

Tomasz BISKUP, Marcin KASPRZAK, Krzysztof BODZEK

Instituto Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

ZASTOSOWANIE ALGORYTMÓW MODULACJI STOCHASTYCZNEJ r-IPDM DO STEROWANIA FAŁOWNIKA REZONANSOWEGO KLASY DU

Streszczenie. W artykule opisano ideę stochastycznej metody modulacji gęstości impulsów (r-IPDM), w której położenie pulsu zintegrowanego w okresie modulacji pozycjonowane jest losowo. Przedstawiono mikroprocesorową realizację sterowania metodą r-IPDM, sześć algorytmów stochastycznych oraz wyniki pomiarów laboratoryjnych. Metoda r-IPDM zapewnia znaczne rozmycie widma subharmonicznych prądu odbiornika, a widmo hałasu ma charakter szerokopasmowy. Metoda pozwala na sterowanie mocy w zakresie 15-100% przy warunkach ZCS.

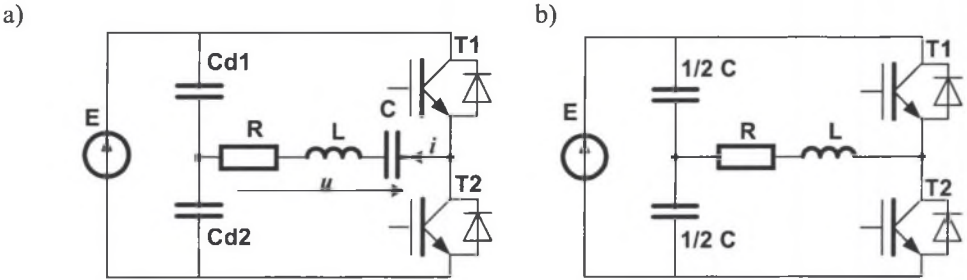
RANDOM MODULATION ALGORITHMS IMPLEMENTATION r-IPDM FOR CONTROL OF CLASS DU SERIES RESONANT INVERTER

Summary. The work concerns the control strategy of output power of half bridge class D series resonant inverter. Proposed control strategy bases on integral pulse density modulation (IPDM) but what is new, the integral pulse is randomly set in modulation period. The r-IPDM ensures ZCS conditions of transistors and allows operation at relatively high switching frequency with output power in range 15-100%. The main idea of this paper is to emphasize advantages of r-IPDM strategy compare to standard IPDM. The r-IPDM characterised in spread output current spectrum and broadband noise spectrum. The paper contains the idea of the control strategy and results of measurements.

1. WPROWADZENIE

Tematyka sterowania mocy przekształtników rezonansowych jest ciągle aktualna. Nadal są prowadzone prace zmierzające do poprawy istniejących technik w tym zakresie. W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienie sterowania mocy wyjściowej tranzystorowego falownika rezonansowego, klasy D_U (rys. 1a, b) oraz realizowane metodą modulacji gęstości impulsów zintegrowanych, w czasie których następuje częściowe powielanie częstotliwości. Metody takie określane są jako IPDM (integral pulse density modulation). Autorzy zaproponowali modyfikację metody IPDM poprzez wprowadzanie modulacji stochastycznej (random-IPDM) polegającej na losowym pozycjonowaniu pulsu zintegrowanego w okresie modulacji. Motywacją do prowadzenia badań w tym zakresie jest zmniejszenie uciążliwości hałasu generowanego przez subharmoniczne znajdujące się w widmie prądu odbiornika. Artykuł jest ścisłą kontynuacją wcześniejszych prac autorów, w których opisano właściwości standardowej metody IPDM [1, 2]. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników realizacji projektu badawczego KBN [3], którego tematem było zastosowanie stochastycznej metody r-IPDM do sterowania rezonansowych falowników napięciowych klasy D_U .

Metoda IPDM oraz proponowana r-IPDM są metodami bezpośrednimi, czyli sterowanie realizowane jest w obrębie falownika. Nie potrzeba więc regulatora DC/DC w obwodzie pośredniczącym. Tranzystory falownika przełączane są w warunkach ZCS, co w rezultacie daje możliwość zastosowania takiego sterowania w falownikach wysokoczęstotliwościowych klasy D i DE (kilkaset kHz do kilku MHz). Ponadto, co niezwykle istotne w aplikacjach małej mocy, metoda może być zastosowana do topologii półmostkowych falownika (rys. 1a, b).

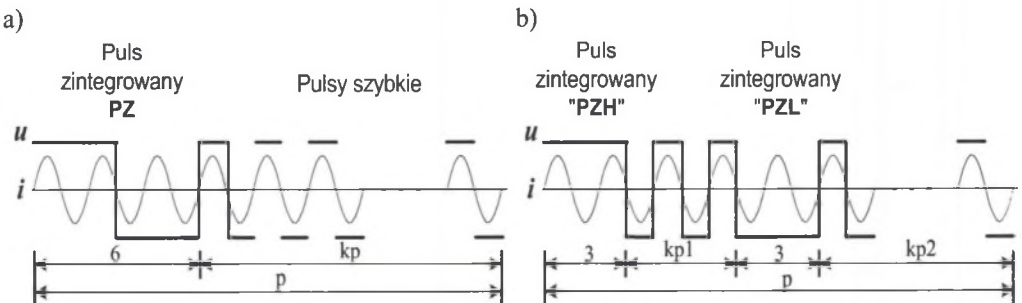


Rys. 1. Tranzystorowy falownik rezonansowy klasy D_U : a) układ z pojemnościowym dzielnikiem napięcia zasilania C_{d1}/C_{d2} ; b) układ z dzielonym kondensatorem rezonansowym C
 Fig. 1. Class D_U series resonant inverter: a) with capacitor supply voltage divider C_{d1}/C_{d2} ; b) with divided resonant capacitor C

2. OPIS MODULACJI STOCHASTYCZNEJ r-IPDM

Metoda modulacji gęstości impulsów (PDM) ma wiele odmian, ale w falownikach rezonansowych klasy D_U była autorem znana wyłącznie w zastosowaniu do topologii pełnego mostka falownika lub przetwornic DC/DC [4, 5, 6, 7, 8].

Autorzy artykułu, bazując na metodzie opisanej w [4] zaproponowali najpierw metodę IPDM mającą zastosowanie do układu półmostkowego falownika, a opis metody zamieścili w [1, 2]. Sterowanie mocy wyjściowej w metodzie IPDM odbywa się przez zadawanie parzystej liczby kp pulsów szybkich, przy ustalonej konfiguracji pulsów zintegrowanych (rys. 2) i przy zachowaniu warunków przełączania ZCS. Długość i układ pulsów zintegrowanych powinny być takie, aby nie zaburzyć naturalnego kierunku quasi-sinusoidalnych drgań obwodu RLC.



Rys. 2. Sterowanie standardową metodą IPDM dla modulacji typu $6+kp$: a) z zespolonym pulsem zintegrowanym PZ; b) z rozdzielonymi pulsami zintegrowanymi PZH i PZL
 Fig. 2. Standard IPDM power control strategy ($6+kp$): a) combined integral pulse is applied; b) integral pulses is split into high and low integral pulse

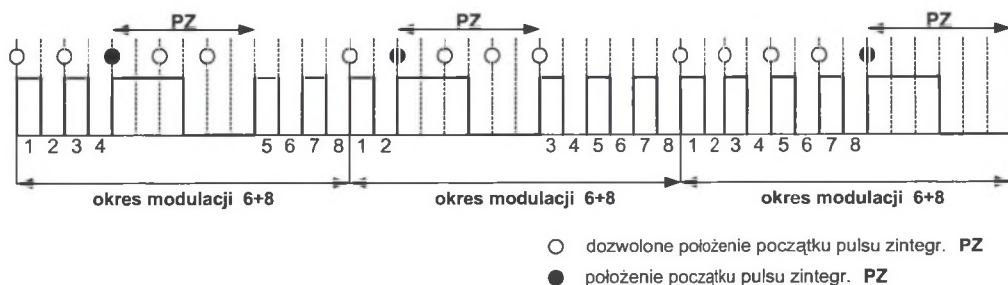
Na rys. 2 zamieszczono dwa przypadki sterowania $\delta+kp$ [1, 2]. Rysunek 2a pokazuje przypadek, gdy pulsy zintegrowane (górny PZH oraz dolny PZL) są zespolone i występują zawsze na początku okresu modulacji T_M , który odpowiada całkowitej liczbie pulsów p . Rysunek 2b pokazuje przypadek, gdy pulsy zintegrowane PZH oraz PZL są rozdzielone symetrycznie pulsami szybkimi, a ich układ jest „sztywny” w okresie T_M .

Przeprowadzone przez autorów badania wykazały, że metody IPDM ze „sztywnym” układem pulsów zintegrowanych charakteryzują się niekorzystnym dyskretnym widmem subharmonicznym w prądzie odbiornika. Ponadto dyskretny charakter subharmonicznego prądu jest źródłem emisji hałasu o uciążliwym dla człowieka brzmieniu.

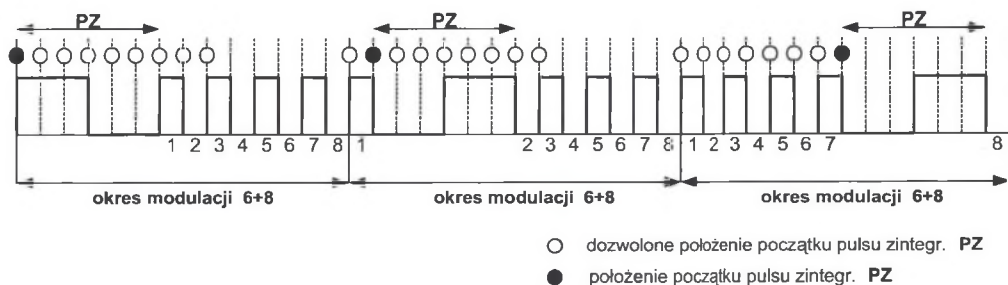
W celu zminimalizowania opisanych wyżej zjawisk, autorzy zaproponowali zmodyfikowanie standardowej metody IPDM poprzez wprowadzenie modulacji stochastycznej (r-IPDM), polegającej na losowym pozycjonowaniu położenia pulsów zintegrowanych w okresie modulacji T_M . Spodziewanym efektem wprowadzenia r-IPDM jest rozmycie widma prądu odbiornika w zakresie subharmonicznym, a co za tym idzie, likwidacja subharmonicznych o dyskretnych wartościach częstotliwości. Taka poprawa widma prądu jest związana ze zmianą charakteru hałasu emitowanego przez falownik. Hałas ten powinien przyjąć charakter szumu, który z punktu widzenia ergonomii pracy jest bardziej korzystny dla człowieka.

Algorytmy stochastyczne opracowano dla modulacji $\delta+kp$. Założono, że w okresie modulacji T_M wystąpią 2 pulsy zintegrowane PZH oraz PZL, każdy o długości trzech półokresów ($3p$). Ponadto przyjęto reguły modulacji jak dla standardowej IPDM. Zaproponowano i przebadano 6 algorytmów modulacji stochastycznej, które przedstawiono w formie graficznej na rys. 3 i 4.

AS #1

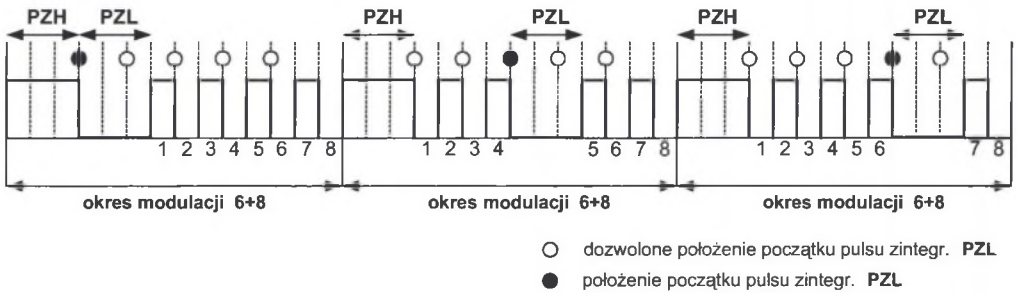


AS #2

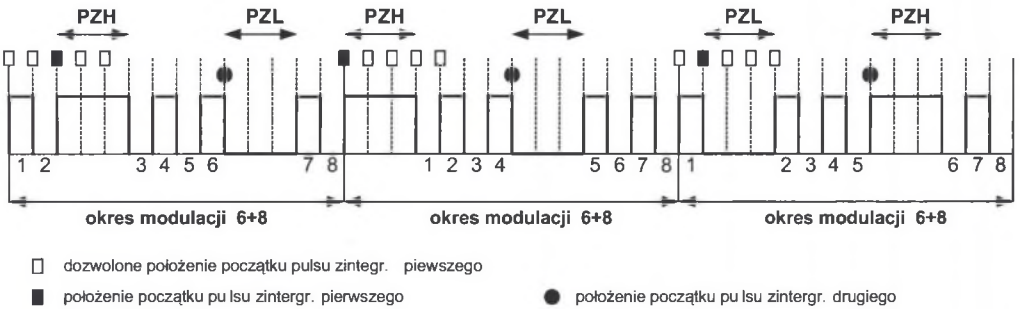


Rys. 3. Graficzna interpretacja algorytmów stochastycznych AS#1, AS#2
Fig. 3. Graphical interpretation of random algorithms AS#1, AS#2

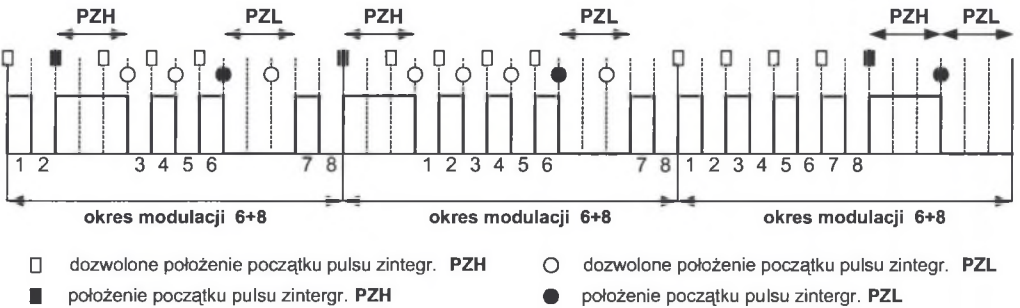
AS #3



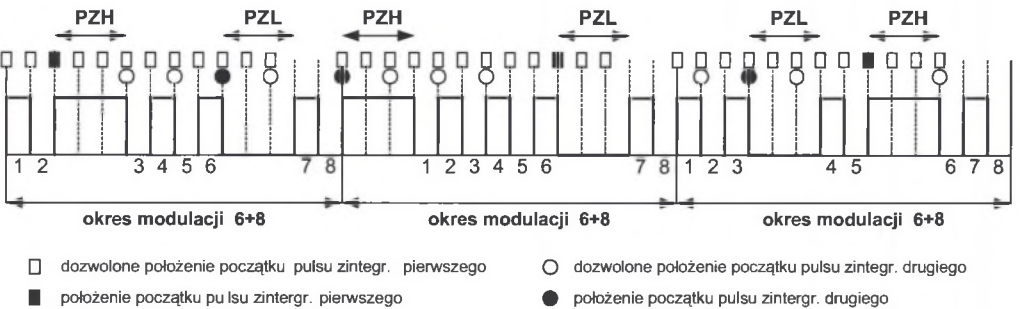
AS #4



AS #5



AS #6



Rys. 4. Graficzna interpretacja algorytmów stochastycznych AS#3 - AS#6
Fig. 4. Graphical interpretation of random algorithms AS#3 - AS#6

Algorytm stochastyczny AS#1. Założenia: a) puls PZH i PZL są zespolone tworząc jeden puls zintegrowany PZ, b) w okresie modulacji T_M położenie pulsu PZ zmienia się losowo, c) puls PZ rozpoczyna się zawsze pulsem górnym PZH, d) położenie początku pulsu PZ może poprzedzać jedynie parzysta liczba pulsów szybkich kp (z zerem włącznie). Przy zadanej parzystej liczbie kp , ilość możliwych kombinacji n położenia pulsu PZ w okresie modulacji T_M wynosi: $n=kp/2+1$.

Algorytm stochastyczny AS#2. Jest to zmodyfikowany algorytm AS#1. Modyfikacja polega na tym, że puls PZ może rozpoczynać się zarówno od pulsu PZH, jak i PZL. Aby zachować naturalny kierunek drgań quasi-sinusoidalnego prądu odbiornika, puls zespolony PZ może rozpocząć się od pulsu PZL tylko wówczas, gdy ilość poprzedzających go pulsów szybkich w okresie T_M jest liczbą nieparzystą. W przypadku gdy puls zespolony PZ rozpoczyna się pulsem PZH, obowiązują reguły jak dla AS#1. Ilość możliwych kombinacji jest dwukrotnie większa niż w AS#1 i wynosi: $n=kp+1$.

Algorytm stochastyczny AS#3. Założenia: a) okres modulacji T_M rozpoczyna się pulsem PZH, b) położenie pulsu PZL wybierane jest losowo. W ten sposób pulsy PZH i PZL są rozdzielone parzystą liczbą pulsów szybkich włącznie z zerem. Przy zadanej parzystej liczbie kp ilość możliwych kombinacji wynosi: $n=kp/2+1$.

Algorytm stochastyczny AS#4. Założenia: a) puls PZH jest losowany w całym zakresie cyklu, podobnie jak w AS#1, b) położenie pulsu PZL wynika z przesunięcia o pół cyklu względem wylosowanego położenia PZH. Jeśli więc puls PZH zostanie wylosowany w pierwszej połowie cyklu, to puls PZL znajdzie się w drugiej części cyklu. W odwrotnym przypadku puls PZL będzie poprzedzał puls PZH. Przy zadanej parzystej liczbie kp ilość możliwych kombinacji wynosi: $n=kp/2+1$.

Algorytm stochastyczny AS#5. Założenia: a) położenie zarówno PLH, jak i PLZ w okresie modulacji T_M zmienia się losowo, b) jako pierwszy w cyklu występuje puls PZH. W ten sposób losowo zmienia się zarówno położenie, jak i rozdzielenie pulsu PZL w okresie T_M . Położenie pulsu PZL jest więc ściśle ograniczone położeniem początku PZH. Ilość możliwych kombinacji dodatkowego rozdzielenia obu pulsów jest tym mniejsza, im później puls PZH rozpoczyna się w cyklu T_M . Ilość możliwych kombinacji wynosi:

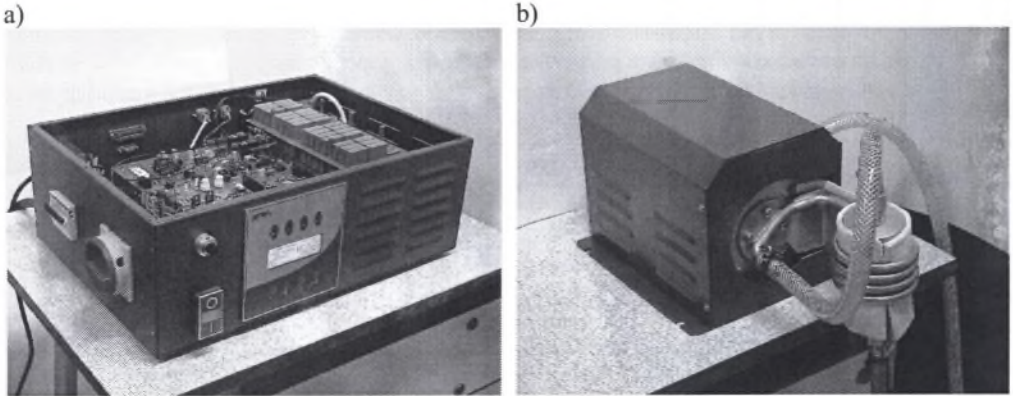
$$n = \sum_{s=0}^{kp/2} (s+1) \quad (1)$$

Algorytm stochastyczny AS#6. Algorytm ten jest rozwinięciem poprzedniej koncepcji. Tutaj w sposób losowy rozmieszczany jest pierwszy puls zintegrowany PZH lub PZL, a następnie za pomocą kolejnego generatora losowane jest położenie drugiego pulsu. Drugi puls może znaleźć się tak samo przed, jak i po pierwszym, nie ma co do tego ograniczeń. Ilość możliwych kombinacji wynosi: $n=1+(kp/2+1)kp/2$.

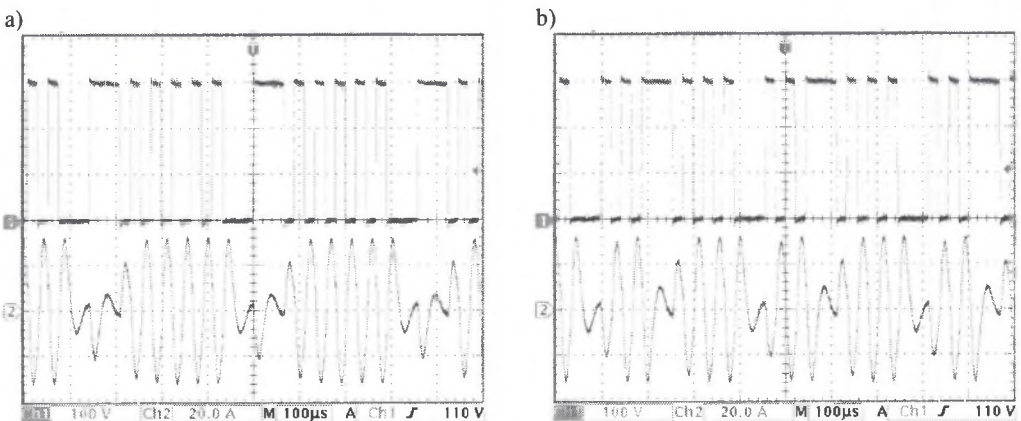
3. WYNIKI POMIARÓW LABORATORYJNYCH

W celu weryfikacji przyjętych założeń przeprowadzono cykl badań przedstawionych wcześniej algorytmów sterowania. Pomiaru zrealizowano w układzie falownika (rys. 1a) o mocy 7,5 kW z tranzystorami IGBT, który został przedstawiony na rys. 5. Napięcie zasilania falownika wynosiło $E=300$ V, częstotliwość rezonansowa obwodu RLC $f_0=22,4$ kHz, dobroć $Q=1,7$. Algorytmy stochastyczne zostały zaimplementowane w układzie sterowania bazującym

na 16-bitowym mikrokontrolerze Hitachi H8/3048 [13, 14]. Dla algorytmów stochastycznych wykorzystano generator liczb pseudolosowych, bazujący na równaniach liniowych oraz na rejestrach przesuwnych (w przypadku kiedy były potrzebne dwa różne generatory) [12]. Na rys. 6 zamieszczono oscylogramy napięcia i prądu odbiornika dla modulacji IPDM $p=6+10$ z zespolonym pulsem PZ oraz rozdzielonymi symetrycznie pulsami PZH i PZL. Przedstawianie większej ilości oscylogramów dla metod stochastycznych jest niecelowe, ponieważ są one nierozróżnialne na podstawie przebiegów czasowych.



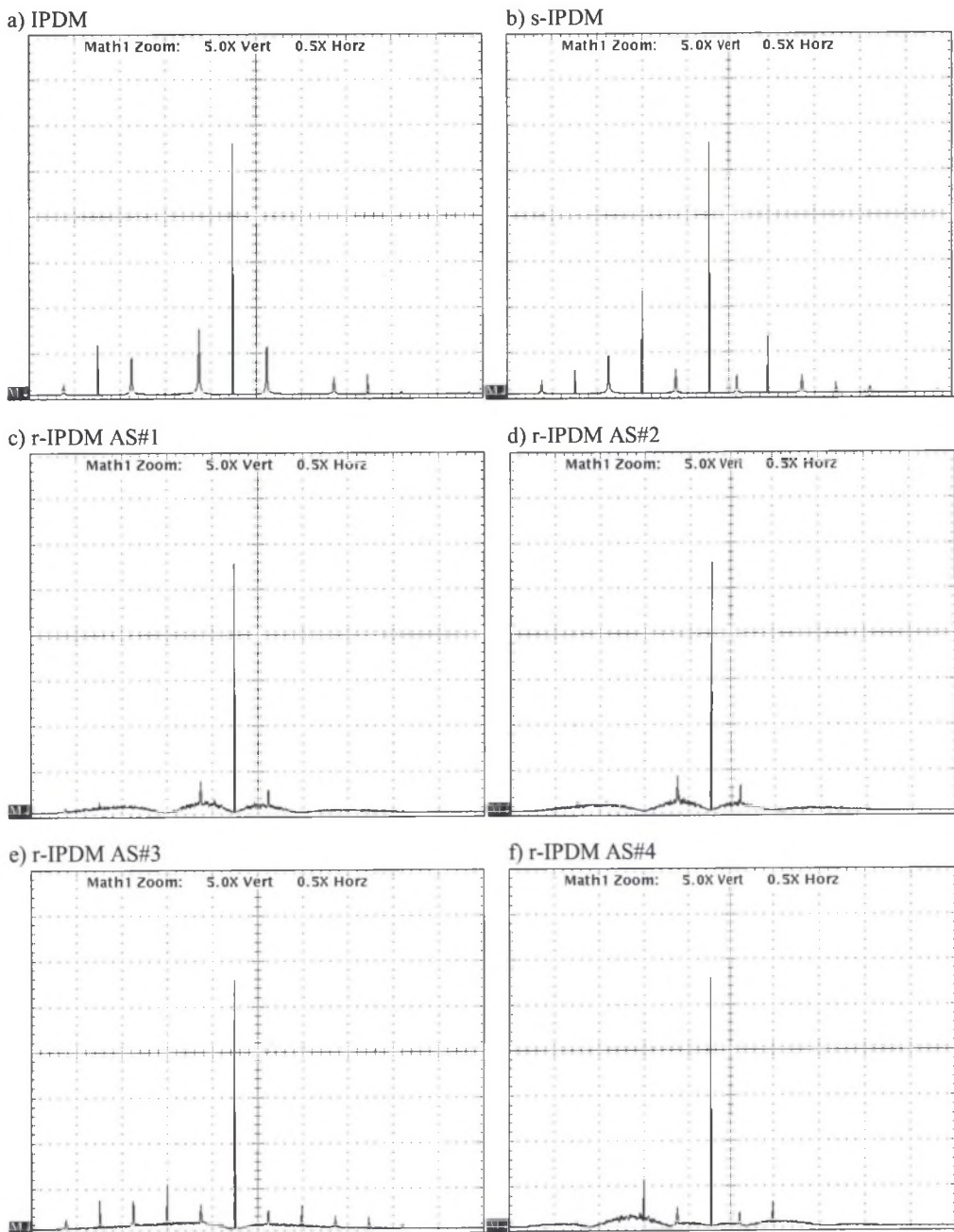
Rys. 5. Widok ogólny falownika wykorzystywanego do badań: a) falownik; b) wzбудnik ze wsadem
Fig. 5. The photos of the inverter used in the investigation: a) inverter; b) matching transformer and coil



Rys. 6. Przebiegi prądu i napięcia odbiornika, $f_o=22.4$ kHz, IPDM $6+10$ dla: a) metoda z zespolonym pulsem PZ; b) metoda z rozdzielonymi pulsami PZH i PZL

Fig. 6. Output current and voltage, $f_o=22.4$ kHz, IPDM $6+10$ for: a) combined integral pulse; b) split pulse PZH and PZL

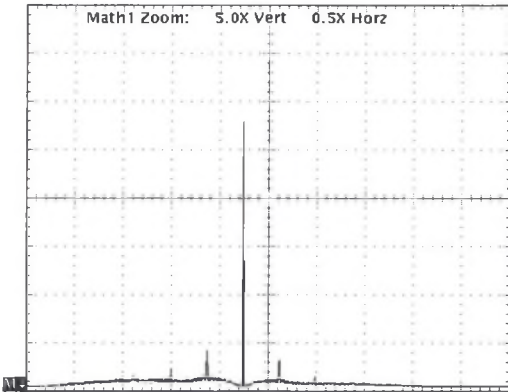
Zasadnicze pomiary dotyczyły analizy widmowej prądu odbiornika dla metody standardowej IPDM oraz sześciu metod stochastycznych. Przykładowe wyniki porównania dla modulacji $p=6+6=12$ zestawiono na rys. 7 i 8. Dla metody standardowej (rys. 7a i b), w zależności od ilości pulsów szybkich k_p , pojawia się odpowiednia liczba prążków subharmonicznych (w tym przypadku poniżej 22,4 kHz).



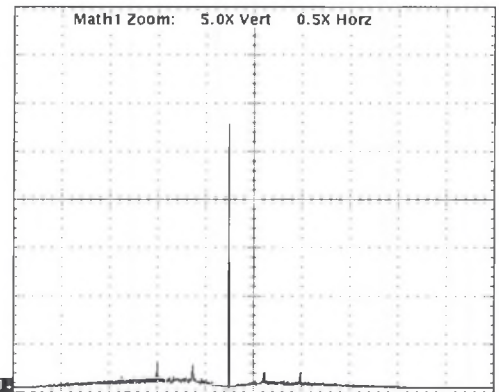
Rys. 7. Charakterystyka widmowa prądu odbiornika dla sześciu przypadków modulacji $p=6+6$, $f_0=22,4$ kHz, skala prądu 2,7 A/dz, skala częstotliwości 5 kHz/dz

Fig. 7. Output current spectra for 6 IPDM algorithms $p=6+6$, $f_0=22,4$ kHz, 2,7 A/div, 5 kHz/div

a) r-IPDM AS#5



b) r-IPDM AS#6

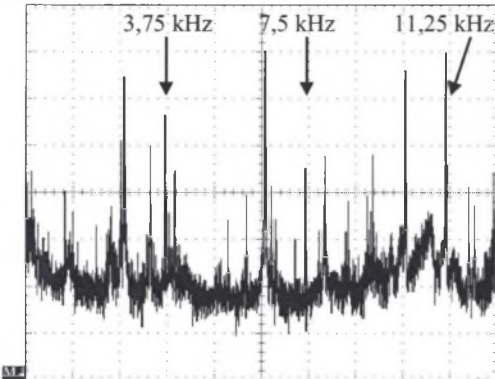


Rys. 8. Charakterystyka widmowa prądu odbiornika dla dwóch przypadków modulacji $p=6+6$, $f_o=22,4$ kHz, skala prądu 2,7 A/dz, skala częstotliwości 5 kHz/dz

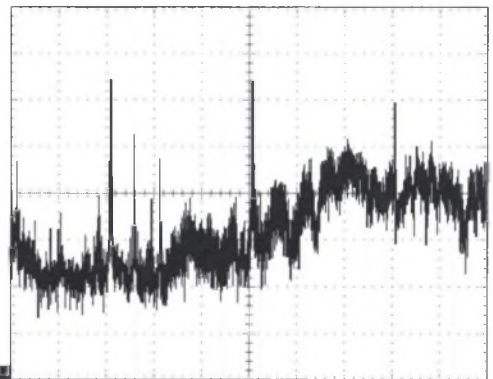
Fig. 8. Output current spectra for 2 r-IPDM algorithms $p=6+6$, $f_o=22,4$ kHz, 2,7 A/div, 5 kHz/div

Dla metod stochastycznych (rys. 7c-f i 8a-b) prążki te są silnie zredukowane, albo całkowicie rozmyte w zależności od liczby pulsów szybkich kp . Przeprowadzone pomiary widma prądu w całym zakresie mocy wskazują, że najlepsze wyniki dla algorytmów stochastycznych otrzymuje się dla metody AS#5 i 6, niewiele gorsze dla metod AS#1 i 2. Badania wskazały, że dla większej liczby taktów zadanych widmo jest bardziej rozmyte, co wynika wprost z większej możliwości pozycjonowania taktu wolnego.

a) IPDM



b) r-IPDM AS#5

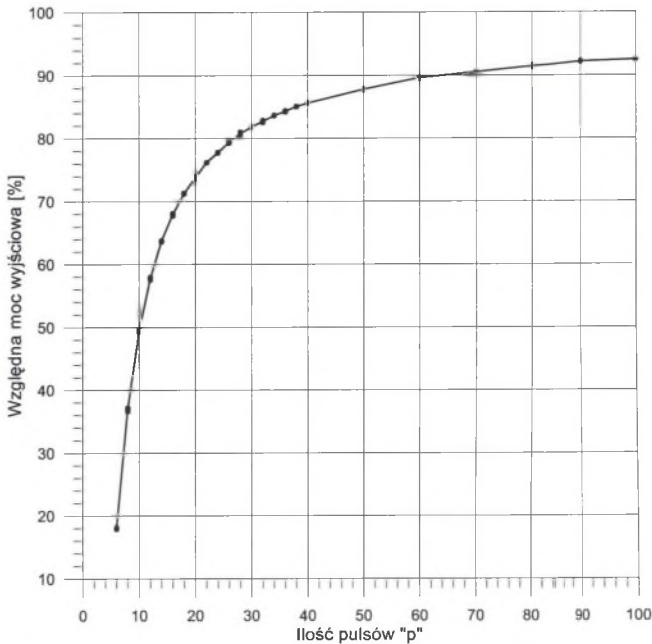


Rys. 9. Charakterystyka widmowa hałasu dla dwóch przypadków modulacji $p=6+6$, $f_o=22,4$ kHz, skala częstotliwości 1,25 kHz/dz; a) modulacja IPDM; b) modulacja r-IPDM5

Fig. 9. Noise spectra for two IPDM algorithms $p=6+6$, $f_o=22,4$ kHz, 1,25 kHz/div; a) IPDM; b) r-IPDM5

Podobne efekty można zauważyć w analizie widmowej hałasu generowanego przez układ. Dwa przykładowe wyniki zostały przedstawione na rysunku 9. Pierwszy z nich (rys. 9a) pokazuje widmo dla modulacji typu deterministycznego IPDM. Można zauważyć wyraźne prążki dla częstotliwości widocznych także w prądzie (rys. 7a): 3,75 kHz, 7,5 kHz, 11,25 kHz. Dla porównania pokazano na rys. 9b widmo dla jednego z badanych algorytmów stochastycznych r-IPDM5. W tym przypadku widmo ma charakter rozmyte, a wymienione

wcześniej prążki są silnie zredukowane. Wrażenia słuchowe potwierdzają bardziej akceptowalny charakter takiego hałasu. W trakcie badań pokazano także, że stopień rozmycia zależy w znaczny sposób od zastosowanego algorytmu. Biorąc pod uwagę równomierność widma w zakresie subharmonicznych, należałoby uszeregować badane metody stochastyczne wg następującej kolejności: r-IPDM6, r-IPDM5, r-IPDM2, r-IPDM1, r-IPDM4, r-IPDM3. Pomiary poziomu hałasu wskazują, że odpowiednie charakterystyki są zbliżone do siebie. Można tylko wskazać, że im większa równomierność widma, tym bardziej jest gładka charakterystyka poziomu hałasu w funkcji liczby zadanych pulsów.



Rys. 10. Charakterystyki sterowania mocy wyjściowej metodą IPDM dla $6+kp$

Fig. 10. Normalised output power characteristics of standard IPDM $6+kp$ control strategy

Pomiary charakterystyk mocy wyjściowej falownika pokazują, że są one dla wszystkich badanych metod praktycznie identyczne. Przykładowa została przedstawiona na rysunku 10, została ona zmierzona dla metody standardowej IPDM. Zakres regulacji mocy wynosi 15-100% mocy maksymalnej.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań stochastycznej metody r-IPDM w zastosowaniu do falownika rezonansowego klasy D_U . Najważniejsze wnioski są następujące:

- Metoda r-IPDM jest metodą bezpośrednią, tzn. nie wymaga stosowania regulatora DC/DC typu BUCK w obwodzie zasilania. Metoda zapewnia przełączanie zaworów w warunkach ZSC, co minimalizuje straty przełączania i tym samym umożliwia zastosowanie w falownikach najwyższych częstotliwości klasy D i DE.
- Charakterystyki sterowania mocy wyjściowej są identyczne dla metod IPDM i r-IPDM. Sterowanie mocy odbywa się w zakresie od ok. 15-100% mocy maksymalnej.

- Analiza widma prądu odbiornika wskazuje, że dla metody stochastycznej można uzyskać znaczne jego rozmycie dla zakresu subharmonicznych. Poziom rozmycia widma zależny jest od zadanej liczby pulsów szybkich – im dłuższy okres modulacji i wyższa moc wyjściowa, tym rozmycie widma jest większe.
- Przeprowadzono pomiary hałasu z wykorzystaniem analizatora hałasu *Brüel & Kjaer 2238 Mediator* z mikrofonem *Brüel & Kjaer 4148* (16 Hz-12kHz). W przypadku metod stochastycznych hałas osiąga charakter szumu szerokopasmowego, który jest znacznie lepiej akceptowany przez człowieka. Porównanie poziomów hałasów wskazuje, że metody stochastyczne nie powodują zasadniczo wzrostu jego wartości.

LITERATURA

1. Grzesik B., Kaczmarczyk Z., Kasprzak M.: *Integral Pulse Modulation - New Strategy for Series Resonant Half Bridge Inverter of Class D and DE*, International Conference on Electrical Drives and Power Electronics EDPE'99, The High Tatras Slovakia 5-7.10.1999. Kosice 1999, pp. 100-104.
2. Grzesik B., Kaczmarczyk Z., Kasprzak M., Stawarz P.: *Modulacja gęstości impulsów z częściowym powielaniem - nowa koncepcja sterowania mocy falownika rezonansowego klasy D i DE*, VIII Sympozjum Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki PPEE'99, Wisła 22-25.03.1999. Wisła 1999. s. 22-27.
3. Biskup T., Kasprzak M.: *Stochastyczna metoda IPDM i jej zastosowanie do sterowania rezonansowego falownika napięciowego klasy D*. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 4 T10A 066 24. Gliwice 2003.
4. Fujita H., Akagi H.: *Pulse-Density-Modulated Power Control of a 4 kW, 450 kHz Voltage-Source Inverter for Induction Melting Application*, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.32, No.2, March/April 1996. pp.279-286.
5. Nagai S., Kim Y., Nakaoka M.: *Development of Advanced Soft-Switching PWM&PFM Hybrid Control-Based Series Load-Resonant Inverter Topologies for High-Frequency Applications*. proceedings of PEMC'94, Warsaw September 1994, Warsaw 1994. pp.474-479.
6. Matysik J.: *Nowa metoda regulacji napięcia w rezonansowych przetwornicach DC/DC*, Przegląd Elektrotechniczny 1995, nr 11, s. 285-289.
7. Matysik J.: *Metody sterowania integracyjnego tranzystorowych falowników napięcia klasy D z szeregowym obwodem rezonansowym*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Elektryka z.114, ISSN 0137-2319, Warszawa 2001.
8. Matysik J.: *Analiza wartości i sekwencji przyrostów prądowych w rezonansowych przetwornicach tranzystorowych sterowanych metodą SIC*. Przegląd Elektrotechniczny nr 12, 1998.
9. Trzynadlowski A.M., Blaabjerg F., Pedersen J.K., Kirlin R.L., Legowski S.: *Random Pulse Width Modulation Techniques for Converter-Fed Drive Systems - A Review*, IEEE Tran. On Ind. Appl., vol.30, no.5, Sep/Oct 1994, pp.1166-1175.
10. Bech M.M., Pedersen J.K., Blaabjerg F.: *Random Modulation Techniques in Power Conversion - An Update*, Proceedings of the 7th International Power Electronics & Motion Control Conference, Budapest Hungary, 2-4 Sep. 1996, pp.3/357-3/365.
11. Kazimierczuk M.K., Czarkowski D.: *Resonant Power Converters*, John Wiley & Sons, USA 1995.
12. Wiczorkowski R., Zieliński R.: *Komputerowe generatory liczb losowych*, WNT, Warszawa 1997.
13. Biskup T., Kasprzak M., Górka S.: *Stochastyczna modulacja r-IPDM dla falownika rezonansowego klasy Du*, materiały konferencji SENE'03, Łódź 19-21.11.2003, Łódź 2003. s. 73-78.
14. Hitachi, *Single-Chip Microcomputer H8/3048 Series*, Hitachi Ltd, 1997.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Matysik