

Maciej KOZAK\*

## **BADANIA SYMULACYJNE I EKSPERYMENTALNE UKŁADU SYNCHRONIZACJI FAŁOWNIKA NAPIĘCIOWEGO Z PRĄDNICĄ SYNCHRONICZNĄ Z WYKORZYSTANIEM ŚRODOWISKA VISUALDSP++ 5.0**

W artykule przedstawiono działanie algorytmu programowego wykorzystywanego do synchronizacji przekształtnika maszynowego z wirującą prądnicą synchroniczną. Zaproponowany algorytm bazujący na szybkiej transformacji Fouriera Radix-2, umożliwia synchronizację przekształtnika z maszyną o zmiennej w szerokim zakresie prędkości wirowania. Przedstawiono wyniki działania programu symulacyjnego oraz oprogramowania pomocniczego stworzonego w środowisku programistycznym VisualDSP++ 5.0, a także przykładowe wyniki działania algorytmu w laboratoryjnym układzie rzeczywistym.

SŁOWA KLUCZOWE: prądnica elektryczna, falownik maszynowy, FFT, synchronizacja

### **1. SYNCHRONIZACJA PRĄDNICY SYNCHRONICZNEJ Z FAŁOWNIKIEM MASZYNOWYM**

#### **1.1. Wstęp**

Ze względów praktycznych najczęściej stosowanymi w przemyśle i okrętownictwie prądnicami są samowzbudne generatory synchroniczne. W celu zwiększenia efektywności prądnic i napędzających je silników Diesla, dąży się do stworzenia systemu sterowania, który jest w stanie w pełni kontrolować zarówno stronę napędową jak i pracę prądnic. Powiązanie elementów sterowania tymi obiektami pozwala na znaczne oszczędności paliwa. Aby w pełni wykorzystać możliwości nowoczesnych silników spalinowych należy zapewnić im możliwość pracy przy zmieniających się w szerokim zakresie prędkościach wirowania. Prądnica samowzbudna generuje napięcie już w chwili rozpoczęcia wirowania, co powoduje konieczność uzyskania informacji o parametrach tego napięcia w celu dokonania prawidłowego procesu synchronizacji falownika maszynowego z generatorem. W zaprezentowanym układzie pomiar wartości chwilowych

---

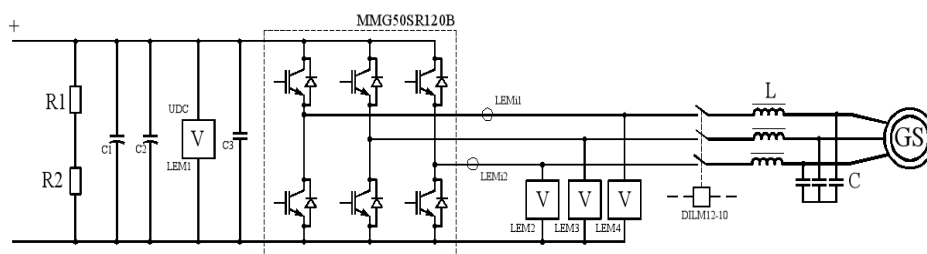
\* Akademia Morska w Szczecinie.

napięć fazowych realizowany jest przez układ FPGA współpracujący z DSP, brak jest bezpośredniej informacji o częstotliwości napięcia. Parametr ten jako jeden z najistotniejszych należy wyznaczyć w układzie czasu rzeczywistego na podstawie pomiarów. W zaproponowanym algorytmie funkcja wyznaczania częstotliwości napięcia realizowana jest w przerwaniami procesora DSP i wykonywana w czasie 150  $\mu$ s. Przed właściwym oprogramowaniem przekształtnika współpracującego z maszyną należało przetestować stworzony algorytm w środowisku programistycznym VisualDSP++ 5.0, aby wyeliminować ewentualne błędy i problemy z np. wyciekami pamięci. Środowisko VisualDSP++ dysponuje bardzo bogatym zestawem narzędzi umożliwiających analizę kodu i jego sprawdzanie przy pomocy wbudowanego symulatora procesorów sygnałowych firmy Analog Devices, które zostały wykorzystane przy tworzeniu funkcji wyznaczania częstotliwości wirującej prądnicy.

## **1.2. Koncepcja układu współpracy falownika tranzystorowego i prądnicy synchronicznej o zmiennej prędkości wirowania wału**

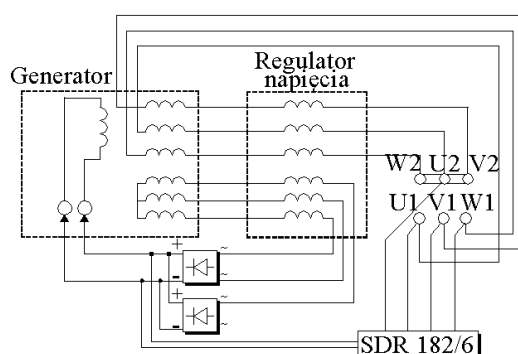
Omawiany układ składa się z przekształtnika dwukierunkowego z obwodem pośredniczącym prądu stałego oraz prądnicy synchronicznej o mocy 6.0 kVA. Przekształtnik zasila obwód pośredniczący prądu stałego i ma za zadanie kontrolę wartości napięcia. Kontrola ta niezbędna jest do rozdziału mocy pomiędzy prądnicami i silnikami napędowymi. Podobnie jak ma to miejsce w sieci elektroenergetycznej należy doprowadzić do synchronizacji falownika z wirującą z nieznaną prędkością maszyną. Jednym z warunków synchronizacji jest równość częstotliwości prądnicy i łączanego falownika. Ze względu na łatwą możliwość regulacji częstotliwości, do pracującego generatora synchronizowany jest falownik maszynowy. Spełnienie warunków synchronizacji zapewnia bezpieczne połączenie dwóch źródeł energii bez występowania niekorzystnych zjawisk takich jak np. przepływ dużych prądów wyrównawczych. Po wykonanym procesie synchronizacji układ sterowania prądnicą synchroniczną steruje przekształtnikiem w sposób odsprężony tzn. niezależnie kontrolowane są wartości prądów czynnego  $i_{sq}$  i biernego  $i_{sd}$ . W przypadku prądnicy samowzbudnej wartość prądu biernego ustawiona jest na poziomie zera a wartość prądu czynnego wynika z pętli regulacyjnej kontroli napięcia stałego.

Analizowany układ składa się z trójfazowego mostka falownikowego wyposażonego dodatkowo w pomiary napięć obwodu pośredniczącego prądu stałego UDC oraz napięć fazowych mierzonych przez przetworniki LEM2, LEM3 i LEM4. Prądnica synchroniczna połączona jest do przekształtnika przez filtr LC oraz przez stycznik załączający prądnicę na szyny przekształtnika przy spełnieniu warunku uzyskania na zaciskach minimalnego napięcia niezbędnego do prawidłowej pracy układu regulacji napięcia stałego.



Rys. 1. Schemat połączenia układu falownika maszynowego i prądnicy synchronicznej [3]

Użyta do badań samowzbudna prądnica synchroniczna generuje napięcie przemiennie na zaciskach, które to napięcie przez transformator trójfazowy zasila mostek prostowniczy. Poprzez szczotki i pierścienie ślizgowe wyprostowane napięcie stałe zasila obwód wzbudzenia prądnicy. Cały układ regulatora napięcia wbudowany jest wewnątrz tabliczki zaciskowej generatora.



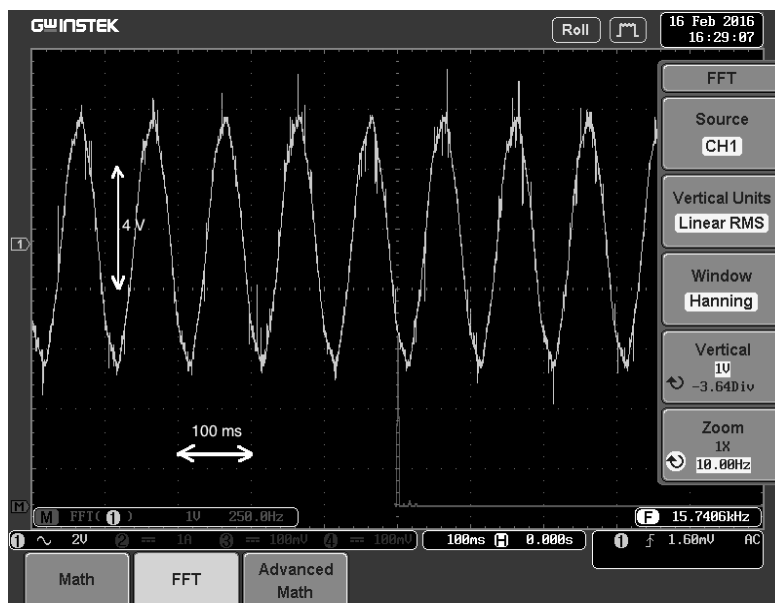
Rys. 2. Schemat układu regulatora napięcia prądnicy synchronicznej BTP3 [2]

Wybrana do badań prądnica synchroniczna nie jest dostosowana do długotrwałej współpracy równoległej z innymi generatorami napięcia sinusoidalnie zmiennego, co wynika m.in. ze zmienności wartości napięcia wyjściowego w zależności od m. in. temperatury uzwojeń i współczynnika mocy obwodu odbiornika i waha się w zakresie od  $\pm 5\%$  (uzwojenia zimne,  $\cos\varphi = 0,8$ ) do  $\pm 10\%$  (uzwojenia ciepłe,  $\cos\varphi = 1$ ).

W przypadku rozpatrywanej prądnicy jest możliwa regulacja napięcia na zaciskach w zakresie ok.  $\pm 10\%$  poprzez zmianę szerokości szczeliny powietrznej w rdzeniu transformatora jednak prądnica musi być wówczas wyłączona.

Jak można zauważyć na przebiegach zarejestrowanych oscyloskopem przebiegi wartości chwilowej napięcia generowanego przez prądnicę odbiegają

kształtem od idealnej sinusoidy, dodatkowo w układzie rzeczywistym zaobserwować można zakłócenia powstające na skutek działania innych odbiorników energoelektronicznych.



Rys. 3. Zarejestrowane przebiegi napięcia jednej fazy prądnicy synchronicznej BTP3 dla prędkości wirowania odpowiadającej 10Hz i spektrum częstotliwości

W rozpatrywanym układzie przyjęto założenie, że zakres prędkości wirowania wykrywany przez algorytm powinien zawierać się w zakresie od 10Hz do 50 Hz. W praktyce pierwsza z podanych wielkości jest zazwyczaj większa i wynosi ok. 20 Hz. Z uwagi na pojawiające się zakłócenia stosowana powszechnie w technice okrętowej metoda wykrywania częstotliwości polegająca na pomiarze czasu pomiędzy przekraczaniem wartości zerowej może okazać się niewystarczająca. W nowoczesnych układach wykorzystujących przekształtniki chętnie sięga się po metodę wykorzystującą algorytm Szybkiej Transformaty Fouriera (FFT) sygnału napięciowego wybranej fazy. W bibliotekach programowych języków wysokiego poziomu, funkcje FFT są zaimplementowane jako podstawowe metody służące do analizy sygnałów. W omawianym układzie wykrywającym częstotliwość prądnicy wykorzystano gotową bibliotekę zawartą w pliku trans.h. Jest to plik standardowo dołączony do środowiska VisualDSP++ 5.0, który zawiera kilka wersji funkcji `fftN` obsługujących wektory danych o różnych ilościach próbek. Zaimplementowana funkcja realizująca szybką transformatę Fouriera wykorzystuje algorytm Cooleya-Tukeya w jego najprostszej formie znanej jako R2 DIT FFT.

## 2. IMPLEMENTACJA ALGORYTMU FFT W PROGRAMIE SYMULACYJNYM ŚRODOWISKA VISUALDSP++ 5.0

Algorytm radix-2 DIT jest popularną aczkolwiek nie najszybszą formą algorytmu Cooleya-Tukeya. Zasadniczą cechą wykorzystanego algorytmu DIT jest to, że dzieli się  $N$ -punktowy wektor danych powstały z sygnału wejściowego DFT na mniejsze  $N/2$  punktowe.

$$X_r = \sum_{l=0}^{N-1} x_l e^{-\frac{2\pi i}{N} lr}, \quad r \in \{0, 1, \dots, N-1\} \quad (1)$$

Wprowadzając nowe oznaczenie  $W_N = e^{-\frac{i2\pi}{N}}$  uzyskujemy:

$$X_r = \sum_{l=0}^{N-1} x_l W_N^{rl}$$

Aby zastosować algorytm FFT w programie należy zastosować podział ciągu  $x_n$  danych wejściowych na dwie części, w których elementy indeksowane są parzyściami i nieparzyściami co pozwala na rozdzielenie równania (1) na dwie części:

$$X_r = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2n} e^{-\frac{2\pi i(2n)r}{N}} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2n+1} e^{-\frac{2\pi i(2n+1)r}{N}} \quad (2)$$

Po podstawieniu odpowiednio  $y_n = x_{2n}$  oraz  $z_n = x_{2n+1}$  otrzymuje się:

$$Y_r = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} y_k W_N^{\frac{rk}{2}}, \quad r \in \{0, 1, \dots, N/2-1\}$$

oraz

$$Z_r = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} z_k W_N^{\frac{rk}{2}}, \quad r \in \{0, 1, \dots, N/2-1\}$$

Jak widać składniki sumy są takie same jak w równaniu (1) po zastąpieniu  $N$  przez  $N/2$ . Kolejne części dyskretnej transformaty Fouriera dzielimy rekurencyjnie aż do osiągnięcia dwupunktowych ciągów DFT przy założeniu, że długość transformaty jest potęgą 2.

Do stworzenia i przetestowania funkcji języka C++ wykorzystującej opisany algorytm FFT wykorzystano możliwości debugera zawartego w IDE VDSP++.

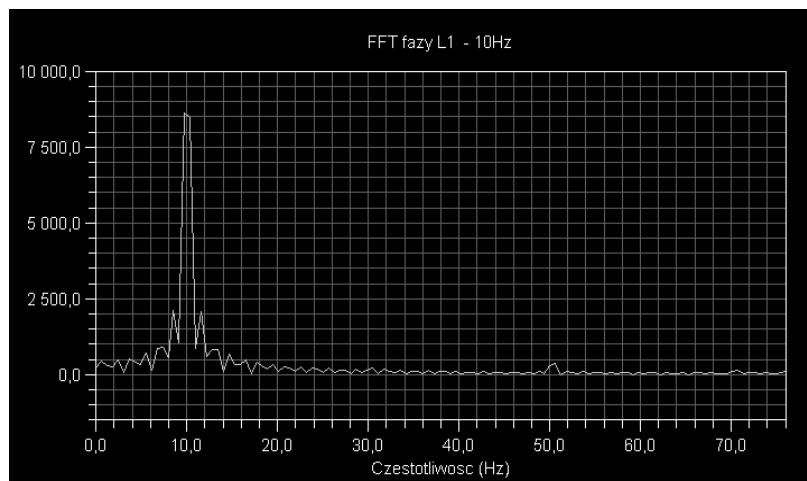
Funkcja ta po sprawdzeniu poprawności działania została przeniesiona bezpośrednio do układu programowego procesora DSP. Do sprawdzania prawidłowości działania omawianego programu, wykonano pomiary oscyloskopem cyfrowym w wyniku czego uzyskano dane przykładowych przebiegów napięć

wejściowych. Jak przedstawiono to na rys. 3 przebiegi napięć pochodzące z prądnicy synchronicznej zawierają zakłócenia wynikające m.in. z przewodzenia diod zwrotnych falownika maszynowego.

Pozyskane dane w formie tekstowej zostały włączone do programu symulacyjnego jako wektor typu float, z którego dane pobierane są do obliczeń. Program działa w pętli nieskończonej a liczniki ustawione są tak, by algorytm za każdym zakończeniem danych w wektorze dokonywał ich przesunięcia.

Ze względu na przesłanki praktyczne ograniczono się do zaprezentowania skuteczności działania algorytmu dla jednego rozmiaru wektora wejściowego funkcji `rfft512` dla 512 próbek pomiarowych.

Wprowadzone do testowanego programu wartości napięcia fazowego pochodzące z pomiaru oscyloskopowego można oglądać w formie przebiegów czasowych. VisualDSP++ 5.0 dysponuje możliwością stworzenia analizy FFT z podanego przebiegu a przykładowy efekt działania funkcji FFT pokazany jest na rys. 4.



Rys. 4. Przebieg czasowy napięcia fazy L1 prądnicy wprowadzony do programu testującego

Funkcja wykrywająca częstotliwość podstawowej harmonicznej wywoływana jest w przerwaniu procesora DSP, który w tym czasie komunikuje się z układem FPGA m.in. odczytując wartości przetworników A/D i wystawiając sterowania przekształtnikiem. Aby wykorzystać wbudowaną funkcję `rfftN` należy przygotować wektor z danymi pochodzącymi z pomiarów w czasie rzeczywistym. Z uwagi na dużą szybkość przetwarzania sygnałów istnieje konieczność redukcji danych. Redukcja polega na wyborze tylko niektórych próbek, które wpisywane są do wektora wejściowego funkcji `rfftN`. Rozwiązanie takie powoduje, że tracona jest wprawdzie część informacji dotycząca spektrum częstotli-

wości badanego napięcia ale ze względu na konieczność wykrywania niskich częstotliwości, takie uproszczenie jest zasadne i nie wpływa na prawidłowość wykrywania częstotliwości napięcia prądniczy w założonym zakresie.

W przypadku przetwarzania danych w czasie rzeczywistym, aby ustrzec się tzw. „przecieku” widmowego widocznego przy początkach i końcach pomiarów wpisywane do bufora o nazwie Wektor dane mnożone są przez funkcję okna Hanninga [4]. Odpowiedni fragment kodu programu wygląda jak następuje:

$$\text{Wektor}[i]=0.54-0.46*\cos(2*PI*i/(NUM\_POINTS-1)) \quad (3)$$

gdzie *NUM\_POINTS* oznacza ilość punktów poddawanych FFT, *i* – numer iteracji wykonywanego kodu.

W praktyce do wyszukiwania częstotliwości podstawowej harmonicznnej napięć sinusoidalnych lub nieodkształconych wystarczające jest zastosowanie czasowego okna prostokątnego.

W efekcie działania funkcja *rfftN* wpisuje do wektorów wartości wielkości wyjściowej w formie zespolonej (*real\_2*, *imag\_2*) zatem do znalezienia wartości maksymalnej należy wyznaczyć moduł zgodnie z zależnościami wziętymi z kodu programu w języku C:

```
float real_2 = (real_output[i])*(real_output[i]);  
float imag_2 = (imag_output[i])*(imag_output[i]);  
real_input[i] = sqrtf(real_2 + imag_2);
```

gdzie: *real\_output* i *imag\_output* to wektory zawierające wartości funkcji wyznaczone przez funkcję *rfftN*, *real\_input* oznacza wektor zawierający wyliczone wartości modułów.

W następnym kroku tablica zawierająca moduły jest rekurencyjnie przeszukiwana i w tym czasie zapisywana jest wartość maksymalna poszukiwanego prążka częstotliwości napięcia prądniczy oraz odpowiadającą jej częstotliwość. Po znalezieniu numeru prążka częstotliwości podstawowej należy obliczyć wartość częstotliwości za pomocą zależności:

$$\text{Częstotliwość} = \text{próbk} * F_s / (\text{NUM\_POINTS} / \text{COKTORA})$$

gdzie: *próbk* oznacza numer prążka odpowiedni dla podstawowej harmonicznnej, *F<sub>s</sub>* to częstotliwość próbkowania, *COKTORA* to wartość redukująca ilość zapisywanych próbek.

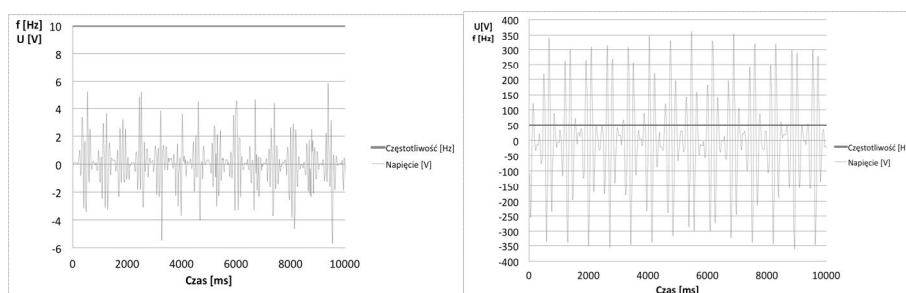
### 3. IMPLEMENTACJA ALGORYTMU FFT W UKŁADZIE EKSPERYMENTALNYM I PRZYKŁADOWE WYNIKI DZIAŁANIA PROGRAMU

Układ eksperymentalny składa się z komputera PC z zainstalowanym oprogramowaniem współpracującym z przekształtnikiem za pośrednictwem interfejsu USB. W przekształtniku zainstalowana jest płyta wyposażona w procesor sygnałowy Analog Devices ADSP-21363 oraz układ FPGA firmy Altera. Bada-

nia wykonywano przy stałej i zmieniającej się w czasie prędkości obrotowej prądnicy synchronicznej. Układ pomiarowy rejestrował dane pochodzące z przetwornika napięcia, które były wpisywane do macierzy w czasie wykonywanego podprogramu przerwania. W przerwaniu były wykonywane również obliczenia częstotliwości wirowania prądnicy. Generator użyty w badaniach napędzany był silnikiem asynchronicznym klatkowym. Napęd maszyny indukcyjnej klatkowej stanowił falownik wektorowy.

### 3.1. Wyniki testów dla ustalonych prędkości wirowania generatora

Przeprowadzone testy eksperymentalne stworzonego oprogramowania objęły m.in. badania skuteczności działania algorytmu w stanie ustalonym. Na falowniku wektorowym sterującym maszyną asynchroniczną nastawiano wartości prędkości obrotowe maszyn a następnie rejestrowano wartości informujące o amplitudzie i częstotliwości napięcia generowanego przez prądnicę w fazie L1.



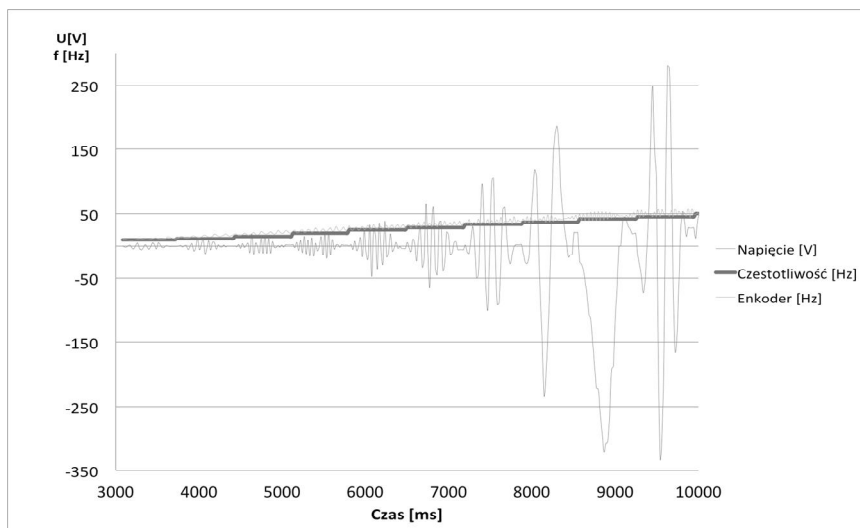
Rys. 5. Przykładowe przebiegi napięć i wyznaczonych częstotliwości zarejestrowane w układzie eksperymentalnym

Jak pokazano na rysunku 5, przebiegi napięć zostały zmodyfikowane przez przemnożenie ich przez współczynniki okna czasowego Hanninga, co spowodowało znaczną zmianę ich kształtu.

### 3.2. Wyniki badań eksperymentalnych dla zmiennych prędkości wirowania generatora synchronicznego

W trakcie projektowania systemu założono, że proces synchronizacji może być rozpoczęty także w chwili dynamicznej zmiany prędkości wirowania generatora. W klasycznych układach prądnic synchronicznych takie zagadnienie do tej pory nie występowało ze względu na stałą prędkość wirowania generatora. Pomiarzy były wykonywane w sposób podobny jak w stanie ustalonym wirowania generatora.





Rys. 6. Zmiana prędkości wirowania generatora i zarejestrowane wartości częstotliwości i napięcia fazy L1

Prędkość wirowania prądnicy zwiększono płynnie z 10 Hz do 50 Hz. Można zaobserwować skokowe odczyty częstotliwości a także opóźnienie wynikające z konieczności akwizycji próbek a następnie ich przetworzenia. Czas niezbędny do wykonania algorytmu FFT dla zestawu 4096 próbek z których wybrane jest 512 wynosi 615 ms co jest wartością dużą i ogranicza zakres stosowania proponowanej metody do synchronizacji układów elektromaszynowych o niezbyt dużych szybkościach zmian prędkości wirowania.

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Środowisko programistyczne VisualDSP++ 5.0 daje możliwość nie tylko tworzenia kodu wykonywalnego dla rodziny procesorów ADSP, lecz również dzięki wbudowanemu symulatorowi procesorów sygnałowych i debugera umożliwia testowanie kodu w czasie rzeczywistym. Dodatkowe funkcje takie jak podgląd zawartości wektorów i macierzy a także narzędzia analizy sygnałów czynią program ten niezwykle przydatnym w tworzeniu nowego kodu dla procesorów sygnałowych. Przedstawiony algorytm szukania częstotliwości prądnicy synchronicznej został napisany i przetestowany w środowisku VisualDSP++ 5.0. Po uruchomieniu opisanej funkcji w rzeczywistym układzie sterowania generatorem okazało się, że wyznaczone wartości częstotliwości praktycznie nie różnią się od rzeczywistych. Pozwoliło to na użycie proponowanego programu jako jednego z elementów służących do poprawnego synchronizowania falownika maszynowego z wirującą i generującą napięcie prądnicą.

**LITERATURA**

- [1] VisualDSP++ 5.0 Run-Time Library Manual for SHARC Processors, Analog Devices, Inc. One Technology Way Norwood, Mass. January 2011.
- [2] Self-regulating alternators series btp3 Operating and maintenance instructions [online]. Mecc Alte, 2011 [dostęp 01.02.2016]. Dostępny w Internecie: <[http://www.meccalte.com/send\\_file.php?fileid=BTP3%20manuale](http://www.meccalte.com/send_file.php?fileid=BTP3%20manuale)>.
- [3] Przemiennik częstotliwości MMB005 PMSM, instrukcja użytkownika, Gdańsk 2014, MMB Drives Sp. z o.o.
- [4] Press H. W., Teukolsky A.S., Vetterling T.W., Flannery P. B., Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing. Second Edition, Cambridge University Press, 2002, ISBN 0-521-43108-5.

**SIMULATIONS AND EXPERIMENTAL RESULTS OF SYNCHRONIZATION  
PROCESS OF VOLTAGE INVERTER WITH SYNCHRONOUS GENERATOR  
WITH USE OF VISUALDSP++ 5.0 SOFTWARE**

In the paper use of software algorithm of inverter and rotating generator synchronization is investigated. Presented algorithm is based on fast Fourier transform radix-2 type and allows obtain information on rotational speed of synchronous generator which is needed for synchronization purposes. There are presented simulation results performed with use of VisualDSP++ 5.0 along with effects of real time inverter operation.

*(Received: 22. 02. 2016, revised: 4. 03. 2016)*