

## WYZNACZANIE PARAMETRÓW TURBOGENERATORA Z SYMULACJI POŁOWO-OBWODOWYCH\*\*

### STRESZCZENIE

Przedstawiono dwuwymiarowy, polowo-obwodowy model turbogeneratora o mocy 500 MVA przeznaczony do wyznaczania charakterystyk dynamicznych turbogeneratora. Przydatność modelu zbadano przez zastosowanie go do wyznaczenia parametrów (reaktancji i stałych czasowych) maszyny. Wykonano obliczenia dla różnych metod wyznaczania reaktancji synchronicznych, przejściowych i podprzejściowych. Sprawdzone metodę małego poślizgu, symetrycznego zwarcia trójfazowego i odbudowy napięcia po zwarcu. Ze względu na długie czasy ustalania się przebiegów turbogeneratora rozważono dopuszczalność zwiększenia kroku czasowego symulacji stanów przejściowych i wyznaczenia parametrów przed uzyskaniem stanu ustalonego.

**Słowa kluczowe:** maszyny synchroniczne, turbogeneratory, modelowanie polowo-obwodowe, parametry elektromagnetyczne

### IDENTIFICATION OF THE TURBOGENERATOR PARAMETERS BY THE FIELD-CIRCUIT SIMULATIONS

A paper presents two-dimensional field-circuit model of 500 MVA turbogenerator. Model is designed to calculate static and dynamic characteristics of machine. The model was applied to calculate basic parameters (reactances and time constants) of machine. The computations was executed for different methods of calculating synchronous, transient and subtransient reactances. There was checked low slip method, sudden short circuit and voltage recovery after sudden short circuit. Transients of current (Figs 3, 5, 8) and voltage (Fig. 9), received by these methods, show that transient parts haven't disappear yet. For example: voltage recovery after sudden short circuit started at 0.3 nominal voltage. Owing to big time constants; possibilities of increase the time step and stop the computation before transient disappear was considered.

**Keywords:** synchronous machine, turbogenerator, field-circuit modelling, electromagnetic parameters

### 1. WSTĘP

Symulacja polowo-obwodowa maszyn synchronicznych może być sposobem pozyskania wzorców diagnostycznych dla monitorowania pracy tych maszyn. Jest również przydatna do identyfikacji parametrów. Dwuwymiarowe modelowanie stanów przejściowych maszyn małych i średnich mocy [1, 5, 6], zweryfikowane eksperymentalnie, wykazało taką przydatność. Modelowanie stanów awaryjnych byłoby jednak szczególnie przydatne dla maszyn synchronicznych największych mocy, czyli turbogeneratorów. W tym przypadku możliwa byłaby ocena dynamicznych właściwości maszyny już na etapie jej projektowania. Maszyna synchroniczna wielkiej mocy charakteryzuje się dużym momentem bezwładności i dużymi stałymi czasowymi. Symulacja polowo-obwodowa procesów przejściowych takiego obiektu jest procesem długotrwałym. I tak obliczenia numeryczne (metodą FEM) symetrycznego zwarcia trójfazowego turbogeneratorsa o mocy 500 MVA z następującą po nim odbudową napięcia o łącznym czasie trwania 23 s, za pomocą modelu polowego o 80 tysiącach węzłów, wykonane komputerem klasy PC 3 GHz, trwają około 340 godzin. Skrócenie czasu obliczeń jest możliwe przez zwiększenie kroku czasowego obliczeń lub zredukowanie modelu do powtarzalnego fragmentu maszyny.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie możliwości wyznaczenia parametrów turbogeneratorsa z symulacji polowo-ob-

wodowych. Modele polowo-obwodowe umożliwiają symulację różnych stanów pracy maszyny, a więc również prób stosowanych do wyznaczania parametrów maszyn synchronicznych [4]. Wybrane próby zamodelowano przy pomocy pakietu Flux 9.2.2 [2], wyznaczono przebiegi prądów i napięć maszyny w stanach nieustalonych i obliczono podstawowe parametry elektromagnetyczne.

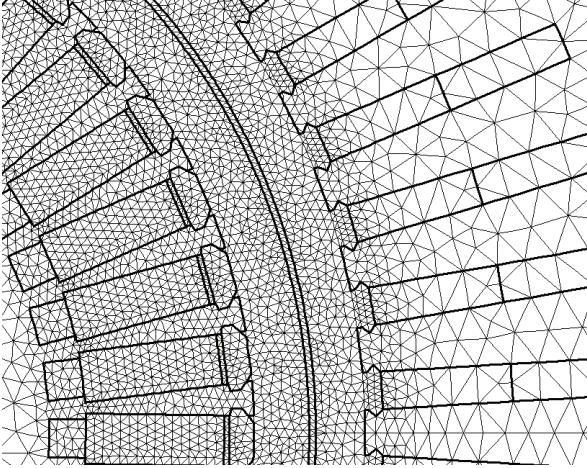
### 2. MODEL POŁOWO-OBWODOWY

Dwuwymiarowy polowo-obwodowy model turbogeneratorsa o mocy 500 MVA i napięciu znamionowym 21 kV sporządzono przy pomocy pakietu Flux 9.2.2. Siatka dyskretyzacyjna modelu zbudowana jest z 41 544 elementów powierzchniowych drugiego rzędu i zawiera 83 197 węzłów. Fragment siatki modelu przedstawiono na rysunku 1.

Model polowy uwzględnia nieliniowe charakterystyki magnesowania elementów obwodu magnetycznego oraz prądy wirowe indukujące się w klinach żłobków wirnika. W szczelinie powietrznej znajduje się pasmo elementów odkształcalnych, którego siatka jest generowana w trakcie obliczeń, stosownie do aktualnego położenia wirnika wirującego z zadaną, stałą prędkością kątową. Model obwodowy, poza elementami reprezentującymi uzwojenia i lite przewody modelu polowego, zawiera źródła oraz rezystancje i reaktancje czołowych części uzwojeń o stałych wartościach.

\* Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

\*\* Artykuł uzyskał pozytywne recenzje i był prezentowany podczas Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2006 w Krakowie

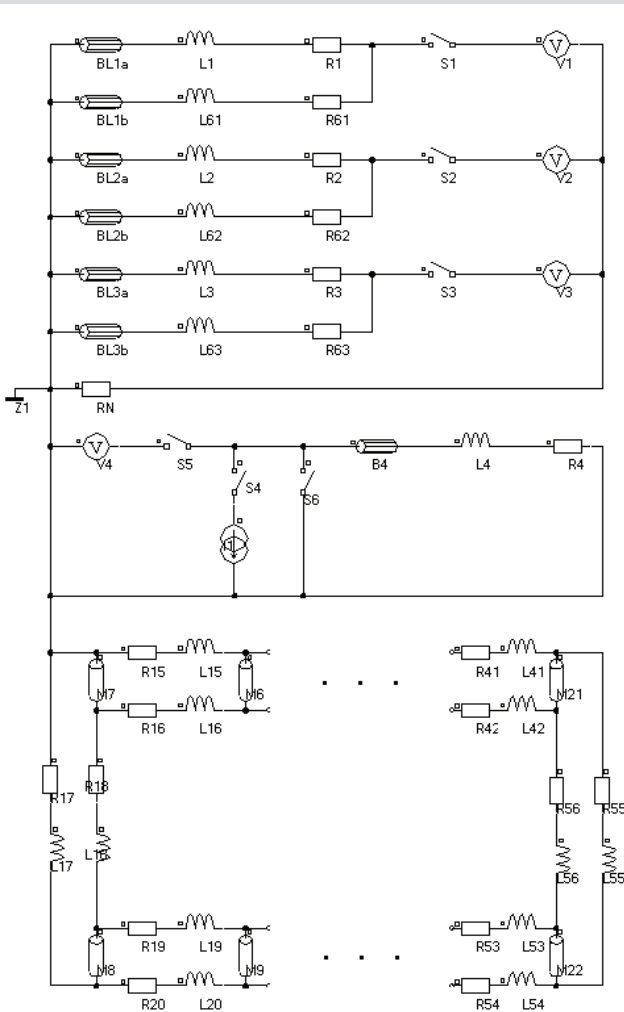


Rys. 1. Fragment siatki dyskretyzacyjnej

Fig. 1. Part of discretization mesh

Parametry części czołowych wyznaczono z wzorów stosowanych w projektowaniu maszyn synchronicznych [3, 7].

Część obwodową modelu, zawierającą obwody stojana, wzbudzenia oraz klatkę tłumiącą przedstawiono na rysunku 2.



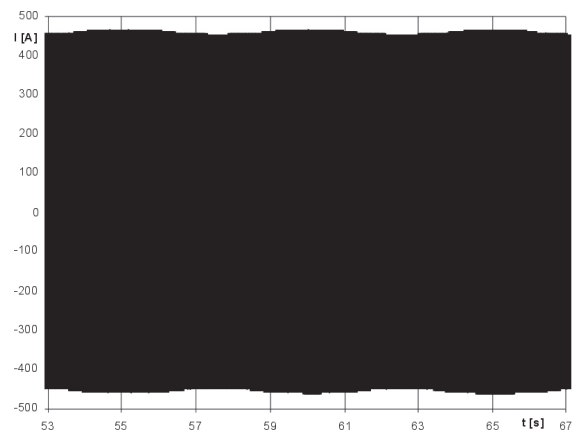
Rys. 2. Część obwodowa modelu maszyny

Fig. 2. Circuit of the machine

### 3. WYNIKI SYMULACJI

#### 3.1. Próba małego poślizgu

Reaktancje synchroniczne w osiach  $d$  i  $q$  wyznaczono metodą małego poślizgu. Stojan maszyny jest zasilany obniżonym do  $0,1 U_n$  napięciem trójfazowym, obwód wzbudzenia jest otwarty, a wirnik wiruje z prędkością zbliżoną do synchronicznej, co powoduje okresowe zmiany amplitud prądów płynących w poszczególnych fazach. Okres tych zmian jest zależny od wartości poślizgu. W symulacji założono wartość poślizgu  $s = 0,002$ . Przebieg prądu w jednej z faz przedstawiono na rysunku 3. Odskształcenia przebiegu prądu wynikają z oddziaływania klatki wirnika i obniżają dokładność wyznaczenia reaktancji.



Rys. 3. Prąd stojana podczas pracy z małym poślizgiem

Fig. 3. The stator current during operation with small slip

Z tego przebiegu wyznaczono maksymalną i minimalną wartość skuteczną prądu. Reaktancję synchroniczną połączoną  $X_d$  obliczono z zależności

$$X_d = \sqrt{\left(\frac{U}{I_{\min}}\right)^2 - R^2} \quad (1)$$

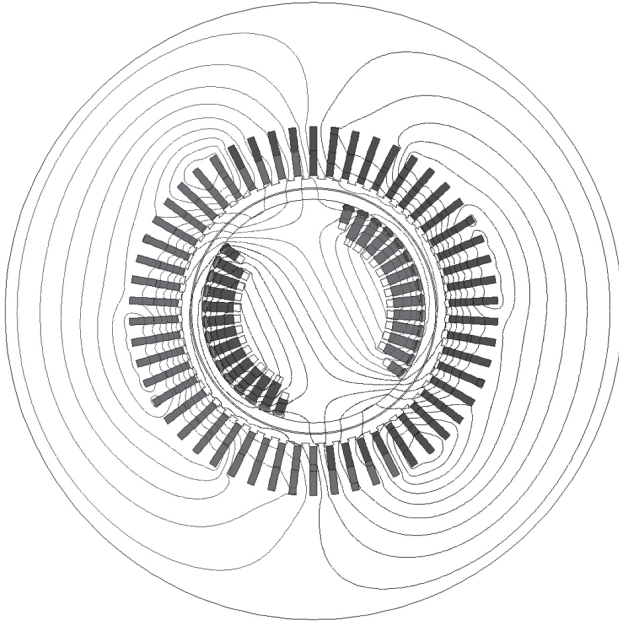
natomiast reaktancję poprzeczną ze wzoru

$$X_q = \sqrt{\left(\frac{U}{I_{\max}}\right)^2 - R^2} \quad (2)$$

#### 3.2. Próba zwarcia symetrycznego

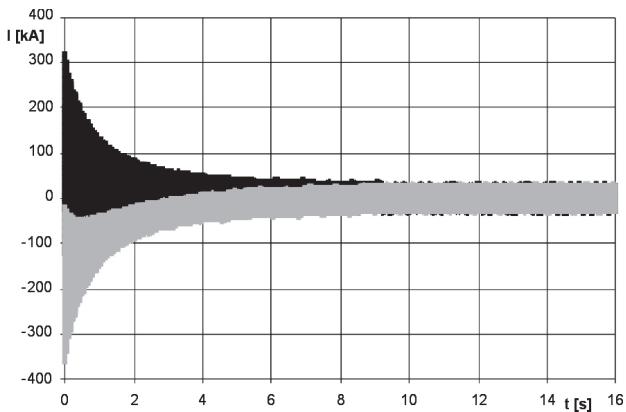
Parametry stanów przejściowych wyznaczono na podstawie analizy przebiegów prądów podczas próby udarowego, trójfazowego zwarcia symetrycznego oraz próby odbudowy napięcia po ustąpieniu zwarcia. Obliczenia wykonano przy prądzie wzbudzenia równym znamionowemu w chwili zwarcia. Tak więc wyznaczone wartości parametrów odnoszą się do maszyny nasyconej.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład linii pola magnetycznego oraz gęstości prądów w uzwojeniach i prętach klatki tłumiącej w czasie trwania zwarcia symetrycznego.



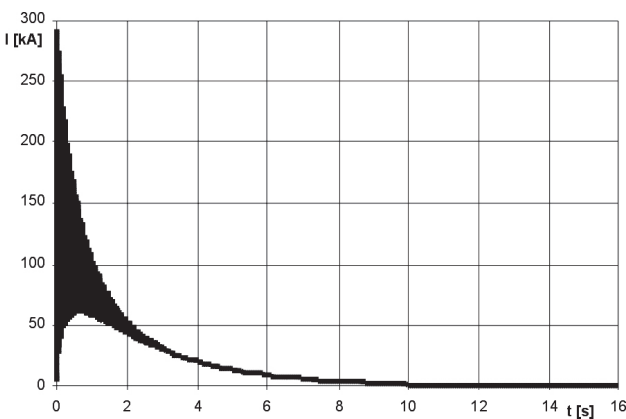
Rys. 4. Rozkład pola magnetycznego oraz gęstości prądów w stanie zwarcia udarowego

Fig. 4. Flux pattern and current density at sudden short circuit



Rys. 5. Prądy fazowe podczas zwarcia udarowego

Fig. 5. Phase currents for the sudden short circuit

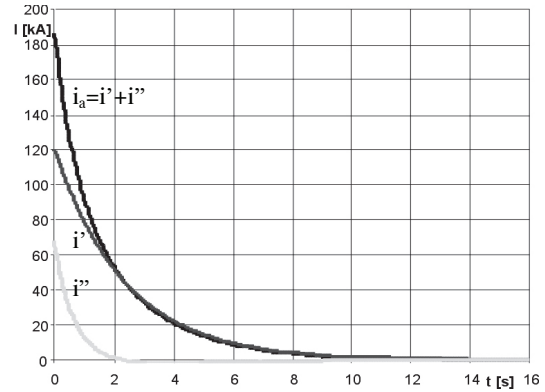


Rys. 6. Składowe nieustalone w prądzie fazowym

Fig. 6. Transient component in phase current

Przebiegi prądów fazowych stojana pokazano na rysunku 5.

Po odjęciu składowej ustalonej od każdego z prądów fazowych otrzymano przebiegi składające się ze składowej aperiodycznej oraz zanikającej składowej okresowo-zmiennej o częstotliwości  $2f = 100$  Hz. Uzyskany w ten sposób przebieg dla jednej z faz przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 7. Składowa przejściowa i podprzejściowa w prądzie stojana

Fig. 7. Transient and subtransient component of stator current

Eliminując zanikającą składową okresowozmienną uzyskano przebieg  $i_a = i' + i''$  przedstawiony na rysunku 7.

Na podstawie krzywych przedstawionych na rysunku 7 wyznaczono wartości  $T'_d$ ,  $T''_d$ , a także początkowe wartości  $i'$  oraz  $i''$ . Wynikająca stąd podprzejściowa reaktancja podłużna opisana jest zależnością

$$X''_d = \frac{U(0^-)}{I(0)} \quad (3)$$

gdzie:

$U(0^-)$  – wartość napięcia stojana przed zwarcie,

$I(0)$  – początkowy prąd zwarcia.

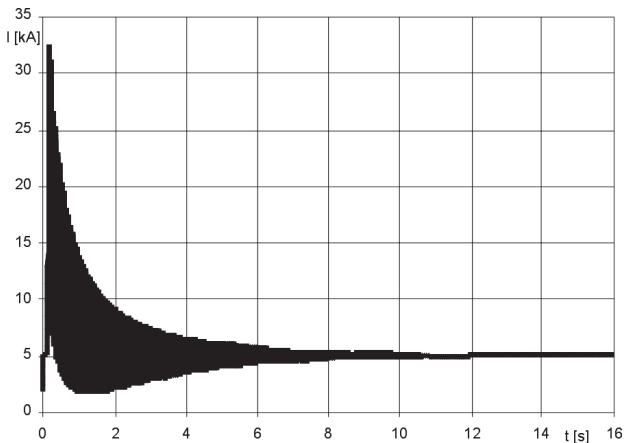
Natomiast przejściowa reaktancja podłużna opisana jest wzorem

$$X'_d = \frac{U(0^-)}{I(0) - I''(0)} \quad (4)$$

W czasie udarowego zwarcia w uzwojeniu wirnika indukuje się napięcie o dwóch składowych:

- 1) aperiodycznej, związanej ze składową okresowozmienną w uzwojeniu stojana;
- 2) okresowozmiennej o częstotliwości  $f = 50$  Hz wywołanej składową aperiodyczną w uzwojeniu stojana.

Uzyskany z obliczeń przebieg prądu wzbudzenia podczas zwarcia symetrycznego przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Przebieg prądu wirnika podczas udarowego zwarcia

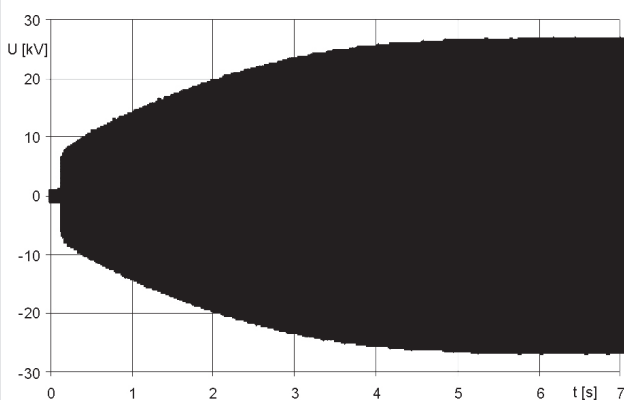
Fig. 8. Transient of rotor current for the sudden short circuit

### 3.3. Próba odbudowy napięcia po zwarcia

Parametry stanów przejściowych i stałe czasowe można również wyznaczyć na podstawie próby odbudowy napięcia po ustąpieniu udarowego zwarcia. Symulację takiego stanu wykonano jako kontynuację omówionego wcześniej zwarcia symetrycznego. Stanowiący podstawę analizy przebieg napięcia fazowego w czasie odbudowy napięcia wyraża się zależnością

$$V(t) = \frac{U}{X_d} \left[ X_d - (X_d - X'_d) e^{\frac{-t}{T'_d}} - (X'_d - X''_d) e^{\frac{-t}{T''_d}} \right] \sin(\omega t + \delta) \quad (5)$$

Uzyskany z obliczeń symulacyjnych przebieg odbudowy napięcia fazowego po ustąpieniu zwarcia symetrycznego przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Przebieg napięcia stojana podczas próby odbudowy napięcia

Fig. 9. Transient of stator voltage for the voltage recovery

### 3.4. Wyniki obliczeń

Otrzymane z omówionych wcześniej prób wyniki obliczeń reaktancji synchronicznych, reaktancji stanów przejściowych i odpowiadających im stałych czasowych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Obliczone parametry maszyny

Table 1

Calculated parameters of the machine

|                                       |         |                |
|---------------------------------------|---------|----------------|
| Reaktancja podłużna                   | $X_d$   | 1,898 $\Omega$ |
| Reaktancja poprzeczna                 | $X_q$   | 1,847 $\Omega$ |
| Przejściowa reaktancja podłużna       | $X'_d$  | 0,231 $\Omega$ |
| Podprzejściowa reaktancja podłużna    | $X''_d$ | 0,159 $\Omega$ |
| Przejściowa stała czasowa podłużna    | $T'_d$  | 2,379 s        |
| Podprzejściowa stała czasowa podłużna | $T''_d$ | 0,620 s        |

## 4. WNIOSKI

Opisane próby wyznaczenia podstawowych parametrów turbogeneratorsa z obliczeń symulacyjnych przy użyciu modelu połowo-obwodowego wykazały, że jest to metoda skuteczna, ale czasochłonna. Dla uzyskania zadawalających wyników konieczna jest weryfikacja modelu dostępnymi pomiarowymi charakterystykami statycznymi (bieg jałowy, zwarcie, krzywe V).

Dokładność metody małego poślizgu zależy od przyjętej wartości poślizgu, kroku czasowego i czasu trwania symulacji. Mała wartość poślizgu eliminuje oddziaływanie klatki, ale wydłuża czas symulacji.

Dokładność wyznaczenia parametrów z symulacji zwarcia symetrycznego lub odbudowy napięcia również zależy od czasu symulacji. Dla uzyskania zadowalającej dokładności, obliczenia należy prowadzić do czasu całkowitego zaniku składowych przejściowych.

Przyjęty w obliczeniach krok czasowy 1 ms pozwalał wykryć odkształcenia prądów i dlatego można uznać go za dopuszczalny.

## Literatura

- [1] Amaya M., Costa A., Palacios J., Cadavid W.: *Identification of the synchronous machine parameters by the simulation of time domain tests using finite-elements method*. Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International, Vol. 1, 1-4 June 2003, vol. 1, 456-460
- [2] CEDRAT, FLUX® 9.20 *User's guide*. November 2005
- [3] Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Warszawa, WNT 1994
- [4] Latek W.: *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle*. Warszawa, WNT 1987
- [5] Martin J.P., Tindall C.E., Morrow D.J.: *Synchronous machine parameter determination using the sudden short-circuit axis currents*. Energy Conversion, IEEE Transactions, Vol. 14, Issue 3, Sept. 1999, 454-459
- [6] Ramirez C., Tu Xuan M., Simond J.-J., Schafer D., Stephan C.-E.: *Synchronous machines parameters determination using finite elements method*. ICEM 2000, 28-30 August 2000, Espoo, Finland, 1130-1133

[7] Turowski J.: *Obliczenia elektromagnetyczne maszyn i urządzeń elektrycznych*. Warszawa, WNT 1982

Wpłynęło: 26.09.2006



Piotr KISIELEWSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w roku 2005, uzyskując stopień magistra. Obecnie jest doktorantem w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Pracował w zespole realizującym projekt badawczy *Nowa generacja interfejsów statków do przewożenia płynnych gazów naturalnych VI* Programu Ramowego Unii Europejskiej. Aktualnie zajmuje się polowo-obwodowym modelowaniem turbogenerатора o mocy 500 MW, gdyż analiza dynamicznych stanów pracy takiej maszyny jest przedmiotem jego otwartego w 2006 roku przewodu doktorskiego.

e-mail: piotr.kisielewski@pwr.wroc.pl



Ludwik ANTAL

Stopnie magistra, doktora i doktora habilitowanego uzyskał odpowiednio w latach 1970, 1976 i 2000 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Od roku 1970 jest pracownikiem Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. W latach 1970–1971 pracował również w ZWME „Dolmel” we Wrocławiu w charakterze starszego konstruktora. Głównym nurtem jego pracy badawczej jest zastosowanie polowo-obwodowych modeli maszyn prądu przemiennego do analizy pracy i projektowania maszyn. Badane takimi metodami maszyny to generatory synchroniczne z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia, dwubiegowe silniki synchroniczne i silniki indukcyjne. Nagrodzone nagrodą Prezesa Rady Ministrów dwubiegowe silniki synchroniczne dużej mocy, stanowiące oryginalną konstrukcję i będące przedmiotem szczególnie intensywnych badań, zostały wdrożone do eksploatacji w kopalniach węgla i miedzi jako ekonomiczny napęd wentylatorów głównego przewietrzania.

e-mail: ludwik.antal@pwr.wroc.pl