

doi:10.15199/48.2024.10.54

Analiza właściwości przetwornicy SEPIC z dławikiem sprzężonym

Streszczenie. W pracy porównano właściwości przetwornicy SEPIC zawierającej dwa pojedyncze dławiki oraz taką przetwornicę z dławikiem sprzężonym. Przeprowadzono badania doświadczalne i symulacyjne w szerokim zakresie zmian rezystancji obciążenia i współczynnika wypełnienia sygnału sterującego. Zastosowano dławiki zawierające rdzeń wykonany ze sproszkowanego żelaza RTMP (160) oraz elementy półprzewodnikowe wykonane z węgla krzemu. Przeprowadzone symulacje w programie SPICE dowodzą, że zastosowanie dławika sprzężonego do budowy przetwornicy SEPIC pozwala na uzyskanie niższych wartości napięcia wyjściowego i wyższej wartości sprawności energetycznej zarówno w trybie CCM jak i DCM. Dodatkowo zwrócono uwagę, że kierunek nawinięcia uzwojeń na rdzeniu dławika sprzężonego ma istotne znaczenie. Nawinięcie uzwojeń w przeciwnych kierunkach może skutkować znacznym obniżeniem sprawności energetycznej rozważanej przetwornicy.

Abstract. The paper compares the properties of the SEPIC converter containing two single inductors and the same converter with a coupled inductor. Experimental and simulation studies were carried out in a wide range of changes in the load resistance and the duty cycle of the control signal. The core of inductors used to investigation were made of RTMP (160) iron powder material and semiconductor devices made of silicon carbide. The conducted SPICE computations prove that the use of a coupled inductor in the construction of the SEPIC converter allows for obtaining lower output voltage values and higher energy efficiency values in both the CCM and DCM modes. Additionally, it was noted that the direction of winding on the core of the coupled inductor is important. Winding the windings in opposite directions may result in a significant reduction in the energy efficiency of the considered converter. (Analysis properties of SEPIC converter containing coupled inductor)

Słowa kluczowe: dławik sprzężony, przetwornica SEPIC, SPICE, elementy magnetyczne

Keywords: coupled inductor, SEPIC converter, SPICE, magnetic elements

Wstęp

Przetwornice dc-dc są szeroko stosowane w różnych gałęziach przemysłu. Typowo spotykane są przetwornice transformatorowe, przetwornice jedno- i dwudławikowe [1, 2]. Do najpopularniejszych przetwornic dwudławikowych należy przetwornica SEPIC, która może zarówno podwyższać, jak i obniżyć napięcie [2]. Choć przetwornica ta nie charakteryzuje się bardzo wysoką sprawnością energetyczną, to posiada szereg zalet, takich jak możliwość wytwarzania napięcia wyjściowego większego lub mniejszego od napięcia wejściowego, a jednocześnie mającego tę samą polaryzację [3]. Wskazane zalety powodują, że rozważana przetwornica w dalszym ciągu jest powszechnie stosowana między innymi w systemach fotowoltaicznych do ładowania akumulatorów oraz w motoryzacji (pojazdy) do korekcji współczynnika mocy w zastosowanych tam układach zasilających lampy LED [4].

W ostatnim czasie obserwuje się trend w kierunku miniaturyzacji urządzeń elektronicznych i wzrostu częstotliwości ich pracy. Problemem w realizacji tego trendu są właściwości dynamiczne elementów półprzewodnikowych. Ograniczają one możliwość zwiększenia częstotliwości ich przełączania. Problem stanowią też rosnące ze wzrostem częstotliwości straty w elementach magnetycznych oraz ich rozmiar [5, 6]. Typowo najwięcej miejsca w rozpatrywanych układach zajmują właśnie elementy magnetyczne [6, 7].

Problem ten stał się punktem wyjścia do projektowania układów elektronicznych o dużym stopniu upakowania ich komponentów i stosowaniu zamiast pojedynczych dławików – dławików sprzężonych [6, 8]. Rozwiązanie to pozwala na zastosowanie tylko jednego rdzenia ferromagnetycznego, na którym nawinięte zostaną wymagane uzwojenia [6].

Projektanci układów elektronicznych przed przystąpieniem do ich budowy wykorzystują programy komputerowe wspomagające ich pracę. Programy te pozwalają jeszcze na etapie projektu na przeanalizowanie właściwości projektowanego układu oraz na dobór

odpowiednich elementów i materiałów zapewniających optymalną pracę projektowanego układu [9].

Jednym z popularnych programów stosowanych do analizy układów elektronicznych jest SPICE. Zawiera on wbudowane modele skupione elementów półprzewodnikowych i biernych, które uwzględniają zarówno podstawowe zjawiska fizyczne zachodzące w wymienionych elementach, jak i zjawiska drugorzędne i komponenty pasożytnicze [10].

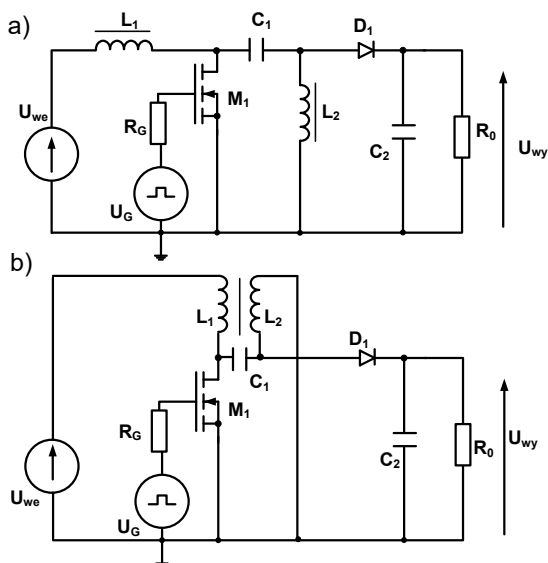
Celem pracy jest analiza i porównanie właściwości klasycznej dwudławikowej przetwornicy SEPIC i rozważanej przetwornicy z dławikiem sprzężonym. Analizy przeprowadzono w szerokim zakresie zmian rezystancji obciążenia i współczynnika wypełnienia sygnału sterującego. Wybrane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów. W rozdziale 2 opisano rozważany układ przetwornicy SEPIC z dwoma osobnymi dławikami i dławikiem sprzężonym, w rozdziale 3 zaprezentowano uzyskane wyniki pomiarów i analiz przeprowadzonych przy zastosowaniu programu SPICE.

Rozważane układy

W celu przeanalizowania i porównania właściwości przetwornicy SEPIC zawierającej dwa pojedyncze dławiki (rys.1a) oraz przetwornicy SEPIC z dławikiem sprzężonym (rys.1b) przeprowadzono badania wykorzystując układy zaprezentowane na rysunku 1.

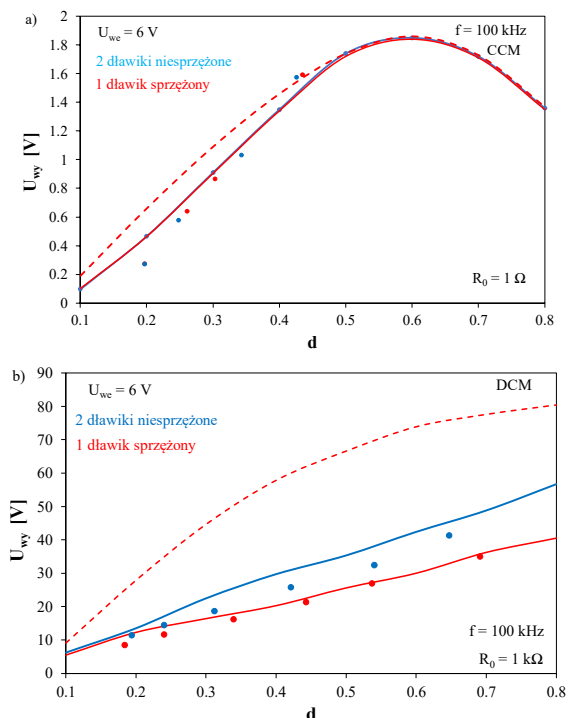
W układach tych zastosowano tranzystor unipolarny M₁ typu UJ4C075033K3S wykonany z węgla krzemu sterowany ze źródła sygnału prostokątnego U_G przez rezystor R_G = 47Ω, diodę Schottky'ego D₁ typu S6D02065A, oraz dwa kondensatory o pojemnościach C₁ = 4,7 μF i C₂ = 6,7 μF. Wejście układu stanowi źródło napięciowe U_{we}, a jego obciążeniem jest rezystor R_o. W obu rozważanych układach zastosowano dławiki zawierające rdzeń pierścieniowy o średnicy 24 mm wykonany ze sproszkowanego żelaza RTMP (160). Indukcyjności własne każdego z komponentów dławika sprzężonego, jak również każdego dławika dyskretnego wynoszą ok. 60 μH.

Indukcyjność wzajemna między uzwojeniami wynosi $50 \mu\text{H}$. W rzeczywistym układzie występują jeszcze amperomierze mierzące prąd wejściowy i wyjściowy przetwornicy. Rezystancja wewnętrzna tych amperomierzy wynosi $0,3 \Omega$.



Rys.1. Przetwornica SEPIC z dwoma dławikami (a) z dławikiem sprzężonym (b)

Dodatkowo, wykorzystując program SPICE przeprowadzono analizy stanów przejściowych przetwornic zaprezentowanych na rysunku 1. Do analizy rozważanych przetwornic zastosowano podstawowe komponenty bierne o wartościach parametrów opisanych wcześniej. Parametry modelu diody zostały wyznaczone wykorzystując program PARTS, a model tranzystora pochodzi ze strony internetowej producenta tego elementu [11].



Rys.2. Zależność napięcia wyjściowego przetwornicy SEPIC pracującej w trybie a) CCM oraz b) DCM od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego

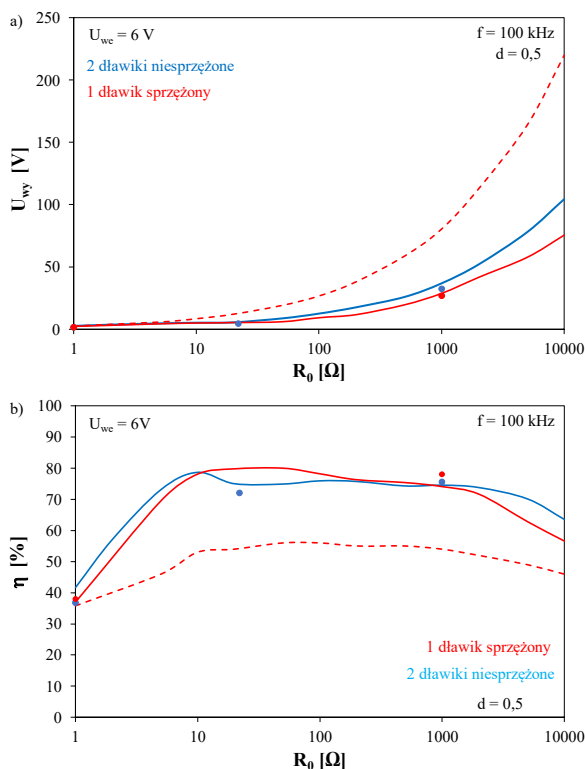
Wyniki badań

W celu zbadania i porównania właściwości przetwornicy SEPIC z dwoma pojedynczymi dławikami i z dławikiem

sprężonym przeprowadzono badania wpływu współczynnika wypełnienia i rezystancji obciążenia na ich charakterystyki. Badania przeprowadzono dla napięcia wejściowego $U_{we} = 6 \text{ V}$, częstotliwości sygnału sterującego f wynoszącej 100 kHz . Dodatkowo rozważono wpływ kierunku nawinięcia uzwojenia dławika sprzężonego na charakterystyki rozważanej przetwornicy.

Na wszystkich rysunkach przyjęto zasadę, że punktami oznaczono wyniki pomiarów, linią ciągłą wyniki symulacji komputerowych uzyskane przy zastosowaniu programu SPICE dla dławika sprzężonego, na którego rdzeniu nawinięto uzwojenie w tym samym kierunku, a linią przerywaną wyniki symulacji uzyskane dla wariantu kiedy uzwojenia na rdzeniu dławika sprzężonego nawinięto w przeciwnym kierunku. Kolorem czerwonym oznaczono wyniki uzyskane dla przetwornicy SEPIC z dławikiem sprzężonym, a kolorem niebieskim - wyniki uzyskane dla przetwornicy SEPIC zawierającej dwa pojedyncze dławiki.

Na rysunku 2 przedstawiono odpowiednio zależność napięcia wyjściowego przetwornicy SEPIC pracującej w trybie CCM (rys.2a) oraz DCM (rys.2b) od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego d . Jak można zauważyć na rys. 2a, przy małej wartości rezystancji obciążenia zależność $U_{wy}(d)$ posiada maksimum przy d równym około $0,6$. Dodatkowo obserwuje się, że w trybie CCM nie obserwuje się wpływu rodzaju konstrukcji dławika na wartość napięcia wyjściowego, a wyniki pomiarów i obliczeń mają zbliżone wartości. Można jednak zauważyć, że przeciwnie nawinięte uzwojenia na rdzeniu dławika sprzężonego powodują uzyskanie wartości napięcia wyjściowego wyższych nawet o 25% niż dla innych konstrukcji dławików.



Rys.3. Zależność napięcia wyjściowego (a) oraz sprawności energetycznej (b) przetwornicy SEPIC od rezystancji obciążenia

Przy rezystancji obciążenia $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$ (rys. 2b) uzyskano zadawalającą zgodność pomiędzy uzyskanymi z pomiarów i obliczeń wartości napięcia wyjściowego rozważanych przetwornic. Można zauważyć, że w rozważanym warunkach pracy wartość napięcia wyjściowego przetwornicy SEPIC z dwoma pojedynczymi

dławikami jest nawet o 40% ($d = 0,7$) wyższa od wartości napięcia przetwornicy SEPIC z dławikiem sprzężonym. Na uwagę zasługuje także fakt, że przy przeciwnym kierunku nawinięcia uzwojeń na rdzeniu dławika sprzężonego uzyskano dwukrotnie wyższe wartości napięcia wyjściowego w porównaniu do wartości tego napięcia uzyskiwanego dla dławika sprzężonego z uzwojeniami nawiniętymi w tym samym kierunku.

Na rysunku 3 przedstawiono odpowiednio zależność napięcia wyjściowego (rys.3a) oraz sprawności energetycznej (rys.3b) rozważanych przetwornic SEPIC od rezystancji obciążenia przy współczynniku wypełnienia sygnału sterującego $d = 0,5$.

Z zależności zaprezentowanej na rysunku 3a można zauważyć, że zgodnie z oczekiwaniem wzrost rezystancji obciążenia powoduje wzrost wartości napięcia wyjściowego. W rozważanym zakresie zmian rezystancji obciążenia wzrost ten może być nawet ponad 50-krotny.

Obserwuje się, że powyżej rezystancji obciążenia $R_0 = 100 \Omega$ uzyskano wyższe wartości napięcia wyjściowego dla przetwornicy zawierającej dwa pojedyncze dławiki. Przy rezystancji obciążenia $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ wartość tego napięcia była prawie o 40 % wyższa od napięcia wyjściowego przetwornicy SEPIC z dławikiem sprzężonym i uzwojeniami nawiniętymi w przeciwnych kierunkach. Przy zgodnym kierunku nawinięcia obu uzwojeń napięcie wyjściowe wzrasta nawet trzykrotnie.

Z kolei z zależności $\eta(R_0)$ zaprezentowanej na rysunku 3b można zauważyć, że sprawność energetyczna w zakresie rezystancji obciążenia od 10Ω do $1 \text{ k}\Omega$ jest najwyższa i sięga nawet 80%. Przy czym najwyższe wartości tego parametru osiągnięto dla przetwornicy zawierającej dławik sprzężony z uzwojeniami nawiniętymi w tym samym kierunku. Na uwagę zasługuje fakt, że przeciwne nawinięcie uzwojeń na rdzeniu dławika sprzężonego skutkuje obniżeniem sprawności energetycznej nawet o 85% w porównaniu do wartości tego parametru w przypadku analizy przetwornicy zawierającej pojedyncze dławiki i dławik sprzężony z uzwojeniami nawiniętymi na rdzeniu w tym samym kierunku.

Fakt, że uzyskano dobrą zgodność pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń dowodzi że zastosowanie podstawowych liniowych modeli elementów biernych, modelu tranzystora ze strony producenta i wbudowanego w programie SPICE modelu diody pozwala na wykonywanie analiz rozważanych przetwornic zapewniających dobrą zgodność z wynikami pomiarów.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analiz komputerowych i pomiarów charakterystyk ilustrujących właściwości przetwornicy SEPIC zawierającej dwa pojedyncze dławiki oraz przetwornicy SEPIC z dławikiem sprzężonym. Badania przeprowadzono w szerokim zakresie zmian współczynnika wypełnienia sygnału sterującego oraz rezystancji obciążenia przy częstotliwości sygnału sterującego wynoszącej 100 kHz.

Z uzyskanych wyników badań można zauważyć, że w trybie CCM nie zaobserwowano istotnego wpływu konstrukcji elementów magnetycznych na właściwości rozważanej przetwornicy. Zaobserwowano natomiast wpływ kierunku nawinięcia uzwojeń na rdzeniu dławika sprzężonego na wartości napięcia wyjściowego rozważanej przetwornicy. W rozważanym przypadku (SEPIC z dławikiem sprzężonym) przeciwne kierunki nawinięcia uzwojeń skutkują uzyskaniem o 25% wyższego napięcia wyjściowego od wartości tego parametru w przypadku przetwornicy z dławikiem sprzężonym, na którym nawinięto uzwojenia w tym samym kierunku.

Istotne rozbieżności pomiędzy wartości napięcia wyjściowego rozważanych przetwornic zaobserwowano przy ich pracy w trybie DCM, gdzie wartość napięcia wyjściowego przetwornicy SEPIC z dwoma pojedynczymi dławikami jest nawet o 40% ($d = 0,7$) wyższa od wartości napięcia przetwornicy SEPIC z dławikiem sprzężonym. Obserwuje się także istotny wpływ rezystancji obciążenia na wartości napięcia wyjściowego przetwornicy SEPIC. Dla rezystancji obciążenia $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ wartość tego napięcia przy zastosowaniu pojedynczych dławików była prawie o 40 % wyższa od napięcia wyjściowego przetwornicy SEPIC z dławikiem sprzężonym.

Przeprowadzone badania dowodzą, że zastosowanie dławika sprzężonego do budowy przetwornicy SEPIC pozwala na uzyskanie niższych wartości napięcia wyjściowego i wyższej wartości sprawności energetycznej zarówno w trybie CCM jak i DCM. Dodatkowo zwrócono także uwagę, że kierunek nawinięcia uzwojenia na rdzeniu dławika sprzężonego ma także istotne znaczenie. Nawinięcie uzwojeń w przeciwnych kierunkach może skutkować znacznym obniżeniem sprawności energetycznej rozważanej przetwornicy przy jednoczesnym wzroście napięcia wyjściowego.

Na uwagę zasługuje fakt, że zastosowanie programu SPICE do analizy rozważanej przetwornicy i wbudowanych lub pochodzących ze stron producentów modeli jej komponentów pozwoliło na uzyskanie dobrej zgodności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów. W dalszych badaniach uwzględniony zostanie wpływ takich czynników jak materiał rdzenia ferromagnetycznego, napięcie wejściowe przetwornicy oraz częstotliwość jej pracy na przebieg jej charakterystyk.

Autorzy: dr hab. inż. Kalina Detka, prof. UMG, Tomasz Olzak (student), prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87 81-225 Gdynia, E-mails: E-mail: k.detka@we.umg.edu.pl; k.gorecki@we.umg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Barlik, R., Nowak M.: *Energoelektronika: elementy, podzespoły, układy*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014, Warszawa.
- [2] Janke W.: *Impulsowe przetwornice napięcia stałego*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2014, Koszalin.
- [3] Hart, D. W., Hart, D. W.: *Power electronics*. McGraw-Hill, 2011, New York.
- [4] Wojtkowski W.: Przekształtnik SEPIC do zastosowań oświetleniowych z użyciem diod LED dużej mocy Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, str. 260-263, 2010.
- [5] Kaźmierczuk M.: *High frequency magnetic components*. John Wiley & Sons, West Sussex, United Kingdom, 2014.
- [6] Detka K., Górecki K.: Modelling power losses in an inductor contained in the boost converter, Proceedings - 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2018, pp. 1 – 6, doi: 10.1109/CPE.2018.8372564
- [7] Coupled inductors broaden DC/DC converter usage – Texas Instruments, <https://www.google.pl/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.ti.com/lit/pdf/slyt380&ved=2ahUKEwiAqoLyseFAxUOQqEDHbBTcrlQFnoECBQQAQ&usq=A0vVaw06iehhXyKj0wGRJoAASHv>
- [8] Detka K., Górecki K.: Influence of the size and shape of magnetic core on thermal parameters of the inductor, *Energies*, Vol. 13, No. 15, 2020, 3842, doi: 10.3390/en13153842
- [9] Detka K., Górecki K.: Electrothermal Model of Coupled Inductors with Nanocrystalline Cores, *Energies*, Vol.15, No. 1, 2022, 224, doi: 10.3390/en15010224
- [10] Debnath S.: *PSPICE A Powerful Simulation tool for Power Electronics & VLSI design*, UK, London, 2020.
- [11] Infineon's Power MOSFET Simulation Models, <https://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/power-mosfet-simulation-models/>, dostęp 28.04.2024