Tomasz BISKUP

# ALGORYTMY MODULACJI STOCHASTYCZNEJ ZE ZMIENNYM POŁOŻENIEM IMPULSU ZAŁĄCZAJĄCEGO I ICH WPŁYW NA ZJAWISKA WIBROAKUSTYCZNE

Streszczenie. Celem artykułu jest przedstawienie algorytmów modulacji stochastycznej ze zmiennym położeniem impulsu załączającego zawory falownika. Wszystkie one charakteryzują się stałym okresem próbkowania i wykorzystują jeden ze stopni swobody jaki daje bazowy algorytm modulacji wektorowej. Ich porównanie jest przeprowadzone z punktu widzenia właściwości wibroakustycznych układu napędowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym, zasilanym z falownika napięcia MSI.

# RANDOMIZED PULSE POSITION PWM STRATEGIES AND THEIR INFLUENCE ON ACOUSTIC PHENOMENA

**Summary.** The aim of a paper is to present several random modulation strategies which are characterised by a fixed switching frequency. Spread spectra of the output voltage of a PWM inverter are obtained by randomization on/off pulse position during each interval. There are presented modulation strategies and some measurements obtained in a drive with an induction motor. The main stress is put on the problem of decreasing the noise generated by a motor fed from this kind of a PWM inverter.

# **1. WPROWADZENIE**

Nowoczesna energoelektronika w przemysłowych układach napędowych prądu przemiennego to przede wszystkim przemienniki częstotliwości MSI. Wiele zalet tych układów decyduje o ich sukcesie i w zakresie ekonomii, i w zakresie techniki. Wysoka sprawność przetwarzania energii, dobre właściwości regulacyjne, niezawodność i cena powodują, że są one bezkonkurencyjnym rozwiązaniem w tym obszarze.

Oprócz zalet należy jednak wskazać na wady takiego sposobu zasilania silnika indukcyjnego. Do najważniejszych można zaliczyć: niekorzystny wpływ na sieć zasilającą, przyśpieszone starzenie izolacji uzwojeń, uszkodzenia łożysk, powiększone wibracje i dodatkowy hałas, jaki jest generowany przez silnik zasilany z przemiennika częstotliwości.

Silniki indukcyjne są źródłem hałasu także przy zasilaniu z napięcia sieciowego [1]. Jego przyczyną jest wentylator chłodzący, jak i wibracje pojawiające się w poszczególnych elementach silnika, będące wynikiem działania sił mechanicznych i magnetycznych.

Zasilanie silnika ze źródła napięcia odkształconego powoduje powiększenie hałasu w stosunku do przypadku zasilania napięciem sinusoidalnym. W większości stosowanych w przemyśle falowników napięcia MSI częstotliwość przełączeń zaworów jest stała, dla stałej częstotliwości napięcia wyjściowego przekształtnika. Wiąże się to z wykorzystywanymi metodami modulacji (modulacja naturalna, modulacja wektorowa), w których częstotliwość przełączeń jest stała.

#### 2. CEL PRACY

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań wpływu modulacji stochastycznej ze zmiennym położeniem impulsu załączającego na zmniejszenie uciążliwości hałasu pochodzącego od silnika indukcyjnego klatkowego, zasilanego z falownika napięcia MSI.

Do realizacji tego celu skonstruowano szereg algorytmów modulacji stochastycznej o stałym okresie próbkowania, które zostały zaimplementowane w systemie mikroprocesorowym sterownika przemiennika częstotliwości MSI. Algorytmy te zostały przebadane pod względem wpływu na właściwości statyczne oraz właściwości wibroakustyczne układu napędowego.

# 3. MODULACJA STOCHASTYCZNA ZE ZMIENNYM POŁOŻENIEM IMPULSU ZAŁĄCZAJĄCEGO

W rozdziale niniejszym zostaną przedstawione algorytmy modulacji stochastycznej badane przez autora pracy. Bazą do ich realizacji jest znana modulacja wektorowa, przy czym w każdym przypadku wykorzystano do losowego uzmiennienia jeden z możliwych stopni swobody tej metody [5]. W badaniach laboratoryjnych wykorzystywano przemiennik częstotliwości z falownikiem napięcia MSI, o konstrukcji przedstawionej we wcześniejszych pracach [2], oraz silnik indukcyjny klatkowy o mocy 3 kW.

Modulacja wektorowa [3] bazuje na opisie trójfazowych wielkości w prostokątnym układzie współrzędnych ( $\alpha\beta$ ), za pomocą wektora przestrzennego. Dla możliwych 8 stanów zaworów falownika można wykreślić położenie odpowiednich wektorów przestrzennych napięcia wyjściowego - rys.1. Otrzymuje się wtedy 2 wektory zerowe i 6 wektorów niezerowych. Można za ich pomocą ustalić sekwencje przełączeń obowiązujące dla danego sektora. Korzystając z dodatkowych założeń o odpowiednio małym czasie próbkowania  $T_c$ , można wyprowadzić znane zależności na czasy trwania odpowiednich wektorów aktywnych i zerowych:



Rys.1.Stany zaworów falownika i odwzorowanie napięcia wyjściowego na płaszczyźnie ( $\alpha\beta$ ) Fig.1. Switching pattern and inverter output voltage space in ( $\alpha\beta$ )

$$t_{1} = \frac{1}{\sqrt{3}} m_{1} T_{c} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \omega_{0} t\right),$$

$$t_{2} = \frac{1}{\sqrt{3}} m_{1} T_{c} \sin\omega_{0} t,$$

$$t_{0} = \frac{T_{c}}{2} - (t_{1} + t_{2}),$$
(1)

gdzie  $m_1 = \frac{U_{h1}}{\frac{2}{3}U_d}$ .

Klasycznie stosuje się następującą sekwencję przełączeń (przykład dla sektora 1):

$$0 - w1 - w2 - z7 - w2 - w1 - z0$$

gdzie: z - wektor zerowy, w1,w2 - wektory niezerowe.

#### 3.1. Modulacja RLL

Charakteryzuje się ona zmodyfikowanym układem sekwencji sterowań względem rozwiązania bazowego. Czas przeznaczony na wektory zerowe z0 i z7 jest dzielony równomiernie. Algorytm ten został pokazany na rys.2. Przy założeniu równomiernego rozkładu prawdopodobieństwa dla wykorzystywanego generatora losowego, średnia częstotliwość przełączeń zmniejsza się do 75% częstotliwości podstawowej  $f_p=1/T_c$ . Otrzymane w ten sposób efekty akustyczne odbiegają mocno od uzyskiwanych, we wcześniejszych pracach autora, przy zmiennej częstotliwości przełączeń [2]. W hałasie silnie przebija hałas tonowy od częstotliwości przełączania i jej wielokrotności – rys 3 i 4. Jako zaletę można wskazać prostotę rozwiązania i zredukowany 1-bitowy generator liczb pseudolosowych. Niewątpliwie wadą są cykle przełączeń, wśród których mogą się zdarzać także takie, w których wszystkie półmostki falownika są jednocześnie przełączane (sekwencja z0-z7 lub z7-z0).













Fig.4. Spectra of a) phase voltage and b) noise,  $F_o$ =40 Hz, no load,  $f_s$ =5 kHz, RLL algorithm

#### 3.2. Modulacja RPP

W tym algorytmie przyjęto 2 kolejności wybierania wektorów według układu klasycznego:

$$z0 - w1 - w2 - z7 - w2 - w1 - z0$$
 lub  $z7 - w2 - w1 - z0 - w1 - w2 - z7$ 

Powoduje to, że na styku kolejnych cykli przełączeń mogą się pojawiać dodatkowe przełączenia wszystkich zaworów w półmostkach (*z7-z0* lub *z0-z7*).

Algorytm ten charakteryzuje się stosunkowo prostą konstrukcją, wymaga także 1-bitowego generatora pseudolosowego. W widmie napięcia wyjściowego falownika znikają lub są bardzo zredukowane nieparzyste wielokrotności częstotliwości przełączania – rys.6 i 7, co objawia się mniej dokuczliwym hałasem w porównaniu z metodą RLL. Metoda ta pozwala także na znaczne ograniczenie pulsacji prądu silnika.

#### 3.3. Modulacja ZVD

Przyjmuje ona inną koncepcję zaburzenia regularności impulsów sterujących w kolejnych cyklach. Tu podstawową zasadą jest losowa dystrybucja czasu przeznaczonego na wektory zerowe z0 i z7. Należy jednak pamiętać o ograniczeniach na najkrótsze czasy przełączania zaworów. To powoduje, że pole manewru jest największe dla małej wartości współczynnika głębokości modulacji, a prawie żadne dla dużych wartości współczynnika. Z drugiej strony dokuczliwość hałasu magnetycznego jest największa dla małych i średnich prędkości wirowania silników. Dla każdego cyklu przełączania musi być spełniona zasada:

$$t_{0a} + t_{0b} = t_0 . (2)$$

Rozdział czasu  $t_0$  na dwie składowe jest realizowany na podstawie wartości zmiennej losowej obliczanej w każdym cyklu. Rysunek 8 pokazuje, że symetria sygnałów sterujących jest zachowana. Widmo napięcia falownika wykazuje duże rozmycie dla małych i średnich wartości współczynnika głębokości modulacji, wraz z jego wzrostem można zauważyć w widmie wszystkie krotności częstotliwości przełączania – rys.9 i 10.

#### 3.4. Modulacja ZVP

Algorytm jest zbliżony do metody poprzedniej. Poprzez niesymetryczny rozdział czasu przeznaczonego na wektor zerowy  $z\theta$  rozpoczynający i kończący cykl przełączania można uzyskać efekty bardzo podobne do metody ZVD. Suma składowych jest stała i wynika z równania (1).

$$t_{0x} + t_{0y} = t_0 . ag{3}$$







b) noise,  $F_o=10$  Hz, no load,  $f_s$ =5 kHz, RPP algorithm

 $f_s=5$  kHz, RPP algorithm













- Rys.12. Widmo a) napięcia fazowego i b) hałasu silnika, F<sub>wyj</sub>=10Hz, bieg jałowy, f<sub>p</sub>=5kHz
- Fig.12. Spectra of a) phase voltage and b) noise,  $F_o=10$  Hz, no load,  $f_s=5$  kHz



- Rys.13.Widmo a) napięcia fazowego i b) hałasu silnika, F<sub>wyj</sub>=40Hz, bieg jałowy, f<sub>p</sub>=5kHz
- Fig.13. Spectra of a) phase voltage and b) noise,  $F_o=40$  Hz, no load,  $f_s=5$  kHz

Jak widać z rysunku 11, przebiegi sygnałów sterujących tracą symetrię. Ma to pewien wpływ na pulsacje w prądzie silnika. Efekty akustyczne oraz widmo napięcia wyjściowego – rys.12 i 13 falownika są zbliżone do poprzedniej metody, z takimi samymi uwarunkowaniami, jeśli chodzi o współczynnik głębokości modulacji.

## 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono porównanie kilku algorytmów modulacji stochastycznej charakteryzujących się stałym okresem próbkowania  $T_c$ . Znaczenie takich metod wynika z konstrukcji programów sterujących falownikami napięcia, gdzie często szereg procedur wzajemnie uzależnionych od siebie powinno być wykonywanych synchronicznie (pomiary, model silnika, regulatory, modulator). Tak postawione wymaganie eliminuje możliwość zastosowania modulacji stochastycznej ze zmienną częstotliwością przełączania [2].

- Najogólniej efekty akustyczne uzyskiwane przy zastosowaniu modulacji stochastycznej ze zmiennym położeniem impulsu załączającego są nieco gorsze w porównaniu z metodami ze zmienną częstotliwością przełączania (RSF) [2].
- Rozmycie widma napięcia wyjściowego falownika zależy w dużym stopniu od konstrukcji algorytmu. Dla części z badanych przez autora metod (ZVD i ZVP) rozmycie widma jest duże dla małych i średnich współczynników głębokości modulacji, a niewielkie dla dużych współczynników głębokości modulacji. W tym drugim przypadku ma to o tyle mniejsze znaczenie, że dla prędkości wirowania silnika zbliżonych do znamionowej hałas aerodynamiczny dominuje nad hałasem magnetycznym.
- Z punktu widzenia rozmycia widma napięcia zasilającego i efektów akustycznych badane 4 algorytmy modulacji ze zmiennym położeniem impulsu załączającego można by uszeregować od najlepszego do najgorszego w sposób następujący: ZVD, ZVP, RPP, RLL.
- Algorytmy przebadane w czasie realizacji projektu są stosunkowo proste do implementacji programowej. Nie wymagają one znaczących zmian w części układowej sterownika. W czasie badań nie zanotowano niekorzystnych zjawisk w układzie napędowym (niestabilność pracy itp.). Dodatkowo wykonana analiza widma wibracji maszyny wskazuje, że po zastosowaniu modulacji stochastycznej jakkolwiek poziom wibracji w niewielkim stopniu zwiększa się, to jednocześnie prążki pochodzące od częstotliwości przełączania ulegają znacznemu spłaszczeniu więc i ich maksima są znacznie niższe [4].

#### LITERATURA

 Ellison A.J. i in.: Acoustic Noise and Vibration of Rotating Electric Machines, Proc. IEE, Vol.115, No.11, Nov. 1968.

- Biskup T., Teluk J.: Idea i zastosowanie modulacji stochastycznej do sterowania 3fazowego falownika napięcia - część 1 i 2, Zeszyty Naukowe Pol. Śl. seria Elektryka nr 170, Gliwice 1999.
- Nowacki Z.: Modulacja szerokości impulsów w napędach przekształtnikowych, PWN, Warszawa 1991.
- Biskup T., Teluk J.: Przebadanie modulacji stochastycznej ze zmiennym położeniem impulsu załączającego, ze względu na generację hałasu przez silnik indukcyjny klatkowy zasilany z przemiennika MSI, sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 8T10A02918, Gliwice 2000
- 5. Bech M.M., Blaabjerg F., Pedersen J.K.: Random Modulation Techniques with Fixed Switching Frequency for Three-Phase Power Converters, proceedings of PESC'99, Charleston USA, 29.06-1.07.1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nowacki

Wpłynęło do Redakcji dnia 7 maja 2001 r.

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

### Abstract

The aim of the paper is to present several random modulation strategies which are characterised by a fixed switching period. One of the important problems connected with PWM inverters is the acoustic and vibration effects of supplied drive systems. The main source of noise is an induction motor. A motor supplied by a 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 a 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 spectra result in improved acoustic effects in drive systems.

All randomised pulse position strategies base on vector algorithm – Fig.1. Spread spectra of the output voltage of a PWM inverter are obtained by randomisation on/off pulse position during each interval. The first RLL algorithm shifts all zero vectors at the beginning or at the end of the period – Fig.2. The second one – RPP Fig.5 – uses classical switching sequence which starts and ends with the same zero vector. The third algorithm – ZVD – in random way divides time for the zero vectors z0 and z7 but it keeps symmetry of control signals – Fig.8. In the fourth algorithm – ZVP – position of the middle zero vector z7 is changed in a random way by asymmetrical division of the time for the vector z0 – Fig.11. There are presented modulation strategies and some measurements obtained in the drive with an induction motor. The measurements were obtained with 3 kW induction motor. The main stress is put on the problem of decreasing the noise generated by a motor fed from this kind of a PWM inverter.

The investigations show that AC drive with random modulation can be less annoying then that with deterministic one.