

WSPÓŁPRACA PRZEWZBUDZONEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z PRZEMIENNIKIEM CZĘSTOTLIWOŚCI

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono badania symulacyjne współpracy przewzbudzonego jawnobiegunowego silnika synchronicznego z typowym przemiennikiem częstotliwości przeznaczonym do zasilania silników asynchronicznych. Obliczenia zostały przeprowadzone dla stanów dynamicznych maszyny synchronicznej o mocy znamionowej 3,2 kW oraz, porównawczo, dla maszyny indukcyjnej o takiej samej mocy znamionowej.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, przemiennik częstotliwości

OVEREXCITED SYNCHRONOUS MOTOR FED WITH FREQUENCY CONVERTER

The paper shows results of simulation investigations of overexcited salient-pole synchronous motor fed with typical frequency converter destined for asynchronous motors. Calculations of transient states have been made for 3.2 kW synchronous motor, the results have been compared with transient states of the same power rated asynchronous motor.

Keywords: synchronous motor, frequency converter

1. WSTĘP

Celem artykułu jest analiza współpracy przewzbudzonego jawnobiegunowego silnika synchronicznego z typowym tranzystorowym przemiennikiem częstotliwości o tranzystorach sterowanych według zasady modulacji szerokości impulsów (PWM), dedykowanym do zasilania silników asynchronicznych [1]. Możliwość takiej współpracy budzi wątpliwości wynikające z faktu wydawania przez przewzbudzoną maszynę synchroniczną mocy biernej, co jest bezpośrednim skutkiem wielkości wewnętrznej SEM takiej maszyny – jest ona istotnie większa od napięcia zasilającego. Producenci przemienników częstotliwości na ogół dopuszczają ich współpracę z odbiorami o $\cos\phi_{\text{ind}} \leq 1$. Takimi odbiorami są m.in. silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Ich współczynniki mocy są wysokie (typowo $\geq 0,95$), ale indukcyjne. W materiałach katalogowych [3] brak jednoznacznych informacji o możliwości współpracy z odbiorami o pojemnościowym współczynniku mocy.

2. MODEL UKŁADU NAPĘDOWEGO Z SILNIKIEM SYNCHRONICZNYM

Model stworzono w środowisku Simulink pakietu MATLAB ver. 6.5, korzystając z gotowych modeli półprzewodnikowych przyrządów mocy i samej maszyny synchronicznej zawartych w bibliotece SimPowerSystems. Model obejmuje przemiennik częstotliwości i silnik synchroniczny. Model przemiennika złożony jest z prostownika diodowego, obwodu pośredniczącego prądu stałego i tranzystorowego falownika wraz z diodami bocznikującymi, pracującego z modulacją szerokości impulsów (rys. 1) [3]. Zastosowano tutaj prostą metodę modulacji symetrycznego przebiegu trójkątnego

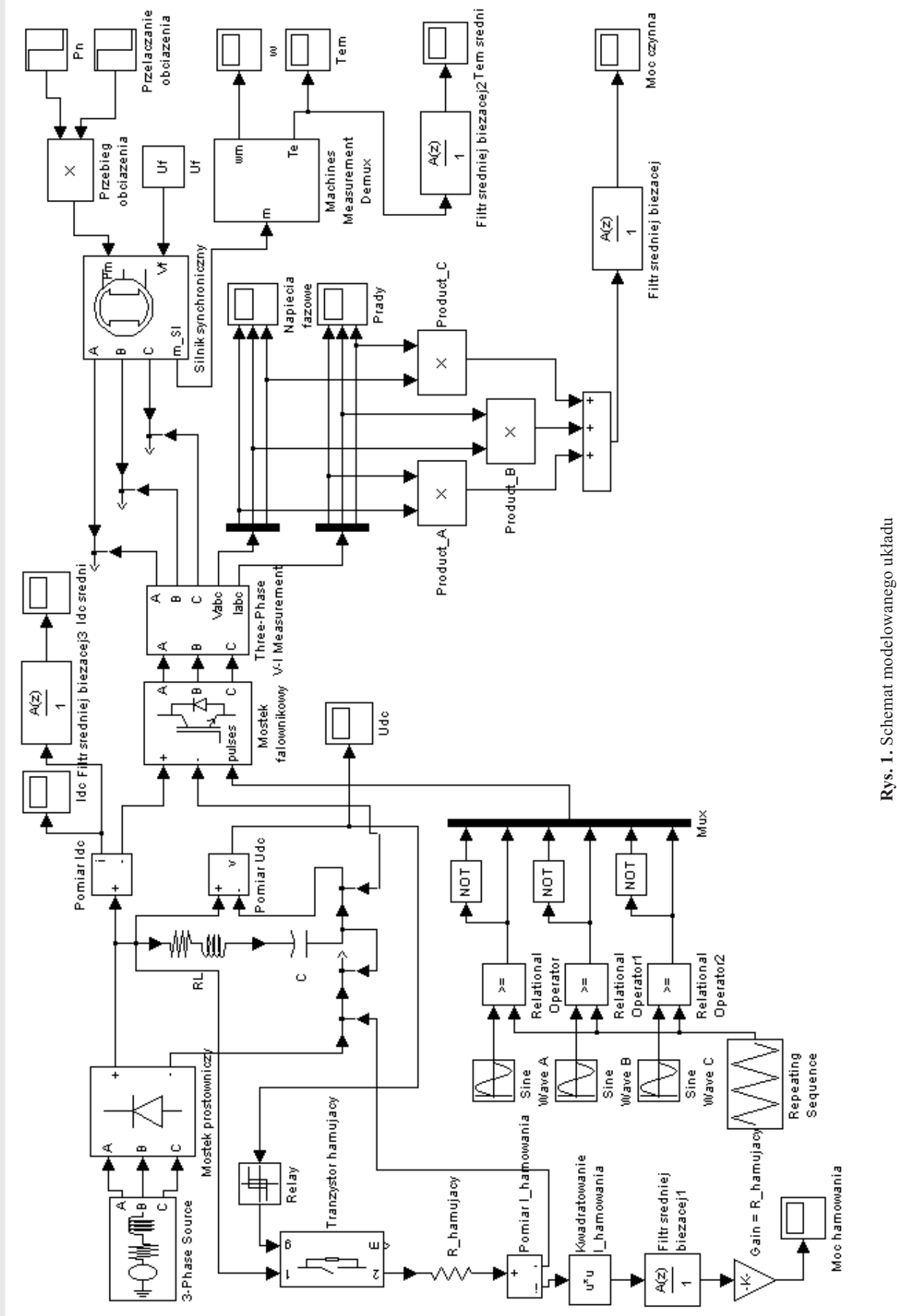
sinusoidami pożądaných napięć maszyny. Napięcie zasilające przemiennik ma wartość taką, aby wartość skuteczna podstawowej harmonicznej napięcia przewodowego przy przyjętej metodzie modulacji była równa napięciu znamionowemu maszyny (400 V). Kondensator w obwodzie pośredniczącym prądu stałego ma pojemność 4000 μF . Zasilona maszyna to znajdująca się w Laboratorium Maszyn Elektrycznych KME AGH jawnobiegunowa maszyna synchroniczna o danych znamionowych: $P = 3,2 \text{ kW}$, $U = 400 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $I = 5,8 \text{ A}$, $\cos\phi = 0,8 \text{ poj.}$, $n = 1500 \text{ obr./min}$, $I_w = 11,5 \text{ A}$. Maszyna posiada klatkę.

Symulacje prowadzono bez rozruchu silnika, zakładając, że jego początkowa prędkość jest równa synchronicznej i wynosi 1500 obr./min. W takiej sytuacji kolejno zamodelowano:

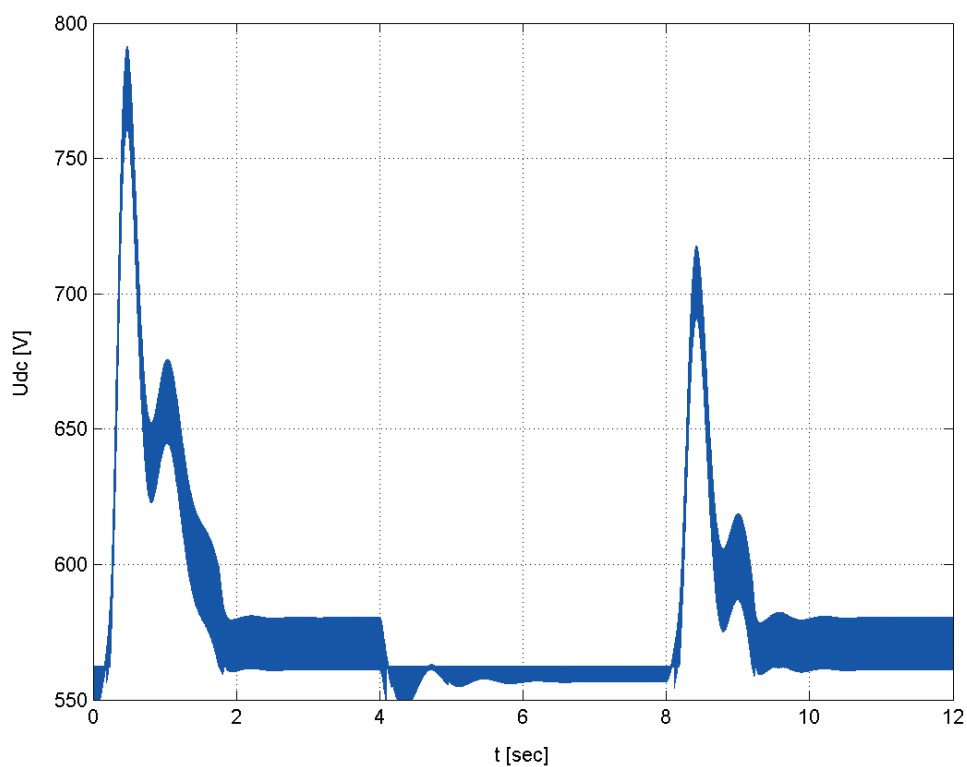
- załączenie wzbudzenia przy zerowym momencie obciążenia ($t = 0 \text{ s}$),
- skokowe obciążenie mocą znamionową ($t = 4 \text{ s}$)
- skokowe odciążenie od mocy znamionowej do zerowej ($t = 8 \text{ s}$).

Wyliczano przebiegi: napięcia na kondensatorze obwodu pośredniczącego prądu stałego, prądu płynącego pomiędzy obwodem prądu stałego a maszyną, prędkości maszyny, mocy czynnej pobieranej przez silnik z przemiennika częstotliwości, elektromagnetycznego momentu średniego maszyny (rys. 2–7). Moc czynną pobieraną liczono na drodze dolnoprzepustowej filtracji częstotliwościowej przebiegu czasowego elektrycznej mocy chwilowej filtrem średniej bieżącej o oknie czasowym 10 ms (rys. 1) [2]. Przebiegi: momentu średniego maszyny i średniego prądu stałego uzyskano z przebiegów naturalnych przez ich filtrację dolnoprzepustową taką jak przy pomiarze mocy czynnej pobieranej (rys. 4, 7, 9) [2].

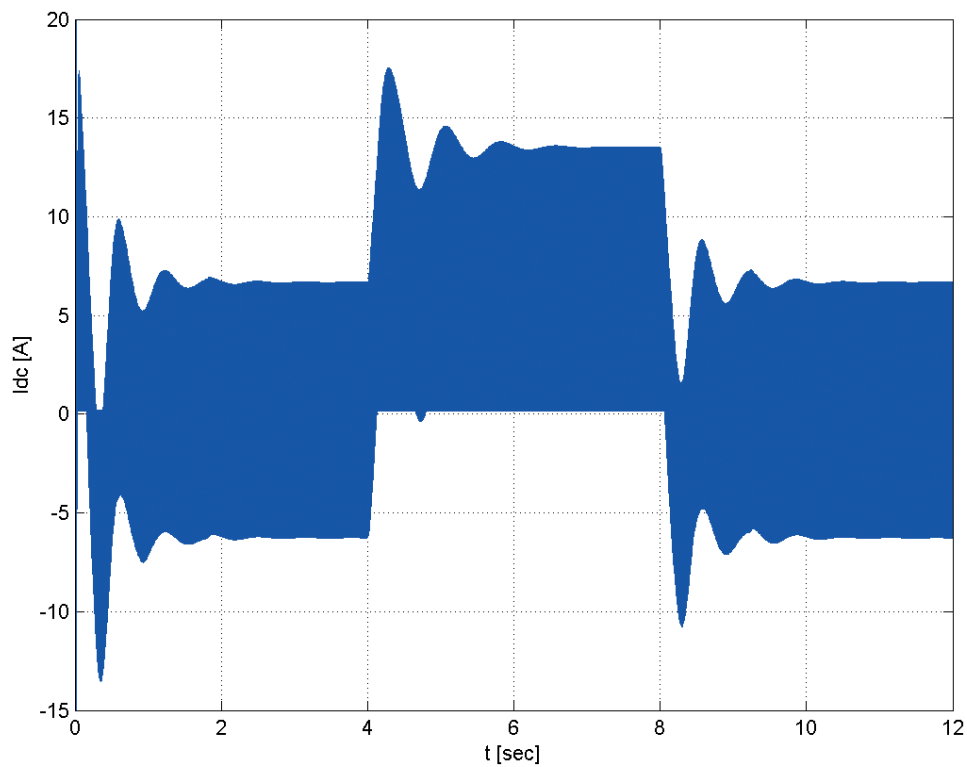
* Katedra Maszyn Elektrycznych Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie



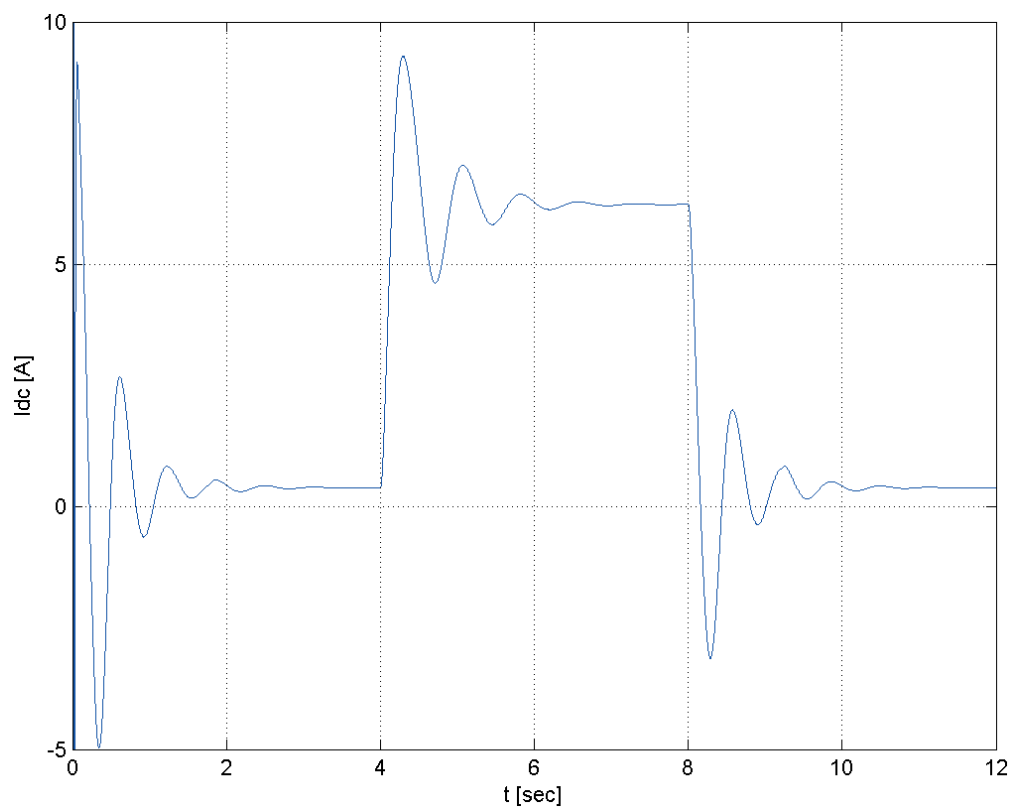
Rys. 1. Schemat modelowanego układu



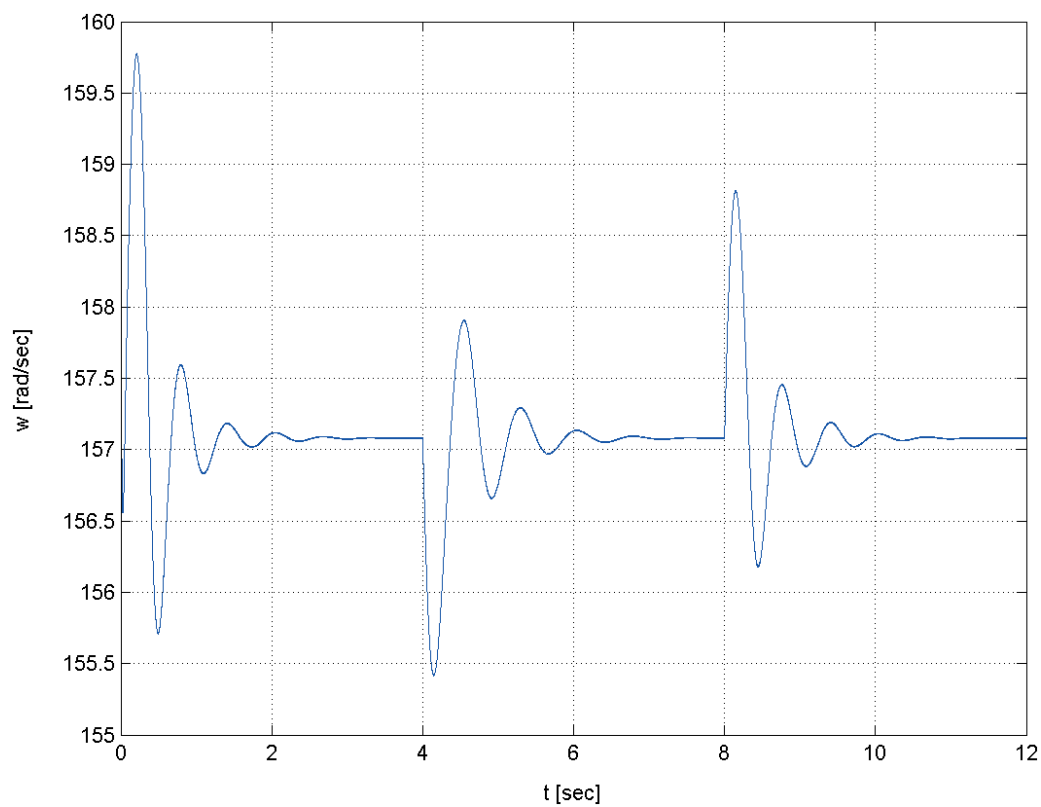
Rys. 2. Przebieg napięcia na kondensatorze w obwodzie pośredniczącym napięcia stałego



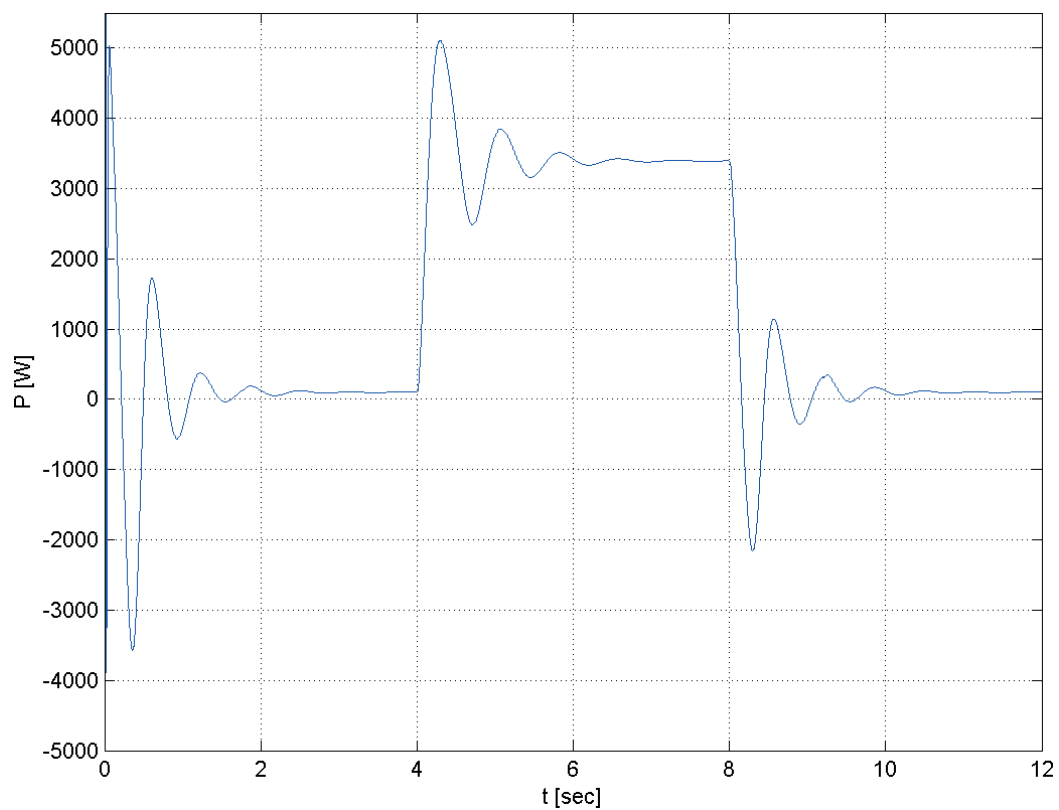
Rys. 3. Przebieg prądu obwodu pośredniczącego prądu stałego płynącego pomiędzy falownikiem z silnikiem synchronicznym a obwodem prądu stałego (prąd < 0 to prąd płynący od maszyny do kondensatora)



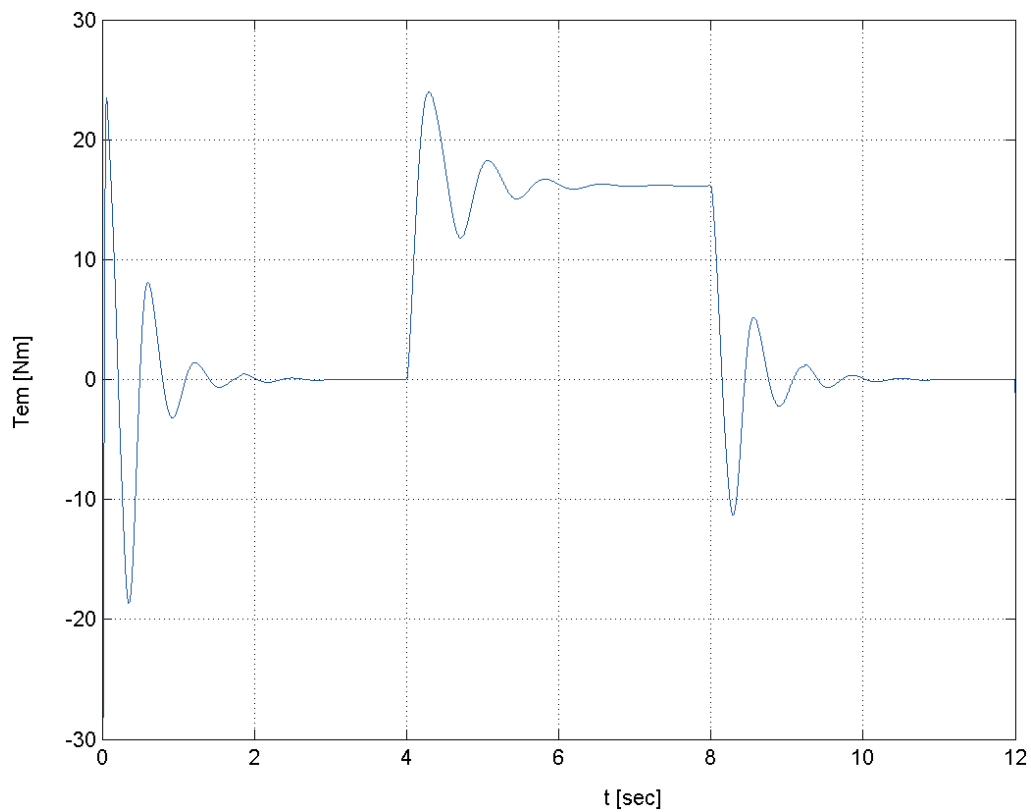
Rys. 4. Przebieg uśrednionego prądu obwodu pośredniczącego prądu stałego płynącego pomiędzy falownikiem z silnikiem synchronicznym a obwodem prądu stałego (prąd < 0 to prąd płynący od maszyny do kondensatora)



Rys. 5. Przebieg prędkości maszyny



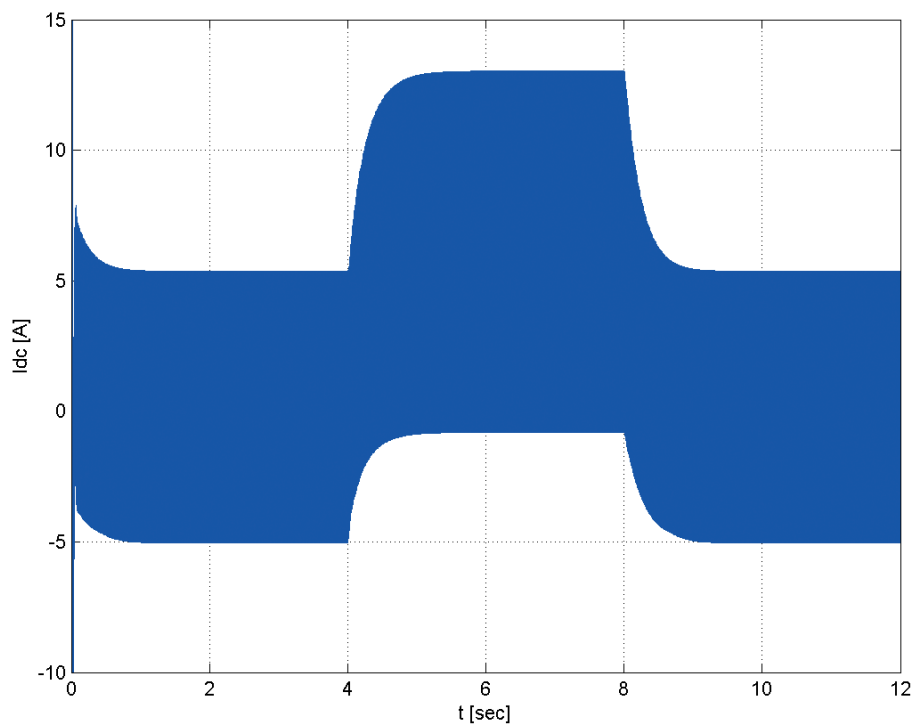
Rys. 6. Przebieg mocy czynnej pobieranej przez silnik z falownika



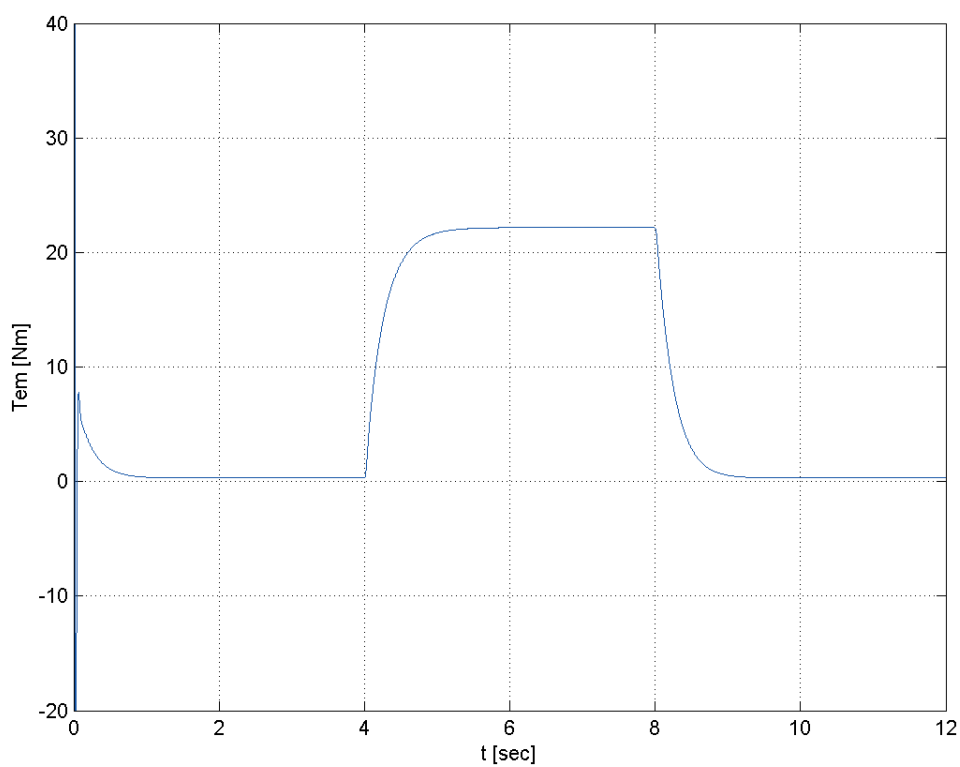
Rys. 7. Przebieg elektromagnetycznego momentu średniego maszyny

Uzyskane przebiegi porównano z analogicznymi przebiegami obliczeniowymi identycznego układu napędowego

z maszyną indukcyjną – przykładowe przebiegi przedstawiono na rysunkach 8, 9.



Rys. 8. Przebieg prądu obwodu pośredniczącego prądu stałego płynącego pomiędzy falownikiem z silnikiem indukcyjnym a obwodem prądu stałego



Rys. 9. Przebieg elektromagnetycznego momentu średniego maszyny indukcyjnej

Pochodzą one z symulowanej maszyny indukcyjnej o parametrach modelu obwodowego analogicznych do parametrów modelu badanej maszyny synchronicznej. Identyczne są: rezystancja i indukcyjność rozproszenia stojana, rezystancja i indukcyjność rozproszenia klatki wirnika (w osiach „d” i „q” identyczne, z uwagi na cylindryczność wirnika maszyny indukcyjnej i symetrię jej klatki), moment bezwładności wirnika i liczba par biegunów.

Natomiast arbitralnie powiększono dwukrotnie w stosunku do maszyny synchronicznej indukcyjność magnesującą ($L_\mu = L_{ad} = L_{aq}$) z uwagi na typowo mniejszą szczelinę powietrzną w maszynach indukcyjnych.

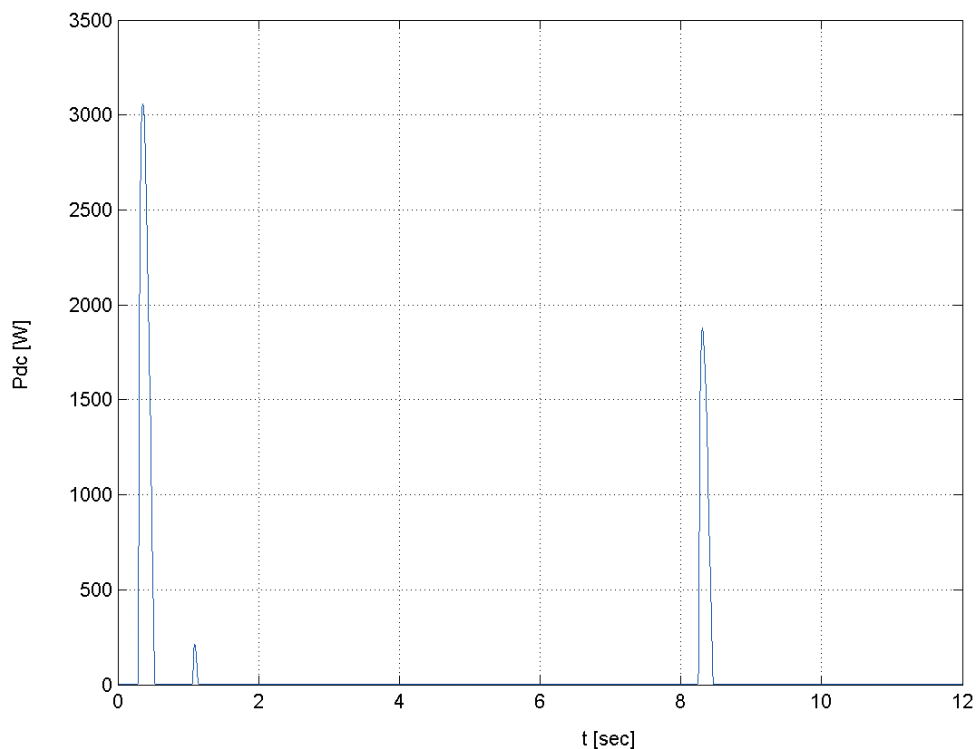
Analiza uzyskanych przebiegów i porównanie ich z analogicznymi przebiegami dla maszyny indukcyjnej pozwala sformułować następujące wnioski:

- 1) Podczas pracy kompensatorowej ($t = 0-4$ s) maszyna synchroniczna wymienia energię z kondensatorem obwodu pośredniczącego, co oznacza przepływ mocy bierniej. Prąd płynie na przemian z maszyny do kondensatora i z kondensatora do maszyny, przy czym częstotliwość zmian kierunku tego prądu jest dyktowana przez przełączenia tranzystorów mostka falownikowego. Podczas ładowania kondensatora prąd płynie przez diody bocznikujące tranzystory. Wartość średnia prądu I_{dc} jest większa od zera (rys. 2 i 3), co wynika ze strat mocy na biegu jałowym. Proces wymiany energii nie zostaje zaburzony również w sytuacji kiedy szeregowo z kondensatorem połączona jest indukcyjność, w modelu 100 nH (praktycznie chodziło o odwzorowanie indukcyjności pasożytniczych). Nie ma tu żadnej istotnej różnicy w stosunku do sytuacji współpracy przemiennika z maszyną asynchroniczną pracującą

na biegu jałowym, kiedy to prąd płynie również na przemian z obwodu prądu stałego do maszyny lub z maszyny do kondensatora (rys. 8). W przypadku wystąpienia oscylacji prędkości (na początku symulacji, po włączeniu wzbudzenia) dochodzi chwilowo do pracy generatorowej (gdy moment maszyny $T_{em} < 0$; wówczas $\frac{d\omega}{dt} < 0$), co po-

woduje niebezpieczny wzrost napięcia na kondensatorze. Wzrost ten jest większy niż w przypadku układu napędowego z maszyną asynchroniczną ponieważ oscylacje momentu i prędkości w jawnobiegunowej maszynie synchronicznej są generalnie gorzej tłumione niż w maszynie indukcyjnej; tak jest również w tym przypadku. Gorsze tłumienie oscylacji jest skutkiem istnienia wysokiej wewnętrznej SEM maszyny przewzbudzonej oraz niepełnej klatki w maszynie jawnobiegunowej (pręty klatki są umieszczone tylko w nabiegunnikach biegunów wzbudzenia).

- 2) Po skokowym obciążeniu silnika mocą (tutaj znamionową) i podczas jego pracy silnikowej ($t = 4-8$ s) nadal w pewnych chwilach czasowych kondensator jest ładowany, ale wartość średnia tego prądu jest zdecydowanie większa od zera. W przypadku wystąpienia oscylacji prędkości do pracy generatorowej maszyny nie dochodzi (moment elektromagnetyczny maszyny pozostaje ciągle większy od zera) i dlatego nie dochodzi do niebezpiecznych wzrostów napięcia na kondensatorze.
- 3) Przy skokowym odciążeniu ($t = 8-12$ s) moment elektromagnetyczny maszyny przyjmuje chwilowo wartości ujemne, co oznacza pracę generatorową, która powoduje niebezpieczny wzrost napięcia w obwodzie prądu stałego.



Rys. 10. Przebieg czasowy strat mocy na rezystorze hamowania przy ograniczeniu dopuszczalnego napięcia w obwodzie prądu stałego do 610 Vdc

3. WNIOSKI

Typowy przemiennik częstotliwości może współpracować z przewzbudzoną maszyną synchroniczną, jeśli posiada możliwość hamowania prądnicowego zasilanej maszyny ze zwrotem energii na rezystor hamujący lub do sieci zasilającej. Przy wykorzystywaniu rezystora hamującego należy liczyć się z dodatkowymi stratami mocy w napędzie w jego stanach nieustalonych. Rysunek 10 przedstawia te straty dla sytuacji obliczeniowej jak z rysunków 2–7, przy ograniczeniu dopuszczalnego napięcia stałego do 610 V. Brak możliwości oddawania mocy podczas chwilowej pracy generatorowej maszyny może spowodować niebezpieczny wzrost napięcia w pośredniczącym obwodzie prądu stałego i awaryjne wyłączenie przemiennika.

W przedstawionym układzie napędowym moc bierna wymieniana jest pomiędzy kondensatorem w obwodzie prądu stałego a silnikiem, a więc przy zastosowaniu prostownika diodowego na wejściu przekształtnika cały napęd dla sieci zasilającej ma $\cos\varphi \cong 1$ (abstrahując od silnego odkształcenia od sinusoidy przebiegów prądów pobieranych przez prostownik diodowy z sieci). Z punktu widzenia użytkownika napędu traci on więc zdolność do kompensacji mocy biernej.

Literatura

- [1] Piróg S.: *Energoelektronika: negatywne oddziaływania układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 1998
- [2] Szafran J., Wiszniewski A.: *Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej*. WNT Warszawa 2001
- [3] Materiały katalogowe firmy Schneider Electric, Przemienniki częstotliwości Altivar 71 i Altivar 61

Wpłynęło: 18.03.2008 r.



Tomasz DRABEK

Urodził się w 1968 roku. Studia ukończył w roku 1991 na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (kierunek: Elektrotechnika). W roku 1991 rozpoczął pracę w Katedrze Maszyn Elektrycznych AGH. Doktorat uzyskał w roku 1999. Interesuje się głównie badaniami zjawisk elektromagnetycznych, towarzyszących dyskretnemu rozkładowi uzwojeń w uzębionych szczelinach powietrznych maszyn elektrycznych wirujących oraz maszynami elektrycznymi z magnesami trwałymi i ich sterowaniem.

e-mail: Tomasz.Drabek@agh.edu.pl



Tomasz LERCH

Urodził się 14 czerwca 1977 roku w Jastrzębiu Zdroju. Dyplom mgr. inż. elektryka uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH w 2003 roku. Od 2004 roku zatrudniony jest w Katedrze Maszyn Elektrycznych AGH na stanowisku asystent. Zainteresowania: energetyka odnawialna, w szczególności elektrownie wiatrowe oraz sterowanie maszyn indukcyjnych.

e-mail: lerch@agh.edu.pl