

Norbert MIELCZAREK

## BADANIA MODULACJI CPWM W PRZEKSZTAŁTNIKACH ENERGOELEKTRONICZNYCH

**STRESZCZENIE** *W pracy przedstawiono badania nad zastosowaniem chaotycznej modulacji szerokości impulsów (CPWM) w przekształtnikach energoelektronicznych DC/DC. Głównym celem wykorzystania modulacji CPWM jest zmniejszenie zakłóceń elektromagnetycznych (EMI), czyli splaszczanie widma sygnału wyjściowego przekształtników. W artykule zamieszczono opis kilku wariantów modulacji CPWM. W każdym z nich sygnał nośny ma charakter chaotyczny, co powoduje, że zawory energoelektroniczne przełączają się nieregularnie. Splot z takim sygnałem nośnym powoduje, że widmo sygnału staje się bardziej rozmyte. Wyniki badań wskazują na duże możliwości modulacji CPWM w zastosowaniu do redukcji zakłóceń EMI przekształtników energoelektronicznych, w szczególności do zastosowań w odnawialnych źródłach energii.*

**Słowa kluczowe:** chaos, układ buck, sterowanie, energoelektronika  
**DOI:** 10.5604/01.3001.0009.4816

### 1. WSTĘP

---

Jednym z ważnych problemów, jakim muszą stawić czoła producenci sprzętu elektronicznego, jest spełnienie norm dotyczących interferencji elektromagnetycznej (EMI). Jest to szczególnie ważne w zastosowaniach medycznych, lotniczych, czy wojskowych. Zazwyczaj problem zmniejszenia EMI jest rozwiązywany przez dodanie odpowiednio dobranych filtrów czy ekranów, które powodują zmniejszenie zakłóceń w określonym paśmie częstotliwości. Projekt filtrów zależy od urządzenia energoelektronicznego, do którego jest dobierany, jego warunków pracy i norm EMI. Obok wzrostu wagi po dodaniu takiego filtru, rozmiaru i kosztów, istotnym problemem jest brak powtarzalności stosowania zaprojektowanego filtru do wszystkich urządzeń. Filtry muszą być zaprojektowane dla każdej aplikacji oddzielnie.

---

**dr inż. Norbert MIELCZAREK**

e-mail: Norbert.Mielczarek@put.poznan.pl

Politechnika Poznańska, Zakład Energoelektroniki

i Sterowania Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej,

ul. Piotrowo 3A, 60-695 Poznań

Innym podejściem do problemu jest taka modyfikacja sterowania urządzeń energoelektronicznych, aby spłaszczyć widmo sygnałów wyjściowych redukując interferencję elektromagnetyczną. Pomysł ten nie wymaga montowania dodatkowych filtrów. W pracy zaprezentowano metody bazujące na teorii chaosu deterministycznego w przekształtniku energoelektronicznym DC/DC obniżającym napięcie. Metody te polegają na chaotycznej modyfikacji sygnału nośnego modulacji szerokości impulsów (*Chaotic Pulse Width Modulation* – CPWM). Ze względu na fakt, że widmo sygnału chaotycznego jest bardziej płaskie, spłot z takim sygnałem nośnym powoduje, że widmo napięcia przekształtnika staje się bardziej rozmyte.

Jeszcze innym podejściem, które może być wykorzystane do redukcji EMI jest wymuszenie harmoniczne, które może doprowadzić do orbity stabilnej, bądź z niej zepchnąć ku chaotycznej. Wejście sygnału sterowanego w chaos jest nazywane chaotyzacją lub anty sterowaniem chaotycznym. Można je osiągnąć dzięki zmianom parametrów wymuszenia harmonicznego, którym może być jego amplituda i kąt przesunięcia fazowego. Badania opisane jako perturbacja parametru kontrolnego przekształtnika obniżającego napięcie zawarte są w pracy [1].

## 2. MODULACJA CPWM

---

Jeśli sygnał nośny modulacji PWM jest okresowy (zazwyczaj piłokształtny lub trójkątny) to w widmie sygnału wyjściowego ta okresowość będzie widoczna i wystąpi wielokrotnie. Jedną z metod redukcji EMI jest zastosowanie, jako sygnału nośnego przebiegu nieokresowego losowego lub chaotycznego. W ostatnich latach temat zastosowania metod sterowania wynikających z chaosu deterministycznego w urządzeniach energoelektronicznych był szeroko badany [2, 5]. Zaletą wykorzystania chaotycznego sygnału nośnego do spłaszczenia widma przebiegu wyjściowego jest fakt, że jest łatwiejszy do zaimplementowania w układach fizycznych. Dzieje się tak dlatego, że sygnał chaotyczny jest opisany deterministycznym równaniem, ale jego trajektoria przypomina zachowanie losowe [3]. Zastosowanie sygnału chaotycznego pozwala na obniżenie kosztów takiego systemu. Sygnał chaotyczny można otrzymać za pomocą metod analogowych, jak i w sterowaniu dyskretnym. Zmieniając parametry modulacji PWM, można zmodyfikować stan, w którym aktualnie znajduje się przekształtnik. Albo stabilizować jego pracę (orbita stabilna) albo zepchnąć na trajektorie chaotyczną. Pierwszy tryb pracy ma widmo mocy z wielokrotnymi szpilkami, natomiast drugi ma widmo spłaszczone.

Modyfikacja sygnałem chaotycznym modulacji PWM może odbywać się na dwa sposoby. Można modulować okres piłokształtnego lub trójkątnego sygnału nośnego lub jego amplitudę. Gdy zmienia się sygnał nośny, wypełnienie w modulacji PWM także będzie modyfikowane, czyli podczas modulacji sygnał wyjściowy będzie miał zmodyfikowane widmo częstotliwościowe. Przekształtniki, jako układy nieliniowe są bardzo wrażliwe na zmiany parametrów sterowania [4]. Mała zmiana wystarczy, żeby z układu pracujący stabilnie zepchnąć na trajektorie niestabilną. Jest to cecha układów chaotycznych. Dlatego też tą cechą wykorzystano w dalszych badaniach, aby zredukować EMI.

Modulacja CPWM ze zmieniającą się częstotliwością sygnału nośnego opisana jest według wzoru (1).

$$\mathbf{T}_{CPWM} = T_{PWM} \frac{\mathbf{x}}{\bar{x}} \quad (1)$$

gdzie:

$\mathbf{T}_{CPWM}$  – to wektor kolejnych okresów sygnału nośnego modulacji CPWM,

$T_{PWM}$  – okres modulacji PWM,

$\mathbf{x}$  – wektor o długości  $N$  sekwencji chaotycznej, jako  $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ ,

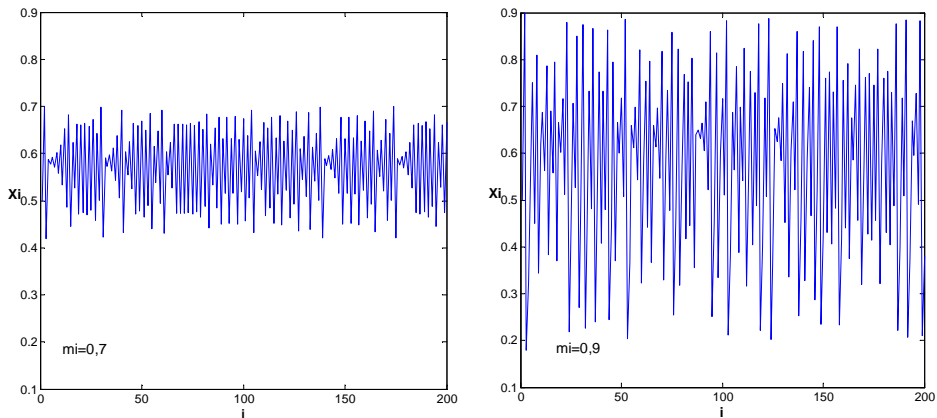
$\bar{x}$  – średnia wartość z wektora  $\mathbf{x}$ .

W pracy sekwencja chaotyczna została generowana za pomocą odwzorowania namiotowego (2) oraz logistycznego (3).

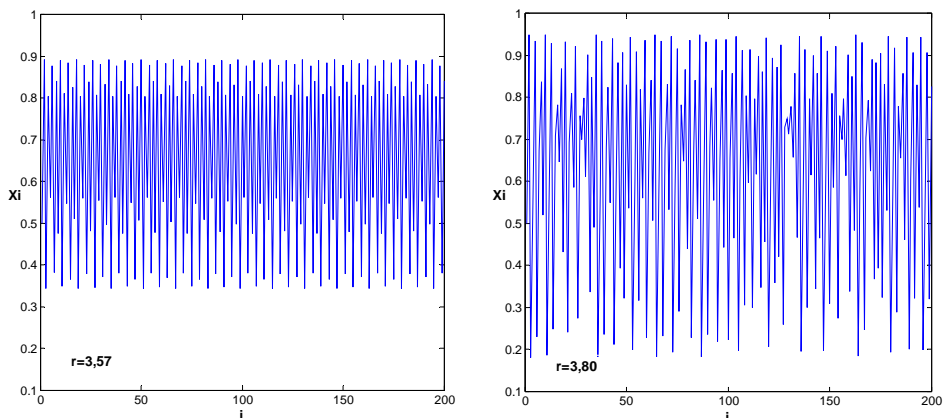
$$x_{n+1} = \begin{cases} 2\mu x_n & \text{dla } x_n \leq 0,5 \\ 2\mu(1-x_n) & \text{dla } x_n > 0,5 \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{n+1} = rx_n(1-x_n) \quad (3)$$

W obu odwzorowaniach wartość współczynnika  $\mu$  oraz  $r$  wpływa na to, czy generowane wyniki są regularne, czy już otrzymywane są wartości z sekwencji chaotycznej. Pokazują to rysunki 1 i 2 opracowane dla różnych odwzorowań i wartości  $\mu$  oraz  $r$ .

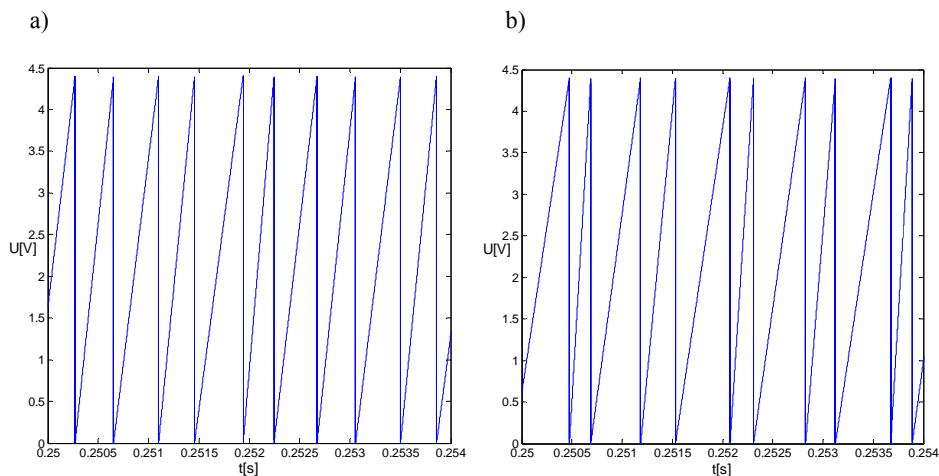


**Rys. 1. Sekwencja chaotyczna wygenerowana dla odwzorowania namiotowego dla różnych wartości współczynników  $\mu$**



**Rys. 2.** Sekwencja chaotyczna wygenerowana dla odwzorowania logistycznego dla różnych wartości współczynników  $r$

Na rysunku 3 zaprezentowano przebieg sygnału nośnego, w którym okres zmienia się – to znaczy jest zaburzany według sekwencji chaotycznej generowanej do wektora  $T_{CPWM}$ . Wariancja generowanych liczb w badanej sekwencji z odwzorowaniem namiotowym (rys. 2a) jest mniejsza niż dla odwzorowania logistycznego (rys. 2b), więc okres sygnału na przebiegu 3a niewiele różni się od zadanego okresu  $T_{PWM}$ . Większe różnice widoczne są na przebiegu 3b dla sygnału nośnego modyfikowanego za pomocą odwzorowania logistycznego.



**Rys. 3.** Sygnał nośny ze zmienną częstotliwością dla sekwencji uzyskanej z:  
a) odwzorowania namiotowego  $\mu = 0,7$ ; b) odwzorowania logistycznego  $r = 3,57$

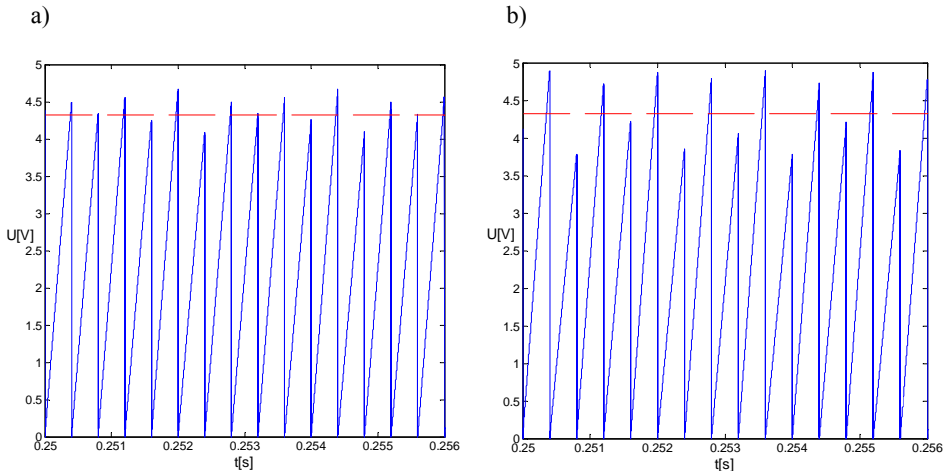
Modulacja CPWM ze zmieniającą się amplitudą sygnału nośnego opisana jest zależnością (4).

$$\mathbf{A}_{CPWM} = \left( (1-\lambda)\mathbf{I} + \lambda \frac{\mathbf{x}}{\bar{x}} \right) A_{PWM} \quad (4)$$

gdzie:

- $\mathbf{A}_{CPWM}$  – wektor kolejnych amplitud sygnału nośnego,
- $A_{PWM}$  – amplituda sygnału nośnego modulacji PWM,
- $\lambda$  – współczynnik modulacji amplitudy,
- $\mathbf{x}$  – wektor o wymiarze  $N$ , sekwencji chaotycznej, jako  $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_2, \dots, x_N]$ ,
- $\bar{x}$  – średnia wartość z wektora  $\mathbf{x}$ ,
- $\mathbf{I}$  – wektor o wymiarze  $N$ , złożony z jedynek  $\mathbf{I} = [1, \dots, 1, \dots, 1]$ .

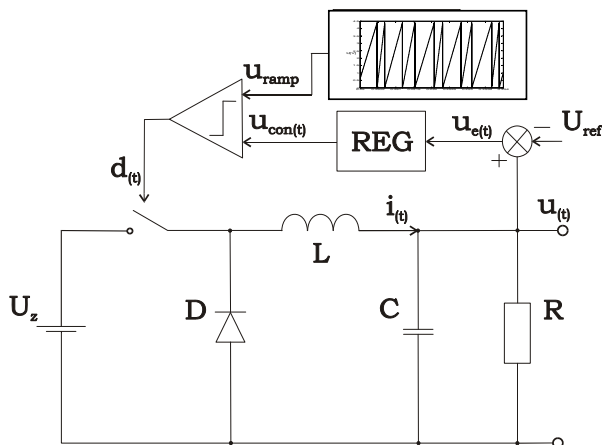
Do generowania sekwencji chaotycznych wykorzystano te same przypadki odwzorowań namiotowego i logistycznego. Na rysunku 4 zaprezentowano dwa przypadki modulacji CPWM przy stałym okresie  $T_{PWM}$ , lecz o zmiennej amplitudzie, która generowana jest do wektora  $\mathbf{A}_{CPWM}$ , jako modyfikacja amplitudy  $A_{PWM}$  według sekwencji chaotycznej. Przerywaną linią pokazano poziom zadanej amplitudy  $A_{PWM}$ . Tak jak w poprzednich przypadkach, ze względu na większą wariancję liczb w sekwencji generowanej za pomocą odwzorowania logistycznego, większe wahania występują na rysunku 4b.



**Rys. 4. Sygnał nośny ze zmienną amplitudą dla sekwencji uzyskanej z:**  
a) odwzorowania namiotowego  $\mu = 0,7$ ; b) odwzorowania logistycznego  $r = 3,57$

### 3. MODEL MATEMATYCZNY

W modelu matematycznym badanego przekształtnika buck przyjęto, że elementy pasywne układu są liniowe, a model zaworu energoelektronicznego jest łącznikiem idealnym. Komparator nie jest wyposażony w przerzutnik typu  $D$  na wyjściu, możliwe jest zatem wiele załączeń zaworu w ciągu jednego okresu modulacji PWM.



Rys. 5. Schemat układu obniżającego napięcie z regulatorem typu  $P$  oraz chaotycznym sygnałem nośnym

Równania stanu opisujące pracę badanego układu przekształtnika obniżającego napięcie mają postać:

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B d(t) \quad (5)$$

gdzie:

$$X(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ i(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -1/RC & 1/C \\ -1/L & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ U_z/L \end{bmatrix}.$$

Sygnał  $d(t)$  jest opisany zależnością:

$$d(t) = \begin{cases} 1 & \Rightarrow u_{ramp} > u_{con}(t) \\ 0 & \Rightarrow u_{ramp} \leq u_{con}(t) \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:  $u_{con}(t) = K_p(u(t) - U_{ref})$ ,  $U_{ref}$  to wartość zadana a  $u_{ramp}$  jest sygnałem nośnym modulacji PWM, który dla tradycyjnej modulacji jednostronnej opisuje wzór:

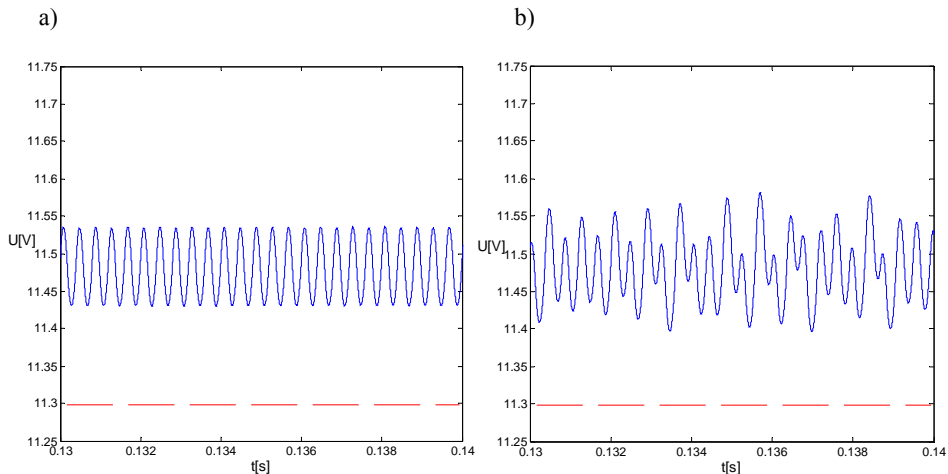
$$u_{ramp}(t) = U_d + (U_g - U_d) \text{ mod}(t, T) / T \quad (7)$$

Przy czym:  $U_d$  i  $U_g$  to odpowiednio górny i dolny poziom sygnału nośnego  $u_{ramp}$ . Dla modulacji CPWM sygnał nośny jest generowany, jako wektor  $U_{ramp}$ , przy uwzględnieniu odpowiednio wzorów 1 lub 4, gdzie pod  $T$  podstawiany jest wektor  $T_{CPWM}$ , a pod  $(U_g - U_d)$  wektor  $A_{CPWM}$ .

## 4. WYNIKI BADAŃ

Dla dalszych badań przyjęto następujące wartości elementów i parametrów sterowania:  $U_z = 20 \text{ V}$ ,  $U_{ref} = 11,3 \text{ V}$ ,  $f_s = 2,5 \text{ kHz}$ ,  $U_g = 4,4 \text{ V}$ ,  $U_d = 0 \text{ V}$ ,  $L = 20 \text{ mH}$ ,  $C = 47 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $R = 22 \text{ }\Omega$ . Symulacje i analizę przeprowadzono w programie MATLAB, gdzie model zakodowany jest w postaci skryptu.

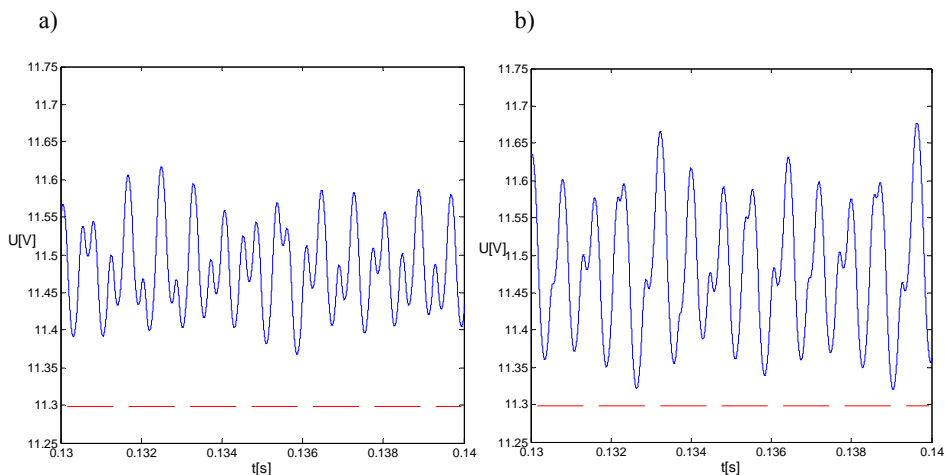
Na rysunku 6 zaprezentowano napięcie wyjściowe przekształtnika obniżającego napięcie dla dwóch przypadków. Pierwszy z nich dotyczy pracy, w której klucz załączany jest pod wpływem sygnału sterującego generowanego według tradycyjnej metody PWM (rys. 6a). W drugim przypadku amplituda nośnego sygnału  $U_{ramp}$ , w każdym okresie modulacji jest nieco inna i różni się o czynnik losowy o rozkładzie normalnym. We wzorze 4 wektor  $x$  podlega rozkładowi normalnemu o średniej 0,5 i odchyleniu standardowym 0,025. Na przebiegach z rysunków 6, 7 oraz 8, czerwoną przerywaną linią zaznaczono poziom napięcia zadanego. Można zauważyć, że tradycyjna metoda PWM umożliwia pracę stabilną okresową. Składowa losowa natomiast powoduje, że przebieg nie jest regularny. Ta nieregularność a zwłaszcza chwilowe duże wahania napięcia jest typową wadą każdej metody opartej na zaburzeniu sygnału nośnego. Obojętnie czy to zaburzenie ma rozkład normalny, czy jest generowaną sekwencją chaotyczną.



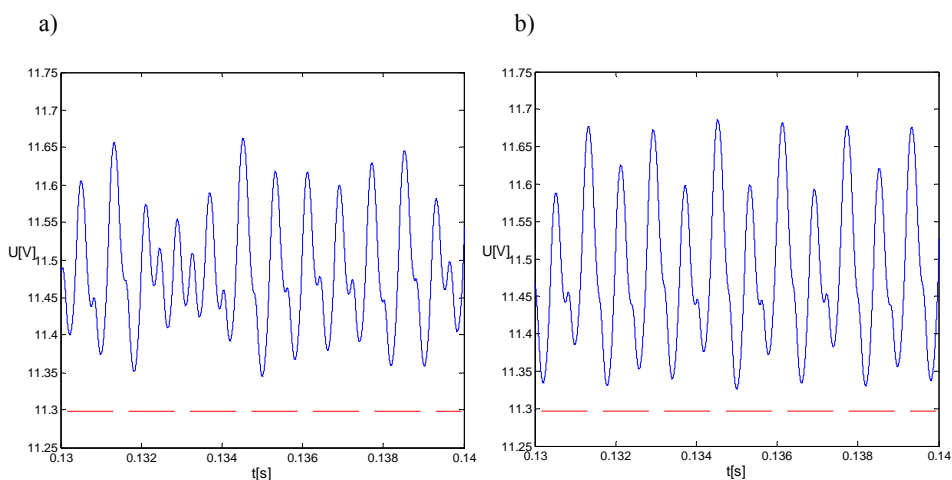
**Rys. 6. Napięcie wyjściowe przekształtnika dla modulacji:**

a) zwykłej PWM; b) z sygnałem nośnym ze zmienną amplitudą dla sekwencji losowej

Kolejne przebiegi (rys. 7) to napięcie wyjściowe przekształtnika uzyskane dla metody CPWM z sygnałem nośnym, którego okres jest zmienny w czasie. Przebiegi uzyskano dla dwóch funkcji użytych przy generowaniu sygnału nośnego: odwzorowania namiotowego i logistycznego. Wariant dla modulacji CPWM i zmiennej amplitudy sygnału nośnego zaprezentowano na rysunku 8. Z pokazanych przebiegów 6, 7, 8 najbardziej przypominający przebieg regularny-okresowy jest przypadek CPWM ze zmienną amplitudą sygnału nośnego przy odwzorowaniu logistycznym.



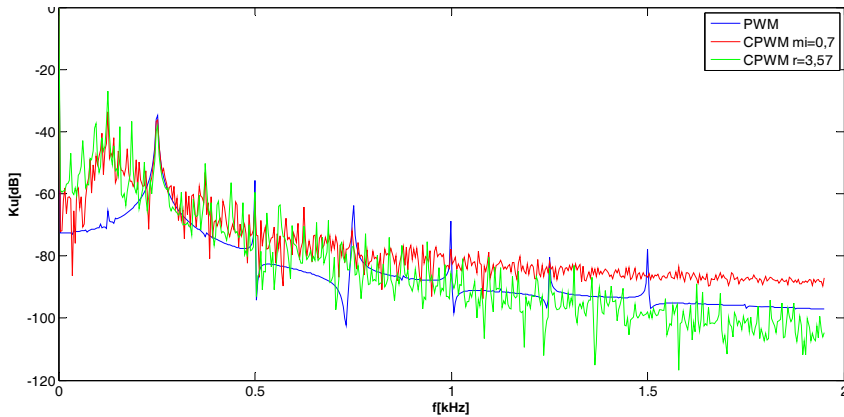
**Rys. 7.** Napięcie wyjściowe przekształtnika dla modulacji CPWM z sygnałem nośnym ze zmienną częstotliwością dla sekwencji uzyskanej z: a) odwzorowania namiotowego  $\mu = 0,7$ ; b) odwzorowania logistycznego  $r = 3,57$



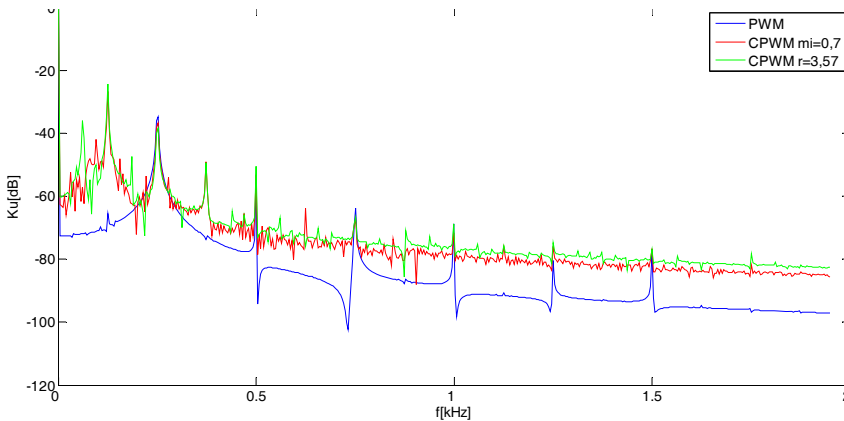
**Rys. 8.** Napięcie wyjściowe przekształtnika dla modulacji CPWM z sygnałem nośnym ze zmienną amplitudą dla sekwencji uzyskanej z: a) odwzorowania namiotowego  $\mu = 0,7$ ; b) odwzorowania logistycznego  $r = 3,57$

Jedną z najważniejszych cech, dla której badano metodę CPWM jest kształt widma częstotliwościowego. Rysunki 9 oraz 10 przedstawiają różne przypadki widm mocy dla badanego przekształtnika.



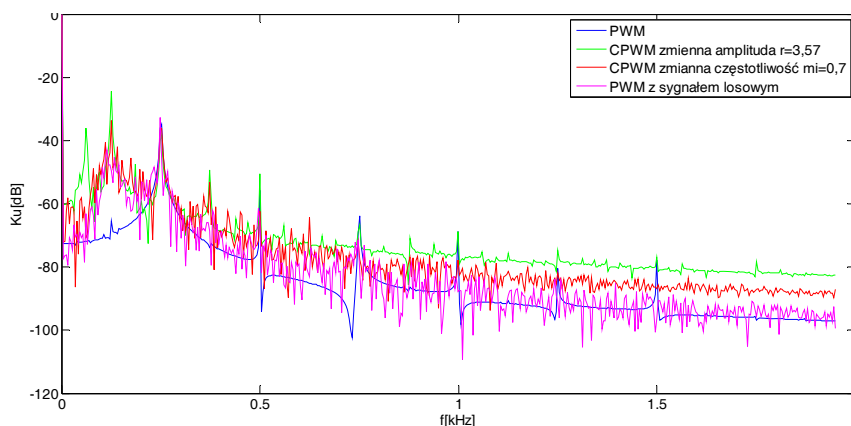


**Rys. 9.** Widmo mocy przekształtnika sterowanego tradycyjnym PWM oraz dla CPWM z sygnałem nośnym ze zmienną częstotliwością dla sekwencji uzyskanej z odwzorowania namiotowego  $\mu = 0,7$  oraz odwzorowania logistycznego  $r = 3,57$



**Rys. 10.** Widmo mocy przekształtnika sterowanego tradycyjnym PWM oraz dla CPWM z sygnałem nośnym ze zmienną amplitudą dla sekwencji uzyskanej z odwzorowania namiotowego  $\mu = 0,7$  oraz odwzorowania logistycznego  $r = 3,57$

Zestawienie widm mocy pokazane na rysunku 11 jest wykresem zbiorczym porównującym przypadek tradycyjnego sterowania PWM oraz metody CPWM zarówno dla zmiennej amplitudy jak i zmiennej częstotliwości sygnału nośnego. Dodane jest tam także widmo dla wariantu PWM oraz zaburzająca sygnał nośny składowa losowa o średniej 0,05 i odchyleniu standardowym 0,025. Z zaprezentowanego zestawienia wynika, że najbardziej płaskie widmo posiada układ przekształtnika obniżającego napięcie sterowany za pomocą CPWM ze zmienną amplitudą sygnału nośnego, która powstała przy pomocy odwzorowania logistycznego dla  $r = 3,57$



**Rys. 11. Widmo mocy przekształtnika sterowanego tradycyjnym PWM oraz dla CPWM w różnych konfiguracjach**

## 5. WNIOSKI

W pracy przedstawiono badania nad zastosowaniem chaotycznej modulacji szerokości impulsów (CPWM) w przekształtniku energoelektronicznych DC/DC obniżającym napięcie. Głównym celem wykorzystania modulacji CPWM jest zmniejszenie zakłóceń elektromagnetycznych (EMI), czyli spłaszczenie widma sygnału wyjściowego przekształtników.

W artykule zamieszczono opis kilku wariantów modulacji CPWM. W każdym z nich sygnał nośny ma charakter chaotyczny, co powoduje, że zawory energoelektroniczne przełączają się nieregularnie. Splot z takim sygnałem nośnym powoduje, że widmo sygnału staje się bardziej rozmyte. Chaotyczność sygnału nośnego uzyskano przez kształtowanie amplitudy bądź przez chaotyczną odchyłkę względem ustalonej częstotliwości PWM.

Zastosowanie metody CPWM powoduje zwiększenie oscylacji napięcia wyjściowego, nieregularne przełączanie zaworów, ale dzięki temu widmo mocy jest bardziej płaskie.

Wyniki badań wskazują na duże możliwości modulacji CPWM w zastosowaniu do redukcji zakłóceń EMI przekształtników energoelektronicznych, w szczególności do zastosowań w odnawialnych źródłach energii.

## LITERATURA

1. Porada R., Mielczarek N.: The General Characterization of Control Methods of Chaotic Systems. Computer Applications in Electrical Engineering part II, Poznań 2006.
2. Yang R., Zhang B., Li F., and Jiang J. J.: Experiment research of chaotic PWM suppressing EMI in converter. Proc. IEEE 5th Int. Conf. Power Electronics and Motion Control, vol. 1, s. 1 – 5, 2006.

3. Ott E., Grebogi C., and Yorke J. A.: Controlling chaos. *Physical Review Letters*, vol. 64, s. 1196 – 1199, 1990.
4. Poddar G., Chakrabarty K., and Banerjee S.: Control of chaos in DC-DC converters. *IEEE Trans. Circuits and Systems–I*, vol. 45, s. 672 – 676, 1998.
5. Y. Lu, X. Huang, B. Zhang, and Z. Mao. Two chaos-based PWM strategies for suppression of harmonics. *Proc. 6th World Congress Intelligent Control and Automation*, vol. 1, s. 953 – 957, 2006.

*Przyjęto do druku dnia 14.12.2016 r.*

## STUDY OF CPWM MODULATION IN POWER ELECTRONICS CONVERTERS

Norbert MIELCZAREK

**ABSTRACT** *In the paper, the research concerning the usage of the Chaotic Pulse Width Modulation (CPWM) in a buck step down converter was presented. The main purpose of the application of CPWM is the reduction of the EMI interference by flattening of the power spectrum of output voltage. This article contains the description of few types of the CPWM modulation. In all of them, a carrier signal behaves chaotically, what makes that the power electronics keys switch irregularly. A convolution with such a carrier signal makes that the power spectrum becomes fuzzier. The results of the presented study depicted on big possibilities of the CPWM modulation for the EMI interference reduction in power electronics, particularly in renewable energy devices.*

**Keywords:** *chaos, buck converter, control, power electronics*

**Dr inż. Norbert MIELCZAREK** – od roku 2002 zatrudniony jako asystent, a od roku 2010 jako adiunkt w Zakładzie Energoelektroniki i Sterowania Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej.



