

Tomasz BISKUP  
Jerzy TELUK

## IDEA I ZASTOSOWANIE MODULACJI STOCHASTYCZNEJ DO STEROWANIA 3-FAZOWEGO FALOWNIKA NAPIĘCIA - CZĘŚĆ 2

**Streszczenie.** Celem artykułu jest przedstawienie zagadnień związanych z modulacją stochastyczną w zastosowaniu do sterowania przekształtników energoelektronicznych. Szczególną uwagę zwrócono na sterowanie 3-fazowego falownika napięcia zasilającego silnik indukcyjny klatkowy. W części głównej pokazano rezultaty badań realizacji modulacji stochastycznej wykonane na obiekcie złożonym z silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 3 kW i przemiennika częstotliwości MSI.

## IDEA AND APPLICATION OF RANDOM MODULATION IN CONTROL OF 3-PHASE VOLTAGE INVERTER - PART 2

**Summary.** The purpose of the paper is to present some problems connected with random modulation which is used in frequency inverters. The authors concentrate especially on the control of 3-phase voltage inverter feeding a induction motor. The results of investigations and measurements are presented in the paper. The measurements have been made on 3kW induction motor.

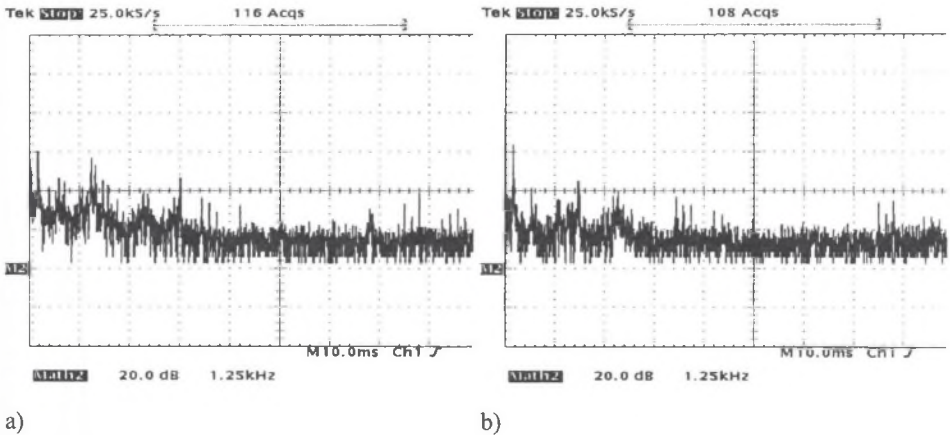
### 1. WPROWADZENIE

Opracowane algorytmy modulacji stochastycznej przedstawione w pracy [1] zostały przebadane przez autorów, z wykorzystaniem typowego silnika indukcyjnego klatkowego o danych: prod. TAMEL, typ SZJe 34a,  $P_n=3$  kW,  $U_n=380$  V,  $I_n=6,7$  A,  $\cos\varphi_n=0,835$ ,  $n_n=1430$  obr/min.

Falownik zasilający silnik miał moc maksymalną 7,5 kW, a zakres częstotliwości pracy 1...100 Hz. Silnik pracował na biegu jałowym. Do pomiarów poziomu hałasu i dalszej analizy widmowej wykorzystywano przyrząd firmy *Bruel&Kjaer 2238 Mediator*. Ma on wbudowany mikrofon pola swobodnego 4188 o paśmie przenoszenia 12,5 kHz oraz filtry korygujące A, C, L. Dodatkową zaletą jest możliwość wykorzystania wyjścia z sygnałem zmiennym (AC) o poziomie zależnym od zakresu pomiarowego (niekorygowany częstotliwościowo lub skorygowany wybraną charakterystyką). We wszystkich pomiarach stosowano charakterystykę korekcyjną typu A. W ten sposób można było przeprowadzić analizę FFT takiego sygnału za pomocą oscyloskopu o odpowiednich parametrach. Wykorzystano do tego oscyloskop cyfrowy *Tektronix TDS 420A* o paśmie przenoszenia 200 MHz i częstotliwości próbkowania

100 MS/s. Pozwala on na analizę FFT sygnału na wybranym kanale. Drugi oscyloskop, który służył do wykonywania pomiarów, to *Tektronix TDS 620*. Jego zaletą była możliwość wykonywania uśrednionej analizy widmowej przebiegu mierzonego.

Ze względu na brak obowiązujących norm dotyczących pomiarów i dopuszczalnych wartości hałasu od silnika indukcyjnego zasilanego z przetwornika częstotliwości, pomiary poziomu hałasu wykonywane były zgodnie z normą [2]. W normie [3] zamieszczona została tylko informacja, że w takich układach napędowych trzeba się liczyć z powiększonym hałasem o większej uciążliwości niż przy zasilaniu sieciowym.



Rys.1. Widmo hałasu dla badanego silnika przy zasilaniu sieciowym 380 V, 50 Hz: a) z wentylatorem, b) bez wentylatora

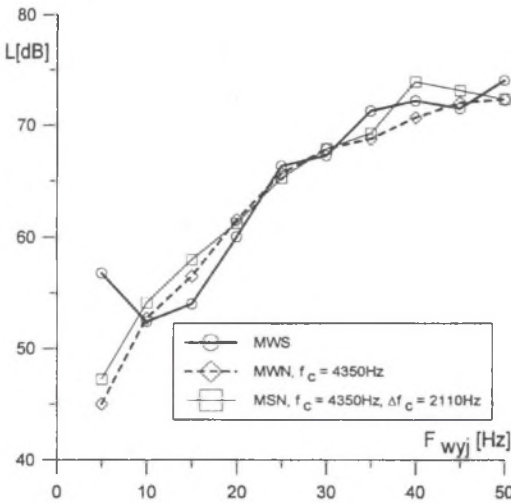
Fig.1. Spectra of noise at sinusoidal supply voltages: 380V, 50Hz, a) with fan, b) without fan

Punktem odniesienia do porównania wyników uzyskanych przy zasilaniu silnika z przetwornika częstotliwości był standardowy stan pracy, czyli zasilanie z sieci 3x380 V, 50 Hz. Poniżej, na rysunku 1, zamieszczono widma hałasu w dwóch stanach: z zainstalowanym wentylatorem chłodzącym silnik i bez niego. Zmierzone wartości poziomu hałasu dla obu stanów wynoszą: z wentylatorem - 73,1 dB[A], bez wentylatora - 67,4 dB[A].

Widać wyraźnie, że harmoniczne 1,6 kHz są związane z samym wentylatorem, a składowa 100 Hz, pochodząca od sił magnetycznych, ma znaczącą wartość. Przy prędkościach wirowania zbliżonych do znamionowej hałas aerodynamiczny zdecydowanie dominuje nad wszystkimi innymi źródłami.

## 2. WYNIKI BADAŃ MODULACJI STOCHASTYCZNEJ

Cykl badań został zapoczątkowany pomiarami poziomu hałasu od silnika zasilanego z przetwornika częstotliwości dla różnych typów modulacji. Na rysunku 2 przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów. Pominięto jedynie modulację stochastyczną synchronizowaną, ze względu na brak możliwości prawidłowego ich porównania. Wynika to ze zmiennych wartości pasma rozmywania częstotliwości próbkowania dla kolejnych wartości częstotliwości wyjściowej falownika.



Rys.2. Zmierzony poziom hałasu dla różnych metod modulacji

Fig.2. Measured level of noise for different types of modulation schemes

Można przyjąć, że wyniki pomiaru poziomu hałasu są zbliżone do siebie. Wyjątkiem jest tu zakres częstotliwości wyjściowej poniżej 10 Hz, gdzie metody niesynchronizowane (MSN i MWN) są znacznie cichsze. Wynika to bezpośrednio z bardzo niskiej częstotliwości próbkowania dla niskich częstotliwości wyjściowych przemiennika w przypadku modulacji synchronizowanej MWS. Wynosi ona przykładowo 1500 Hz dla  $F_{wyj}=5$  Hz, czyli jest prawie 3 razy niższa niż dla modulacji niesynchronizowanych. Różnica w poziomie hałasu jest więc tu bardzo duża, bo 3 dB to dwa razy mniejszy hałas odczuwany przez człowieka. Jeśli porównuje się modulację stochastyczną i wektorową, to różnice są niewielkie i można stwierdzić, że zastosowanie modulacji stochastycznej nie wpływa na powiększenie poziomu hałasu.

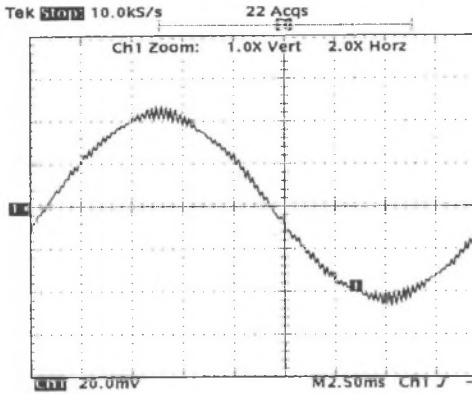
## 2.1. Modulacja stochastyczna synchronizowana i niesynchronizowana

W celu porównania właściwości modulacji stochastycznej synchronizowanej i niesynchronizowanej przeprowadzono odpowiednie pomiary. Przebiegi prądów silnika w stanie ustalonym, dla przykładowej wartości częstotliwości wyjściowej  $F_{wyj}=44$  Hz, zostały przedstawione na rysunkach 3-6.

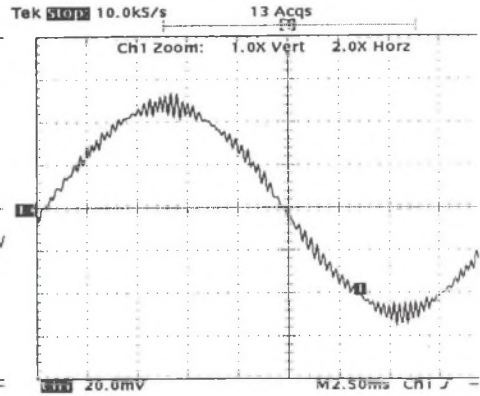
Można uznać, że przebiegi prądów są zbliżone do siebie, co pozwala na wnioskowanie, że modulacje stochastyczne nie powodują pogorszenia działania układu napędowego z przekształtnikiem z punktu widzenia funkcjonalnego. Należy jednak zauważyć, że zbyt szerokie pasmo rozmywania częstotliwości próbkowania może powodować znaczne pulsacje w prądzie. W badaniach przyjęto, że połowa pasma rozmywania  $1/2\Delta f_c$  nie powinna przekraczać  $1/3$  wartości częstotliwości próbkowania  $f_c$ . Obserwacja pracy silnika nie wskazuje na możliwość powstawania dodatkowych niestabilności pracy ani powiększonych wibracji korpusu.

Przeprowadzone zostały także analizy widmowe przebiegów prądów, napięć i hałasu za pomocą oscyloskopu cyfrowego z FFT. Przykładowe wyniki zostały przedstawione na rysunkach 7-10. Zostały one uzyskane dla podobnych warunków pracy, tzn. średnia częstotliwość próbkowania była ta sama i pasmo rozmywania  $\Delta f_c$  dla modulacji stochastycznych było także takie samo. Widać w porównaniu z widmem hałasu dla silnika zasilanego z sieci, że dodatkowe siły magnetyczne wynikające z modulacji powodują pojawienie się dodatkowych prądów w widmie hałasu.

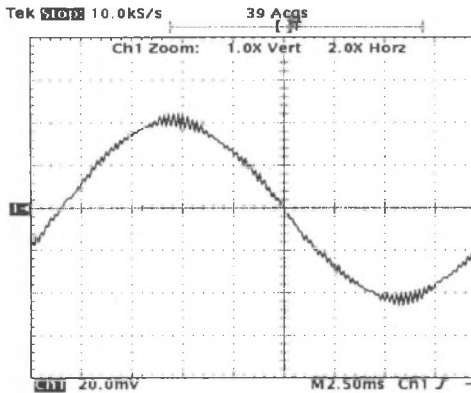
Głównie skupiają się one w obszarze drugiej krotności częstotliwości przełączania. Pozwala to na wnioskowanie, że podniesienie częstotliwości przełączania powyżej 8 kHz spowodowałoby znaczne wyciszenie napędu.



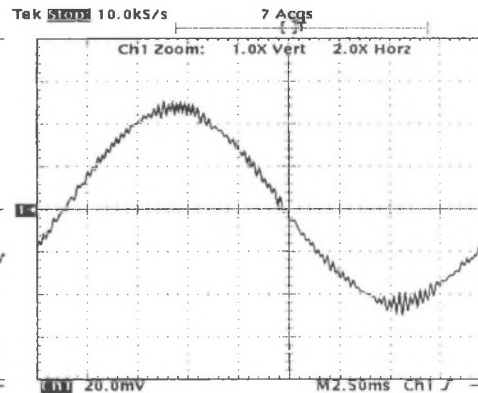
Rys.3. Prąd fazowy dla  $F_{wyj}=44$  Hz, MWN,  
 $f_c=4350$  Hz prąd 2 A/div  
 Fig.3. Current for  $F_o=44$  Hz, MWN,  
 $f_c=4350$  Hz current 2 A/div



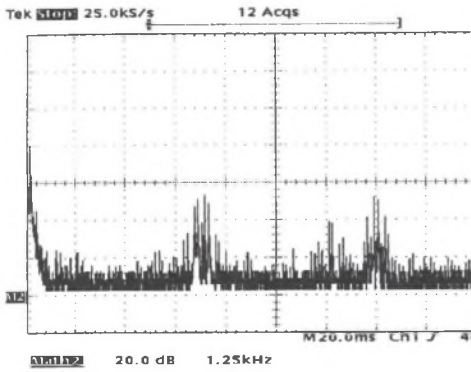
Rys.4. Prąd fazowy dla  $F_{wyj}=44$  Hz, MSN,  
 $f_c=4350$  Hz,  $\Delta f_c=2110$  Hz, prąd  
 2 A/div  
 Rys.4. Current for dla  $F_o=44$  Hz, MSN,  
 $f_c=4350$  Hz,  $\Delta f_c=2110$  Hz, current  
 2 A/div



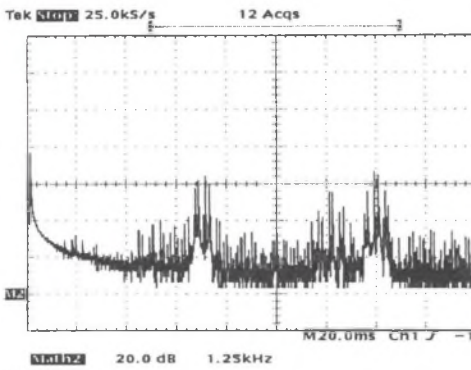
Rys.5. Prąd fazowy dla  $F_{wyj}=44$  Hz, MWS,  
 $f_c=4350$  Hz prąd 2 A/div  
 Fig.5. Current for  $F_o=44$  Hz, MWS,  
 $f_c=4350$  Hz current 2 A/div



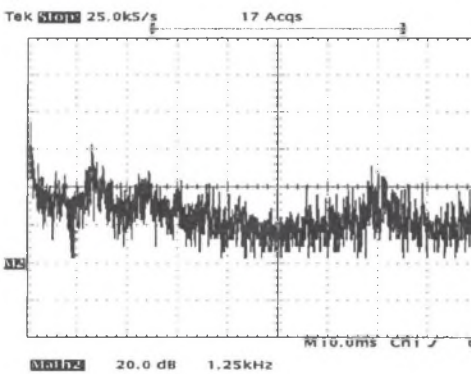
Rys.6. Prąd fazowy dla  $F_{wyj}=44$  Hz, MSS1,  
 $f_c=4350$  Hz,  $\Delta f_c=2110$  Hz, prąd  
 2 A/div  
 Fig.6. Current for dla  $F_o=44$  Hz, MSS1,  
 $f_c=4350$  Hz,  $\Delta f_c=2110$  Hz, current  
 2 A/div



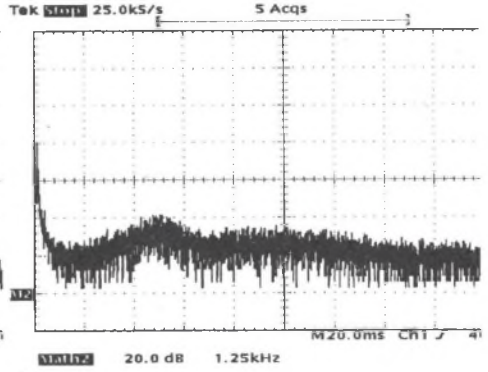
a)



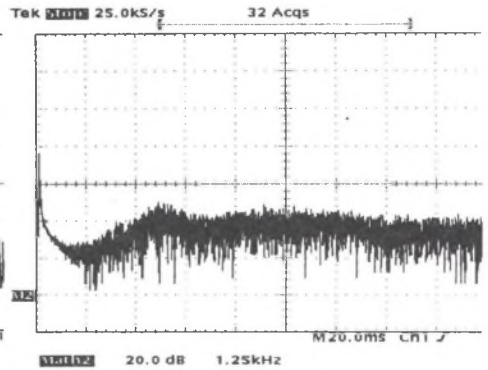
b)



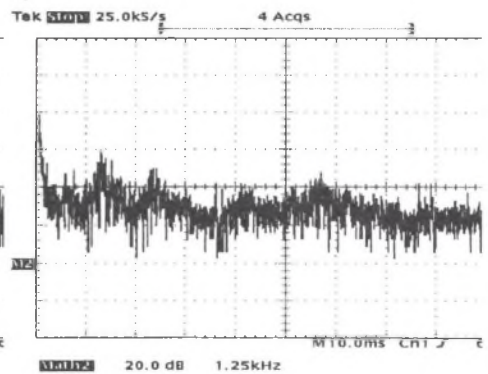
c)



a)



b)



c)

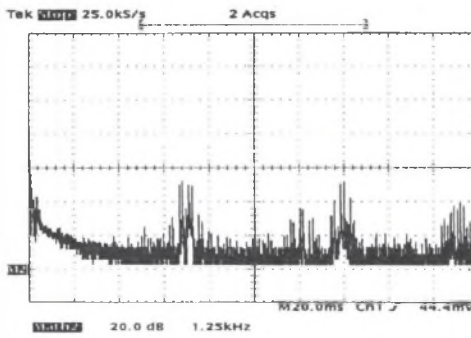
Rys.7. Widmo: a) prądu, b) napięcia c) hałasu dla  $F_{wyj}=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz, modulacja MWS

Fig.7. Spectra of: a) current, b) voltage c) noise, for  $F_o=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz, modulation MWS

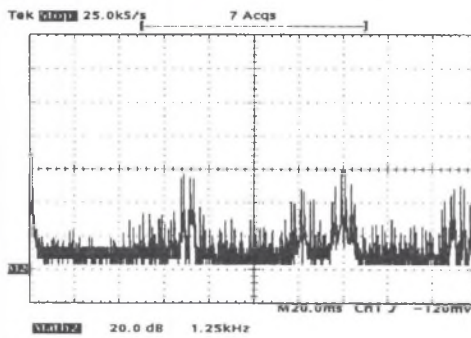
Rys.8. Widmo: a) prądu, b) napięcia c) hałasu dla  $F_{wyj}=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz  $\Delta f_c=2110$  Hz, modulacja MSS1

Fig.8. Spectra of: a) current, b) voltage c) noise, for  $F_o=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz  $\Delta f_c=2110$  Hz, modulation MSS1

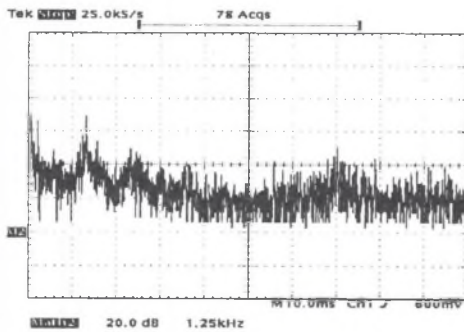




a)



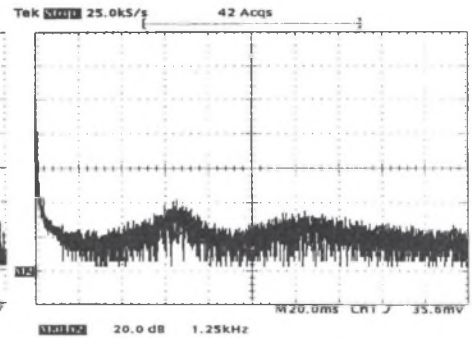
b)



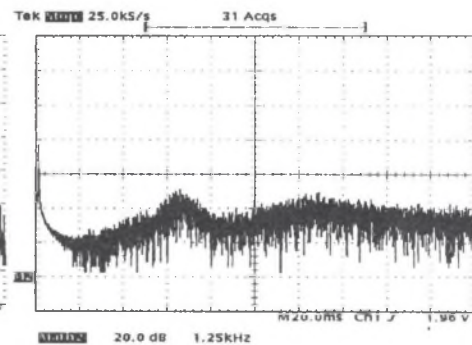
c)

Rys.9. Widmo: a) prądu, b) napięcia c) hałasu, dla  $F_{wyj}=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz, modulacja MWN

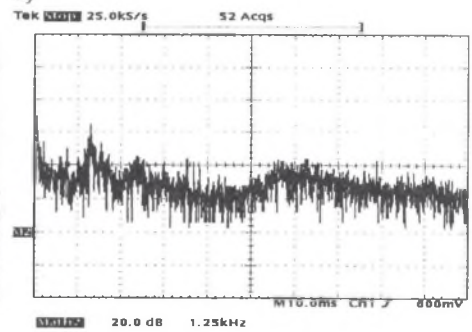
Fig.9. Spectra of: a) current, b) voltage, c) noise, for  $F_o=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz, modulation MWN



a)



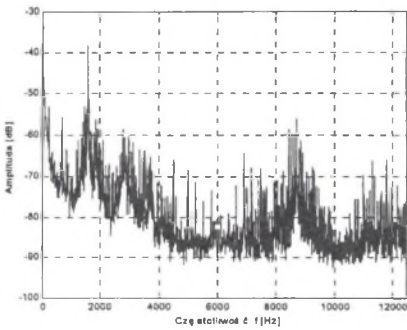
b)



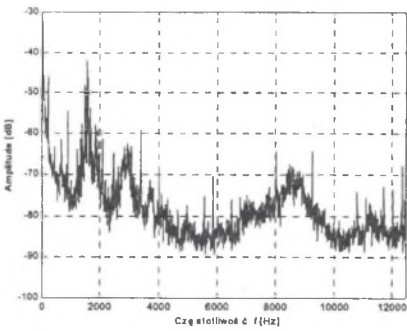
c)

Rys.10. Widmo: a) prądu, b) napięcia c) hałasu, dla  $F_{wyj}=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz,  $\Delta f_c=2110$  Hz, modulacja MSN

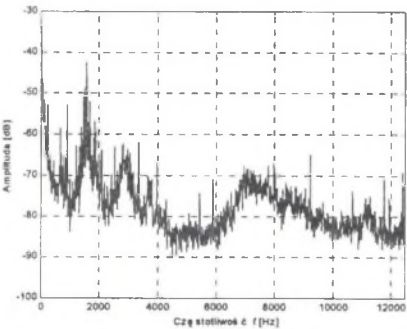
Fig.10. Spectra of: a) current, b) voltage, c) noise, for  $F_o=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz,  $\Delta f_c=2110$  Hz, modulation MSN



a)



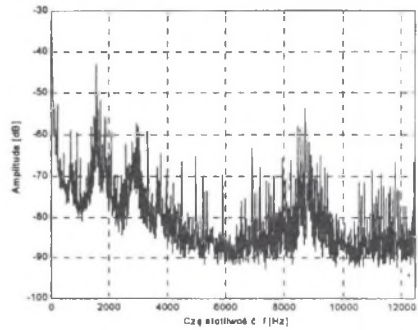
b)



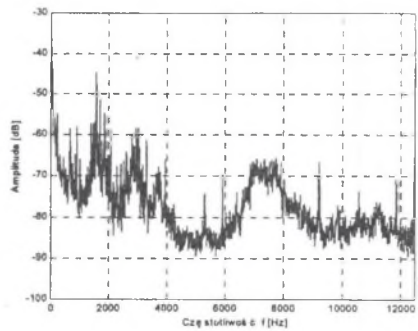
c)

Rys.11. Usrednione widma hałas  
 $F_{wyj}=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz, modulacja MSN,  $\Delta f_c=$  a) 0 Hz, b) 1000 Hz, c) 2000 Hz

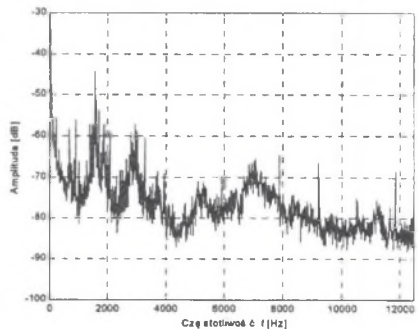
Fig.11. Mean spectra of noise  $F_o=44$ Hz,  $f_c=4350$  Hz, modulation MSN,  $\Delta f_c=$  a) 0 Hz, b) 1000 Hz, c) 2000 Hz



a)



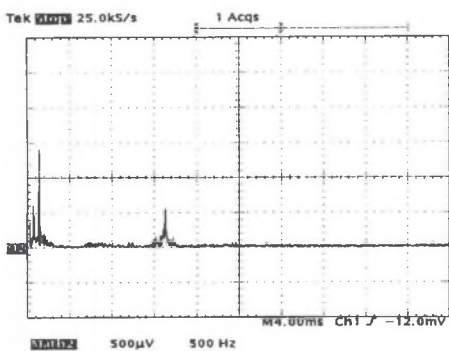
b)



c)

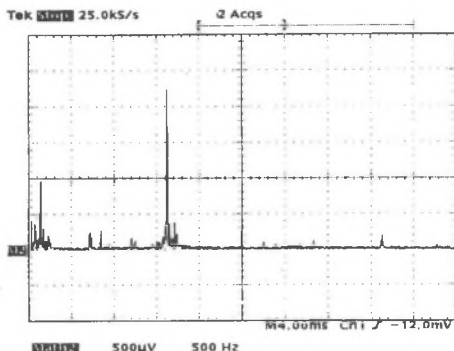
Rys.12. Usrednione widma hałas  
 $F_{wyj}=44$  Hz,  $f_c=4350$  Hz, modulacja MSS1,  $\Delta f_c=$  a) 0 Hz, b) 1056 Hz, c) 2110 Hz

Fig.12. Mean spectra of noise  $F_o=44$ Hz,  $f_c=4350$  Hz, modulation MSS1,  $\Delta f_c=$  a) 0 Hz, b) 1056 Hz, c) 2110 Hz



Rys.13. Widmo hałasu przy  $F_{wyj}=44$  Hz  
 $f_c=900$  Hz,  $\Delta f_c=440$  Hz, modulacja  
 MSN

Fig.13. Spectra of noise for  $F_o=44$  Hz  $f_c=900$   
 Hz,  $\Delta f_c=440$  Hz, modulation MSN



Rys.14. Widmo hałasu przy  $F_{wyj}=44$  Hz,  
 $f_c=820$  Hz, modulacja MWN

Rys.14. Spectra of noise for  $F_o=44$  Hz,  
 $f_c=820$  Hz, modulation MWN

Zastosowanie modulacji stochastycznej powoduje rozmycie widma hałasu, a co za tym idzie, zmianę jego charakteru z tonalnego na szerokopasmowy. Wrażenie dokuczliwości zmniejsza się w znaczny sposób, przy czym wartość poziomu hałasu nie zmienia się. W sposób bardziej wyraźny można zauważyć to na rysunkach, gdzie widma hałasu zostały uzyskane w wyniku uśrednienia 8 pomiarów. Na rysunku 11 zamieszczono widma dla modulacji synchronizowanej, na rysunku 12 dla niesynchronizowanej. Wraz ze zwiększaniem szerokości pasma rozmywania  $\Delta f_c$  obniżają się wartości bezwzględne dla poszczególnych prążków widma hałasu z obszaru drugiej krotności częstotliwości przełączania. Widma uśrednione nieco lepiej pokazują tendencje w dłuższych okresach, bowiem reakcja ucha ludzkiego jest opisana przez stałą całkowania rzędu 100-200 ms [4].

Warto także zauważyć, że zasilanie z przemiennika MSI może spowodować wzbudzenie rezonansów powodujących znaczne powiększenie hałasu. Dlatego należy przy określaniu częstotliwości przełączania przebadac zachowanie całego układu napędowego. Porównanie zachowania układu laboratoryjnego, dla modulacji niesynchronizowanych: wektorowej i stochastycznej, przedstawiono na rysunkach 13 i 14. Widać tu rezonans dla częstotliwości 1650 Hz, który ujawnia się wyraźniej dla modulacji wektorowej.

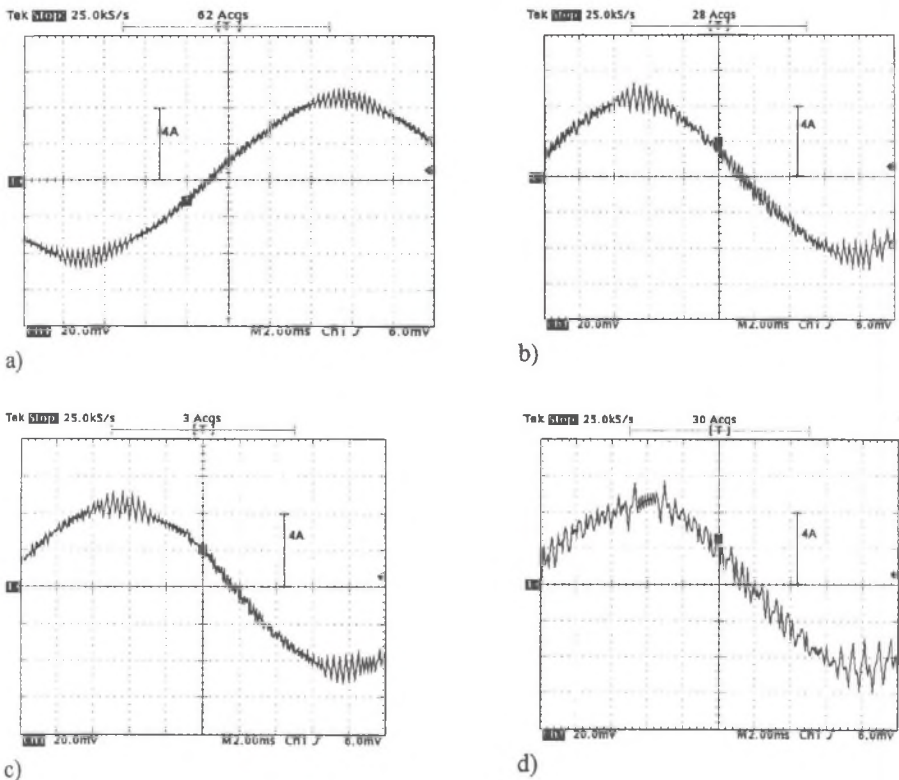
## 2.2. Modulacja stochastyczna synchronizowana - porównanie dwóch odmian

W drugiej fazie badań porównano modulację wektorową synchronizowaną MWS i dwie odmiany synchronizowanych stochastycznych: MSS1 i MSS2.

Przykładowe wyniki badań dla częstotliwości wyjściowej silnika  $F_{wyj}=40$  Hz przedstawiono na rysunkach 15 oraz 16-19. Przyjęto podobną metodykę badań co poprzednio. Jako pierwsze porównano pracę układów napędowych z punktu widzenia funkcjonalnego. Jak widać na rysunku 15, kształt prądu dla modulacji stochastycznych jest zbliżony do prądu dla modulacji wektorowej, z tym że duże rozsuniecie częstotliwości granicznych dla przypadku MSS2 d) spowodowało większe zniekształcenia obwiedni prądu. Wynika to z tego, że dolna częstotliwość przełączeń była wtedy bardzo niska i wynosiła 1,6 kHz. Wskazuje to na znaczenie ustalenia prawidłowej wartości ograniczenia dolnej częstotliwości próbkowania  $f_d$  w metodzie MSS2.



Analiza widmowa pokazuje, że efekty zmiany charakteru hałasu generowanego przez silnik są podobne w metodach MSS1 i MSS2. Widać tu znaczne spłaszczenie widma harmonicznych, które powoduje, że taki hałas ma charakter szumu. Należy zwrócić uwagę na pewną odmienność w przypadku modulacji MSS2 - rys. 19c, gdzie jeśli częstotliwość przełączeń  $f_g$  jest wielokrotnością  $f_d$ , to powoduje to wzmocnienie odpowiednich harmonicznych i powstawanie hałasu o charakterze tonalnym. Te harmoniczne (ok. 1,6 kHz, 3,2 kHz, 4,8 kHz, 6,4 kHz) są wyraźnie widoczne w widmie prądu, napięcia i hałasu - rys.19.

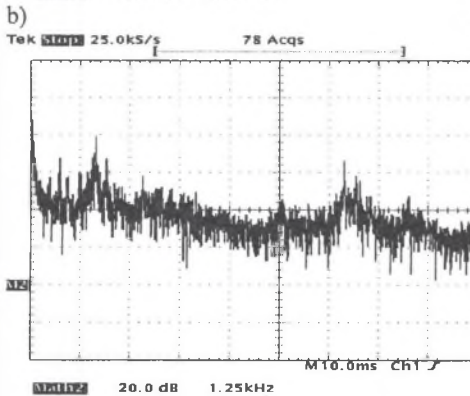
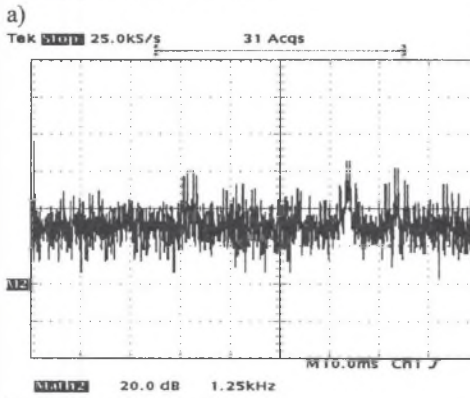
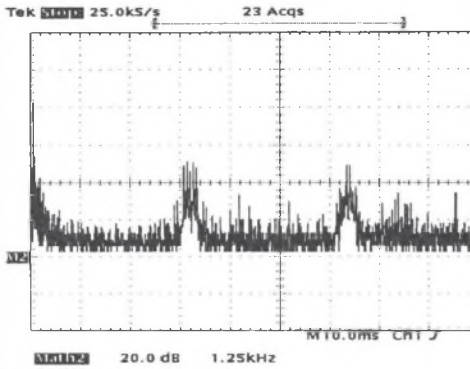


Rys.15. Przebiegi prądów fazowych silnika dla  $F_{wyj}=40$  Hz, a) MWS  $f_c=3960$  Hz, b) MSS1, dla  $f_{min}=3000$  Hz,  $f_{max}=4920$  Hz, c) MSS2, dla  $f_d=3000$  Hz,  $f_g=4920$  Hz, d) MSS2, dla  $f_d=1600$  Hz,  $f_g=6320$  Hz

Fig.15. Motor currents for  $F_o=40$  Hz, a) MWS  $f_c=3960$  Hz, b) MSS1, for  $f_{min}=3000$  Hz,  $f_{max}=4920$  Hz, c) MSS2, for  $f_d=3000$  Hz,  $f_g=4920$  Hz, d) MSS2, for  $f_d=1600$  Hz,  $f_g=6320$  Hz

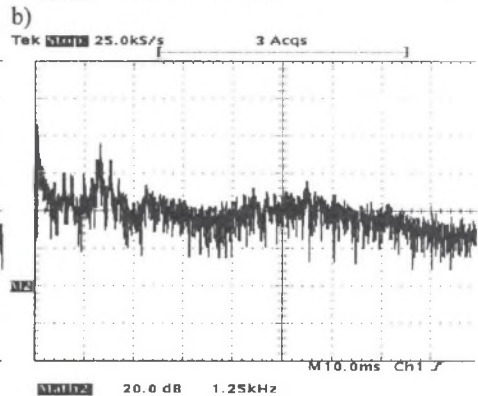
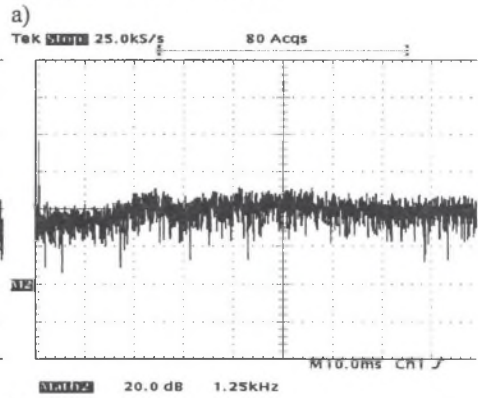
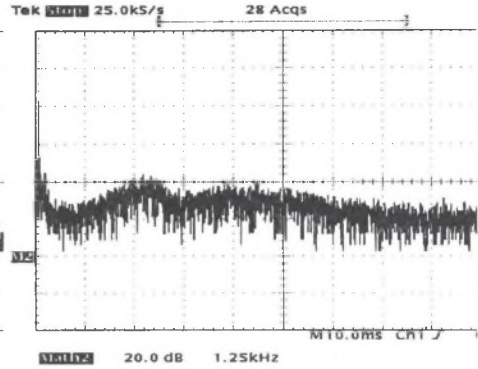
### 3. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono badania wpływu rodzaju modulacji na dodatkowy hałas pochodzący od sił magnetycznych. Pokazano także metody na zmniejszenie dokuczliwości takiego hałasu dla człowieka.



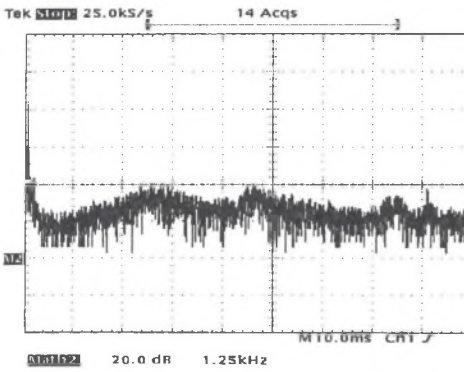
c)  
Rys.16.Charakterystyki widmowe dla modulacji MWS  $F_{wyj}=40$  Hz,  $f_c=3960$  Hz: a) prąd, b) napięcie, c) hałas

Fig.16.Spectra for modulation MWS,  $F_o=40$  Hz,  $f_c=3960$  Hz: a) current, b) voltage c) noise

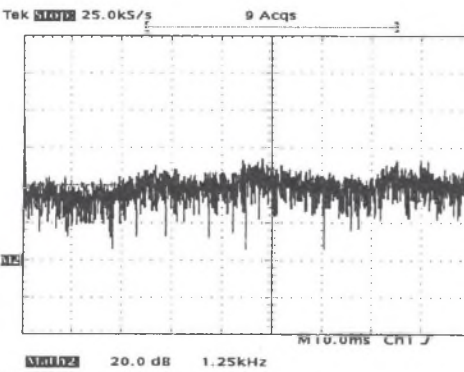


c)  
Rys.17.Charakterystyki widmowe dla modulacji MSS1  $F_{wyj}=40$  Hz,  $f_{min}=3000$  Hz,  $f_{max}=4920$  Hz: a) prąd, b) napięcie, c) hałas

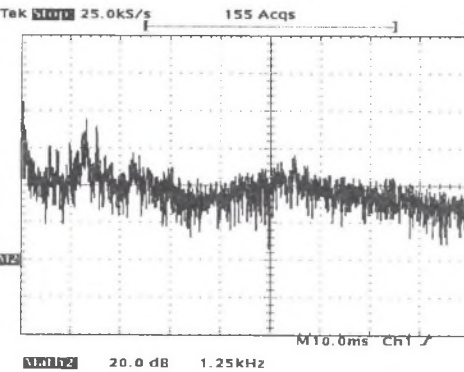
Fig.17. Spectra for modulation MSS1  $F_o=40$  Hz,  $f_{min}=3000$  Hz,  $f_{max}=4920$  Hz: a) current, b) voltage c) noise



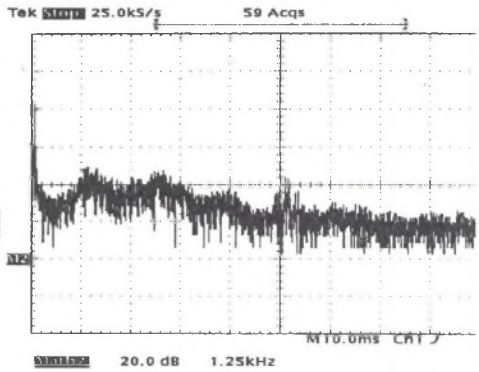
a)



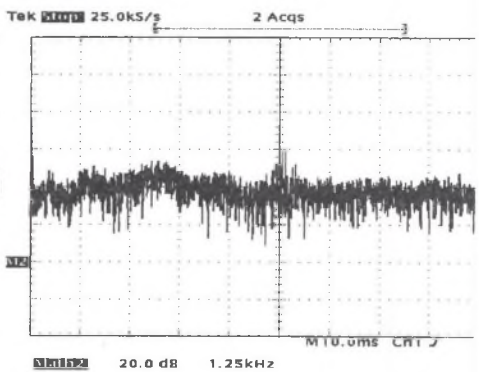
b)



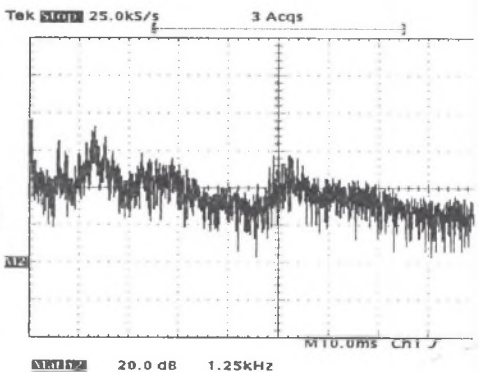
c)



a)



b)



c)

Rys.18. Charakterystyki widmowe dla modulacji MSS2  $F_{wyj}=40$  Hz,  $f_d=3000$  Hz,  $f_g=4920$  Hz: a) prąd, b) napięcie, c) hałas  
 Fig.18. Spectra for modulation MSS2,  $F_o=40$  Hz,  $f_d=3000$  Hz,  $f_g=4920$  Hz a) current, b) voltage, c) noise

Rys.19. Charakterystyki widmowe dla modulacji, MSS2  $F_{wyj}=40$  Hz,  $f_d=1600$  Hz,  $f_g=6320$  Hz: a) prąd, b) napięcie, c) hałas  
 Fig.19. Spectra for modulation MSS2  $F_o=40$  Hz,  $f_d=1600$  Hz,  $f_g=6320$  Hz: a) current, b) voltage, c) noise

Porównano metody modulacji: wektorowe i stochastyczne w odmianach niesynchronizowanych i synchronizowanych. Modulacja niesynchronizowana daje obniżenie poziomu hałasu dla częstotliwości wyjściowych przemiennika poniżej 10 Hz. Wynika to z wysokiej wartości częstotliwości przełączeń w całym zakresie pracy przemiennika.

Wprowadzenie zmiennej częstotliwości przełączania nie powoduje powstawania znaczących zniekształceń w prądzie fazowym silnika. Warunkiem takiego stanu jest utrzymanie minimalnej częstotliwości przełączania na odpowiednio wysokim poziomie. Z punktu widzenia funkcjonalnego modulacja stochastyczna nie powoduje pogorszenia właściwości układu napędowego.

Zastosowanie modulacji stochastycznej pozwala na obniżenie dokuczliwości hałasu pochodzącego od silnika. Modulacja stochastyczna MSS2 pozwala na osiągnięcie wyników podobnych do MSS1, o ile właściwie dobrano częstotliwości przełączeń: górną  $f_g$  i dolną  $f_d$ .

Utrzymanie częstotliwości przełączania powyżej 8 kHz wpłynęłoby na znaczne obniżenie hałaśliwości silnika, dla częstotliwości zasilania poniżej znamionowej.

Wszystkie badania były wykonywane dla generatora pseudolosowego o rozkładzie równomiernym. W przyszłości planowane są pomiary w przypadku zmiany rozkładu prawdopodobieństwa generatora. W zamierzeniach jest też sprawdzenie wpływu modulacji stochastycznej na drgania mechaniczne korpusu silnika.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr T10A 034 15 finansowanego przez KBN.

## LITERATURA

1. Biskup T.: Idea i zastosowanie modulacji stochastycznej do sterowania 3-fazowego falownika napięcia - część 1, ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z.170, Gliwice 1999.
2. PN-93/E-04257/01. Maszyny elektryczne wirujące. Metody pomiaru hałasu. Metoda techniczna do stosowania w swobodnym polu akustycznym nad powierzchnią odbijającą dźwięk.
3. PN-E-06717. Maszyny elektryczne wirujące. Wytyczne stosowania silników indukcyjnych klatkowych zasilanych z przekształtników.
4. Rocznik M.: Fizyka hałasu. Podstawy akustyki ośrodków gazowych, Wyd.Pol.Śl., Gliwice 1996.

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Zbigniew Nowacki

Wpłynęło do Redakcji 10 maja 1999 r.

## Abstract

The purpose of the paper is to present some problems connected with random modulation which is used in frequency inverters. The authors concentrate especially on the control of 3-phase voltage inverter feeding a induction motor. The results of investigations and measurements are presented in the paper. Laboratory tests are made on a 3 kW induction motor. The

following equipment has been used for measurements: oscilloscopes Tektronix TDS 420A and TDS 620 (with FFT), sound pressure level meter Brüel & Kjaer 2238 Mediator. Examples of the obtained measurement results are presented in Figures 3-19 for each strategy of modulation.

The investigations show that AC drives with random modulation are less annoying than the old, deterministic ones. This result is obtained by means of small software changes of the control algorithm. The comparison of the random strategies reveals that there are only small differences between the obtained results, which are not so important from the point of view of human's hearing.