

*autonomiczny generator indukcyjny,  
samowzbudzenie, badania eksperymentalne*

Błażej JAKUBOWSKI\*  
Krzysztof PIENKOWSKI\*

## **BADANIA PROCESÓW WZBUDZENIA AUTONOMICZNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO**

W pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące procesów wzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego klatkowego. Podano schemat zastępczy i warunki statyczne wzbudzenia generatora indukcyjnego. Główna część artykułu dotyczy badań eksperymentalnych procesów samowzbudzenia. Opisano układ laboratoryjny i metodykę badań. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych procesów samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego. Badano procesy samowzbudzenia generatora wywołane magnetyzmem szczątkowym wirnika oraz wywołane przyłączeniem do uzwojenia stojana generatora baterii naładowanych kondensatorów. Badano wpływ wartości prędkości obrotowej wirnika generatora oraz wartości pojemności kondensatorów na przebiegi procesów samowzbudzenia. Wyniki wykonanych badań pozwalają na dokładniejsze poznanie zjawisk elektromagnetycznych występujących podczas procesów samowzbudzenia generatora indukcyjnego i pozwalają na weryfikację wyników analiz teoretycznych i badań symulacyjnych.

### **1. WSTĘP**

Obecnie intensywnie rozwijane są układy generacji energii z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. W układach tych do przetwarzania energii z odnawialnych źródeł są często stosowane maszyny indukcyjne z wirnikiem klatkowym wykorzystywane jako generatory indukcyjne. Generatory indukcyjne odznaczają się prostotą konstrukcji, niezawodnością działania, niskimi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacji.

W układach małej i średniej mocy znaczący udział zastosowań generatorów indukcyjnych stanowią układy autonomiczne. Warunki pracy autonomicznego generatora indukcyjnego są trudne. Przy pracy generatora mogą występować duże zmiany prędkości kątowej wirnika oraz duże zmiany parametrów obwodów obciążenia generatora.

---

\* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: blazej.jakubowski@pwr.wroc.pl; krzysztof.pienkowski@pwr.wroc.pl.

Najważniejszym procesem związanym z pracą autonomicznego generatora indukcyjnego jest proces samowzbudzenia generatora. Brak wystąpienia procesu samowzbudzenia lub nieprawidłowy przebieg tego procesu eliminuje możliwość wykorzystywania generatora indukcyjnego jako źródła energii elektrycznej.

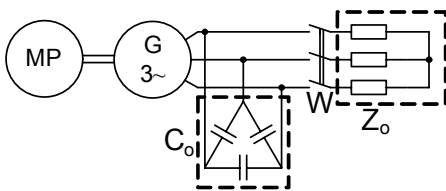
Analizy procesów samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego były przedmiotem wielu prac badawczych [1–4]. Przeważająca liczba tych prac jest oparta na analizach teoretycznych i badaniach symulacyjnych procesu samowzbudzenia generatora indukcyjnego z wykorzystaniem modeli matematycznych generatora. Wyniki tych analiz nie zawsze zapewniają uzyskanie poprawnych wyników ze względu na dużą złożoność procesu samowzbudzenia. Z tych względów duże znaczenie mają badania eksperymentalne procesów samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego.

W pracy tej przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących procesów samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego. Celem badań było wyznaczenie przebiegów chwilowych wielkości elektromagnetycznych podczas procesu samowzbudzenia oraz określenie wpływ na ten proces wartości parametrów elektromagnetycznych i prędkości kątowej generatora.

## 2. ANALIZA STANÓW PRACY USTALONEJ AUTONOMICZNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO

### 2.1. ANALIZA STATYCZNA WARUNKÓW PRACY USTALONEJ AUTONOMICZNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO

Podstawowy schemat autonomicznego generatora indukcyjnego klatkowego przedstawiono na rysunku 1.



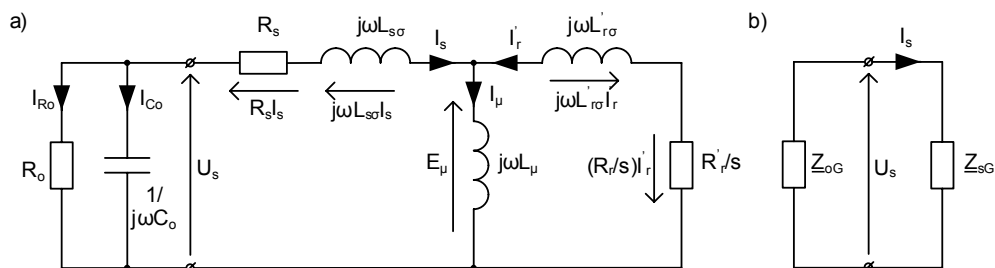
Rys. 1. Schemat autonomicznego generatora indukcyjnego

Fig. 1. System of self-excited induction generator

Wirnik generatora G jest napędzany przez maszynę pomocniczą MP, którą może być turbina wiatrowa, turbina wodna, silnik spalinowy lub inne źródło energii mechanicznej. Do zacisków stojana generatora G jest przyłączona bateria trójfazowa kondensatorów  $C_0$  połączonych w trójkąt lub gwiazdę. Bateria kondensatorów zapewnia utrzymanie stanu samowzbudzenia generatora i jest źródłem mocy biernej dostarczanej do generatora. Generator zasila trójfazowy odbiornik o impedancji  $Z_0$ .

Analiza statyczna pracy autonomicznego generatora indukcyjnego dokonywana jest na podstawie równań obwodów elektrycznych generatora dla stanów pracy usta-

lonej generatora [2], [4]. Równania te są formułowane na podstawie schematu zastępczego autonomicznego generatora przedstawionego na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy autonomicznego generatora indukcyjnego: a) szczegółowy, b) uproszczony  
Fig. 2. Equivalent circuit of the induction generator: a) detailed, b) simplified

Podstawowy warunek statyczny pracy ustalonej autonomicznego generatora indukcyjnego jest określony przez równanie dla obwodów schematu zastępczego generatora:

$$0 = (Z_{oG} + Z_{sG}) \cdot \underline{I}_S \quad (1)$$

gdzie:

$Z_{sG}$  – impedancja fazowa obwodów schematu zastępczego generatora od strony stojana;

$Z_{oG}$  – impedancja fazowa obwodów przyłączonych do uzwojenia stojana generatora;

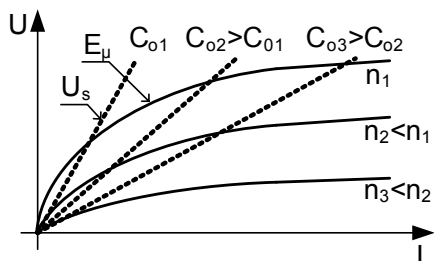
$\underline{I}_S$  – zespolona wartość prądu stojana generatora.

Uwzględniając, że w stanie pracy ustalonej wartość prądu stojana generatora jest różna od zera, to warunkiem statycznym pracy ustalonej jest równość zera wypadkowej impedancji występującej w równaniu (1) w nawiasach. Możliwość spełnienia warunku (1) przy zmiennych parametrach obciążenia i zmiennej wartości prędkości kątowej wirnika wynika z tego, że parametry elektromagnetyczne generatora indukcyjnego są zależne od pulsacji napięcia generatora, poślizgu wirnika oraz nasycenia obwodu magnetycznego generatora. Pozwala to na samoczynne dopasowywanie się impedancji generatora do parametrów obwodu obciążenia oraz wymuszanej prędkości kątowej wirnika generatora. Gdy możliwości takiego dopasowywania nie będą spełnione to prądy w obwodach generatora maleją do zera i następuje zakończenie pracy generatorowej maszyny.

## 2.2. CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE DLA PRACY USTALONEJ GENERATORA INDUKCYJNEGO

Analiza szczegółowa warunku (1) na podstawie schematu zastępczego generatora indukcyjnego z uwzględnieniem nieliniowej zmienności nasycenia obwodu magne-

tycznego generatora pozwala na określenie zakresów możliwych stanów pracy ustalonej generatora [2]–[4]. Wybrane wyniki takiej analizy zostały przedstawione graficznie na rys. 3.



Rys. 3. Punkty pracy generatora indukcyjnego  
Fig. 3. Operation points of induction generator

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki autonomicznego generatora indukcyjnego dla stanu pracy jałowej. Na rysunku tym linie ciągłe przedstawiają charakterystyki siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu stojana przy danej prędkości obrotowej wirnika, natomiast linie przerywane charakterystyki napięcia wywołanego przepływem prądu przez kondensatory przyłączone do uzwojenia stojana dla zadanych wartości pojemności. Stany pracy ustalonej autonomicznego generatora indukcyjnego występują w punktach przecięcia charakterystyki siły elektromotorycznej generatora i charakterystyki napięciowej kondensatorów wzbudzenia.

Na podstawie charakterystyk przedstawionych na rys.3 mogą być wyznaczone następujące szczegółowe warunki i zakresy pracy statycznej autonomicznego generatora indukcyjnego:

- Obwód magnetyczny generatora indukcyjnego powinien być nieliniowy;
- Pojemność kondensatorów wzbudzenia powinna być odpowiednio duża. Przy zbyt małej wartości pojemności nie nastąpi wzbudzenie generatora lub nastąpi wzbudzenie do stanu z wytwarzaniem zbyt małej wartości napięcia;
- Prędkość obrotowa wirnika generatora powinna być odpowiednio duża. Przy zbyt małej wartości prędkości wirnika nie nastąpi wzbudzenie generatora lub nastąpi wzbudzenie do stanu z wytwarzaniem zbyt małej wartości napięcia.

Analiza stanów statycznych autonomicznego generatora indukcyjnego pozwala na sformułowanie warunków niezbędnych do zapewnienia pracy ustalonej generatora. Warunki statyczne pracy ustalonej generatora są często rozpatrywane jako warunki wymagane dla wymuszenia procesu samowzbudzenia generatora. Jest to nieuzasadnione ponieważ proces samowzbudzenia jest złożonym procesem przejściowym. Opis teoretyczny procesu samowzbudzenia generatora indukcyjnego jest trudny. Z wymienionych względów w tej pracy przedstawiono wykonane badania eksperymentalne dotyczące analizy przebiegów przejściowych i warunków samowzbudzenia generatora.

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE PROCESÓW SAMOWZBUDZENIA AUTONOMICZNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO

#### 3.1. PARAMETRY BADANEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO

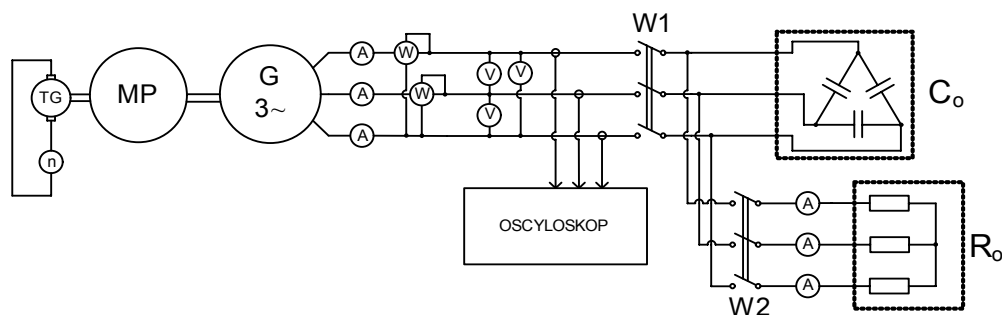
W badaniach jako generator indukcyjny zastosowano silnik indukcyjny typu SZJe 34a. Parametry badanej maszyny indukcyjnej wyznaczone dla znamionowego punktu pracy (parametry wirnika przeliczone na stronę stojana) przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry generatora indukcyjnego  
Table 1. Parameters of induction generator

Nazwa	Symbol	Wartość	Jednostka
Napięcie znamionowe	$U_n$	220/380	V
Prąd znamionowy	$I_n$	11,6/6,5	A
Moc znamionowa	$P_n$	3	kW
Rezystancja stojana	$R_s$	1,953	$\Omega$
Rezystancja wirnika	$R_r'$	2,202	$\Omega$
Indukcyjność rozproszenia stojana	$L_{s\sigma}$	9,35	mH
Indukcyjność rozproszenia wirnika	$L_{r\sigma}'$	9,35	mH
Indukcyjność magnesowania	$L_\mu$	0,2192	H
Liczba par biegunów	$p_b$	2	–

#### 3.2. OPIS UKŁADU POMIAROWEGO

Badania generatora indukcyjnego przeprowadzono w układzie laboratoryjnym przedstawionym na rysunku 4.



Rys. 4. Układ do badania procesów samowzbudzenia oraz pracy generatora indukcyjnego  
Fig. 4. Scheme for investigation of self-excitation process and operation of induction generator

Podczas badań generator indukcyjny G był napędzany przez maszynę pomocniczą MP, której rolę pełnił silnik obcowzbudny prądu stałego o regulowanej w szerokim zakresie prędkości kątowej. Zastosowany układ łączników W1 i W2 pozwalał na badanie procesów samowzbudzenia generatora zarówno dla stanów pracy jałowej i z obciążeniem generatora. Przebiegi przejściowe wielkości elektromagnetycznych podczas procesu samowzbudzenia były rejestrowane i przetwarzane za pośrednictwem oscyloskopu cyfrowego. Zastosowany układ pomiarowy był również wykorzystywany do wyznaczania charakterystyk statycznych generatora indukcyjnego w stanach pracy ustalonej.

### 3.3. BADANIA PROCESÓW WZBUDZENIA GENERATORA INDUKCYJNEGO WYWOŁANYCH MAGNETYZMEM SZCZĄTKOWYM WIRNIKA

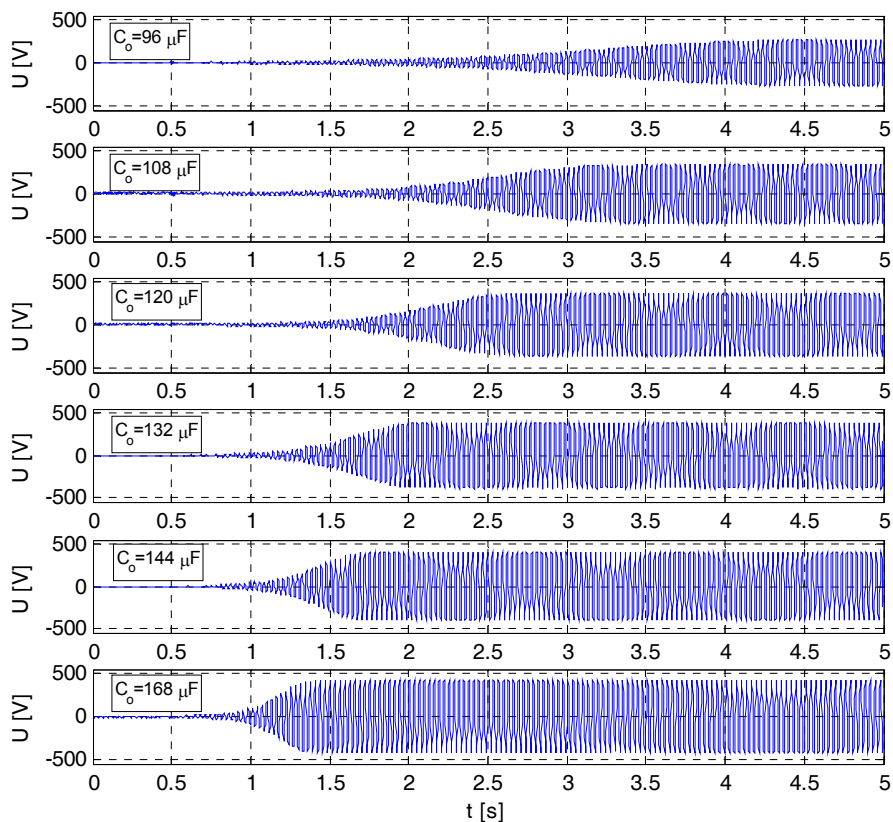
Przy eksploatacji generatorów indukcyjnych prezentowane są nieraz poglądy, że wzbudzenie generatora indukcyjnego od magnetyzmu szczątkowego (remanentu magnetycznego) nie jest możliwe ze względu na zbyt małe wartości strumienia magnetyzmu szczątkowego w maszynie indukcyjnej spowodowany stosowaniem blachowanego rdzenia i blach o wąskiej pętli histerezy. Dla weryfikacji tych poglądów wykonano serię badań procesów eksperymentalnych procesu samowzbudzenia generatora indukcyjnego wymuszonego działaniem tylko magnetyzmu szczątkowego.

Podczas tych badań wirnik generatora był napędzany z zadaną, nastawianą prędkością obrotową. Następnie do zacisków stojana generatora przyłączano baterię kondensatorów o różnych wartościach pojemności  $C_o$ . Przed badaniami bateria kondensatorów była długotrwale zwarta przez rezystory rozładowcze, aby wykluczyć możliwość obecności napięcia początkowego na kondensatorach. Badania wykonano dla różnych wartości prędkości obrotowej wirnika generatora  $n$  oraz dla różnych wartości pojemności  $C_o$  baterii kondensatorów.

Wybrane wyniki wykonanych badań eksperymentalnych przedstawiono na rysunku 5 i 6. Wykonane badania wskazują, że magnetyzm szczątkowy obwodu magnetycznego wirnika jest zdolny do zapewnienia procesu samowzbudzenia generatora indukcyjnego.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi napięcia międzyfazowego stojana generatora indukcyjnego podczas procesu samowzbudzenia przy stałej prędkości wirnika i różnych wartościach pojemności kondensatorów wzbudzenia  $C_o$ . Z wyznaczonych przebiegów wynika, że:

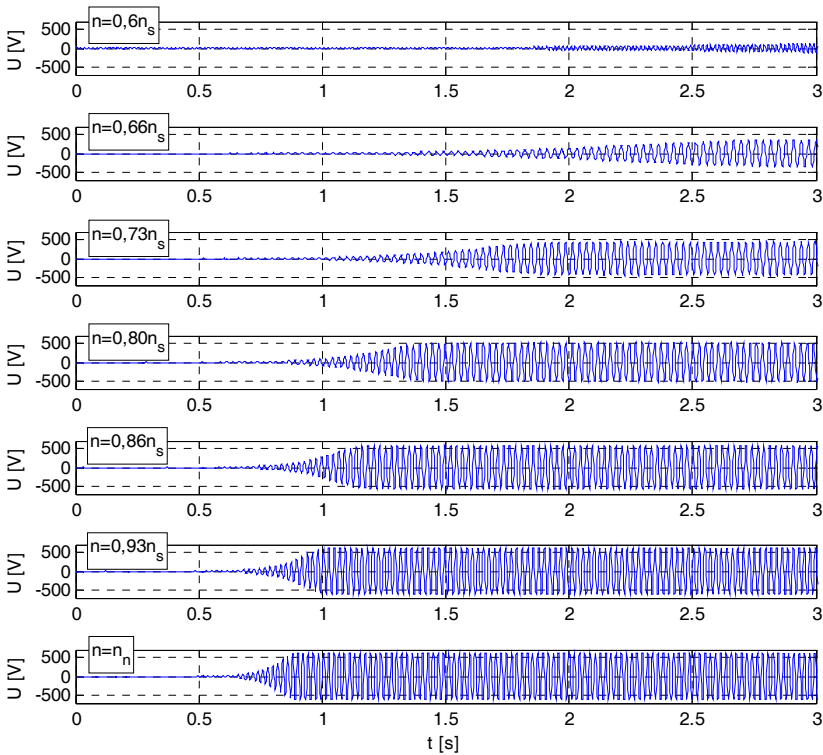
- zwiększanie wartości pojemności kondensatorów  $C_o$  powoduje skrócenie czasu trwania procesu samowzbudzenia i szybsze przejście do stanu pracy ustalonej generatora;
- zwiększanie wartości pojemności kondensatorów  $C_o$  powoduje zwiększanie wartości skutecznej napięcia generatora w stanie ustalonym. Wniosek ten jest potwierdzeniem wyników analizy statycznej generatora przedstawionych na rys. 3.



Rys. 5. Przebiegi napięcia międzyfazowego  $U$  stojana generatora indukcyjnego przy stałej prędkości obrotowej wirnika  $n = 1000$  obr/min i różnych wartościach pojemności  $C_o$ .  
 Fig. 5. Transient waveforms of a line stator voltage  $U$  of the induction generator for constant rotational speed  $n = 1000$  rpm and various excited-capacitance  $C_o$ .

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi napięcia międzyfazowego stojana generatora indukcyjnego podczas procesu samowzbudzenia wymuszanego przy stałej wartości pojemności kondensatorów wzbudzenia  $C_o$  i różnych wartościach prędkości obrotowych wirnika generatora. Z wyznaczonych przebiegów wynika, że:

- procesy samowzbudzenia generatora wymuszone przy dużych prędkościach obrotowych wirnika trwają krócej niż procesy wymuszone przy małych prędkościach;
- zwiększanie wartości prędkości obrotowej wirnika generatora powoduje zwiększanie wartości skutecznej napięcia wytwarzanego przez generator w stanie ustalonym. Wniosek ten również jest potwierdzeniem wyników analizy statycznej przedstawionych na rys. 3.



Rys. 6. Przebiegi napięcia międzyfazowego  $U$  stojana generatora indukcyjnego przy stałej pojemności  $C_o = 108 \mu\text{F}$  i różnych prędkościach wirnika generatora  $n$   
 Fig. 6. Transient waveforms of a line stator voltage  $U$  of the induction generator for constant capacitance  $C_o = 108 \mu\text{F}$  and various rotational speed  $n$

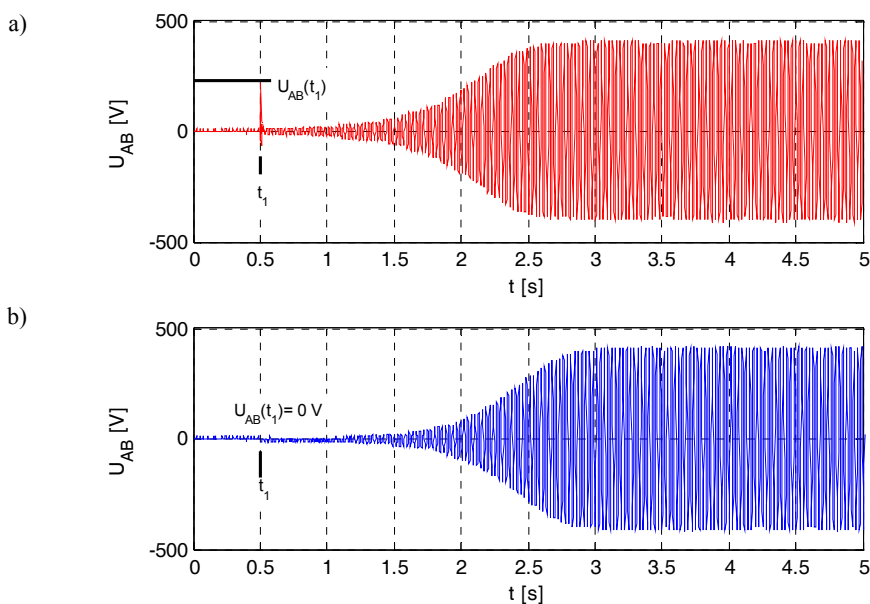
### 3.4. BADANIA PROCESÓW SAMOWZBUDZENIA GENERATORA INDUKCYJNEGO WYWOŁANYCH PRZYŁĄCZENIEM NAŁADOWANYCH KONDENSATORÓW

Obecnie prezentowany jest często pogląd, że warunkiem samowzbudzenia generatora indukcyjnego jest dokonanie przyłączenia do uzwojenia stojana naładowanej baterii kondensatorów o odpowiedniej pojemności. Dla weryfikacji tego poglądu wykonano serię badań procesów samowzbudzenia generatora wymuszanych przez przyłączenie do generatora baterii naładowanych kondensatorów. Podczas tych badań wirnik generatora był napędzany z zadaną prędkością obrotową. Następnie do zacisków stojana generatora przyłączano baterię naładowanych kondensatorów o różnych wartościach pojemności kondensatorów  $C_o$ . Przed przyłączeniem do generatora bateria kondensatorów została naładowana przez przyłączenie do źródła napięcia stałego. Stosowano typowy układ ładowania baterii z kondensatorami połączonymi w trójkąt przez przyłączenie zacisków źródła napięcia stałego do dwóch węzłów obwodu połą-



czenia kondensatorów w trójkąt, przy którym uzyskiwano niesymetryczne naładowanie kondensatorów. Badania wykonano dla różnych wartości prędkości obrotowej wirnika generatora  $n$  oraz różnych wartości pojemności kondensatorów  $C_o$  dołączanych baterii kondensatorów.

Wybrane wyniki wykonanych badań eksperymentalnych przedstawiono na rysunku 7. Na rysunku tym dokonano również porównania wyników badań z procesu samowzbudzenia generatora bez naładowanych kondensatorów, czyli wywołanych przez magnetyzm szczątkowy wirnika.



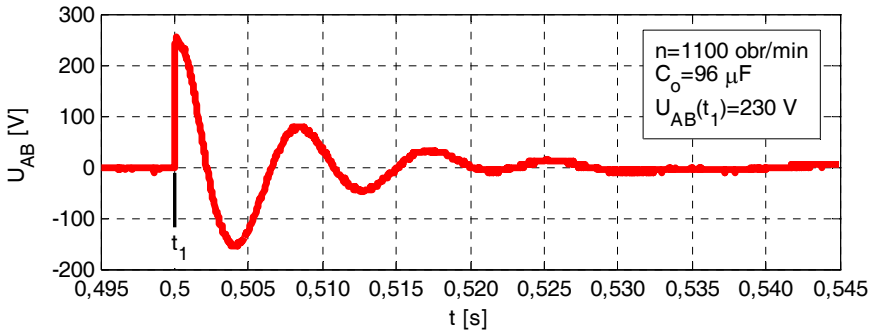
Rys. 7. Przebiegi napięcia międzyfazowego  $U$  stojana generatora indukcyjnego ( $n=1100$  obr/min,  $C_o=96\mu\text{F}$ ): a) przy wzbudzeniu od naładowanych kondensatorów, b) przy wzbudzeniu od magnetyzmu szczątkowego

Fig. 7. Transient waveforms of a line stator voltage  $U$  of the induction generator ( $n=1100$  rpm,  $C_o=96\mu\text{F}$ ): a) self-excitation with initially charged capacitors, b) self-excitation with residual magnetism and without charged capacitors

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi napięcia międzyfazowego stojana generatora indukcyjnego podczas procesu samowzbudzenia wymuszanego przy zadanej wartości pojemności fazowych kondensatorów wzbudzenia  $C_o$  i zadanych wartościach prędkości obrotowej wirnika generatora. Przebieg na rysunku górnym (rys. 7a) dotyczy procesu samowzbudzenia generatora po przyłączeniu naładowanej baterii kondensatorów, a przebieg na rysunku dolnym (rys. 7b) po przyłączeniu nienaładowanej baterii

kondensatorów. Przyłączenie baterii kondensatorów w obu przypadkach następowało w tej samej chwili czasu  $t_1$ .

Z porównania przebiegów przedstawionych na rysunku 7 wynika, że przy przyłączaniu do generatora naładowanych lub nie naładowanych kondensatorów proces samowzbudzenia praktycznie przebiega w taki sam sposób. W celu dokładniejszego poznania procesu samowzbudzenia z naładowanymi kondensatorami dokonano analizy pomiarowej przebiegów napięcia na naładowanych kondensatorach po ich przyłączeniu do uzwojenia stojana generatora. Wybrane wyniki badań dotyczące przebiegu chwilowego napięcia na jednym z kondensatorów baterii przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Przebieg napięcia  $U$  na kondensatorze po załączeniu naładowanej baterii kondensatorów do uzwojenia stojana generatora indukcyjnego

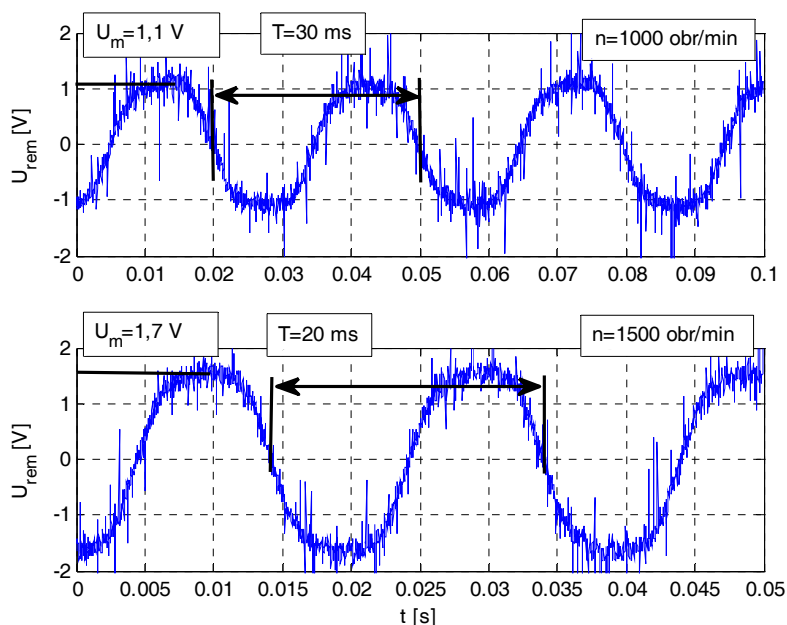
Fig. 8. Transient waveform of a capacitor voltage  $U$  after connecting charged capacitor bank to the stator winding of induction generator

Z analizy przebiegu napięcia na rys. 8 wynika, że po przyłączeniu naładowanych kondensatorów do uzwojenia stojana następuje szybkie rozładowanie się kondensatorów i dalszy proces samowzbudzenia odbywa się przy rozładowanych kondensatorach. Wskazuje to, że dla wystąpienia procesu samowzbudzenia generatora istotna jest obecność w maszynie magnetyzmu szczątkowego i przyłączenie do generatora kondensatorów. Natomiast można uznać, że stopień naładowania kondensatorów nie ma tu znaczenia. Przyłączanie naładowanych kondensatorów może mieć pewne znaczenie w przypadku małej wartości magnetyzmu szczątkowego w maszynie. W tym przypadku magnetyzm ten może być wzmocniony przez prądy płynące w uzwojeniu stojana podczas rozładowywania kondensatorów.

### 3.5. NAPIĘCIE REMANENTU MAGNETYCZNEGO

Badania remanentu magnetycznego (magnetyzmu szczątkowego) w generatorze indukcyjnym wykonano na podstawie pomiaru sił elektromotorycznych rotacji indukowanych w rozwartym uzwojeniu stojana generatora przy napędzaniu wirnika ze

stałą prędkością obrotową. Siły elektromotoryczne rotacji w uzwojeniu stojana są proporcjonalne do strumienia magnetyzmu szczątkowego i prędkości kątowej wirnika. Pulsacja sił elektromotorycznych rotacji jest równa elektrycznej prędkości kątowej wirnika. Na rysunku 9 przedstawiono wyznaczone pomiarowo przebiegi napięcia międzyfazowego, indukowanego na rozwartych zaciskach stojana generatora indukcyjnego przez strumień remanentu wirnika przy różnych prędkościach obrotowych wirnika. Badania potwierdziły proporcjonalność amplitudy i pulsacji sił elektromotorycznych rotacji do prędkości kątowej wirnika. Znajomość wyznaczonej pomiarowo amplitudy siły elektromotorycznej rotacji przy danej prędkości kątowej pozwala na wyznaczenie wartości strumienia magnetycznego remanentu. Dla badanego generatora indukcyjnego wartość strumienia magnetycznego remanentu wynosiła około 0,5% wartości znamionowej strumienia magnesowania maszyny.



Rys. 9. Napięcie międzyfazowe sił elektromotorycznych rotacji indukowane w uzwojeniu stojana generatora indukcyjnego

Fig. 9. Waveforms of line voltage of rotation voltage induced in the winding of the induction generator

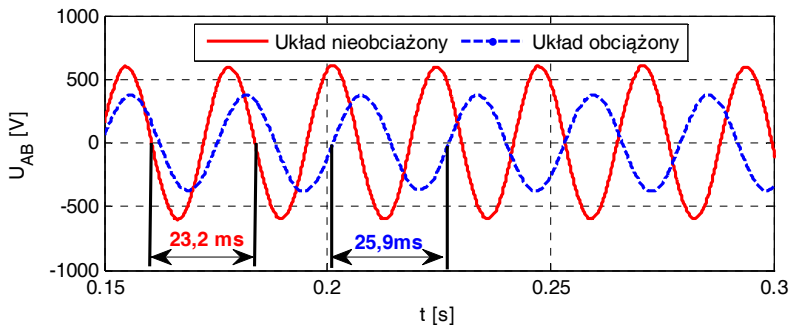
Występowanie strumienia remanentu magnetycznego w maszynie indukcyjnej wskazuje na konieczność uwzględnienia w analizie teoretycznej bardziej złożonego modelu generatora indukcyjnego. Na początku procesu samowzbudzenia praca generatora jest zbliżona do pracy generatora synchronicznego, a dopiero dalszy proces samowzbudzenia odpowiada pracy maszyny indukcyjnej.

#### 4. BADANIA PROCESÓW OBCIĄŻENIA AUTONOMICZNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO

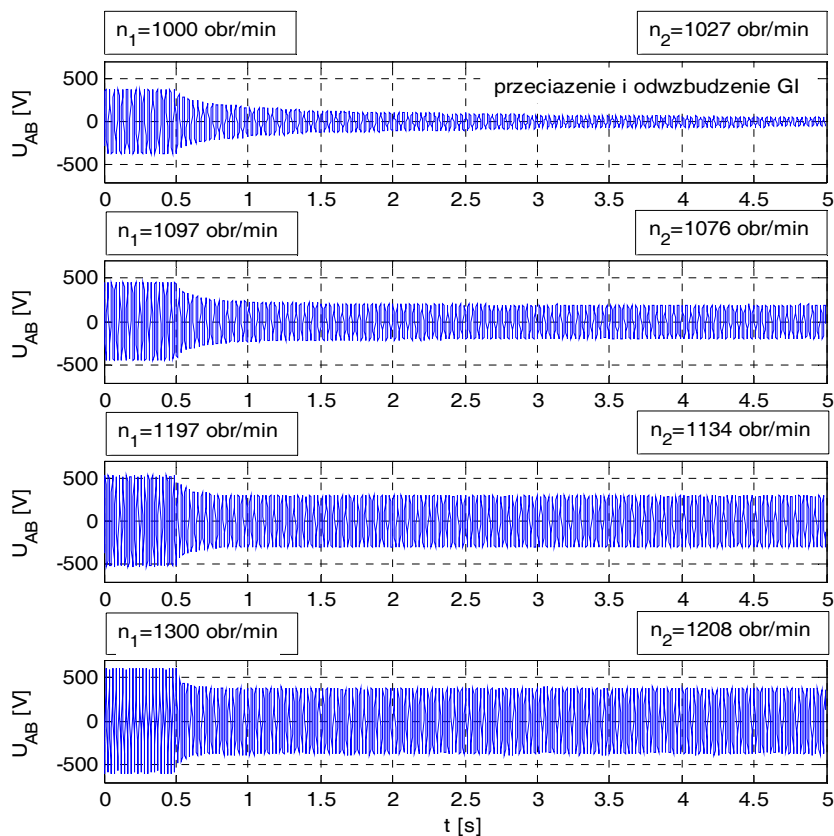
Badania laboratoryjne procesów obciążenia autonomicznego generatora indukcyjnego polegały na wymuszeniu przy danej prędkości kątowej wirnika stanu samowzbudzenia generatora na biegu jałowym. W stanie ustalonym przy stałej wartości skutecznej napięcia generatora do stojana przyłączano symetryczny trójfazowy odbiornik o charakterze czynnym. Badania wykonano dla pracy generatora przy różnych wartościach prędkości obrotowych wirnika  $n$  i pojemności  $C_o$  przyłączanej baterii kondensatorów.

Wybrane wyniki badań przedstawiono na rysunku 11. Rys. 11 przedstawia wyznaczone pomiarowo przebiegi chwilowe napięcia międzyfazowego generatora po załączeniu trójfazowego odbiornika o rezystancji fazowej  $R_o = 40 \Omega$ , wykonane przy różnych wartościach prędkości obrotowych wirnika. Przed załączeniem obciążenia generator pracował w stanie jałowym z przyłączoną baterią kondensatorów o stałej pojemności  $C_o = 108 \mu\text{F}$ . Obciążenie generatora indukcyjnego powodowało również pewne zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika generatora spowodowane brakiem stabilizacji prędkości obrotowej maszyny pomocniczej napędzającej generator.

Z wykonanych badań wynika, że obciążenie generatora odbiornikiem o charakterze czynnym zawsze powoduje obniżenie wartości napięć wytwarzanych przez generator. Obciążanie generatora wywołuje również pewną zmianę pulsacji wielkości elektromagnetycznych generatora (prądów, napięć, strumieni magnetycznych). Przeprowadzone badania potwierdziły analizy teoretyczne z których wynika, że zwiększanie obciążenia generatora indukcyjnego powoduje zmniejszanie pulsacji zmiennych elektromagnetycznych – rys. 10. Badania potwierdziły również możliwość pracy generatora indukcyjnego z obciążeniem tylko w przedziale powyżej pewnej prędkości granicznej wirnika. Obciążanie generatora pracującego przy prędkości wirnika poniżej prędkości granicznej powoduje szybkie zmniejszanie się napięcia generatora aż do stanu zaniku wzbudzenia generatora.



Rys. 10. Napięcie międzyfazowe  $U$  stojana generatora przy braku obciążenia i przy obciążeniu  
Fig. 10. Transient waveforms of a line stator voltage  $U$  without load and with load of induction generator



Rys. 11. Przebiegi napięcia międzyfazowego  $U$  stojana przy obciążeniu generatora indukcyjnego  
 Fig. 11. Transient waveforms of a line stator voltage  $U$  under load of the induction generator

## 5. PODSUMOWANIE

Samowzbudzenie autonomicznego generatora indukcyjnego jest złożonym procesem elektromagnetycznym. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych procesu samowzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego. Wykonane badania laboratoryjne potwierdziły zdolność maszyny indukcyjnej do samowzbudzenia wywołanego magnetyzmem szczątkowym. Badania laboratoryjne wykazały możliwość samowzbudzenia generatora indukcyjnego tylko w przypadku gdy prędkość wirnika jest większa od pewnej minimalnej wartości granicznej.

Wyniki wykonanych badań pozwalają na dokładniejsze poznanie zjawisk elektromagnetycznych podczas procesów samowzbudzenia generatora indukcyjnego i pozwalają na weryfikację wyników analiz teoretycznych i badań symulacyjnych.

*Praca opracowana w ramach realizacji projektu „Przedsiębiorczy doktorant – inwestycja w innowacyjny rozwój regionu” (Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Priorytet VIII Regionalne Kadry Gospodarki, Działanie 8.2 Transfer Wiedzy, Poddziałania 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji). Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.*

#### LITERATURA

- [1] JAKUBOWSKI B., PIEŃKOWSKI K., *Analiza warunków wzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 64, Seria Nr 30, Wrocław 2010, 332–343.
- [2] MURTHY S.S., MALIK O.P., TANDON A.K., *Analysis of self-excited induction generators*, IEE PROC., 1982, Vol. 129, Pt. C, No. 6, 260–265.
- [3] SHADHU KHAN P.K., CHATTERJEE J.K., *Three-Phase Induction Generators: A Discussion on Performance*, Electric Power Components and Systems, 1999, Vol. 27, No. 8, 813–832.
- [4] TANDON A.K., MURTHY S.S., BERG G.J., *Steady-state analysis of capacitor self-excited induction generators*, IEEE Trans. on Power, Apparatus and Systems, 1984, Vol. PAS-103, No. 3, 612–618.

#### EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF SELF-EXCITATION PROCESSES OF AUTONOMOUS INDUCTION GENERATOR

This paper presents issues concerning the self-excitation process of autonomous induction generator. Equivalent circuit and static conditions of self-excitation process of induction generator are given. The main part of the article concerns the experimental investigations of self-excitation process. In this paper the laboratory system and methodology of research are described. The paper presents the results of laboratory tests of self-excitation of autonomous induction generator. Self-excitation processes were investigated due to rotor residual magnetism and initially charged capacitor bank. The experimental issues of influence of rotor speed and capacitance value on self-excitation process are presented. Results presented in this paper allow more exactly explain the electromagnetic phenomena occurring during self-excitation process of induction generators and let to verify theoretical studies and simulations.