

OLESIAK Krzysztof¹

BADANIA POMIAROWE NAPĘDU PRĄDU PRZEMIENNEGO Z TRÓJFAZOWYM PRZEMIENNIKIEM CZĘSTOTLIWOŚCI

W referacie zaprezentowano komputerowy układ do pomiarów i wizualizacji wybranych wielkości elektromechanicznych napędu prądu przemiennego. Scharakteryzowano podstawowe parametry trójfazowego przełącznika częstotliwości oraz zasady ich konfiguracji. Przeprowadzono badania pomiarowe układu napędowego podczas rozruchu, rewersu oraz hamowania. Rezultaty badań przełącznika częstotliwości przedstawiono w postaci przebiegów czasowych prędkości obrotowej, napięcia międzyfazowego oraz prądu fazowego.

MEASUREMENT RESEARCH OF THE ALTERNATING CURRENT DRIVE WITH THE THREE-PHASE FREQUENCY CONVERTER

The paper presents a computer system for measurements and visualization of selected electromechanical quantities of the alternating current drive. Basic parameters and configuration rules of the three-phase frequency converter have been characterized. Measurement tests of the drive system were carried out during start-up, reverse and braking. The research results of the frequency converter were presented in the form of time characteristics of the rotational speed, the phase-to-phase voltage and the phase current.

1. WSTĘP

Przełączniki częstotliwości wykorzystywane do zasilania silników asynchronicznych klatkowych znajdują obecnie bardzo szerokie zastosowanie w przemyśle. Układy te umożliwiają rozruch, hamowanie oraz płynną regulację prędkości obrotowej napędu. Jednocześnie charakteryzują się wysoką sprawnością energetyczną i dużą niezawodnością, która jest bardzo ważna w przypadku napędów przemysłowych pracujących w ruchu ciągłym [2, 3].

Niezwykle istotnym zagadnieniem jest prawidłowy dobór parametrów przełącznika takich jak: minimalna i maksymalna częstotliwość napięcia wyjściowego, czas narastania napięcia w trakcie rozruchu, wartość momentu hamowania, czas hamowania oraz wartość maksymalnego prądu wyjściowego. W wielu praktycznych rozwiązaniach układów napędowych występuje jednak konieczność weryfikacji parametrów zadanych oraz

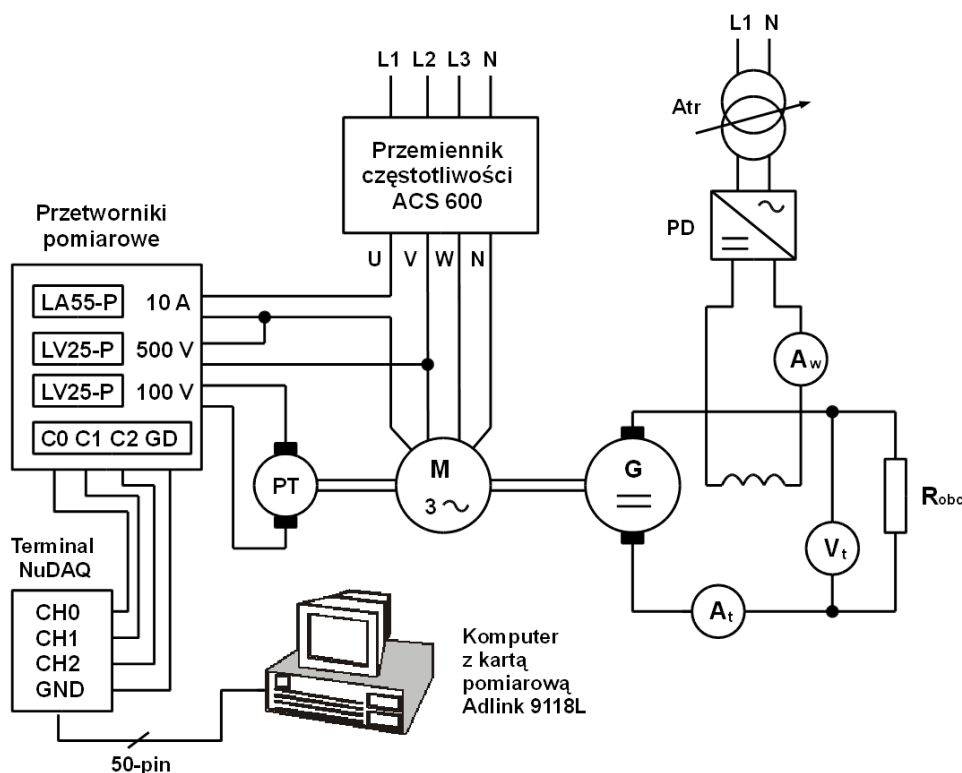
¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, tel.: + 48 34 32 50 884, fax: + 48 34 32 50 821, e-mail: kolesiak@el.pcz.czest.pl

rzeczywistych. Niezbędna jest wówczas realizacja komputerowego układu umożliwiającego rejestrację i wizualizację wybranych wielkości elektromechanicznych napędu takich jak: prędkość obrotowa, prąd fazowy oraz napięcie międzyfazowe.

2. NAPĘD ASYNCHRONICZNY Z PRZEMIENNIKIEM CZĘSTOTLIWOŚCI

Układ napędowy składa się z silnika asynchronicznego klatkowego oraz połączonej z nim za pomocą sztywnego mechanicznego wału maszyny obcowzbudnej prądu stałego, która pracuje jako generator. Silnik asynchroniczny jest zasilany przy wykorzystaniu 3-fazowego przemiennika częstotliwości ACS 600 firmy ABB. Z wirnikiem silnika prądu przemiennego mechanicznie połączono prądnicę tachometryczną, która służy do pomiaru prędkości obrotowej układu napędowego.

Schemat połączeń zrealizowanego układu pomiarowego oraz napędu prądu przemiennego zaprezentowano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat połączeń napędu asynchronicznego z przemiennikiem częstotliwości oraz komputerowego układu pomiarowego

Zestawienie elementów badanego napędu prądu przemiennego oraz układu pomiarowego wraz z podstawowymi parametrami przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry elementów układu napędowego oraz pomiarowego

Oznaczenie	Nazwa oraz podstawowe parametry
ACS 600	Trójfazowy przemiennik częstotliwości $P_N = 4,0\text{kW}$; $I_N = 11,0\text{A}$; $U_{N1} = 380\div 415\text{V}$; $f_1 = 48\div 63\text{Hz}$; $U_{N2} = 0\div U_{N1}$; $f_2 = 0\div 300\text{Hz}$; $\cos\varphi = 0,97$; $\eta_N = 98\%$
M	Silnik asynchroniczny klatkowy $P_N = 4,0\text{kW}$; $U_N = 220\text{V}/380\text{V}$; $I_N = 14,6\text{A}/8,5\text{A}$; $n_N = 1430\text{ obr/min}$; $\cos\varphi = 0,85$
G	Maszyna obcowzbudna prądu stałego $P_N = 5,5\text{ kW}$; $U_{IN} = 220\text{V}$; $I_{IN} = 28,0\text{A}$; $U_{wN} = 220\text{V}$; $I_{wN} = 0,91\text{A}$; $n_N = 1450\text{ obr/min}$
PT	Prądnicza tachometryczna: 1000 obr/min - 20V
PD	Prostownik diodowy: $U_d = 250\text{V}$; $I_d = 2\text{A}$
Atr	Autotransformator: $U_{zas} = 230\text{V}$; $U_{wv} = 0\div 230\text{V}$; $I_N = 10\text{A}$
R _{obc}	Rezystancja obciążenia obwodu twornika: $R = 12\Omega$; $I_{max} = 20\text{A}$
LV25-P	Przetworniki napięciowe: zakresy pomiarowe 100V, 500V, dokładność pomiaru $\pm 0,8\%$, liniowość $\pm 0,2\%$, czas reakcji 40 μs
LA55-P	Przetwornik prądowy: zakres pomiarowy 10A, dokładność pomiaru $\pm 0,65\%$, liniowość $\pm 0,15\%$, czas reakcji 40 μs
V _t	Woltomierz: zakres pomiarowy 300V, klasa 0.5
A _t	Amperomierz: zakres pomiarowy 20A, klasa 0.5
A _w	Amperomierz: zakres pomiarowy 2A, klasa 0.5

Przemiennik ACS 600 funkcjonuje przy wykorzystaniu metody bezpośredniego sterowania momentem (ang. Direct Torque Control - DTC) [1]. Metoda ta pozwala na uzyskanie korzystniejszych właściwości regulacyjnych w porównaniu z konwencjonalną metodą PWM. Zasada działania metody DTC polega na cyklicznym wyznaczaniu odpowiedniej sekwencji sterującej przełączaniem elementów półprzewodnikowych w falowniku napięcia w zależności od aktualnego stanu elektromagnetycznego silnika prądu przemiennego. Wartość chwilowa momentu elektromagnetycznego silnika asynchronicznego jest proporcjonalna do iloczynu wektorów strumienia sprzężonego stojana i wirnika [4], czyli:

$$M_e = c_m \cdot (\underline{\Psi}_s \times \underline{\Psi}_r) = c_m \cdot \Psi_s \cdot \Psi_r \cdot \sin \vartheta_\Psi \quad (1)$$

gdzie: $\underline{\Psi}_s$, $\underline{\Psi}_r$ - wektory strumieni sprzężonych stojana i wirnika,

ϑ_Ψ - kąt między wektorami strumieni stojana i wirnika,

c_m - stała zależna od parametrów konstrukcyjnych silnika,

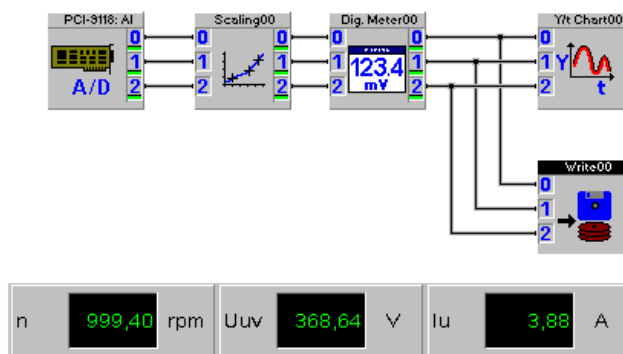
W przypadku, gdy ϑ_{ψ} należy do przedziału $(0, \pi)$ to wówczas wektor strumienia stojana wyprzedza wektor strumienia wirnika i powstaje moment napędowy skierowany zgodnie ze zwrotem prędkości obrotowej. Przy odwrotnym wzajemnym położeniu wektorów stojana i wirnika wytwarzany jest moment hamujący. Zmianę wartości bezwzględnej momentu elektromagnetycznego można uzyskać nie tylko przez zmianę modułów strumieni, ale także poprzez zmianę kąta między ich wektorami [2].

Dla potrzeb prowadzonych badań zrealizowano układ pomiarowy składający się z komputera stacjonarnego wyposażonego w specjalistyczne oprogramowanie DasyLab oraz kartę pomiarową Adlink 9118L z 12-bitowym przetwornikiem A/C o maksymalnej częstotliwości próbkowania na poziomie 100 kHz. Karta pomiarowa umożliwia jednoczesną rejestrację i wizualizację sygnałów napięciowych maksymalnie na ośmiu kanałach bipolarnych.

Ze względu na konieczność separacji galwanicznej obwodów napięciowych i prądowych napędu przekształtnikowego od układu pomiarowego zastosowano przetworniki firmy LEM o odpowiednio dobranych zakresach [6]. W obwodach pomiarowych napięcia międzyfazowego i prędkości obrotowej zastosowano przetworniki napięciowe LV25-P, a w obwodzie prądu fazowego wykorzystano przetwornik prądowy LA55-P.

Do zapisu przebiegów czasowych napięcia międzyfazowego U_{UV} , prądu fazowego I_U oraz prędkości obrotowej n napędu przekształtnikowego prądu przemiennego zastosowano oprogramowanie DASYLab w wersji 7.0 [5]. Sygnały pomiarowe odczytywane przez trzy kanały karty Adlink 9118L są wprowadzane do modułu skalowania w celu ponownego przeliczenia na wartości rzeczywiste występujące w układzie napędowym. Następnie przeskalowane sygnały są kierowane do modułu mierników cyfrowych. W odniesieniu do napięcia międzyfazowego U_{UV} oraz prądu I_U wyznaczane są wartości skuteczne, a w przypadku prędkości obrotowej n wartość średnia w danym przedziale czasu. W końcowej fazie otrzymane przebiegi czasowe są prezentowane na ekranie w postaci graficznej oraz zapisywane na dysku w pliku zgodnie z własnym standardem programu DASYLab.

Schemat zrealizowanego układu do skalowania, wizualizacji i zapisu wybranych przebiegów czasowych układu napędowego zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy układu do zapisu i wizualizacji przebiegów czasowych wielkości elektromechanicznych napędu przekształtnikowego prądu przemiennego

3. BADANIA POMIAROWE NAPĘDU PRĄDU PRZEMIENNEGO

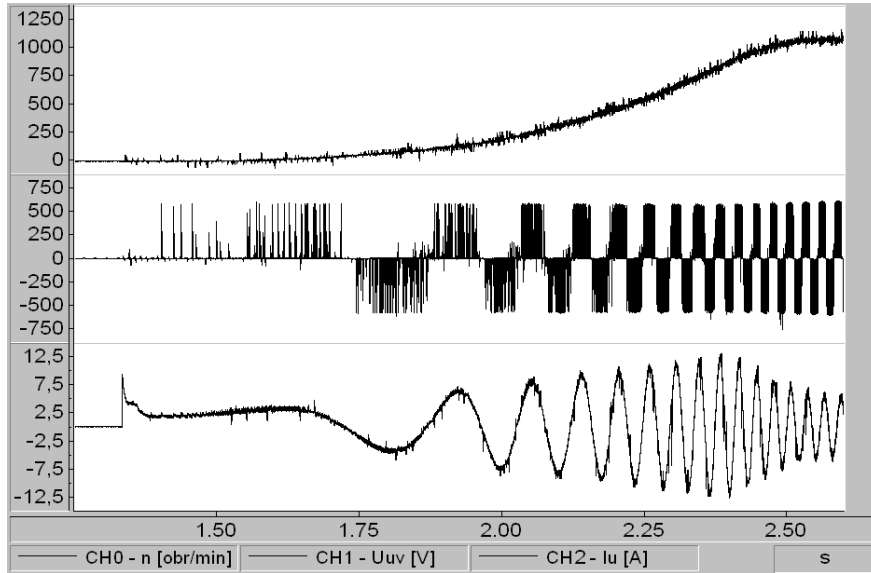
Podstawowym elementem badanego układu napędowego jest trójfazowy przemiennik częstotliwości ACS 600. Część silnoprządowa przekształtnika składa się z prostownika, obwodu pośredniczącego napięcia stałego z baterią kondensatorów oraz falownika. Do obwodu pośredniczącego dołączony jest układ hamowania z dodatkowym zewnętrznym rezystorem. Zastosowanie falownika umożliwia przetwarzanie napięcia stałego na napięcie zmienne, które zasilają silnik asynchroniczny. W przypadku hamowania falownik zapewnia możliwość przepływu energii elektrycznej do rezystora w celu rozproszenia w postaci ciepła.

Przemiennik częstotliwości ACS 600 umożliwia uzyskanie informacji dotyczących bieżących wartości wybranych wielkości fizycznych. Zestawienie najważniejszych z nich zaprezentowano w tabeli 2.

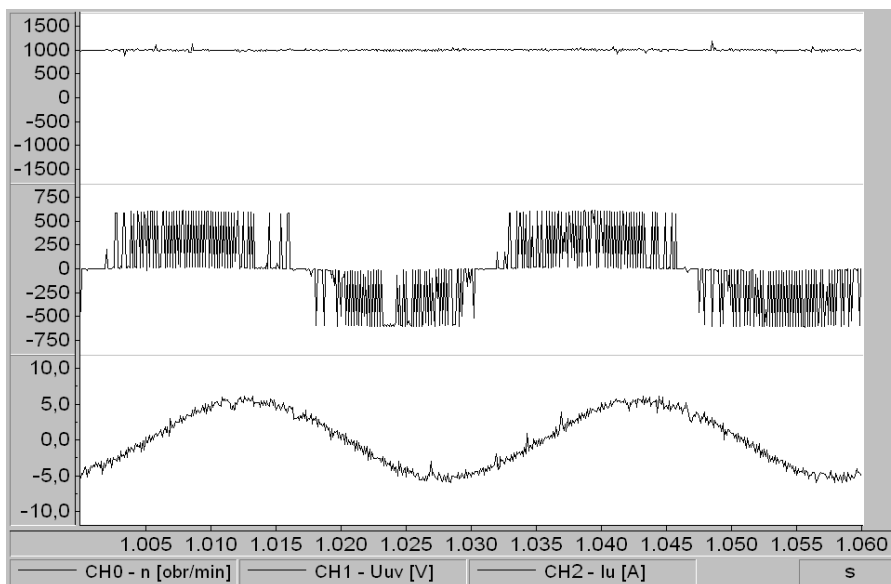
Tab. 2. Zestawienie bieżących wartości wielkości fizycznych przemiennika ACS 600 [1]

Numer i nazwa	Zakres	Opis
01 PROCESS SPEED	0 ... 100000/ jednostki użytkownika	Prędkość oparta na skali i jednostkach według nastaw użytkownika
02 SPEED	rpm (=obr/min)	Prędkość obliczona silnika
03 FREQUENCY	Hz	Obliczona częstotliwość zasilania silnika
04 CURRENT	A	Pomierzony prąd silnika
05 TORQUE	%	Obliczony moment obrotowy silnika i wyrażony w procentach momentu znamionowego
06 POWER	%	Moc silnika wyrażona w procentach mocy znamionowej
07 DC BUS VOLTAGE	V	Pomierzone napięcie obwodu pośredniczącego
08 MAIN VOLTAGE	V	Obliczone napięcie zasilania
09 OUTPUT VOLTAGE	V	Obliczone napięcie silnika
10 ACS 600 TEMP	C	Temperatura radiatora
11 EXTERNAL REF 1	obr/min; Hz	Zewnętrzna wartość zadana 1. Hz jest jednostką dla trybu SCALAR
12 EXTERNAL REF 2	%	Zewnętrzna wartość zadana 2
13 CTRL LOCATION	LOCAL; EXT1; EXT2	Tryb sterowania aktywnego
14 HOUR COUNTER	h	Zegar czasu pracy

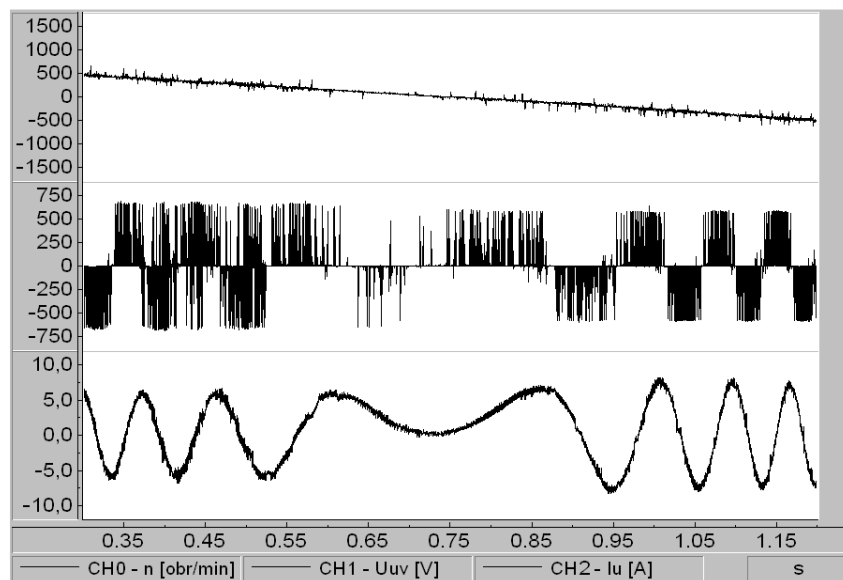
Badania pomiarowe układu napędowego przeprowadzono dla następujących stanów pracy: rozruch, rewers oraz hamowanie układu przy stałym momencie obciążenia. Wybrane rezultaty badań obejmujące przebiegi czasowe prędkości obrotowej, napięcia międzyfazowego oraz prądu fazowego przedstawiono na rys. 3-6.



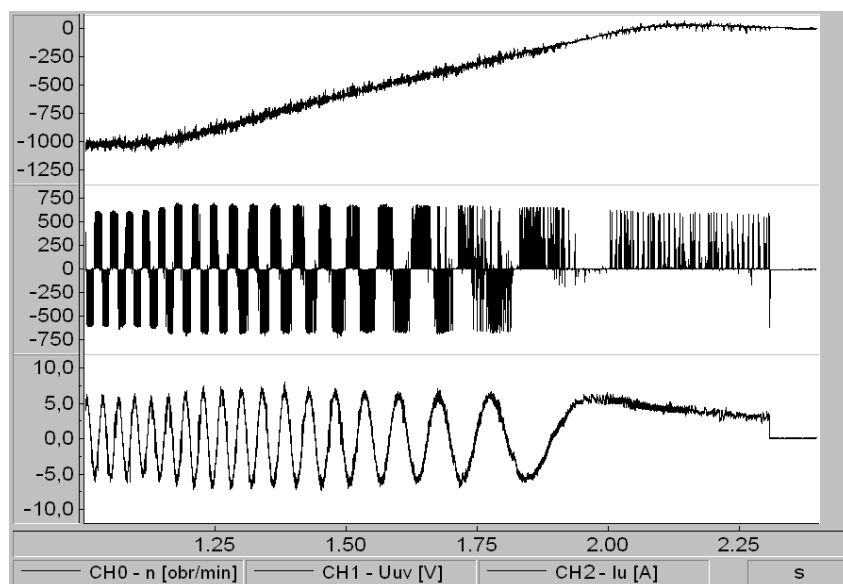
Rys. 3. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej n , napięcia międzyfazowego U_{UV} i prądu fazowego I_U przy rozruchu układu napędowego ($n_z = 1000$ obr/min, $M_{obc} = 0,25M_N$)



Rys. 4. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej n , napięcia międzyfazowego U_{UV} i prądu fazowego I_U dla ustalonego stanu pracy układu napędowego ($n_z = 1000$ obr/min, $M_{obc} = 0,25M_N$)



Rys. 5. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej n , napięcia międzyfazowego U_{UV} i prądu fazowego I_U przy rewersie układu napędowego ($n_1 = 500$ obr/min, $n_2 = -500$ obr/min, $M_{obc} = 0,25M_N$)



Rys. 6. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej n , napięcia międzyfazowego U_{UV} i prądu fazowego I_U przy hamowaniu układu napędowego ($n_z = 1000$ obr/min, $M_{obc} = 0,25M_N$)

4. WNIOSKI

Przedstawiony komputerowy układ do pomiarów, rejestracji i wizualizacji wielkości elektromechanicznych napędu asynchronicznego zasilanego przez trójfazowy przemiennik częstotliwości z bezpośrednim sterowaniem momentem pozwala na dokładną analizę przebiegów czasowych napięcia międzyfazowego, prądu fazowego oraz prędkości obrotowej. Poprzez odpowiedni dobór parametrów przemiennika ACS 600 można przeprowadzić łagodny rozruch układu napędowego pod obciążeniem przy jednoczesnym ograniczeniu prądu rozruchowego na poziomie wartości prądu nominalnego silnika asynchronicznego. Taki przykładowy rozruch napędu przedstawiono na rys. 3. Skala czasu została dobrana w taki sposób, aby zaprezentować pełny przebieg prędkości tzn. od wartości zerowej do zadanej.

Kształt napięcia międzyfazowego, które składa się z impulsów o różnej szerokości powoduje występowanie w przebiegu czasowym prądu silnika składowej zmiennej o częstotliwości odpowiadającej przełączaniu elementów półprzewodnikowych przemiennika. Jest to zjawisko niekorzystne, ale w nowoczesnych przekształtnikach amplituda składowej zmiennej jest stosunkowo niewielka w odniesieniu do amplitudy składowej sinusoidalnej prądu. Przykładową ilustrację tego zagadnienia przy pracy napędu ze stałą prędkością przedstawiono na rys. 4.

Przemiennik częstotliwości z bezpośrednim sterowaniem momentem bardzo dobrze sprawdza się również w przypadku rewersu układu pod obciążeniem. Przebieg prędkości praktycznie liniowo zmienia się od prędkości początkowej do końcowej. Natomiast prąd płynnie zmienia się przy bardzo niewielkiej częstotliwości składowej sinusoidalnej. Zostało to zaprezentowane na rys. 5. Przemiennik częstotliwości ACS 600 umożliwia również hamowanie układu napędowego. Energia uzyskiwana podczas hamowania wydziela się w postaci ciepła na dodatkowym zewnętrznym rezystorze, który stanowi standardowe wyposażenie układu. Przebiegi czasowe przy hamowaniu napędu przedstawiono na rys. 6.

Opracowany komputerowy układ pomiarowy umożliwia przeprowadzenie badań przemiennika częstotliwości zasilającego silnik asynchroniczny w warunkach rozruchu, hamowania, rewersu oraz regulacji prędkości obrotowej. Otrzymane rezultaty pozwalają na dokonanie weryfikacji parametrów zadanych oraz rzeczywistych układu napędowego.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] ABB Centrum Automatyki: *Podręcznik programowania ACS 600*, 1999.
- [2] ABB Drive: *Direct torque control - the world's most advanced AC drive technology*, *Technical guide No. 1*, 2011.
- [3] Barlik R., Nowak M.: *Technika tyrystorowa*, Warszawa, WNT 1994.
- [4] Boldea I., Nasar S. A.: *Electric Machine Dynamics*, New York, Macmillan Publishing Company 1986.
- [5] DASYTEC: *DASYLab Data Acquisition System Laboratory - User Guide*, version 7.0, Amherst, DASYTEC USA 2002.
- [6] LEM: *Industry Current & Voltage Transducers*, Switzerland, Geneva, LEM International SA 2008.