

Wpływ metody z perturbacją parametru kontrolnego na sterowanie przekształtnika obniżającego napięcie

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania symulacyjne oraz badania laboratoryjne układu przekształtnika obniżającego napięcie typu buck. W układzie zastosowano metodę perturbacji parametru kontrolnego sterowania, którym jest wzmacnienie K . Celem zastosowania metody jest eliminacja zachowań chaotycznych i synchronizacja trajektorii, po której porusza się układ do orbity stabilnej za pomocą zaburzenia o niewielkiej amplitudzie.

Abstract. In this paper it was presented simulations and laboratory researches of voltage step down converter. In this buck converter applied perturbation of control parameter, which was control gain K . The main purpose of application of this method was elimination of chaotic behavior and synchronization of system's trajectory to stable orbit with usage of low amplitude perturbation. (Effect of method with perturbation of control parameter on control of buck converter).

Słowa kluczowe: chaos, układ buck, sterowanie, energoelektronika.

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

doi:10.12915/pe.2014.11.25

Wstęp

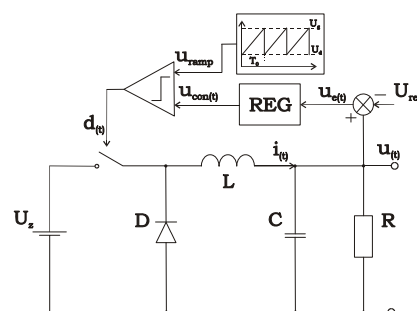
Przekształtnik obniżający napięcie typu buck, jest stosunkowo prostym przekształtnikiem, co przedstawia model matematyczny (1) jeśli przyjęte zostaną elementy idealne. Jedynym źródłem nieliniowości jest tu metoda sterowania. Mimo swej prostoty w układzie występuje szereg bardzo interesujących zjawisk, którymi zajmuje się teoria chaosu deterministycznego [1]. Przekształtnik wykazuje dużą wrażliwość na warunki początkowe a zmiana wzmacnienia w torze regulacji prowadzi od pracy stabilnej do oscylacji chaotycznych według scenariusza nazywanego bifurkacjami. Układ ten jest przedmiotem badań nie tylko ze względu na aspekty poznawcze poszerzające wiedzę na temat układów nieliniowych, czy stanów chaotycznych. Ten przekształtnik ma wiele zastosowań praktycznych a precyzyjne sterowanie jego pracą pozwala na minimalizowanie uchybu i stabilne napięcie wyjściowe. Poza tym, kolejnym celem badań jest opracowanie takiej metody sterowania, którą będzie można wykorzystać także w innych, bardziej złożonych układach, w których można obserwować pracę chaotyczną.

W pracy przedstawiono badania przeprowadzone z zastosowaniem metody perturbacji parametru kontrolnego sterowania na przykładzie przekształtnika obniżającego napięcie. Sinusoidalnie zaburzonym parametrem jest wzmacnienie K regulatora typu P . Zaburzenie zostało zastosowane dla wzmacnienia K , ze względu na łatwość realizacji w cyfrowym układzie sterowania, a także potrzebę porównania z innymi metodami pod względem szerokości przedziału K , dla którego układ działa stabilnie.

Na podstawie analizy stabilności opracowanej z wykorzystaniem odwzorowania Poincaré [2,3,4] wybrano amplitudę perturbacji oraz jej przesunięcie fazowe gwarantujące jak najszerszy zakres pracy stabilnej. Następnie wyniki analizy dla wybranych współczynników porównano z wynikami symulacji komputerowymi. W ostatniej części badań metodę perturbacji zastosowano w przekształtniku fizycznym a wyniki pomiarowe porównano z badaniami teoretycznymi i symulacyjnymi.

Model matematyczny badanego przekształtnika

Dla uproszczenia modelu matematycznego 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 połączeń zaworu w ciągu jednego okresu modulacji PWM.



Rys.1. Schemat układu obniżającego napięcie z regulatorem typu P

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

$$(1) \quad \dot{X}(t) = A X(t) + B d(t)$$

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

Sygnał $d(t)$ jest opisany zależnością:

$$(2) \quad d(t) = \begin{cases} 1 & \Rightarrow u_{ramp} > u_{con}(t) \\ 0 & \Rightarrow u_{ramp} \leq u_{con}(t) \end{cases}$$

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 modulacji jednostronnej opisuje wzór:

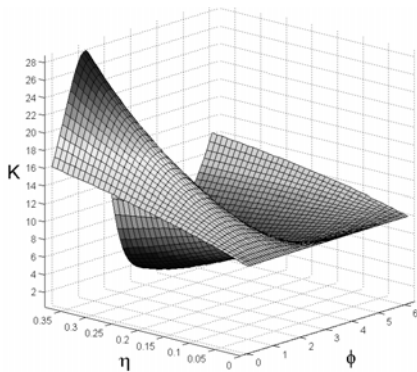
$$(3) \quad u_{ramp}(t) = U_d + (U_g - U_d) \text{mod}(t, T) / T$$

Przy czym: U_d i U_g to odpowiednio górny i dolny poziom sygnału nośnego u_{ramp} . Dla dalszych badań przyjęto następujące wartości elementów i parametry sterowania: $U_z = 20V$, $L = 20mH$, $C = 47\mu F$, $R = 22\Omega$, $K = 8,4$, $U_{ref} = 11,3V$, $f_s = 2,5kHz$, $U_g = 4,4V$, $U_d = 0V$.

Sterowanie z wykorzystaniem klasycznego regulatora typu P , PI czy PID nie eliminuje zachowań chaotycznych [2,3,4,5], dlatego w celu poszerzenia stabilnego zakresu pracy wykorzystano metodę z perturbacją parametru kontrolnego. Metoda ta polega na wprowadzeniu oscylacji dla do tej pory stałej wartości współczynnika wzmacnienia K [2,3,4]:

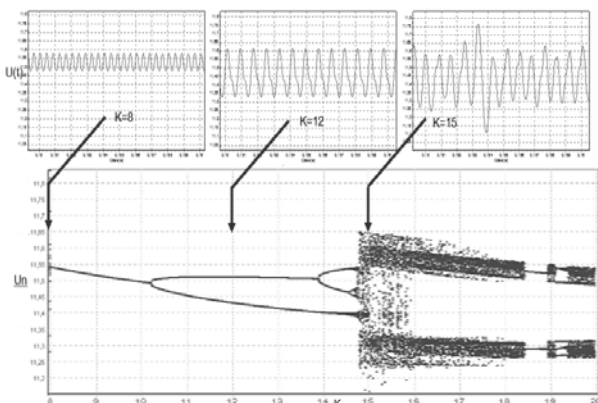
$$(4) \quad K_p(t) = K(1 + \eta \sin(2\pi f_s \cdot t + \varphi))$$

gdzie: η , f_s i φ to odpowiednio amplituda, częstotliwość i kąt przesunięcia fazowego wprowadzonego zaburzenia.



Rys. 2 Wykres zależności $K_{1Tmax}=f(\eta,\varphi)$ wyznaczony analitycznie dla przekształtnika buck

W pracy [2], na podstawie odwzorowania Poincaré wyznaczono maksymalne wzmocnienie $K_{1Tmax}=f(\eta,\varphi)$, dla którego układ działa stabilnie na orbicie o okresie $1T$ w orzestrzeni stanów. adzie T to okres modulacji PWM.

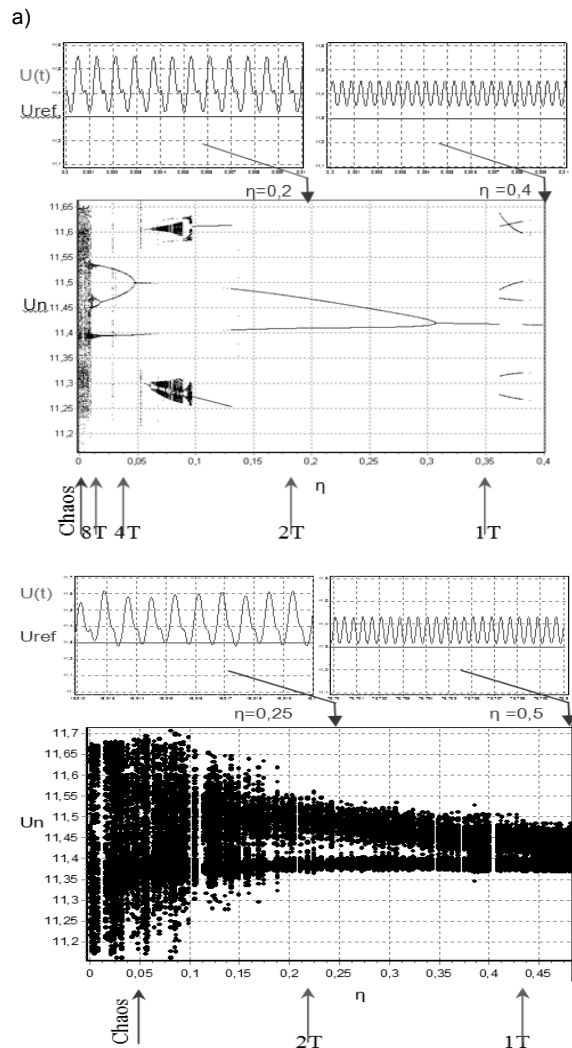


Rys. 3 Diagram bifurkacji otrzymany symulacyjnie dla wzmocnienia K oraz przebiegi napięcia do zaznaczonych wartości K

Na kształt trajektorii fazowej badanego układu ma wpływ amplituda zaburzenia i kąt przesunięcia fazowego φ pomiędzy sygnałami nośnym PWM a zaburzeniem. Wyznaczenie dla badanego przekształtnika odwzorowania Poincaré i wartości własnych, umożliwiło przedstawienie zależności $K_{1Tmax}=f(\eta,\varphi)$ w przestrzeni trójwymiarowej. Obrazuje to rysunek 2, na którym przedstawiono jak wartość K_{1Tmax} zależy od amplitudy zaburzenia η oraz kąta φ . Widać na nim, że sygnał zaburzenia wzmocnienia w sprzężeniu zwrotnym K ma bardzo duży wpływ na sterowanie trajektorią tego układu. Za pomocą zmian amplitudy zaburzenia η oraz zmian przesunięcia fazowego φ można wprowadzić system na orbitę $1T$ -okresową za pomocą oscylacji o bardzo małej amplitudzie. Na podstawie wyznaczonej funkcji $K_{1Tmax}=f(\eta,\varphi)$ można stwierdzić, że wartością amplitudy perturbacji η oraz kąta φ gwarantującą najszerszy zakres pracy stabilnej na orbicie $1T$ jest $\eta=0,4$ oraz $\varphi=1,27$ rad.

Wyniki badań

Badania symulacyjne przeprowadzono w programie *ChaoPhS* [5]. Dla przypadku sterowania klasycznego (regulator typu P) na rysunku 3 pokazano diagram bifurkacji uzyskany symulacyjnie, gdzie parametrem bifurkacji jest stałe wzmocnienie regulatora K . Widoczne jest przejście do chaosu poprzez kaskadę podwajania okresu orbity układu. Od wartości $K=14,7$ układ zachowuje się chaotycznie. Nad diagramem pokazane są przebiegi napięcia dla zaznaczonych wartości wzmocnienia.

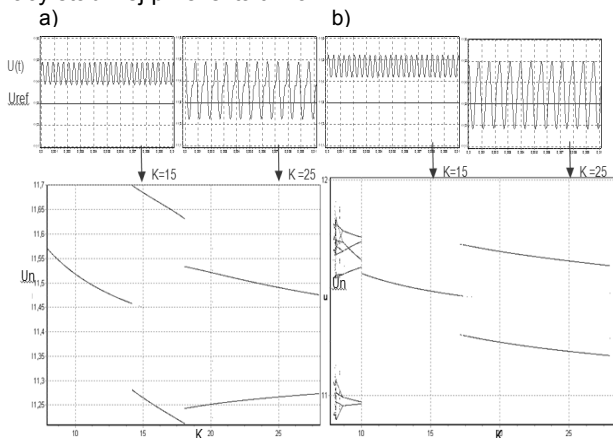


Rys. 4 Diagram bifurkacji dla amplitudy η perturbacji wzmocnienia K dla układu uzyskany: a) symulacyjnie; b) z układu fizycznego

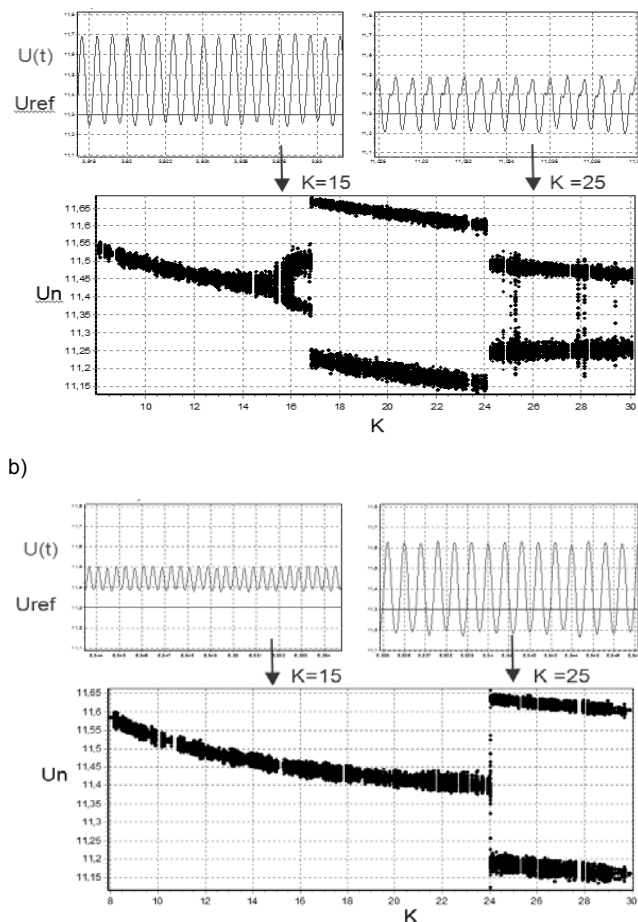
Na rysunku 4a pokazano diagram bifurkacji układu dla parametru η dla wartości wzmocnienia $K=15$ uzyskany z symulacji komputerowej. Można zauważyć, że wprowadzenie zaburzenia o postaci (4) i wartości $\eta=0,01$ wprowadza układ na orbitę $8T$, natomiast dla wartości $\eta=0,4$ – na orbitę $1T$, stabilizując pracę układu. Strzałki pod diagramem oznaczają obszar pracy chaotycznej bądź stabilnej o okresowości podpisanej pod strzałkami, gdzie T oznacza okres modulacji PWM. Nad diagramami pokazano przebiegi napięć wyjściowych przekształtnika dla dwóch wartości amplitud zaburzenia $\eta=0,2$ oraz $\eta=0,4$. Na wykresach zaznaczono wartość napięcia zadanego U_{ref} .

Na rysunku 4b pokazano analogiczny diagram otrzymany podczas badań układu fizycznego przekształtnika. Za pomocą diagramu można zaobserwować, jak zwiększając amplitudę oscylacji η można wyprowadzić układ z chaotycznego trybu pracy do pracy stabilnej. Diagram ten jest podobny do diagramu uzyskanego symulacyjnie (rysunek 4a), co świadczy o chaotycznym charakterze układu wynikającym nie tylko z przyjętego modelu symulacyjnego. Porównując diagramy można zauważyć różnice. Pierwsza różnica jest bardzo wyraźna i jest związana z pewnym rozrzutem punktów pomiarowych, co może wynikać z dokładności toru pomiarowego. Druga różnica polega na braku wyraźnych orbit $8T$, $4T$ – po wyjściu z obszaru niestabilnego jest widoczna tylko orbita $2T$. Najprawdopodobniej wynika to z parametrów tranzystora MOSFET użytego w badanym

układzie i procesów występujących podczas załączania i wyłączenia tranzystora. W symulacjach układu uwzględniono idealny model klucza i porównując wyniki uzyskane na ich podstawie z wynikami pomiarowymi można stwierdzić, że pomimo wykorzystania bardzo szybkiego tranzystora proces przełączania klucza ma wpływ na obszar pracy stabilnej przekształtnika.



Rys. 5 Symulacyjne diagramy bifurkacji napięcia dla badanego przekształtnika dla: a) $\eta=0,2$ i $\varphi=1,08$ rad ; b) $\eta=0,4$ i $\varphi=1,27$ rad

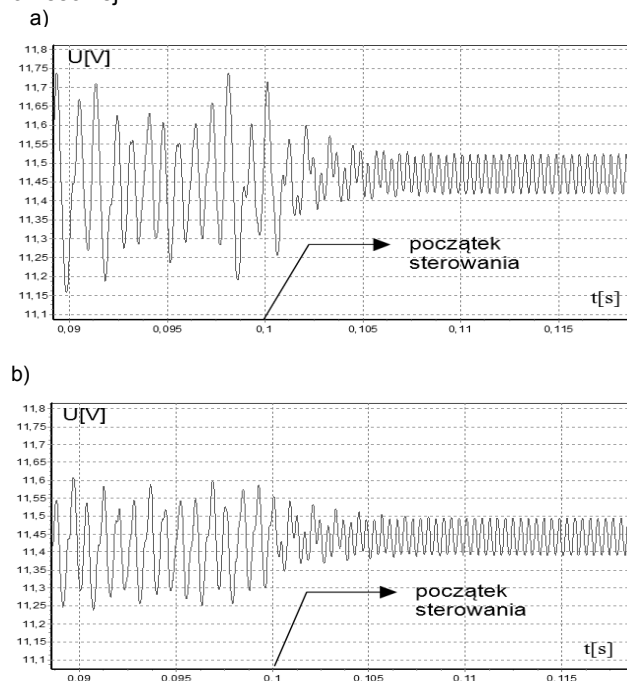


Rys. 6 Diagram bifurkacji napięcia dla układu fizycznego dla: a) $\eta=0,2$ i $\varphi=1,08$ rad ; b) $\eta=0,4$ i $\varphi=1,27$ rad

Rysunek 5 przedstawia zestawienie diagramów bifurkacji napięcia wyjściowego badanego przekształtnika, gdzie parametrem bifurkacji jest wzmacnienie K . Wykresy dotyczą przypadków, gdy wartość amplitudy zaburzenia wynosi $\eta=0,2$ i $\varphi=1,08$ rad (rysunek 5a) oraz $\eta=0,4$ i $\varphi=1,27$ rad (rysunek 5b). Wartości kąta przesunięcia fazowego φ

wynikają z wykresu 2 i oznaczają wartości, dla których przy zadanej amplitudzie perturbacji ($\eta=0,2$ i $\eta=0,4$) wzmacnienie K_{ITmax} osiąga swoje maksimum. Nad diagramami pokazano przebiegi napięć dla dwóch wartości wzmacnienia $K=15$ i $K=25$.

Porównując uzyskane diagramy prezentowane na rysunku 5 z przypadkiem bez zaburzenia (rysunek 4) można zaobserwować, że dla badanego przedziału $K \in <1,30>$ dla metody z zaburzeniem wzmacnienia K zjawisko nieregularnej pracy nie wystąpiło. Na diagramie tym można zauważyć, że trajektorie układu porusza się po orbitach o różnych okresach, lecz nie zaobserwowano przejścia do chaosu. Na pierwszym z nich pojawia się tylko orbita $1T$ -okresowa (rysunek 5a), natomiast na drugim oprócz tego między wartościami $K \in <8,10>$ występują orbity o większej okresowości. Na diagramach 5 można zaobserwować, że w przedziale parametru K , dla którego występuje chaos dla układu bez sterowania, układ z wprowadzonym zaburzeniem porusza się po orbicie $2T$ -okresowej.

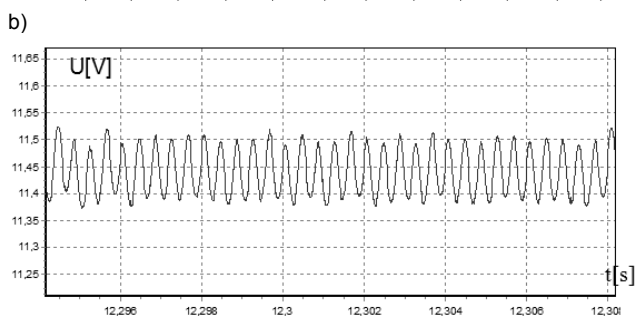
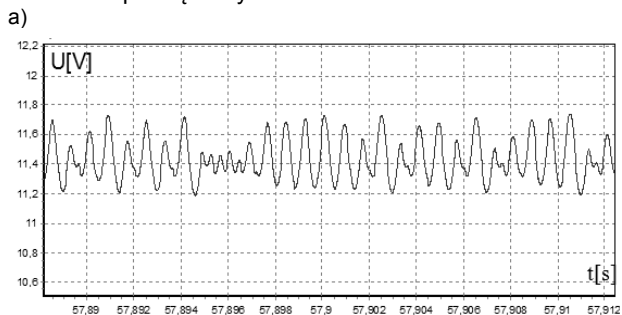


Rys. 7 Przebiegi symulacyjne napięcia na wyjściu układu przed i połączeniu sterowania dla $\eta=0,4$ i $\varphi=1,27$ rad a) $K=15$ b) $K=18$

Na kolejnym rysunku 6 zaprezentowano diagramy bifurkacji napięcia wyjściowego dla parametru kontrolnego K , dla różnych wartości amplitudy perturbacji η i kąta przesunięcia φ uzyskane w badaniach układu fizycznego przekształtnika buck. Diagramy uzyskano dla tych samych parametrów, dla których powstały diagramy symulacyjne widoczne na rysunku 5. Nad diagramami umieszczono przebiegi napięcia wyjściowego układu fizycznego dla zaznaczonych strzałkami wartościami wzmacnienia.

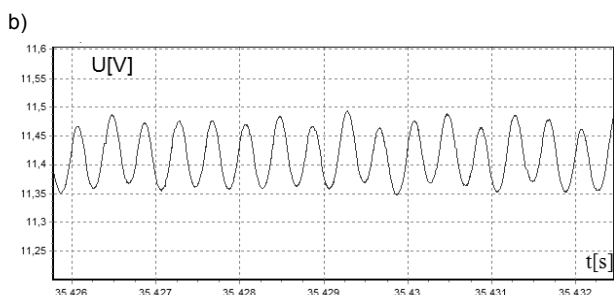
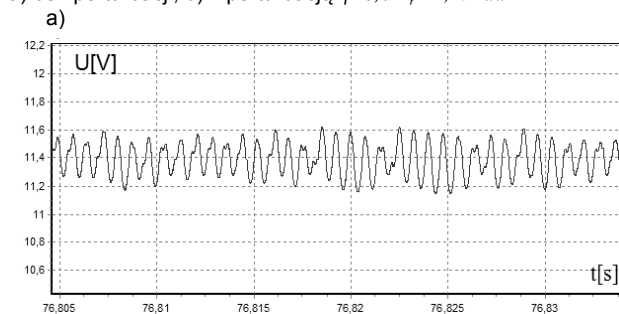
Pomiędzy diagramami, obrazującymi procesy zachodzące podczas zwiększania wzmacnienia K , uzyskanymi symulacyjnie i otrzymanymi z układu fizycznego widać duże podobieństwo jakościowe. Dla przypadków doboru amplitudy zaburzenia η i kąta φ , które przedstawiają diagramy 5 i 6 w badanym przedziale wzmacnienia K zachowania chaotyczne zostały wyeliminowane a uchyb regulacji zmniejszony. Dla układu fizycznego nie zaobserwowano w przedziale $K \in <8,10>$ ruchu po orbitach o większej okresowości niż $1T$, czego przyczyną mogą być parametry tranzystora rzeczywistego układu laboratoryjnego, dokładność toru pomiarowego,

niedokładne wartości elementów pasywnych układu oraz wpływ zjawisk pasożytniczych ale także wynika to z wpływu warunków początkowych.



Rys. 8 Przebiegi napięcia przekształtnika fizycznego dla $K=15$:

a) bez perturbacji; b) z perturbacją $\eta=0,4$ i $\varphi=1,27$ rad



Rys. 9 Przebiegi napięcia przekształtnika fizycznego dla $K=18$:

a) bez perturbacji; b) z perturbacją $\eta=0,4$ i $\varphi=1,27$ rad

Rysunek 7 przedstawia przebieg napięcia na wyjściu układu buck uzyskany z symulacji dla dwóch przypadków wzmocnienia $K=15$ i $K=18$, dla których jak wynika z diagramu 3 bez wprowadzonego zaburzenia, układ znajduje się w stanie chaotycznym. W chwili $t=0,1s$ wprowadzono sterowanie z zaburzeniem o amplitudzie $\eta=0,4$ i przesunięciu $\varphi=1,27$ rad stabilizując orbitę układu. Po zmianie amplitudy perturbacji wzmocnienia w chwili $t=0,1s$ zachowania chaotyczne zostały wyeliminowane a częstotliwość napięcia wyjściowego przyjęła wartość równą częstotliwości sygnału piłk kształtnego odpowiedzialnego za modulację PWM.

Następnie dla tych samych współczynników zaburzenia zastosowano metodę modyfikacji trajektorii w układzie fizycznym. Przebiegi napięcia wyjściowego układu buck (rysunek 8a) świadczą o chaotycznym trybie pracy.

Rysunek 8b przedstawia te same przebiegi po włączeniu metody z perturbacją parametru kontrolnego o amplitudzie $\eta=0,4$ i w fazie $\varphi=1,27$ rad. Po włączeniu sterowania układ zaczął działać w trybie stabilnym o okresie równym okresowi modulacji PWM.

Metodę perturbacji zastosowano w układzie fizycznym także dla wartości wzmocnienia $K=18$ oraz tych samych wartości amplitudy i fazy zaburzenia. Przebiegi napięć uzyskanych w regulatorze klasycznym oraz z załączonym zaburzeniem przedstawiono na rysunku 9. Można zauważyć stabilizację orbity $1T$ okresowej i zmniejszenie uchybu regulacji w stosunku do wartości wzmocnienia $K=15$, co potwierdza diagram 6b.

Wnioski

Przedstawiona metoda polega na synchronizacji trajektorii, po której porusza się układ do orbity stabilnej. Wybierając jedną z wielkości w układzie zostaje do niej dodawany sygnał zaburzający tą wartość. W ten sposób, jak pokazano dla badanego układu, w chaotycznym trybie pracy niestabilne do tej pory orbity okresowe wchodzące w skład atraktora, są stabilizowane za pomocą zaburzenia o niewielkiej amplitudzie. Dodatkowo metoda ta nie wnosi żadnych opóźnień w torze sterowania.

Jak pokazano na drodze obliczeń analitycznych i symulacyjnych dla badanego przekształtnika typu buck, czynnikiem mającym wpływ na stabilność układu jest wartość amplitudy i jego przesunięcie fazowe wprowadzonego zaburzenia. Można dobrać tak wartość przesunięcia fazowego zaburzenia, aby moc sygnału zaburzenia stabilizująca pracę układu była minimalna. Parametry te mają także wpływ na czas, po którym następuje wejście układu na orbitę okresową. Przeprowadzona analiza na podstawie odwzorowania Poincaré umożliwiła znalezienie współczynników zaburzenia, przy których układ działa stabilnie, co zostało wykorzystane w symulacjach, a następnie w realizacji w przekształtniku fizycznym.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają, że zastosowanie metody z perturbacją parametru kontrolnego może prowadzić do polepszenia jakościowych warunków pracy układów nieliniowych. Po zastosowaniu metody zjawiska chaotyczne zostały wyeliminowane z badanego zakresu wzmocnienia K , co przyczyniło się także do zmniejszenia uchybu regulacji.

LITERATURA

- [1] Hirsch M.W. Smale S.: Differential Equations, Dynamical Systems and Linear Algebra, Academic Press, New York 1974.
- [2] Porada R., Mielczarek N.: The General Characterization of Control Methods of Chaotic Systems. "Computer Applications in Electrical Engineering" part II, Poznań 2006.
- [3] Yufei Zhou, Chi K. Tse, Herbert H.C. lu, Jun-Ning Chen.: Control chaos DC/DC converter using optimal parametric perturbation. IEEE vol.05 2381–2383.
- [4] Yufei Zhou, Chi K. Tse, Shui-Sheng Qiu, Francis C.M. Lau.: Applying resonant parametric perturbation to control chaos in the buck DC/DC converter with phase shift and frequency mismatch consideration. International Journal of Bifurcation and Chaos. Vol. 13. No.11, 2003 3459–3471
- [5] Porada R., Mielczarek N.: Modeling of Chaotic Systems in Program ChaoPhS. CMS: Kraków 2005.
- [6] di Bernardo M, Bolivar G, Vasca F.: Routes to chaos in voltage-controlled buck converter without latch, Nonlinear Phenomena in Power Electronics, 2001, 208-228

Autor: dr inż. Norbert Mielczarek, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, e-mail: Norbert.Mielczarek@put.poznan.pl