

Porównanie wybranych narzędzi do symulacji przetwornic dc-dc

Streszczenie: W pracy przeanalizowano przydatność programów SPICE, Ansys Simplorer oraz PLECS przeznaczonych do analizy układów przekształcania energii elektrycznej. Wykorzystując wspomniane programy zbadano wpływ rezystancji obciążenia i współczynnika wypełnienia sygnału sterującego na charakterystyki przetwornicy SEPIC, a uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów. Porównano też czasy trwania obliczeń wykonanych przy zastosowaniu wspomnianych programów. Z przeprowadzonych badań wynika, że przy pracy przetwornicy w trybie CCM każdy z rozważanych programów zapewnia uzyskanie wyników obliczeń zgodnych z wynikami pomiarów. Istotne rozbieżności pomiędzy tymi wynikami obserwuje się w trybie DCM. Jest to spowodowane różnym sposobem modelowania właściwości elementów magnetycznych. Najkrótszy czas trwania obliczeń uzyskano przy zastosowaniu programu PLECS i nie zależy on od parametrów badanej przetwornicy, natomiast czas trwania obliczeń przy zastosowaniu programu Ansys Simplorer istotnie zależy od rezystancji obciążenia przetwornicy i współczynnika wypełnienia sygnału sterującego.

Abstract: This paper analyzes the usefulness of the SPICE, Ansys Simplorer and PLECS programs dedicated for the analysis of power conversion systems. Using the mentioned programs, the influence of the load resistance and the duty cycle of the control signal on the characteristics of the SEPIC converter was examined, and the obtained calculation results were compared with the measurement results. The duration time of calculations performed using these programs was also compared. The research shows that when the converter operates in the CCM mode, each of the considered programs ensures that calculation results are consistent with the measurement results. Significant discrepancies between these results are observed in the DCM mode. This is caused by different ways of modeling the properties of magnetic elements. The shortest calculation time was obtained using the PLECS program and does not depend on the parameters of the tested converter, while the calculation time using the Ansys Simplorer program significantly depends on the load resistance of the converter and the duty cycle of the control signal. **(Comparison of selected tools for simulating dc-dc converters)**

Słowa kluczowe: Ansys Simplorer, PLECS, przetwornica dc-dc, SEPIC, SPICE

Keywords: Ansys Simplorer, PLECS, dc-dc converters, SEPIC, SPICE

Wstęp

Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się gwałtowny rozwój narzędzi do wspomagania procesów projektowania i analizy właściwości układów elektronicznych i energoelektronicznych. Narzędzia te można podzielić na złożone programy do analizy obwodów elektronicznych, które typowo wymagają instalacji na komputerze oraz proste symulatory dostępne online [1, 2].

Do najczęściej stosowanych programów symulacyjnych należących do pierwszej wspomnianej grupy należą takie programy jak PSPICE, Multisim, LTSpice, OrCad, Electronic WorkBench, PLECS czy Simplorer należący do rodziny Ansys [1, 2, 3, 4]. Większość wymienionych programów powstała na bazie programu SPICE, który został opracowany w latach 70-tych XX wieku na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley [2].

Z kolei, do drugiej grupy programów z dostępem z poziomu strony internetowej należą takie programy jak PartSim, Circuit Simulator Applet, DoCircuits [2]. Jednak, jak wynika m.in. z pracy [2] programy te charakteryzują się ograniczoną dokładnością związaną z pominięciem wielu zjawisk zachodzących w elementach elektronicznych. Mogą być one wykorzystywane w procesie dydaktycznym w celu jakościowego zobrazowania działania wybranego układu, jednak nie stanowią dobrego narzędzia do rozważań naukowych ani zastosowań przemysłowych [2].

Celem niniejszej pracy jest analiza przydatności 3 wybranych programów do symulacji właściwości układów elektronicznych: SPICE, PLECS oraz Ansys Simplorer do wyznaczania charakterystyk przetwornicy SEPIC. Rozważana jest zarówno dokładność obliczeń, jak i czas ich trwania.

W rozdziale 2 zawarto krótką charakterystykę rozważanych programów. W rozdziale 3 opisano badany układ przetwornicy SEPIC. W rozdziale 4 zaprezentowano uzyskane wyniki analiz.

Programy do analizy układów elektronicznych

W literaturze opisano wiele programów do analizy układów elektronicznych. W tej pracy przeprowadzono

rozważania dla 3 programów scharakteryzowanych w kolejnych podrozdziałach, tj. SPICE, Ansys Simplorer oraz PLECS.

A. SPICE

Jednym z pierwszych programów stosowanych do analizy właściwości układów elektronicznych był SPICE. Powstał on na bazie programu CANCER napisanego przez profesora Ronalda Rohra z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley pod koniec lat 60 XX wieku [5]. Od 1970 roku rozwijano ten program wprowadzając jego kolejne wersje, które stosowane są do dziś w postaci pakietów takich jak: Intusoft ICAP/4 Professional, Orcad/Unison Engineer (PSPICE), Electronic Wkbch Multisim 7 Power Pro, Protel nVisage Spectrum, MicroCap [6]. Spośród wielu wspomnianych odmian SPICE dostępnych na rynku, w pracy będzie rozważany program PSPICE.

Program PSPICE służy do symulacji układów elektronicznych, a przede wszystkim układów scalonych [5]. Zawiera on wbudowane modele skupione elementów półprzewodnikowych i biernych. Modele te uwzględniają zarówno podstawowe zjawiska fizyczne zachodzące w wymienionych elementach, jak i zjawiska drugorzędne i komponenty pasożytnicze. Do tego programu dołączone są biblioteki zawierające wartości parametrów tych modeli dla wybranych typów elementów należących do poszczególnych rodzajów.

Biblioteki programu PSPICE można poszerzać o udostępniane przez producentów modele elementów znajdujących się w ich ofercie handlowej, np. dyskretnych elementów półprzewodnikowych [7, 8, 9] i układów scalonych oraz o literaturowe modele np. elementów magnetycznych, które nie są dostępne w ofercie producentów tych elementów [10, 11, 12].

W programie SPICE można wprowadzać opis analizowanego układu oraz parametry planowanych do wykonania analiz przy zastosowaniu wejściowego pliku tekstowego lub interfejsu graficznego. W zależności od potrzeby, w programie PSPICE istnieje możliwość przeprowadzenia różnego typu analiz, do których należą

m.in. analiza stałoprądowa, analiza stanów przejściowych, analiza częstotliwościowa lub analiz parametryczna [5, 6].

B. Ansys Simplorer

Z kolei program Ansys Simplorer jest przeznaczony do wykonywania wielodomenowych symulacji systemów elektrycznych [13, 14, 15, 16]. Oznacza to, że w rozważanym programie można przeprowadzić analizy układów zawierających różne elementy elektroniczne, optyczne, mechaniczne lub hydrauliczne. Elementy te mogą być opisane zarówno przy wykorzystaniu modeli skupionych, jak i modeli o stałych rozłożonych dedykowanych do obliczeń metodą elementu skończonego (FEM). Unikatową cechą tego programu jest możliwość przeprowadzenia analiz dla przypadku, gdy część elementów opisana jest za pomocą modeli skupionych, a część za pomocą modeli o stałych rozłożonych. Cechy tej nie posiadają dwa pozostałe z analizowanych programów, tj. PLECS i SPICE.

Rozważany program współpracuje z innymi produktami z rodziny Ansys umożliwiając wykonywanie analiz sprzężonych, pozwalających na uwzględnienie różnych zjawisk modelowanych w takich symulatorach jak Maxwell, Q3D, Mechanical, Fluent, RMXprt, PEXprt. Program ten współpracuje także z innymi programami zewnętrznymi, np. Matlab Simulink oraz MathCad [14].

W programie Ansys Simplorer reprezentację obwodową analizowanego układu przedstawia się wykorzystując interfejs graficzny oraz bibliotekę symboli elementów elektronicznych. Niestety, biblioteka ta nie jest tak obszerna jak dla programu SPICE. Jednak program ten pozwala również na tworzenie własnych modeli napisanych w języku SML lub VHDL-AMS oraz import modeli zewnętrznych w formacie VHDL, SPICE lub C-model oraz współpracę ze środowiskiem Modelica [14].

W programie Ansys Simplorer istnieje możliwość przeprowadzenia analizy stanów przejściowych, analizy częstotliwościowej, analizy stałoprądowej oraz analizy parametrycznej [14]. Wyniki analizy przy wykorzystaniu modeli skupionych mają postać charakterystyk statycznych, częstotliwościowych lub przebiegów czasowych napięć i prądów. W przypadku zastosowania modeli do analizy FEM można wyznaczyć też czasowo-przestrzenne rozkłady wybranych wielkości. Odróżnia to rozważany program od programów PLECS czy SPICE.

C. PLECS

Program PLECS (Piecwise Linear Electrical Circuit Simulation) dedykowany jest do analizy układów impulsowych przy wykorzystaniu odcinkami liniowych modeli elementów półprzewodnikowych. Zawiera on bibliotekę modeli elementów elektronicznych [17], jednak w porównaniu do programu SPICE, modele statyczne w programie PLECS charakteryzują przełączniki elektroniczne i zawierają uproszczony opis procesu przełączania.

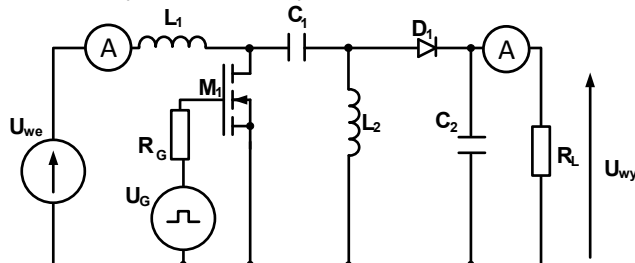
Dodatkowo liczba parametrów charakteryzujących właściwości tych elementów jest ograniczona. Przykładowo, dla elementów półprzewodnikowych wykorzystuje się odcinkami liniową charakterystykę opisaną jedynie przez dwa parametry: napięcie przewodzenia U_{on} oraz rezystancję przewodzenia R_{on} .

Przełączanie elementów półprzewodnikowych modeluje się za pomocą modeli skupionych bez uwzględnienia ich inercji, przy założeniu zerowego czasu przełączania i pominięciu ich pasożytniczych pojemności i indukcyjności. W rezultacie, w obliczeniach nie występują przepięcia i przetężenia [18]. W programie tym wykorzystuje się interfejs graficzny do opisu wybranego układu. Podobnie jak SPICE, PLECS nie współpracuje z innymi programami przy

realizacji obliczeń. Jednak podobnie jak w przypadku programu SPICE, producenci elementów półprzewodnikowych podają coraz częściej na swoich stronach wartości parametrów tych elementów dla programu PLECS [9].

Badany układ

Przedmiotem badań jest przetwornica SEPIC. Jest to przetwornica dwudławikowa, która umożliwia zarówno podwyższanie, jak i obniżanie napięcia [19]. Schemat tej przetwornicy pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat badanego układu przetwornicy SEPIC

W przetwornicy SEPIC źródło tranzystora MOSFET jest uziemione, co upraszcza konstrukcję układu sterującego bramkę tranzystora. Koncepcję działania rozważanej przetwornicy opisano w pracy [19, 20, 21].

W układzie zaprezentowanym na rysunku 1 zastosowano

tranzystor M_1 typu MOSFET IRF540, diodę Shottky'ego D_1 typu S6D02065A dławiki L_1 i L_2 , zawierające rdzenie ze sproszkowanego żelaza (-26) o indukcyjności $40 \mu\text{H}$ każdy oraz kondensatory elektrolityczne bipolarnie C_1 i C_2 o pojemności $2,2 \mu\text{F}$. Źródłem sygnału sterującego bramkę tranzystora jest generator funkcyjny, wytwarzający sygnał prostokątny o poziomach równych zero oraz $8,5 \text{ V}$. W celu ograniczenia prądu bramki tranzystora zastosowano rezystor R_G o rezystancji 47Ω . Amperomierze cechują się rezystancją wewnętrzną równą $0,3 \Omega$.

Wyniki badań

Wykorzystując omówione wcześniej programy komputerowe przeprowadzono badania symulacyjne ilustrujące wpływ rezystancji obciążenia i współczynnika wypełnienia sygnału sterującego na charakterystyki przetwornicy SEPIC. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów.

W przypadku programu SPICE zastosowano liniowe modele induktorów i kondensatorów oraz modele elementów półprzewodnikowych wbudowane w tym programie. Parametry modeli elementów półprzewodnikowych można wyznaczyć stosując różne metody estymacji parametrów opisane między innymi w [22] jednak w rozważanym przypadku wartości parametrów modelu diody wyznaczono wykorzystując program PARTS [23], a wartości parametrów modelu tranzystora zaczerpnięto z biblioteki PWRMOS.lib [24].

Badania przeprowadzono dla napięcia wejściowego U_{we} równego 6 V , w szerokim zakresie zmian rezystancji obciążenia R_L przy częstotliwości sygnału sterującego f wynoszącej 50 kHz i przy 2 wartościach współczynnika wypełnienia d tego sygnału wynoszących odpowiednio $0,3$ oraz $0,7$.

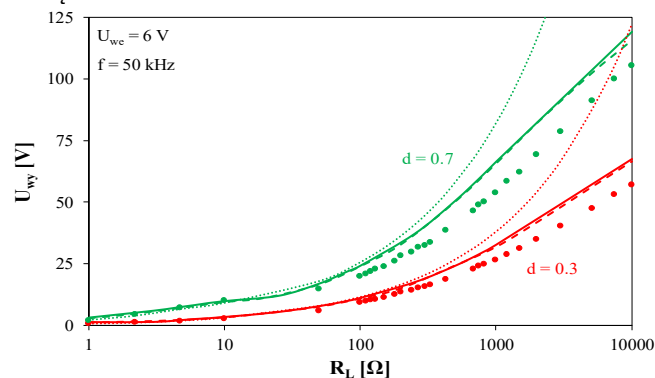
W przypadku programu Ansys Simplorer również zastosowano liniowe modele elementów biernych natomiast modele elementów półprzewodnikowych zostały zaimportowane z programu SPICE. Wartości parametrów tych modeli są takie same jak dla programu SPICE.

Dla programu PLECS nie ma możliwości importowania modeli i bibliotek elementów elektronicznych z innych programów. Do analizy przetwornicy SEPIC w tym programie zastosowano elementy półprzewodnikowe, które zawarte były w bibliotece tego programu, dla których istniała możliwość zdefiniowania tylko rezystancji przewodzenia. Dla tranzystora i diody wynosi ona odpowiednio: $R_T = 50 \text{ m}\Omega$, $R_D = 15 \text{ m}\Omega$. W programie tym zastosowano liniowe modele elementów biernych.

Z kolei, wartości parametrów modelu tranzystora zastosowanego w programie SPICE i Ansys Simplorer wynoszą odpowiednio: Level = 3, Tox = 100 nm, Phi = 0,6 V, $R_s = 21,34 \text{ m}\Omega$, KP = 20,71 $\mu\text{A}/\text{V}^2$, W = 0,94 m, L = 2 μm , VTO = 3,136 V, RD=32,52 $\text{m}\Omega$, RDS = 444,4 k Ω , CBD = 2,408 nF, PB = 0,8 V, Mj = 0,5, FC = 0,5, Cgso = 1,153 nF/m, Cgdo = 445,7 pF/m, Rg = 5,557 Ω , Is = 2,859 pA, N = 1, TT = 142 ns, Uo = 600 $\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$, natomiast wartości parametrów modelu diody dla programu SPICE i Ansys wynoszą: Is = 20,425 μA , Rs = 22 $\text{m}\Omega$, N = 2, Eg = 3,2 V, Cjo = 1,45 nF, M = 0,5, Vj = 1 V, NR = 2, BV = 650 V, Ibv = 1 mA, Nbv = 1. Z kolei, wartości indukcyjności L_1 i L_2 oraz pojemności C_1 oraz C_2 odpowiadają wspomnianym wcześniej wartościom, dla których realizowano pomiar.

Na wszystkich zaprezentowanych w niniejszym rozdziale rysunkach wyniki pomiarów oznaczono punktami, wyniki obliczeń przy zastosowaniu programu SPICE - linią kreskową, wyniki obliczeń przy zastosowaniu programu Ansys Simplorer - linią ciągłą, a wyniki obliczeń uzyskane za pomocą programu PLECS - linią kropkowaną.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono odpowiednio zależność napięcia wyjściowego (rys.2) i sprawności energetycznej (rys.3) przetwornicy SEPIC od rezystancji obciążenia.



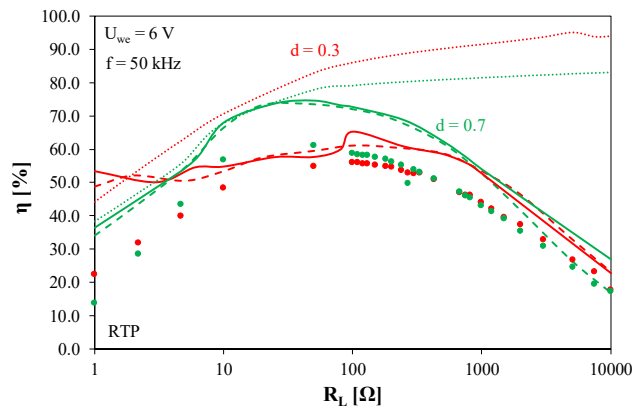
Rys.2. Zależność napięcia wyjściowego przetwornicy SEPIC od rezystancji obciążenia

Z zależności $U_{wy}(R_L)$ można zauważyć, że dla rezystancji obciążenia R_L powyżej 50 Ω przetwornica przechodzi w tryb pracy DCM. Wyniki obliczeń uzyskane przy zastosowaniu programu PLECS i SPICE uwzględniają ten fakt oraz pozostają w dobrej zgodności z wynikami pomiarów w trybie pracy CCM.

Istotne rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń przy użyciu każdego z rozważanych programów i pomiarów obserwuje się dla rezystancji obciążenia powyżej 300 Ω przy współczynniku wypełnienia $d = 0,3$ i dla $R_L > 100 \Omega$ (dla $d = 0,7$). Wynika to z faktu, że w zakresie kiedy przetwornica pracuje w trybie DCM na wartość napięcia wyjściowego wpływają przede wszystkim właściwości elementów magnetycznych. Można zauważyć, że w trybie DCM, dla $d = 0,3$ wyniki obliczeń otrzymane przy zastosowaniu programu SPICE i Ansys Simplorer są zawyżone o 38% w stosunku do wyników pomiarów. Natomiast wyniki obliczeń napięcia wyjściowego uzyskane

przy zastosowaniu programu PLECS są dwukrotnie wyższe od wyników pomiarów.

Z kolei, dla współczynnika wypełnienia sygnału sterującego $d = 0,7$ (przy $R_L = 1 \text{ k}\Omega$) wyniki obliczeń otrzymane przy zastosowaniu programu SPICE i Ansys Simplorer są zawyżone w stosunku do wyników pomiarów o ok. 40%, a przy wykorzystaniu programu PLECS wyniki obliczeń są zawyżone w stosunku do wyników pomiaru o ok. 60%. Warto także zwrócić uwagę, że w przypadku współczynnika wypełnienia $d = 0,7$ rozbieżności pomiędzy otrzymanymi wynikami obliczeń i pomiarów przy zastosowaniu rozważanych programów pojawiają się dla $R_L > 800 \Omega$.



Rys.3. Zależność sprawności energetycznej przetwornicy SEPIC od rezystancji obciążenia

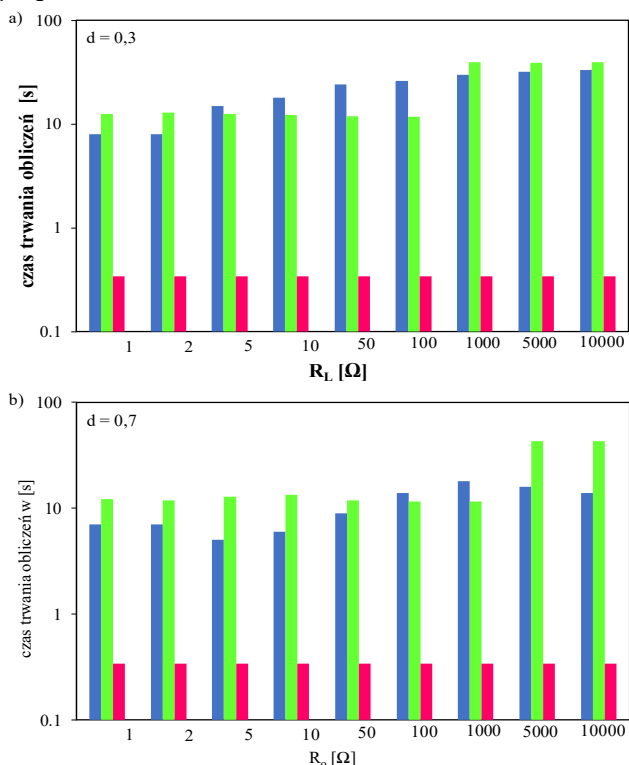
Z wyników pomiarów ilustrujących zależność $\eta(R_L)$ przedstawionych na rysunku 3 widać, że dla rozważanych wartości współczynnika wypełnienia sygnału sterującego występuje maksimum lokalne przy $R_L = 50 \Omega$ ($d=0,7$) i $R_L = 500 \Omega$ ($d=0,3$), co potwierdzają wyniki obliczeń uzyskane przy zastosowaniu programu SPICE i Ansys Simplorer. Niestety rozbieżność pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń otrzymanych przy zastosowaniu programów dla $d=0,7$ jest duża i może dochodzić do 50% ($R_L = 5 \Omega$). Tak duża różnica pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń wynika przede wszystkim z zastosowania modeli, które nie uwzględniają wpływu wielu czynników na występujące w nich straty. Na uwagę zasługuje jednak fakt, że w przypadku współczynnika wypełnienia $d = 0,3$ uzyskano podobne wartości sprawności energetycznej rozważanej przetwornicy przy zastosowaniu programu Ansys i SPICE.

Na rysunku 4 porównano czasy trwania obliczeń analizowanego układu wykonanych dla rozpatrywanych programów. Kolorem niebieskim oznaczono czas trwania obliczeń za pomocą programu Ansys Simplorer, kolorem zielonym – programu SPICE, zaś kolorem czerwonym – programu PLECS. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że zakres analizy stanów przejściowych wynosi 15 ms. Podczas wykonywania obliczeń zaobserwowano wpływ rezystancji obciążenia na czas trwania obliczeń przetwornicy SEPIC tylko przy zastosowaniu programu Ansys, dlatego porównanie wspomnianych czasów trwania obliczeń zilustrowano w postaci zależności $t(R_L)$. Stąd na rysunku 4a zaprezentowano zależność $t(R_L)$ przy współczynniku wypełnienia sygnału sterującego $d = 0,3$, a na rysunku 4b - tę samą zależność dla $d = 0,7$.

Jak można zauważyć w zakresie rezystancji obciążenia do 100 Ω czas trwania obliczeń przy wykorzystaniu programu SPICE jest podobny i nie zależy od rezystancji obciążenia oraz od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego. Z kolei, w przypadku zastosowania programu Ansys Simplorer obserwuje się, że zarówno wartość

współczynnika wypełnienia i rezystancji obciążenia wpływa na czas trwania obliczeń.

Przykładowo wzrost rezystancji obciążenia z 5Ω do $10 \text{ k}\Omega$ powoduje prawie czterokrotne wydłużenie czasu trwania analizy ($d = 0,3$). Z kolei, w przypadku programu PLECS nie obserwuje się wpływu współczynnika wypełnienia sygnału sterującego ani rezystancji obciążenia na czas trwania analizy. Warto także zwrócić uwagę na gwałtowny wzrost czasu trwania obliczeń dla $R_L > 100 \Omega$ przy zastosowaniu programu SPICE. Wynika to z konieczności wydłużenia czasu trwania analizy z 15 ms do 70 ms , ze względu na nieuzyskanie we wskazanym czasie trwania analizy stanu ustalonego. W przypadku zwiększenia zakresu analizy do 70 ms w programie Ansys Simplorer (co nie było konieczne, ponieważ 15 ms wystarczyło do uzyskania stanu ustalonego) zaobserwowano, że czas wykonywanych obliczeń podwoił się dla rozważanego zakresu rezystancji obciążenia. Warto także zwrócić uwagę, że najkrótszy czas wykonywania obliczeń uzyskano dla programu PLECS. Jest on ponad dwudziestokrotnie krótszy niż dla pozostałych programów.



Rys.4. Czasy trwania obliczeń przy zastosowaniu programu SPICE, Ansys Simplorer oraz PLECS

Podsumowanie

W pracy przeanalizowano użyteczność najpopularniejszych programów wykorzystywanych do analizy układów elektronicznych SPICE, Ansys Simplorer oraz PLECS. Wykorzystując wspomniane programy przeprowadzono analizę właściwości przetwornicy SEPIC, a uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów.

Z przeprowadzonych badań wynika, że przy pracy w trybie CCM każdy z rozważanych programów pozwolił na uzyskanie wyników obliczeń pozostających w dobrej zgodności z wynikami pomiarów. Istotne rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń obserwuje się w trybie DCM, gdzie o właściwościach przetwornicy decydują przede wszystkim właściwości elementów magnetycznych.

Zwrócono także uwagę, że najmniejsze, choć równie istotne różnice pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń we

wspominanym trybie pracy przetwornicy uzyskano przy zastosowaniu programu SPICE, natomiast największe przy zastosowaniu programu PLECS. Zwrócono także uwagę, że w przypadku współczynnika wypełnienia sygnału sterującego $d = 0,7$ rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów przy zastosowaniu rozważanych programów pojawiają się dla $R_L > 800 \Omega$.

Porównano także czasy trwania obliczeń. Najkrótszy czas uzyskano przy zastosowaniu programu PLECS, natomiast czas trwania obliczeń przy zastosowaniu programu Ansys Simplorer istotnie zależy od rezystancji obciążenia przetwornicy i współczynnika wypełnienia sygnału sterującego. Jest on nawet dwudziestokrotnie dłuższy niż dla programu PLECS. Z kolei obliczenia wykonane przy zastosowaniu programu SPICE trwają około dwukrotnie krócej niż w programie Ansys Simplorer.

Przeprowadzone badania dowodzą, że modele elementów elektronicznych wbudowane w programach symulacyjnych nie są wystarczająco dokładne do analizy układów przekształcania energii elektrycznej i wymagają modyfikacji. Pozwoli to na poprawę dokładności obliczeń. Jednak podczas formułowania takich modeli istotne jest aby były to modele o możliwie prostej formie, co pozwoli na wykonywanie obliczeń w akceptowalnym czasie.

Autorzy: dr hab. inż. Kalina Detka, prof. UMG, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: k.detka@we.umg.edu.pl, mgr inż. Michał Downar - Zapolski, PIT-RADWAR S.A., Aleja Generała Józefa Hallera 233A, 80-502 Gdańsk, downarzapolski@gmail.com, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, k.gorecki@we.umg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Hulewicz A, Krawiecki Z., Programy symulacyjne elektronicznych układów analogowych. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, No. 88, 2016, pp. 57-66
- [2] Trojnar M., Internetowe symulatory obwodów elektrycznych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, R. 59, Nr 10, 2013, s.1112-1115.
- [3] Niculae D., Iordache M., Bobaru L., Stănculescu M., Drosu O., Moscu A. A., Dedicated Analog Circuit Simulation Programs. In 2023 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIEMEN), 2023, pp. 1-6
- [4] Norbutaev M. A., Norbutaeva S. I., Possibilities of Using the Electronics Workbench Multisim Software, Studying Electrical and Chemical Engineering. *Journal of Ethics and Diversity in International Communication*, Vol.3, No.2, 2023, pp. 69-73
- [5] J. Porębski, P. Korohoda, Spice Program analizy nieliniowej układów elektronicznych, WNT, Warszawa, 1996
- [6] Dobrowolski A., Pod maską SPICE'a - metody i algorytmy, Wydawnictwo BTC, Warszawa, 2004
- [7] Infineon's Power MOSFET Simulation Models, <https://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/power-mosfet-simulation-models/>, dostęp 10.04.2024
- [8] High accurate SPICE model download lists, <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/highlighted-contents/articles/simulating-the-transient-characteristics-of-mosfet-more-accurately/simulating-the-transient-characteristics-of-mosfet-more-accurately-download.html>, dostęp 10.04.2024
- [9] Circuit Simulation Models, <https://www.rohm.com/support/design-model>, dostęp 10.04.2024
- [10] Górecki K., Detka K. Electrothermal model of choking-coils for the analysis of dc-dc converters. *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 177, no. 15, 2012, pp. 1248-1253.
- [11] Górecki K, Zarębski J., Detka K., Application of the electrothermal average inductor model for analyses of boost converters, Proceedings of the 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES, 2015, pp. 417 – 421, doi: 10.1109/MIXDES.2015.7208554

- [12] Górecki K., Detka K., SPICE-Aided Models of Magnetic Elements—A Critical Review. *Energies*, Vol. 16, No. 18, 2023, 6568.
- [13] Jankowski P., Hallman D., Simulation study of the dynamic-thermal properties of an ultra-fast inductive-dynamic drive, *Przeegląd Elektrotechniczny*, R. 100, nr 2, 2024, s. 202-208, doi: 10.15199/48.2024.02.42
- [14] Ansys Simplorer, symulacja sterowania, <https://mesco.com.pl/ansys-simplorer-symulacja-sterowania/>, dostęp 10.04.2024
- [15] Chen X, Liu Y. *Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench*, CRC press, 2018.
- [16] P. Jankowski, Modelling of Magneto-Elastic Phenomena in Inductive Dynamic Drive, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 12, No. 3, 2017, pp. 1073-1081 doi: 10.5370/JEET.2017.12.3.1073
- [17] The Simulation Platform for Power Electronic Systems, https://www.google.pl/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.plexim.com/files/plecsmanual.pdf&ved=2ahUKEwjVluOinL-FAXUpQvEDHWPnCqsQFnoECBQQAQ&usg=AOvVaw3pEok8YpSp3aPo7GY-U_St, dostęp 10.04.2024
- [18] Górecki P, Wojciechowski D., "Accurate Electrothermal Modeling of High Frequency DC–DC Converters With Discrete IGBTs in PLECS Software," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 6, pp. 5739-5746, June 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3189102
- [19] Hart D. W. *Power electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [20] Barlik R., Nowak M., *Energoelektronika: elementy, podzespoły, układy*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014.
- [21] W. Janke *Impulsowe przetwornice napięcia stałego*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2014, Koszalin
- [22] Bisewski D., Parameters estimation of SPICE models for silicon carbide devices, EMPC 2017 - 21st European Microelectronics and Packaging Conference and Exhibition Vol. 2018, pp. 1 – 5, 2017, doi: 10.23919/EMPC.2017.8346918
- [23] PSpice User Guide, <https://resources.pcb.cadence.com/i/1180526-ppspice-user-guide/199?>, dostęp 10.04.2024
- [24] Biblioteka PWRMOS.LIB, MicroSim Corporation, 1995.