

Andrzej Książkiewicz

Jerzy Janiszewski

Wydział Elektryczny
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań
E-mail: andrzej.ksiazkiewicz@put.poznan.pl,
jerzy.janiszewski@put.poznan.pl

Faculty of Electrical Engineering
Poznan University of Technology
Piotrowo 3a, 60-965 Poznan

Zmiana rezystancji zestykowej przekaźników niskiego napięcia pod wpływem działania prądów zwarciovych

Low voltage relay contact resistance change influence by short-circuit current

Słowa kluczowe: przekaźniki, materiały stykowe, rezystancja zestykowa

Keywords: relays, contact materials, contact resistance

Streszczenie: Przekaźniki elektromagnetyczne w trakcie swojej eksploatacji są narażone na niekorzystne zjawiska łączeniowe. Do narażeń tych można zaliczyć m.in. załączenie obwodu zwartego, co skutkuje przepływem prądu o znacznej wartości przez styki przekaźnika. Przepływ tego prądu, któremu w początkowej fazie może także towarzyszyć łuk elektryczny, wpływa na stan powierzchni styków, a tym samym na wartość rezystancji zestykowej, będącej istotnym parametrem eksploatacyjnym przekaźników. Celem pracy jest analiza oddziaływania procesów załączania prądu o znacznej wartości na rezystancję zestykową przekaźników. Obserwowane są znaczne zmiany tej rezystancji po każdym cyklu łączeniowym.

Abstract: Electromagnetic relays are exposed to switching phenomena during its service life. These phenomena may include making of a short circuit, resulting in current flow of significant value for the relay contacts. This current influences the contacts surface and thus the value of the contact resistance, which is an important exploitation parameter for electromagnetic relays. The aim of the study is to analyze the impact of current flow of substantial value on the electric contact resistance of the relay contacts. Significant changes in the resistance after each switching cycle is observed.

1. Wstęp

Przekaźniki elektromagnetyczne są powszechnie stosowane w celu łączenia obwodów o umiarkowanych wartościach natężenia prądu łączeniowego (tzw. obwody średnioprądowe), przy napięciach nieprzekraczających 1000 V. Wykorzystuje się je między innymi jako elementy wykonawcze w systemach automatyki budynkowej (np. KNX, LCN, LonWorks) czy w sterownikach i przekaźnikach programowalnych (Easy, NEED). Różnią się one między sobą budową, przeznaczeniem, a także parametrami technicznymi. W odniesieniu do styków łączników, wykonanych z różnych materiałów, w literaturze często prezentowane są rezultaty badań przeprowadzonych zarówno w warunkach normalnej eksploatacji, jak i w warunkach wystąpienia szczególnych narażeń. Badania te jednak koncentrują się często na niskonapięciowych (< 50 V) obwodach prądu stałego [8]. Podobne badania wykonali Morin [16], Neuhaus [17] czy Doublet [6], którzy niezależnie od siebie prowadzili prace dla

podobnych materiałów stykowych, lecz dla obwodów niskonapięciowych o niewielkim natężeniu prądu stałego. Badania związane z procesami łączeniowymi w obwodach prądu przemiennego średniego napięcia koncentrują się na zakresach prądu od kilku do kilkunastu kA [1, 9]. Dostrzegalny jest brak badań w zakresie nisko- i średnioprądowych łączników prądu przemiennego przy prądach zbliżonych do normalnych warunków pracy oraz zwarciovych, które mogą występować w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia, nieprzekraczających zwykle 1 kA. W zakresie modelowania prowadzone są badania symulacyjne dotyczące nagrzewania połączeń szyn i zestyków o skomplikowanych kształtach, konfiguracjach i wykorzystujących różnorodne materiały przewodzące [10].

Przełączniki przeznaczone do łączenia obwodów odbiorczych narażone są na pewne niekorzystne procesy. Do zjawisk tych można zaliczyć łączenie prądów przeciążeniowych i zwarciovych, mogące prowadzić do skrócenia czasu eksploatacji przełączników bądź, w skrajnych przypadkach, ich całkowitego uszkodzenia. W artykule opisano wpływ załączenia zwartych obwodów odbiorczych na zmianę rezystancji zestykowej. Zbadane zostały przełączniki z trzema różnymi materiałami stykowymi.

Rezystancja zestykowa łącznika elektroenergetycznego jest jego istotnym parametrem eksploatacyjnym. Ważne, aby rezystancja ta w okresie eksploatacji przełącznika osiągała możliwie małe wartości, jednocześnie nie ulegała znacznym zmianom w czasie. Od jej wartości zależy między innymi dopuszczalne obciążenie robocze przełącznika, związane z jego nagrzewaniem [15]. Wartość rezystancji zestykowej zależy od [7, 14]:

- rezystancji kształtu R_k ,
- rezystancji warstw nalotowych R_n .

Wypadkowa wartość rezystancji zestyku (przejścia) jest równa:

$$R_z = R_k + R_n \quad (1)$$

Rezystancja warstw nalotowych R_n jest trudna do ustalenia analitycznie, ponieważ zależy od wielu, czasem przypadkowych, czynników, w tym od: temperatury otoczenia, wilgotności, materiału stykowego. Rezystancja kształtu R_k zależy przede wszystkim od rezystywności i twardości materiału stykowego. Do jej opisu często stosowany jest model jednopunktowy z eliptycznymi, ekwipotencjalnymi liniami rozprywu prądu [5, 7]. Rzeczywista powierzchnia styczności jest znacznie mniejsza niż pozorna (nominalna) powierzchnia styczki. Model ten można uznać za słuszny, przy niewielkich siłach docisku styków stosowanych w przełącznikach.

Na wartość rezystancji zestyku wpływ ma materiał zastosowany na styczki. Stosowane mogą być styczki z czystych metali, w tym z: miedzi, srebra, złota, platyny, palladu, wolframu czy molibdenu. Częściej korzysta się ze stopów i spieków, takich jak: srebro-miedź, srebro-kadm, srebro-pallad, srebro-tlenek kadmu, srebro-wolfram, srebro-nikiel, srebro-tlenek cyny [3]. Styczki mogą zostać pokryte dodatkową warstwą materiału, mającą na celu polepszenie ich niektórych właściwości (np. odporności na wędrowkę materiału). Stosowane są pokrycia z cyny, srebra lub złota. Pokrycie styku warstwą cyny prowadzi do nieznacznego wzrostu rezystancji zestyku w stosunku do materiału niepowleczonego. Warstwa srebra ma skutek odwrotny, zmniejsza wartość rezystancji przejścia zestyku [19]. Obecnie najczęściej stosowane materiały stykowe, w niskonapięciowych przełącznikach prądu przemiennego średniej mocy, to spieki srebra z: nikiem $AgNi$, tlenkiem kadmu $AgCdO$ i tlenkiem cyny $AgSnO_2$. Właściwości poszczególnych materiałów są następujące [3, 23]:

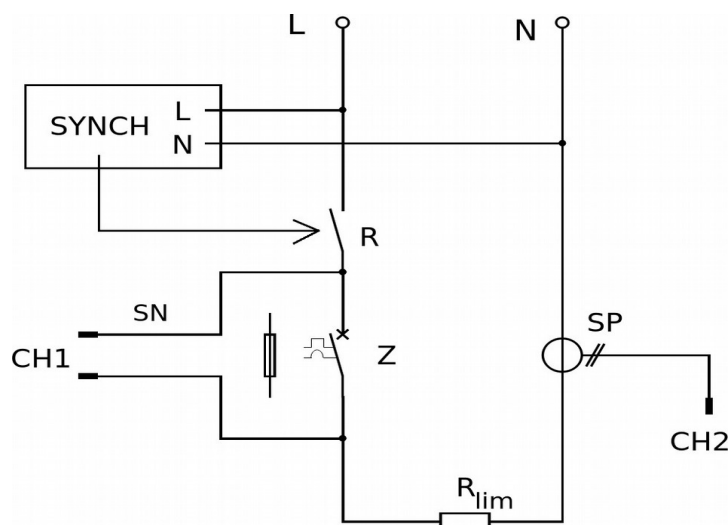
- $AgNi$: wykazuje małą wędrowkę materiału, jest nieodporny na działanie siarki i jej związków oraz jest skłonny do tworzenia tlenków,
- $AgCdO$: materiał wrażliwy na siarkę, cechuje się odpornością na spawanie, jego zastosowanie sprzyja procesowi gaszenia łuku elektrycznego, jest też odporny na wędrowkę materiału,

- $AgSnO_2$: materiał odznacza się wysoką stabilnością termiczną i odpornością na wędrówkę materiału, cechuje się stabilną rezystancją przejścia zestyku.

Materiały wykonane jako srebro-metal lub srebro-tlenek metalu z reguły wykazują wysoką odporność na szepianie [21]. Częstotliwość występowania oraz siła szepień przy załączaniu wzrasta proporcjonalnie do wartości natężenia prądu łuku załączeniowego, podczas gdy czas palenia się łuku takiego wpływu już nie ma [17]. Siła szepienia styków nie wykazuje zależności od statycznej siły docisku styków. Jest natomiast zależna od prędkości poruszania się styku ruchomego. Rozważania te są słuszne przede wszystkim dla styków wykonanych z czystego srebra [17].

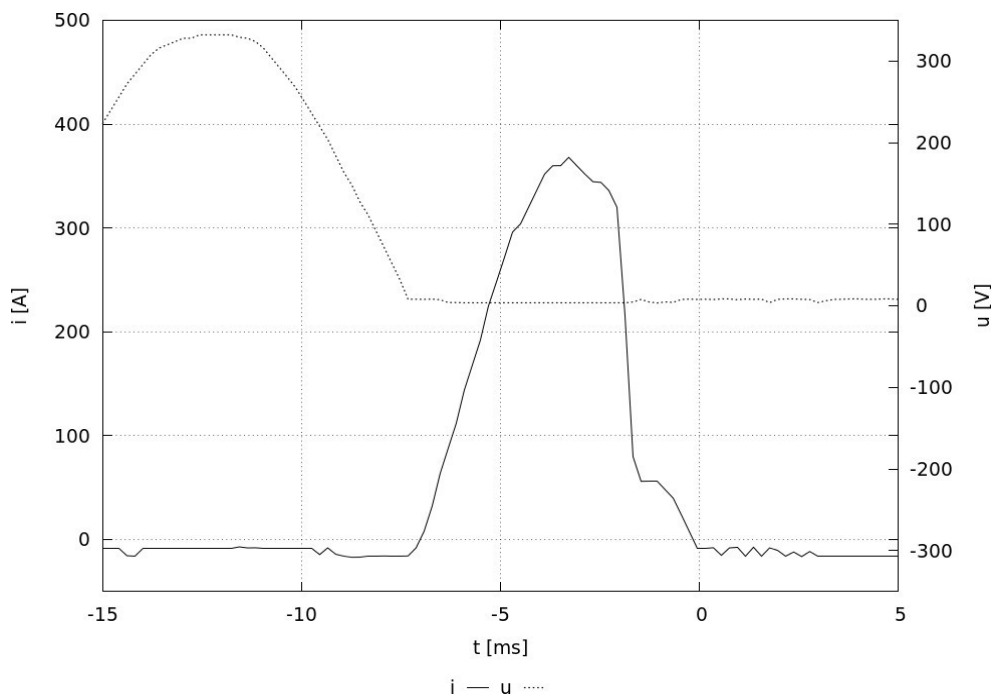
2. Układ probierczy

Badaniom zostały poddane przekaźniki miniaturowe, wykorzystujące dwa wymienione wcześniej materiały stykowe, czyli $AgNi$ i $AgSnO_2$. Dla drugiego z nich badaniom zostały poddane dwa rodzaje styków: w wykonaniu bimetalowym oraz w wykonaniu pełnym. Nity bimetalowe wykonywane są najczęściej w technologii metalurgii proszkowej lub, w przypadku wykorzystania tlenków metali, wewnętrznego utleniania. Nity pełne produkowane są najczęściej z drutów, wykonanych z danego materiału stykowego, a ich kształt uzyskiwany jest w procesach obróbki kucia na zimno. Schemat elektryczny układu probierczego przedstawiony został na rysunku 1. Układ zasilany jest bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia 230 V_{AC}. Obwód zabezpieczony jest przed skutkami zwarcia i przeciążeń poprzez wyłączniki instalacyjne o prądzie znamionowym roboczym 16 A i charakterystyce B, C oraz D, a także bezpiecznikiem ogólnego przeznaczenia gG 16. Dla każdego zabezpieczenia wykonano pojedynczą próbę łączeniową z każdym z wymienionych materiałów stykowych. Dzięki wykorzystaniu urządzenia synchronizującego moment załączenia przekaźnika z wybraną fazą napięcia uzyskano powtarzalność warunków probierczych. Jako fazę załączania wybrano przejście napięcia przez zero. Spodziewane natężenie prądu zwarciovego zostało ograniczone poprzez rezystor do wartości 320 A ($I_m = 453$ A). Średnia wartość szczytowa prądu zwarciovego dla wszystkich prób wyniosła 413 A. Wartość niższa niż spodziewana może wynikać z ograniczania jej przez aparat zabezpieczający obwód.



Rys. 1. Schemat elektryczny układu probierczego: R - badany przekaźnik, Z - zabezpieczenie obwodu: wyłącznik instalacyjny lub bezpiecznik, R_{lim} - rezystor ograniczający, SYNCH - urządzenie synchronizujące, SP - sonda prądowa, SN - sonda napięciowa, CH1, CH2 - kanały oscyloskopu

Przebieg natężenia prądu oraz napięcie między stykami rejestrowane były metodą oscyloskopową z wykorzystaniem sond prądowej i napięciowej. Przykładowy oscylogram przedstawiono na rysunku 2. Przekładniki były przyłączone do układu poprzez dedykowane gniazdo łączeniowe. Pomiar rezystancji wykonywano czteroprzewodową metodą Kelvina za pomocą miernika małych rezystancji MI3252 firmy Metrel. Do otrzymanych wyników zastosowano poprawkę uwzględniającą rezystancję przejścia torów prądowych samego gniazda oraz przekładnika, tak aby jak najdokładniej wyznaczyć wartość poszukiwanej rezystancji zestykowej.

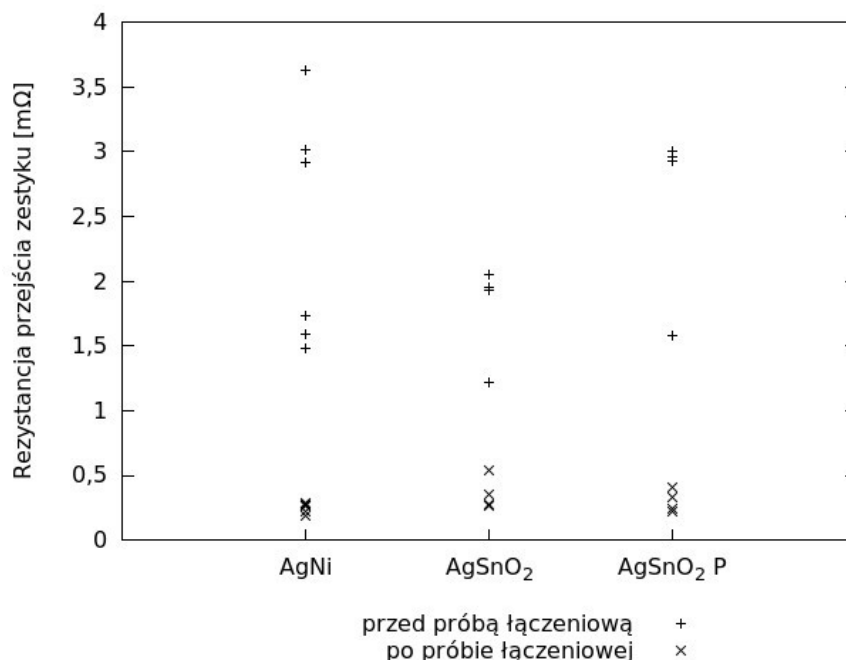


Rys. 2. Oscylogram przebiegu natężenia prądu w obwodzie probierczym i napięcia między stykami przekładnika dla losowo wybranej próby

3. Wyniki pomiarów

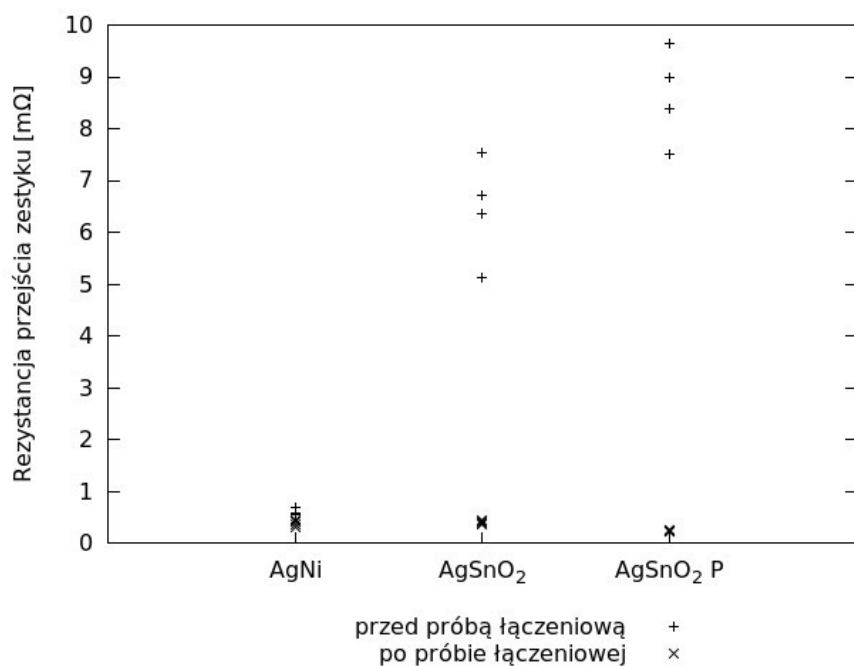
Przetestowane zostały trzy modele przekładników ze stykami wykonanymi z wcześniej wymienionych materiałów. Każdy z nich poddany był pojedynczej próbie łączeniowej. Przed oraz po przeprowadzeniu próby załączania prądu zwarciovego dokonano pomiaru rezystancji przejścia. Próby wykonano w dwójnasób, a mianowicie dla przekładników kondycjonowanych, jak i niekondycjonowanych. Pod pojęciem kondycjonowania autor rozumie mechaniczną obróbkę styków poprzez wykonanie określonej liczby cykli łączeniowych (wykonanych bez obciążenia elektrycznego). Kondycjonowanie styków wpływa na początkową wartość rezystancji zestykowej [11]. Liczba cykli łączeniowych dla operacji kondycjonowania wynosiła dwa tysiące. Dla takiej liczby cykli następowała stabilizacja wartości rezystancji zestykowej, a różnice pomiędzy kolejnymi pomiarami wykazywały niewielkie wahania. Próby wykonywane były dla różnych, stosowanych powszechnie, zabezpieczeń przetężeniowych. Na podstawie tych wyników podjęto próbę wykazania czy istnieje dodatkowy czynnik, który mógłby wpływać na wynik. Średnie wartości rezystancji zestykowej dla omawianych przypadków, z podziałem na przekładniki poddane kondycjonowaniu i niekondycjonowane, przedstawiono w tabelicy 1. Wyniki te nie rozróżniają wartości rezystancji zestykowej od zastosowanego zabezpieczenia, ponieważ w zakresie stosowanych prądów probierczych nie stwierdzono takiej zależności.

Zmiana wartości rezystancji zestykowej, dla przekaźników kondycjonowanych i niekondycjonowanych, w zależności od materiału stykowego, dla wszystkich wykonanych prób, przedstawiona została na rysunkach 3 oraz 4. Rezystancja zestykowa dla dwóch przypadków po kondycjonowaniu wzrosła. Tylko dla *AgNi* nastąpił spadek wartości tej wielkości. Wynikać to może z faktu, że materiał ten charakteryzuje się najmniejszą wartością twardości w porównaniu do pozostałych (tab. 2). Zmiana struktury powierzchni stycki podczas operacji łączeniowych, czyli mechanicznego uderzenia styku ruchomego o nieruchomy, możliwa jest ze względu na mniejszą twardość materiału stykowego. Prowadzi to do zwiększenia rzeczywistej powierzchni styku a tym samym do zmniejszenia wartości rezystancji zestykowej. W pozostałych przypadkach obserwowany efekt był odwrotny, czyli bezprądowe operacje łączeniowe prowadziły do wzrostu rezystancji zestykowej. Obszar deformacji powierzchni stycki zależy jest od odporności danego materiału na szepianie. Im mniejsza ta odporność tym większa jest zmieniona powierzchnia styku [22]. Robocza hipoteza wyjaśniająca taką zależność jest następująca. Stycka nieużywana charakteryzowana jest pewną nieregularną powierzchnią, na której pojawiają się mikrowzniesienia. Te mikrowzniesienia, przy pierwszym łączeniu, mogą zwiększyć liczbę punktów styku, co prowadzi do zmniejszenia wartości rezystancji zestykowej. Podczas kondycjonowania styków ulega zmianie powierzchnia stycki, w tym mikrowzniesienia są z niej mechanicznie usuwane. Po tej operacji powierzchnia stycki osiąga właściwy sobie docelowy kształt, dla którego słuszna staje się teza styku jednopunktowego. Razem ze zmianą powierzchni stycki ulega zmianie jej warstwa nalotowa. Ponieważ czas pomiędzy poszczególnymi etapami badania (kondycjonowanie - pomiar rezystancji - próba łączeniowa - pomiar rezystancji) był możliwie krótki, to wpływ warstwy nalotowej na końcowy wynik będzie znikomy. Z tablicy 1 wynika również, że niezależnie od początkowej wartości rezystancji zestyku, po próbie załączania prądu zwarciovego, rezystancja ta znacząco maleje.



Rys. 3. Zmiana rezystancji zestykowej pod wpływem załączania prądu zwarciovego; przekaźniki niekondycjonowane: P - przekaźnik ze stykami w wykonaniu pełnym

Przy załączaniu prądu zwarciovego może pojawić się wstępny zapłon łuku lub wystąpić odskok styków podczas przewodzenia tego prądu. To, które zjawisko wystąpi, ma wpływ na siłę szepiania styków [4].



Rys. 4. Zmiana rezystancji zestykowej pod wpływem załączania prądu zwarcioowego; przekaźniki kondycjonowane: P - przekaźnik ze stykami w wykonaniu pełnym

Tab. 1. Średnie wartości rezystancji zestykowej dla przekaźników kondycjonowanych i niekondycjonowanych, przed i po wykonanej próbie załączenia obwodu zwartego

Lp.	Materiał stykowy	Średnia wartość rezystancji zestyku przed próbą [mΩ]	Średnia wartość rezystancji przejścia zestyku po próbie [mΩ]
Przekaźniki niekondycjonowane			
1	AgNi	2,3927	0,2502
2	AgSnO ₂	1,7909	0,1262
3	AgSnO ₂ P	2,6162	0,3014
Przekaźniki kondycjonowane			
1	AgNi	0,6252	0,3850
2	AgSnO ₂	6,4300	0,4040
3	AgSnO ₂ P	8,6381	0,2467

P - przekaźnik ze stykami w wykonaniu pełnym

Tab. 2. Wybrane właściwości materiałów stykowych stosowanych w niskonapięciowych przekaźnikach [20]

Materiał	Gęstość	Twardość	Przewodność cieplna przy 20 °C	Przewodność elektryczna
	[kg/m ³]	[HB]	[W/K·m]	10 ⁻⁸ [Ωm]
AgNi	10 300	50	350	1,84
AgSnO ₂ / AgSnO ₂ P	9 900	70	307	2,04

Obydwa te zjawiska wpływają bardzo niekorzystnie na stan styczek i prowadzą do pojawienia się łuku elektrycznego. Wraz ze wzrostem wartości natężenia prądu łączeniowego wzrasta ubytek masy styczki [2, 18, 21]. Oprócz tego łuk elektryczny może prowadzić do silnego, lokalnego nagrzewania plamki łukowej, nawet powyżej temperatury topnienia materiału stykowego [12]. Jeżeli przynajmniej na powierzchni jednej styczki materiał stykowy ulegnie roztopieniu i w tym samym czasie nastąpi zetknięcie się styków, wtedy nastąpi szczepienie styków [13]. Pierwotne właściwości materiału stykowego ulegają zmianie, gdy zmieni się powierzchnia styku lub skład danego materiału [22]. Skład może ulec zmianie poprzez ciepłe oddziaływanie prądu. Zależności te są prawdziwe przede wszystkim przy łączeniu prądów o znacznym natężeniu, rzędu kilku kiloamperów.

4. Podsumowanie

Wystąpienie prądu zwarciovego w instalacji elektrycznej jest najczęściej wynikiem sytuacji awaryjnej i jako takie jest to zdarzenie jednostkowe. Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów można zauważyć, że załączanie prądu zwarciovego przez przełącznik istotnie wpływa na wartość jego rezystancji zestykowej. Dla każdego z zarejestrowanych przypadków nastąpiło zmniejszenie wartości rezystancji zestykowej. Niska jej wartość może być uznana za porządną, chociażby ze względu na mniejsze straty mocy i mniejszy wzrost temperatury punktu styku podczas normalnej eksploatacji przełącznika. Kondycjonowanie styków wpływa w istotny sposób na rezystancję zestykową. Nie można jednoznacznie określić czy operacja ta spowoduje jej wzrost lub spadek. Dla styków wykonanych z $AgNi$ nastąpił spadek tej wartości, natomiast dla obu wykonanych styków z $AgSnO_2$ nastąpił znaczący wzrost. Niezależnie od początkowej wartości rezystancji zestykowej po wykonaniu próby załączania prądu zwarciovego rezystancja ta w sposób znaczący zmalała. Znajomość wartości rezystancji zestykowej w normalnych warunkach eksploatacyjnych mogłaby posłużyć do pośredniej oceny stanu powierzchni styków. W dalszych badaniach przewiduje się opracować metody oceny stanu zużycia tej powierzchni na podstawie stopnia zmiany rezystancji zestykowej.

Badania są finansowane w ramach dotacji celowej na prowadzenie badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nim związanych, służące rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej nr **04/41/DSMK/4133**.

Literatura

1. Borkowski P. Arc erosion of contacts on switching high currents. Archives of Electrical Engineering 2004; 53: 259-287.
2. Borkowski P. Nowoczesne metody badań zestyków elektrycznych. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2013.
3. Celiński Z. Materiałoznawstwo elektrotechniczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
4. Chen Z.K, Witter G.J. A Study of Dynamic Welding of Electrical Contacts with Emphasis on the Effects of Oxide Content for Silver Tin Indium Oxide Contacts. Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2010; 56: 1-6.
5. Ciok Z. Procesy Łączeniowe w układach elektroenergetycznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1983.

6. Doublet L, Ben Jemaa N, Hauner F, Jeannot D. Make arc erosion and welding tendency under 42 VDC in automotive area. *Proceedings of the Forty-Ninth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*; 2003:158-162.
7. Holm R. *Electric Contacts*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1981
8. Kharin S.N, Sarsengeldin M. Influence of Contact Materials on Phenomena in a Short Electrical Arc. *Key Engineering Materials* 2012; 510-511: 321-329.
9. Kolimas Ł. Analysis of the making arcing time during current switching. *Przegląd Elektrotechniczny* 2008; 84: 72-74.
10. Kolimas Ł. Modelowanie i analiza rozptyłu temperatury w torach wielkopiędowych i zestykach. *Przegląd Elektrotechniczny* 2014; 9: 183-186.
11. Książkiewicz A. Change of electric contact resistance of an electromagnetic relay during switching operations without electric load. 5th International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists InterTech 2012; 5: 257-260
12. Książkiewicz A, Janiszewski J. Electrical contact temperature change after short-circuit current. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* 2014; 78: 65-70.
13. Książkiewicz A, Janiszewski J, Batura R. Influence of short-circuit AC currents on electrical contact resistance of low voltage relays. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* 2012; 70: 99-103.
14. Kulas S. *Tory prądowe i układy zestykowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2008.
15. Maksymiuk J, Pochanke Z. *Obliczenia i badania diagnostyczne aparatury rozdzielczej*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2001.
16. Morin L, Jemaa N.B, Jeannot D. Make arc erosion and welding in the automotive area, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 2000; 23: 240-246.
17. Neuhaus A.R, Rieder W.F, Hammerschmidt M. Influence of Electrical and Mechanical Parameters on Contact Welding in Low Power Switches. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 2004; 27: 4-11.
18. Pons F, Cherkaoui M. An electrical arc erosion model valid for high current: Vaporization and Splash Erosion. *Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 2008; 54: 9-14.
19. Sawada S, Shimizu K, Hattori Y, Tamai T, Iida K. Analysis of Contact Resistance Behavior for Electric Contacts with Plating Layer. *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 2010; 56: 1-8.
20. Thurston M. O. *Electrical Contacts. Fundamentals, Applications and Technology*. Taylor & Francis Group LLC, 2007.
21. Walczuk E, Borkowski P, Książek S, Missol W, Rdzawski Z, Durst K. Evaluation of Basic Electrical Parameters of Silver-Based Contact Materials of Different Chemical Composition and Manufacturing Technology. *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 2010; 56: 1-8.
22. Zhenbiao L, Lichun C, Jiyun Z. The metallurgical research on contact surface deterioration of AgNi, AgW, AgFe, AgCu contact materials. *Proceedings of the Forty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 1995; 41: 346-349.
23. www.relpol.com.pl, 2014. Relpol. Przekazniki.