

Tomasz BISKUP

Jakub KRZAK

MODULACJA STOCHASTYCZNA ZE ZMIENNYM POŁOŻENIEM IMPULSU ZAŁĄCZAJĄCEGO

Streszczenie. Celem artykułu jest przedstawienie jednej z odmian modulacji stochastycznej, charakteryzującej się stałą częstotliwością przełączania. Rozmycie widma harmonicznego napięcia wyjściowego z falownika MSI jest uzyskiwane przez zmianę położenia impulsu załączającego tranzystory falownika. Przedstawiono algorytm sterowania oraz wyniki pomiarów, uzyskanych w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym klatkowym. Szczególną uwagę zwrócono na problem obniżenia uciążliwości hałasu pochodzącego od silnika zasilanego z takiego źródła przy zastosowaniu przedstawionego algorytmu modulacji.

RANDOMIZED PULSE POSITION PWM STRATEGY

Summary. The aim of the paper is to present one of the existing random modulation strategies, which is characterised by fixed switching frequency. Spread spectrum of the PWM inverter output voltage is obtained by randomisation on/off pulse position during each interval. There are presented the modulation strategy and some measurement results obtained in the drive with an induction motor. The main stress is put on the problem of decrease in noise generated by a motor fed from this kind of a PWM inverter.

1. WPROWADZENIE

Silniki indukcyjne klatkowe zasilane z przemienników częstotliwości MSI są obecnie najbardziej popularnym rozwiązaniem układu napędowego, wykorzystywanym w przemyśle. Ich zastosowanie obejmuje napędy pomp i wentylatorów, jak i układy o wyższych wymaganiach dynamicznych, gdzie jeszcze niedawno dominowały napędy prądu stałego.

Ta różnorodność środowisk, w jakich musi funkcjonować to urządzenie oraz powszechność jego stosowania powoduje, że w literaturze naukowej i technicznej coraz szerzej przedstawiane są tematy związane z problemami eksploatacyjnymi takich napędów. Tematyka ta obejmuje zagadnienia tak niekorzystnego wpływu przekształtnika na silnik (przyspieszone starzenie izolacji, prądy łożyskowe itp.) lub sieć zasilającą (pobór

odkształconych prądów), jak i wpływ zespołu przekształtnik-silnik na otaczające je środowisko (EMC, dodatkowy hałas).

Zasadniczymi źródłami hałasu, jakie generuje silnik, są siły aerodynamiczne, mechaniczne i magnetyczne [1], [2]. Są to zagadnienia znane z układów, gdzie silnik jest zasilany z napięcia sieciowego. W układach przekształtnikowych silnik jest źródłem dodatkowego hałasu, wynikającego z zawartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilania. Hałas ten ma najczęściej charakter tonowy i może być dokuczliwy dla obsługi, pracującej w otoczeniu takiego napędu. Problem tkwi nie w poziomie hałasu, który wcale nie musi przekraczać dopuszczalnych norm, ale w jego charakterze. Badania nad słuchem ludzkim pozwalają na stwierdzenie, że hałas tonowy jest znacznie bardziej dokuczliwy od hałasu szerokopasmowego [3].

2. WPLYW METODY MODULACJI NA HAŁAS GENEROWANY PRZEZ SILNIK

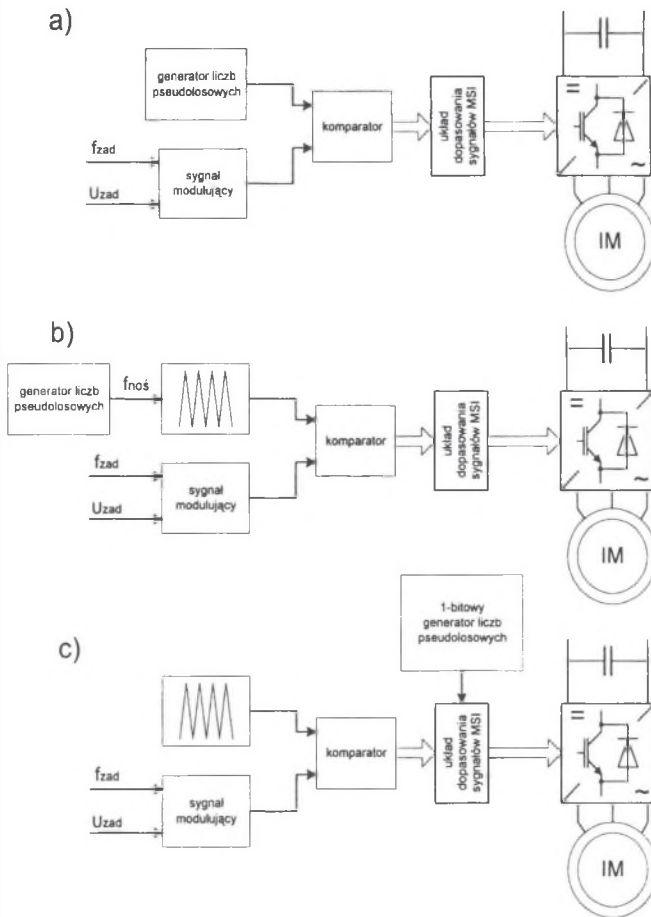
Naczelnym celem modulacji jest kształtowanie wartości pierwszej harmonicznej napięcia i częstotliwości wyjściowej przemiennika na zadanym poziomie. Otrzymywane napięcie międzyfazowe jest napięciem przemiennym, zmodulowanym o stałej amplitudzie i zawiera szereg wyższych harmonicznych, których wartość jest zależna od typu zastosowanej modulacji.

Do najczęściej stosowanych metod modulacji: naturalnej z sygnałem nośnym i wektorowej, widmo to poza pierwszą harmoniczną zawiera wielokrotności częstotliwości przełączania i ich wstęgi boczne. Są one przyczyną dodatkowego hałasu tonowego generowanego przez silnik, wywołanego przez siły magnetyczne. Jest to zjawisko charakterystyczne dla napędów z przekształtnikami MSI.

Od końca lat 80 w literaturze tematu pojawiały się informacje o zastosowaniu różnych odmian modulacji stochastycznej w celu zmniejszenia uciążliwości hałasu, którego źródłem jest silnik [4], [5], [6]. Modulacja stochastyczna najogólniej pozwala na rozmycie widma harmonicznych napięcia zasilającego silnik i w ten sposób na zmianę charakteru widma z tonowego na szerokopasmowy. Można wyróżnić 3 podstawowe grupy modulacji stochastycznej:

- modulacja ze stochastycznym sygnałem nośnym,
- modulacja ze stochastycznie zmienną częstotliwością przełączania,
- modulacja ze zmiennym położeniem impulsu załączającego zawór.

Schematy blokowe modulatorów dla tych trzech odmian zostały przedstawione na rysunku 1.



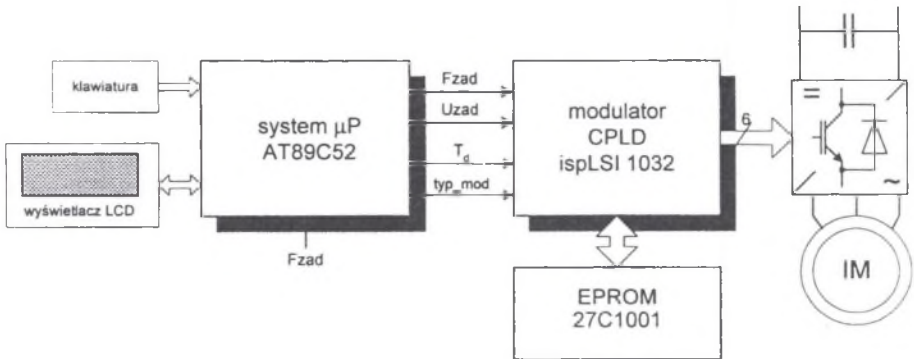
Rys.1. Schematy blokowe modulatorów dla: a) modulacji ze stochastycznym sygnałem nośnym, b) modulacji ze stochastycznie zmienną częstotliwością przełączeń, c) modulacji ze stochastycznie zmiennym położeniem impulsu załączającego

Fig.1. Block diagrams of modulators for: a) random carrier modulation, b) randomized switching frequency modulation, c) randomized pulse position modulation

Pierwsza z tych odmian ma znaczenie raczej już tylko historyczne, jako pierwsza, która została zaproponowana w literaturze. Autorzy w dotychczasowych pracach skupili się na implementacji i badaniu właściwości odmiany drugiej [7]-[10]. W niniejszym artykule przedstawiona zostanie realizacja modulacji stochastycznej ze zmiennym położeniem impulsu załączającego.

3. UKŁAD STEROWANIA Z MODULATOREM STOCHASTYCZNYM

Układ sterowania falownika napięcia MSI został skonstruowany pod potrzeby badań laboratoryjnych. Zastosowano technikę hybrydową poprzez połączenie prostego sytemu mikroprocesorowego, opartego na 8-bitowym mikrokontrolerze Atmel 89C52 oraz modulatora zbudowanego w oparciu o programowalne układy CPLD. Schemat blokowy układu został przedstawiony na rysunku 2.



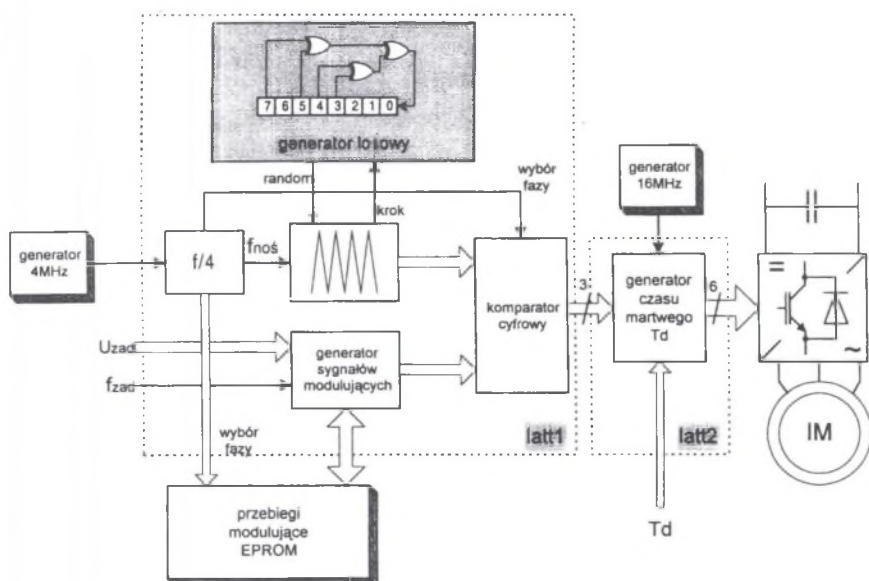
Rys.2. Schemat blokowy układu sterowania falownika napięcia MSI

Fig.2. Block diagram of PWM inverter control system

Funkcje systemu mikroprocesorowego zostały ograniczone do komunikacji z użytkownikiem za pomocą klawiatury i wyświetlacza LCD, kształtowania charakterystyki U/f , ustawiania czasu martwego T_d i rodzaju modulacji. W niniejszych badaniach wykorzystano pracę z modulacją naturalną z sinusoidalnym sygnałem nośnym i modulację stochastyczną ze zmiennym położeniem impulsu załączającego.

Zasadniczą rolę pełni w systemie modulator oparty na układach CPLD Lattice ispLSI 1032. Schemat blokowy modulatora został pokazany na rysunku 3. Pierwsza z matryc CPLD (*latt1*) realizuje zadany algorytm modulacji, druga (*latt2*) pozwala na wprowadzenie czasu martwego, nastawianego w zakresie 1..10 μ s.

Jak wspomniano wyżej, obie metody bazują na algorytmie modulacji naturalnej niesynchronizowanej z trójkątnym sygnałem nośnym. Sygnał prostokątny o częstotliwości ok.4MHz, taktujący generator sygnału nośnego, jest wstępnie dzielony przez 4. Pozwala to na wydzielenie 3 taktów na komparację z 3 sygnałami modulującymi dla poszczególnych faz falownika, oraz czwarty takt na synchronizację przełączenia wszystkich tych sygnałów. Sygnały modulujące dla 3 faz są przechowywane w pamięci EPROM. Każda faza wymaga 128 tablic funkcji sinus (lub innej modulującej) o liniowo zwiększającej się amplitudzie (0..127). Funkcja sinus (jeden okres) została zapisana w postaci 255 zdyskretyzowanych wartości.



Rys.3. Schemat modulatora stochastycznego zbudowanego w oparciu o układy CPLD

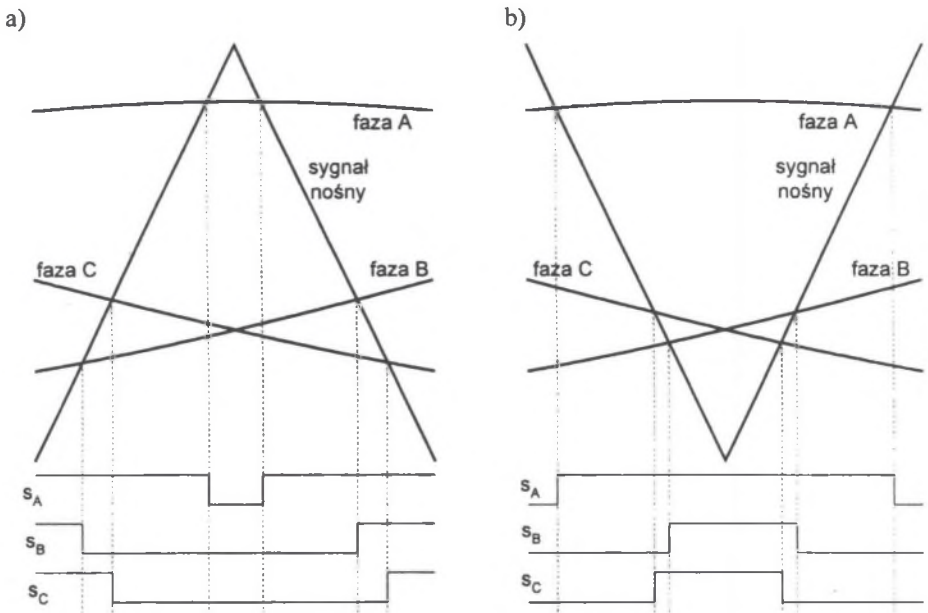
Fig.3. Diagram of a random modulator built of CPLDs

Oznacza to, że sygnał F_{zad} o częstotliwości 255 razy większej od zadanej częstotliwości wyjściowej falownika taktuje licznik adresujący kolejne próbki sygnału modulującego. Siedem bitów adresu pochodzi od zadanej amplitudy tego sygnału (0-127) i jest zadawanych przez mikrokontroler, a pozostałe 2 bity wskazują na aktualną fazę (a , b , c) sygnału modulującego. Tak uzyskany sygnał modulujący jest porównywany z trójkątnym sygnałem nośnym o częstotliwości ok. 3,9kHz. W czwartym taktie uzyskane z komparatora sygnały sterujące są przepisywane i podawane na układ generujący czas martwy zrealizowany w bloku *latt2*.

Na układ ten składa się 6 niezależnych modułów, z których każdy wprowadza w sygnał sterujący czas martwy T_d o zadanej przez mikrokontroler wartości (1..10 μ s). Do tej matrycy doprowadzono sygnał zegarowy o częstotliwości 16MHz. Pozwala to na osiągnięcie dokładności w zadanej wartości T_d rzędu 62,5ns.

Dla modulacji stochastycznej ze zmiennym położeniem impulsu załączającego wprowadzona zostaje modyfikacja, polegająca na przełączaniu kolejnego okresu trójkątnego sygnału nośnego w sposób losowy: albo rozpoczyna się od wartości maksymalnej, albo rozpoczyna się od wartości minimalnej. W efekcie impuls załączający będzie leżał na początku i końcu okresu lub w jego środku. Ilustracją tego procesu jest rysunek 4.

Generator liczb pseudolosowych jest układem 8-bitowym i został oparty na idei rejestrów przesuwanych. Wykorzystuje się najstarszy bit z generatora 8-bitowego. Jego schemat blokowy przedstawiono także na rysunku 3.



Rys.4. Przebiegi sygnałów modulujących i nośnego dla modulacji stochastycznej dla wyjścia z generatora losowego: a) $random=0$, b) $random=1$

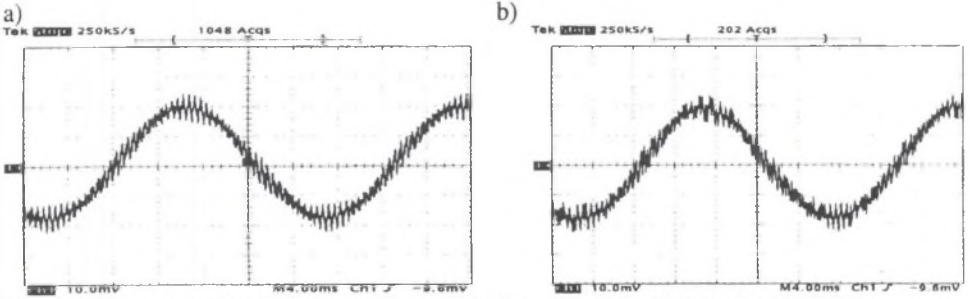
Fig.4. Waveforms of modulating signal and carrier for random modulation at the random generator output : a) $random = 0$, b) $random = 1$

4. POMIARY UKŁADU NAPĘDOWEGO Z MODULACJĄ STOCHASTYCZNĄ

W celu zweryfikowania przyjętych założeń przeprowadzono wiele eksperymentów laboratoryjnych. Jako obiekt modelowy wykorzystano silnik indukcyjny klatkowy o mocy 2,2kW.

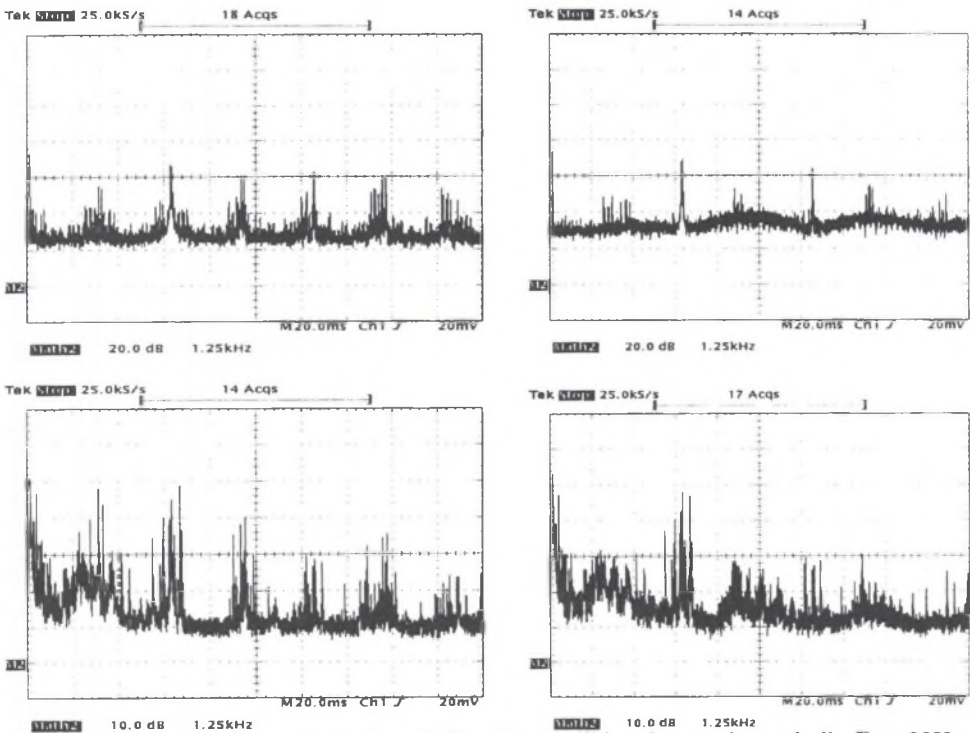
Zasadnicze obserwacje dotyczyły zachowania w stanach statycznych i dynamicznych silnika pracującego na biegu jałowym. W trakcie tych badań nie stwierdzono znaczących różnic w pracy układu napędowego w porównaniu do zastosowania klasycznej modulacji naturalnej. Przykładowe przebiegi prądu dla częstotliwości wyjściowej falownika $F_{wyj}=40\text{Hz}$ pokazano na rysunku 5.

Zgodnie z podanymi wytycznymi zasadniczą uwagę zwrócono na hałas generowany przez silnik dla obu metod modulacji. Subiektywne wrażenie wskazuje na to, że hałas dla modulacji stochastycznej jest mniej uciążliwy. W zmierzonych widmach napięcia wyjściowego falownika i hałasu generowanego przez silnik można zaobserwować jego rozmycie w dużym zakresie. Widoczne są jednak nadal prążki pochodzące od parzystych krotności częstotliwości sygnału nośnego. Jest to zasadnicza różnica w porównaniu do modulacji stochastycznej ze zmienną częstotliwością przełączania [8]. Przykładowe widma napięcia i hałasu dla obu metod modulacji zostały przedstawione na rysunkach 6 - 9.



Rys.5. Przebiegi prądu silnika przy $F_{wyj}=40\text{Hz}$ dla: a) modulacji naturalnej (MNN), b) modulacji stochastycznej ze zmiennym położeniem impulsu załączającego (MSZPI)

Fig.5. Waveforms of the motor current at $F_{wyj}=40\text{Hz}$ for: a) natural modulation (MNN), b) randomized pulse-position modulation (MSZPI)

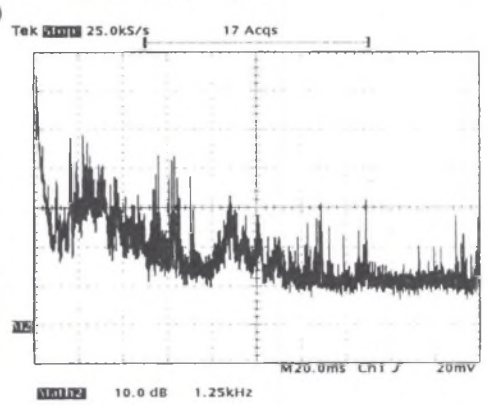
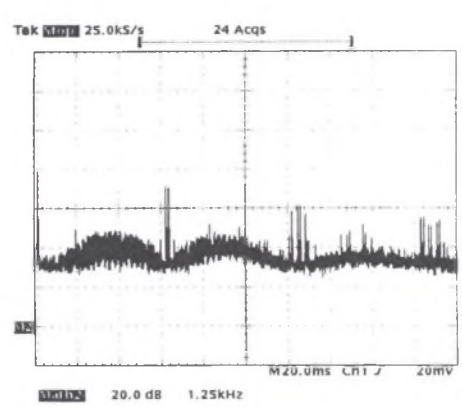
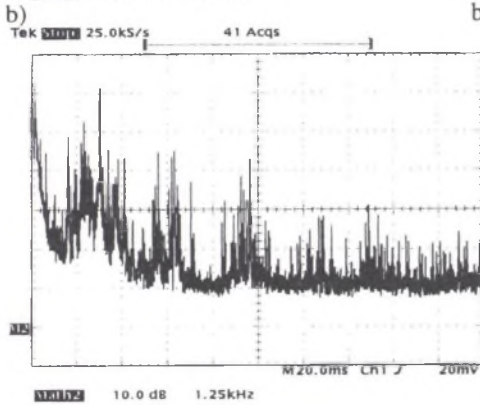
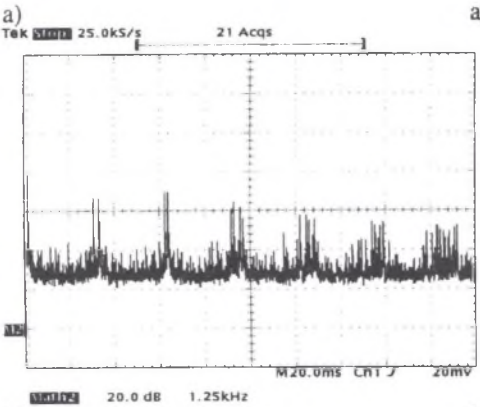


Rys.6. Widmo harmoniczných dla $F_{wyj}=20\text{Hz}$, modulacja MNN, skala decybelowa:
a) napięcia fazowego
b) hałasu

Fig.6. Harmonic spectrum for $F_{wyj}=20\text{Hz}$, (MNN modulation, decibel scale):
a) of a phase voltage
b) of noise

Rys.7. Widmo harmoniczných dla $F_{wyj}=20\text{Hz}$, modulacja MSZPI, skala decybelowa:
a) napięcia fazowego
b) hałasu

Fig.7. Harmonic spectrum for $F_{wyj}=20\text{Hz}$, (MSZPI modulation, decibel scale):
a) of a phase voltage
b) of noise



Rys.8. Widmo harmoniczných dla $F_{wyj}=40\text{Hz}$,
modulacja MNN, skala decybelowa:
a) napięcia fazowego,
b) hałasu

Fig.8. Harmonic spectrum for $F_{wyj}=40\text{Hz}$,
(MNN modulation, decibel scale):
a) of a phase voltage
b) of noise

Rys.9. Widmo harmoniczných dla $F_{wyj}=40\text{Hz}$,
modulacja MSZPI, skala decybelowa:
a) napięcia fazowego,
b) hałasu

Fig.9. Harmonic spectrum for $F_{wyj}=40\text{Hz}$,
(MSZPI modulation, decibel scale):
a) of a phase voltage
b) of noise

Zmierzone poziomy hałasu ulegają tylko niewielkim zmianom. Wszystkie pomiary dotyczące poziomu hałasu i jego widma zostały uzyskane za pomocą miernika Bruel&Kjaer 2238 Mediator oraz oscyloskopu z FFT TDS 620. Wykorzystano opcję pomiaru widma uśrednionego, co pozwala na częściowe oddanie całkujących właściwości ucha ludzkiego [3].

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono układ sterowania falownika napięcia realizujący algorytm modulacji stochastycznej ze zmiennym położeniem impulsu załączającego (MSZPI). Główne zadania wykonuje modulator zbudowany na bazie programowalnych układów CPLD. Przeprowadzone badania wskazują na to, że tego typu elementy znakomicie nadają się do realizacji nawet skomplikowanych algorytmów przełączania zaworów energoelektronicznych, zwłaszcza dla bardzo dużych częstotliwości, co pozwala np. na odciążenie nadrzędnego systemu mikroprocesorowego. Badany układ umożliwiał zmianę typu modulatora i zmianę wartości czasu martwego w czasie pracy urządzenia. Pozwalało to zwłaszcza na lepszą ocenę akustycznych właściwości układu napędowego z falownikiem napięcia. Warta zauważenia jest także duża odporność układów CPLD na zakłócenia.

W celu zobrazowania właściwości modulacji stochastycznej typu MSZPI porównano ją do znanej modulacji naturalnej, szczególną uwagę zwracając na hałas, jaki jest generowany przez silnik zasilany z falownika. Badania te wskazują na lepsze właściwości modulacji stochastycznej ze zmiennym położeniem impulsu załączającego MSZPI. Jak można zauważyć w widmie napięcia (rys.7a i 9a), tylko nieparzyste krotności częstotliwości przełączania ulegają rozmyciu. Stąd charakter hałasu jest niestety mieszany i w tle szumu przebija się tonowy hałas głównie od drugiej krotności częstotliwości przełączania.

W planach autorów jest także przeprowadzenie analizy wpływu typu modulacji na wibracje maszyny zasilanej z falownika napięcia.

LITERATURA

1. Ellison A.J. i in.: Acoustic Noise and Vibration of Rotating Electric Machines, Proc. IEE, Vol.115, No.11, Nov. 1968.
2. Frydrychowicz-Jastrzębska G.: Modelowe badania diagnostyczne przyczyn nadmiernego hałasu silników indukcyjnych. Materiały VII Sympozjum Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki, PPEE'97, Ustroń-Jaszowiec, 17-20.03.1997.
3. Rocznik M.: Fizyka hałasu. Podstawy akustyki ośrodków gazowych, Wyd.Pol.Śl., Gliwice 1996.
4. Boys J.T., Handley P.G.: Spread Spectrum Switching: Low Noise Modulation Technique for PWM Inverter Drives, IEE Proc.-B, Vol.139, No.3, May 1992.
5. Trzynadlowski A.M., i in.: Random Pulse Width Modulation Techniques for Converter-Fed Drive Systems - A Review, IEEE Tran. On Ind. Apply., Vol.30, No.5, Sep/Oct 1994.
6. Bech M.M., Pedersen J.K., Blaabjerg F.: Random Modulation Techniques in Power Conversion - An Update, Proceedings of 7th International Power Electronics & Motion Control Conference, PEMC'96, Budapest, Hungary 2-4.09.1996.

7. Biskup T., Teluk J.: Mikroprocesorowa realizacja modulacji wektorowej/stochastycznej. Materiały Konferencji Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, Łódź-Arturówek 12-14.11.1997.
8. Biskup T., Grzesik B., Teluk J.: Random Modulation - A Comparison of Realizations, Proceedings of International Conference on Power Electronics, Motion Control PEMC'98, Praga, Czechy, 8-10.09.1998.
9. Biskup T., Teluk J.: Modulacja stochastyczna i jej zastosowanie do sterowania przemiennikami częstotliwości MSI. Materiały VIII Sympozjum Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki, PPEE'99, Wisła, 22-25.03.1999.
10. Biskup T., Teluk J.: Idea i zastosowanie modulacji stochastycznej do sterowania 3-fazowego falownika napięcia - część 1 i 2, Zeszyty Naukowe Pol. Śl. seria Elektryka nr 170, Gliwice 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nowacki

Wpłynęło do Redakcji dnia 3 kwietnia 2000 r.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr T10A 029 18 finansowanego przez KBN.

Abstract

The aim of the paper is to present one of the existing random modulation strategies, which is characterised by fixed switching frequency. One of the important problem connected with PWM inverters is the acoustic and vibration effects of the supplied drive systems. The main source of noise is an induction motor. A motor supplied by the PWM inverter generates a new kind of acoustic noise because of the addition of harmonics in the voltage. The most popular PWM inverters work with fixed switching frequency. Deterministic PWM voltage control results in periodic voltage and current waveforms, which consist of the fundamental component and, in addition, unwanted harmonics. The harmonics occur in clusters that are integer multiples of the switching frequency. In many cases these higher harmonics cause tonal acoustic noise which is more annoying. This problem can be solved by replacing the fixed switching operation with a random (non-deterministic) switching strategy, the spread voltage spectrum resulting in improved acoustic effects in drive systems.

Description of the control system (Fig.2) of frequency inverter is given in the paper. Spread spectrum of output voltage of PWM inverter is obtained by randomization on/off pulse position during each interval (RPP). There are presented the modulation strategy and some measurement results obtained in the drive with an induction motor. The RPP strategy is based on classical triangle carrier PWM. The main part of the control system was built of CPLDs (Fig.3). The results of investigations and measurements are presented at the end of the paper. The measurements were taken on with 2.2 kW induction motor. The main stress is put on the problem of decrease in noise generated by a motor fed from this kind of a PWM inverter.

Examples of the obtained measurement results are presented in Figs. 5-9 for random and deterministic strategies of modulation. The investigations show that AC drive with random modulation is less annoying than deterministic ones.