

Optymalizacja nowoczesnych zasilaczy impulsowych

Streszczenie. W artykule opisano działania podejmowane w celu optymalizacji zasilaczy impulsowych pod względem sprawności i minimalizacji wymiarów. Prace obejmują badania układów przetwornic, układów prostownikowych, transformatorów wysokich częstotliwości, a także układów sterowania. Optymalizacja dotyczy doboru elementów i zagospodarowania przestrzeni w celu zwiększenia gęstości mocy oraz zmniejszenia strat w elementach aktywnych zasilacza impulsowego. Pokazano kilka rozwiązań przetwornic wysokoczęstotliwościowych wraz z przebiegami czasowymi charakterystycznych wielkości elektrycznych. Szczególną uwagę zwrócono na zagadnienie indukcyjności i pojemności pasożytniczych wynikających z połączeń pomiędzy elementami

Abstract. Efficiency increasing and dimension minimization in order to optimization of power supplies are described in this paper. Works include investigations of structure of the HF converters, rectifiers, HF transformers as well as control systems. Optimization relate to selection of elements and space utilization to perform power density increasing and power losses decreasing in active switches of the impulse supplier. Several projects of the HF converters and transients are shown in this paper. Particularly remark turned to parasitic inductances and parasitic capacities between the elements connections (**Optimization of the modern switch mode power supplies**)

Słowa kluczowe: zasilacz impulsowy, optymalizacja, gęstość mocy

Keywords: switch mode power supply, optimization, power density

Wstęp

Wymagania stawiane urządzeniom zasilającym urządzenia elektroniczne są coraz bardziej rygorystyczne. Przy projektowaniu nowoczesnych zasilaczy duże znaczenie ma ich sprawność. Jest to podyktowane trendem budowy urządzeń energooszczędnych i ekologicznych. Oprócz energooszczędności, ściśle związanej ze sprawnością, przykładą się dużą wagę do poziomu zakłóceń. Ogólna tendencja minimalizacji urządzeń istotnie wpływa na wymagane rozmiary ich członów zasilających. Małe rozmiary sprzętu wymagają stosowania coraz mniejszych zasilaczy. Widać to na przykładzie komputerów, których wymiary na przestrzeni ostatnich lat znacznie się zmniejszyły, jednak zapotrzebowanie na energię nie zmalało.

Rozwijająca się tendencja wykorzystywania energii odnawialnej (elektrownie wiatrowe, panele słoneczne i inne) wymusiła zapotrzebowanie na nowe wysokosprawne przekształtniki energoelektroniczne. Przekształtniki mają na celu konwersję napięć wytwarzanych przez na przykład panele słoneczne, na napięcia, które mogą być wykorzystane przez przeciętnego użytkownika, tj. przede wszystkim 230V/50Hz. W opisanym przypadku niezwykle istotną staje się kwestia sprawności urządzeń przekształtnikowych. Celem jest uzyskanie jak największej ilości energii z systemu wykorzystującego źródło energii odnawialnej, co wiąże się z zapewnieniem minimalnych strat przetwarzania.

Autorzy pracują nad optymalizacją zasilaczy impulsowych pod względem maksymalizacji sprawności i minimalizacji wymiarów. Prace obejmują badania przetwornic, układów prostownikowych, transformatorów wysokiej częstotliwości, a także nowych rozwiązań układów sterowania. Optymalizacja dotyczy w szczególności doboru elementów, optymalnego zagospodarowania przestrzeni w celu zwiększenia gęstości mocy oraz zmniejszenia strat w elementach aktywnych zasilacza. Szczególnie istotnymi stają się zagadnienia indukcyjności i pojemności pasożytniczych pochodzących od połączeń pomiędzy elementami zasilacza.

Najważniejszymi problemami do rozwiązania przy projektowaniu nowoczesnych zasilaczy są:

- zwiększenie sprawności;
- zwiększenie gęstości mocy;
- zmniejszenie wymiarów;
- redukcja zakłóceń (przewodzonych i promieniowanych).

W przypadku zasilaczy impulsowych podstawowym parametrem jest częstotliwość przetwarzania. Dzięki wyższej częstotliwości można zwiększyć przenoszoną moc, przy zachowaniu wielkości transformatora, albo zachować moc przy zmniejszeniu wymiarów transformatora i filtrów. Z tego względu, częstotliwości przetwarzania w zasilaczach powinny być jak najwyższe, jednak przy wzroście częstotliwości następuje ogólny spadek sprawności zasilacza. Spadek sprawności jest wywołany większym udziałem strat łączeniowych w elementach aktywnych oraz strat wydzielanymi w innych elementach zasilacza.

Autorzy wykonali prototypy zasilaczy zoptymalizowane pod względem sprawności oraz gęstości mocy. Pierwszym etapem pracy był wybór topologii falownika i prostownika oraz technologii wykonania transformatora. Drugi etap obejmował dobór elementów, tj.: tranzystorów falownika, kształtek rdzenia transformatora elementów prostownika oraz elementów pasywnych i układów sterowania. Kolejnym etapem było wykonanie projektu związanego z optymalizacją połączeń elementów w celu minimalizacji pojemności i indukcyjności pasożytniczych – zastosowano technologię montażu powierzchniowego oraz dwuwarstwową płytkę obwodów drukowanych. Ostateczny projekt płytki obwodów drukowanych zasilacza został wykonany za pomocą komputerowych narzędzi projektowych. Efektem prac jest funkcjonalny prototyp zasilacza impulsowego o mocy 1kW z falownikiem półmostkowym, transformatorową separacją napięcia oraz prostownikiem mostkowym.

Dzięki optymalizacji wymiarów i połączeń wewnętrznych można uzyskać dużą gęstość mocy oraz zwiększyć sprawność zasilacza w porównaniu do urządzeń wykonanych w montażu klasycznym THT. Autorzy w swej pracy korzystali z podstawowej literatury dotyczącej zagadnień energoelektroniki [1, 2, 3, 4, 5].

Budowa zasilaczy

Wyróżnia się kilka podstawowych topologii przetwornic impulsowych w zależności od ich zastosowania. W przypadku przetwornic izolowanych, układami pozwalającymi na uzyskanie wysokich sprawności, są topologie przetwornic przeciwobnych, półmostkowych oraz pełnomostkowych.

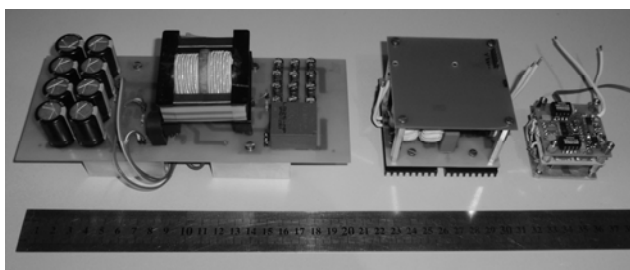
Przetwornice przeciwobne mają zastosowanie w przypadku konwersji niskich napięć i dużych prądów, natomiast przetwornice półmostkowe i pełnomostkowe w

przypadku konwersji wyższych napięć i niższych prądów. Podział ten wynika z analizy przepływu prądu w obwodach pierwotnych przetwornic oraz ilości łączników półprzewodnikowych, w których występują straty mocy spowodowane spadkiem napięcia.

Autorzy przeanalizowali problem optymalizacji przetwornic podwyższających jak i obniżających napięcie zapewniających separację galwaniczną pomiędzy napięciem wejściowym i wyjściowym.

Ze względu na założenia projektowe dotyczące mocy oraz sposobów sterowania, prototypy zostały wykonane w topologii pełnomostkowej. W celu porównania wykonano trzy rozwiązania przetwornic, jedną w montażu klasycznym oraz dwie optymalizowane pod względem rozmieszczenia elementów. Optymalizacja procesu projektowego przetwornic miała na celu dążenie do zmniejszenia indukcyjności pasożytniczych pomiędzy elementami mocy oraz ograniczenie ich wpływu na pracę układu.

Zmniejszenie indukcyjności pasożytniczych istotnie wpływa na redukcję przebiegów, które powstają w trakcie komutacji tranzystorów mocy. Przebiegi te są dodatkowo tłumione poprzez użycie kondensatorów impulsowych o małej indukcyjności wewnętrznej. Z tego względu, zmniejszenie wymiarów przetwornicy, a więc skrócenie połączeń pomiędzy elementami mocy, może przyczynić się do zwiększenia sprawności. Ograniczenie zakłóceń impulsowych pozwala ponadto na umieszczenie układów sterujących w bliskiej odległości od elementów mocy przetwornicy. Autorzy w jednym z prototypów zaproponowali w tym celu koncepcję modułową, wykorzystującą elementy mocy w montażu SMD. W tym przypadku poszczególne moduły przetwornicy umieszczone zostały w układzie pionowym: u dołu transformator, następnie płytki tranzystorów mocy, u góry drivery tranzystorów i obwód sterujący. Montaż taki umożliwił łatwą konfigurację przetwornicy oraz ułatwił dokonywanie zmian w układzie.

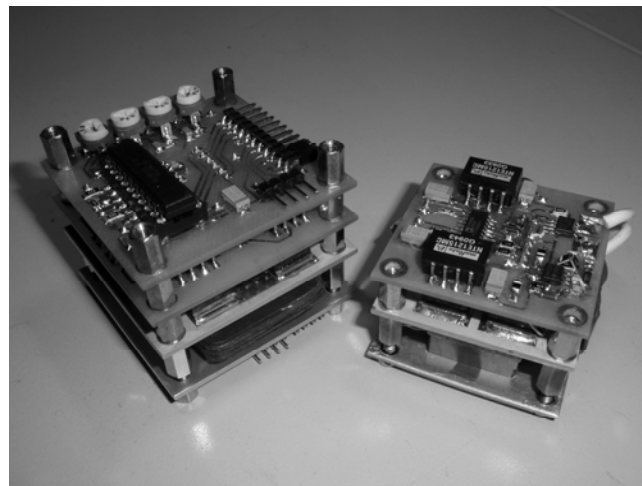


Rys. 1. Kolejne wersje zasilaczy o mocy 1kW jako efekt optymalizacji

Poza montażem, przetwornice różnią się od siebie sposobem komutacji tranzystorów. W przypadku przetwornicy wykonanej w montażu klasycznym, wykorzystywane jest „twarde” przełączanie tranzystorów (ang. Hard switching). W przypadku pozostałych dwóch przetwornic, zaimplementowano metodę miękkiego przełączania tranzystorów (ang. Soft switching), polegającą na komutacji tranzystorów w trakcie występowania na nich zerowego napięcia. Efekt ten uzyskiwany jest poprzez kontrolowanie procesu ładowania i rozładowania pojemności wewnętrznej tranzystorów z udziałem indukcyjności uzwojenia pierwotnego transformatora głównego przetwornicy. Przełączenia tranzystorów oddzielone są czasami martwymi, w trakcie których następuje przeladowanie pojemności wewnętrznej tranzystorów. Metoda ta określana jest jako ZVT (ang. Zero Voltage Transition). W tym przypadku regulacja napięcia wyjściowego przetwornicy nie odbywa się w sposób

standardowy, jak ma to miejsce w przypadku klasycznych zasilaczy impulsowych z modulacją PWM (Pulse Width Modulation), lecz poprzez zmianę fazy sygnałów sterujących tranzystorami przetwornicy. Dzięki temu rozwiązaniu czasy martwe mają niezmiennie wartości co umożliwia poprawną pracę układu w trybie ZVT.

W celu zwiększenia sprawności przetwornicy, transformator wykonano na rdzeniu planarnym zapewniającym niskie straty spowodowane rozproszeniem. Szczególną uwagę zwrócono na konstrukcję uzwojeń transformatora pod względem minimalizacji wpływu efektu naskórkowego.



Rys. 2. Kolejne wersje zasilaczy o mocy 1kW jako efekt optymalizacji

Ze względu na stosowaną częstotliwość przełączania kluczy, wynoszącą powyżej 100kHz, zdecydowano się na użycie materiału magnetycznego typu 3F3 (Ferroxcube). Wybrany materiał posiada optymalną charakterystykę pracy dla tego przedziału częstotliwości.

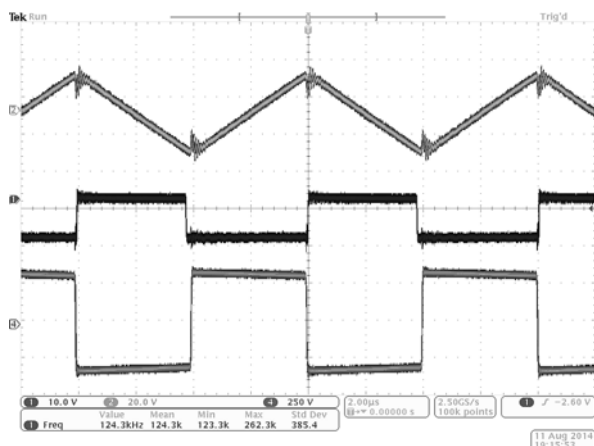
W układzie modelowym przetwornicy o najmniejszych gabarytach klasyczny prostownik diodowy zastąpiono sterowanym prostownikiem synchronicznym, w którym elementami wykonawczymi, podobnie jak w części pierwotnej, są tranzystory MOSFET. Zasada działania tego układu polega na monitorowaniu napięć na tranzystorach prostownika i cyklicznym ich załączeniu, co skutkuje zwieraniem wewnętrznej diody tranzystorów, poprzez niewielką rezystancję występującą w trakcie zamknięcia tranzystora. Układ sterowania ma za zadanie wygenerować impulsy sterujące bramkami tranzystorów z uwzględnieniem odpowiednich czasów martwych oraz realizację funkcji zabezpieczeń chroniących przed załączeniem obu tranzystorów w tym samym czasie.

W przypadku prototypowej przetwornicy o napięciu wyjściowym równym 50V i prądzie dochodzącym do 20A, zastosowanie prostownika synchronicznego jest lepszym rozwiązaniem niż aplikacja klasycznego układu prostownika diodowego. Straty mocy wywołane spadkiem napięcia na diodach, w przypadku dużych wartości prądów, są większe niż straty wywołane spadkiem napięcia na rezystancji wewnętrznej tranzystorów $R_{ds(on)}$. Do konstrukcji przetwornicy wybrano tranzystory o małych wartościach rezystancji wewnętrznej oraz jak najlepszych parametrach dynamicznych.

Badania eksperymentalne zasilaczy

Na rys. 1 oraz rys. 2 pokazano prototypowe przetwornice o mocy 1kW będące efektem prac w zakresie optymalizacji pod względem maksymalizacji gęstości mocy.

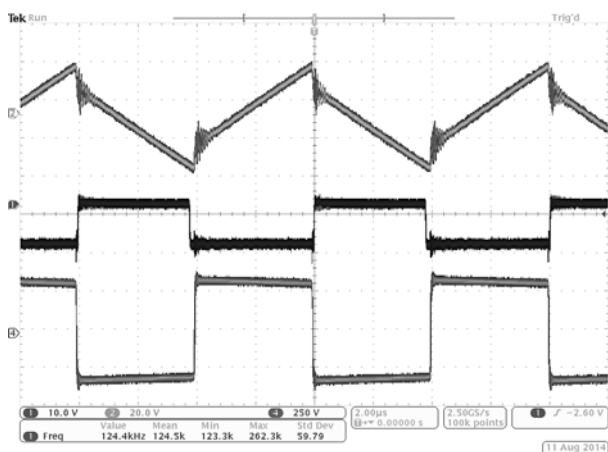
Przetwornice pokazane na rys. 1 różnią się koncepcją montażu. Pierwsza z lewej wykonana jest klasycznie, z prostownikiem diodowym. Częstotliwość przetwarzania wynosi 50kHz przy sprawności równej 88% oraz gęstości mocy wynoszącej 0,79W/cm³. Przetwornica pokazana w środku, wykonana jest w montażu mieszanym, charakteryzuje się częstotliwością przetwarzania równą 100kHz i sprawnością równą 91%. Wyposażona jest również w prostownik diodowy. Gęstość mocy wynosi 3,23W/cm³. Przetwornica widoczna po prawej stronie (najmniejsza) charakteryzuje się częstotliwością przetwarzania równą 124kHz i sprawnością równą 95% i wyposażona jest w prostownik synchroniczny. Gęstość mocy wynosi 12,65W/cm³. Wykonano również kilka prototypów przetwornic o innych mocach w opisywanych powyżej koncepcjach montażu.



Rys. 3. Przebiegi czasowe w charakterystycznych punktach układu przetwornicy o częstotliwości przetwarzania 124kHz w stanie jałowym

Na rys. 3 pokazano przebiegi czasowe napięć i prądów w charakterystycznych punktach układu przetwornicy o częstotliwości przetwarzania równej 124kHz w stanie jałowym:

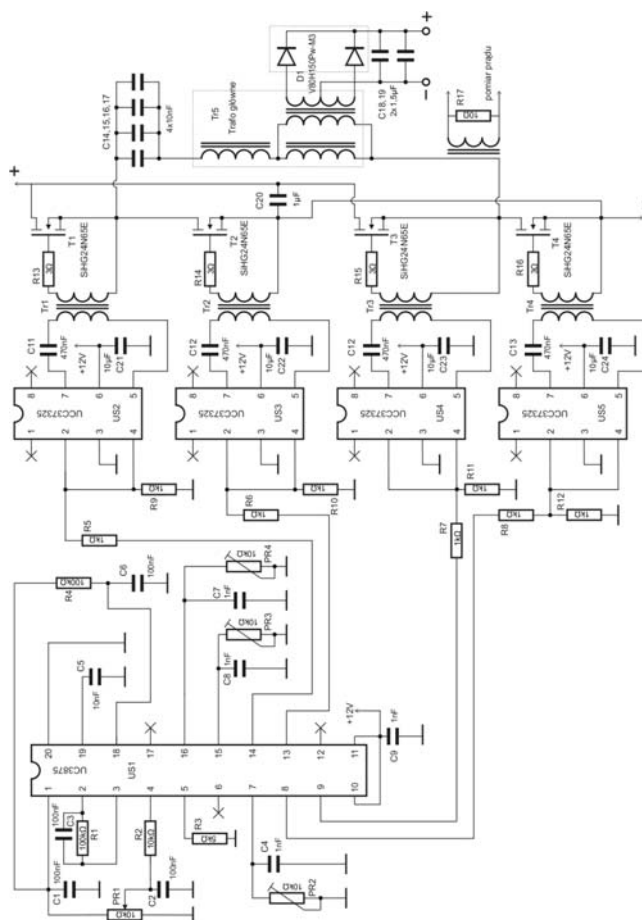
- 1 - przebieg bramkowy,
- 2 - przebieg prądu uzwojenia pierwotnego transformatora,
- 4 - przebieg napięcia wyjściowego falownika.



Rys. 4. Przebiegi czasowe w charakterystycznych punktach układu przetwornicy o częstotliwości przetwarzania 124kHz przy zwiększonym obciążeniu

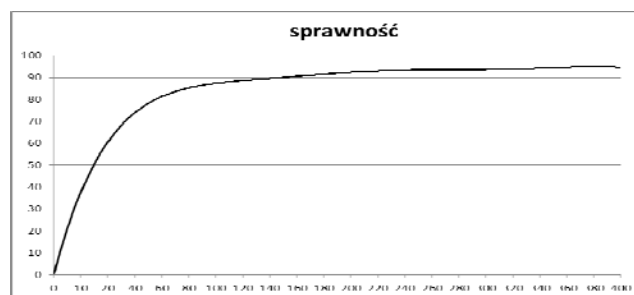
Na rys. 4 pokazano przebiegi czasowe napięć i prądów w charakterystycznych punktach układu przetwornicy o częstotliwości przetwarzania równej 124kHz przy zwiększonym obciążeniu:

- 1 - przebieg bramkowy,
- 2 - przebieg prądu uzwojenia pierwotnego transformatora,
- 4 - przebieg napięcia wyjściowego falownika.



Rys. 5. Schemat ideowy przetwornicy o częstotliwości przetwarzania 124kHz z prostownikiem diodowym

Rys. 5 przedstawia przykład schematu ideowego przetwornicy prostownikiem diodowym z uwzględnieniem obwodu mocy z transformatorem, układu sterowania oraz driverów z separacją galwaniczną. Na rys. 6 pokazano charakterystykę sprawności przetwornicy o częstotliwości przetwarzania 124kHz. Ograniczenie mocy podczas badań podyktowane było maksymalną mocą dostępną obciążenia elektronicznego.



Rys. 6. Charakterystyka sprawności przetwornicy

Badania laboratoryjne przetwornic przeprowadzono na stanowisku składającym się z następujących elementów:

- oscyloskop DPO wyposażony w sondy: napięciową, prądową oraz różnicową;
- zasilacze laboratoryjne;
- obciążenie elektroniczne.

Na rys. 7 przedstawiono widok aparatury pomiarowej na stanowisku badawczym podczas testów jednej z wykonanych przetwornic.



Rys. 7. Widok aparatury pomiarowej na stanowisku badawczym podczas testów jednej z wykonanych przetwornic.

Wnioski

Wykonanie układu potwierdziło założenia projektowe - zasilacze posiadają wysoką sprawność przetwarzania dochodzącą do 95%. Optymalny dobór elementów składowych poskutkował poprawną pracą zasilaczy w zakresie założonych obciążeń. Osiągnięto również założoną gęstość mocy. Zastosowanie techniki ZVT umożliwiło uzyskanie małych zakłóceń oraz mniejszy wpływ indukcyjności połączeń na pracę układu. Zastosowano transformator główny na rdzeniu planarnym, który jest w tym przypadku zintegrowanym elementem indukcyjnym, zawierającym indukcyjność szeregową prostownika oraz indukcyjności szeregową i równoległą, pozwalające na uzyskanie efektów ZVT.

Zastosowanie obwodów drukowanych o podłożu aluminiowym pozwoliło na wydajne chłodzenie elementów mocy w montażu SMD. Ponadto konstrukcja umożliwiła wykorzystanie powierzchni aluminiowych w charakterze

dodatkowych radiatorów transformatora planarnego. Rozwiązanie to istotnie wpłynęło również na ekranowanie zakłóceń pochodzących z transformatora i tym samym redukcję ich wpływu na pracę układu sterowania.

Autorzy planują dalsze rozwijanie koncepcji wykorzystującej laminat z podłożem aluminiowym, w szczególności w zastosowaniu do wydajnego chłodzenia nowoczesnych półprzewodników na bazie azotku galu GaN oraz węgla krzemu SiC. Rozwiązanie to pozwoli na znaczne zwiększenie gęstości mocy poprzez zniwelowanie strat na elementach energoelektronicznych oraz zapewni wydajniejsze chłodzenie elementów.

LITERATURA

- [1] Barlik R., Nowak M. i inni: *Układy energoelektroniczne*, (1982), PWN, Warszawa
- [2] Barlik R., Nowak M.: *Technika tyrystorowa*, (1997), WNT, Warszawa
- [3] Tunia M., Barlik R.: *Teoria przekształtników*, (2003), Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa
- [4] Baranowski J., Czajkowski G.: *Układy elektroniczne cz. II, Układy analogowe nieliniowe i impulsowe*, (2004), WNT, Warszawa
- [5] Januszewski S., Pytlak A., Rosnowska-Nowaczyk M.: *Energoelektronika – podręcznik*, (2012), WSiP, Warszawa
- [6] Jąderko A., Swadowski M., Zygoń K.: *Optymalizacja nowoczesnych zasilaczy impulsowych*, materiały XXIV Sympozjum Środowiskowego PTZE, Hucisko k./Częstochowy, 7-10 września 2014r., s. 97-99

Autorzy:

dr inż. Andrzej Jąderko, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: aj@el.pcz.czest.pl

mgr inż. Maciej Swadowski, student studiów doktoranckich, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: maciej940@gmail.com;

mgr inż. Krzysztof Zygoń, student studiów doktoranckich, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: krzysztof.zygon@gmail.com;