

Modelowanie i analiza rozptyłu temperatury w torach wielkopiędowych i zestykach

Streszczenie. Zestyki aparatów elektrycznych należą do najbardziej obciążonych elementów torów prądowych. Powinny zatem być tak zaprojektowane, wykonane i eksploatowane, aby dopuszczalne ograniczenia na ich parametry techniczne, wynikające z odpowiednich przepisów i norm, nie były przekraczane.

Abstract. Contact assemblies of electric apparatuses belong to the most burdened elements of current circuits. They should be designed, made and exploited in order to acceptable restrictions to their technical parameters, resulting from adequate rules and standards, weren't crossed. (The modelling and analysis of the temperature in current gauges and contact system).

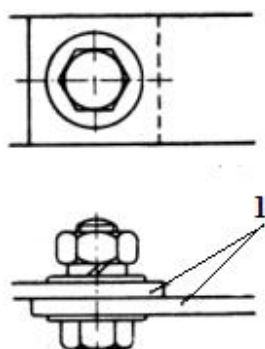
Słowa kluczowe: szynoprzewody, tory wielkopiędowe, zestyki

Keywords: current gauges, contact system, electric apparatus

doi:10.12915/pe.2014.09.46

Wprowadzenie

Wymagania stawiane wielkopiędowym torom i układom stykowym różnią się od typowych wymagań dla torów o niewielkim obciążeniu prądowym nie tylko tym, że są „ostrzejsze”, ale pojawiają się wymagania nowe wynikające z tego, że ustawicznie rośnie wielkość projektowanych urządzeń i systemów elektroenergetycznych, ich rozległość i różnorodność. W aktualnie istniejących warunkach wolnej konkurencji producenci chcący utrzymać się na rynku są zmuszeni do ciągłego: redukcji czasu rozwoju nowego wyrobu, obniżania jego ceny, podnoszenia jego walorów użytkowych, szybkiego reagowania na zmieniające się wymagania klientów oraz przystosowanie się do ulegającego ciągłym zmianom otoczenia [1]. Najskuteczniejszą drogą do sprostania takiej presji jest stosowanie różnego rodzaju technik komputerowego wspomagania prac inżynierskich, jak również opracowania odpowiednich procedur i algorytmów realizujących działania projektowe. Przedmiotem pracy są zagadnienia dotyczące przepływu ciepła, rozkładu temperatury i gęstości prądu w zestyku toru wielkopiędowego (rys.1).

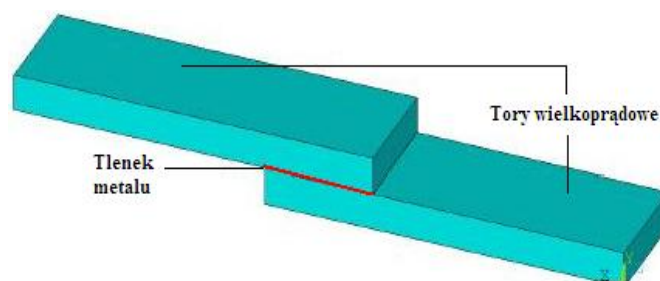


Rys. 1. Zestyk nierozłączny nieruchomy (1- styk nieruchomy)

Badanie wpływu rodzajów kształtu i materiałów na rozkład temperatury w zestykach

W warunkach normalnej pracy związanej z długotrwałym przewodzeniem prądów roboczych, prąd o natężeniu I przepływając przez zestyk wywołuje na jego rezystancji R_p stratę mocy $I^2 R_p$. Temperatura miejsca zestyku jest podwyższona w stosunku do temperatury pracy szynoprzewodu. Wartość tej temperatury jest zależna od warunków oddawania ciepła ze styków. Zależności ilościowe są wyznaczone w głównej mierze dla zestyku punktowego, dla pozostałych rodzajów zestyków stanowią informację przybliżoną. Celem pracy jest poruszenie problematyki doboru optymal-

nych parametrów zestyku, dla których transport energii odbywałby się przy jak największej sprawności. Analiza zawarta w niniejszej pracy może przyczynić się do lepszego zrozumienia zjawisk fizycznych zachodzących w przewodnikach prądu elektrycznego. Narzędziem jakie wykorzystano do analizy termiczno – elektrycznej był program ANSYS. Z pośród wielu systemów MES – ANSYS jest programem zaliczanym do wiodących. Oprogramowanie reprezentuje jeden z kilku najnowszych pakietów wykorzystania metody elementów skończonych, zawierające złożone procedury ułatwiające budowę modelu geometrycznego i umożliwiające wprowadzenie opisu kształtu z najbardziej popularnych systemów CAD. ANSYS to program wyposażony również w algorytmy automatycznej dyskretyzacji oraz rozbudowane moduły graficznej prezentacji modelu i wyników obliczeń. W programie zaimplementowano zestyk jak na rysunku 2.



Rys. 2. Zaimplementowany zestyk

W symulacji wykorzystano właściwości materiałów pokazanych w tabelach 1,2,3,4.

Tabela 1. Właściwości miedzi wykorzystane w symulacji.

Miedź		
Właściwość	Wartość	Jednostka
gęstość	8950	$\frac{kg}{m^3}$
przewodność cieplna	384	$\frac{W}{m \cdot K}$
rezystywność	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$\Omega \cdot m$
względna przenikalność magnetyczna	0,999969	-
ciepło właściwe	386	$\frac{J}{kg \cdot K}$
emisyjność	0,05	-

Tabela 2. Właściwości tlenku miedzi wykorzystane w symulacji

Tlenek miedzi		
Właściwość	Wartość	Jednostka
gęstość	6000	$\frac{kg}{m^3}$
przewodność cieplna	0,698	$\frac{W}{m \cdot K}$
rezystywność	5	$\Omega \cdot m$
względna przenikalność magnetyczna	1,002991	-
ciepło właściwe	503	$\frac{J}{kg \cdot K}$
emisyjność	0,65	-

Tabela 3. Właściwości aluminium wykorzystane w symulacji

Aluminium		
Właściwość	Wartość	Jednostka
gęstość	2700	$\frac{kg}{m^3}$
przewodność cieplna	205	$\frac{W}{m \cdot K}$
rezystywność	$2,65 \cdot 10^{-8}$	$\Omega \cdot m$
względna przenikalność magnetyczna	1,000207	-
ciepło właściwe	900	$\frac{J}{kg \cdot K}$
emisyjność	0,02	-

Tabela 4. Właściwości tlenku aluminium wykorzystane w symulacji

Tlenek aluminium		
Właściwość	Wartość	Jednostka
gęstość	3950	$\frac{kg}{m^3}$
przewodność cieplna	40	$\frac{W}{m \cdot K}$
rezystywność	10^{14}	$\Omega \cdot m$
względna przenikalność magnetyczna	0,99995	-
ciepło właściwe	775	$\frac{J}{kg \cdot K}$
emisyjność	0,2	-

Dysponując modelem przygotowanym do obliczeń, należy kolejno zadać obciążenia. Bieżąca analiza dotyczy zagadnień termicznych i elektrycznych, więc takie należy zaimplementować. Opracowanie zawiera instrukcje do poszczególnych funkcji zgodnie z rzeczywistą pracą w programie. Stąd ścieżki dostępu funkcji w języku angielskim. Z menu głównego wybrano zakładkę *Preferences* i dalej w opcjach *Thermal* oraz *Electric*. W pierwszej kolejności przypisano parametry elektryczne. Z głównego menu ANSYS'a, *Preprocessor / Loads / Define Loads / Apply / Electric / Boundary / Voltage / On Areas*, pozwala powierzchniowo przypisać potencjał elektryczny. Dodano go jako spadek napięcia na odcinku szynoprzewodu poprzez określenie wartości w woltach. Aby była możliwość wymiany energii termicznej nałożono konwekcję na górną powierzchnię toru prądowego. Implementacja obciążenia umożliwi przejście ciepła do ośrodka, w którym znajduje się szynoprzewód, *Preprocessor / Loads / Define Loads / Apply / Thermal / Convection / On Areas*. Po zaznaczeniu górnych powierzchni w oknie należy określić współczynnik wymiany ciepła *VAL1 Film Coefficient* (w układzie SI podawany w $\frac{W}{m^2 \cdot K}$), którego wartość dla powietrza przyjęto 20.

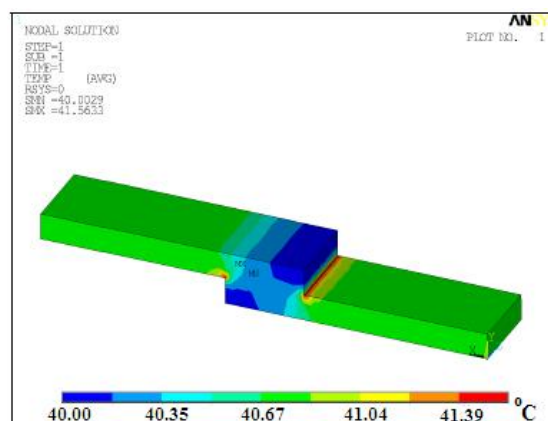
Następnie w tym samym oknie wybrano *VAL21 Bulk temperature*, wartość oznacza temperaturę ośrodka w stopniach Celsjusza. Dla wybranej analizy przyjęto 40°C.

Analizie poddano zestyk miedziany z obecnością tlenku miedzi. Na rysunku 3 pokazano parametry modelu.

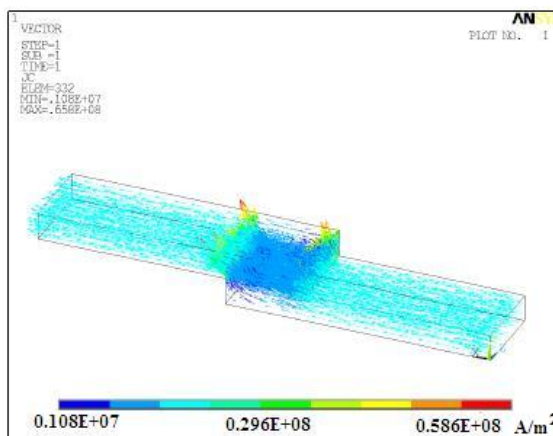
Model	Wymiary każdej z szyn			
	Długość	Szerokość	Wysokość	Powierzchnia zestyku
	1 m	0,3 m	0,1 m	0,09 m ²
Materiały				
	Miedź		Tlenek miedzi	

Rys. 3. Geometria i dane materiałowe zestyku miedzianego

Analiza została przeprowadzona zgodnie z opisanymi wcześniej założeniami. Pod wpływem przepływającego prądu, w wyniku generacji ciepła Joule'a zestyk osiągnął wyższą temperaturę od otoczenia. W miejscu warstwy nalożonej widać wyższą wartość temperatury. Rozkład gęstości prądu i temperatury pokazano na rysunku 4.



Rys. 4a. Rozkład temperatury w zestyku miedzianym

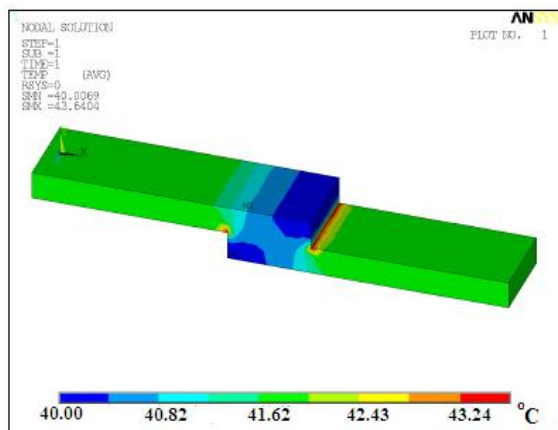


Rys. 4b. Rozkład gęstości prądu w zestyku miedzianym

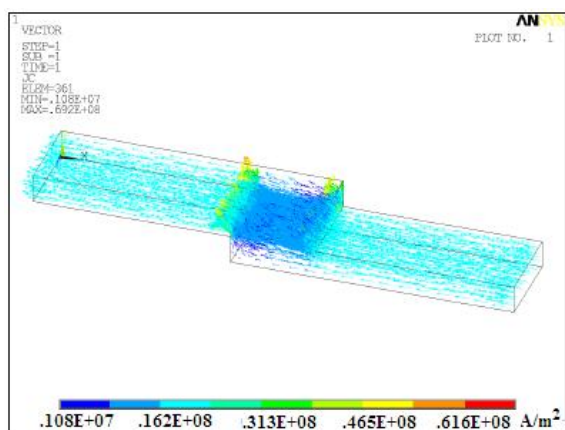
Wyniki analizy termiczno – elektrycznej dla zestyku miedzianego wykorzystano jako punkt odniesienia do dalszych badań. Model zestyku aluminiowego pokazano na rysunku 5.

Model	Wymiary każdej z szyn			
	Długość	Szerokość	Wysokość	Powierzchnia zestyku
	1 m	0,3 m	0,1 m	0,09 m ²
Materiały				
	Aluminium		Tlenek aluminium	

Rys. 5. Geometria i dane materiałowe zestyku aluminiowego



Rys. 5a. Rozkład temperatury w zestyku aluminiowym




Rys. 5b. Rozkład gęstości prądu w zestyku aluminiowym

Zestyk aluminiowy dla tych samych warunków osiągnął wyższą temperaturę. Przyczyną jest zdecydowanie wyższa rezystywność warstwy tlenku aluminium. Oczywiście nie należy zapomnieć o zdecydowanie wyższej rezystywności samego metalu w stosunku do miedzi. Na rozkładzie temperatury widać zwiększoną jej wartość nie tylko na połączeniu, ale i całym modelem. Niezmiennie obszar krawędzi zestyku jest najchłodniejszy i nie różni się od modelu miedzianego o takiej samej geometrii. Gęstość prądu wzrasta na krawędziach zestyku, co oznacza zmniejszenie obciążalności prądowej przy zachowaniu tego samego przekroju w stosunku do modelu miedzianego.

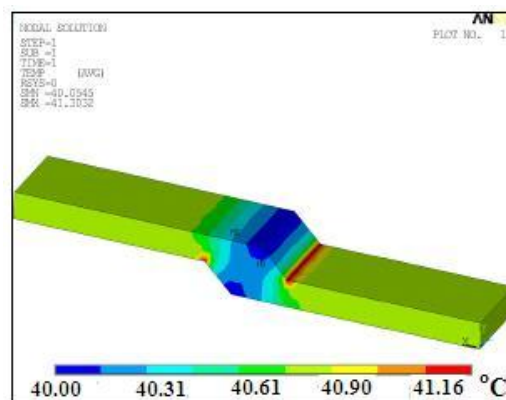
Wykonano szereg analiz dla różnych konstrukcji toru miedzianego wraz z zestykiem:

- model miedziany o wysokości szyn 0,05m,
- model miedziany o wysokości szyn 0,15m,
- model miedziany o szerokości szyn 0,45m (zmianie uległa również powierzchnia zestyku 0,135m²),
- model miedziany o szerokości szyn 0,15m (zmianie uległa również powierzchnia zestyku 0,045m²),
- model miedziany o dłuższym zachodzeniu styków (zmianie uległa powierzchnia zestyku 0,135m²),
- model miedziany o krótszym zachodzeniu styków (zmianie uległa powierzchnia zestyku 0,045m²),
- model miedziany o ściętych krawędziach zestyku,
- model miedziany o dłuższym zachodzeniu styków, szerokości szyn 0,45m i wysokości 0,05m (zmianie uległa również powierzchnia zestyku 0,045m²).

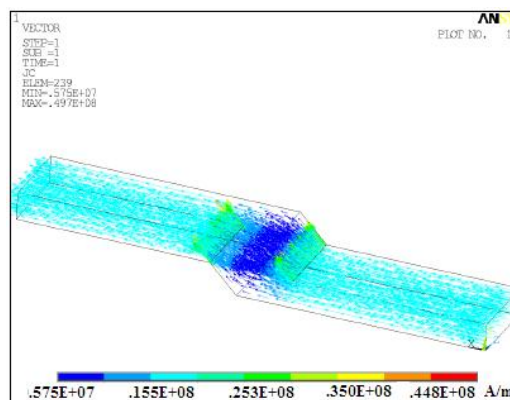
W celu zobrazowania badań przedstawiono wyniki dla modelu z zestykiem o ściętych krawędziach i zmienionej geometrii wraz ze zwiększonym zachodzeniem styków. Na rysunku 6, 6a, 6b pokazano parametry modelu i wyniki analizy.

Model	Wymiary każdej z szyn			
	Długość ^{II}	Szerokość	Wysokość	Powierzchnia zestyku
	1 m	0,3 m	0,1 m	0,09 m ²
Materiały				
Miedź			Tlenek miedzi	

Rys. 6. Geometria i dane materiałowe zestyku miedzianego ze ściętymi krawędziami




Rys. 6a. Rozkład temperatury w zestyku miedzianym ze ściętymi krawędziami



Rys. 6b. Rozkład gęstości prądu w zestyku miedzianym ze ściętymi krawędziami

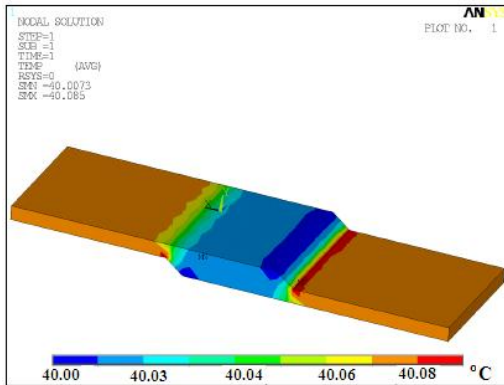
Kąt fazowania określono na 45°. Poprzez ścięcie bez zmiany innych parametrów geometrycznych powierzchnia konwekcji została dodatkowo powiększona. Usunięta geometria nie brała udziału w przepływie prądu. Skutkiem okazał się zdecydowanie lepszy przepływ ciepła. Na rysunku 7, 7a, 7b pokazano parametry modelu (podsumowującego) i wyniki analizy.

Model	Wymiary każdej z szyn			
	Długość	Szerokość	Wysokość	Powierzchnia zestyku
	1 m	↑ 0,45 m	↓ 0,05 m	↑ 0,2025 m ²
Materiały				
Miedź			Tlenek Miedzi	

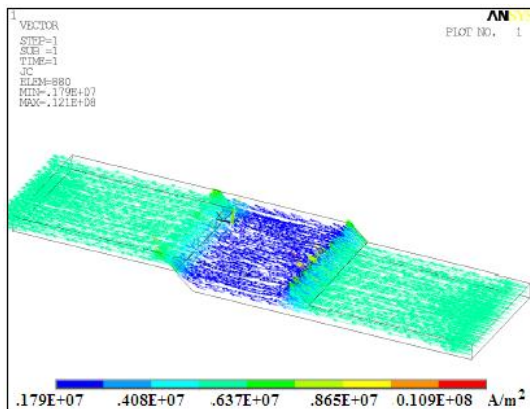
Rys. 7. Geometria i dane materiałowe zestyku miedzianego ze zwiększoną powierzchnią zestyku i ściętymi krawędziami

Model zgodnie z oczekiwaniami przedstawia najniższą temperaturę oraz najbardziej równomierny jej rozkład. Szerszy tor prądowy przyczynił się do spadku temperatury poprzez zwiększoną powierzchnię zestyku oraz konwekcję. Dłuższa zakładka styków wpłynęła na zmniejszenie rezystancji przejścia i bardziej równomierny rozptyw prądu.

Ścięcie krawędzi powiększyło dodatkowo konwekcję i wpłynęło pozytywnie na rozptył ciepła.



Rys. 7a. Rozkład temperatury w zestyku miedzianym ze zwiększoną powierzchnią zestyku i ściętymi krawędziami



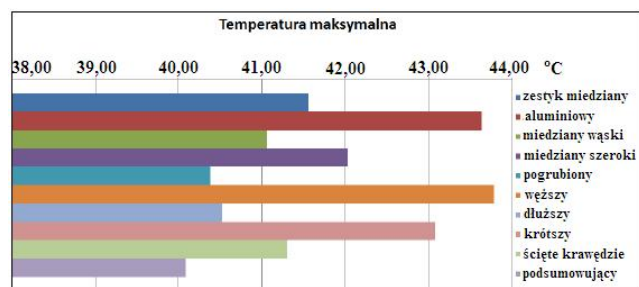
Rys. 7b. Rozkład gęstości prądu w zestyku miedzianym ze zwiększoną powierzchnią zestyku i ściętymi krawędziami

Podsumowanie

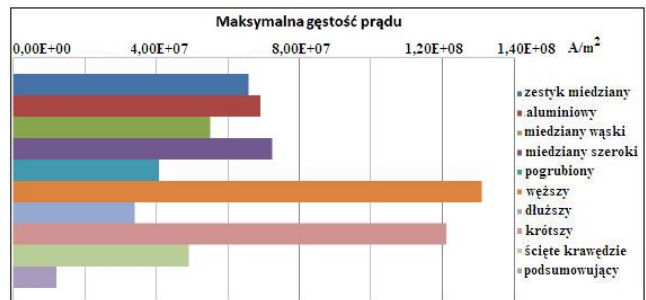
Autor przeprowadził szereg usystematyzowanych symulacji, których wyniki przedstawiono w tabeli 5 i rysunkach 8, 9, 10.

Tabela 5. Wartości liczbowe przeprowadzonych analiz

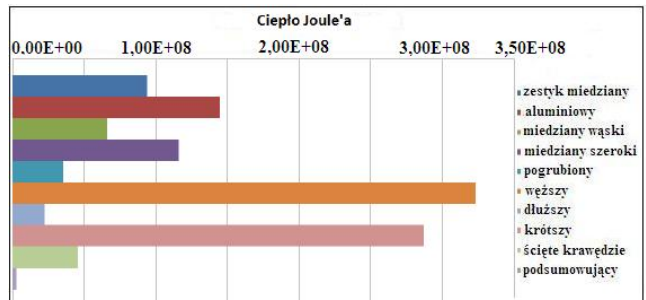
Model	Maks. temp. °C	Maks. gęstość prądu $\frac{A}{m^2}$	Ciepło Joule'a J
Referencyjny miedź	41,5633	6,58E+07	9,39E+07
Aluminiowy	43,6404	6,92E+07	1,45E+08
Miedź cieńszy	41,0569	5,50E+07	6,63E+07
Miedź grubszy	42,0280	7,24E+07	1,16E+08
Miedź szerszy	40,3768	4,07E+07	3,57E+07
Miedź węższy	43,7868	1,31E+08	3,23E+08
Miedź dłuższy zest.	40,5196	3,39E+07	2,27E+07
Miedź krótszy zest.	43,0783	1,21E+08	2,87E+08
Miedź ścięte krawędzie	41,3032	4,91E+07	4,56E+07
Podsumowujący	40,0850	1,21E+07	2,89E+06



Rys. 8. Wyniki maksymalnych temperatur zestyku



Rys. 9. Wyniki maksymalnych gęstości prądu w zestyku



Rys. 10. Wyniki maksymalnych wartości ciepła Joule'a w zestyku

Obecnie układy szynoprzewodów są coraz częściej stosowane ze względu na ich większą obciążalność oraz możliwość ponownego montażu z wykorzystaniem tych samych elementów, co znacznie obniża koszty. Z uwagi na brak szczegółowej analizy rozkładu temperatury niezbędnej przy projektowaniu torów wieloprądowych i zestyków projektanci zmuszeni są do stosowania dużych poprawek inżynierskich. W pracy przedstawiono sposób podejścia do analiz temperaturowych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi programowych. Możliwości oprogramowania pozwalają na opracowywanie wytycznych dotyczących projektowania i konstruowania torów wieloprądowych i zestyków o skomplikowanych kształtach, konfiguracjach i wykorzystanych innych niż np. miedź elektryczna materiałów. Przykładem może być typoszereg torów miedzianych na napięcie do 400V, gdzie prądy znamionowe w zakresie od 1kA do 6,3kA wynoszą: 1, 1,25, 1,6, 2,0, 2,25, 2,50, 3,0, 3,6, 4,25, 4,4, 5,3 i 6,3kA. Nasuwa się pytanie, jak należy dobrać tory wieloprądowe i zestyki w przypadkach nie sklasyfikowania w typoszergu? Przytoczona analiza umożliwi wykorzystanie modelu jako instrukcji postępowania w takich właśnie sytuacjach. Zaprezentowane wyniki są wstępem do dalszej pracy autora związanej z optymalizacją torów wieloprądowych i zestyków.

LITERATURA

- [1] W. Tarczyński, Elektrodynamika aparatów elektrycznych, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2007
- [2] Ł. Kolimas, Analiza zjawisk fizycznych zachodzących w układach stykowych podczas załączania prądów, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2008
- [3] P. Slade, Electrical contacts, Manel Dekker, inc.. New York, 1999
- [4] S. Kulas, Ł. Kolimas, Badania symulacyjne wieloprądowego układu stykowego załącznika zwarciovowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3, 2007, 137-140.

Autorzy: dr inż. Łukasz Kolimas, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: lukaszpw@o2.pl