

doi:10.15199/48.2016.06.10

## Obserwator siły elektromotorycznej w silniku z magnesami trwałymi o strumieniu poprzecznym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę wyznaczania siły SEM w dwufazowym silniku z magnesami trwałymi o strumieniu poprzecznym podczas normalnej pracy układu napędowego. Algorytm wykorzystuje sygnały, które są mierzalne zewnętrznie, bez ingerencji w konstrukcję silnika (na przykład bez montowania dodatkowych czujników wewnątrz silnika). Jako platformę sprzętową zastosowano przekształtniki laboratoryjne (własne konstrukcje falowników). Nisko poziomowe bloki sterowania falowników (przełączanie kluczy, zabezpieczenia, pomiary, algorytmy sterowania) zostały oparte na module FPGA. Akwizycja sygnałów pomiarowych została zrealizowana na platformie dSpace. Praca zawiera wyniki symulacji i badań eksperymentalnych na odpowiednio zaprojektowanym stanowisku laboratoryjnym.

**Abstract.** In the paper author presents the method of back-EMF calculation in the permanent magnet transverse flux motor during normal operation of drive system. The algorithm uses externally measurable signals without interfering with the structure of the motor (e.g. without adding additional sensors inside the motor). Hardware platform is based on laboratory power inverters. Low-level control blocks (switching keys, protections, measurement, control algorithms) of the inverter uses an FPGA module. Measurements are implemented on dSpace platform. The work contains simulations and the results of experiments. (The calculation of back-EMF in the permanent magnet transverse flux motor).

**Słowa kluczowe:** silnik z magnesami trwałymi o strumieniu poprzecznym (PMTFM), układy programowalne (FPGA), obserwator, prototypowanie sprzętowe, siła SEM.

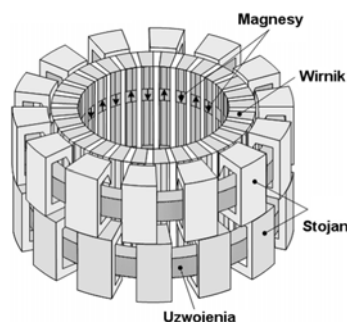
**Keywords:** Permanent Magnet Transverse Flux Motor (PMTFM), Field-Programmable Gate Array (FPGA), observer, hardware prototyping back-EMF.

### Wstęp

W obecnych czasach systemom napędowym stawia się coraz większe wymagania głównie w odniesieniu do ich wymiarów, mocy i wagi. Coraz więcej uwagi poświęca się projektowaniu nowych, lepszych konstrukcji zarówno pod względem mechanicznym jak i elektrycznym. Silnik powinien charakteryzować się niewielkim rozmiarem (w stosunku do mocy) i być energooszczędny. Nowoczesne algorytmy sterowania powinny zapewniać pracę w pełnym zakresie prędkości (również uwzględniając przypadek generowania momentu przy zatrzymanym silniku). W nowoczesnym, zrobotyzowanym przemyśle bardzo często wykorzystywane są bezszczotkowe silniki z magnesami trwałymi. Urządzenia te spośród wszystkich dostępnych typów silników charakteryzuje największa sprawność. Istnieje wiele ich różnych konstrukcji. W klasycznych silnikach magnesy trwałe mogą być montowane na powierzchni wirnika lub zatopiane wewnątrz. Zmiana położenia magnesu względem stojana pozwala na uzyskanie różnych właściwości silnika.

Inną grupę napędów bezszczotkowych stanowią silniki o strumieniu osiowym (np. stosowane do napędu rowerów elektrycznych) oraz silniki o strumieniu poprzecznym. Więcej informacji na temat różnych konstrukcji silników z magnesami trwałymi znajduje się w [1].

Dalsza część artykułu będzie poświęcona silnikom bezszczotkowym z magnesami trwałymi o strumieniu poprzecznym PMTFM. Przykład budowy takiego silnika został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Przykład konstrukcji dwufazowego silnika PMTFM (rysunek został zaczerpnięty z artykułu [2])

Badany obiekt charakteryzuje się o wiele bardziej złożoną strukturą mechaniczną w stosunku do rozwiązań typowych (silników ze strumieniem osiowym lub promieniowym). Silnik ze strumieniem poprzecznym opracował, opatentował i opisał po raz pierwszy w 1895r. W.M. Morday. Jednak skomplikowana budowa mechaniczna w znaczący sposób spowolniła rozwój tego typu konstrukcji.

Silniki ze strumieniem poprzecznym charakteryzują się stosunkowo dużym momentem przy małych i średnich prędkościach i przy jednoczesnym zachowaniu niewielkich rozmiarów. Ich wadą są duże koszty produkcji oraz występowanie tętnień w przebiegu momentu, których eliminowanie wymaga zastosowania odpowiedniego sterowania.

W artykule przedstawiony został algorytm obserwatora siły elektromotorycznej w silniku PMTFM. Odtwarzanie SEM odbywa się bez ingerencji w konstrukcję silnika (np. bez montażu dodatkowych sond wewnątrz).

Stopień złożoności metody jest na tyle mały, że można ją zaimplementować w rzeczywistym układzie napędowym. Pomiar odbywa się równolegle i niezależnie od roboczego trybu pracy maszyny (bez konieczności „wstrzykiwania” dodatkowych sygnałów). Prezentowany algorytm nie wymaga do poprawnej pracy sygnału z czujnika położenia (enkodera). Podstawowym warunkiem jego działania jest niezerowa prędkość silnika (lub całego napędu). Na podstawie wyznaczonych wartości SEM można w następnym etapie oszacować generowany moment elektromagnetyczny a również estymować kąt położenia wirnika.

### Opis algorytmu

Równania modelu silnika we współrzędnych stojana można zapisać następująco:

$$(1) \quad L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{\alpha} \\ E_{\beta} \end{bmatrix}$$

gdzie:  $i_{\alpha\beta}$  – prąd w niezależnych pasmach silnika,  $V_{\alpha\beta}$  – napięcia zasilające pasma,  $E_{\alpha\beta}$  – siły elektromotoryczne indukowane w pasmach,  $L$  – indukcyjność pasma,  $R$  – rezystancja pasma.

Można założyć, że siły elektromotoryczne w pasmach są nieznanymi funkcjami czasu i skonstruować odpowiedni obserwator i identyfikator (2). Opis i stabilność algorytmu została przedstawiona w pracy [3].

$$(2) \quad L_o \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ae} \\ i_{\beta e} \end{bmatrix} = -R_o \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{ae} \\ E_{\beta e} \end{bmatrix} + a \begin{bmatrix} i_{ae} - i_{\alpha} \\ i_{\beta e} - i_{\beta} \end{bmatrix}$$

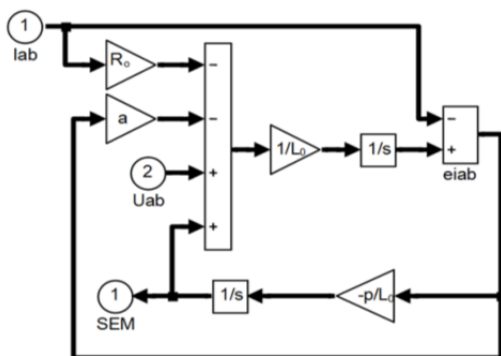
$$L_o \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E_{ae} \\ E_{\beta e} \end{bmatrix} = -p \begin{bmatrix} i_{ae} - i_{\alpha} \\ i_{\beta e} - i_{\beta} \end{bmatrix}$$

gdzie  $R_o$  i  $L_o$  są wartościami rezystancji i indukcyjności przyjętymi przez obserwator.

O szybkości zbieżności decyduje macierz:

$$(3) \quad H = \frac{1}{L_o} \begin{bmatrix} a & 1 \\ p & 0 \end{bmatrix}$$

Wartości własne macierzy (3) można modyfikować przez dobór parametrów projektowych „a” i „p”. Wybór dużych wartości tych parametrów wynika z konieczności wytworzenia bardzo szybkiego obserwatora. Jednak zbyt duże ich wartości powodują powstawanie błędów numerycznych i w konsekwencji szumu o stosunkowo dużej amplitudzie. Na rysunku 2 przedstawiony został schemat blokowy algorytmu identyfikacji SEM zrealizowany na platformie dSpace.



Rys.2. Model obserwatora siły elektromotorycznej

### Opis stanowiska laboratoryjnego

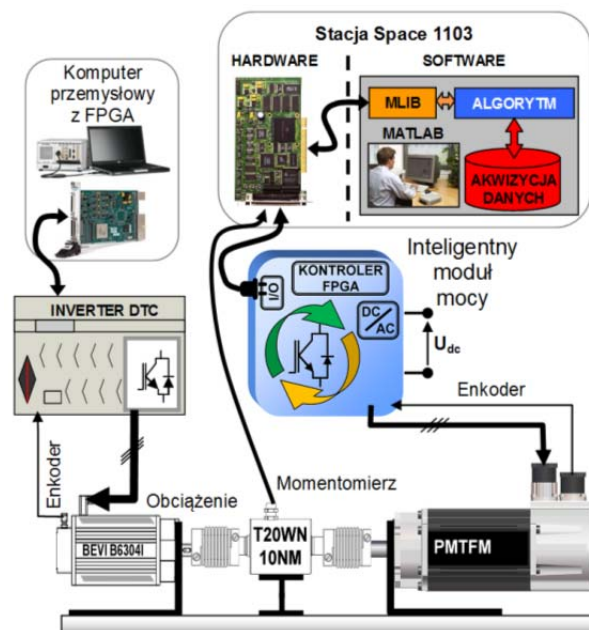
Stanowisko laboratoryjne zostało w całości skonstruowane w Instytucie Automatyki PŁ. Układ napędowy składa się z dwóch silników połączonych ze sobą poprzez momentomierz oraz dwóch falowników napięcia. Parametry silników zostały zamieszczone w tabeli 1. Typowy silnik bezszczotkowy zasilany jest z falownika o mocy ok. 3kW i realizuje funkcje obciążenia. Sterowanie silnikiem (algorytm DTC) zrealizowane jest wyłącznie na module FPGA i umożliwia generowanie praktycznie dowolnych trajektorii momentu obciążenia. Układ sterowania i realizacja napędu został szczegółowo opisany w [4]. Badany silnik PMTFM jest zasilany za pomocą drugiego falownika napięcia (o mocy do około 30kW), pracującego pod kontrolą systemu wbudowanego z interfejsem zrealizowanym na platformie dSpace. Urządzenie to posiada własny moduł kontroli i pomiaru zrealizowany w układzie współpracy modułu FPGA i procesora ARM STM32. Na FPGA zbudowany został mechanizm zabezpieczeń i pomiarów (pomiar prądów, napięć, kąta położenia wirnika, prędkości) oraz generator PWM. Zadaniem procesora STM32 jest głównie komunikacja z systemem dSpace. W pamięci procesora może zostać również zapisany algorytm sterowania

silnikiem (sterowanie prędkością lub momentem) tak, że falownik może pracować niezależnie. Algorytm sterowania może również być realizowany na platformie dSpace, ale wtedy falownik powinien zostać skonfigurowany do pracy z zewnętrznym zadawaniem napięć lub prądów.

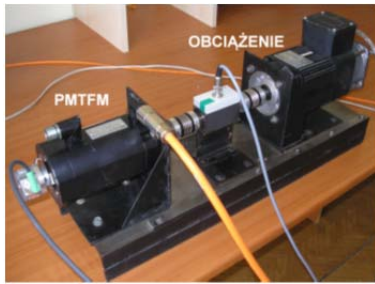
Tabela 1. Parametry silników układu napędowego

Silnik badany PMTFM-MDD1	Prąd znamionowy	$I_n$	3	A
	Liczba par biegunów	p	20	-
	Prędkość znamionowa	$n_n$	900	obr/min
	Stała $k_t$	$k_t$	1.33	Nm/A
	Stała $k_e$	$k_e$	160	mV/rpm
	Rezystancja pasma	R	3.6	$\Omega$
	Indukcyjność pasma	L	37	mH
	Liczba pasm		2	-
Silnik obciążenia BEVI B6304I3H3	Napięcie zasilania	$U_n$	400	V
	Prąd znamionowy	$I_n$	2.1	A
	Prędkość znamionowa	$n_n$	3000	obr/min
	Stała $k_t$	$k_t$	1.7	Nm/A
	Napięcie zasilania	$U_n$	400	V

Istotną cechą odróżniającą opisywany przekształtnik mocy (oprócz znacznych możliwości konfiguracyjnych) jest realizacja bezpośredniego pomiaru średniej wartości napięcia wyjściowego mierzonego za okres modulacji falownika. Informacja o napięciu pochodząca właśnie z tego układu jest o wiele dokładniejsza niż szacowanie napięcia na podstawie stanu kluczy i wartości napięcia obwodu pośredniczącego. Jak zostanie wykazane dalej właśnie dokładny pomiar napięcia ma duży wpływ na dokładność wyznaczania SEM za pomocą prezentowanego algorytmu. Więcej informacji na temat konstrukcji falownika i mechanizmu pomiaru napięcia znajduje się w [5] z tą uwagą, że pierwotny układ falownika był projektowany do zasilania typowego silnika PMSM a teraz został dostosowany do potrzeb sterowania dwufazowego silnika PMTFM. Na potrzeby badań układ sterowania został przeprogramowany zgodnie z podstawowymi zasadami zastosowania falowników trójfazowych do zasilania układów dwufazowych opisanymi np. w [6]. Strukturalny schemat stanowiska laboratoryjnego został pokazany na rysunku 3, natomiast na ilustracji 5 przedstawiony został testowy układ napędowy zainstalowany w laboratorium.



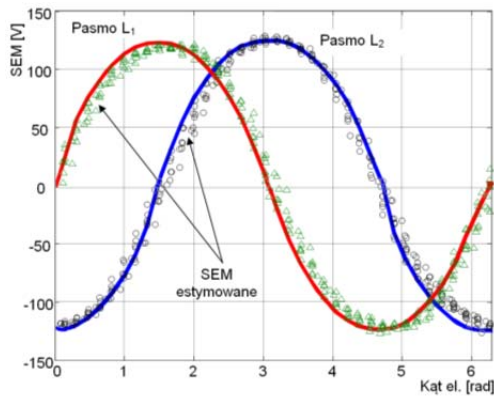
Rys.3. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego



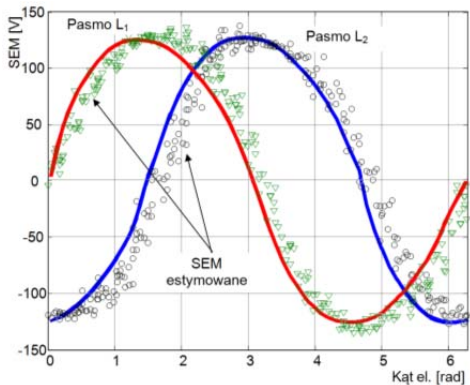
Rys.4. Fotografia laboratoryjnego zestawu napędowego

### Opis i wyniki przeprowadzonych eksperymentów

W ramach eksperymentu przeprowadzone zostały dwie próby. W obu układ napędowy pracował w trybie regulacji prędkości z jej ustaloną wartością. W pierwszej próbie silnik nie był obciążony. W drugiej załączony został układ, który obciążał badany silnik momentem około 3Nm. W ramach testu zarejestrowane zostały przebiegi prądów, napięć, prędkości, kąta położenie wirnika i momentu obciążenia. W ramach obliczeń symulacyjnych, metodą prób wyznaczone zostały doświadczalnie parametry konstrukcyjne „a” i „p”. Na rysunkach 5 oraz 6 zaprezentowane zostały przebiegi odtworzonych sił SEM w obu pasmach silnika.



Rys.5. Porównanie wartości SEM estymowanej i wyznaczonej eksperymentalnie. Silnik nie był obciążony.



Rys. 6. Porównanie wartości SEM estymowanej i wyznaczonej eksperymentalnie. Silnik badany był obciążony momentem około  $M_o=3Nm$ .

Przebieg odtworzonej SEM został porównany z wartością odniesienia. Wartość ta została pośrednio wyznaczona w osobnym eksperymencie na podstawie pomiarów prądu i momentu przy zahamowanym wirniku. Do obliczeń wykorzystane zostały znane zależności (4) i (5).

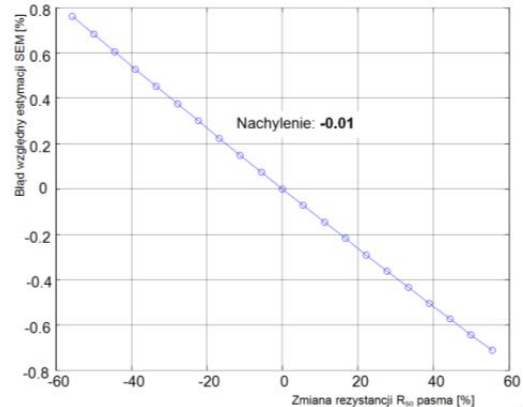
$$(4) \quad M = p c_e \varphi I$$

$$(5) \quad E = c_e \varphi \omega$$

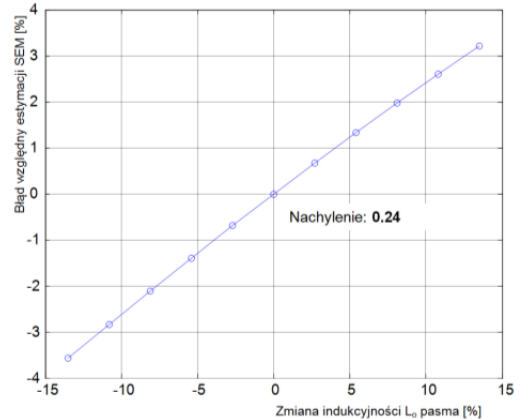
gdzie:  $M$  – moment generowany przez pasmo,  $I$  – prąd pasma,  $E$  – SEM,  $\omega$  – prędkość elektryczna,  $\varphi$  – strumień,  $p$  – liczba par biegunów,  $c_e$  – stała elektryczna.

Na rysunkach widoczne jest również niewielkie opóźnienie odtwarzania SEM. Opóźnienie to można zmniejszyć kosztem zwiększenia szumu a w pewnych przypadkach również pogorszenia stabilności algorytmu.

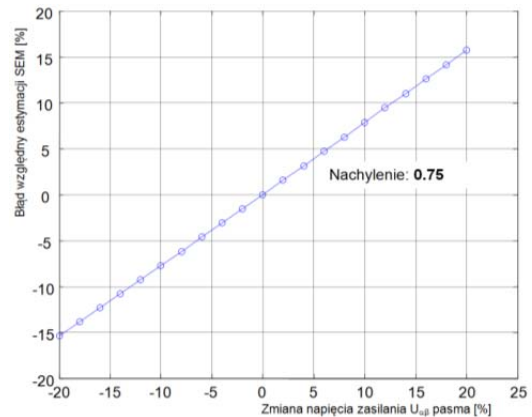
Na rysunkach od 7 do 10 przedstawiony został wpływ błędu oszacowania parametrów  $L_o$  i  $R_o$  oraz błędu pomiaru prądów i napięć na pracę obserwatora SEM. Największy wpływ na dokładność odtworzenia wielkości sił elektromotorycznych ma prawidłowy pomiar napięcia zasilania uzwojeń silnika. Dodatkowo błąd pomiaru napięć i prądów wpływa również na powiększenie przesunięcia fazowego.



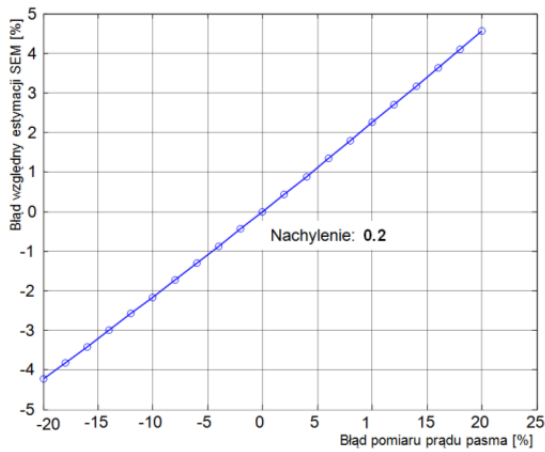
Rys.7. Wpływ zmiany rezystancji pasma  $R_o$  na błąd wyznaczenia SEM



Rys.8. Wpływ zmiany indukcyjności  $L_o$  na błąd wyznaczenia SEM

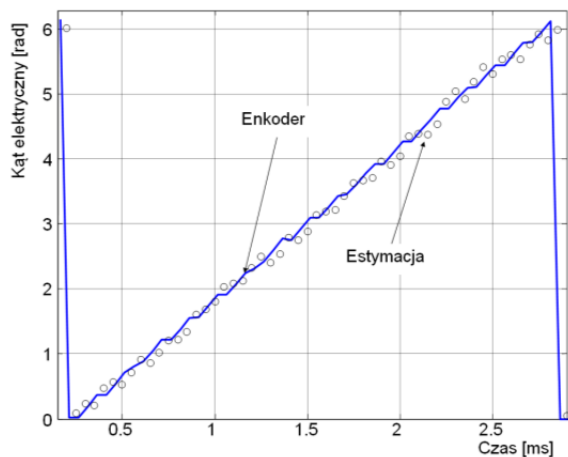


Rys.9. Wpływ błędnego pomiaru napięć  $U_{d\beta}$  na błąd wyznaczenia SEM

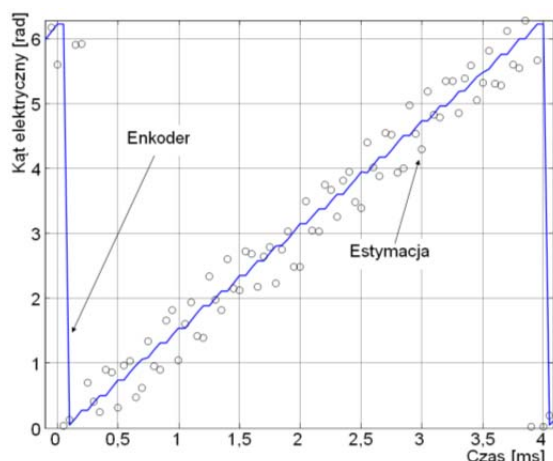


Rys. 10. Wpływ błędnego pomiaru prądów  $I_{\alpha\beta}$  w obserwatorze na wyznaczenie SEM

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiona została estymacja kąta na podstawie wyznaczonych przebiegów siły SEM. W przypadku obciążonego napędu wyznaczony przebieg kąta jest mocno zaszumiony. Natomiast szybkość odtwarzania jest zadawalająca. W przypadku estymacji kąta dla silnika nieobciążonego można zaobserwować zmniejszenie poziomu zakłóceń.

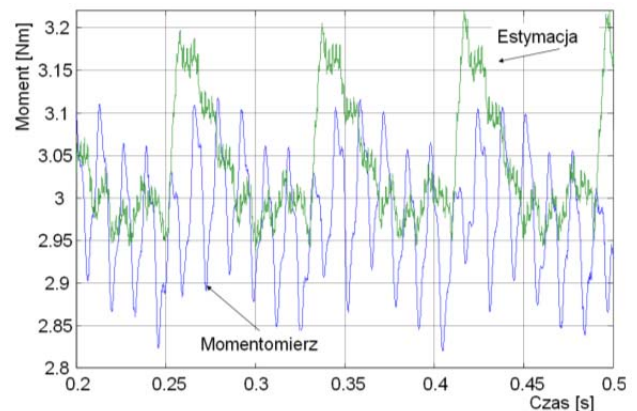


Rys. 11. Kąt elektryczny odtworzony na podstawie obserwowanych wartości SEM (brak obciążenia maszyny)



Rys. 12. Kąt elektryczny odtworzony na podstawie obserwowanych wartości SEM (maszyna obciążona)

Na rysunku 13 przedstawione zostało porównanie momentu mierzonego i obliczanego na podstawie obserwowanych SEM. Wartości średnie momentów są przesunięte o wartość momentu tarcia. Poprawności odtworzenia kształtu przebiegu nie można ocenić ze względu na zbyt małe pasmo przenoszenia momentomierza.



Rys. 13. Moment elektromagnetyczny odtworzony na podstawie obserwowanych wartości SEM (maszyna obciążona)

### Podsumowanie

Na podstawie wyników eksperymentalnych można stwierdzić, że wymagania stawiane nowej metodzie zostały spełnione. Przede wszystkim do poprawnej pracy algorytmu nie jest wymagana informacja o położeniu wirnika. Układ odniesienia jest związany ze stojanem. W związku z tym nie ma też żadnych przekształceń trygonometrycznych, które mogą być potencjalnym źródłem błędów. Zaletą metody jest jej niewielka złożoność obliczeniowa. Wadą mogą być przesunięcia fazowe a także konieczność zastosowania złożonych metod całkowania przy implementacji dyskretnych algorytmów, których zadaniem jest odtworzenie SEM w czasie rzeczywistym.

Autor: dr inż. Tomasz Sobieraj Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź e-mail: [tomasz.sobieraj@p.lodz.pl](mailto:tomasz.sobieraj@p.lodz.pl)

### LITERATURA

- [1] Dan Jones, Nowe silniki do nowych aplikacji, *Control Engineering Polska*, 2011 20-22
- [2] Strete L., Tutelea L., Boldea I., Martis C., Viorel A., Optimal design of a rotating transverse flux motor (TFM) with permanent magnets in rotor, XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM2010, Rome
- [3] Kabziński J., Zastosowanie obserwatorowych identyfikatorów parametrów w układach napędowych, SENE2001, 215-221
- [4] Sobieraj T., Stanowisko wyposażone w kartę FPGA do prototypowania algorytmów sterowania dla silników PMSM, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 4b, 219-223
- [5] Nowak R., Chudzik P., Sobieraj T., Wektorowy falownik napięciowy z pomiarem rzeczywistego napięcia wyjściowego, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 2/2013 (99)
- [6] Piróg S., Wawro M., Metody SPWM oraz SVPWM dla dwu- i trójfazowych VSI zasilających dwufazowe wysokoobrotowe silniki AC oraz związane z nimi ograniczenia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 5a, 208-217