ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1975

Seria: ELEKTRYKA z. 51 Nr kol. 457

Jolanta Dąbrowska, Anna Kajura
Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów

POŁACZENIA ŚRUBOWE SZYN PŁASKICH W TOKU BADAŃ MODELOWYCH

Streszczenie. Sprawdzono w toku badań modelowych zachowanie się połączeń śrubowych szyn aluminiowych płaskich. Zastosowano różne technologie przygotowania powierzchni stykowych. Wynikiem badań jest ustalenie technologii pozwalających na utrzymanie w czasie eksploatacji przyrostów temperatury złącz w granicach dopuszczalnych przez PN oraz zapewniających wartości rezystancji połączeń zbliżonych do rezystancji szyny porównawczej[1].

1. Wstęp

Zjawiska występujące w czasie eksploatacji mogą stać się przyczyną pogorszenia własności początkowych połączeń śrubowych. Należą do nich m.in. zmiany obciążenia elektrycznego oraz wynikające stąd wahania temperatury złącz. Wzrost rezystancji złącza w miarę upływu czasu może doprowadzić do całkowitego zniszczenia połączenia śrubowego. Wiąże się to z zakłóceniem w pracy toru elektrycznego i może stanowić przyczynę w dostawie energii elektrycznej do odbiorów. Znajomość początkowej rezystancji zestykowej w warunkach początkowych [1], [5] nie jest więc wystarczająca do określenia zachowania się połączenia pozostającego pod wpływem zmiennego obciążenia elektrycznego.

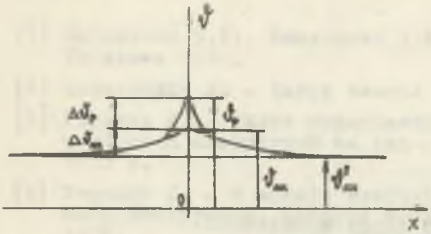
W celu określenia własności połączeń śrubowych szyn w czasie eksploatacji niezbędne jest wykonanie prób modelowych.

2. Niektóre własności eksploatacyjne połączeń śrubowych

W wyniku zjawiska Joule'a powstają w torze prądowym straty cieplne uzależnione od wielkości przepływającego prądu, rezystancji toru oraz rezystancji zestykowej. Przykładowy rozkład temperatury w torze prądowym wraz z zestykiem przedstawiono na rys. 1.

---

[1] Przez szynę porównawczą rozumie się tutaj fragment szyny o długości złącza znajdujący się w wystarczającej odległości od złącza i wykonany z tego samego materiału przewodowego.



Rys. 1. Rozkład temperatury w torze prądowym wraz z zestykiem

Objaśnienia do rys. 1:

$\Delta\vartheta_m$ - przyrost temperatury zestyku ponad temperaturę szyny z uwzględnieniem, że powierzchnia pozorna S jest równa rzeczywistej powierzchni styczności S_p,

ϑ'_m - temperatura szyny w miejscu wystarczająco odległym od zestyku,

ϑ_m - temperatura w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca styczności dla $S_p = S$,

$\Delta\vartheta_p$ - przyrost temperatury rzeczywistej powierzchni zestyku ponad temperaturę ϑ_m; przy czym rzeczywista powierzchnia zestyku jest znacznie mniejsza niż powierzchnia pozorna: $S_p \ll S$,

ϑ_p - temperatura rzeczywistej powierzchni styczności zestyku.

Złącza szyn aluminiowych, jak i miedzianych skręca się śrubami stalowymi. Dla miedzi posiadającej wyższe niż aluminium wskaźniki wytrzymałościowe oraz znacznie mniejszą różnicę współczynnika rozszerzalności liniowej w odniesieniu do stali, fakt ten nie wpływa na znaczne pogorszenie się parametrów złącza. Natomiast dla aluminium, którego współczynnik rozszerzalności liniowej jest dwukrotnie większy niż dla stali może to stać się przyczyną wystąpienia naprężeń w złączu. Po poddaniu złącza działaniu kilkakrotnych cykli nagrzewania do temperatury dopuszczalnej przy zwarciu zaobserwowano wskutek wystąpienia wymienionych naprężeń zmniejszenie sił ściskających złącze. Zostało to spowodowane miejscowym plastycznym odkształceniem materiału szyny. Obniżenie wartości siły ściskającej połączenia stwarza dogodne warunki dla utleniania się powierzchni stykowych i związanego z tym wzrostu rezystancji zestykowej. Procesy te zachodzą tym wyraźniej im większa była początkowa rezystancja zestykowa oraz im większe i częstsze są zmiany temperatury.

Wykonanie prawidłowego złącza obciążonego długotrwale prądem roboczym wiąże się ze spełnieniem następujących wymagań:

- rezystancja zestykowa powinna być nie większa od rezystancji szyny porównawczej nie tylko w warunkach początkowych ale w całym okresie eksploatacji,
- temperatura osiągana przez złącze przy obciążeniu prądem roboczym nie powinna przekraczać temperatury osiąganej przez szynę porównawczą w tych samych warunkach,
- spadek napięcia na złączu nie powinien przekroczyć spadku napięcia na odcinku szyny o długości złącza.

Własności złącza nie powinny ulec zasadniczym zmianom również w przypadku przepływu prądu zwarciowego.

3. Program badań i wyniki pomiarów

Połączenia śrubowe szyn aluminiowych AP-50x5 poddano badaniom modelowym dla omówionych w dalszym ciągu tekstu cykli obciążeń. Zachowany został warunek nie przekraczania temperatury dopuszczalnej długotrwale (dla szyny porównawczej), który przyjęto zgodnie z normą [9]. Oprócz tego badane złącza poddano kilkakrotnym cyklom nagrzewania aż do osiągnięcia przez szynę porównawczą temperatury granicznej dopuszczalnej przy zwarciu [9]. Złącza wykonano zgodnie z normą oraz nietypowo na jedną śrubę. Do połączenia nietypowego zastosowano:

- śrubę M16 wg PN-58/M-82117,
- nakrętkę M16 wg PN-58/M-82144,
- podkładkę zwykłą d_o = 17 mm wg PN-67/M-82006,
- podkładkę sprężystą d_o = 16,3 mm wg PN-65/M-82008,
- średnicę otworu d = 18 mm [11].

Powierzchnie stykowe, przygotowane wg technologii zestawionych w tabeli 1, skręcono śrubami przy pomocy klucza dynamometrycznego. Średnie dociski przyjmowane jako dopuszczalne wynoszą [6]:

- dla miedzi $\leqslant 20 \div 40 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$
- dla aluminium $\leqslant 5 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$.

Natomiast Erk i Schmelzle w [3] przyjmują dla połączeń aluminiowych średni docisk $10 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$ (jako dolną granicę przyjęto $5 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$, a górną - $20 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$).Ci sami autorzy podają również średnie dociski wynoszące:

- dla miedzi posrebrzanej lub pocynowanej: $5 \div 10 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$,
- dla aluminium oczyszczonego i natłuszczonego: $20 \div 30 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$.

W celu uzyskania zalecanych docisków ustalono doświadczalnie moment naprężający a mianowicie:

- dla miedzi - 60 Nm,
- dla aluminium - 20 Nm.

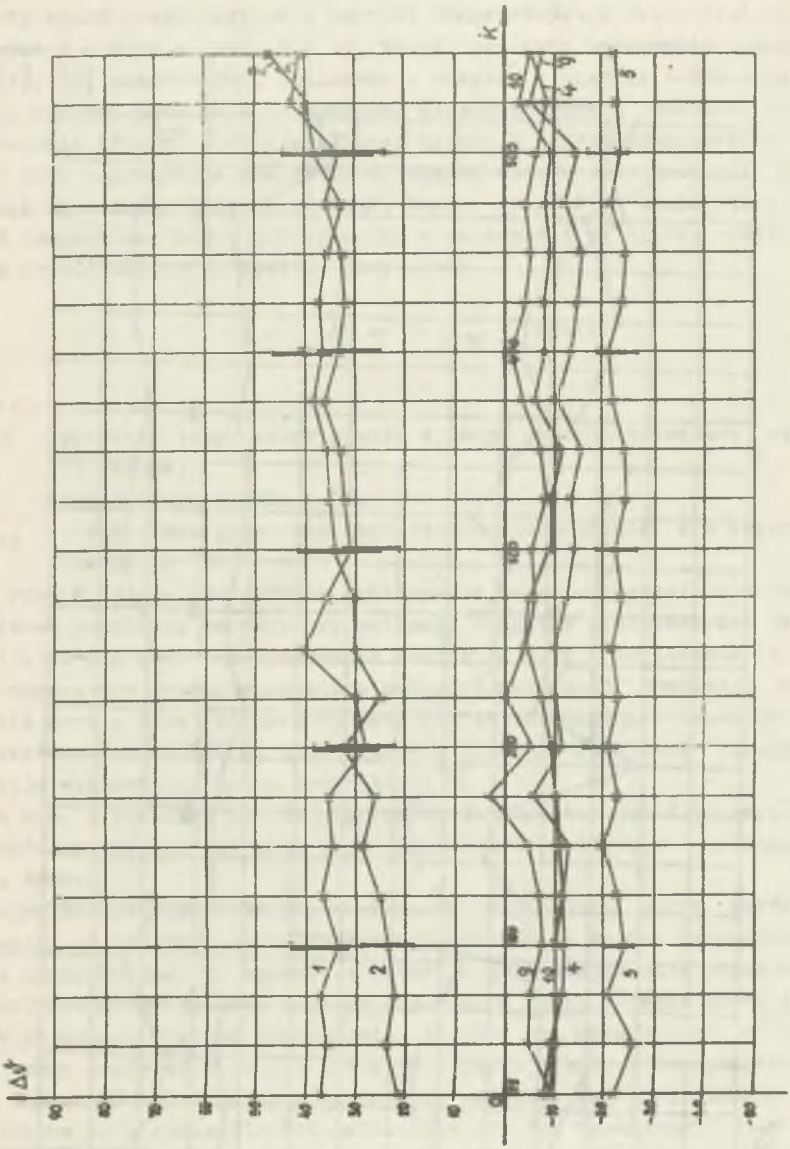
Normy przedmiotowe nie podają jak należy przeprowadzać badania zachowania się połączeń śrubowych szyn płaskich w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. Wobec tego kierując się normą [10] ustalono, że zakres badań modelowych kolejno będzie obejmować:

a) 500 cykli nagrzewania badanych połączeń śrubowych do temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwale dla szyny porównawczej i chłodzenia do temperatury otoczenia,
b) 5 cykli nagrzewania do temperatury granicznej dopuszczalnej przy zwarciu dla szyny porównawczej i chłodzenia do temperatury otoczenia,
c) 50 cykli, jak w punkcie a).

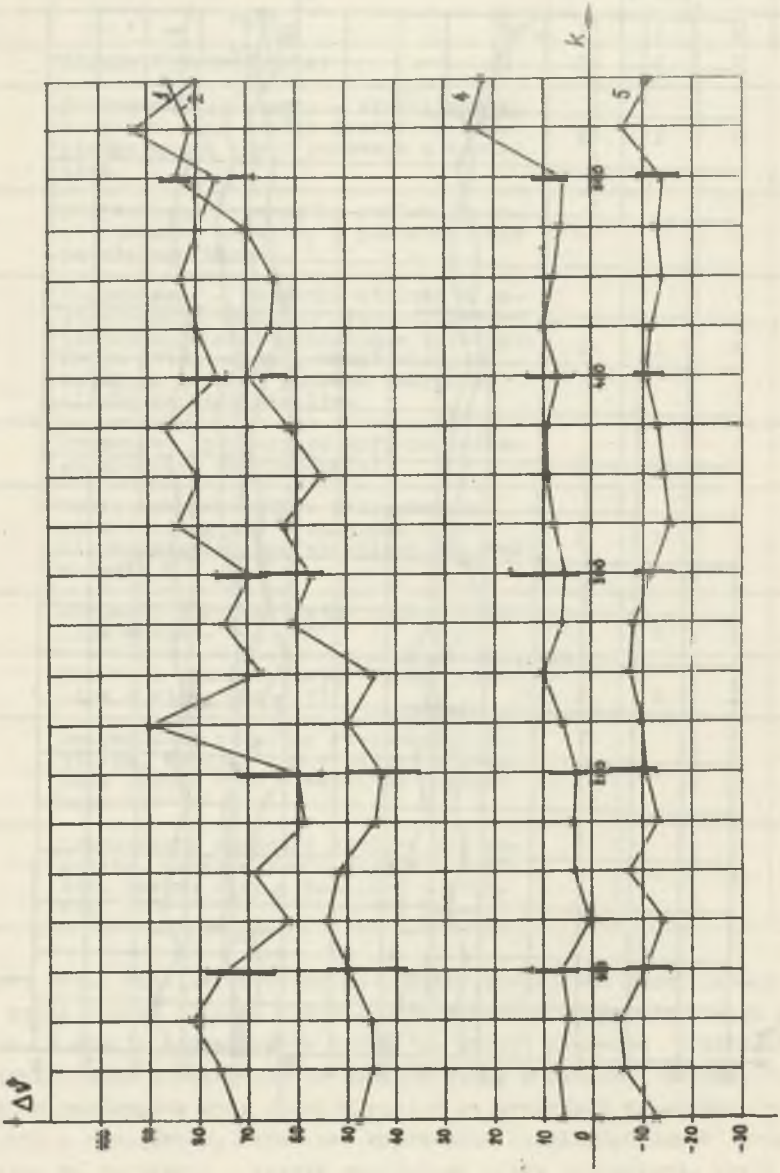
Tabela 1

Oznaczenie technologii t	Sposób przygotowania powierzchni stykowych złączy przeznaczonych do badań modelowych	Złącza szyn			
		Al - Al		Cu - Cu	
		Wg PN	Na 1 śrubę	Wg PN	Na 1 śrubę
1	2	3	4	5	6
1	Surowe (nieobrobione)	X	X	X	X
2	Oczyszczone na sucho - szczotką stalową tzn. bez użycia środków zabezpieczających przed ponownym utlenieniem	X	X	X	X
3	Oczyszczone - szczotką stalową z zastosowaniem wazeliny i pozostawienie powstałego smaru	X	X	X	X
4	Oczyszczone - szczotką stalową z zastosowaniem wazeliny przemysłowej (substancja zabezpieczająca przed ponowym utlenieniem), usunięcie powstałego smaru i ponowne pokrycie cienką warstwą wazeliny	X	X	X	X
5	Cynowane (pomiary po upływie jednego miesiąca od wykonania)	X	X	X	X
6	Powierzchnia stykowa przygotowana wg technologii 4 i skręcona z powierzchnią stykową obrobioną wg technologii 5	X	X	X	X
7	Surowe i pokryte pastą: cynk + wazelina o stos. wag. 1:1	X	X	X	X
8	Surowe i pokryte pastą: cyna + wazelina o stos. wag. 1:3	X	X	X	X
9	Oczyszczone szczotką stalową pod wazeliną, warstwa smaru zdjęta i nałożona pasta: cynk + wazelina o stos. wag. 1:1	X	X	X	X
10	Oczyszczone szczotką stalową pod wazeliną, warstwa smaru zdjęta i nałożona pasta: cyna + wazelina o stos. wag. 1:3	X	X	X	X

W toku badań modelowych wykonano pomiary przyrostów temperatury osiąganych przez badane złącza. Jednocześnie mierzono temperatury szyn porównawczych. W stanie nienagrzanym czyli "na zimno" mierzono spadki napięć na zestykach oraz porównawczo na odcinku szyny o długości złącza. Pomiary przyrostów temperatur oraz spadków napięć na zestykach wykonywano po każdym 25 cyklu obciążenia. Dodatkowo wyznaczono oscylograficznie przyrosty temperatur na zestykach w czasie ostatniego cyklu nagrzewania szyny porównawczej do temperatury granicznej dopuszczalnej przy zwarciu.



Rys. 2. Przyrosty temperatur ponad temperaturę szyny porównawczej dla złączy Al-Al wykonanych według PN w funkcji liczby cykli obciążenia



Rys. 3. Przebieg $\Delta\vartheta = f(k)$ dla złączy Al-Al skręconych przy pomocy jednej śruby

Zgodnie z przedstawionym programem do badań modelujących warunki eksploatacyjne wybrano losowo po n = 10 złączy, których powierzchnie stykowe przygotowano według technologii t, gdzie t = 1,2,...,10 (tabela 1). Rezultaty badań przedstawiono w postaci charakterystyk $\Delta\vartheta = f(k)$ na rys. 2 i 3 oraz R = f(k) na rys. 9 i 10. Wyniki pomiarów opracowano podobnie jak i w [1], [5] zaznaczając, obliczone w oparciu o rozkład t-Studenta, przedziały ufności pokrywające prawdziwą nieznaną średnią wartość populacji na poziomie ufności 0,95 dla zadanej liczby k - cykli obciążenia.

Do prób nagrzewania przygotowano złącza według t-technologii oraz połączono zgodnie z PN dwoma śrubami. Zmiany przyrostu temperatury złączy ponad temperaturę szyny porównawczej w zależności od liczby cykli obciążenia k przedstawiono na rys. 2, przy czym:

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{sz}, \quad \text{(deg)} \tag{1}$$

gdzie:

$\Delta\vartheta$ - przyrost temperatury złącza w (deg) ponad temperaturę szyny porównawczej,

ϑ - temperatura złącza w ^{o}C,

ϑ_{sz} - temperatura graniczna dopuszczalna długotrwale dla szyny porównawczej w ^{o}C.

Z rys. 2 wynika, że podczas cyklicznych zmian obciążenia elektrycznego najwyższe przyrosty temperatury osiągają złącza z zastosowaniem technologii 1 i 2. Dla połączeń wykonanych według 4, 5, 9 i 10 (tabela 1) przyrosty temperatury ponad temperaturę szyny porównawczej przyjmują wartości bliskie zeru a nawet ujemne. Oznacza to, że temperatury złącz są bliskie temperaturze szyny lub od niej niższe. Korzystne rezultaty otrzymano dla zestyków wykonanych według technologii 5.

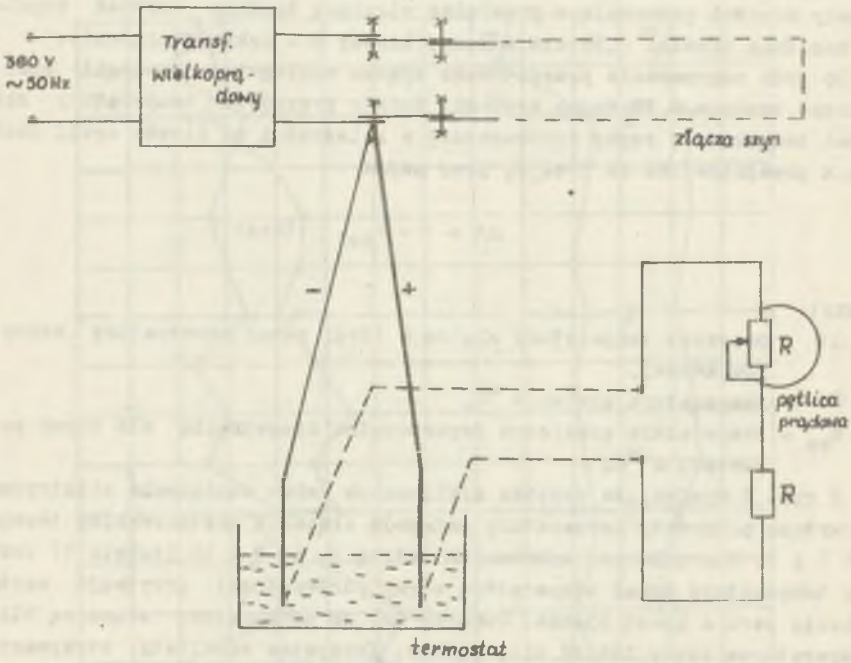
Na rys. 3 pokazano zmiany przyrostów temperatury ponad temperaturę szyny porównawczej dla zestyków szyn aluminiowych wykonanych nietypowo na jedną śrubę.

Najwyższe przyrosty temperatury ponad temperaturę szyny porównawczej wystąpiły na złączach surowych i oczyszczonych na sucho. Natomiast w przypadku złącz wykonanych zgodnie z technologią 4 występujące początkowo niskie przyrosty temperatury wzrastały jednak w miarę trwania prób; przyjmując w ostatnich cyklach nagrzewania wartości znacznie wyższe od temperatury szyny porównawczej. Dla zestyków o powierzchniach przygotowanych według technologii 5 i 9 przyrosty temperatur osiągały wartości bliskie zero oraz ujemne co w szczególności uwidacznia się dla technologii 5.

Cynowanie powierzchni stykowych szyn aluminiowych wpływa wyraźnie na obniżenie temperatur zarówno połączeń śrubowych wykonanych według PN, jak i wykonanych nietypowo na jedną śrubę.

Po wykonaniu 500 cykli nagrzewania do temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwale poddano badane złącza działaniu 5 cykli nagrzewania

do temperatury granicznej dopuszczalnej przy zwarciu dla szyny porównawczej. Przyrosty temperatur ponad temperaturę otoczenia dla złączy, wykonanych z zastosowaniem technologii wymienionych w tabeli 1, wyznaczono metodą oscylograficzną w układzie podanym na rys. 4.

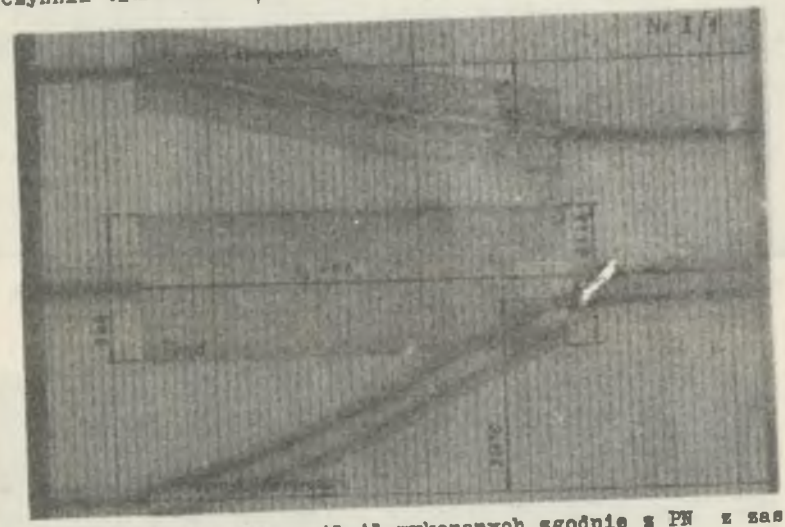


Rys. 4. Schemat układu pomiarowego dla prób nagrzewania zestyków do temperatury granicznej dopuszczalnej przy zwarciu

Dane dotyczące układu pomiarowego przedstawionego na rys. 4:

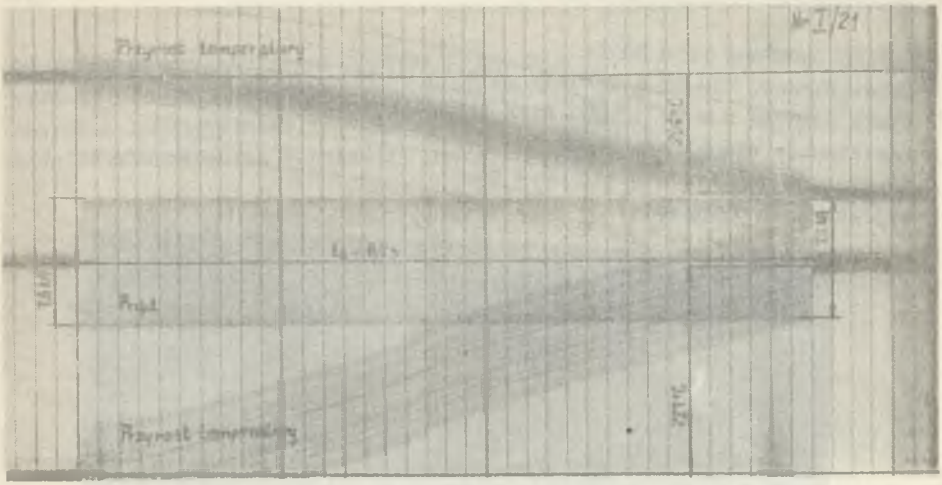
- transformator wielkoprądowy typu TW 75:
  napięcie zasilające przy 50 Hz 380 V,
  obciążalność długotrwała 7000 A,
  obciążalność krótkotrwała 10 000 A,
  pobór prądu przez I uzwojenie zasilające 200 A,
  przekładnia znamionowa 10 000/5,
- badane złącza szyn AP-50x5,
- termoelementy: chromel-alumel,
- dodatkowe rezystancje każda o wartości 1100Ω ± 10%, obciążalność maksymalna 0,07 mA,
- oscylograf pętlicowy typu N-102,

- pętlice prądowe typu M005:
  częstotliwość 150 Hz a robocza od 0 do 90 Hz,
  stała prądowa $5 \times 10^{-7} \left[\frac{Am}{mm}\right]$ przy długości wskazówki świetlnej 300 mm,
  rezystancja zewnętrzna 200Ω,
  maksymalna amplituda prądu 0,2 mA,
  współczynnik tłumienia: $\beta = 0,7 \pm 0,1$.

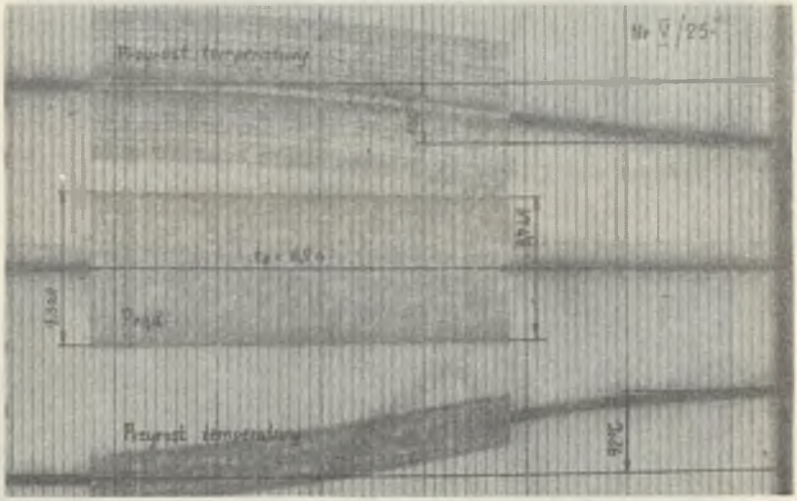


Rys. 5. Oscylogram dla złączy Al-Al wykonanych zgodnie z PN z zastosowaniem technologii 1

Rys. 6. Oscylogram dla złączy wykonanych zgodnie z PN z zastosowaniem technologii 5



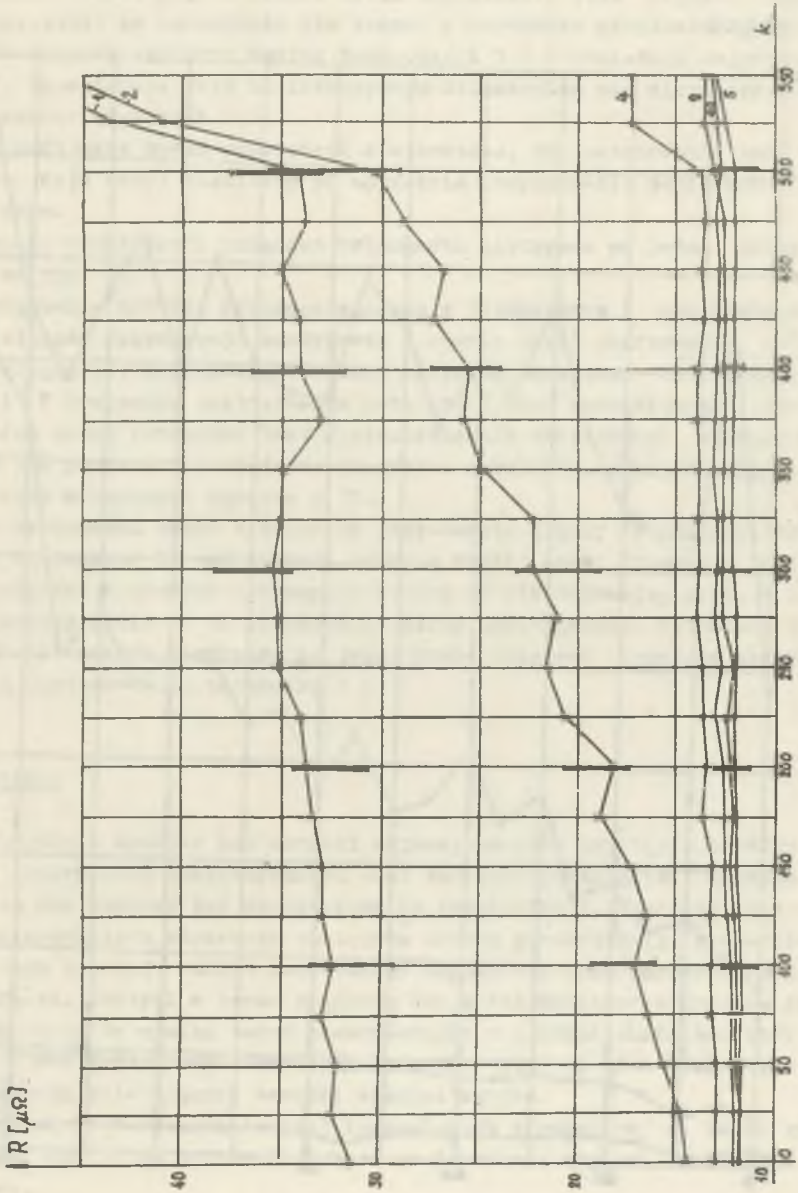
Rys. 7. Oscylogram dla złączy Al-Al wykonanych nietypowo na jedną śrubę z zastosowaniem technologii 1



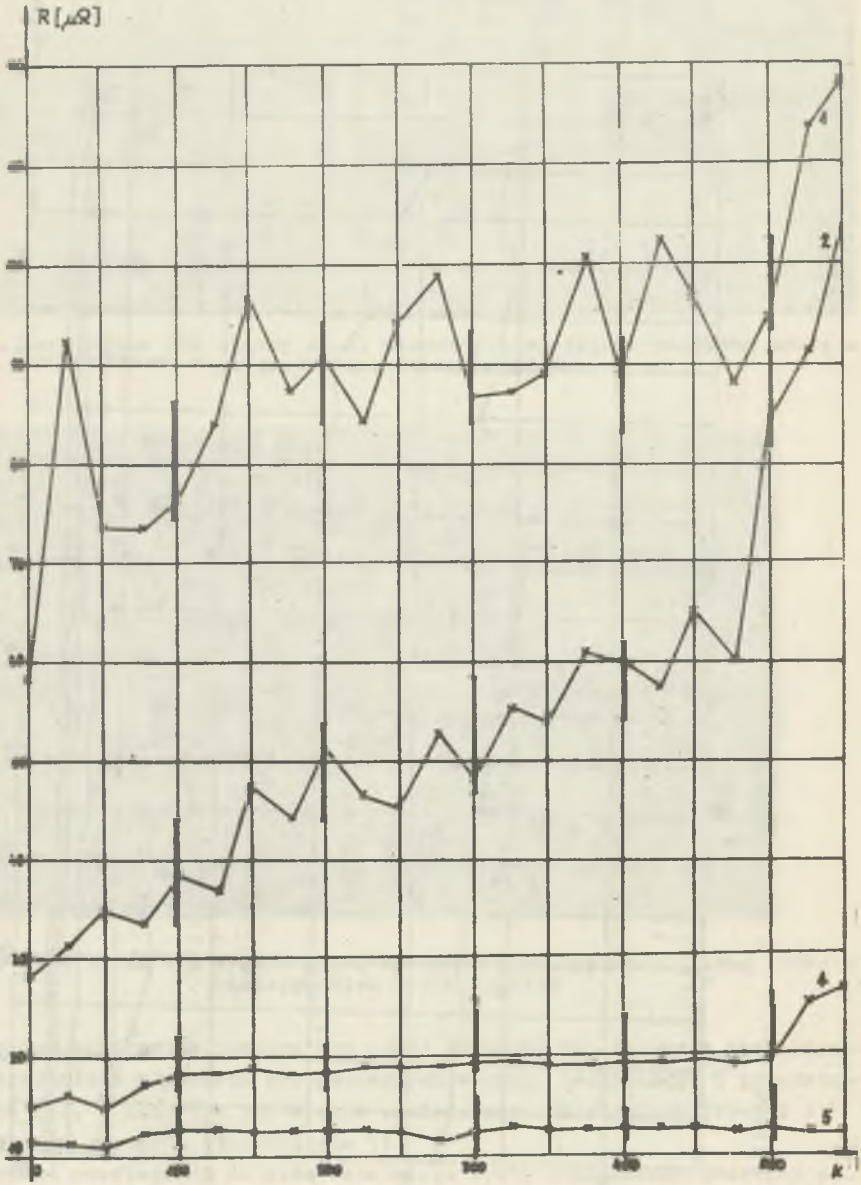
Rys. 8. Oscylogram dla złączy Al-Al wykonanych nietypowo na jedną śrubę z zastosowaniem technologii 5

Przebieg przyrostów temperatury ponad temperaturę otoczenia dla złączy o powierzchniach stykowych przygotowanych według technologii 5 przedstawiono na rys. 6 i 8. Dla porównania zamieszczono oscylogramy (rys. 5 i 7) dla zestyków surowych (technologia 1).

Wykonane oscylogramy dotyczą ostatniego cyklu nagrzewania badanych połączeń śrubowych do temperatury granicznej dopuszczalnej przy zwarciu, tj 505^{x} cyklu.



Rys. 9. Zmiany rezystancji zestykowej złączy Al-Al wykonanych zgodnie z PN dla różnych technologii w zależności od liczby cykli nagrzewania



Rys. 10. Rezystancje stykowe w funkcji liczby cykli nagrzewania dla różnych technologii przygotowania powierzchni stykowych złączy Al-Al skręconych nietypowo na jedną śrubę

Przebieg zmian rezystancji złączy szyn aluminiowych w funkcji liczby cykli nagrzewania przedstawiono na rys. 9 i 10.

Największą stałością rezystancji charakteryzują się złącza przygotowane według technologii 5, 9 i 10 (tabela 1). Dla pozostałych technologii zmienność rezystancji w czasie cykli nagrzewania jest większa. Wpływa to niekorzystnie na zachowanie się złącza w warunkach eksploatacyjnych. Połączenia śrubowe wykonane według technologii 1 i 2 posiadają najgorsze własności. Spowodowane jest to intensywnym utlenieniem się niezabezpieczonych powierzchni stykowych.

Na podstawie badań modelowych stwierdzono, że zastosowanie past łączeniowych daje dobre rezultaty po uprzednim oczyszczeniu powierzchni stykowych szyn.

Zmiany rezystancji połączeń wykonanych nietypowo na jedną śrubę pokazano na rys. 10.

Połączenia śrubowe wykonane zgodnie z technologią 5 posiadają największą stałość rezystancji zestykowej w czasie cykli nagrzewania. Pozostałe technologie nie zapewniają stałości rezystancji złącza w trakcie eksploatacji. W przypadku zastosowania połączenia szyn aluminiowych nietypowo na jedną śrubę konieczne jest uszlachetnianie powierzchni stykowych poprzez ich pocynowanie. Daje to korzystne rezultaty również dla połączeń śrubowych wykonanych zgodnie z PN.

Po ukończeniu badań modelowych rezystancje złączy o różnych technologiach odniesiono do rezystancji szyny o takiej samej długości. Rezystancje połączeń śrubowych wykonanych według PN dla technologii: 5, 9 i 10 są najbardziej zbliżone do rezystancji szyny porównawczej. Natomiast dla zestyków wykonanych nietypowo na jedną śrubę własność powyższą posiada zestyk z zastosowaniem technologii 5.

4. Wnioski

Połączenia śrubowe bez obróbki mającej na celu usunięcie warstwy tlenków i dodatkowych zanieczyszczeń oraz zabezpieczenie przed dalszym utlenianiem nie powinny być dopuszczone do eksploatacji. Obecność tych warstw na powierzchniach stykowych zmniejsza czynną powierzchnię przewodzenia i tym samym powoduje wzrost rezystancji zestykowej oraz nadmierne nagrzewanie złącza. Zestyki w torze prądowym stają się dodatkowym źródłem ciepła. Potwierdziły to wyniki badań przedstawione w postaci charakterystyk $R_p = f(P)$ dla warunków początkowych oraz $\Delta\vartheta = f(k)$ i $R = f(k)$ dla prób nagrzewania modelujących warunki eksploatacyjne.

Możliwe jest stosowanie past łączeniowych wykonanych na bazie cynku i cyny pod warunkiem nałożenia ich na powierzchnie stykowe uprzednio oczyszczone.

Najkorzystniejsze rezultaty dla zestyków szyn aluminiowych wykonanych zgodnie z PN oraz nietypowo na jedną śrubę z zastosowaniem technologii

cynowania. Złącza uszlachetnione warstwą cyny wykazywały najniższe wartości początkowej rezystancji zestykowej oraz najniższe temperatury i spadki napięć w toku badań modelowych. Celowym jest więc podjęcie dalszych badań mających na celu udoskonalenie technologii cynowania szyn aluminiowych. Dodatkowo połączenia wykonane nietypowo na jedną śrubę powinny zostać poddane badaniom własności mechanicznych.

LITERATURA

[1] Dąbrowska J., Kajura A. - Wpływ technologii przygotowania powierzchni stykowych połączeń szynowych na ich początkową rezystancję zestykową - Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" nr 50, 1975.

[2] Dzierzbicki St. - Aparaty elektryczne - PWN, Warszawa, 1970.

[3] Erk A., Schmelzle M. - Grundlagen der Schaltgerätetechnik - Spring-Verlag Berlin-Heidelberg-New York 1974.

[4] Fabry K. - Die zusätzliche Kurzschlusswärmung elektrischer Sammelschienen durch Kontakte und Verbindungen - Acta Technica ČSAV nr 5, 1967.

[5] Kajura A., Dąbrowska J. - Początkowa rezystancja zestykowa połączeń szynowych o powierzchniach styczności pokrytych pastami łączeniowymi - Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" nr 50, 1975.

[6] Kryński J. - Elektryczne aparaty rozdzielcze - PWN, Łódź - 1964 - Warszawa.

[7] Plante M.P. - Raccordements électriques par contact des conducteurs usuels en aluminium et cuivre - Séance du 15 avril 1953 de la 3e Section de la Societé de la Societé française des Électriciens.

[8] Wollenek A. - Die Veränderung der Kontaktberührungsfläche bei hohen Temperaturen - Zeitschrift für angewandte Physik nr 8, 1960.

[9] PN-56/E-05020 - Wyznaczanie obciążalności szyn sztywnych.

[10] PN-E/06501 - Elektroenergetyczne linie kablowe. Osprzęt do kabli o napięciu znamionowym do 60 kV.

[11] PN-72/E-05025 - Dobór i układanie przewodów szynowych sztywnych.

Przyjęto do druku w listopadzie 1974 r.

СОСТОЯНИЕ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЛОСКИХ ШИН
ВО ВРЕМЯ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Р е з ю м е

Во время проведения модельных испытаний проведена проверка сохранности болтовых соединений плоских алюминиевых шин. Применены различные технологии подготовки контактных поверхностей. В результате исследований определена технология, позволяющая удержать прирост температуры соединений в границах, допускаемых государственным стандартом, и обеспечивающая величину резистанса соединений в пределах резистанса сравнительной шины.

SCREW CONNECTIONS OF FLAT BARS IN MODEL TESTING

S u m m a r y

The behaviour of flat aluminium screw bars has been tested in model experiments. Different technologies of contact surfaces forming have been applied.
The results of the experiments is establishing the technologies which grant stable temperature rise of the contact surfaces allowed by PN (Polish Standard) and assure connections resistance values similar to the resistance of the comparative bar.