

Zbigniew GACEK, Krzysztof MAŻNIEWSKI, Rafał SOSIŃSKI
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
Politechnika Śląska, Gliwice

WPLYW NARAŻEŃ STARZENIOWYCH NA PARAMETRY TECHNICZNE WYBRANYCH ZACISKÓW PRZEBIJAJĄCYCH IZOLACJĘ W LINIACH NAPOWIETRZNYCH NISKIEGO NAPIĘCIA

Streszczenie. W artykule zaprezentowano niektóre osiągnięcia Instytutu Elektroenergetyki i Sterowania Układów (IEiSU) w zakresie badań dotyczących wpływu zacisków o różnorodnej konstrukcji na wytrzymałość mechaniczną przewodów oraz narażeń starzeniowych na niektóre parametry techniczne zacisków przebijających izolację. Opisano wyniki wykonanych prób starzeniowych w postaci elektrycznych cykli cieplnych, wibracji mechanicznych oraz próby wilgotnościowej. Przedstawiono również propozycję sposobu porównawczej oceny jakości badanych zacisków.

INFLUENCE OF AGEING STRESS ON PARAMETERS OF CHOSEN INSULATION PIERCING CONNECTORS IN OVERHEAD LOW VOLTAGE LINES

Summary. Some research achievements of Institute of Power Systems and Control relating to an influence of connector installations on mechanical strength of conductors and ageing stress on parameters of insulation piercing connectors are presented. The results of ageing stress tests - electrical heat cycle, mechanical vibration and humidity cycle tests - are described. A method of general evaluation of connectors' quality is proposed.

1. WPROWADZENIE

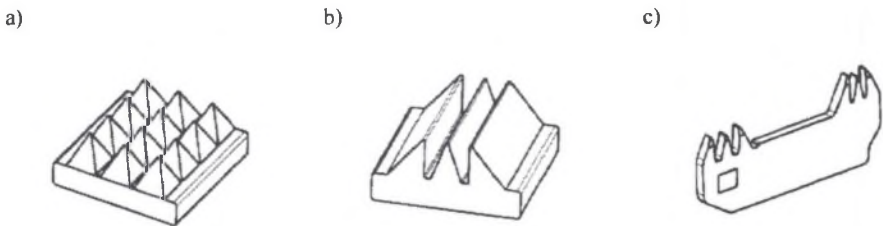
Zainteresowanie napowietrznymi liniami izolowanymi niskiego i średniego napięcia ciągle rośnie, co związane jest z pozytywnymi doświadczeniami eksploatacyjnymi w tej dziedzinie. Równocześnie, ze względu na ryzyko wystąpienia awarii, szczególnie istotny jest dobór prawidłowego osprzętu oraz poprawne wykonawstwo takich linii. Zwiększenie niezawodności jest jednak możliwe tylko wówczas, gdy zjawiska zachodzące w elementach składowych instalacji napowietrznych linii izolowanych są dobrze poznane.

Jednym z najsłabszych elementów rozważanych linii mogą być zaciski przebijające izolację. Jakość połączenia prądowego uzyskiwanego za pomocą takich zacisków przekłada się bowiem na niezawodność linii zasilającej, a tym samym na stabilność dostawy energii elektrycznej do klienta. Ze względu na długotrwałą pracę zacisków, w celu oszacowania stabilności w czasie ich podstawowych parametrów technicznych, niezbędne są prace badawcze o charakterze naukowo-konstrukcyjnym.

Zaciski przebijające izolację, stosowane głównie jako elementy odgałęźne, są stosunkowo nowym rozwiązaniem technologicznym. Pierwsze rozwiązania konstrukcyjne, które pojawiły w latach 70. ubiegłego stulecia we Francji, wykazywały szereg wad. Na przykład izolacja przebijana była tylko na przewodzie głównym, co oznaczało zarówno ryzyko uszkodzenia od strony odgałęźnej, jak i porażenia podczas prac pod napięciem. Zaciski charakteryzowały się również podatnością na uszkodzenia mechaniczne przy zbyt dużym momencie dokręcania oraz znacznym ryzykiem braku połączenia przy zbyt małym momencie dokręcenia. W przypadku łączenia przewodów miedzianych występowały problemy związane z korozją styku, a podczas pracy w niskich temperaturach pękała osłona izolacyjna.

Gwałtowny rozwój techniczny zacisków przebijających izolację nastąpił na przełomie lat 80. i 90. ubiegłego stulecia. Konstruktorzy koncentrowali się przede wszystkim nad znalezieniem dobrego materiału izolacyjnego, opracowaniem bezpiecznego wykonywania połączenia odgałęźnego pod napięciem oraz poprawieniem niezawodności styków. Właściwości styków poprawiano głównie na drodze eksperymentalnej, badając złącza podczas termicznych cykli elektrycznych i skupiając się na stabilizacji mechanicznej oraz poprawie trwałości obszaru stykowego.

Obecnie technologia przebijania izolacji budzi mniejszą nieufność, niż jeszcze pod koniec lat 90. XX wieku. Zaciski spełniają bowiem wymogi bezpieczeństwa i wodoszczelności. Są wyposażone w osłonę izolacyjną w postaci korpusu, zintegrowanego z elektrodami łączeniowymi. Zapewniają na ogół kontrolę momentu dokręcenia oraz charakteryzują się szerokim zakresem przekrojów łączonych przewodów. Nadal jednak ściiera się ze sobą kilka rozwiązań dotyczących przede wszystkim konstrukcji tzw. płytek stykowych (styków), które należą do najważniejszych elementów zacisku (rys.1). Konstrukcja piramidalna, nożowa oraz płytkowa konkurują ze sobą pod względem jakości połączenia prądowego, osłabienia wytrzymałości mechanicznej przewodu oraz ceny [14].



Rys. 1. Podstawowe konstrukcje płytek stykowych: a) piramidalna, b) nożowa, c) kurtynowa
 Fig. 1. Basic constructions of contact shallows: a) pyramidal, b) knife, c) blade

Ze względu na specyfikę wynikającą ze stosowania w napowietrznych liniach niskiego napięcia przewodów izolowanych złącza występujące w zaciskach przebijających izolację znacznie różnią się od tradycyjnych rozwiązań stosowanych w liniach z przewodami gołymi. Zjawiska zachodzące w tych złączach nie są dostatecznie poznane, a interakcje między tymi zjawiskami decydują o jakości połączenia stykowego. Podstawowe pytania odnoszące się do zacisków przebijających izolację dotyczą ich zdolności do długotrwałego przewodzenia prądu przy małej powierzchni stykowej oraz możliwości wykonywania szybkiego łączenia pod obciążeniem (prace pod napięciem).

Odrębnym zagadnieniem jest dostosowanie konstrukcji zacisków do współpracy z istniejącym systemem przewodów. W napowietrznych liniach izolowanych niskiego napięcia dominuje obecnie technologia przewodów wiązkowych pokrywanych izolacją. Wyróżnia się dwa podstawowe systemy:

- **czteroprzewodowy samonośny**, w którym cztery jednakowe, izolowane żyły skrócone są w wiązkę i każda z żył przenosi obciążenia mechaniczne,

- z **linką nośną**, w którym trzy izolowane żyły fazowe skrócone są w wiązkę razem z izolowaną lub gołą linką nośną, przenoszącą całość obciążeń mechanicznych.

W Polsce w napowietrznych liniach izolowanych niskiego napięcia stosowany jest system czteroprzewodowy samonośny.

Stosowany system przewodów warunkuje dobór odpowiedniego osprzętu. Zastosowanie zacisku niedostosowanego do systemu może powodować pogorszenie własności stykowych i mechanicznych, a w konsekwencji doprowadzić do awarii.

Zaciskom pracującym w systemie z linką nośną stawia się łagodniejsze wymagania niż zaciskom pracującym w systemie samonośnym. W pierwszym przypadku dopuszcza się osłabienie wytrzymałości mechanicznej żył aż o 50%, podczas gdy zaciski pracujące w systemie samonośnym mogą powodować osłabienie wytrzymałości żyły nie więcej niż o 10%. Różnice występują również w zakresie wymaganej liczby cieplnych cykli elektrycznych, wykonywanych podczas prób starzeniowych (tab. 1).

Europejski Komitet ds. Standaryzacji CENELEC zaleca, aby w systemie czteroprzewodowym samonośnym stosować zaciski skonstruowane na zasadzie igiełek przebijających izolację rozłożonych na płaskiej płytce. Zasadę tę spełniają zaciski o piramidalnych płytkach stykowych (rys. 1a) oraz opisywane w dalszej części zaciski o płytowo-wieloigłowych elementach przebijających izolację (rys. 2a i 3b).

Jak dotychczas nie zaproponowano żadnej procedury, która w sposób ujednolicony pozwalałaby porównywać ze sobą istniejące rozwiązania konstrukcyjne pod względem ich jakości i niezawodności. Istniejące normy zagraniczne ograniczają się do sprecyzowania - różniących się od siebie w poszczególnych krajach - wymagań probierczych. W związku z tym w IEiSU podejmowane są prace naukowo-badawcze mające na celu:

- wyodrębnienie i standaryzację parametrów decydujących o jakości złącza podczas pracy długotrwałej,
- wskazanie i weryfikację metody pozwalającej na porównawczą ocenę jakości różniących się od siebie rozwiązań konstrukcyjnych zacisków.

W artykule zaprezentowano wybrane osiągnięcia Instytutu w zakresie badań wpływu różnorodnej konstrukcji zacisków na wytrzymałość mechaniczną przewodów oraz wpływu trzech narażeń starzeniowych na niektóre parametry techniczne zacisków. Przedstawiono również propozycję sposobu porównawczej oceny jakości badanych zacisków. Zastosowane procedury badawcze opracowano na podstawie norm międzynarodowych i narodowych [1-4, 8, 12, 16], ale celem badań nie było potwierdzenie zgodności wybranych konstrukcji zacisków z postanowieniami aktów normatywnych. Dokonując wyboru obiektów badań, zróżnicowano je pod względem konstrukcyjnym, unikając jednocześnie istotnych różnic w przedziale przekrojów żył stosowanych w torze głównym.

Tabela 1

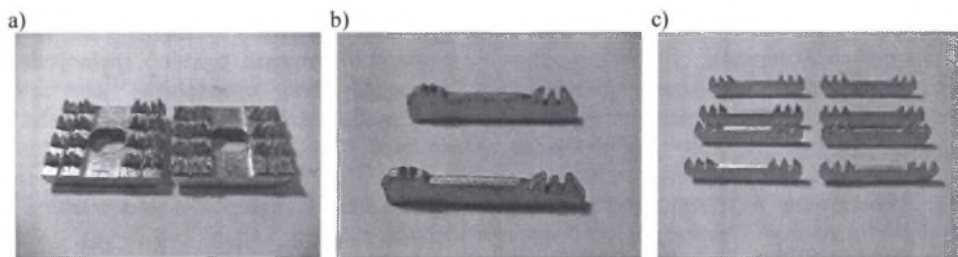
Wymagana liczba termicznych cykli elektrycznych w różnych aktach normatywnych [13, 15]

Kraj	System	Symbol normy	Ilość cykli
Francja	z linką nośną	NFC	200
Niemcy Austria Portugalia W. Brytania Szwecja Norwegia Finlandia Unia Europejska IEC	samonośny	VDE OVE DMA EATS SEN NOK SFS EN 61284 IEC 61238	1000

2. BADANIA MECHANICZNE

2.1. Obiekty badań

Obiektami badań były trzy typy zacisków przebijających izolację różniące się głównie konstrukcją elementów przebijających izolację (rys.2): płytowy-wieloigłowy (typ I), kurtynowy pojedynczy (typ II), kurtynowy podwójny (typ III). W tabeli 2 zestawiono podstawowe parametry techniczne tych zacisków.



Rys.2. Elementy przebijające izolację zacisków poddanych badaniom mechanicznym:

a) typ I - płytowy-wieloigłowy, b) typ II -kurtynowy pojedynczy, c) typ III - kurtynowy podwójny
 Fig. 2. Piercing elements of connectors under mechanical strength tests: a) type I - multi-teeth plate,
 b) type II - blade single-sided, c) type III - blade double-sided

Tabela 2

Podstawowe parametry techniczne badanych zacisków

Lp.	Typ	Przekrój przewodu głównego	Przekrój przewodu odgałęźnego	Moment dokręcenia
		mm ²	mm ²	N·m
1	I	10 ÷ 95	10 ÷ 95	26
2	II	25 ÷ 95	6	10
3	III	25 ÷ 95	25 ÷ 95	14

2.2. Zakres i procedura badań

Celem badań wykonanych w 1998 r. [10] było określenie wpływu zainstalowania zacisków przebijających izolację na wytrzymałość mechaniczną przewodów. Mierzono wartość siły zrywającej F_b przed i po zainstalowaniu zacisku. Za poziom odniesienia (tzw. tło) przyjęto siłę zrywającą badanych przewodów, zmierzoną bez zamontowanych zacisków.

Wykonano po trzy próby zrywające dla dwóch wartości przekroju przewodu głównego, tj. 25 mm^2 i 95 mm^2 . Jako przewód odgałęźny stosowano przewód o tym samym przekroju, z wyjątkiem zacisku typu II, w którym zgodnie z zaleceniem producenta (tab. 2) zastosowano przewód o przekroju 6 mm^2 .

Przewód izolowany o długości ok. 0,7 m mocowano w zrywance i naprężano wstępnie do wartości 25 MPa, aby zasymulować rzeczywiste warunki mechaniczne panujące podczas montażu zacisków. Zacisk razem z fragmentem przewodu odgałęźnego montowano w połowie długości przewodu. Następnie przewód poddawano naprężeniom rozciągającym, aż do zerwania.

2.3. Wyniki pomiarów

Podstawowe parametry statystyczne (obliczone wg [5, 6]) dotyczące wyników tej części badań przedstawiono w tab. 3. Jako miarę wytrzymałości mechanicznej na zrywanie badanych przewodów przyjęto statystycznie najmniejszą siłę zrywającą F_{\min} . W tabeli 3 umieszczono również wartości zmierzonej siły zrywającej F_b oraz średniej siły zrywającej F_{av} .

Tabela 4

Procentowe osłabienie wytrzymałości mechanicznej

Przekrój żyły (mm ²)	Badany zacisk					
	typ I		typ II		typ III	
	$\Delta F_{\min\%}$	$\Delta F_{av\%}$	$\Delta F_{\min\%}$	$\Delta F_{av\%}$	$\Delta F_{\min\%}$	$\Delta F_{av\%}$
25	15,8	11,4	15,4	13,4	55,6	34,4
95	2,6	1,8	9,0	4,1	13,4	7,0

Dodatkowo podano, o ile procent wartość średniej siły zrywającej badanych zacisków różni się od wartości średniej siły zrywającej dla tła ($\Delta F_{av\%}$).

2.4. Wnioski

Badania wykazały, że montaż zacisków przebijających izolację zmniejsza wytrzymałość mechaniczną przewodów na zrywanie tym bardziej, im mniejszy jest przekrój żyły przewodu.

Najmniejsze osłabienie wytrzymałości mechanicznej stwierdzono w przypadku zacisków typu I i II, przy czym dla przewodów o przekroju żyły 25 mm^2 było to zmniejszenie o ok. 16%

Tabela 3
Zmierzona, średnia i statystycznie najmniejsza siła zrywająca

Tło lub zacisk	F_b	F_{av}	F_{\min}
	kN	kN	kN
przekrój 25 mm²			
Tło	4,90	5,00	4,75
	5,00		
	5,10		
Typ I	4,65	4,43	4,00
	4,33		
	4,30		
Typ II	4,25	4,33	4,02
	4,50		
	4,25		
Typ III	2,80	3,28	2,11
	3,75		
	3,30		
przekrój 95 mm²			
Tło	16,10	16,17	16,05
	16,20		
	16,20		
Typ I	15,85	15,88	15,63
	15,80		
	16,00		
Typ II	16,06	15,83	14,60
	15,83		
	14,60		
Typ III	16,06	15,13	13,90
	15,13		
	13,90		

W tabeli 4 pokazano, o ile procent wartość najmniejszej siły zrywającej badanego zacisku różni się od wartości tej siły dla tła ($\Delta F_{\min\%}$). Jest to informacja o obniżeniu wytrzymałości mechanicznej przewodu spowodowanym zamocowaniem zacisku.

(tab. 4), a w przypadku zacisku typu I i przewodów z żyłą o przekroju 95 mm^2 o ok. 2,5%. Zacisk typu III spowodował największe osłabienie wytrzymałości mechanicznej przewodów dla obu przekrojów żył (o ok. 55% dla przekroju 25 mm^2 i 13% dla przekroju 55 mm^2).

3. BADANIA STARZENIOWE

3.1. Obiekty badań

Badaniom poddano dwa rozwiązania konstrukcyjne zacisków odgałęźnych o podobnych parametrach (tab. 5), lecz zróżnicowanych pod względem rozmieszczenia elementów przebijających izolację (rys.3). W torze głównym zastosowano przewód o przekroju 95 mm^2 , a torze odgałęźnym - przewód o przekroju 35 mm^2 . Prąd dopuszczalny długotrwale dla tych przewodów wynosił odpowiednio 258 A i 138 A. Badano cztery, pochodzące od różnych producentów, (A, B, C i D) typy zacisków, po sześć sztuk z każdego typu. Przebieg i wyniki tych badań opisano szerzej w [9].

3.2. Zakres i procedura badań

Celem wykonanych w 2002 r. badań było określenie wpływu wybranych narażeń starzeniowych na jakość połączeń prądowych badanych zacisków. Zakres badań obejmował: test elektrycznych cykli cieplnych (EHT - ang. *Electrical Heat Cycle Test*), test drgań mechanicznych (MVT - ang. *Mechanical Vibration Cycle Test*) oraz test wilgotnościowy (HT - ang. *Humidity Cycle Test*).

We wszystkich rodzajach wykonywanych testów mierzono rezystancję zestyku (CR - ang. *Contact Resistance*) jako parametr elektryczny charakteryzujący jakość zacisku. W teście wilgotnościowym mierzono dodatkowo prąd upływu (LC - ang. *Leakage Current*). Jako kryterium jakości połączenia prądowego przyjęto, że mierzone wielkości powinny być jak najmniejsze. Kryterium to stosowano również do wybranych miar statystycznych charakteryzujących pomiary: wartości średniej, odchylenia standardowego, współczynnika zmienności, wartości statystycznie maksymalnej, rozrzutu wyników w seriach pomiarowych oraz przyrostu rozpatrywanych wartości względem wartości poprzedniej i wartości przed rozpoczęciem testu. Jako miary statystyczne mierzonych wielkości (CR i LC) przyjęto:

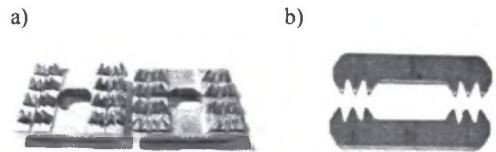
- wartość statystycznie maksymalną (ang. *Statistical Maximum Value*)

$$SMV = X_{av} + |\Delta X_{av}|, \quad (1)$$

Parametry i oznaczenia zacisków

Tabela 5

Producent	Typ	Przekrój przewodu (mm^2)	
		głównego	odgałęźnego
A	I	95	95
B		95	35
C		95	95
D	II	95	95



Rys.3. Elementy przebijające izolację zacisków poddawanych próbom starzeniowym:

a) płytowy-wielozębny, b) kurtynowy pojedynczy

Fig. 3. Piercing elements of connectors under ageing tests: a) multi-teeth plate, b) blade single-sided

- przyrost wartości statystycznie maksymalnej względem wartości obliczonej przed rozpoczęciem testu (ang. *Increment of Current Statistical Maximum*)

$$ISMV = \frac{SMV_n - SMV_1}{SMV_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

gdzie:

X_{av} – wartość średnia,

ΔX_{av} – przedział ufności na poziomie istotności 5%,

SMV_n, SMV_1 – SMV bieżąca oraz obliczona przed rozpoczęciem testu.

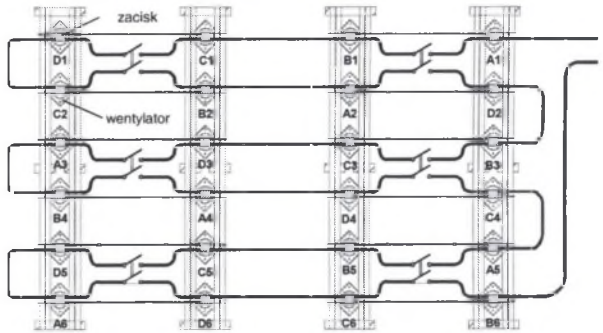
Czynnik SMV zawiera informację o wartości średniej oraz o rozrzucie wartości analizowanego parametru (miarą tego rozrzutu jest odpowiedni przedział ufności). Czynnik ISMV określa stopień pogorszenia się jakości zacisku podczas testu.

3.3. Wpływ elektrycznych cykli cieplnych

Celem tej części badań było określenie wpływu liczby cykli grzania i chłodzenia zacisku na jego rezystancję przejścia. Wykonano 1025 cykli grzania i chłodzenia. Czas trwania nagrzewania nie przekraczał 20 min, a chłodzenia - 10 min [8]. Schemat ideowy stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 4.

Dzięki umieszczeniu wszystkich badanych zacisków na wspólnej pętli prądowej nagrzewały się one wskutek przepływu prądu o tej samej wartości. Jednakowe warunki chłodzenia zacisków zalewniono dzięki umieszczeniu pod każdym z nich wentylatora. Wartość prądu płynącego we wspólnej pętli prądowej dobrano tak, aby w ciągu 20 min spowodować przyrost temperatury przewodu głównego o co najmniej 30 K. Sterowanie czasem i liczbą cykli wykonywano za pomocą komputera.

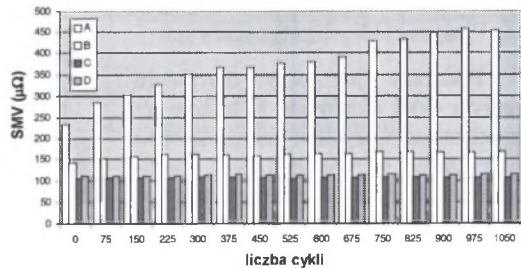
Pomiar rezystancji przejścia badanych zacisków wykonywano po każdym 75 cyklach. Dzięki zastosowaniu wielokanałowej karty pomiarowej możliwe było równoczesne



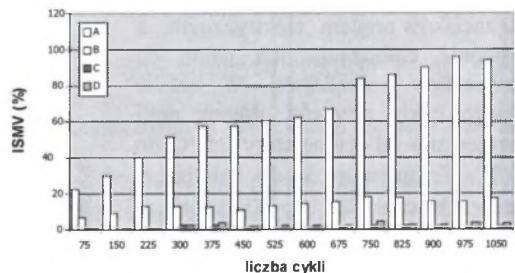
Rys. 4. Schemat ideowy stanowiska badawczego do testu elektrycznych cykli cieplnych

Fig. 4. The current loop for electrical heat cycle test

a)



b)



Rys. 5. Wpływ elektrycznych cykli cieplnych na miary statystyczne rezystancji przejścia: a) SMV i b) ISMV

Fig. 5. Influence of EHT on statistical measures of the contact resistance: a) SMV, b) ISMV

wykonywanie pomiaru wszystkich spadków napięcia oraz prądu płynącego w obwodzie. Archiwizację danych pomiarowych zapewniało odpowiednie oprogramowanie.

Wpływ liczby cykli na wartość statystycznie maksymalnej rezystancji przejścia oraz na przyrost tej wartości przedstawiono na rys. 5. Na tej podstawie można stwierdzić, że najmniejszą SMV oraz najmniejszy ISMV wykazuje zacisk typu C.

3.4. Wpływ drgań mechanicznych

Kolejnym etapem badań było określenie wpływu wibracji mechanicznych zacisku na jego rezystancję przejścia, będącą miarą jakości połączenia prądowego. Badania odwzorowywały tzw. drgania eolskie, w które wpadają przewody linii napowietrznych wraz z osprzętem w wyniku działania wiatru. Przyjmuje się, że częstotliwość takich drgań mieści się w przedziale od 5 Hz do 50 Hz, a ich amplituda nie przekracza połowy średnicy przewodu [12].

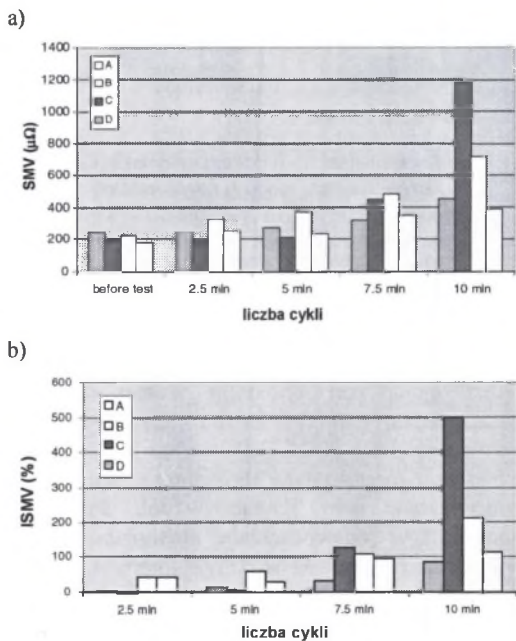
Zamodelowano pionowe drgania mechaniczne o częstotliwości 50 Hz i amplitudzie drgań badanego zacisku równej połowie średnicy przewodu (8,5 mm). Drganiom mechanicznym poddawano próbkę w postaci przewodu o długości 2,5 m wraz z zaciskiem, zamocowanym w odległości 40 cm od podpory. Zbadano 24 próbki, po 6 próbek dla każdego typu zacisku. Każda próbka była mocowana z jednej strony do konstrukcji stanowiska badawczego (na sztywno). Drugi koniec próbki obciążony był poprzez system bloczków tak, aby naprężenie przewodu wynosiło 5 MPa. W przewodzie wymuszano falę stojącą, a badany zacisk znajdował się w strzałce tej fali.

Każdy z badanych zacisków poddano 10 mln drgań, mierząc rezystancję zestyku co 2,5 mln drgań. Podobnie jak dla cykli cieplnych, pomiary rezystancji wykonywano metodą techniczną. Wybrane wyniki badań przedstawiono na rys. 6. Zamodelowane drgania mechaniczne stworzyły zaciskom surowsze warunki pracy niż elektryczne cykle cieplne, co potwierdzają większe SMV i ISMV rezystancji przejścia.

3.5. Wpływ cykli wilgotnościowych

Podobnie jak przy określaniu wpływu cykli cieplnych, w trakcie tej części badań wszystkie badane zaciski umieszczono na wspólnej pętli prądowej. Nad każdym z zacisków zainstalowano spryskiwacze w taki sposób, aby strumień wody skierowany był w miejsce, w którym zacisk przebija izolację. Badania polegały na nagrzewaniu zacisków prądem elektrycznym, a następnie chłodzeniu ich wodą do temperatury początkowej. W trakcie takiego cyklu przewód główny pętli nagrzewano od temperatury 25 °C do 90 °C. Temperatura wody chłodzącej nie przekraczała 22 °C. Wielkościami mierzonymi były rezystancja przejścia oraz prąd upływu testowanych zacisków. Harmonogram badań obejmował następujące czynności [16, 4, 7]:

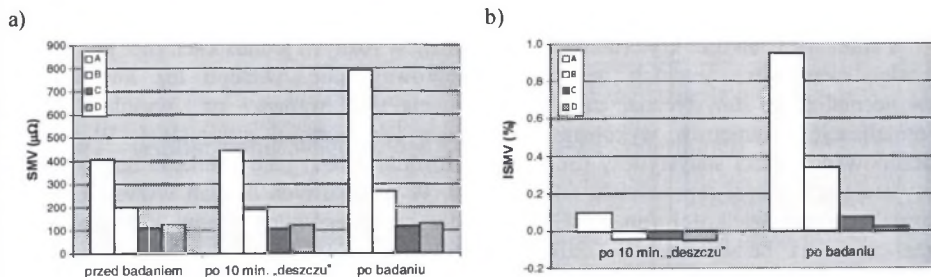
- 1) pomiar prądu upływu przy napięciu przemiennym 250 V oraz pomiar rezystancji przejścia,
- 2) spryskiwanie wodą przez 10 min.,



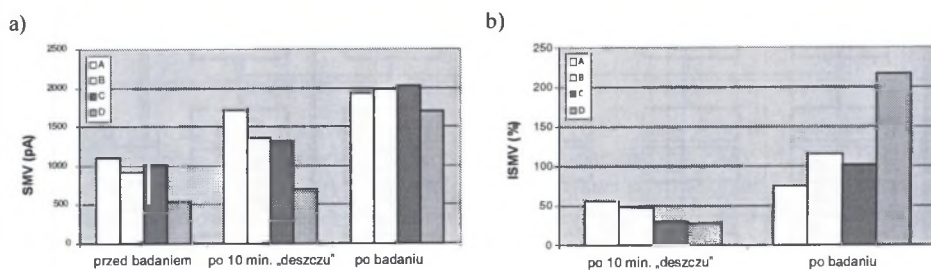
Rys. 6. Wpływ wibracji mechanicznych na miary statystyczne rezystancji przejścia: a) SMV, b) ISMV
Fig. 6. Influence of MVT on statistical measures of the contact resistance: a) SMV, b) ISMV

- 3) pomiar jak w pkt. 1,
- 4) 100 cykli nagrzewania prądem toru głównego do 90 °C i chłodzenia go wodą do 25 °C,
- 5) pomiar jak w pkt. 1.

Wybrane wyniki pomiarów rezystancji zestyku oraz prądu upływu przedstawiono na rys. 7 i 8.



Rys. 7. Wpływ testu wilgotnościowego na SMV i ISMV rezystancji przejścia (a, b)
Fig. 7. Influence of HT on SMV and ISMV of the contact resistance (a, b))



Rys. 8. Wpływ testu wilgotnościowego na SMV i ISMV prądu upływu (a, b)
Fig. 8. Influence of HT on SMV and ISMV of the leakage current (a, b))

4. PORÓWNAWCZA OCENA ZACISKÓW

4.1. Kryteria oceny

Do porównawczej oceny jakości zacisków wykorzystano wyniki z testów EHT, MVT i HT, definiując następujące wielkości kryterialne:

- 1) rezystancję zestyku po próbie elektrycznych cykli ciepłych (CREHT - ang. *Contact Resistance after EHT*),
- 2) rezystancję zestyku po próbie wibracji mechanicznych (CRVT - ang. *Contact Resistance after MVT*),
- 3) rezystancja zestyku po próbie wilgotnościowej (CRHT - ang. *Contact Resistance after HT*),
- 4) prąd upływu po próbie wilgotnościowej (LCHT - ang. *Leakage Current after HT*).

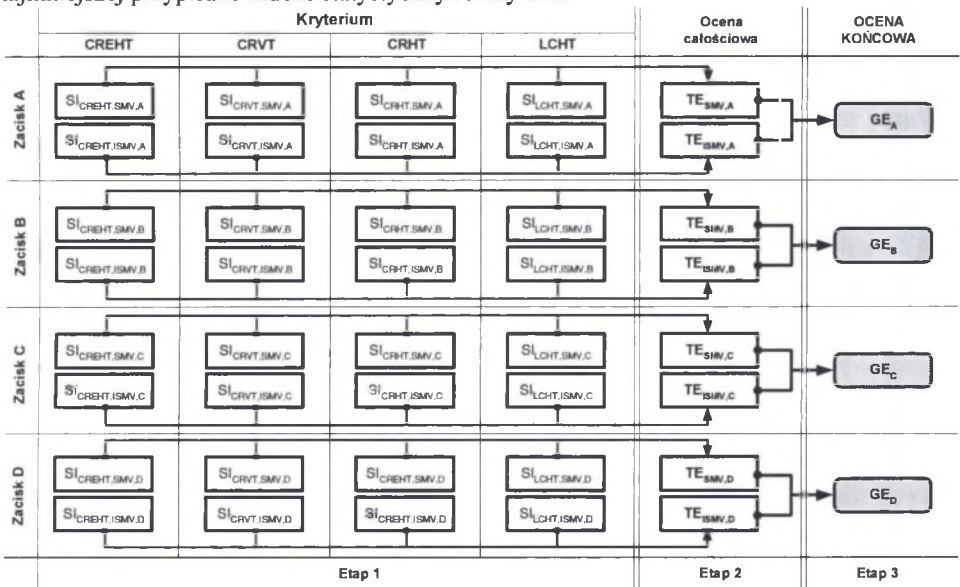
Każdą z tych wielkości kryterialnych opisano za pomocą dwóch rozważanych wcześniej miar statystycznych (SMV i ISMV), uzyskując następujące grupy parametrów wielkości kryterialnych:

- parametry dla SMV - $CREHT_{SMV}$, $CRVT_{SMV}$, $CRHT_{SMV}$, $LCEHT_{SMV}$,
- parametry dla ISMV - $CREHT_{ISMV}$, $CRVT_{ISMV}$, $CRHT_{ISMV}$, $LCEHT_{ISMV}$.

Założono, że jakość połączenia prądowego jest największa, gdy te wartości parametrów wielkości kryterialnych są najmniejsze. Oceny porównawczej badanych konstrukcji zacisków dokonano w trzech opisanych dalej etapach (rys. 9). Procedurę oceny porównawczej opisano szerzej w [11].

4.2. Obliczenie indeksów statystycznych (etap 1)

Parametry wielkości kryterialnych wyrażają się w różnych jednostkach (np. $\mu\Omega$, pA i %), a więc niemożliwe jest ich bezpośrednie porównywanie. Dlatego też konieczna jest tzw. normalizacja statystyczna, czyli transformacja tych wartości na „wspólny” poziom. Normalizację parametrów wykonano za pomocą ich wartości minimalnej. W tym celu zdefiniowano indeks statystyczny (SI - ang. *Statistical Index*) jako wielkość bezwymiarową, przyjmującą wartości z przedziału od 0 do 100. W wyniku tych działań wszystkie wartości normalizowanej wielkości (np. $CREHT_{SMV}$) dla poszczególnych typów zacisków zostały przeliczone na bezwymiarowe liczby z przedziału od 0 do 100, przy czym wartości najmniejszej przypisano indeks statystyczny równy 100.



Rys. 9. Metoda wykonywania oceny porównawczej zacisków

Fig. 9. The final rank - method of executing

Indeksy statystyczne dla poszczególnych typów badań, wielkości kryterialnych oraz zacisków opisano jako:

$$SI_{X,Y,Z} = \frac{\min(X_Y)}{X_{Y,Z}}, \quad (3)$$

gdzie: X – rodzaj wielkości kryterialnej (CREHT, CRVT, CRHT lub LCHT),
 Y – rodzaj parametru wielkości kryterialnej (SMV lub ISMV),
 Z – kod (producent) zacisku (A, B, C lub D).

Oznacza to, że każdemu typowi zacisku w poszczególnym rodzaju badania wystawiono ocenę częściową w skali od 0 do 100. Oceny obliczane osobno dla miar statystycznych SMV i ISMV można traktować jako kryteria składowe oceny jakości połączenia prądowego.

4.3. Całościowa ocena dla parametru SMV i ISMV (etap 2)

Każdy zacisk oceniono całościowo posługując się wielkością (TE - ang. *Total Evaluation*) zawierającą oceny częściowe uzyskane w poszczególnym rodzaju badania. Taka ocena została dokonana oddzielnie dla parametru SMV i ISMV (jako ważona średnia geometryczna z poszczególnych ocen częściowych). Mając na uwadze zróżnicowaną istotność poszczególnych rodzajów badań, każdemu z nich przypisano odpowiednie wagi (tab. 6). Wielkość TE dla poszczególnych zacisków obliczono zgodnie ze wzorem:

$$TE_{Y,Z} = \sum^{WF_X} \sqrt[WF_X]{SI_{CREHT,Y,Z}^{WF_{CREHT}} \cdot SI_{CRVT,Y,Z}^{WF_{CRVT}} \cdot SI_{CRHT,Y,Z}^{WF_{CRHT}} \cdot SI_{LCHT,Y,Z}^{WF_{LCHT}}}, \quad (4)$$

gdzie WF_X – współczynnik wagowy dla X -tej wielkości kryterialnej.

Tabela 6

Współczynniki wagowe przyjęte w ocenie całościowej wyników badań

WF _{CREHT}	WF _{CRMVT}	WF _{CRHT}	WF _{LCHT}
rezystancja zestyku			prąd upływu
0,35	0,3	0,245	0,105

4.4. Końcowa ocena każdego zacisku (etap 3)

Dla każdego zacisku wystawiono ocenę końcową (GE - ang. *Global Evaluation*) jako średnią geometryczną ocen całościowych uzyskanych dla parametrów SMV i ISMV. Ponieważ parametry SMV i ISMV jako kryteria składowe traktowane są równorzędnie, więc przyjęto jednakowe jednostkowe wartości współczynników wagowych dla obydwóch parametrów. Wartość GE określono zatem jako:

$$GE_Z = \sqrt{TE_{SMV,Z} \cdot TE_{ISMV,Z}}. \quad (5)$$

Wyniki oceny jakości badanych zacisków zestawiono w tab. 7. Na tej podstawie można stwierdzić, że zgodnie z opisaną metodyką oceny najwyższą jakość połączenia prądowego zapewnia konstrukcja płytowo-wieloiągłowa (rys. 3a).

Tabela 7

Klasyfikacja zacisków - oceny całościowe dla parametrów SMV i ISMV i oceny końcowe

Z (kod zacisku)	TE _{SMV,Z}	TE _{ISMV,Z}	GE _Z (ocena końcowa)
A	34,09	10,29	18,72
B	75,49	27,85	45,68
C	76,99	60,48	68,23
D	100	100	100

5. PODSUMOWANIE

Przyjęto, że głównymi wielkościami kryterialnymi decydującymi o jakości zacisków przebijających izolację podczas pracy długotrwałej jest ich rezystancja przejścia oraz prąd

upływu. Wartość statystycznie maksymalna tych wielkości oraz przyrost wartości statystycznie maksymalnej są wygodnymi miarami statystycznymi, pozwalającymi uniknąć podczas oceny posługiwania się wartością średnią, współczynnikiem zmienności oraz lokalnym przyrostem rezystancji przejścia, czy prądu upływu.

Zaproponowana metoda umożliwi wielokryterialną ocenę jakości różnych rozwiązań konstrukcyjnych zacisków przebijających izolację. Ważnym elementem metody jest dobór współczynników wagowych, co pozwala uwypuklić w ocenie porównawczej istotne czynniki jakościowe (np. większy współczynnik wagowy dla próby elektrycznych cykli cieplnych).

Ocena końcowa zacisków została dokonana według czterech kryteriów. Bardziej ogólna i precyzyjna ocena powinna uwzględniać dodatkowe kryteria, wymagające wykonania szerszych badań dotyczących wpływu promieniowania UV, wodoszczelności, niskich temperatur oraz naprężeń mechanicznych na jakość zacisku.

LITERATURA

1. Bestimmungen für lösbare Kabelklemen in Starkstrom-Kabelanlagen bis 1000 V. German Standard VDE 0220 Teil 1/11.71.
2. Clamp Connection Device for Aluminium Conductors with 2.5-300 mm² Area in Cables for max. 24 kV. Swedish National Standard SEN 24 15 10, 1975.
3. Construction and Testing of Connectors for Power Cables and Overhead Lines. Finnish National Standard SFS 2663, 1975.
4. Covers of Insulating Material for Power Line Connectors – Humidity Test. Electrical Properties. Finnish National Standard SFS 4644 - 2001.
5. Dugain E., Michaut C.: Méthodes rapides d'interprétations statistique - appliquées aux petites séries de mesures. Revue de l'Aluminium, No 3/1974.
6. Dugain E., Michaut C.: Méthodes rapides d'interprétations statistiques - appliquées aux petites séries de mesures. Revue de l'Aluminium, No 4/1974.
7. Effects of current passing through the human body. IEC Report. Part 1: General aspects. IEC Publ. 479-1, 1984.
8. Electrical Heating Cycles (Draft).CENELEC TC 20/WG 11 SG ABC ACCESSORIES - 1999.
9. Gacek Z., Maźniewski K., Sosiński R.: Selected Constructional and Ageing Tests of Piercing Connectors in LV Overhead Power Lines with Covered Conductors. Final Report. Silesian University of Technology, Politechnika Śląska. Gliwice 2002 (nie publikowane).
10. Gacek Z., Maźniewski K., Sosiński R.: Test of Selected Electromechanical Parameters of Piercing Connectors in Low Voltage Overhead Power Lines with Covered Conductors. Politechnika Śląska, Gliwice 1998 (niepublikowane).
11. Gacek Z., Maźniewski K., Sosiński R.: Comparative Testing Of Chosen Piercing Connectors. Referat zgłoszony w 2003r. do druku w czasopiśmie IEEE. Nr TPWRD-00543-2003.R1 status: „after 1-st review”.
12. Optical Cables to be used Along Electrical Power Lines, Appendix E - Aeolian Vibration Test Method. EN 187200, 1998.
13. Pancer W.: Systemy zasilania elektroenergetycznego z osprzętem ENSTO. Seminarium szkoleniowe „Projektowanie, budowa i eksploatacja izolowanych linii napowietrznych”, Okoniówek 20-21.02.2004.
14. Porcheray G.: Rozwój technologii zacisków przebijających izolację. Elektrosystemy, Nr1 (36) - styczeń 2003, ss. 56-60.
15. Rakowska A., Grzybowski A., Hajdrowski K.: Wymagania dotyczące badań osprzętu przewodowego w liniach napowietrznych z przewodami izolowanymi. I Konferencja Naukowo-Techniczna. „Elektroenergetyczne linie napowietrzne niskiego i średniego napięcia”. Kołobrzeg 2000.
16. Test Requirements for Low Voltage Aerial Bundled Cable Accessories – Climatic and Corrosion Test (CENELEC 20/WG 11 SG ABC ACCESSORIES). pr EN 50xxx-6 - 2002.