

*silnik PMSM, sterowanie energo-optymalne,  
napęd bezczujnikowy, napęd wentylatora*

Stefan BROCK\*, Tomasz PAJCHROWSKI\*

## **BEZCZUJNIKOWY I ENERGOOSZCZĘDNY NAPĘD WENTYLATORA Z SILNIKIEM PMSM**

W artykule przedstawiono problem bezczujnikowego sterowania częstotliwościowego według zasady u/f silnika synchronicznego o magnesach trwałych bez klatki tłumiącej, dla napędu wentylatora. W celu zmniejszenia poboru mocy przez układ napędowy wyznaczono na stanowisku laboratoryjnym optymalne charakterystyki napięcia w funkcji częstotliwości silnika. Badania przeprowadzono na zestawie napędowym składającym się z sprzęgniętych dwóch maszyn PMSM, gdzie jedna maszyna była zasilona z tranzystorowego przekształtnika energoelektronicznego, a druga stanowiła obciążenie bierno. Zaproponowano nowe kryterium minimalizacji na podstawie modułu wektora prądu stojana silnika i zbadano algorytm optymalizacji w stanach ustalonych. Przedstawione wyniki laboratoryjne potwierdzają słuszność zastosowanego rozwiązania dla napędu wentylatora.

### **1. WPROWADZENIE**

Silnik synchroniczny o magnesach trwałych (*PMSM, ang. Permanent Magnet Synchronous Motor*) ze względu na swoje bardzo dobre właściwości dynamiczne jest szeroko stosowany w układach napędowych wymagających dużej precyzji sterowania, takich jak roboty przemysłowe czy obrabiarki. Wiele prowadzonych obecnie prac badawczych koncentruje się również na wykorzystaniu silników PMSM bez klatki tłumiącej do napędów pomp i wentylatorów, które mają znacznie mniejsze wymagania dynamiczne [1, 2]. Ze względu na znaczne odległości pomiędzy silnikiem a przekształtnikiem w napędach wentylatorów czy pomp, bezpośredni pomiar położenia wirnika jest trudny. Wiąże się to z koniecznością prowadzenia długiego połączenia, co zwiększa koszty, a przede wszystkim obniża niezawodność napędu. Zastosowanie bloku obserwatora, czy optymalizacja wektorowa [4] jest utrudniona ze względu na często stosowane w tych rozwiązaniach filtry pomiędzy przekształtnikiem a silnikiem.

---

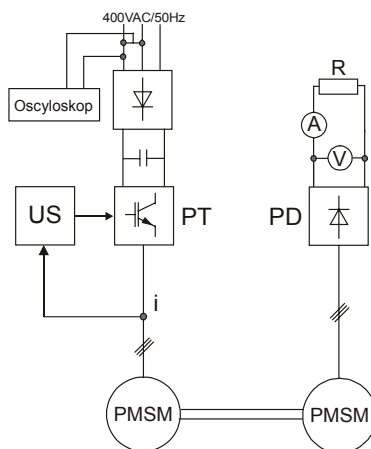
\* Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań.

Alternatywnym rozwiązaniem sterowania dla układu wentylatorowego z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych jest układ otwarty, sterowany częstotliwościowo według zasady  $u/f$  [1, 2, 3]. W pracy [3] autorzy przeprowadzili obszerne badania symulacyjne napędu z silnikiem PMSM bez klatki tłumiącej dla sterowania częstotliwościowego  $u/f$ . Wykazano, że w celu zmniejszenia poboru mocy przez układ napędowy należy przeprowadzić optymalizację napięcia zasilającego oraz wprowadzić pętlę stabilizującą pracę silnika. W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych takiego napędu. Ponadto, zaproponowano nowe kryterium minimalizacji mocy na podstawie pomiaru modułu wektora prądu stojana silnika i przeprowadzono optymalizację *on-line*. Przedstawione wyniki laboratoryjne potwierdzają słuszność zastosowanego rozwiązania dla napędu wentylatora.

## 2. STANOWISKO LABORATORYJNE

Badania laboratoryjne przeprowadzono na zestawie napędowym składającym się z dwóch maszyn PMSM połączonych wspólnym wałem, gdzie jedna maszyna była zasilona ze sterowanego mikroprocesorowo przekształtnika tranzystorowego. Druga maszyna, obciążona mostkiem prostowniczym i rezystorem, stanowiła obciążenie. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego.

Badania doświadczalne na stanowisku laboratoryjnym wykazały, że dla badanego zestawu nie jest konieczne stosowanie pętli stabilizującej pracę silnika.

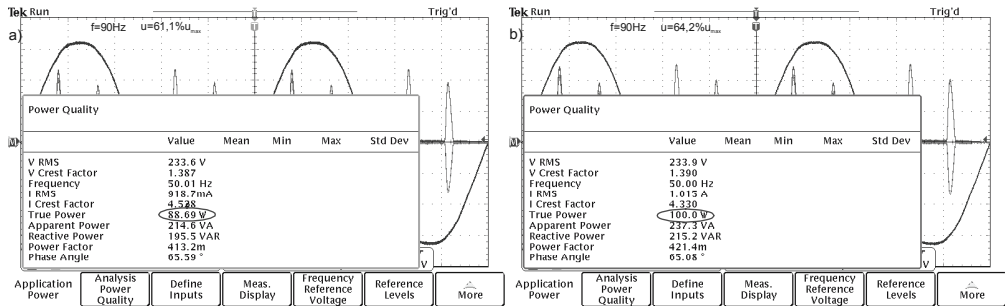


Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego

Fig. 1. Block diagram of the laboratory set-up

Pomiar mocy wejściowej dla układów przekształtnikowych z diodowym mostkiem prostowniczym jest problemem trudnym, przede wszystkim ze względu na impul-

sowy kształt prądu pobieranego z sieci. Czynną moc wejściową w jednej fazie mierzono wykorzystując układ pomiarowy składający się z: cyfrowego oscyloskopu typu DPO3014 z modułem pomiaru mocy DPO3PWR oraz sond: prądowej i napięciowej. Przyjmując symetrię napięć zasilających można na tej podstawie wyznaczyć całkowitą moc pobieraną z sieci. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wyniki analizy mocy. Moc wyjściową obciążenia mierzono po stronie prądu stałego układem składającym się z amperomierza i woltomierza.



Rys. 2. Analiza mocy pobieranej przez układ napędowy (dla jednej fazy):

a)  $f = 90$  Hz,  $u = 61,1\% u_{\max}$ ,  $P_{we} = 89$  W, b)  $f = 90$  Hz,  $u = 64,1\% u_{\max}$ ,  $P_{WE} = 100$  W

Fig. 2. Analysis of the input power supply for the drive system, (one phase):

a)  $f = 90$  Hz,  $u = 61,1\% u_{\max}$ ,  $P_{we} = 89$  W, b)  $f = 90$  Hz,  $u = 64,1\% u_{\max}$ ,  $P_{WE} = 100$  W

### 3. ENERGO-OPTYMALNA CHARAKTERYSTYKA STEROWANIA $U/F$

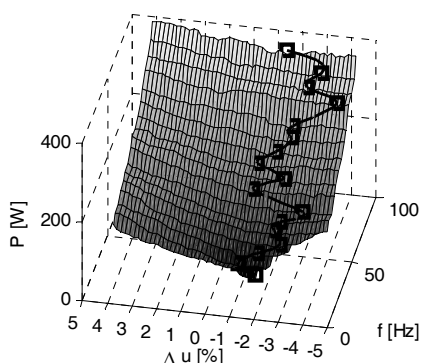
Celem pracy było opracowanie takiego układu sterowania, aby w trybie pracy bezczujnikowej minimalizować moc czynną pobraną przez układ napędowy w stanie statycznym. Układ ma działać w założonym przedziale częstotliwości zasilania silnika od 0 do 100 Hz. Badany przekształtnik jest tak sterowany, by uzyskać sinusoidalne napięcie wyjściowe o częstotliwości  $f$  i amplitudzie  $u_{wy}$  zgodnie z charakterystyką:

$$u_{wy} = (u_o + m \cdot f) + \Delta u, \quad (1)$$

gdzie  $u_o$  i  $m$  to parametry opisujące charakterystykę, natomiast  $\Delta u$  jest wartością korekty amplitudy napięcia. Parametry  $u_o$  i  $m$  zostały tak dobrane, żeby zapewnić stabilną pracę w całym zakresie badanych prędkości obrotowych. Korekta napięcia dobierana była indywidualnie dla różnych prędkości obrotowych tak, żeby zminimalizować moc czynną pobieraną przez układ napędowy z sieci zasilającej. Ponieważ moment obciążenia jest liniowo zależny od prędkości zgodnie z zależnością:

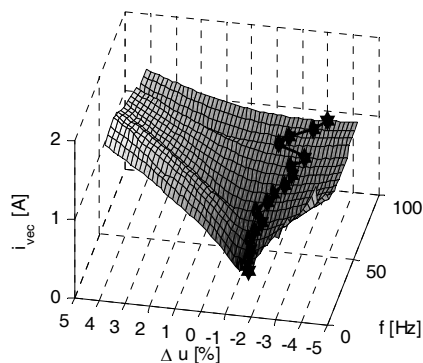
$$T_{op} = k \cdot \omega, \quad (2)$$

gdzie  $T_{op}$  to moment oporowy,  $\omega$  to prędkość obrotowa, natomiast  $k$  to współczynnik proporcjonalności, to z uwagi na synchroniczną prędkość obrotową wartość korekty napięcia nie wpływa na moc przekazywaną do maszyny obciążającej. Zbyt mała wartość napięcia korekty może jednak doprowadzić do wypadnięcia z synchronizmu i awarii układu. Badania w trybie *off-line* polegały na poszukiwaniu takiego napięcia korekty, aby moc czynna odczytywana na oscyloskopie była minimalna. Wyniki badań przedstawione zostały na rysunku 3. Przykładowe wyniki dla częstotliwości zasilania 90 Hz przedstawione są na rysunku 2: dla charakterystyki podstawowej pobierana moc wynosi 300 W, natomiast po uwzględnieniu napięcia korekty moc pobierana zmniejsza się do 266 W.



Rys. 3. Charakterystyka mocy pobieranej przez przekształtnik w funkcji częstotliwości i napięcia korekcyjnego

Fig. 3. Characteristics of input power of the converter as a function of frequency and voltage correction



Rys. 4. Charakterystyka prądu wyjściowego przekształtnika w funkcji częstotliwości i napięcia korekcyjnego

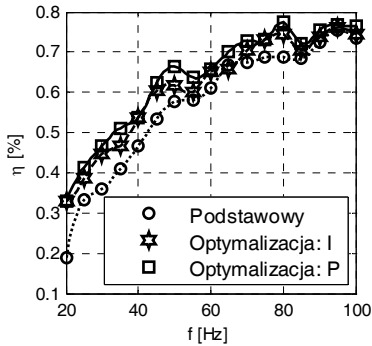
Fig. 4. Characteristics of output current of the converter as a function of frequency and voltage correction

Pobierana moc nie jest mierzona w układzie sterowania przekształtnika, mierzone są natomiast prądy wyjściowe z przekształtnika  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ . Przyjęto kryterium minimalizacji modułu wektora tego prądu  $|i|$

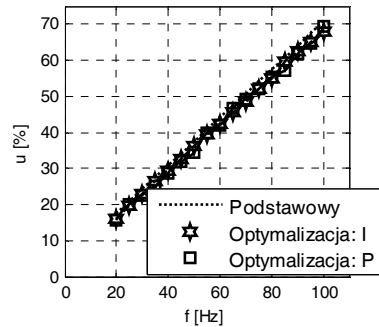
$$|i| = \sqrt{i_a^2 + \frac{(i_b - i_c)^2}{3}}. \quad (3)$$

Wyniki badań przedstawiono odpowiednio na rysunku 4. Uzyskana powierzchnia charakteryzuje się wyraźnym ekstremum, co ułatwia poszukiwania rozwiązania optymalnego. Dla oceny, czy przyjęte kryterium minimalizacji modułu wektora prądu może zastąpić kryterium minimalizacji pobieranej mocy porównano sprawność uzyskaną przez cały układ napędowy w obu przypadkach. Wyniki porównania zamieszczono na rysunku 5. Sprawność dla korekty napięcia według kryterium minimalizacji modułu prądu jest tylko

nieznacznie niższa, niż w przypadku minimalizacji pobieranej mocy. Należy podkreślić że przedstawiany wskaźnik sprawności opisuje cały układ napędowy: przekształtnik ac/dc/ac, dwie maszyny PMSM i przekształtnik ac/dc. Zbiorcze charakterystyki amplitudy napięcia w funkcji częstotliwości przedstawione są na rysunku 6.



Rys. 5. Sprawności zestawu napędowego w funkcji częstotliwości wyjściowej  
Fig. 5. Drive set efficiency as a function of output frequency



Rys. 6. Napięcie wyjściowe przekształtnika w funkcji częstotliwości  
Fig. 6. Output voltage as a function of frequency

#### 4. OPTIMALIZACJA W TRAKCIE PRACY NAPĘDU

Ponieważ analityczne wyznaczenie charakterystyk przedstawionych w poprzednim rozdziale wymagałoby dokładnej identyfikacji parametrów maszyny, natomiast uzyskanie ich na drodze pomiarowej jest czasochłonne, dlatego zaproponowano prosty algorytm doboru napięcia korekty działający w trakcie pracy napędu. Ograniczono się przy tym wyłącznie do zadania optymalizacji statycznej prowadzonej w stanie pracy ustalonej. Takie założenie jest uzasadnione tym, że w przypadku napędów wentylatorów nie występują gwałtowne zmiany momentu obciążenia.

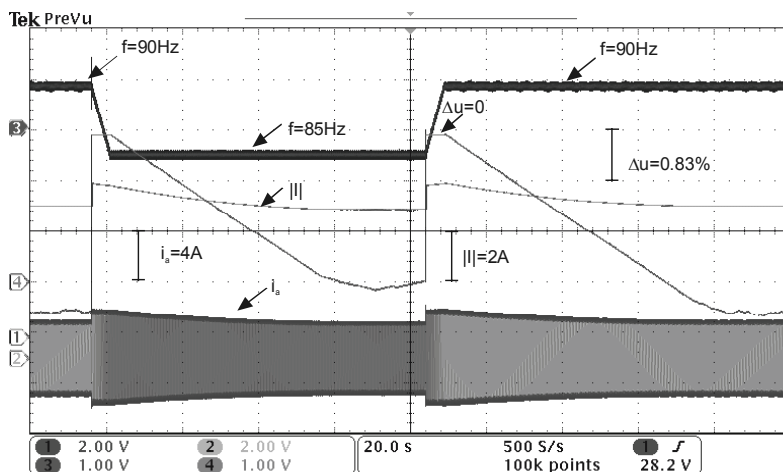
Zastosowano algorytm wspinaczkowy o zmiennym kroku, działający zgodnie ze wzorami:

$$\Delta u(n+1) = \Delta u(n) + z(n) \cdot (\delta + \eta \cdot \|i(n)\| - \|i(n-1)\|) \quad (4)$$

$$z(n) = \begin{cases} z(n-1) & \text{gdy } \|i(n)\| < \|i(n-1)\| \\ -z(n-1) & \text{gdy } \|i(n)\| \geq \|i(n-1)\| \\ 1 & \text{gdy } n = 1 \end{cases} \quad (5)$$

Parametry  $\delta$  i  $\eta$  zostały dobrane doświadczalnie, tak by zapewnić stabilność algorytmu wyszukiwania. Przedstawiony algorytm uruchamiany jest w stanie pracy ustalonej,

gdy prędkość zadana nie zmienia się, natomiast w trakcie zmian prędkości zadanej dla bezpieczeństwa napędu przyjmowane jest  $\Delta u = 0$ .



Rys. 7. Działanie algorytmu optymalizacji w trakcie zmian częstotliwości  
Fig. 7. Operation of the optimize algorithm during the frequency change

Wyniki eksperymentalne, potwierdzają poprawną pracę napędu. Rysunek 7 przedstawia zmianę częstotliwości napięcia falownika z 90 Hz na 85 Hz i powrót na 90 Hz. Po zakończeniu stanu dynamicznego napięcie korekty w czasie około 60 s obniża się do wartości optymalnej, a jednocześnie odpowiednio zmniejsza się prąd silnika.

Praca wykonana w ramach projektu POIG.01.01.02-00-113/09 „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa” realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka Działanie 1.1.

#### LITERATURA

- [1] CHANDANA PERERA P.D., BLAABJERG F., PEDERSEN J.K., THOGERSEN P., *A sensorless, stable V/f control method for Permanent-magnet synchronous motor drives*, IEEE Trans. Ind. Appl. cat., May/June 2003, Vol. 39, 783–791.
- [2] KIUCHI M., OHNISHI T., HAGIWARA H., YASUDA Y., *V/f control of Permanent Magnet Synchronous Motors suitable for home appliances by DC-link peak current control method*, International Power Electronic Conference, IPEC, 2010, 567–573.
- [3] BROCK S., PAJCHROWSKI T., *Reducing Energy Losses for Fan Applications with V/f control of PMSMs*, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2011, No. 11, 89–94.
- [4] NALEPA R., ORLOWSKA-KOWALSKA T., *Optimum Trajectory Control of the Current Vector of a Nonsalient-Pole PMSM in the Field-Weakening Region*, IEEE Trans. On Ind. Electronics, July 2012, Vol. 59, No. 7, 2867–2876.

## SENSORLESS AND ENERGY-EFFICIENT PMSM FAN DRIVE

The article presents the problem of sensorless frequency control of synchronous permanent magnets motor without damping cage by the principle of  $v/f$ , to drive the fan. In order to reduce power consumption of the drive system in the laboratory the optimal voltage to the motor frequency characteristics were determined. The study was conducted on a laboratory set-up consisting of two coupled PMSM machines where one machine was supplied by a transistor inverter, and the other was a passive load. A new criterion based on minimizing of the stator current vector module was proposed and optimization algorithm in steady states was tested. The lab results confirm the validity of the solution to drive the fan.