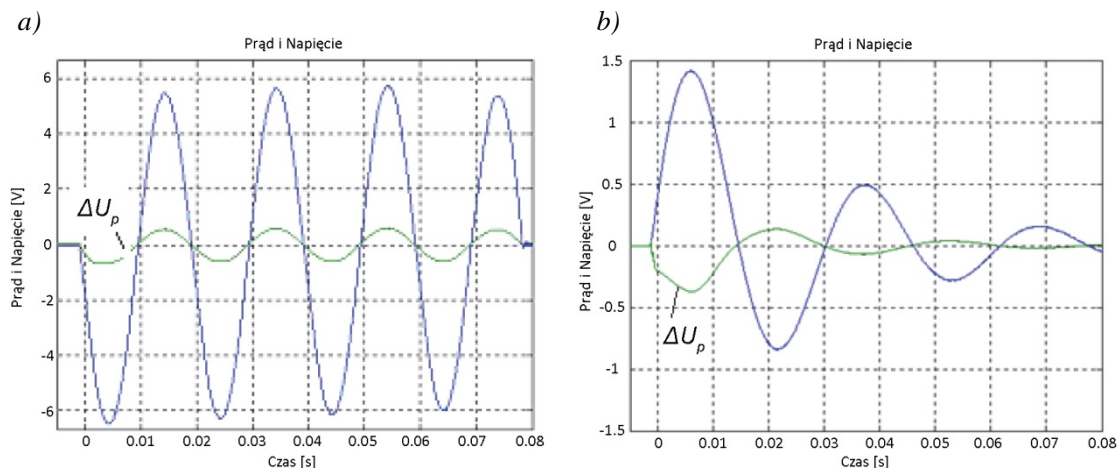


Rys. 7. Przykładowe makrografie powierzchni styków, po krótkotrwałym oddziaływaniu na nie łuku elektrycznego

Złożoność zjawiska szepienia i wynikające stąd trudności teoretycznego wyznaczenia wartości prądu szepienia w tych szczególnych warunkach, skłaniają do przeprowadzania licznych badań eksperymentalnych. Celem takich badań było wyznaczenie odpo-

wiednich współczynników empirycznych, umożliwiających analityczne określenie wartości prądu szepienia styków.

Przykładowe wybrane oscylogramy z badań prądu szepienia zestyków podano na rys. 8.



Rys. 8. Przebiegi prądu i spadku napięcia na zestyku punktowym miedzianym, uzyskane w układzie: a) zwarciovym, b) baterii kondensatorowej

Na przebiegu spadku napięcia na zestyku, widoczne jest szepienie w czasie pierwszej połówki sinusoidy prądu. Objawia się to zarówno zniekształceniem przebiegu pierwszej połówki sinusoidy napięcia, jak i zmniejszeniem wartości spadku napięcia na zestyku, przy przepływie kolejnych pół fali prądu.

Przeprowadzone badania eksperymentalne dotyczące wyznaczenia wartości prądu szepienia dla różnego rodzaju zestyków, były podstawą do sformułowania odpowiedniej zależności, uwzględniającej wpływ stromości i czasu trwania impulsu prądowego oraz sił docisku zestyków, na wartość tego prądu.

$$i_s = \sqrt{\frac{192c_0 \ln(1 + \frac{2}{3} \alpha \vartheta_s)}{\pi^4 \alpha H^2 \rho_0}} \frac{F_{doc}}{\sqrt{t}} n \left[ 1 + \left( \frac{S_{50}}{S_x} \right)^\zeta \right]^\kappa \quad (9)$$

gdzie:

- $n$  – współczynnik zależny od rodzaju zestyku; dla punkтового  $n = 1$ , dla liniowego  $n = 2$ , dla powierzchniowego  $n = 3$ ;
- $S_{50}, S_x$  – stromości prądów zwarciovych odpowiadające częstotliwości 50 Hz, oraz stromości poszczególnych impulsów prądowych;
- $\zeta$  i  $\kappa$  – współczynniki charakterystyczne dla rodzajów zestyków; określone na podstawie przeprowadzonych badań.

Wartość współczynnika  $\kappa$ , który zależy od siły docisku styków  $F_{doc}$ , może być określony dla zestyków miedzianych i z mosiądzu, z zależności:

$$\kappa = -0.004F_{doc} + 2.9 \quad (10)$$

natomiast wartość współczynnika  $\zeta$  dla tego rodzaju zestyków można przyjąć, że jest stała i wynosi 0,36.

Wartość granicznego prądu szepienia  $i_s$  jest ważnym kryterium oceny układu stykowego. Zależy przede wszystkim od siły wypadkowej, dociskającej zestyki w czasie przepływu prądu zwarciowego, liczby styków, a także od przebiegu czasowego prądu, zwłaszcza jego stromości.

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono przykłady wykorzystania metod analitycznych i numerycznych do oceny stopnia niejednorodności pola elektrycznego w przestrzeni międzystykowej oraz podano zależności matematyczne, umożliwiające oszacowanie wartości napięcia przebicia przerwy międzystykowej. Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Zestyki urządzeń elektroenergetycznych stanowią najbardziej obciążone cieplnie elementy torów prądowych.
2. Powinny być tak zaprojektowane, wykonane i eksploatowane, aby w stanie przewodzenia prądów roboczych nie były przekroczone przepisowe wartości przyrostów temperatury i żeby styki się nie szepiały, ani trwale nie odkształcały podczas przewodzenia prądów zakłócenowych.
3. Okresowe diagnozowanie stanu układów stykowych jest niezbędne w celu zapewnienia niezawodnego zasilania odbiorców energii elektrycznej. Umożliwia wydłużanie okresów czasu między przeglądami łączników, zapobiega występowaniu ich awarii, oraz pozwala na wykrywanie stanów technicznych łączników odbiegających od normy.

4. Nowe rozwiązania układów stykowych wspomagane komputerowo i technologia w dziedzinie aparatury łączeniowej, są odpowiedzią na wymagania energetyki, dotyczące nie tylko niezawodności, ale także oczekiwanych minimalnych kosztów eksploatacyjnych.

#### Literatura

1. Au A., Maksymiuk J., Pochanke Z.: *Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 1982.
2. Borkowski P.: *Erozja łukowa styków łączników elektrycznych*, WPL, Łódź 2013.
3. Ciok Z., Maksymiuk J., Kulas S., Zgliński K.: *Problemy analizy, badania oraz eksploatacji urządzeń rozdzielczych*, Symposium Krajowe „Elektryczna Aparatura Rozdzielcza”, EAR'2004, Poznań 2004, s. 9-18.
4. Kulas S.: *Tory prądowe i układy zestykowe*, OWPW, Warszawa 2008.
5. Kulas S., Zgliński K.: *Badania szepiania się zestyków wieloprądowych*, Konferencja Naukowa „Postępy w Elektrotechnice stosowanej” Kościelisko 2007, s. 77-79.
6. Kulas S., Kolimas Ł.: Optimization of electric field in contacts on example of making switch, Proceedings of the 42th International Universities Power Engineering Conference, Brighton, 2007, s. 491-495
7. Maksymiuk J., Nowicki J.: *Aparaty elektryczne i rozdzielnice*, OWPW, Warszawa 2014.
8. Markiewicz H.: *Urządzenia elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa 2001.
9. Shoffa V.N., Miedzinski B.: *Synchronna komutacja gerkonami elektrycznych cepiej pieremiennovo toka*, Proc. 3rd Int. Conf. on „REED Switches and Products” Ryazan, Russia, 2011, pp 48-60.
10. Slade P.: *Electrical contacts*, Marcel Dekker Inc., New York 1999.
11. Walczuk E.: *Resistance and temperature variations of heavy current contacts in welding conditions*, Proc. of the Tenth Int. Conf. on Electrical Contact Phenomena (ICECP'80), Budapeszt 1980, s. 367-375.

prof. dr hab. inż. STANISŁAW KULAS  
 prof. dr hab. inż. HENRYK SUPRONOWICZ  
 Instytut Systemów Elektronicznych,  
 Wojskowa Akademia Techniczna  
 ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
 {stanislaw.kulas, supronowicz}@wat.edu.pl