

Obliczenia i analiza strat mocy w szynoprzewodowych torach prądowych pod kątem ich konfiguracji

Streszczenie. Artykuł przedstawia analizę i obliczanie strat mocy czynnej w torach prądowych szynoprzewodów z uwzględnieniem efektów naskórkowości i zbliżenia. Jako metodę rozwiązania problemu przyjęto metodę wyznaczania współczynnika strat dodatkowych w analizowanych torach prądowych. Rozpatrzone zostały różne konfiguracje torów prądowych, a jako podstawowe kryterium dla porównania i oceny kształtu torów prądowych szynoprzewodów, przyjęto kryterium minimalizacji strat mocy czynnej przypadające na jednostkę długości toru prądowego.

Abstract. Paper presents the analysis and calculation of active power losses in the current carrying paths of busbars considering skin and proximity effects. The way of solving the problem was determination of the coefficient of additional power losses in the analyzed current carrying paths. Different configurations of current carrying paths were taken for consideration and the basic criterion for the comparison and evaluation of the shape of current carrying busbars was the minimization of active power losses per length unit of the current carrying path. (**Calculation and analysis of busbars current carrying paths in terms of their configuration**).

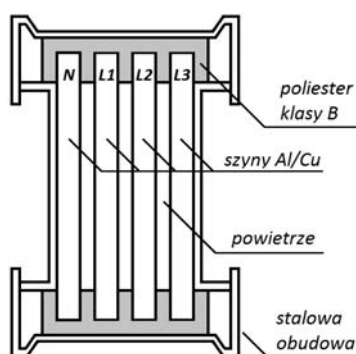
Słowa kluczowe: straty mocy czynnej, szynoprzewody, efekty naskórkowości i zbliżenia.

Keywords: active power losses, busbars, skin effect and proximity effects .

doi:10.12915/pe.2014.08.33

Wstęp

Do przesyłania dużej mocy, zwłaszcza dla przemysłowych odbiorców energii elektrycznej, celowe okazuje się stosowanie szynoprzewodów (rys. 1), które wykazują szereg zalet w stosunku do równoległych linii kablowych, między innymi przez wyższą niezawodność oraz łatwiejszą i tańszą eksploatację.



Rys.1. Szynoprzewód wentylowany

Przy przepływie prądów obciążeniowych w szynoprzewodach występują straty mocy czynnej zarówno w przewodach fazowych, jak i w istniejącej osłonie. Przy analizie zjawisk fizycznych zachodzących w tego typu torach, należy uwzględnić zjawiska naskórkowości i zbliżenia, a także prądy wirowe indukowane w osłonie. Podstawowym warunkiem niezawodnego działania szynoprzewodów jest taki dobór elementów przewodzących prąd, aby nie nagrzewały się one do nadmiernych temperatur w różnych warunkach pracy. Stąd analizuje się przebieg nagrzewania (stygnięcia) pod wpływem działania prądów roboczych, a w stanach zakłóceń przy prądach przeciążeniowych i zwarciovych [1, 2, 3, 6, 8].

W warunkach ustalonych nagrzewania prądem ciągłym I , w A, izotropowego przewodu o stałym przekroju poprzecznym i dostatecznie długim (pominięcie przepływu ciepła wzdłuż jego osi), o stałych wartościach rezystywności oraz przewodności cieplnej, straty cieplne P , w W/m, w jednorodnych torach prądowych wyznacza się ze wzoru (1) [4, 6, 9]

$$(1) \quad P = k_w I^2 \frac{\rho_{20}}{S} [1 + \alpha(\vartheta - 20)]$$

gdzie: k_w - współczynnik strat dodatkowych (naskórkowości oraz efektu zbliżenia w przypadku torów prądowych zbliżonych blisko siebie), wyrażający stopień zwiększenia rezystancji toru prądowego w zależności od kształtu jego przekroju i częstotliwości prądu, ρ_{20} - rezystywność materiału przewodu w temperaturze $[\Omega \cdot m]$, S - powierzchnia przekroju przewodu $[m^2]$, α - współczynnik temperaturowy rezystywności materiału przewodu $[1/^\circ C]$, ϑ - temperatura przewodu $[^\circ C]$.

Zjawiska naskórkowości i zbliżenia w torach prądowych powodują nierównomierny rozkład prądu w ich przekrojach i w konsekwencji nierównomierny rozkład strat mocy [11]. Rzeczywiste straty mocy przy przepływie prądu przemiennego są wyższe, niż przy przepływie prądu stałego. W wyniku nierównomiernego przepływu prądu rezystancja toru prądowego wzrasta, współczynnik naskórkowości k_w jest miarą tego wzrostu. Efekt zjawiska naskórkowości, zależy od wymiarów geometrycznych przekroju toru, jego przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej oraz częstotliwości przepływającego prądu.

Rozkład gęstości prądu w przekroju elementu przewodzącego zależy nie tylko od zjawiska naskórkowości ale również od efektu zbliżenia wywołanego wpływem zmiennych pól magnetycznych od prądów w sąsiednich torach prądowych. Efekt zbliżenia charakteryzowany przez współczynnik zbliżenia k_z jest uwzględniany w przypadku równoległego ułożenia blisko siebie torów prądowych i dotyczy pakietów szyn danej fazy jak i sąsiedztwa szyn innych faz [5, 10].

Sumaryczny współczynnik strat dodatkowych k_w , uwzględniający zarówno naskórkowość jak i efekt zbliżenia, określany jest z zależności

$$(2) \quad k_w = k_o \cdot k_z$$

Cel pracy

Przedmiotem referatu jest analiza trójfazowych nieosłoniętych torów prądowych izolowanych powietrzem. Rozpatrywane są przewody fazowe wykonane z pasków (pakietów) lub rur o przekrojach kołowych, kwadratowych, prostokątnych, zarówno pełnych jak i wydrążonych. Uwzględnia się konfiguracje, w których osie symetrii przewodów fazowych znajdują się w wierzchołkach trójkąta równobocznego lub są ułożone w jednej płaszczyźnie.

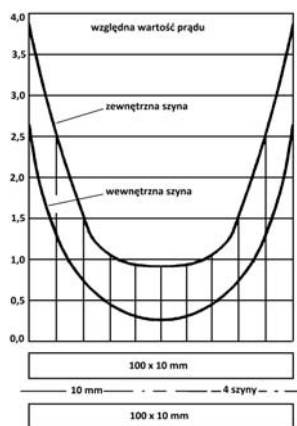
Oprócz powyższej analizy szynoprzewodów pod kątem wcześniej opisanych zjawisk, (naskórkowości i zbliżenia), pozwalającej uzyskać konkretne wartości współczynników naskórkowości i zbliżenia, została również przedstawiona analiza symulacyjna, dzięki której możliwe jest pokazanie jak powyższe współczynniki wpływają na podstawowy techniczny parametr szynoprzewodów tj. obciążalność. W analizie symulacyjnej uwzględniony został również wpływ zmian pola przekroju szynoprzewodów na obciążalność oraz na masę konstrukcji. Pozwala to na określenie pierwszego przybliżenia optymalizacji konstrukcji szynoprzewodów.

Analiza wyboru kształtu i konfiguracji torów prądowych

Konstrukcje szynoprzewodów [5] są wykonywane w postaci układów jednofazowych lub trójfazowych, przy czym poszczególne tory prądowe danych faz, składają się z pojedynczych szyn, bądź utworzone są z pakietów szyn o różnych kształtach

W oparciu o analizę teoretyczno-doświadczalną można stwierdzić, że nawet niewielkie zmiany kształtu przekroju i konfiguracji, powodują zauważalne zmiany wartości strat mocy czynnej wydzielanej w szynoprzewodach oraz zmiany ich temperatury, co w rezultacie ma istotny wpływ na zużycie materiału przewodzącego oraz gabaryty szynoprzewodów [4, 9].

Skutki działania zjawisk zarówno naskórkowości jak i zbliżenia są widoczne na rysunku 2. Przedstawiono na nim przykładowy rozkład gęstości prądu dla pakietu jednej fazy, utworzonego z 4 płaskowników miedzianych, o wymiarach 100x10 mm i o odległościach między paskami wynoszących 10 mm. Przez taki pakiet przepuszczony został prąd o ustalonej wartości. W zależności od położenia danej szyny oraz punktu na długości w którym mierzony był prąd przepływu, prąd ten miał inną wartość. Bez uwzględnienia zjawisk naskórkowości i zbliżenia oba wykresy byłyby w postaci linii prostej poziomej równym 1. Należy jednak dodać, że skutek cieplny tak zróżnicowanego rozkładu prądu w poszczególnych torach jest częściowo kompensowany przez intensywniejsze oddawanie ciepła z powierzchni zewnętrznych. Jak wynika z obliczeń teoretycznych [5, 11], już przy odstępach między szynami równym 3-krotnej ich wysokości, efekt zbliżenia można praktycznie pominąć.



Rys.2. Rozkład prądu w 4 paskowym miedzianym pakiecie toru prądowego

W tabelach 1 i 2 przedstawione zostały rezultaty obliczeń [4, 5] wartości współczynnika strat dodatkowych i wartości strat mocy w szynoprzewodach, o różnej konfiguracji i kształtach torów prądowych. Wyniki tego typu obliczeń oraz badań, odgrywają istotną rolę w projektowaniu i wyborze kształtu i konfiguracji układu szyn.

Wskazują one na kierunek poszukiwań rozwiązań konstrukcyjnych torów prądowych szynoprzewodów.

Tabela 1. Wyniki obliczeń wartości współczynnika strat dodatkowych i strat mocy w wybranych 3-fazowych układach torów prądowych

Geometria układu	Dane $I = 1000 \text{ A}$, $L = 1 \text{ m}$	Wyniki obliczeń
	$R_z = 0,0225 \text{ m}$ $D = 0,05 \text{ m}$ $S = 15,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$k_o = 1,161$ $k_z = 1,326$ $k_w = 1,54$ $R = 32,5 \cdot 10^{-6} \Omega$ $P = 32,5 \text{ W}$
	$R_z = 0,0225 \text{ m}$ $D = 0,05 \text{ m}$ $S = 15,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$k_o = 1,161$ $k_{zA,C} = 1,148, k_{zB} = 1,73$ $k_{wA,C} = 1,333, k_{wB} = 2,009$ $R_{A,C} = 28,14 \cdot 10^{-6} \Omega$ $R_B = 42,41 \cdot 10^{-6} \Omega$ $P_{A,C} = 28,14 \text{ W}$ $P_B = 42,41 \text{ W}$
	$R_z = 0,125 \text{ m}$ $R_w = 0,115 \text{ m}$ $D = 0,278 \text{ m}$ $S = 75,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$k_o = 1,029$ $k_z = 2,070$ $k_w = 2,130$ $R = 9,483 \cdot 10^{-6} \Omega$ $P = 9,483 \text{ W}$
	$R_z = 0,125 \text{ m}$ $R_w = 0,115 \text{ m}$ $D = 0,278 \text{ m}$ $S = 75,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$k_o = 1,0291$ $k_{zA,C} = 1,686, k_{zB} = 3,598$ $k_{wA,C} = 1,735, k_{wB} = 3,702$ $R_{A,C} = 7,724 \cdot 10^{-6} \Omega$ $R_B = 16,48 \cdot 10^{-6} \Omega$ $P_{A,C} = 7,724 \text{ W}$ $P_B = 16,48 \text{ W}$
	$a_z = 0,0475 \text{ m}$ $D = 0,125 \text{ m}$ $S = 22,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$k_o = 1,323$ $k_{zA,C} = 1,262, k_{zB} = 1,784$ $k_{wA,C} = 1,67, k_{wB} = 2,36$ $R_{A,C} = 24,85 \cdot 10^{-6} \Omega$ $R_B = 35,12 \cdot 10^{-6} \Omega$ $P_{A,C} = 24,85 \text{ W}$ $P_B = 35,12 \text{ W}$
	$a_z = 0,1 \text{ m}$ $a_w = 0,088 \text{ m}$ $D = 0,125 \text{ m}$ $S = 22,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$k_o = 1,031$ $k_{zA,C} = 1,306, k_{zB} = 2,020$ $k_{wA,C} = 1,346, k_{wB} = 2,086$ $R_{A,C} = 20,03 \cdot 10^{-6} \Omega$ $R_B = 31,0 \cdot 10^{-6} \Omega$ $P_{A,C} = 20,03 \text{ W}$ $P_B = 31,0 \text{ W}$

R_z – promień zewnętrzny, R_w – promień wewnętrzny, a_z – szerokość zewnętrzna, a_w – szerokość wewnętrzna, D – średnica, S – pole przekroju, L – długość,

Tabela 2. Wyniki obliczeń wartości współczynnika strat dodatkowych i strat mocy w jednofazowych prostokątnych torach prądowych

Geometria układu	Dane $I = 1000 \text{ A}$, $L = 1 \text{ m}$	Wyniki obliczeń
	$h = 0,100 \text{ m}$ $a = 0,020 \text{ m}$ $S = 20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$k_w = 1,36$ $R = 22,83 \cdot 10^{-6} \Omega$ $P = 22,83 \text{ W}$
	$h = 0,100 \text{ m}$ $a = 0,01 \text{ m}$ $S = 2 S_1 = 20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$k_w = 1,25$ $R_1 = 41,96 \cdot 10^{-6} \Omega$ $P = 2 P_1 = 20,98 \text{ W}$
	$h = 0,100 \text{ m}$ $a = 0,01 \text{ m}$ $S = 2 S_1 = 20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$k_w = 1,19$ $R_1 = 39,94 \cdot 10^{-6} \Omega$ $P = 2 P_1 = 19,97 \text{ W}$

h – wysokość, a – szerokość, S – pole przekroju, L – długość,

Przyjęta metoda wyznaczania strat dodatkowych k_w dla porównania różnych kształtów torów prądowych, wskazuje na ile zmienia się rezystancja toru prądowego przy przepływie prądu przemiennego w stosunku do prądu stałego, w wyniku istnienia efektów naskórkowości i zbliżenia.

Wybierając kształt toru prądowego szynoprzewodu, oprócz dążenia do miniaturyzacji strat mocy czynnej w samym torze prądowym, należy brać pod uwagę

skuteczność odprowadzenia ciepła z toru prądowego, co ma bezpośredni związek z jego obciążalnością prądową długotrwałą. Intensywność odprowadzenia ciepła w istotny sposób zależy od stosunku długości szczeliny pomiędzy poszczególnymi paskami do wysokości profilu szyny.

Oprócz typowych zjawisk fizycznych zachodzących wewnątrz szynoprzewodów, podczas projektowania elementu toru przewodzącego należy również uwzględnić koszt wykonania takiego elementu. Analiza optymalizacji konstrukcji może być rozpoczęta od pierwszego przybliżenia w postaci porównania możliwości obciążeniowych w stosunku do masy szynoprzewodu oraz ilości szyn w pakiecie, za którymi idzie wyznacznik kosztów wykonania elementu. Aby wyznaczyć wartości obciążalności ciągłej należy przyjąć pewne kryteria konstrukcyjne, którymi są wymiary wyznaczanego szynoprzewodu [1, 4, 6].

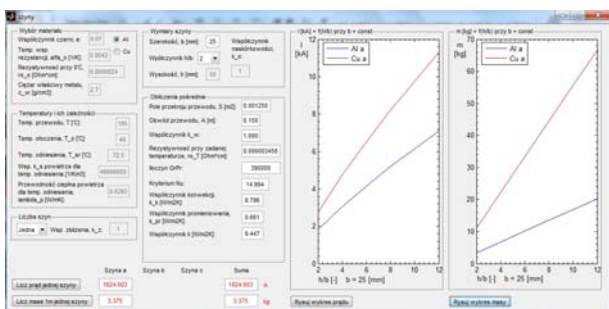
Pierwsze przybliżenie pozwala określić stopień sensowności powiększania gabarytów toru prądowego w stosunku do potrzeb obciążeniowych oraz możliwości montażowych szynoprzewodu w większym zespole przesyłowym energii.

Badania symulacyjne - pierwsze przybliżenie optymalizacji

Na podstawie wzorów analitycznych i doświadczalnych [1, 4, 6] wykonana została aplikacja komputerowa w środowisku programistyczno-obliczeniowym MATLAB umożliwiająca wyznaczenia obciążalności szynoprzewodów w określonym punkcie wartości wymiarów szynoprzewodów (rys.3). W aplikacji ograniczono się do szynoprzewodów o przekroju prostokątnym izolowanych powietrzem oraz o maksymalnej liczbie pakietu 3 szyn.

Aplikacja umożliwia również zobrazowanie w postaci wykresu zależności prądu obciążenia ciągłego pojedynczego szynoprzewodu/pakietu szyn od stosunku jego wysokości i szerokości przy stałej jego szerokości. W identyczny sposób przedstawiona jest zależność masy szynoprzewodu/pakietu szyn.

Lewy panel aplikacji odpowiada za wyznaczenie jednego punktu pracy toru prądowego. Jako że jest to pierwsze przybliżenie, zostały poczynione pewne założenia konstrukcyjne: materiał szynoprzewodu – miedź lub aluminium, temperatura przewodu i otoczenia – 105°C/40°C, punkt wyjścia wymiarów – szerokość, odległość między szynami dla pakietu 2 lub 3 szyn – szerokość jednej szyny. Po uruchomieniu obliczeń, wartości obciążalności oraz masy pojawiają się w odpowiednich polach edycyjnych.



Rys.3. Aplikacja do obliczeń szynoprzewodów

Prawy panel aplikacji odpowiada za zobrazowanie graficzne opisanych wcześniej zależności. Po uruchomieniu obliczeń, odpowiednie wykresy pojawiają na polach odczytowych. Odpowiednie wartości do obliczeń pobierane są z lewego panelu aplikacji.

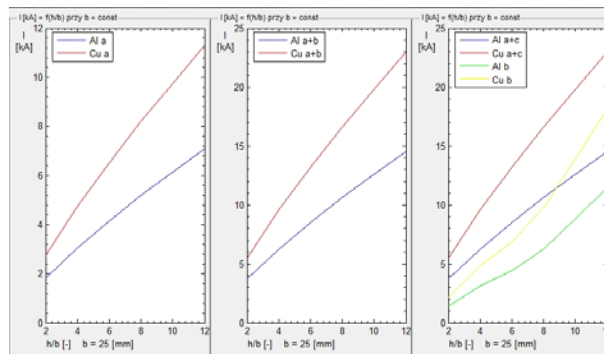
Wybór materiału

Z przedstawionych na rysunku 3 wykresów wynika, iż większą obciążalność posiada szynoprzewód wykonany z miedzy (linie górne obu wykresów) a jej wartość rośnie w szybszym tempie przy zwiększaniu wysokości szyny. Jednakże należy zwrócić uwagę na większą gęstość miedzy od aluminium, za którą idzie większa masa szyny. Nachylenie wykresu masy miedzy jest znacznie większe od nachylenia wykresu masy aluminium.

O ile sensowne jest zwiększanie pola przekroju pojedynczej szyny (zwiększenie stosunku wysokość/szerokość), o tyle przy wyborze materiału wykonania należy mieć na względzie masę całej konstrukcji oraz kosztem wykonania szyny i większą wytrzymałością konstrukcji nośnej szyny.

Wybór ilości szyn w pakiecie

Zwiększenie ilości szyn w pakiecie spowoduje oczywisty wzrost masy całej konstrukcji 2 lub 3-krotnie w omawianych przypadkach. Jednakże nie oznacza to 2 lub 3-krotnego wzrostu obciążalności pakietu szyn. Na rys. 4 przedstawione zostały wykresy obciążalności odpowiednio dla 1 szyny, pakietu 2 szyn i pakietu 3 szyn. Tabela 3 przedstawia sumaryczne zestawienie całkowitej obciążalności dla tych samych przyjętych gabarytów szyn.



Rys.4. Wykresy obciążalności

Na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych można stwierdzić iż zwiększenie liczby szyn nie zmienia charakteru wzrostu obciążalności w funkcji pola przekroju (stosunku wysokość/szerokość). Dla przypadku pakietu 3 szyn widoczna jest silnie nieproporcjonalna zależność obciążalności dla szyny środkowej. W ten właśnie sposób objawia się zjawisko zbliżenia oraz utrudnione oddawanie ciepła z tej szyny.

Tabela 3. Wyniki obliczeń wartości obciążalność i masy oraz wzrosty dla tych parametrów

Materiał	Układ szyn	Obciążalność Masa całkowita	Wzrost obciążalności Wzrost masy
Al		I = 1824.603 A m = 3.375 kg	1,000 1
		I = 3727.303 A m = 6.750 kg	2,043 2
		I = 5165.641 A m = 10.125 kg	2,831 3
Cu		I = 2764.191 A m = 11.125 kg	1,000 1
		I = 5562.699 A m = 22.250 kg	2,012 2
		I = 7709.303 A m = 33.375 kg	2,789 3

Z wyników obliczeń przedstawionych w tabeli 3 wynika iż zwiększenie ilości szyn w pakiecie dla ustalonych założeń opisanych w punkcie 4 referatu powoduje niewiele większe podniesienie obciążalności, natomiast dla przypadku 3 szyn, wartości wzrostu obciążalności jest nawet niższa od

ilości szyn. Należy również spojrzeć do zagadnienia od strony pojedynczej szyny. Zwiększenie ilości szyn dla szyn zewnętrznych umożliwia podniesienie ich obciążalności własnej, a dla szyny środkowej przy układzie 3 szyn umożliwia dalszą optymalizację układu poprzez zmniejszenie jej gabarytów (a zarazem całego układu) ze względu na mniejszy prąd w stosunku do szyn zewnętrznych.

Oczywiście są to konkretne przypadki dla określonych wcześniej założeń, zmiana stosunku wysokości do szerokości będzie miała istotny wpływ na wzrost bądź spadek obciążalności ze względu na zmianę powierzchni zbliżeń szyn do siebie.

W dalszej analizie należy uwzględnić również wpływ zmiany odległości między szynami na obciążalność całego toru prądowego.

Podsumowanie

Uwzględnianie zjawiska naskórkowości i zbliżenia podczas analizy torów wieloprądowych jest konieczne, a wykorzystanie współczynnika strat dodatkowych k_w do porównania kształtów i konfiguracji torów prądowych w projektowaniu jest użyteczne.

Straty mocy czynnej w 3-fazowych układach o konfiguracji trójkąta równobocznego są niższe od strat w układach o konfiguracji płaskiej, a tory wyodrążone charakteryzują się mniejszymi stratami mocy od torów pełnych o takich samych przekrojach poprzecznych.

Zwiększenie liczby pasków w pakiecie szyn, przy niezmiennym całkowitym przekroju poprzecznym toru oraz zachowaniu odległości między paskami, prowadzi do zmniejszenia strat mocy przypadającej na jedną szynę oraz, jak pokazują badania symulacyjne, pozwala na zwiększenie obciążalności jednej szyny w pakiecie. Należy tu mieć na uwadze określony przypadek konfiguracji toru (wysokość, szerokość) gdyż jak widać wzrost obciążalności może być nie adekwatny do poniesionych kosztów podczas użycia pakietu szyn zamiast pojedynczej szyny.

Wyniki badań symulacyjnych potwierdzają celowość rozpatrywania różnych przypadków i założeń

konstrukcyjnych zarówno pod kątem uzyskania jak najmniejszej straty mocy jak i maksymalizacji wartości prądu pracy szynoprzewodu.

Konieczne staje się opracowanie konkretnych zależności analitycznych umożliwiających uwzględnienie szeregu parametrów konstrukcyjnych a co za tym idzie opracowanie modelu kryterialnego dla wyboru odpowiednio zoptymalizowanego toru prądowego.

LITERATURA

- [1] Au A., Maksymiuk J., Pochanke Z., *Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 1982.
- [2] Braunowicz M. i in., *Electrical contacts*, CRC Press, London-New York, 2006
- [3] Ciok Z., *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 1983.
- [4] Kulas S., *Tory prądowe i układy zestykowe*, OWPW, Warszawa, 2008.
- [5] Kulas S., Analysis of heavy current busbars aim at minimization of thermal losses, *Proceedings of the International Scientific Conference "Energy Savings in Electrical Engineering"*, Warsaw 2001, pp. 78-82.
- [6] Kurek R., *Metody obliczeń obciążalności prądowej ciągłej przewodów szynowych*, Praca magisterska, Politechnika Warszawska, 1987
- [7] Maksymiuk J., *Aparaty elektryczne*, WNT, Warszawa, 1992.
- [8] Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa, 2008.
- [9] Nawrowski R., *Tory prądowe izolowane powietrzem lub SF6*, WPP, Poznań, 1998.
- [10] Piątek P., *Modelowanie linii, kabli i torów wieloprądowych*, WPCz., Częstochowa, 2007.
- [11] Silvester P., A. C. resistance and reactance of isolated rectangular conductors. *IEEE, Trans. Power Apparatuses* 1967, nr 6.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Stanisław Jan Kulas, E-mail: skulas@wat.edu.pl; mgr inż. Robert Berczyński, E-mail: rberczynski@wat.edu.pl, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa