

## Jednofazowy falownik napięcia sterowany z użyciem metody modulacji PFM

**Streszczenie.** W artykule zawarto przebieg procesu konstrukcyjnego jednofazowego falownika napięcia, sterowanego za pomocą modulacji PFM. Przedstawiono etapy, począwszy od teoretycznych założeń i symulacji, kończąc na projekcie rzeczywistego modelu. Analiza teoretyczna oraz badania zawierają również zagadnienia obejmujące sterowanie prędkością obrotową wału silnika indukcyjnego za pomocą zmiany częstotliwości napięcia zasilania.

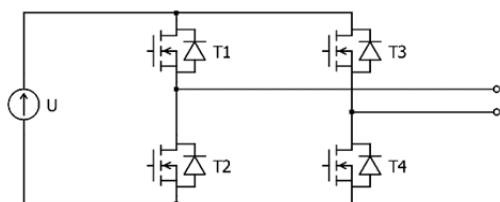
**Abstract.** The article presents construction process of the single-phase voltage inverter controlled by means of PFM modulation. The work goes through theoretical assumptions and simulations to design of the real model. The theoretical analysis and research include also problems referring to control of the rotational speed of induction motor shaft by changing the frequency of the supply voltage. (**Analysis and synthesis, design and implementation of the single-phase voltage inverter model controlled by PFM modulation**).

**Słowa kluczowe:** falownika jednofazowy, falownik napięcia, PFM, silnik indukcyjny.

**Keywords:** single phase inverter, voltage inverter, PFM, induction motor.

### Wprowadzenie

W układach jednofazowych falowników o prostokątnej fali napięcia wyjściowego, przełączanie poszczególnych łączników odbywa się przeważanie z częstotliwością napięcia wyjściowego. Częstotliwość łączeń w falownikach średniej i dużej mocy tylko w nielicznych przypadkach przekracza 100 [Hz] [1]. W układach jednofazowych przeważa mostkowy układ zaworów ( $T_1 \div T_4$ ), którego ogólny schemat został przedstawiony na rysunku 1.

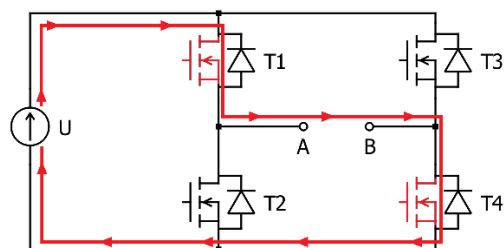


Rys. 1. Układ mostka H w falowniku jednofazowym

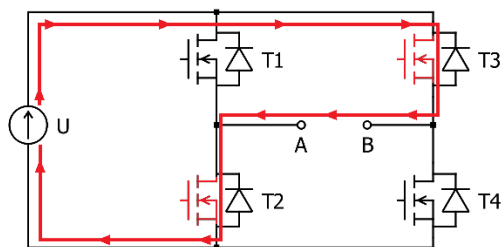
W układzie przedstawionym na rysunku 1, jako elementy przełączające wykorzystano tranzystory unipolarne MOSFET, które za sprawą swojego krótkiego czasu przełączania oraz łatwego sposobu sterowania znajdują obecnie szerokie zastosowanie w falownikach małej mocy [2]. Prezentowany falownik (rys.1) należy do grupy układów przekształtników niezależnych, których cechą charakterystyczną jest brak sztywnego połączenia od strony wyjścia z siecią zasilającą. Zasada działania falowników niezależnych nie jest oparta na źródle napięcia o stałej częstotliwości (tak jak przekształtniki o komutacji sieciowej), lecz wymagane jest zasilania o stałej wartości napięcia [2].

Proces powstawania prostokątnej fali napięcia na wyjściu mostka H jest spowodowany krótkoterminowym, naprzemiennym załączaniem diagonalnie przeciwnych par tranzystorów. W rezultacie, napięcie doprowadzane do obwodu zmienia swoją wartość w zależności od załączonej pary tranzystorów. W momencie załączenia tranzystorów  $T_1$  oraz  $T_4$  powstaje dodatnia półfala napięcia stałego  $U$ , zasilającego mostek H. Generacja ujemnej półfali prostokątnej rozpoczyna się od wyłączenia z przewodzenia tranzystorów  $T_1$  oraz  $T_4$  z jednoczesnym załączeniem tranzystorów  $T_2$  i  $T_3$ . W wyniku cyklicznego przełączania par tranzystorów na wyjściu falownika, obserwujemy powstawanie symetrycznej fali napięcia prostokątnego. Na

rysunkach 2 i 3 przedstawiono przepływ prądu przez elementy mostka w momencie załączenia poszczególnych par tranzystorów.



Rys. 2. Przepływ prądu przez elementy falownika w momencie załączenia tranzystorów  $T_1$  oraz  $T_4$



Rys. 3. Przepływ prądu przez elementy falownika w momencie załączenia tranzystorów  $T_2$  oraz  $T_3$

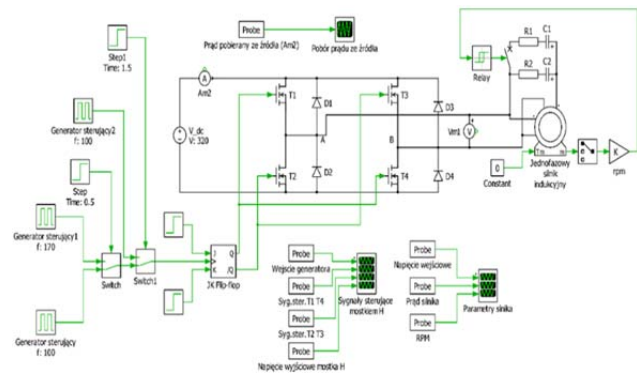
Częstotliwość napięcia wyjściowego generowanego przez mostek jest ściśle powiązana z częstotliwością sygnałów sterujących załączających poszczególne pary tranzystorów [3]. Sterowanie za pomocą modulacji PFM (Pulse Frequency Modulation) należy do najprostszych sposobów sterowania procesem komutacji tranzystorów [4]. Dysponując sterowaniem za pomocą modulacji częstości impulsów (PFM) mamy możliwość bezpośredniego przełożenia częstotliwości sygnałów sterujących na częstotliwość wyjściowej fali napięcia prostokątnego. Głównym czynnikiem mającym wpływ na decyzja o wybraniu i wdrożeniu takiego rodzaju sterowania była prostota realizacji praktycznej w postaci układu elektronicznego zbudowanego z elementów dyskretnych.

Jednym z podstawowych wymogów, stawianych współczesnym układom napędowym jest możliwość regulacji prędkości obrotowej [1]. Obecnie, zdecydowana większość silników indukcyjnych o zastosowaniu przemysłowym jest zasilana z przemienników

częstotliwości, które przez zmianę parametrów napięcia zasilania wpływają na prędkość obrotową wału [5]. Mając to na uwadze zdecydowano, że układem obciążenia dla przyszłego przekształtnika zostanie jednofazowy silnik indukcyjny. Badania obejmują regulację częstotliwości napięcia zasilania silnika indukcyjnego. Wraz ze zmianą częstotliwości napięcia zasilania silnika, zmianie ulega prędkość wirowania pola magnetycznego, co w konsekwencji wpływa na prędkość obrotową wału.

### Implementacja modelu falownika w środowisku symulacyjnym PLECS

Głównym założeniem stawianym symulacji falownika jednofazowego z obciążeniem w postaci silnika indukcyjnego jest, wymaganie, by topologia układu generującego falę napięcia prostokątnego była oparta na układzie mostka H z elementami w pełni sterowanymi typu MOSFET. Zasilanie mostka powinno stanowić wyprostowane napięcie sieciowe o wartości 320 [V]. Wszystkie powyższe założenia zaimplementowano w modelu symulacyjnym wykonanym w programie PLECS 4.5.4, którego schemat widoczny jest na rysunku 4.



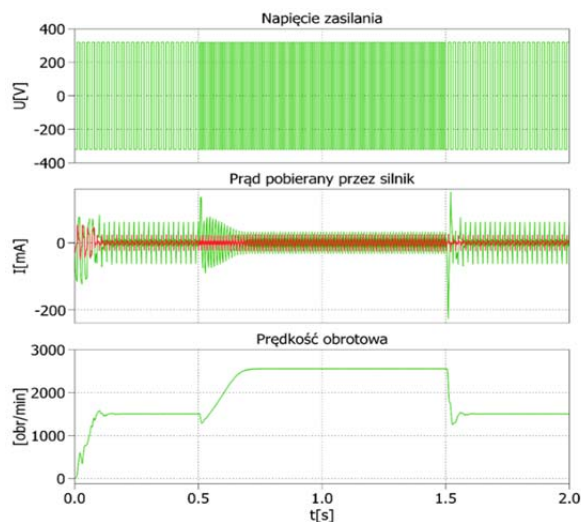
Rys. 4. Schemat symulacji falownika jednofazowego z obciążeniem w postaci silnika indukcyjnego

Głównym elementem sterowania jest generator, którego zadaniem jest podawanie sygnałów na układ złożony z przerzutnika JK. Układ przerzutnika został tak zaprojektowany, aby rozdzielić sygnał sterujący pochodzący z generatora, na dwa sygnały o przeciwnych fazach. Jest to wymagane ze względu na regułę działania mostka H. Możliwość podziału sygnału opiera się zasadzie działania przerzutnika JK, na którego wejścia  $J$  i  $K$  podano stały logiczny stan wysoki, natomiast do wejścia zegarowego wyzwalanego zboczem narastającym, podłączono generator sterujący. Zastosowany przerzutnik jest układem synchronicznym, w którym zmiana stanu wewnętrznego zależy od sygnału zegarowego (w tym konkretnie przypadku zegarem jest generator sygnału sterującego). Zbocze narastające pierwszego impulsu sygnału sterującego powoduje powstanie na wyjściu  $Q$  (wyjście niezanegowane) przerzutnika stanu wysokiego, wprawiającego w stan przewodzenia tranzystory  $T_1$  i  $T_4$ . W tym samym momencie wyjście  $/Q$  (wyjście zanegowane) pozostaje w niskim stanie logicznym, pozostawiając tranzystory  $T_2$  i  $T_3$  w stanie wysokiej rezystancji. Pojawienie się kolejnego zbocza narastającego powoduje zmianę sygnału na wejściu  $Q$ , na stan niski, co powoduje wyłączenie z przewodzenia tranzystorów  $T_1$  i  $T_4$ , jednocześnie wyjście zanegowane  $/Q$ , zmienia swój stan logiczny na wysoki, co skutkuje załączeniem tranzystorów  $T_2$  i  $T_3$ . W wyniku powyższych cyklicznych zmian stanów logicznych, na wyjściu mostka H (punkty a i b) powstaje prostokątna fala o amplitudzie wyprostowanego napięcia sieciowego.

Elementem obciążenia jest model symulacyjny wentylatora jednofazowego (firmy SUZHOU PF MOTOR & FAN TECHNOLOGY CO.). Napięcie znamionowe pracy podawane przez producenta dla wentylatora PF12038A2S wynosi 230 VAC, prąd pobierany podczas znamionowych obrotów osiąga 140 [mA].

### Badania i analiza symulowanego układu

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ zmiany częstotliwości zasilania na prędkość obrotową silnika oraz pobór prądu, na poszczególnych etapach pracy. Proces ukazujący stopniowe zwiększanie oraz zmniejszanie prędkości obrotowej za pomocą regulacji częstotliwości, został zrealizowany dla jej dwóch przykładowych wielkości. Początkowo, wygenerowano częstotliwość napięcia zasilania równą 50 [Hz], co doprowadziło do rozruchu silnika oraz ustawiło jego prędkość na poziomie ok. 1500 [obr/min]. Po upływie 0.5 [s] zwiększono częstotliwość napięcia wyjściowego, generowanego przez mostek H, na 85 [Hz]. Spowodowało to wzrost prędkości obrotowej wału silnika do 2500 [obr/min]. W celu zmniejszenia obrotów silnika, po upływie 1,5 [s] została ponownie załączona częstotliwość 50 [Hz], co spowodowało powrót obrotów wału silnika do poziomu 1500 [obr/min].



Rys. 5. Przebiegi napięć, prądów i prędkości obrotowych silnika indukcyjnego zasilanego z falownika jednofazowego w momencie zwiększania częstotliwości napięcia zasilania w czasie  $t = 0,5$  [s] oraz zmniejszenia częstotliwości napięcia  $t = 1,5$  [s]

Podczas analizy otrzymanych przebiegów, zarówno w trakcie zwiększania, jak i zmniejszania prędkości obrotowej, zaobserwowano, że w momencie rozruchu za pomocą częstotliwości 50 [Hz] wystąpiły wahania obrotów, obejmujące niemalże cały okres związany z osiągnięciem prędkości obrotowej, odpowiedniej dla danej częstotliwości. W trakcie zwiększenia częstotliwości napięcia zasilania powyżej 90 [Hz], silnik zaprzestał wykonywania obrotów. Oznacza to górny limit impulsów podawanych na silnik. Stanowi to istotny parametr przy projektowaniu rzeczywistego układu sterownia. Interesujące pozostają również przebiegi prądu pobieranego ze źródła, którego wartość rośnie w momencie zmniejszenia prędkości obrotowej. W przeprowadzonej symulacji, wartość częstotliwości zmienia się skokowo, gdyż użyte bloki generatorów umożliwiają jedynie przełączanie pomiędzy określonymi częstotliwościami w sposób bezwzględny. W celu zasymulowania płynnej zmiany częstotliwości należałoby dołączyć dodatkowe bloki generatorów z częstotliwościami pośrednimi. Dodanie większej ilości generatorów pośredniczących zmniejszyłoby skokowy charakter regulacji lecz kosztem przejrzystości symulacji.

Podczas projektowania rzeczywistego modelu, zostanie szczególnie uwzględniona możliwość płynnego sterowania częstotliwością napięcia wyjściowego.

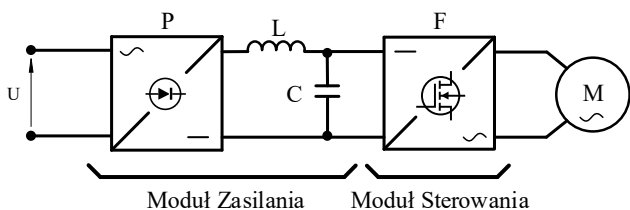
### Projekt rzeczywistego układu falownika jednofazowego

Rozpoczynając etap projektowania uwzględniono wnioski uzyskane w momencie implementacji i analizy modelu symulacyjnego. W wyniku przeprowadzonej symulacji sterowania silnikiem jednofazowym, nasunęła się konieczność zastosowania układu sterowania, który będzie umożliwiał jak najpłynniejszą zmianę częstotliwości w zakresie od 0÷100 [Hz]. Granice płynnego sterowania zostały podyktowane możliwościami zasilanego silnika. W trosce o bezpieczeństwo urzędnienia i osób go obsługujących urządzenie, zaprojektowany układ powinien posiadać zabezpieczenie przeciw przeciążeniowe, z możliwością dobrania odpowiedniego zakresu oraz wbudowany system zabezpieczający przed chwilowymi stanami przeciążenia. W celu ułatwienia projektowania oraz uproszczenia montażu, jak i mając na względzie niezawodność układów, zdecydowano o podziale falownika na dwa moduły.

Moduł zasilania – obejmujący całość problematyki związanej ze sposobem zasilania oraz zawierający w sobie elementy pomocnicze.

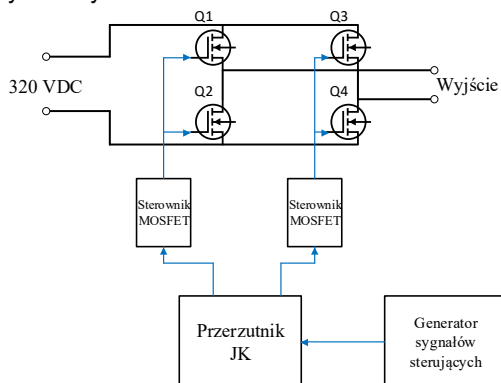
Moduł sterowania – zawierający mostek H oraz elementy związane bezpośrednio z sterowaniem jego pracą.

Rysunek 6 przedstawia ogólny schemat blokowy układu falownika z podziałem na poszczególne moduły. Idea konstrukcji przyszłego przekształtnika została oparta na falowniku z pośredniczącym układem napięcia stałego.



Rys. 6. Schemat blokowy falownika jednofazowego z pośredniczącym obwodem napięcia stałego

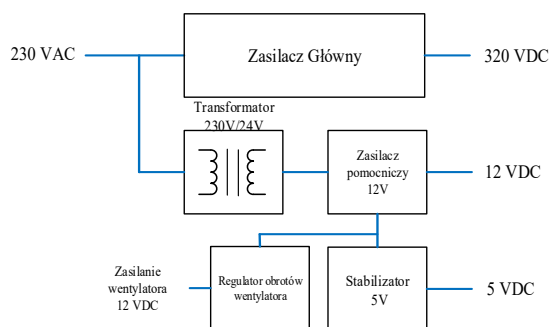
Zadaniem układu sterowania jest generowanie impulsów o zadanej częstotliwości, których celem jest odpowiednie załączanie tranzystorów mostka H. Ogólny schemat blokowy przedstawiający koncepcje działania układu sterującego przedstawia rysunek 7. Praca układu sterowania nie uległa znaczącej zmianie w porównaniu z symulowanym obwodem (rys. 4), dlatego nie ma konieczności ponownego opisu funkcjonowania układu. Zmiany dotyczą jedynie dodania do układu sterowników MOSFET umożliwiających płynne sterowanie łącznikami tranzystorowymi.



Rys. 7. Schemat blokowy modułu sterowania falownika

Głównym elementem układu jest generator sygnałów prostokątnych AVT5684, którego zakres częstotliwości mieści się w granicach od 1 Hz÷499 [kHz]. Elementem, którego zadaniem jest rozdział sygnału sterowania otrzymanego od generatora na poszczególne tranzystory mostka jest układ scalony CD4027BE, który realizuje funkcje podwójnego przerzutnika JK. Wykonany w technologii CMOS, w obudowie DIP16, układ o możliwości pracy z częstotliwością do 16 [MHz] zasilany jest za pomocą napięcia stałego o wartości 5 [V]. Układ scalony sterownika (ang. Driver) IR2184, w obudowie DIP8, umożliwia sterowania tranzystorów MOSFET zgodnie z zadaną częstotliwością impulsów podawanych na wejście IN. Element posiada również dwa wyjścia sygnałowe, które umożliwiają sterowanie dwoma tranzystorami za pomocą jednego układu. Zasilany za pomocą napięcia stałego, o wartości 12 [V], może realizować przełączanie tranzystorów z prędkością dochodzącą do 15 [kHz]. Jako element przełączający zastosowano tranzystor MOSFET STP4NK60Z w obudowie TO-220. Element umożliwia przełączanie napięć sięgających do 600 VDC z częstotliwością do 1 [MHz]. Maksymalny prąd przewodzenia wynosi 4 [A], co wiąże się z koniecznością zastosowania radiatora w celu rozproszenia ciepła powstającego podczas przełączania. Dołączając radiator, maksymalna moc zostaje zwiększona do 70 [W].

Projekt zasilacza odpowiada na potrzeby układu sterowania oferując napięcie stałe o wartości 12 [V], przeznaczone do zasilania generatora i sterowników oraz napięcie 5 VDC zasilające przerzutnik JK. Elementem stanowiącym podstawę modułu zasilania jest zasilacz sieciowy generujący napięcie 320 VDC, który stanowi zasilanie układu mostka H. Schemat ogólny modułu zasilania pokazano na rysunku 8.



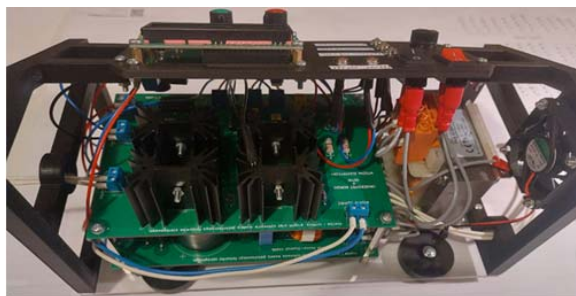
Rys. 8. Schemat blokowy modułu zasilania falownika

Zasilacz główny pobiera energię bezpośrednio z sieci, natomiast zasilacze pomocnicze wymagają napięcia o obniżonej wartości. W tym celu zastosowano sieciowy transformator, którego zadaniem jest obniżenie wartości napięcia z 230 VAC do 24 VAC. Głównym elementem zasilacza pomocniczego jest układ regulatora LM338T, którego przeznaczeniem jest stabilizacja napięcia pobieranego z transformatora na 12 VDC. Stabilizator 5 [V] zasilający układ przerzutnika został oparty na scalonym układzie LM7805. Wszystkie omówione wyżej zasilacze klasyfikowane są jako stabilizatory liniowe, których cechą charakterystyczną są relatywnie duże spadki napięcia. W celu redukcji negatywnego wpływu temperatury na elementy półprzewodnikowe zaprojektowano układ wymuszonej cyrkulacji powietrza oparty na tranzystorze MOSFET IRF9540N. Wszystkie wyżej opisane moduły zrealizowano na specjalnie zaprojektowanych do tego celu obwodach drukowanych oraz połączono przewodami o przekroju 2 [mm<sup>2</sup>], dla głównego zasilania oraz o przekroju 1 [mm<sup>2</sup>], przeznaczonymi do połączenia pozostałych układów.

Całość umieszczono w kompaktowej obudowie zaprojektowanej w programie Fusion 360 oraz wykonanej za pomocą technologii druku 3D. Rysunki 9 i 10 przedstawiają ukończony model falownika jednofazowego.



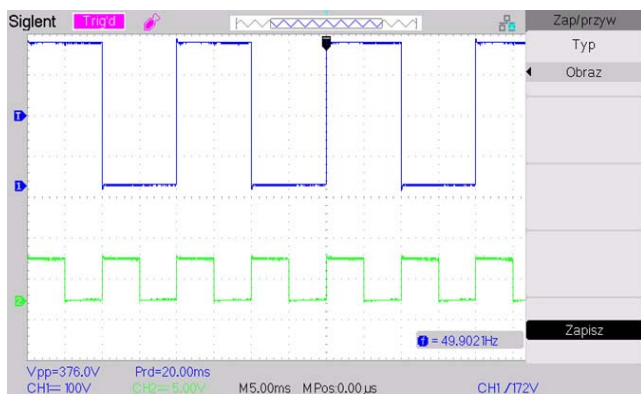
Rys. 9. Front modelu falownika jednofazowego



Rys. 10. Tył modelu falownika jednofazowego

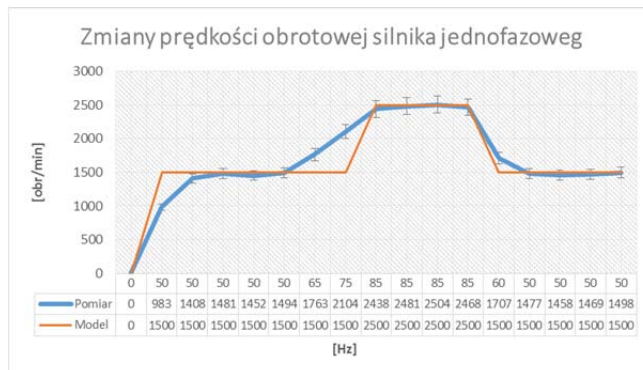
### Badania i weryfikacja pracy układu

Weryfikacji poddano napięcia generowane przez układy zasilające jak i sygnały sterujące (rys. 11). Otrzymane oscylogramy świadczą o poprawnym funkcjonowaniu całego modułu sterowania. Przeprowadzone czynności weryfikacyjne zostały dokonane przy ustawieniu częstotliwości generatora na 100 [Hz]. Efektem tego było wygenerowanie na wyjściach sterowników tranzystorowych dwóch sygnałów o przeciwnych fazach i częstotliwości ok. 50 [Hz]. W rezultacie na wyjściu otrzymano prostokątną falę napięcia o częstotliwości 50 [Hz].



Rys. 11. Oscylogram przedstawiający sygnał na wyjściu falownika w postaci prostokątnej fali napięcia (kolor niebieski) oraz sygnał wyjściowy z generatora (kolor zielony)

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej podłączono wentylator PF12038A2S firmy SUZHOU PF MOTOR & FAN TECHNOLOGY CO., z silnikiem indukcyjnym. Procedura pomiarowa polegała na uruchomieniu silnika za pomocą napięcia zasilania o częstotliwości równej 50 [Hz], a następnie, analogicznie jak w przypadku symulacji, zwiększono częstotliwość do 85 [Hz]. Prędkość obrotowa wentylatora była na bieżąco rejestrowana za pomocą laserowego obrotomierza DT-2234C+. Wyniki otrzymane podczas przeprowadzonego badania ilustruje charakterystyka widoczna na rysunku 12.



Rys. 12. Charakterystyka zmian prędkości obrotowej silnika jednofazowego w zależności od częstotliwości napięcia zasilania (porównanie pomiarów z modelem symulacyjnym)

### Wnioski

Pomierzona zależność prędkości obrotowej silnika od częstotliwości napięcia zasilania odpowiada wartościom otrzymanym w wyniku symulacji. Jedyną istotną różnicą jest moment zmiany częstotliwości, który w przypadku badania rzeczywistego układu realizowany jest w sposób płynny, a nie skokowy, jak ma to miejsce w modelu symulacyjnym. W trakcie badań laboratoryjnych, zauważono, że zwiększanie prędkości obrotowej jedynie za pomocą częstotliwości napięcia zasilania prowadzi do zmniejszenia momentu na wale silnika. Dalsze zwiększanie częstotliwości powoduje spadek momentu poniżej wartości momentu obciążenia, co w efekcie powoduje zatrzymanie silnika. Stanowi to cechę, która ogranicza stosowanie takiego rodzaju sterowania. Do wydajnej regulacji maszyny indukcyjnej wymagane jest utrzymanie stałej wartości strumienia (zachowując stosunek  $U/f=const$ ) tak aby maszyna mogła rozwinąć moment. Niespełnienie powyższego stosunku skutkuje osłabieniem strumienia co skutkuje pojawieniem się małego momentu i w konsekwencji powstanie zjawiska „utykania maszyny”. Jednakże, pomimo wyżej opisanej wady, niebagatelną zaletą tego rodzaju sterowania, jest prostota realizacji, która umożliwia wykorzystanie tej metody w silnikach o niewielkim obciążeniu wału np. w wentylatorach.

Dalsze prace rozwojowe przedstawionego układu falownika będą prowadzone w kierunku istotnej modernizacji układu sterowania. W przyszłości planowane jest zastąpienie generatora fali prostokątnej układem mikroprocesorowym, którego zadaniem będzie bieżący pomiar parametrów wyjściowych oraz odpowiednie załączanie par tranzystorów mostka za pomocą modulacji PWM.

**Autorzy:** inż. Michał Downar-Zapolski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81/87, 81-225 Gdynia, E-mail: [downarzapolski@gmail.com](mailto:downarzapolski@gmail.com); dr hab. inż. Piotr Mysiak, prof. UMG, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81/87, 81-225 Gdynia, E-mail: [p.mysiak@we.umg.edu.pl](mailto:p.mysiak@we.umg.edu.pl).

### LITERATURA

- [1] Tunia H., Winiarski B.: *Energoelektronika*, WNT, Warszawa 1994
- [2] Nowak M., Barlik R.: *Poradnik Inżyniera Energoelektronika*, WNT, Warszawa (2016), 133-141
- [3] Borecki J., Stosur M., Szkolka S.: *Energoelektronika – Podstawy i wybrane zastosowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2008), 120-123
- [4] Firma Danfoss : *Facts worth knowing about Frequency Converters*, Wydanie (1998).
- [5] Zagajewski T., Malzacher S., Kwieciński A.: *Elektronika Przemysłowa*, WNT, Warszawa (1975), 438-439