

Norbert MIELCZAREK

BADANIE STABILNOŚCI PRZEKSZTAŁTNIKA OBNIŻAJĄCEGO NAPIĘCIE Z WYKORZYSTANIEM ARYTMETYKI PRZEDZIAŁOWEJ

STRESZCZENIE *W pracy przedstawiono badania przekształtnika typu buck przeprowadzone z zastosowaniem arytmetyki przedziałowej. Arytmetyka przedziałowa to dział matematyki zajmujący się analizą danych niepewnych. W pracy wykorzystano metody, których zadaniem jest ocena stabilności pod kątem zmienności parametrów w ustalonym zakresie. Kolejnym badanym aspektem jest zgodność obliczeń numerycznych z wynikami badań układu fizycznego. W sterowaniu układu zastosowano metodę perturbacji parametru kontrolnego, którym było wzmocnienie regulatora. 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. Wyniki obliczeń wskazują na duże możliwości arytmetyki przedziałowej w badaniach układów energoelektronicznych i analizie ich stanów pracy.*

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

1. WSTĘP

Badania zawarte w pracy dotyczą stosunkowo prostego przekształtnika – układu obniżający napięcie typu buck. Jedynym źródłem nieliniowości, jeśli tak ja w dalszych badaniach przyjęte zostaną elementy idealne, jest metoda sterowania. Mimo swej prostoty w układzie występuje szereg bardzo interesujących zjawisk, którymi zajmuje się teoria chaosu deterministycznego [1].

dr inż. Norbert MIELCZAREK
e-mail: Norbert.Mielczarek@put.poznan.pl

Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej,
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 272, 2016

Przekształtnik ten 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.

Poprzednie badania symulacyjne wskazały na duży wpływ błędów numerycznych i warunków początkowych, a w badaniach układu fizycznego parametry układu to dane niepewne. Źródłem niepewności może być zmiana wartości w czasie – starzenie elementów biernych czy margines tolerancji wartości podawany przez producenta. Motywacją do podjęcia tematyki stała się potrzeba znalezienia odpowiednich narzędzi, które biorą pod uwagę wymienione czynniki a jednocześnie zawierają sprawdzone metody numeryczne. Autor zdecydował o wyborze arytmetyki przedziałowej ze względu na to, że daje ona możliwości analizy błędów dyskretyzacji, błędów obcięcia, błędów zaokrąglania, wrażliwości na warunki początkowe, czy możliwość sprawdzania od razu przy jednej symulacji całych potoków fazowych. Arytmetyka ta używana jest do modelowania niepewnych danych oraz wyznaczania błędów zaokrągleń.

Dodatkowym celem pracy jest sprawdzenie działania metody perturbacji parametru kontrolnego stabilizującą działanie układu buck. 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.

2. ARYTMETYKA PRZEDZIAŁOWA

Arytmetyka przedziałowa to nowa nazwa starego problemu matematycznego, z którą mierzył się już Archimedes podając wartość liczba π , jako $223/71 < \pi < 22/7$. Ten dział matematyki intensywnie rozwinął się w połowie ubiegłego wieku, w skutek rozwoju komputerów i obliczeń numerycznych. Rozwiązania numeryczne są obarczone błędem wynikającym z reprezentacji liczb w notacji zmiennopozycyjnej. Nazwa arytmetyka przedziałowa i podstawowe prawa teoretyczne opisujące tą dziedzinę liczb zostały zaproponowane w roku 1966 przez Ramona E. Moore'a [2].

Przedziałem rzeczywistym nazywamy domknięty i ograniczony zbiór liczb rzeczywistych **R**:

$$[x] = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x \in \mathbf{R} : \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\} \quad (1)$$

Średnica (szerokość), promień i punkt środkowy przedziału $[x]$ są zdefiniowane następująco:

$$d([x]) = \bar{x} - \underline{x} \quad (2)$$

$$r([x]) = \frac{\bar{x} - \underline{x}}{2} \quad (3)$$

$$m([x]) = \frac{\bar{x} + \underline{x}}{2} \quad (4)$$

Elementarne operacje arytmetyczne na liczbach rzeczywistych rozszerza się na argumenty przedziałowe $[x]$ i $[y]$ przez zdefiniowanie wyniku takiej operacji, jako zbioru liczb rzeczywistych powstałego przez wykonanie operacji na dowolnych dwu liczbach zawartych w przedziałach $[x]$ i $[y]$, tj.

$$\begin{aligned} [x] + [y] &= [\underline{x} + \underline{y}, \bar{x} + \bar{y}], \\ [x] - [y] &= [\underline{x} - \bar{y}, \bar{x} - \underline{y}], \\ [x] \cdot [y] &= [\min\{\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}\}, \max\{\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}\}], \\ [x] / [y] &= [x] \cdot [1/\bar{y}, 1/\underline{y}], \quad 0 \notin [y] \end{aligned} \quad (5)$$

Przynależność liczby x do przedziału $[x]$, $x \in [x]$, można przedstawić zależnością:

$$|x - m([x])| \leq r([x]) \quad (6)$$

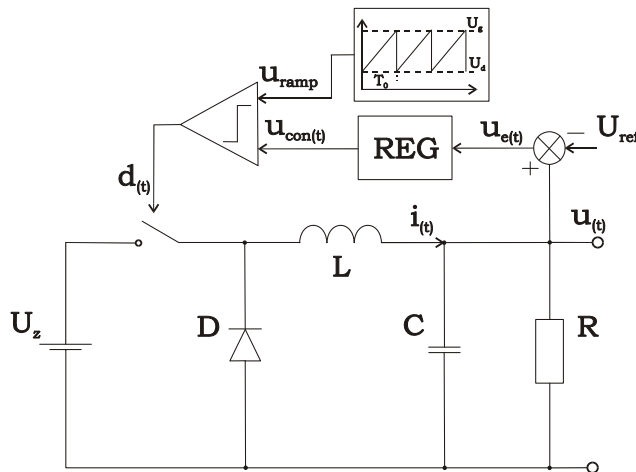
Promień przedziału $[x]$ jest zatem ograniczeniem górnym błędu bezwzględnego punktu środkowego $m([x])$ rozważanego jako przybliżenie nieznaney liczby $x \in [x]$. Należy zauważyć, że jeśli zdefiniujemy przedział $x = [1, 2]$ to operacja: $x - x \neq 0$, a wynosi $[-1, 1]$, zgodnie z wzorem (5).

Reprezentowanie wyników obliczeń, jako iloczynu kartezjańskiego przedziałów odpowiada w pewnym sensie „pakowaniu” przedmiotów do pudełka (ang. *wrapping effect*) [3]. Przy reprezentowaniu obiektów dowolnego kształtu za pomocą wektorów przedziałowych, czyli prostopadłościennych pudełek o krawędziach równoległych do osi układu współrzędnych dochodzi do przeszacowania wyniku. Przeszacowanie to propaguje się, gdy pośrednie wyniki są wykorzystywane w dalszych obliczeniach. Szczególnie wyraźnie widać to przy obliczeniach opartych na wzorach rekurencyjnych, do których należy wyznaczanie trajektorii układu dynamicznego. Występowanie efektu pakowania nie jest jednak ograniczone do wyznaczania trajektorii układów dynamicznych. Przy obliczeniach w arytmetyce przedziałowej wynik każdej pośredniej operacji jest przedziałem. Jeśli jakaś wielkość kilkakrotnie pojawia się w obliczeniach, to, ponieważ nie są pamiętane zależności między przedziałami, może się zdarzyć, że wynik obliczeń jest przeszacowany.

Obecnie arytmetyka przedziałowa ma wiele zastosowań, m.in. w chemii, geografii, fizyce, grafice komputerowej i CAD, elektrotechnice, dynamice systemów i teorii chaosu, teorii sterowania, systemach eksperckich, ekonomii, kontroli jakości, tablicach statystycznych oraz mechanice płynów.

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. 1. Schemat układu obniżającego napięcie z regulatorem typu P

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

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B d(t) \quad (7)$$

gdzie:

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

Sygnal $d(t)$ jest opisany zależnością:

$$d(t) = \begin{cases} 1 & \Rightarrow u_{ramp} > u_{con}(t) \\ 0 & \Rightarrow u_{ramp} \leq u_{con}(t) \end{cases} \quad (8)$$

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:

$$u_{ramp}(t) = U_d + (U_g - U_d) \text{mod}(t, T) / T \quad (9)$$

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 parametrów sterowania:

$U_z = 20 \text{ V}$, $U_{ref} = 11,3 \text{ V}$, $f_s = 2,5 \text{ kHz}$, $U_g = 4,4 \text{ V}$, $U_d = 0 \text{ V}$ oraz następujące przedziały zmienności $L = [19,9\text{e-}3, 20,1\text{e-}3] \text{ mH}$, $C = [19,9\text{e-}3, 20,1\text{e-}3] \mu\text{F}$, $R = [21,9, 22,1] \Omega$, $I_o = [0,1] \text{ A}$, $U_o = [0, 20] \text{ V}$.

Sterowanie z wykorzystaniem klasycznego regulatora typu P, PI czy PID nie eliminuje zachowań chaotycznych [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 wzmocnienia K [4, 5]:

$$K_p(t) = K(1 + \eta \sin(2\pi f_s \cdot t + \phi)) \quad (10)$$

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

W pracy [4], na podstawie odwzorowania Poincaré, czyli analitycznie, wyznaczono maksymalne wzmocnienie $K_{ITmax} = f(\eta, \phi)$, dla którego układ działa stabilnie i jego częstotliwość pracy jest taka sama jak częstotliwość modulacji PWM. Tymi wartościami są amplituda perturbacji $\eta = 0,4$ oraz kąt $\phi = 1,27 \text{ rad}$. W dalszej części badań zostaną pokazane wyniki obliczeń z wykorzystaniem arytmetyki przedziałowej na podstawie wzorów dokładnych wynikających z wyznaczenia rozwiązania równania różniczkowego (7).

4. WYNIKI BADAŃ

Ze względu na możliwość porównania z wcześniejszymi badaniami oraz zweryfikowane algorytmy obliczeniowe i łatwość w implementacji modeli, jako narzędzie umożliwiające obliczenia w arytmetyce przedziałowej wybrano pakiet MATLAB. Biblioteka INTLAB do matematyki przedziałowej została opracowana przez Siegfrieda Rumpa [6]. Na początku porównano dokładność obliczeń uzyskanych analitycznie w dziedzinie liczb rzeczywistych otrzymanych w MATLABIE oraz programie *ChaoPhS* [7] z wynikami obliczeń biblioteki INTLAB. Wyniki obrazuje tabela 1, w której wiersze 2, 4, 5, 6 dotyczą obliczeń w programie *ChaoPhS*, natomiast wiersz 3 to obliczenia w MATLABIE, z wykorzystaniem zmiennopozycyjnego sposobu zapisu liczb. Ostatnie wiersze dotyczą arytmetyki przedziałowej a zapis *inf* i *sup* to minimum i maksimum przedziału rozwiązania dla czasu końcowego. Przedział otrzymany dla obliczeń wykonanych dla arytmetyki przedziałowej $[U]$ różni się w stosunku do obliczeń analitycznych na 5-tym miejscu po przecinku, pomimo że krok uwzględniony dla obliczeń przedziałowych był 10 krotnie większy niż innych metod. W obliczeniach zaprezentowanych w tabeli 1 otrzymano dla arytmetyki przedziałowej wartość porównywaną z innymi metodami, łącznie z informacją o błędzie popełnianym przy tak skonfigurowanej symulacji $m([U]) \pm r([U]) = 11,53960 \pm 0,00002 \text{ [V]}$.

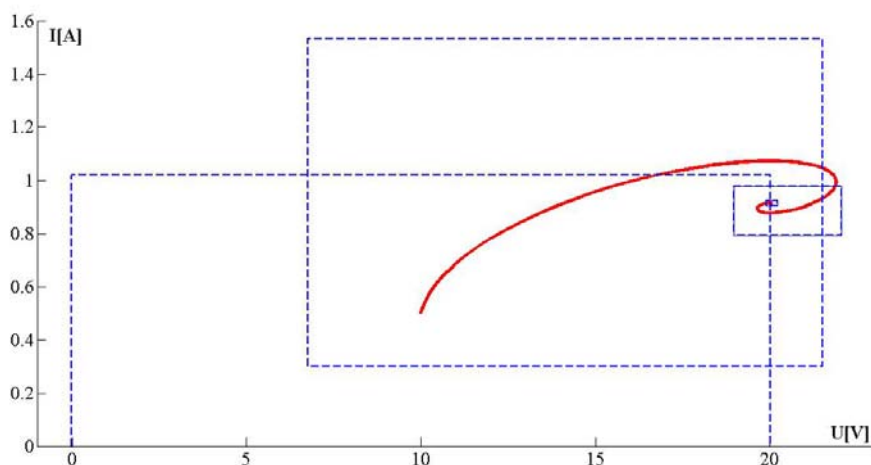
TABELA 1

Porównanie dokładności obliczeń programów MATLAB, INTLAB, *ChaoPhS*

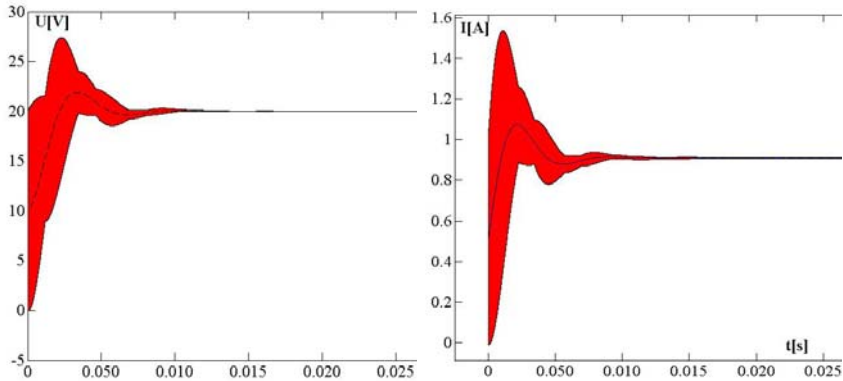
Metoda uzyskania rozwiązania	Wartość napięcia dla $t = 0,05$ s	Błąd w stosunku do rozwiązania analitycznego	
	[V]	względny [%]	bezwzględny [V]
Analityczna	11,5396113112745	0,00E+00	0,00E+00
Gragga-Bulirscha-Stoer'a	11,5396108160988	4,29E-06	4,95E-07
Matlab - ode15s	11,5396107782065	4,62E-06	5,33E-07
Runge-Kutty 4	11,5396195900874	7,17E-05	8,28E-06
Adamsa-Multona	11,5395530258280	5,05E-04	5,83E-05
Gear'a 4	11,5394952057034	1,01E-03	1,16E-04
Arytmetyka przedziałowa – inf	11,5395849017644	2,29E-04	2,64E-05
Arytmetyka przedziałowa – sup	11,5396215033509	8,83E-05	1,02E-05

Następnie sprawdzono wpływ warunków początkowych, którymi są prąd cewki I_o i napięcie kondensatora U_o oraz wpływ przedziałów niepewności wartości elementów RLC na trajektorie osiągnięcia punktu ustalonego, gdy klucz przekształtnika jest cały czas załączony. Ten przypadek zaprezentowany jest na rysunku 2. Przerywanymi prostokątami zaznaczono infimum i supremum każdego przedziału prądu i napięcia. Zgodnie z tym co pokazano na rysunku, przedziały zmniejszają się prowadząc do punktu ustalonego, który już nie zależy od warunków początkowych, a od wartości parametrów RLC obwodu. Ze względu na mały przedział zmian parametrów RLC prostokąt końcowy ma niewielkie wymiary. Linia ciągłą zaznaczono środki przedziału $m([x])$ rozwiązania analitycznego równania (7).

Na rysunku 3 przedstawiono przedziały wartości granicznych (infimum i supremum) dla przebiegu napięcia wyjściowego i prądu cewki. Wewnątrz zaznaczono wartość środkową z przedziału.

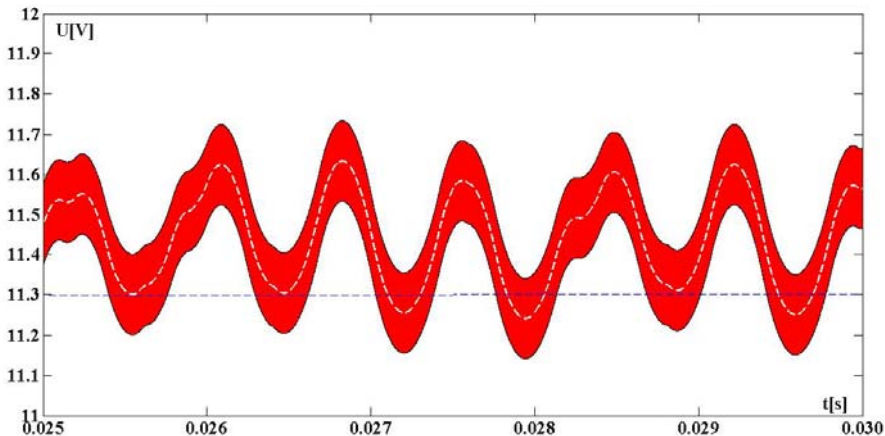


Rys. 2. Trajektorii układu buck podczas włączenia układu

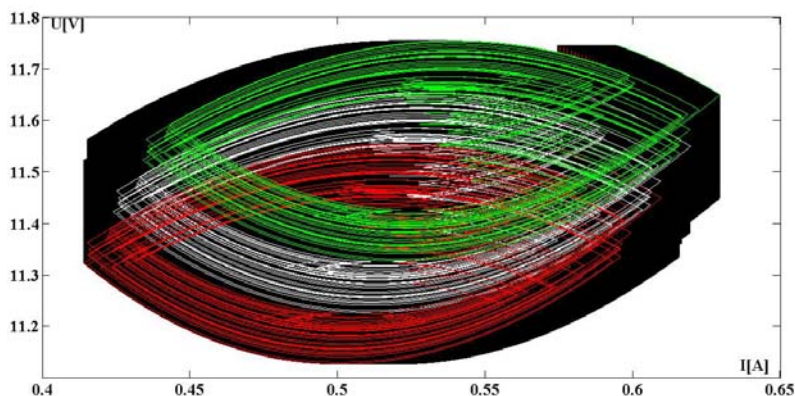


Rys. 3. Przebieg napięcia i prądu układu buck podczas włączenia układu

Kolejna faza badań to sprawdzenie jak przedziały niepewności, którymi opisane są parametry RLC układu oraz warunki początkowe, wpłyną na stabilność układu buck, gdy zastosowany będzie regulator typu P oraz metoda modulacji szerokości impulsów PWM. Jak pokazano w pracy [4], dla wzmocnienia regulatora $K = 15$ układ działa chaotycznie, co obrazuje przebieg przedziału napięcia na rysunku 4. Na przebiegu pokazano infimum, supremum oraz wartość środkową. Linia przerywana to wartość napięcia zadanego $U_{ref} = 11,3$ V. Portret fazowy układu buck, na którym znajduje się potok fazowy dla pracy niestabilnej, znajduje się na rysunku 5. Czarnym kolorem zaznaczono atraktor, otrzymany dla przedziału rozwiązań $[x]$ równania (7). Różnymi kolorami oznaczono odpowiednio trajektorie dla infimum, wartości środkowej oraz supremum macierzy $[x]$.

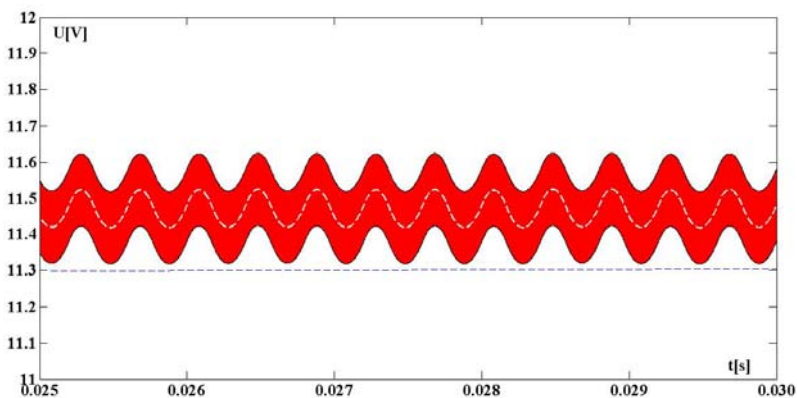


Rys. 4. Przebieg napięcia układu buck dla parametru kontrolnego dla $K = 15$ otrzymany w programie MATLAB – praca niestabilna

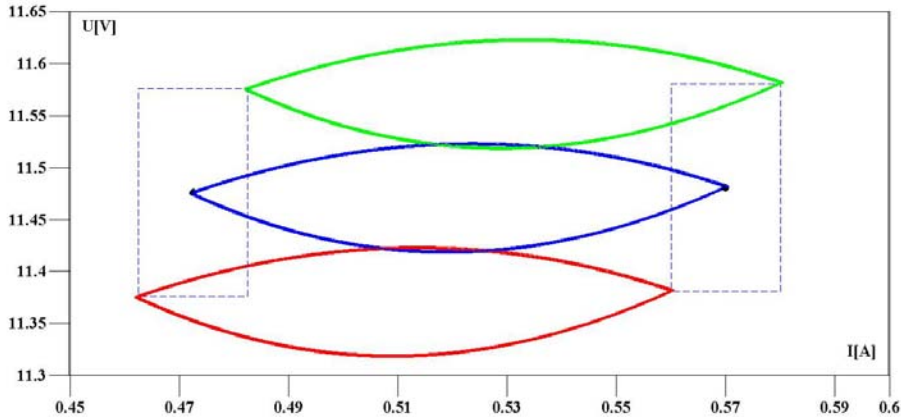


Rys. 5. Portret fazowy układu buck dla $K = 15$ otrzymany w programie MATLAB – praca niestabilna

Stan chaotyczny układu obniżającego napięcie można stabilizować wykorzystując metodę perturbacji parametru kontrolnego. Po zastosowaniu tej metody dla przypadku o wzmacnieniu $K = 15$ oraz parametrów z równania (10), amplitudy perturbacji $\eta = 0,4$ oraz kąta $\varphi = 1,27$ rad otrzymano przebieg napięcia pokazany na rysunku 6. Widać na nim poziom napięcia zadanego oraz przedział możliwych stanów dla wektora napięcia $[U]$. Układ jest w stanie pracy stabilnej a niepewność wartości wyznaczonych przez infimum i supremum wynika z niepewności podanych wartości parametrow RLC . Obrazuje to portret fazowy z rysunku 7. Oprócz trajektorii otrzymanych dla maksimum, wartości środkowej oraz minimum macierzy $[x]$ złożonej z wartości napięcia i prądu przekształtnika, zaznaczono dwa przykładowe punkty środkowe $m([x_{(t)}])$, które otoczono prostokątem wyznaczającym skrajne wartości prądów i napięć dla tej wyznaczanej chwili czasowej.



Rys. 6. Przebieg napięcia układu buck z metodą perturbacji parametru kontrolnego K dla $K = 15$ $\eta = 0,4$ i $\varphi = 1,27$ – praca stabilna (MATLAB)

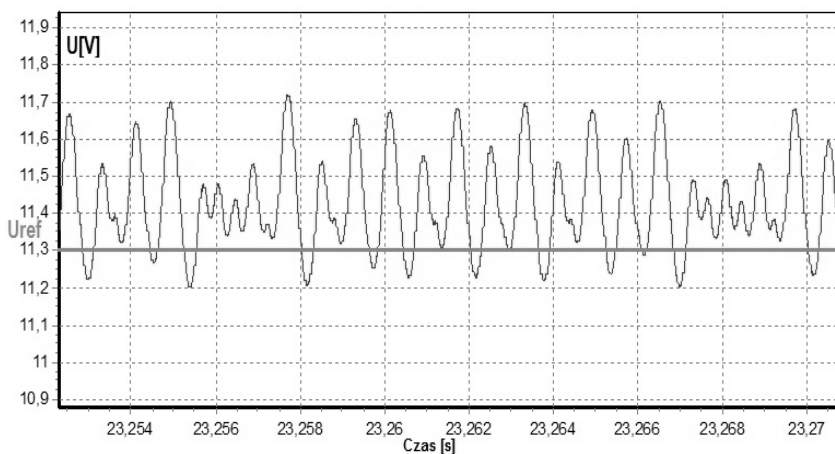


Rys. 7. Portret fazowy układu buck z metodą perturbacji parametru kontrolnego K dla $K = 15$, $\eta = 0,4$ i $\varphi = 1,27$ – praca stabilna (MATLAB)

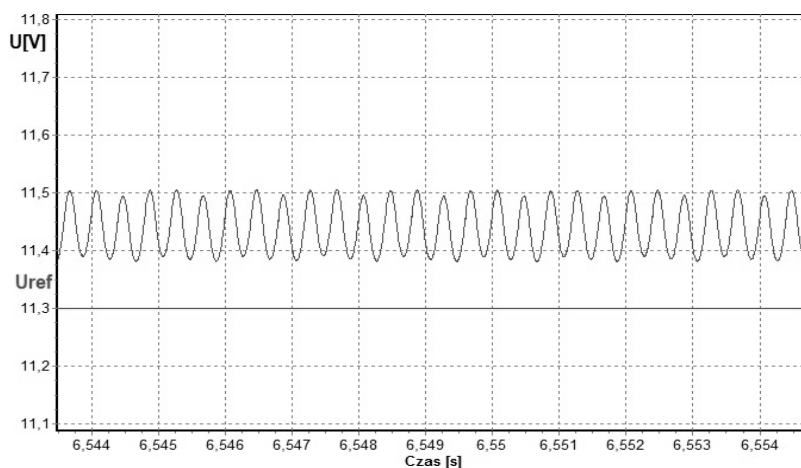
Dla potwierdzenia wniosków wynikających z modeli analitycznych i symulacyjnych porównano je z wynikami pomiarowymi uzyskanymi dla przekształtnika buck zbudowanego w oparciu o zestaw laboratoryjny C1-BCK LABINVERTER. Założenie przy wyborze tego systemu opierało się na tym, aby parametry przekształtnika były jak najbardziej zbliżone do układu idealnego – tranzystor i dioda były jak najszybsze, rezystory bezindukcyjne, natomiast cewka i kondensator o znikomym wpływie parametrów pasożytniczych. Ważnym kryterium podczas wyboru to także jak najlepsze parametry toru pomiarowego. Celem badań układu o tak dobranych parametrach było zbadanie zbieżności wyników obliczeń analitycznych i symulacyjnych do wyników otrzymanych w układzie fizycznym. Klucz jest sterowany za pomocą dwuprocesorowego systemu uruchomieniowego ALS-G3-2368PCI, w skład którego wchodzi karta rozszerzeń ALS-G3-ACA1812-1 z przetwornikami 18 bitowymi A/C, próbkującymi dla badanego układu z szybkością 250 kb/s.

Na rysunku 8 zaprezentowano przebiegi napięcia przekształtnika laboratoryjnego w trybie pracy chaotycznej, dla wzmocnienia regulatora $K = 15$. Zaznaczony jest tam także poziom napięcia zadanego $U_{ref} = 11,3$ V. Można zaobserwować duże podobieństwo do przebiegu z rysunku symulacyjnego 4, związane z poziomem zmienności a także z nieregularnym zachowaniem układu.

Przebieg widoczny na rysunku 9 dotyczy przypadku stabilnej pracy układu laboratoryjnego, gdy trajektoria jest stabilizowana za pomocą metody perturbacji parametru kontrolnego, która synchronizuje trajektorie do orbity okresowej. Zaburzenia wzmocnienia K na poziomie amplitudy $\eta = 0,4$ i sygnałem okresowym o częstotliwości tej samej co PWM, ale przesuniętym o $\varphi = 1,27$ rad, skutkują ustabilizowaniem pracy układu. Dzięki temu można zwiększać wzmocnienie K uzyskując mniejszy uchyb regulacji. Zmiana napięcia wyjściowego jest na poziomie wartości środkowych $m([U_{(t)}])$ przedziału obliczeń symulacyjnych. Dla pracy chaotycznej zmienność napięcia była na poziomie średnicy $m([U_{(t)}])$ przedziału otrzymanego w obliczeniach symulacyjnych z wykorzystaniem arytmetyki przedziałowej.



Rys. 8. Przebieg napięcia układu buck z metodą perturbacji parametru kontrolnego K dla $K = 15$ $\eta = 0,4$ i $\varphi = 1,27$ – praca niestabilna (układ fizyczny)



Rys. 9. Przebieg napięcia układu buck dla $K = 15$ otrzymany z układu fizycznego – praca stabilna

5. WNIOSKI

W pracy opisano badania stabilności przekształtnika obniżającego napięcie z wykorzystaniem arytmetyki przedziałowej. Dotychczasowe badania autora skupiały się na prostych układach nieliniowych, które mimo swojej prostoty wykazywały szereg złożonych zachowań. W układzie buck można zaobserwować wiele typowych zachowań dla układów chaotycznych, m.in. bifurkacja trajektorii układu pod wpływem zmian jednego z parametrów sterowania, wpływ warunków początkowych na stabilność

działania układu czy atraktor chaotyczny. Ze względu na trudności w uchwyceniu niektórych zachowań w układzie fizycznym i rozdzieleniu przyczyn ich pojawiania od błędów wynikających z toru pomiarowego czy błędów numerycznych, w bieżących rozważaniach wykorzystano do modelowania układu energoelektronicznego arytmetykę przedziałową.

Na początku dokonano sprawdzenia jednego z możliwych narzędzi modelowania za pomocą arytmetyki przedziałowej – bibliotekę INTLAB [6], doinstalowaną do pakietu MATLAB. Spośród dostępnych i zweryfikowanych narzędzi bądź bibliotek dołączanych do języków programowania (AWA, COSY, FADBAD/TADIFF, VNODE-LP, MAPLE, MATLAB) pomimo długich czasów obliczeniowych, wybrano pakiet MATLAB ze względu na interfejs ułatwiający szybkie budowanie modeli, z możliwościami szybkiej obróbki danych. Dodatkowo, dzięki wyborowi tego programu, wyniki obliczeń autor mógł porównać ze swoimi wcześniejszymi badaniami.

W kolejnym etapie sprawdzono wrażliwość układu na wpływ warunków początkowych. Arytmetyka przedziałowa daje możliwość sprawdzenia czasu, po którym w układzie gwarantowane jest osiągnięcie stanu stabilnego dla wszystkich przypadków warunków początkowych podanych w modelu jako $[X_0]$. W badanym układzie przy wyborze pracy w trybie stabilnym, promień przedziału wartości wyjściowych $[X_{(t)}]$ zmniejsza się, a same wartości dążą do punktu ustalonego na portrecie fazowym.

Przy zadanych wartościach niepewnych parametrów *RLC* obwodu i dla określonego przedziału warunków początkowych na portrecie fazowym można obserwować całe potoki fazowe rozwiązań. Daje to możliwości prawidłowego doboru odpowiednich parametrów sterowania układem tak, aby dla projektowanego układu fizycznego dla znanej tolerancji elementów składowych zachować stabilny tryb pracy.

W końcowej części porównano wyniki analizy z wykorzystaniem arytmetyki przedziałowej z wynikami pomiarowymi przekształtnika laboratoryjnego. We wcześniejszych badaniach, porównując wyniki laboratoryjne z symulacyjnymi, obserwowano dla wyników pomiarowych większy rozmiar atraktora, czyli większy rozrzut napięcia wyjściowego niż w symulacjach. Można to tłumaczyć większą ilością danych dla pomiarów w układzie fizycznym, dlatego że symulacje wykonywane były do czasu końcowego t_k mocno ograniczonego długością wykonywania obliczeń. Dla analizy za pomocą arytmetyki przedziałowej horyzont czasowy symulacji nie musi być taki długi, dlatego że na podstawie wariancji parametrów wejściowych otrzymuje się przedział zmienności wartości wyjściowych.

Bieżąca praca przedstawia wyniki wstępne sprawdzające możliwości wykorzystania arytmetyki przedziałowej w dalszych badaniach układów energoelektronicznych, polegających szczególnie na sprawdzeniu wpływu parametrów niepewnych na stabilność pracy układu. Wyniki uzyskane w badaniach świadczą o dużym potencjale matematyki przedziałowej w badaniach przekształtników i będą kontynuowane.

LITERATURA

1. Hirsch M.W. Smale S.: Differential Equations, Dynamical Systems and Linear Algebra, Academic Press, New York, 1974.
2. Moore R.: Methods and Applications of Interval Analysis, SIAM Studies in Applied Mathematics, Philadelphia, 1979.

3. Galias Z.: Comparison of interval methods for finding periodic orbits. In: Proc. Int. Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA'99, tom 2, s. 439–442, Hawaii, 1999.
4. Porada R., Mielczarek N.: The General Characterization of Control Methods of Chaotic Systems. Computer Applications in Electrical Engineering, Part II, Poznań, 2006.
5. Zhou Yufei, Iu HH-C, Tse CK, Chen Junning.: Controlling chaos in DC/DC converters using optimal resonant parametric perturbation. IS-CAS 2005. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, s. 2481–2484, 2005.
6. Rump S.M.: INTLAB – Interval Laboratory, the Matlab toolbox for verified computations, Version 5.3, <http://www.ti3.tu-harburg.de/publications/rump>, 2006.
7. Porada R, Mielczarek N.: Modeling of Chaotic Systems in Program ChaoPhS. CMS, Kraków, 2005.
8. Johnson, T.T., Zhihao Hong, Kapoor, A.: Design verification methods for switching power converters. Power and Energy Conference at Illinois (PECI), s. 1–6, 2012.

Przyjęto do druku dnia 23.02.2016 r.

STUDY OF STABILITY OF BUCK CONVERTER WITH USAGE OF INTERVAL ARITHMETIC

Norbert MIELCZAREK

ABSTRACT *In the paper, the research of a buck step down converter with the usage of an interval arithmetic was presented. The interval arithmetic is the part of mathematics that is concerned with an uncertain data analysis. In this paper, the methods that aim to evaluate the stability of a system on the ground of the interval change of a parameter value were applied. The next studied aspect was the accordance of numerical calculations with results of measurements taken from the laboratory set. In the control process of the buck converter, the method of the perturbation of a control parameter was used. This method consists in the synchronization of the trajectory on which the system moves to the stable orbit. Choosing one of the system parameters the perturbed signal is added. In this way, the unstable periodic orbits inside of an attractor are stabilized by the low amplitude perturbation. The obtained results depicted on the high possibilities of the interval arithmetic in the researches of power electronic systems and analysis of their operation modes.*

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



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