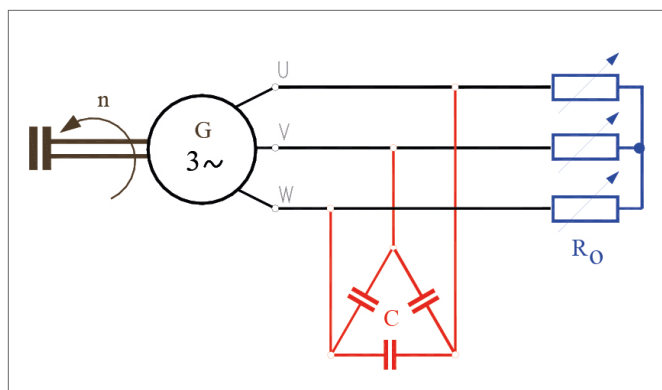


# Modelowanie samowzbudnych prądnic indukcyjnych

Roman Miksiewicz

## 1. Wstęp

Jako indukcyjne generatory wiatrowe stosowane są zarówno maszyny klatkowe, jak i pierścieniowe. Szczególnie dla elektrowni wiatrowych mniejszych mocy stosowane są częściej maszyny indukcyjne klatkowe, głównie ze względu na większą niezawodność tych maszyn mimo gorszych ich właściwości regulacyjnych. Wymagają one jednak zastosowania kondensatorów do ich wzbudzenia (rys. 1) oraz musi wystąpić magnetyzm szczątkowy. Przy pracy autonomicznej częstotliwość napięcia zależy od prędkości obrotowej oraz od obciążenia, co stanowi istotną wadę indukcyjnych generatorów klatkowych. Aby zapewnić stałą częstotliwość, stosuje się dodatkowe urządzenia energoelektroniczne z przetwarzaniem, np. AC-DC-AC. Wiele publikacji [1–5, 7–8] omawia zagadnienia związane z właściwościami generatorów indukcyjnych przy pracy autonomicznej oraz przy współpracy z siecią.



Rys. 1. Schemat połączeń prądnicy indukcyjnej przy pracy autonomicznej

## 2. Model obwodowy

Schemat zastępczy modelu obwodowego przedstawiono na rys. 2. Model obwodowy uwzględnia nieliniowość obwodu magnetycznego w postaci reaktancji magnesującej  $X_m$ , która jest zależna od prądu magnesującego  $I_m$ . Schemat ten nie uwzględnia strat w żelazie. Dla rozważanej maszyny indukcyjnej parametry schematu zastępczego wyznaczono przy pomocy RMXprt programu Maxwell.

Dane silnika indukcyjnego: moc znamionowa 7,5 kW; napięcie znamionowe 380 V, prędkość znamionowa 965 obr/min, układ połączeń – trójkąt. Na podstawie obliczeń obwodowych wyznaczono charakterystykę  $X_m(I_m)$  oraz obliczono wartości pozostałych parametrów schematu zastępczego, które wynoszą:

$$R_s = 1,215; X_{os} = 2,72; R'_r = 2,29; X'_{or} = 4,42$$

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono modele obliczeniowe prądnicy indukcyjnej samowzbudnej. Model obwodowy, uwzględniający nieliniowość obwodu magnetycznego, umożliwia obliczenia charakterystyk statycznych prądnicy przy pracy autonomicznej. Model polowo-obwodowy, wykorzystujący program Maxwell 2D, pozwala na wyznaczenie przebiegów czasowych dowolnych wielkości elektrycznych w różnych stanach pracy prądnicy. Przedstawiono podstawowe charakterystyki statyczne wyznaczone wg obydwóch modeli oraz przebiegi czasowe prądów, napięć, momentu podczas procesu samowzbudzenia i przy obciążeniu, przy współpracy z układem prostownikowym oraz podczas włączenia prądnicy wzbudzonej i niewzbudzonej do sieci.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, prądnica indukcyjna samowzbudna, modelowanie polowe i obwodowe

## 🇬🇧 MODELLING OF SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS

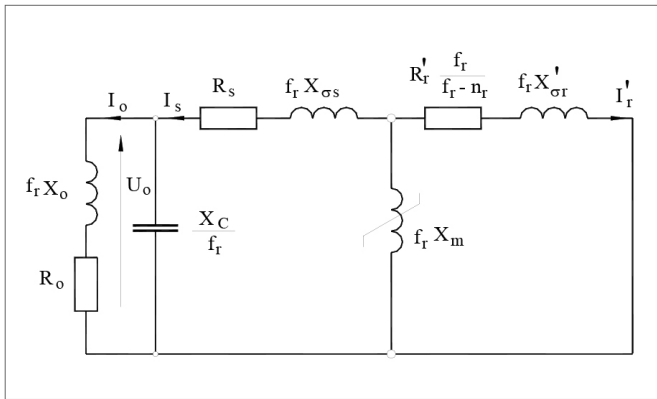
**Abstract:** In the paper are presented computational models of induction self-excited generator. Circuit models taking into consideration nonlinearity of the magnetic circuit enable calculations of static characteristic of the generator at autonomic operation. The field-circuit model using Maxwell 2D software allows for determination of time curves of any electrical variable in different conditions of generator operation. There are presented basic static characteristics determined using both models and time curves of currents, voltages, torque during self excitation and under load, in cooperation with rectifier system and during connection of excited and not excited generator to network.

Keywords: electrical machines, self-excited induction generator, field and circuit modelling

Na schemacie zastępczym  $f_r$  oznacza względną częstotliwość, częstotliwość napięcia stojana względem znamionowej częstotliwości silnika.

Opracowany z wykorzystaniem programu Mathcad algorytm obliczeniowy do wyznaczania charakterystyk statycznych, z uwzględnieniem nieliniowości charakterystyki magnesowania, umożliwia wyznaczenie charakterystyk przy stałej prędkości obrotowej lub stałej częstotliwości napięcia na obciążeniu [5].

Względna częstotliwość można wyznaczyć, przyrównując do zera część rzeczywistą impedancji zastępczej widzianej z zacisków reaktancji magnesującej:  $\text{Re}(Z_z) = 0$ . Natomiast ustalony



Rys. 2. Schemat zastępczy prądnicy indukcyjnej dla jednej fazy

punkt pracy oblicza się, przyrównując część urojoną impedancji zastępczej do reaktancji magnesującej:  $\text{Im}(Z_z) = f_r X_m$

### 3. Obliczenia połowo-obwodowe

W obliczeniach połowo-obwodowych zastosowano program Maxwell ze solverem Transient. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie różnych stanów nieustalonych generatora pracującego autonomicznie na odbiornik w stanie pracy symetrycznego i niesymetrycznego obciążenia, jak również we współpracy z układem prostownikowym. Również możliwe

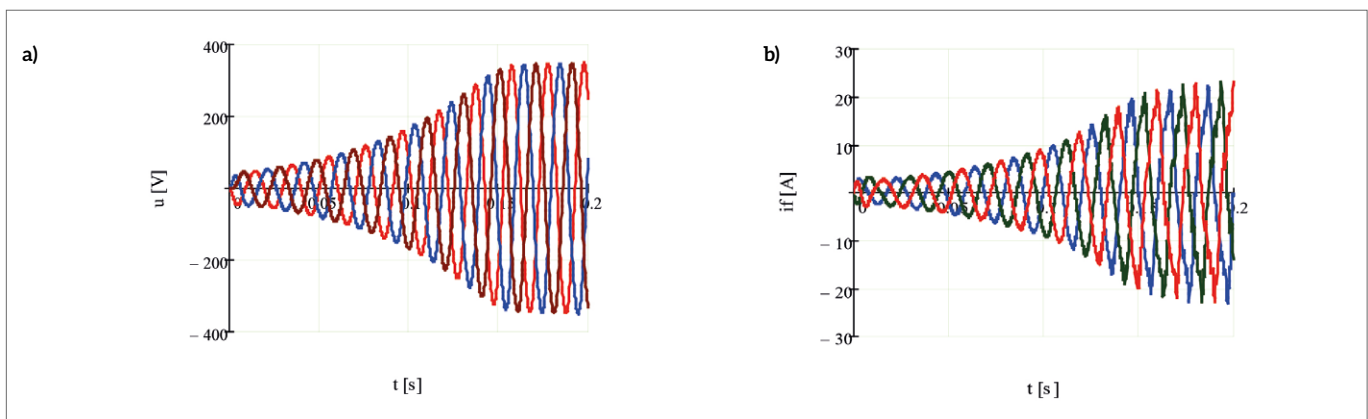
są obliczenia dla różnego rodzaju niesymetrii. W obliczeniach 2-wymiarowych uwzględniono rezystancję stojana oraz indukcyjności rozproszeń stojana i wirnika wyznaczone przy pomocy RMXprt, takie same jak w obliczeniach obwodowych. Program nie uwzględnia również strat w żelazie.

#### 3.1. Samowzbudzenie się generatora

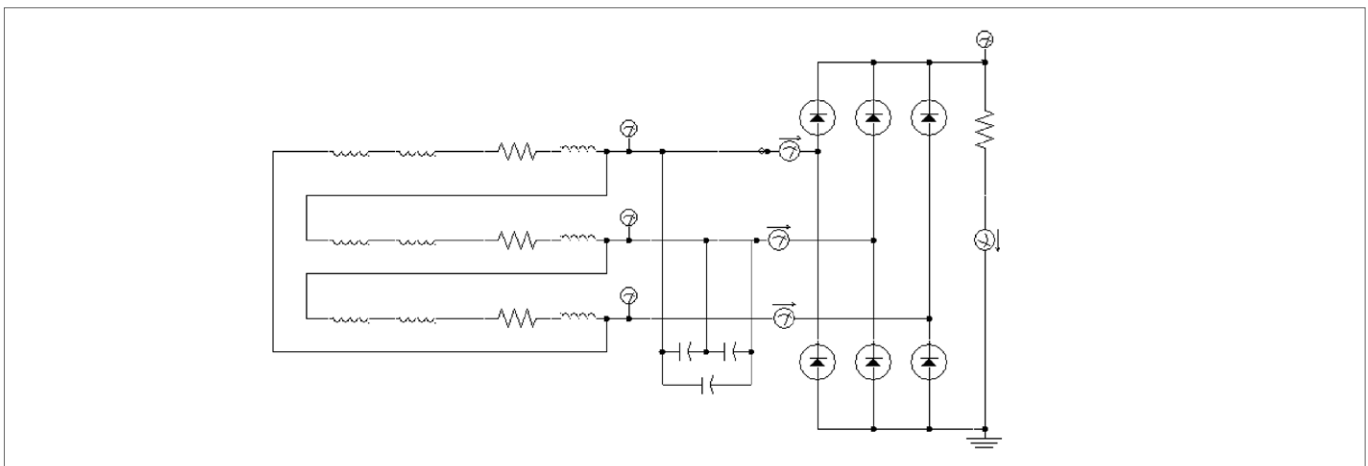
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki obliczeń w postaci przebiegów czasowych napięć międzyprzewodowych i prądów fazowych i przy stałej prędkości obrotowej  $n = 1040$  obr/min podczas samowzbudzenia się generatora w stanie obciążonym. Aby umożliwić proces samowzbudzenia się generatora podczas obliczeń numerycznych, zadano niezerowe warunki początkowe (prądowe) na jednym z uzwojeń fazowych.

#### 3.2. Praca generatora z układem prostownikowym

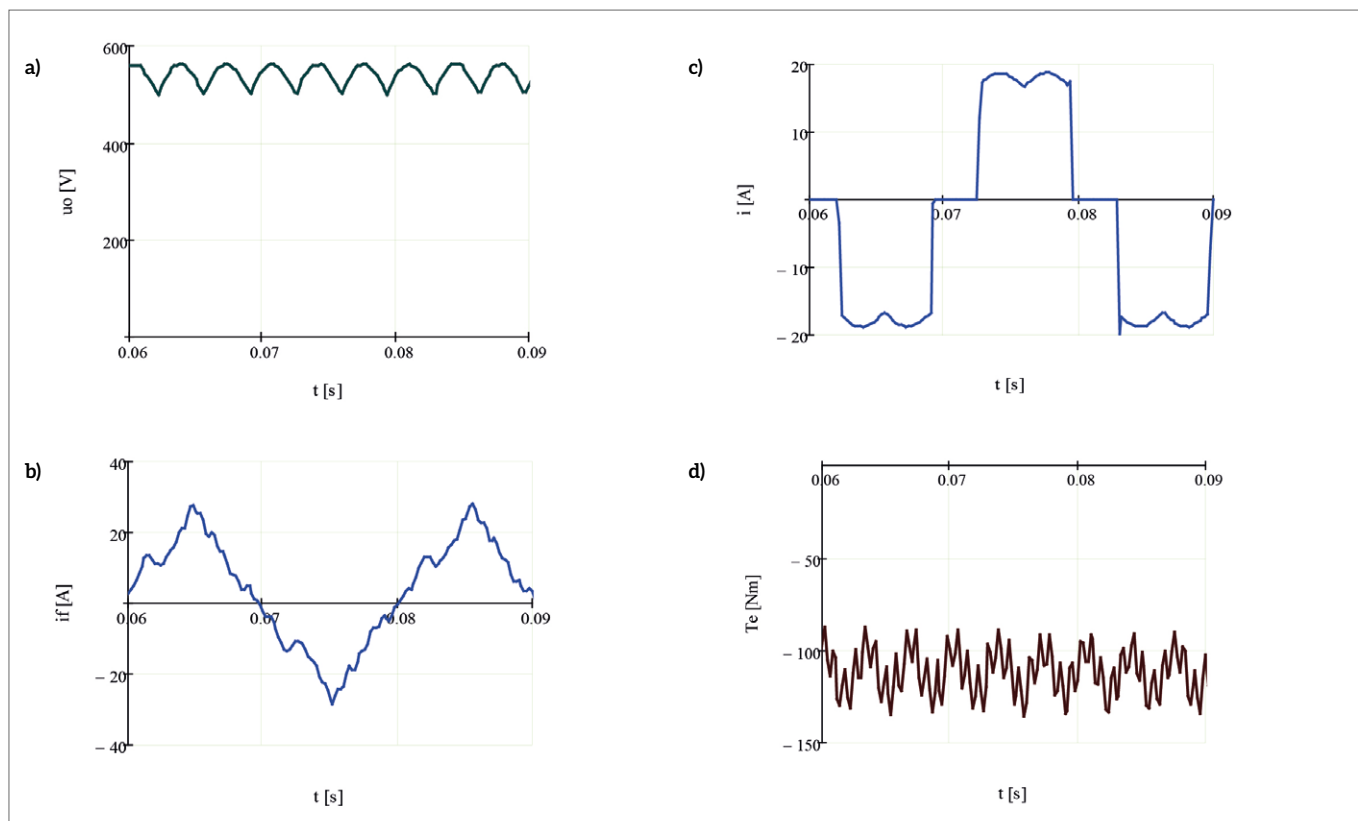
Schemat obwodowy modułu Schematic Capture programu Maxwell przedstawiono na rys. 4. Obliczenia wykonano dla obciążenia rezystancyjnego  $R_o = 30 \Omega$ , pojemności kondensatorów  $C = 90 \mu\text{F}$ , przy stałej prędkości obrotowej  $n = 1040$  obr/min. Przykładowe przebiegi czasowe napięcia na odbiorniku, prądu fazowego uzwojenia, prądu przewodowego przed układem prostownikowym oraz momentu elektromagnetycznego przedstawiono na rys. 5. Znając te przebiegi, można dokładnie wyznaczyć ich wartości skuteczne oraz dopuszczalne obciążenie.



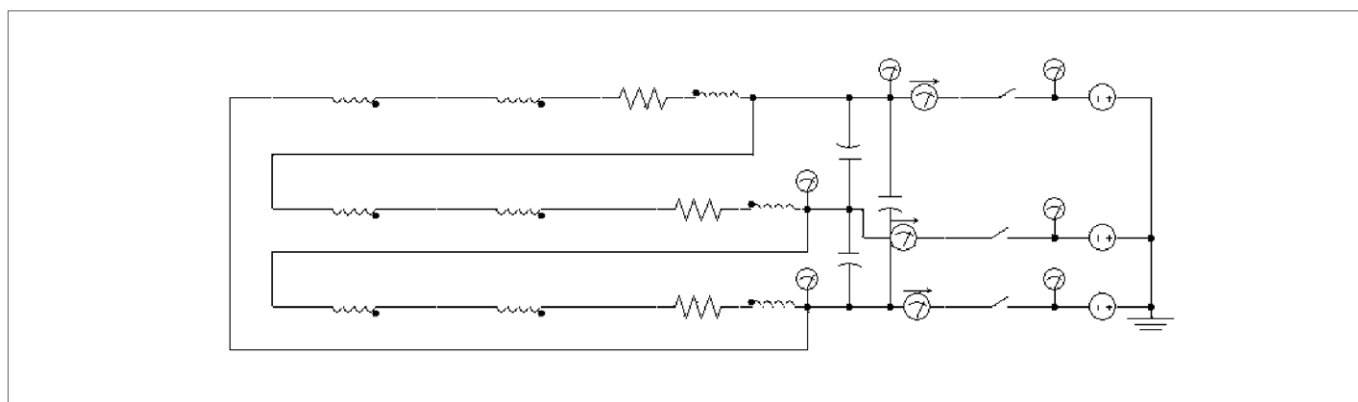
Rys. 3. Przebiegi czasowe napięć międzyprzewodowych i prądów fazowych podczas samowzbudzenia się generatora



Rys. 4. Schemat obwodowy generatora wraz z układem prostownikowym modułu Schematic Capture



Rys. 5. Przebiegi czasowe: a) napięcia na zaciskach; b) prądu fazowego; c) prądu przewodowego; d) momentu elektromagnetycznego w stanie ustalonym



Rys. 6. Schemat obwodowy prądnicy w module Schematic Capture przy włączeniu do sieci

### 3.3. Włączenie generatora wzbudzonego i niewzbudzonego do sieci

Program Maxwell umożliwia wykonanie obliczeń dla różnych przypadków stanów nieustalonych. Rozważono przypadek włączenia nieobciążonego generatora do sieci i równoczesnego zadania momentu napędowego. Schemat układu obwodowego przedstawiono na rysunku 6.

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi czasowe momentu, prędkości obrotowej i prądów generatora wzbudzonego (początkowa prędkość 1040 obr/min) podczas jego włączenia do sieci i równoczesnego zadania momentu napędowego  $T = 100 \text{ Nm}$ .

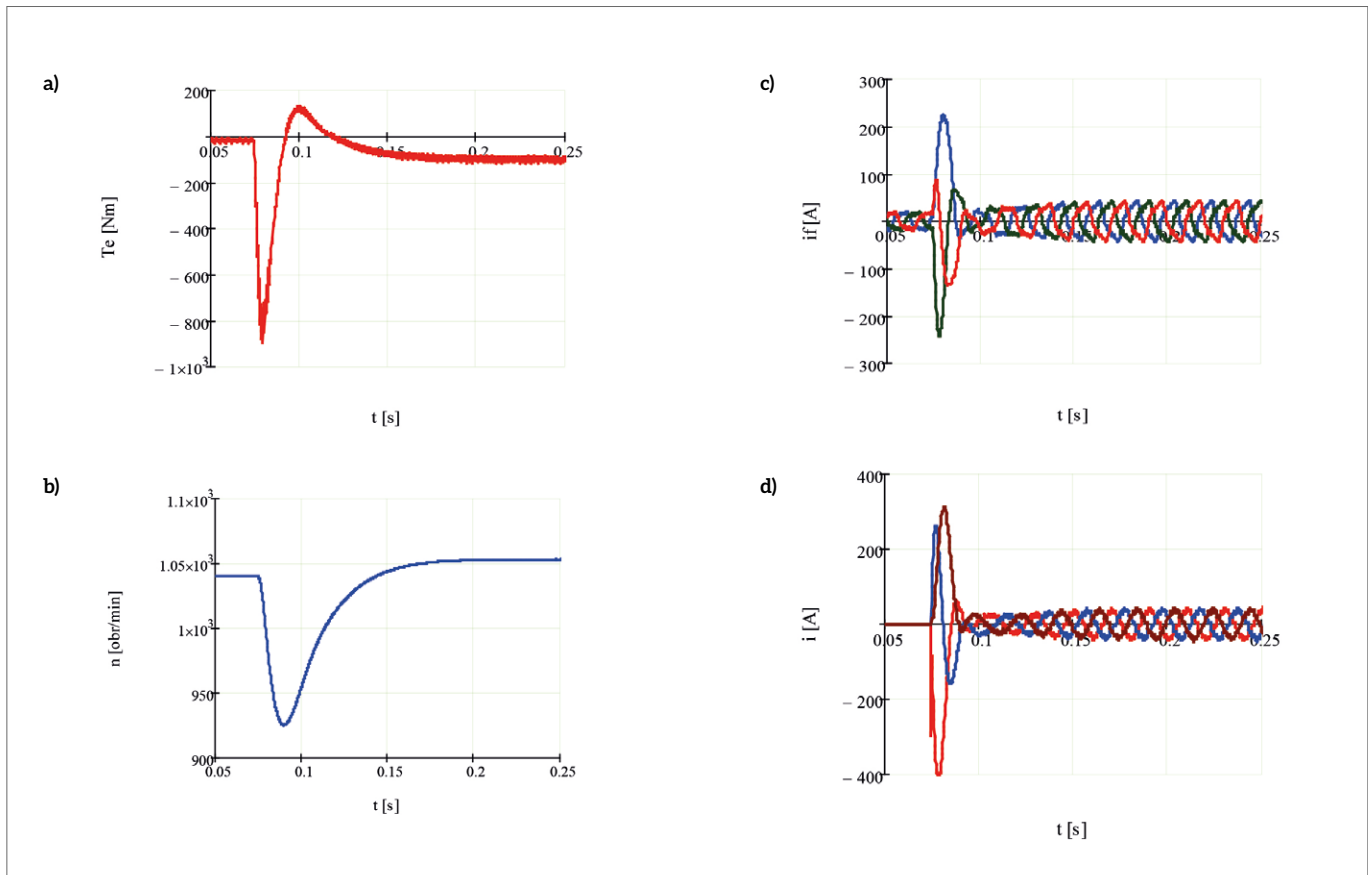
Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi czasowe momentu, prędkości obrotowej i prądów generatora niewzbudzonego w warunkach jak wyżej.

Jak widać z przedstawionych przebiegów (rys. 7 i rys. 8), w obu przypadkach nie występują problemy z synchronizacją, natomiast można się spodziewać dużych prądów łączeniowych.

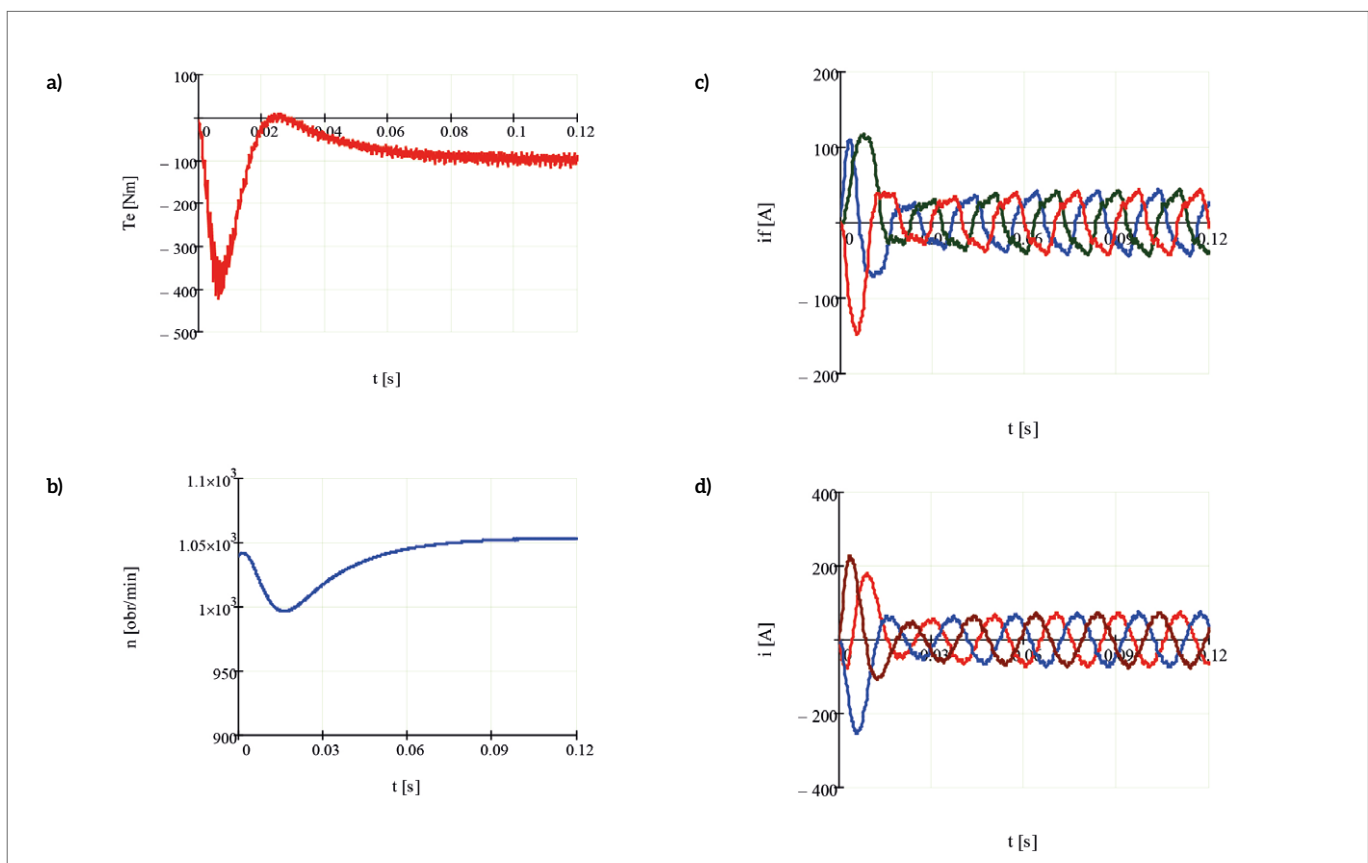
### 4. Charakterystyki statyczne prądnicy

Charakterystyki statyczne prądnicy można wyznaczyć na podstawie obliczonych obwodowo parametrów schematu zastępczego oraz na podstawie obliczeń połowo-obwodowych dla ustalonych warunków pracy. Na rysunku 9 przedstawiono wyznaczone obydwoma metodami charakterystyki zewnętrzne  $U = f(I)$  dla dwóch pojemności kondensatorów, przy stałej prędkości obrotowej  $n = 1040 \text{ obr/min}$  i obciążeniu rezystancyjnym.

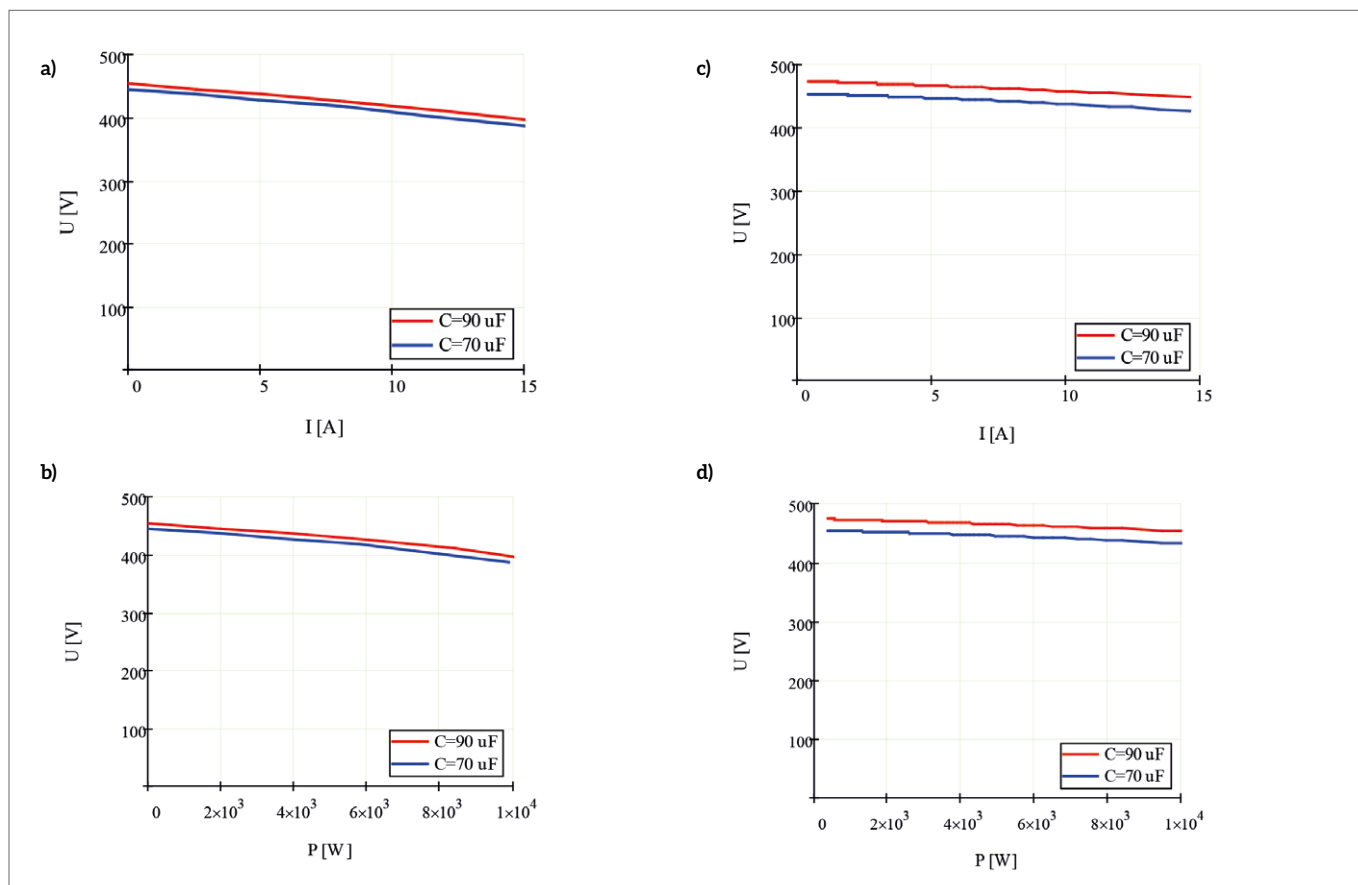
Na podstawie obliczeń obwodowych łatwo również wyznaczyć charakterystyki statyczne przy stałej częstotliwości, co przy



Rys. 7. Przebiegi czasowe podczas włączenia prądnicy wzbudzonej do sieci: a) momentu elektromagnetycznego; b) prędkości obrotowej; c) prądu fazowego; d) prądu przewodowego



Rys. 8. Przebiegi czasowe podczas włączenia prądnicy niewzbudzonej do sieci: a) momentu elektromagnetycznego; b) prędkości obrotowej; c) prądu fazowego; d) prądu przewodowego



Rys. 9. Charakterystyki statyczne obliczone przy pomocy modelu polowo-obwodowego: a)  $U = f(I)$ ; b)  $U = f(P)$ , obliczone wg modelu obwodowego: c)  $U = f(I)$ ; d)  $U = f(P)$

obliczeniach polowo-obwodowych jest bardziej kłopotliwe i wymaga wielokrotnych czasochłonnych przeliczeń.

Porównując charakterystyki statyczne wyznaczone obydwoma metodami, można zauważyć niewielkie różnice między nimi. Wpływa na to dokładność wyznaczenia parametrów schematu zastępczego przy metodzie obwodowej oraz stałość tych parametrów. Jednakże z praktycznego punktu widzenia do wstępnego doboru kondensatorów oraz uzwojenia prądnicy obliczenia obwodowe powinny być zastosowane. Obliczenia obwodowe dają większą zmienność napięcia na zaciskach generatora.

## 5. Podsumowanie

Obliczenia obwodowe i polowo-obwodowe wskazują na dobrą zgodność wyników obliczeń. Na początkowym etapie projektowania można więc zastosować model obwodowy.

Opracowany model polowo-obwodowy pozwala na obliczenia dla różnego typu stanów nieustalonych i analizę wyników tych obliczeń zarówno z punktu widzenia samego generatora, jak również w różnych układach.

## Literatura

- [1] BANSAL R.C.: *Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, June 2005, pp. 292–299.
- [2] CIDRÁS J., FEIJÓ A.E., GONZÁLEZ C.C.: *Synchronization of Asynchronous Wind Turbines*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 4, November 2002, pp. 1162–1169.

- [3] DYBOWSKI P., ORLEWSKI W.: *Badania generatora indukcyjnego wzbudzanego kondensatorami*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 77/2007, AGH Kraków, s. 23–26.
- [4] HICKIEWICZ J., MOCH J.: *Praca generatora indukcyjnego przy niesymetrycznym obciążeniu*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, Nr 28, Wrocław 2008, s. 412–419.
- [5] JAKUBOWSKI B., PIEŃKOWSKI K.: *Analiza warunków wzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, Nr 30, Wrocław 2010.
- [6] MIKSIEWICZ R.: *Maszyny elektryczne. Zagadnienia obliczeniowe z wykorzystaniem programu Mathcad*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
- [7] SANDHU K.S., JAIN S.P.: *Steady State Operation of Self-Excited Induction Generator with Varying Wind Speeds*. International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, Issue 1, Volume 2, 2008.
- [8] SIMÕES M.G., CHAKRABORTY S., WOOD R.: *Induction Generators for Small Wind Energy Systems*. Third Quarter 2006 IEEE Power Electronics Society Newsletter 19, Illinois St., U.S.A.

dr inż. Roman Miksiewicz – Politechnika Śląska,  
Instytut Elektrotechniki i Informatyki,  
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej  
w Transporcie, e-mail: Roman.Miksiewicz@polsl.pl

artykuł recenzowany