

Eksperymentalny dobór układu chłodzenia do bezszczotkowej prądnicy synchronicznej reluktancyjnej

Experimental selection of cooling system of brushless reluctance synchronous generator

Marcin Pepliński

Akademia Morska w Gdyni, 81-225 Gdynia, ul. Morska 81-87, e-mail: marcinpe@atol.am.gdynia.pl

Słowa kluczowe: prądnica synchroniczna, ciepło, chłodzenie

Abstrakt

Celem artykułu jest doświadczalny dobór układu chłodzenia do bezszczotkowej prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi i dowzbudzeniem elektromagnetycznym, która została zaprojektowana i wykonana w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni. Zaprojektowano, zbudowano i zbadano trzy układy chłodzenia: z radiatorem aluminiowym i chłodzeniem naturalnym, z radiatorem aluminiowym i z jednym wentylatorem zewnętrznym, oraz układ chłodzenia z radiatorem aluminiowym i z dwoma wentylatorami zewnętrznymi przeciwobnymi. Do prób cieplnych wykorzystano czujniki termoparowe, które umieszczono w poszczególnych częściach maszyny. Uzyskane w sposób doświadczalny wyniki stanowią podstawę do doboru odpowiedniego dla tego rodzaju prądnicy układu chłodzenia.

Key words: synchronous generator, heating, cooling system

Abstract

This paper deals with experimental selection of a cooling system of a brushless synchronous generator with permanent magnets and an additional excitation, designed and built in Department of Ship Electrical Power Engineering in Gdynia Maritime University. Three cooling system were tested: with an aluminium radiator and natural cooling with the aluminium radiator and an external fan and the aluminium radiator and two external fans. Results of thermal tests are presented for a machine with built-in thermocouples. The selection of cooling system for the investigated machine is based on the experimental results.

Wstęp

Jednym z problemów pojawiających się przy użytkowaniu maszyn elektrycznych jest odprowadzanie ciepła, powstającego w wyniku strat mocy w poszczególnych ich częściach.

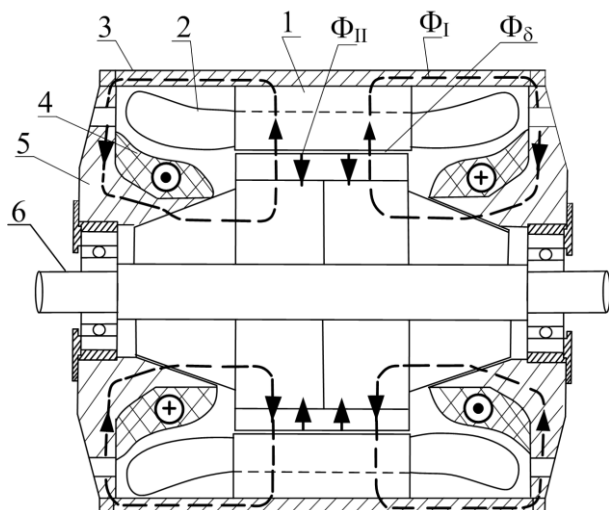
Ze względu na to, że maszyna elektryczna z punktu widzenia jej właściwości cieplnych stanowi skomplikowany układ, to występujący wewnątrz niej rozkład temperatur jest nierównomierny [1, 2].

Poznanie właściwości cieplnych maszyny jest bardzo istotne w szczególności w przypadku konstrukcji prototypowych. Umożliwia to w fazie projektowania wybór odpowiedniego układu chłodzenia, którego zadaniem będzie skuteczne odprowa-

dzanie ciepła, pozwalające na pracę ciągłą maszyny w warunkach eksploatacyjnych.

W artykule przedstawiono eksperymentalną analizę możliwych rozwiązań układów odprowadzania ciepła przeznaczonych dla prototypowego modelu bezszczotkowej prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi i dowzbudzeniem elektromagnetycznym, która została zbudowana w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni pod kierownictwem dr inż. J. Wróblewskiego [3].

Na rysunku 1 zamieszczono przekrój rozpatrywanej prądnicy oraz przedstawiono drogi strumienia magnetycznego, na podstawie których wyjaśniono zasadę jej działania.



Rys. 1. Budowa fizycznego modelu prądnicy synchronicznej reluktancyjnej: 1 – blachowany twornik [3, 4], 2 – uzwojenie twornika, 3 – tuleja stalowa, 4 – cewka dowzbudzenia, 5 – pokrywa boczna prądnicy, 6 – wał, Φ_{δ} – strumień w szczelinie przytwornikowej Φ_I – strumień dowzbudzenia elektromagnetycznego, Φ_{II} – strumień od magnesów trwałych

Fig. 1. The model of the reluctance synchronous generator: 1 – stator core, 2 – stator windings, 3 – steel casing, 4 – electromagnetic coils, 5 – end cap, 6 – shaft, Φ_{δ} – flux in the air gap, Φ_I – electromagnetic excitation, Φ_{II} – permanent magnet excitation

W wirniku tej prądnicy są odpowiednio usytuowane i spolaryzowane magnesy trwałe, tworzące jej strukturę wielobiegunową. Natomiast na pokrywach bocznych, stanowiących jednocześnie tarczę łożyskową prądnicy, znajdują się cewki przeciwsobnie połączone, tworzące obwód dowzbudzenia elektromagnetycznego.

Strumień w szczelinie Φ_{δ} jest w przybliżeniu równy [3]:

$$\Phi_{\delta} = \Phi_I + \Phi_{II} \quad (1)$$

gdzie:

Φ_I – jest amplitudą składowej zmiennej strumienia magnetycznego od nieruchomego uzwojenia wzbudzenia dwuczęściowej magniesnicy umieszczonej w stojanie,

Φ_{II} – amplituda strumienia magnetycznego od magnesów trwałych znajdujących się w wirniku.

Strumień Φ_I dowzbudzenia elektromagnetycznego prądnicy jest regulowany wartością prądu stałego, przepływającego przez nieruchome uzwojenie wzbudzenia. Wytworzony przez nie strumień zamyka się poprzez pokrywy boczne, tuleję stalową (rys. 1) oraz blachy magnetyczne stojana. Należy podkreślić, że ze względu na duży opór magnetyczny powietrza strumień wytworzony przez uzwojenia wzbudzenia stojana wnika do wirnika

głównie przez bieguny magnetyczne z pominięciem luk międzybiegunowych. Dzięki temu nieruchome uzwojenie wzbudzenia, przez które przepływa prąd stały może wytwarzać wirujące pole magnetyczne. Dane rozwiązanie konstrukcyjne prądnicy jest chronione patentami [3, 4].

Stanowisko pomiarowe

W celu zbadania właściwości cieplnych prądnicy wykonano fizyczny model maszyny. Do pomiaru rozkładu temperatur wykorzystano czujniki termoparowe, które zostały umieszczone w poszczególnych częściach maszyny zgodnie z rysunkiem 2. Czujniki te wykonano z drutów o grubości 0,2 mm, dzięki czemu charakteryzują się małymi wymiarami i nie zakłócają rozkładu temperatury w punkcie pomiarowym. Badana prądnica jest napędzana silnikiem indukcyjnym typu PKM o mocy 6 kW zasilanym z układu falownika napięcia.

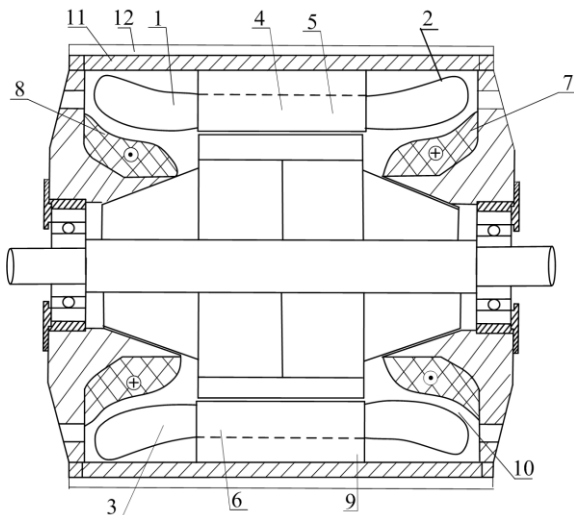
W skład stanowiska do pomiaru temperatur wszedł także przetwornik pomiarowy dla zastosowanego typu termopar, którego zadaniem jest wzmocnienie badanego sygnału i zamiana sygnału wyjściowego na standardowy w torze 4–20 mA. Ponadto użyty przetwornik umożliwił kompensację nieliniowości charakterystyki oraz temperatury zimnych końcówek termopar. Do pomiaru sygnału wyjściowego z termopar posłużył multimetr cyfrowy klasy dokładności 0,2.

Schemat rozmieszczenia termopar w badanym modelu prądnicy oraz schemat stanowiska pomiarowego służącego do przeprowadzenia prób cieplnych dla stanu ustalonego pokazano na rysunkach 2, 3. Planowane dane znamionowe badanej maszyny zestawiono w tabeli 1. W obecnej wersji prądnica może pracować z mocą $S = 3,5$ kVA przy $\cos\Phi = 0,89$ ind. Przewidywana jest modyfikacja modelu prądnicy umożliwiająca osiągnięcie planowanych parametrów znamionowych, to jest mocy $S = 3,5$ kVA i $\cos\Phi = 0,8$ ind.

Tabela 1. Dane znamionowe planowane badanej bezszczotkowej prądnicy synchronicznej

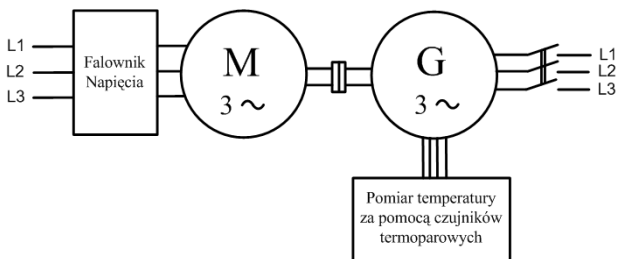
Table 1. Designed ratings of the tested brushless synchronous generator

Napięcie znamionowe [V] / Rated voltage [V]	230/400
Prąd znamionowy twornika [A] / Rated stator current [A]	5,07
Moc [kVA] / Rated power [kVA]	3,5
Prędkość obrotowa [obr/min] / Rated speed	1500
Współczynnik mocy / Rated power factor	0,8 ind.
Liczba faz / Number of phase	3



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia termopar w bezsztukowej prądnicie z magnesami trwałymi i dowzbudzeniem elektromagnetycznym: 1, 2, 3 – w czołach uzwojeń stojana; 4, 5, 6 – w uzwojeniu twornika w części żłbkowej; 7, 8 – w cewce dowzbudzenia elektromagnetycznego; 9 – żelazo stojana; 10 – powietrze wewnątrz prądnicy; 11, 12 – na obudowie i w radiatorze aluminiowym

Fig. 2. The thermocouples location in the investigated brushless reluctance generator with permanent magnets and electromagnetic excitation: 1, 2, 3 – stator end windings; 4, 5, 6 – slot windings; 7, 8 – electromagnetic excitation circuit; 9 – stator core; 10 – air inside the machine; 11, 12 – casing and aluminium radiator



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania rozkładu temperatur dla stanu ustalonego: M – silnik indukcyjny 3-fazowy, G – badana prądnicą synchroniczna

Fig. 3. Diagram of the experimental stand for measurement of temperature rise distribution: M – 3-phase induction motor, G – tested synchronous generator

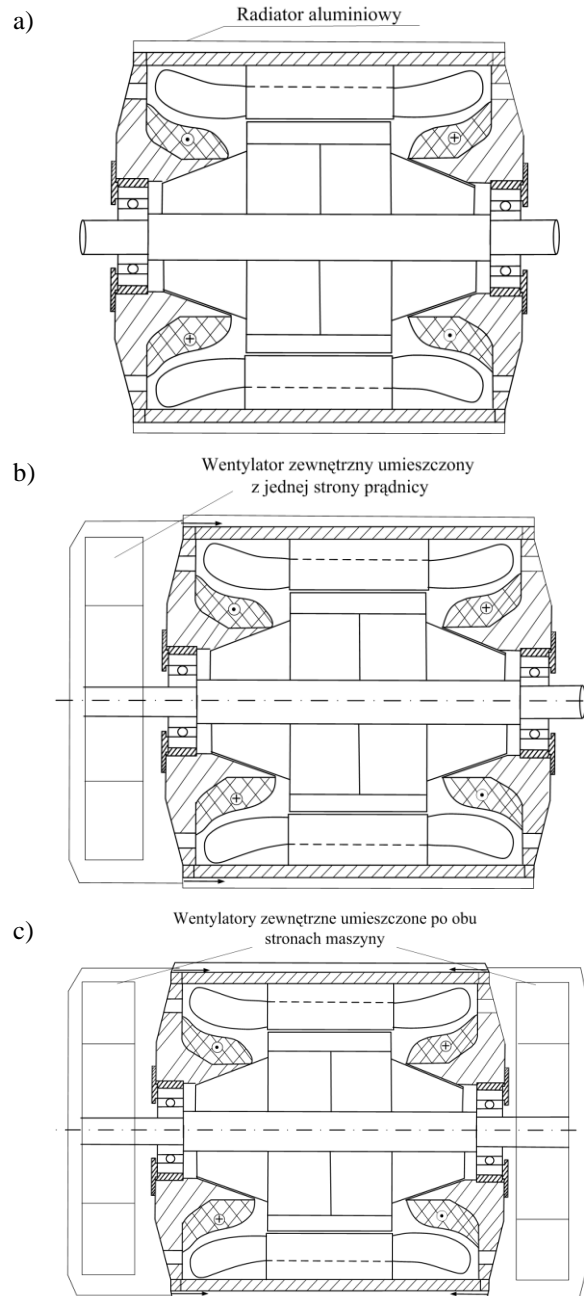
Rozwiązania konstrukcyjne zastosowanych układów chłodzenia dla badanego modelu prądnicy

Ze względu na specyficzną budowę prądnicy nie istnieje możliwość umieszczenia w jej wnętrzu wentylatorów wymuszających przepływ powietrza chłodzącego ani stworzenia osiowych kanałów pomiędzy blachami czynnymi a obudową. W związku z tym zostały przeanalizowane następujące układy chłodzenia maszyny:

a) z chłodzeniem naturalnym i radiatorze aluminiowym mocowanym na zewnętrznej powierzchni obudowy stalowej prądnicy;

b) z radiatorze aluminiowym mocowanym na zewnętrznej powierzchni obudowy stalowej prądnicy i z jednym wentylatorem zewnętrznym;

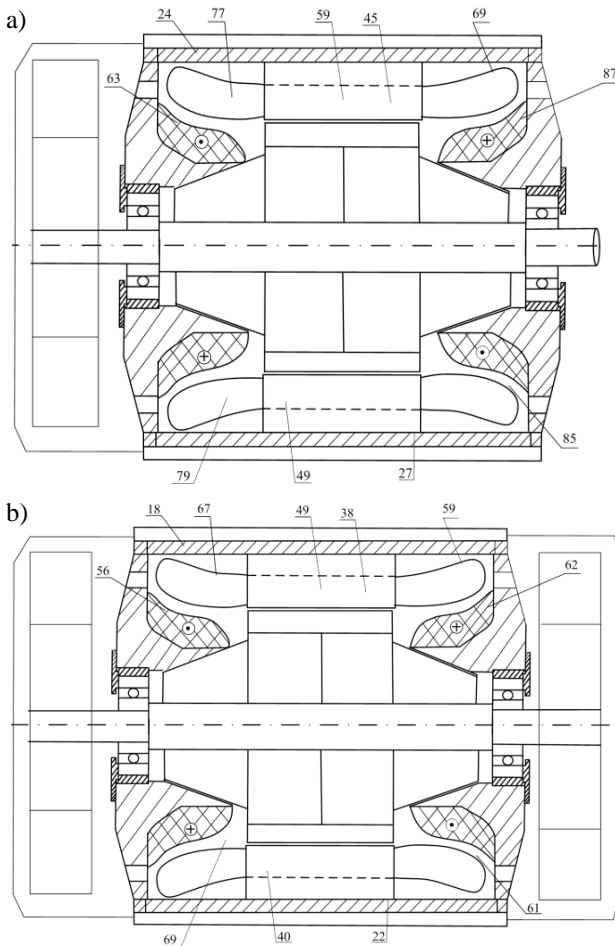
c) z radiatorze aluminiowym, jak w punkcie a) i b) i z dwoma wentylatorami zewnętrznymi umieszczonymi po obu stronach maszyny.



Rys. 4. Rozwiązania konstrukcyjne zastosowanych układów chłodzenia w maszynie: a) układ chłodzenia z radiatorze aluminiowym i chłodzeniem naturalnym, b) układ chłodzenia z radiatorze aluminiowym i z jednym wentylatorem zewnętrznym, c) układ chłodzenia z radiatorze aluminiowym i z dwoma wentylatorami zewnętrznymi przeciwnymi

Fig. 4. Cooling system applied in the machine: a) the cooling system with an aluminium radiator, b) the cooling system with the aluminium radiator and one side fan, c) the cooling system with the aluminium radiator and two fans

Na rysunkach 4b i 4c pokazano za pomocą strzałek kierunek przepływu powietrza na wyjściu z wentylatorów. Rozkład temperatur dla poszczególnych sposobów chłodzenia w stanie równowagi cieplnej wyznaczono w sposób doświadczalny dla następujących parametrów: moc czynna $P = 2,8$ kW, prąd twornika $I = 5,07$ A, $\cos\Phi = 0,89$ ind. Próby cieplne dla obu sposobów chłodzenia zostały wykonane w tych samych warunkach atmosferycznych, to jest w tym samym ciśnieniu i temperaturze otoczenia. Otrzymane wartości przyrostów temperatury zostały przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Rozkłady przyrostów temperatur w stanie ustalonym uzyskane dla obciążenia znamionowego: a) rozkład przyrostów temperatur uzyskany w układzie z radiatorem i jednym wentylatorem zewnętrznym, b) rozkład przyrostów temperatur uzyskany w układzie z radiatorem i dwoma wentylatorami zewnętrznymi

Fig. 5. The measured temperature rise distribution for the reference test: a) the measured temperature rise distribution for the cooling system with the radiator and one side fan, b) the measured temperature rise distribution for the cooling system with the radiator and two side fan

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że uzyskane przyrosty temperatur przy wykorzystaniu dwóch wentylatorów są znacznie niższe niż przyrosty temperatur, jakie występują

w układzie chłodzenia z jednym wentylatorem zewnętrznym. Dla czoł uzwojeń wartości przyrostów temperatury są średnio niższe o 10°C , uzwojeń stojana w żłobku o 8°C , cewki dowzbudzenia (strona nienapędowa) o 7°C , cewki dowzbudzenia strony napędowej o 25°C i żelaza stojana o 5°C . Badania cieplne dla stanu równowagi cieplnej zostały przeprowadzone na modelu z jednym rodzajem magnesy trwałej typu SmCo (samar-kobalt). Prądnica podczas przeprowadzonej próby cieplnej nie została zbadana przy znamionowym współczynniku mocy, ze względu na konstrukcję zastosowanej do jej budowy cewki dowzbudzenia. Dopuszczalna wartość prądu wynikającego z przyjętego do jej budowy drutu nawojowego podczas badania wynosiła $I = 2,0$ A. Dla zmodyfikowanej wersji prototypu po poprawieniu budowy cewki dowzbudzenia planuje się osiągnięcie obliczeniowych parametrów znamionowych maszyny, to jest $S = 3,5$ kVA przy $\cos\Phi = 0,8$ ind. Spowoduje to wzrost strat mocy w maszynie i dodatkowe jej nagrzewanie. W związku z tym najbardziej odpowiednim układem chłodzenia dla tego modelu będzie układ z dwoma wentylatorami, w którym to uzyskane przyrosty temperatur w próbie cieplnej są znacznie niższe od dopuszczalnych wynikających z klasy izolacji zastosowanej do budowy prądnicy. W przypadku chłodzenia z jednym wentylatorem zewnętrznym uzyskane przyrosty temperatur w cewkach dowzbudzenia stanowią granicę dopuszczalnych przyrostów temperatur w stosunku do klasy B izolacji zastosowanej do budowy prądnicy w wersji badanej. W układzie chłodzenia przy wykorzystaniu jedynie radiatorów aluminiowych mocowanych do zewnętrznej powierzchni prądnicy o wymiarach żeber, jak w poprzednich układach chłodzenia, nie udało się przeprowadzić do końca próby dla stanu równowagi cieplnej ze względu na przegrzewanie się uzwojeń.

Wnioski

1. Celem przedstawionego artykułu jest analiza właściwości cieplnych bezszczotkowej prądnicy synchronicznej, której modele zostały zaprojektowane i wykonane w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni. Analiza ta miała na celu dobór odpowiedniego dla tej prądnicy układu chłodzenia. Skuteczność tego układu została sprawdzona w sposób doświadczalny.
2. Zaprojektowano, zbudowano i sprawdzono trzy układy chłodzenia prądnicy, tj. z chłodzeniem naturalnym i radiatorem aluminiowym mocowa-

nym do zewnętrznej powierzchni tulei stalowej, z radiatorem aluminiowym i wentylatorem zewnętrznym umieszczonym po jednej stronie maszyny, oraz z radiatorem aluminiowym i dwoma wentylatorami przeciwsobnymi umieszczonymi po obu stronach prądnicy. Dokonano doświadczalnego wyznaczenia rozkładu temperatur w stanie równowagi cieplnej.

3. Na podstawie uzyskanych rozkładów temperatur można stwierdzić, że układ chłodzenia przy wykorzystaniu dwóch wentylatorów przeciwsobnych jest najbardziej korzystny i daje najniższe przyrosty temperatur w stanie badanego obciążenia w stosunku do pozostałych przedstawionych powyżej układów chłodzenia. Po modyfikacji konstrukcji prototypu prądnicy może on stanowić najlepszy układ chłodzenia dla tej maszyny umożliwiając uzyskanie jej parametrów znamionowych. Przeprowadzone próby cieplne mają charakter wstępnych badań, a dalsze prace będą kontynuowane w odniesieniu do kolejnych modeli budowanych przy użyciu różnych typów magneśnic i cewek dowzbudzenia.
4. Uzyskane w sposób doświadczalny przyrosty temperatur mogą stanowić w przyszłości podstawę do dalszych prac związanych z opracowaniem modelu cieplnego tej prądnicy dla kolejnych jej modeli powstających w Katedrze Elektroenergetyki Akademii Morskiej w Gdyni.
5. Dalszą poprawę skuteczności chłodzenia można uzyskać poprzez zastosowanie w miejsce badanych wentylatorów promieniowych, wentylatorów osiowych posiadających większą sprawność i wydatek powietrza.

Bibliografia

1. PEŁCZEWSKI W.: Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych. PWT, Warszawa 1956.
2. MUKOSIEJ J., ZAPAŚNIK R.: Badania cieplne i wentylacyjne maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1964.
3. WRÓBLEWSKI J., SWARCEWICZ K.: Bezszytkowa reluktancyjna prądnica synchroniczna. Patent nr P332435 Warszawa 16.12.2004.
4. WRÓBLEWSKI J., SWARCEWICZ K.: Bezszytkowa maszyna synchroniczna. Patent nr P332434 Warszawa 16.12.2004.

Pozostałe pozycje

5. JEZERSKI E.: Maszyny synchroniczne. PWT, Warszawa 1951.
6. DUBICKI B.: Maszyny elektryczne tom I i III. PWT, Warszawa 1965.
7. LATEK W.: Badania maszyn elektrycznych w przemyśle. WNT, Warszawa 1964.
8. NAKAHAMA T., BISWAS D., KAWANO K., ISHIBASHI F.: Improved cooling performance of large motors using fans. IEEE Transactions on Conversion, 2006, vol. 21, No 2.
9. Farschtschi Temperature calculation in electrical machines. ETEP, 1992, vol. 2, No 3.
10. WRÓBLEWSKI J.: Wybrane badania eksperymentalne dwóch sposobów magnesowania elektromagnetycznego w bezszytkowej prądnicy synchronicznej reluktancyjnej z magnesami trwałymi. Zeszyty Naukowe AM, Gdynia 2003.
11. WRÓBLEWSKI J.: Conception of artificial deepening of reluctance by permanent magnets in reluctance generators. Archives of Electrical Engineering vol. LIII, No 4, 429–447.

Recenzent:
dr hab. inż. Cezary Behrendt
profesor Akademii Morskiej w Szczecinie