

PIOTR BORKOWSKI, MAREK PAWŁOWSKI**Politechnika Łódzka, Katedra Aparatów Elektrycznych**

DEGRADACJA CIEPLNA STYKÓW W ŁĄCZNIKACH PRACUJĄCYCH W INTELIGENTNYCH BUDYNKACH

W artykule przedstawiono zagadnienie degradacji cieplnej styków, które może występować w łącznikach instalacyjnych pracujących w inteligentnych budynkach. Podczas załączania nowoczesnych urządzeń elektronicznych oraz energoelektronicznych (np. źródeł światła LED) występują udary prądowe ponad 50 razy większe od maksymalnej wartości natężenia prądu w stanie ustalonym. Zjawisko to może być przyczyną zbyt szybkiej destrukcji warstwy wierzchniej styku, a w konsekwencji degradacji styków, która w końcowym efekcie doprowadzi do uszkodzenia łącznika.

WPROWADZENIE

W świecie techniki, w odniesieniu do początku XXI wieku, często sięga się po hasło „smart”. Mimo że dosłowne tłumaczenie oznacza „bystry”, „sprytny”, ze względów marketingowych przyjęto tłumaczenie „inteligentny”¹.

W związku z powyższym planuje się inteligentne miasta, w których będą inteligentne domy, zasilane z inteligentnych sieci elektroenergetycznych. Naturalne jest więc oczekiwanie, że w inteligentnym domu będzie wiele inteligentnych urządzeń.

Uwzględniając lekkie przerysowanie tej wizji, należy jednak uznać, że rozwój systemów inteligentnych na wielu płaszczyznach staje się faktem. Autorzy pragną zwrócić uwagę na konieczność integracji nowoczesnych systemów inteligentnych z dotychczasowymi rozwiązaniami technicznymi.

Dynamiczny postęp technologiczny powoduje rozwój urządzeń elektrycznych stanowiących podstawowe wyposażenie budynków. Zaawansowane układy elektroniczne oraz energoelektroniczne stwarzają szereg możliwości funkcjonalnych. Praca tych urządzeń wiąże się jednak ze ściśle określonymi wymaganiami oraz mniej znanymi konsekwencjami. Do podstawowych wymagań należy zaliczyć wysoką jakość napięcia zasilającego, dlatego wiele urządzeń posiada szereg układów zasilających i filtrujących. Ich prawidłowe

¹ Przy uwzględnieniu słownikowej definicji tego słowa, ów przekład nie jest jednak do końca poprawny.

działanie wiąże się jednak z negatywnym wpływem na jakość napięcia zasilającego, co jest jedną z niekorzystnych konsekwencji.

Skutkiem pracy układów energoelektronicznych jest silne odkształcenie prądu i znaczne przesunięcie fazowe, co wiąże się ze zmniejszeniem współczynnika mocy oraz generacją mocy biernej.

Trzecią konsekwencją pracy układów energoelektronicznych jest charakter ich pracy w stanach nieustalonych podczas załączania tych urządzeń. Przeprowadzone wstępne badania opisane w rozdziale 3 wskazują na istotne zmiany parametrów pracy tych układów w stanach nieustalonych.

Analizując zjawiska elementarne, można dostrzec wiele kwestii, które wymagają rozwiązania. Jedną z nich jest obsługa nowych urządzeń elektrycznych za pomocą klasycznych łączników zestykowych. Pierwsze wyniki prac autorów, opisane w niniejszym artykule, wskazują jednoznacznie na konieczność głębszej analizy tematu oraz przeprowadzenia szeregu prac naukowo-badawczych, pozwalających na rozwiązania zauważonych problemów z zakresu degradacji cieplnej styków.

Zestyki biorą bezpośredni udział w najważniejszych czynnościach wykonywanych przez łącznik i odgrywają dominującą rolę, zwłaszcza przy pracy przepustowej i łączeniowej [1-5]. W czasie wykonywania tych prac występuje wiele zjawisk szkodliwie oddziałujących na zestyki. Ze względu na złożony charakter tych zjawisk, w praktyce nie analizuje się zwykle szczegółowo poszczególnych zjawisk, a jedynie ich skutki.

Do najważniejszych szkodliwych skutków zjawisk występujących w zestykach należą [5]:

- a) nagrzewanie styków,
- b) zużywanie i deformowanie styków,
- c) szczepianie styków,
- d) "starzenie" materiału styków²,
- e) utlenianie.

Często rozpatrywane skutki występują jednocześnie i są ze sobą ściśle związane, co znacznie utrudnia ich ilościowe ujęcie. O tym, czy w pewnych określonych warunkach zestyk będzie pracował prawidłowo, zadecyduje wtedy nie jeden, a kilka skutków. Na przykład w czasie pracy przepustowej, najważniejszą rolę odgrywać będzie nagrzewanie, "starzenie" materiału, a czasami również i szczepianie styków, natomiast w czasie pracy łączeniowej zwykle wszystkie skutki wymienione poprzednio. Z kolei zjawiska zachodzące w zestyku podczas załączania prądu (stapianie się materiału, szczepianie i wyładowania elektryczne) powodują

² „Starzenie” materiału w pojęciu autorów odnosi się do warstwy wierzchniej styków, związane jest z oddziaływaniem procesów łukowych na zmianę struktury materiału i powoduje zmianę własności elektrycznych zestyku.

duże zróżnicowanie przebiegu odskoków oraz zmienność z prądem postaci odskoków, czasu trwania, amplitudy i liczby odskoków.

1. PARAMETRY PRACY URZĄDZEŃ ENERGOOSZCZĘDNYCH

Inteligentny budynek to obiekt budowlany, który ze względu na posiadaną infrastrukturę wskazuje cechy, które pozwalają zaliczyć go do tej grupy obiektów.

Pomimo wielu prac naukowych i rozwojowych, nie ma jednoznacznych wyznaczników, które w sposób definitywny pozwalałyby uznać budynek za inteligentny bądź nie. Na dzień dzisiejszy jest to raczej zbiór cech możliwych do osiągnięcia różnymi sposobami, które w ujęciu całościowym nadają obiektowi status „inteligentny”.

Powyższy opis pozwala na znaczny subiektywizm w ocenie poziomu „inteligencji budynku”. W związku z tym wprowadza się pewne standardy oceny budynków, takie jak certyfikacja LEED³ czy BREAM⁴ [6-8]. Należy pamiętać, że jedną z podstawowych cech inteligentnego budynku jest jego energooszczędność. Słuszne jest więc upatrywanie w charakterystyce energetycznej budynku jednej z najbardziej obiektywnych form oceny i porównania budynków.

Dla poprawy efektywności energetycznej budynków kluczowy jest system automatyki budynkowej integrujący podsystemy oraz zasoby znajdujące się w obrębie budynku. Niemniej jednak, dla uzyskania maksymalizacji zysków wynikających ze zużycia energii, należy dążyć do minimalizacji jej zużycia również na poziomie urządzeń elektrycznych, które stanowią wyposażenie inteligentnego i energooszczędnego budynku. Prace w tym zakresie były i są realizowane przez autorów [9-11]. Pośrednie wyniki tych prac skupiły uwagę autorów na zagadnieniach zjawisk łączeniowych podczas załączania urządzeń energooszczędnych łącznikami zestykowymi.

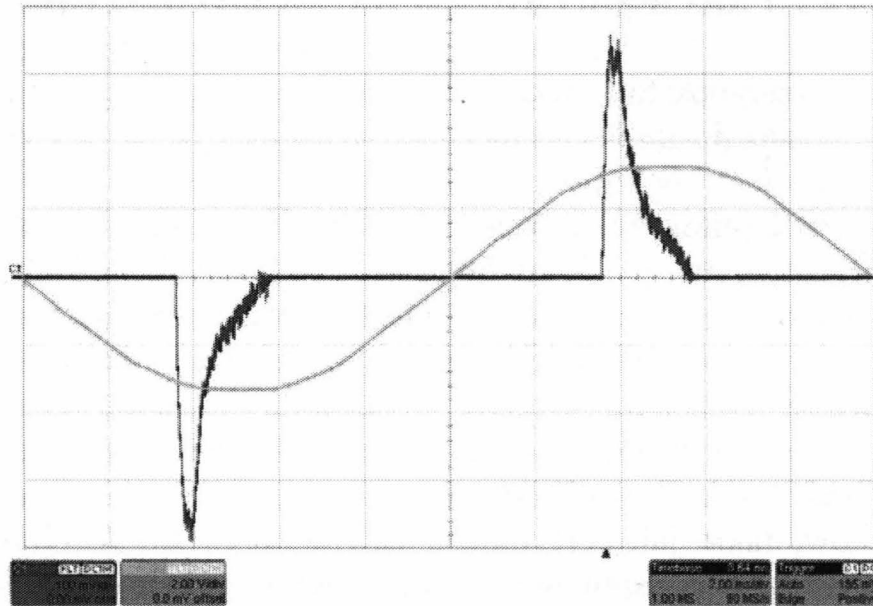
Dla zobrazowania tychże zjawisk łączeniowych, autorzy wykonali pomiary dla energooszczędnych źródeł światła, bazujących na diodach LED. Są to urządzenia nowoczesne, bardzo popularne, zdobywające coraz większe grono zwolenników, głównie ze względu na korzyści ekonomiczne, które wynikają z mniejszej mocy zainstalowanych źródeł światła. Obiektem badanym była lampa LED (LED Bulb Light, Moc: 9 W, U_N : 85-265 V; Barwa: ciepły biały, CCT: 2700-3300K).

Pomiary realizowano za pomocą oscyloskopu Lecroy waveSurfer 454. Na rys. 1 przedstawiono oscylogram z pracy lampy LED w stanie ustalonym. Na kanale 1 obserwowany jest sygnał z bocznika ($R_B = 10 \Omega$), co pozwala na

³ LEED – Leadership in Energy and Environmental Design.

⁴ BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method.

obserwację oraz analizę przebiegu prądu płynącego w obwodzie (sonda $1\div 10$). Kanał 2 to przebieg napięcia zasilającego (sonda $1\div 100$).

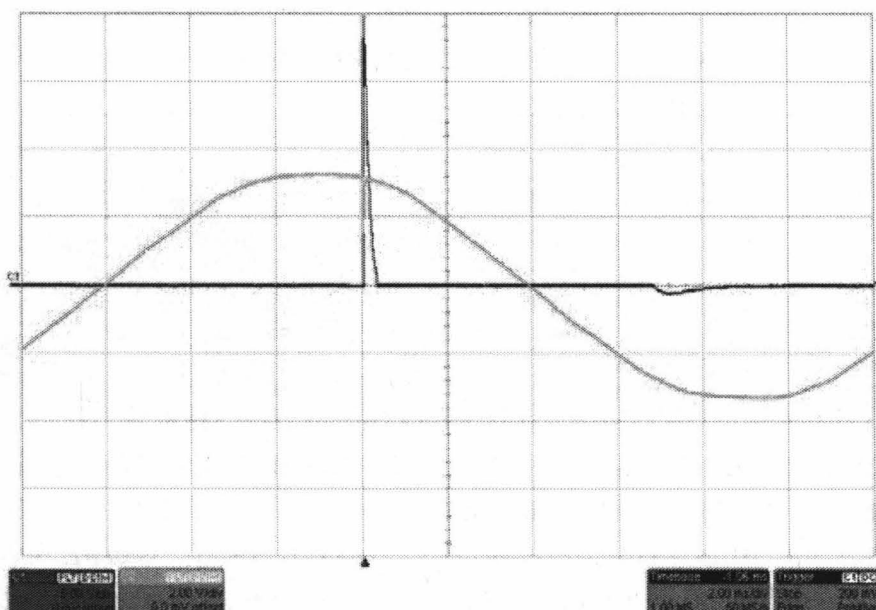


Rys. 1. Stan ustalony podczas pracy badanej lampy LED

Maksymalny spadek napięcia na boczniku wynosi 3,8 V ($380 \text{ mV} \times 10$), co odpowiada wartości natężenia prądu 380 mA. Widoczne jest również znaczne odkształcenie przebiegu prądu, który jest daleki od sinusoidalnego. Zauważalne jest również przesunięcie fazowe na poziomie 3,6 ms. Potwierdza to opisane we wprowadzeniu pierwsze dwie konsekwencje pracy tych urządzeń, czyli wpływ na jakość napięcia zasilającego oraz generację mocy biernej. Oczywiście, zgodnie z rys. 1, w stanie ustalonym przebieg napięcia zasilającego nie jest odkształcony. Wynika to ze stabilności źródła, jakim jest sieć zasilająca oraz przede wszystkim z małej mocy odbiornika. Należy jednak pamiętać, że przy wzroście liczby oraz mocy odbiorników odkształcenia mogą wpłynąć na kształt przebiegu napięcia. Występujące na oscylogramie (rys. 1) przesunięcie fazowe, widoczne jako opóźnienie 3,6 ms, oznacza współczynnik mocy ($\cos \varphi$) na poziomie 0,43, a tym samym $\text{tg } \varphi = 2,12$. Dla odbiorców indywidualnych póki co nie ma to znaczenia, ponieważ w taryfach G11 oraz G12 są oni rozliczani jedynie za energię czynną. Pobór opłat za energię bierną dla odbiorcy indywidualnego jest zawieszony. Jednak w przypadku odbiorców przemysłowych, w przypadku przekroczenia $\text{tg } \varphi > 0,4$, naliczane są dodatkowe opłaty.

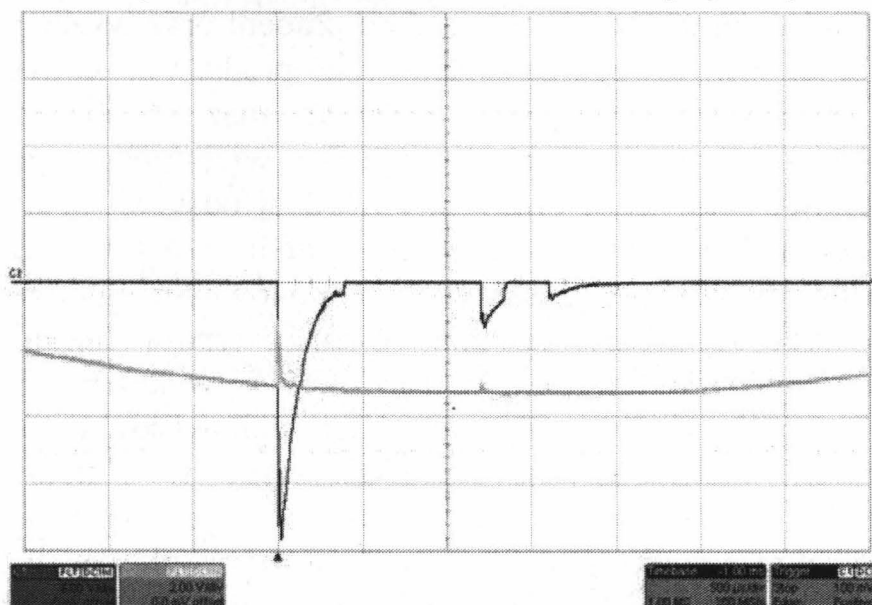
2. STAN NIEUSTALONY PRACY LAMP LED

W pracy analizowano stany nieustalone podczas załączania lampy LED. Na rys. 2 przedstawiono oscylogram z procesu załączania odbiornika. Dla zaobserwowania całego przebiegu procesu załączania była konieczna zmiana skali na kanale 1, do którego podłączony jest sygnał z bocznika. Na widocznych oscylogramach (rys. 2 i rys. 3) wynosiła ona 5 V/dz; oznacza to, że chwilowa maksymalna wartość natężenia prądu wynosiła 20 A, tym samym jest ponad 50 razy większa od wartości maksymalnej natężenia prądu w stanie ustalonym.



Rys. 2. Stan nieustalony podczas załączania badanej lampy LED

Na rys. 3 zaprezentowano oscylogram z prądem początkowym przy podstawie czasu 500 μ s/dz. Można stwierdzić, że udar prądowy trwał 400 μ s.



Rys. 3. Udar prądowy podczas załączania badanej lampy LED

3. WPŁYW UDARU PRĄDOWEGO NA ZESTYK W ŁĄCZNIKU

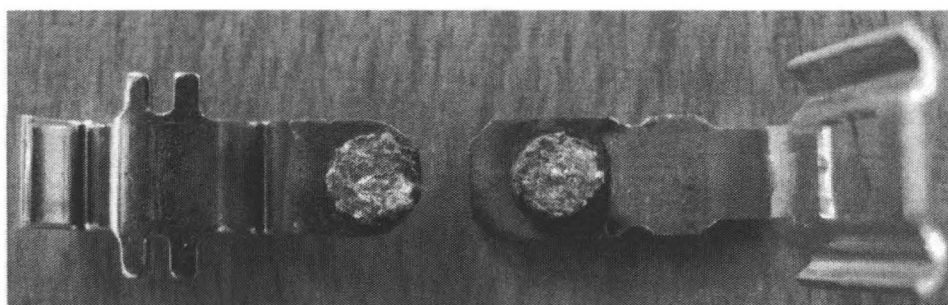
Jak wiadomo zjawisko szczepiania styków może nastąpić podczas eksploatacji łącznika w przypadku przepływu przez zestyki łącznika dużego prądu przeciążeniowego lub zwarciovowego. Ze względu na złożoność i zależność zjawisk fizycznych powodujących szczepienie styków od wielu wielkości i czynników, często o działaniu przypadkowym, ocenę odporności na szczepianie materiału stykowego przeprowadza się na podstawie wyników eksperymentalnych uzyskanych w specjalnych urządzeniach probierczych w warunkach modelowych. Mogą być wykonywane badania [5]:

- szczepiania statycznego, w zestyku zamkniętym obciążonym jedną półfalą prądu o częstotliwości 50 Hz [12],
- szczepiania dynamicznego, które odtwarzają przypadek pracy łącznika przy załączaniu dużego prądu. Są one prowadzone w warunkach występowania odskoków sprężystych styków przy zamykaniu zestyku lub przy wymuszaniu pojedynczego odskoku modelowego w zestyku zamkniętym [13].

Łączniki instalacyjne z napędem ręcznym są powszechnie stosowane w instalacjach domowych i podobnych. Obecnie można spotkać na rynku krajowym dużą różnorodność tych łączników. Wszystkie rozwiązania konstrukcyjne łączników muszą spełniać wymagania normy polskiej PN-IEC 60669-1 [14], zgodnej z normą międzynarodową IEC 669-1 [15]. Coraz częściej firmy z branży elektrotechnicznej mają problemy z ww. łącznikami, ponieważ potrafią one ulec uszkodzeniu już po miesiącu pracy. Związane jest to właśnie ze zjawiskiem odskoku elektrodynamicznego, który wielokrotnie powtarzany w końcu doprowadza do trwałego szczepienia się styków. Zjawisko to zostało zaobserwowane już przez Walczuka [16], który sklasyfikował charakterystyczne przebiegi odskoków przy obciążeniu zestyku prądem oraz wyznaczył zależność siły szczepienia od szczytowego załączeniowego prądu przy zamykaniu zestyku dla różnych materiałów stykowych. Podsumowując można powiedzieć, że podczas załączania występują udary prądowe wielokrotnie przewyższające prądy znamionowe (pkt. 2), a prądy te powodują odskoki elektrodynamiczne będące przyczyną cieplnego oddziaływania łuku elektrycznego na zestyk, których skutkiem jest szczepienie się styków po ponownym zamknięciu zestyku.

Autorzy przeprowadzili badania dwóch typów łączników jedno-biegunowych z napędem klawiszowym 10 A, 250 V, wykonanych przez dwóch producentów (A i B) w skomputeryzowanym stanowisku do badań wielkiej grupy łączników instalacyjnych, funkcjonującym w Katedrze Aparatów Elektrycznych PŁ [5]. Stanowisko to pozwala badać jednocześnie 5 łączników w warunkach określonych przez normy. Zakres głównych parametrów probierczych to: napięcie 230 V AC, prąd probierczy od 2 do 20 A, obciążenie rezystancyjne lub indukcyjne. W łącznikach styki wykonane były z materiału

AgCdO10. Badania zostały wykonane przy napięciu znamionowym 230 V, w obwodzie rezystancyjnym, przy prądzie $I = 1,2 I_N = 12$ A oraz w obwodzie indukcyjnym o $\cos \varphi = 0,3$, przy prądzie $I = 1,25 I_N = 12,5$ A. W obu przypadkach liczba cykli łączeniowych wynosiła 200. Dla każdej serii wyznaczono wartości średnie liczby i czasu trwania odskoków oraz energię elektryczną łuku w czasie odskoków. Z nielicznymi przypadkami we wszystkich łącznikach występował tylko jeden odskok, ale o różnym czasie trwania. Wyniki końcowe wykazały wyraźny wzrost wartości średnich czasu trwania odskoku. Zwiększała się przez to również wartość energii cieplnej łuku oddziałującej na styki. Na rys. 4 przedstawiono przykładową fotografię styków jednego łącznika po badaniach trwałości łączeniowej w obwodzie indukcyjnym.



Rys. 4. Przykładowa fotografia toru prądowego z stykami AgCdO10 łącznika po badaniach

Analiza badań autorów pozwala jednoznacznie stwierdzić, że podczas pracy łączeniowej w zestykach, w wyniku działania łuku, występuje proces „starzenia” materiału w warstwie wierzchniej styków, szczególnie wyraźny w stykach wykonanych z materiałów kompozytowych [5]. Proces ten objawia się zmianą własności fizykochemicznych i elektrycznych zestyku powodowanych zmianą struktury i składu chemicznego styków i najczęściej powoduje pogorszenie odporności styków na działanie szkodliwych skutków zjawisk w zestyku.

Zmiany związane ze „starzeniem” materiału styków, w szczególności wykonanych z materiałów kompozytowych na bazie srebra, zostają zapoczątkowane przez stopienie w warstwie wierzchniej styków srebra, wypełniającego kapilary szkieletu, najczęściej materiału trudnotopliwego. W zależności od wartości prądu oraz czasu trwania łuku, ilość pochłoniętej przez materiał energii, powodującej jednocześnie zmianę stanu materii tego materiału, decyduje o rozległości i głębokości obszaru stopienia srebra w szkielecie materiału trudnotopliwego oraz o temperaturze ciecży. Samo stopienie srebra jest zazwyczaj krótkotrwałe i nie powoduje jeszcze zauważalnych zmian w strukturze i składzie kompozytu. Wzrost objętości srebra w wyniku zmiany stanu skupienia jest nieznaczny i powoduje nieznaczne pogrubienie filmu srebrnego na powierzchni styku. Nie może być mowy o swobodnym wypływananiu ciekłego srebra na powierzchnię, gdyż jest ono

utrzymywane w szkielecie materiału trudnotopliwego siłami kapilarnymi. Gwałtowny wypływ na powierzchnię, a nawet erupcja kropelek srebra, występuje dopiero pod działaniem ciśnienia par srebra, po nagrzaniu stopionego srebra powyżej temperatury wrzenia [17].

Skutki tego zjawiska mogą być obserwowane, przy głębszej analizie mikroskopowej, bezpośrednio na powierzchni i w warstwie wierzchniej styku (strukturze) jako skutki płytkie lub głębokie. Ubytek srebra ze szkieletu i pozbawienie tego szkieletu chłodzenia przez srebro, powoduje jego wtórne spiekanie, połączone z kurczeniem się powodującym wzrost naprężeń rozciągających w mostkach, łączących poszczególne krystality, aż do przekroczenia wytrzymałości mostków na rozciąganie. Powstają wtedy w szkielecie pęknięcia o różnej orientacji i rozległości. Można je podzielić na [17]:

- pęknięcia szczelinowe – pionowe, prostopadłe do powierzchni styku lub skośne,
- pęknięcia warstwowe – poziome, równoległe do powierzchni styku,
- pęknięcia łuskowate – miseczkowate o ograniczonym zasięgu.

Powyższe wyniki badań łączników instalacyjnych oraz wstępne obserwacje zjawisk zachodzących podczas załączania energooszczędnych źródeł światła wskazują na konieczność rozwinięcia zagadnień degradacji styków w łącznikach instalacyjnych w wyniku współpracy z nowoczesnymi odbiornikami w budynkach inteligentnych.

4. PODSUMOWANIE

Rozwój inteligentnych technologii wymusza opracowanie systemów integrujących nowoczesne urządzenia z dotychczasową infrastrukturą techniczną. Jednymi z podstawowych elementów pełniących tę funkcję są łączniki zestykowe.

W pracy przedstawiono wyniki badań łącznika instalacyjnego podczas załączania energooszczędnych źródeł światła (lampa LED).

Uzyskane wyniki wskazują, że podczas załączania udar prądowy osiąga wartość ponad 50 razy większą od wartości znamionowej. Tak wysoka wartość prądu może być przyczyną degradacji cieplnej styków w łącznikach instalacyjnych.

Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy widzą konieczność prowadzenia szeregu prac badawczych i analitycznych dla rozwiązania kwestii poprawności pracy łączników zestykowych w instalacjach wyposażonych w nowoczesne urządzenia elektroniczne oraz energoelektroniczne.

LITERATURA

- [1] Keil A., Merl W.A., Vinarycky E.: Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York Tokyo 1984.
- [2] Féchant L.: Le contact électrique – Phenomenes physiques et materiaux, Collection SEE, Editions Hermes, Paris 1996.
- [3] Slade P. G.: Electrical Contacts: Principles and Applications. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, 1999.
- [4] Braunovic M.: Electrical Contacts: Fundamentals, applications and technology. CRC Press, 2007.
- [5] Borkowski P.: Nowoczesne metody badania zestyków elektrycznych. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2013, s. 204 (ISBN 978-83-7837-010-9).
- [6] Mao Xiaoping; Lu Huimin; Li Qiming: A Comparison Study of Mainstream Sustainable/Green Building Rating Tools in the World. Management and Service Science 2009, International Conference on. DOI: 10.1109/ICMSS.2009.5303546.
- [7] Kovacs N.O.: Regulations and certificates regarding energy efficiency in buildings. Energy (IYCE), 2013 4th International Youth Conference on. DOI: 10.1109/IYCE.2013.6604151.
- [8] Thornley V., Mullins, S.: Sustainable building, smartgrid-ready. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2011.6162625.
- [9] Pawłowski M., Borkowski P.: Electrical Energy Management System in Double Unpredictability Objects. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 2014, Nr 9, pp. 191-196.
- [10] Borkowski P., Pawłowski M.: Zasilanie energooszczędnych źródeł światła poprzez systemy zasobnikowe. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 2013, Nr 1a, ss. 21-24.
- [11] Borkowski P., Pawłowski M.: Potencjał oszczędności energii elektrycznej u odbiorcy komunalnego. Rynek Energii, Nr 1(98)/2012, ss. 101-106.
- [12] Borkowski P., Boczkowski D., Wysocki T.: Computer-controlled system for testing contacts on switching high current. Journal of the International Measurement Confederation - MEASUREMENT, Elsevier, Vol. 40/3 2007, pp. 294-299.
- [13] Borkowski P., Walczuk E.: Computerized measurement stands for testing static and dynamic electrical contact welding. Journal of the International Measurement Confederation - MEASUREMENT, Elsevier, Vol. 44/9 2011, pp. 1618-1627.
- [14] PN-IEC 60669-1:2000. Łączniki do stałych instalacji domowych i podobnych. Wymagania ogólne. 2006.
- [15] IEC 660-1. Switches for household and similarbfixed electrical instalations. Part 1: General requirements (1983, modified).
- [16] Walczuk E.: Wpływ odskoków sprężystych na szepianie się zestyków łącznika. Praca habilitacyjna. Zeszyty Naukowe PŁ, Nr 150, Z. 37, 1972.
- [17] Borkowski P.: Erozja łukowa styków łączników elektrycznych, Seria wydawnicza: Postępy Techniki Wysokich Napięć Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2013, s. 201 (ISBN 978-83-7283-520-8).

THE THERMAL DEGRADATION OF CONTACTS IN THE HOUSEHOLD SWITCHES OPERATING IN INTELLIGENT BUILDINGS

Summary

The paper presents the problem of thermal degradation of contacts that can occur in the household switches operating in intelligent buildings. During the switching on of modern electronic devices and power electronics (e.g. LED light source) current surges occur more than 50 times larger than the maximum current in the steady state. This may cause too rapid destruction of the contact surface layer, and consequently the degradation of the contacts, which in the final effect will damage the household switches.

Keywords: degradation of contacts, LED, intelligent buildings.