

Wydajne metody chłodzenia małogabarytowych przekształtników o wysokiej gęstości mocy

Streszczenie. W artykule opisano działania podejmowane w celu polepszenia wydajności chłodzenia małogabarytowych przekształtników o dużej gęstości mocy. Prace obejmują badania układów wysokich częstotliwości: przetwornic, układów prostownikowych, transformatorów, a także układów sterowania. Pokazano kilka rozwiązań przekształtników optymalizowanych pod względem chłodzenia. Szczególnie skupiono się na koncepcji, w której obwód drukowany jednocześnie zapewnia krótkie połączenia elektryczne oraz odprowadzenie ciepła z elementów mocy.

Abstract. Increasing of the cooling efficiency of the small-size high power density converters is described in this paper. The paper includes research on topologies of high frequency SMPS, rectifiers, transformers and controllers. Several solutions of the cooling optimization of the small-size high power density converters are shown. Solutions especially focused on idea that printed circuit board provides short electrical connections and removes heat from device simultaneously. (**Effective Methods of the Small- Size High Power Density Converters Cooling**)

Słowa kluczowe: przekształtnik małogabarytowy, wydajne chłodzenie, wysoka gęstość mocy, MCPCB

Keywords: small-size power converter, effective cooling, high power density, MCPCB

Wstęp

Zagadnienie wydajnego chłodzenia zawsze przysparzało problemów konstrukcyjnych podczas budowy przekształtników energoelektronicznych. Największe ilości ciepła wytwarzane są podczas pracy półprzewodnikowych elementów przełączających, takich jak tranzystory, czy diody mocy. Straty mocy można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- wynikające ze spadku napięcia na elemencie,
- wynikające z przełączania elementów (komutacji).

Najczęściej, w celu odbioru ciepła z elementów mocy, stosuje się radiatory, do których mechanicznie przymocowane są elementy. Rozwiązanie to sprawdza się od początku stosowania półprzewodnikowych elementów przełączających i ma wiele zalet, takich jak niski stopień skomplikowania montażu oraz wysoka wydajność chłodzenia. Podczas długiego okresu produkcji urządzeń energoelektronicznych opracowano wiele typów obudów elementów mocy, różniących się sposobem montażu w zależności od mocy i zastosowania. Niestety duże gabarytowo obudowy oraz radiatory wprowadzają utrudnienia konstrukcyjne skutkujące zwiększeniem wymiarów całego urządzenia.

W przypadkach szczególnych, gdy konieczne jest wykonanie urządzenia dużej mocy, zachowując jednocześnie małe gabaryty, napotyka się szereg problemów z wydajnością chłodzenia i przestrzennym rozmieszczeniem elementów elektronicznych, w taki sposób, aby zapewnić wysoką gęstość mocy. W przypadku radiatorów, aby zmniejszyć ich rozmiary i wagę, stosuje się różne warianty chłodzenia.

Jednym z wariantów jest chłodzenie tunelowe z wymuszonym przepływem powietrza. Rozwiązanie to jest znacznie skuteczniejsze niż standardowe, polegające na pasywnym, konwekcyjnym chłodzeniu radiatora, ale wentylatory pobierają dodatkową energię oraz generują hałas. W urządzeniach dużej mocy chłodzenie tunelowe staje się jednak niedostatecznie wydajne, co można poprawić stosując radiatory z chłodzeniem cieczowym. W rozwiązaniu tym ciepło odbierane jest z radiatora poprzez zawarte w nim kanały, przez który przepływa w sposób wymuszony czynnik chłodzący, przekazujący energię cieplną zwykle do wymiennika ciecz - powietrze. Chłodzenie cieczowe radiatorów składa się więc ze skomplikowanego systemu, wykonanego między innymi z: -radiatora, będącego cieczowym odbiornikiem ciepła, -pompy wymuszającej przepływ czynnika chłodzącego,

-wymennika ciepła, będącego zazwyczaj chłodnicą cieczowo powietrzną z wymuszonym przepływem powietrza. System ten, choć skomplikowany, jest często jedynym sposobem wydajnego odprowadzenia ciepła z układów energoelektronicznych.

Wydajne metody chłodzenia małogabarytowych przekształtników o dużej gęstości mocy

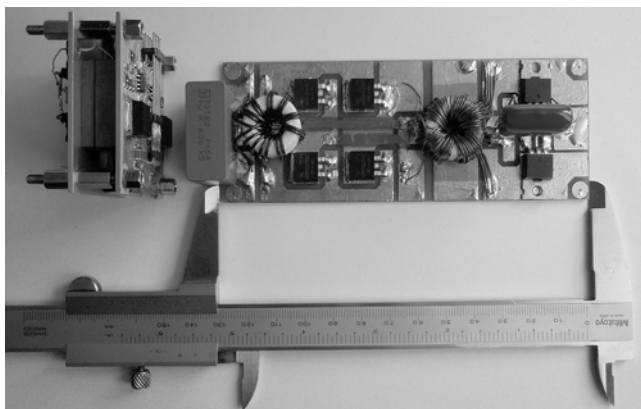
Postęp rozwoju elektronicznych elementów przełączających umożliwia wykonanie urządzeń energoelektronicznych pracujących z coraz wyższą częstotliwością, co przekłada się na zwiększenie wydajności, zmniejszenie wymiarów i często polepszenie parametrów dynamicznych układów. Autorzy wykonują badania nad zwiększeniem wydajności i gęstości mocy przetwornic i falowników pracujących z wysoką częstotliwością przetwarzania. Tendencje rozwoju takich zasilaczy autorzy opisali w publikacji [5].

W przypadku układów energoelektronicznych, pracujących z wysoką częstotliwością przetwarzania, bardzo istotne stają się parametry pasożytnicze wynikające z długości połączeń elektrycznych oraz technologii wykonania elementów składowych. Szczególną rolę odgrywają indukcyjności i pojemności pasożytnicze. Z wyżej wymienionych względów autorzy dążą do optymalizacji montażu obwodów mocy przekształtników, poprzez zastosowanie małogabarytowych elementów półprzewodnikowych o dobrych parametrach dynamicznych, elementów magnetycznych z materiałów ferrytowych i nanokrystalicznych o niskich stratach oraz małogabarytowych kondensatorów o małych indukcyjnościach własnych. Zastosowanie małogabarytowych elementów składowych wymaga również modyfikacji sposobu wykonywania połączeń pomiędzy nimi. Z uwagi na stosowanie elementów półprzewodnikowych wykonanych w technologii montażu powierzchniowego oraz elementów indukcyjnych opartych o rdzenie planarne, stosowanie standardowych radiatorów aluminiowych przysparzałoby sporych problemów, wynikających z montażu mechanicznego oraz wykonania krótkich połączeń elektrycznych.

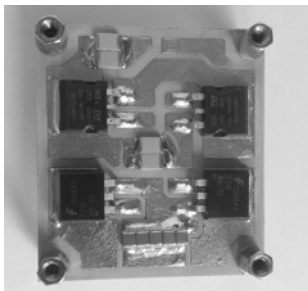
Autorzy wykonali szereg prób z montażem powierzchniowym na podłożach z laminatu szklano - epoksydowego. Rozwiązanie to zapewniło optymalizację połączeń, której efektem są krótkie połączenia pomiędzy elementami oraz zagospodarowanie przestrzenne umożliwiające wysoki stopień integracji. Rozwiązanie to ma

jednak istotną wadę, polegającą na małej zdolności oddawania ciepła do otoczenia, wynikającej z niskiego współczynnika przewodnictwa cieplnego laminatu szklano - epoksydowego. Uniemożliwia to uzyskanie większych mocy i przekłada się na niską gęstość mocy. Zastąpienie laminatu szklano - epoksydowego obwodem drukowanym, wykonanym na podłożu aluminiowym, umożliwiło uzyskanie zadowalających wyników.

Obwody o podłożu aluminiowym wykonane są z warstwy miedzi tworzącej połączenia elektryczne, odizolowane od podłoża aluminiowego za pomocą cienkiej warstwy posiadającej dobry współczynnik przewodnictwa cieplnego. W zależności od producenta i rodzaju, przewodnictwo cieplne laminatów szklano - epoksydowych mieści się w zakresie $0.3-1.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, a laminatów na podłożu aluminiowym w zakresie $2.0-5.0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. W przypadku układów modelowych, z wykorzystaniem podłoża aluminiowego, uzyskano możliwość ponad dwukrotnego zwiększenia mocy przetwornicy, zachowując jednakową temperaturę elementów wykonawczych w porównaniu do układów wykonanych na laminacie szklano - epoksydowym, o takim samym rozkładzie elementów. Przy ustalonej temperaturze tranzystorów przełączających, wynoszącej 75°C , przetwornica o mniejszej mocy oddawała 96W, a druga przetwornica 229W. Przetwornica wykonana na obwodzie z podłożem aluminiowym wykazuje wyższą sprawność. Spowodowane jest to niższymi spadkami napięć na rezystancji kanałów tranzystorów MOSFET, co wynika z niższej temperatury złącz. W obu układach modelowych, do przełączania tranzystorów kluczujących, wykorzystano efekt ZVT (ang. Zero Voltage Transition). Polega on na załączaniu i wyłączaniu tranzystorów w chwili występowania niskiego napięcia na złączu dren-źródło.

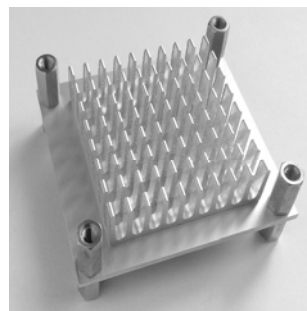


Rys. 1. Porównanie wymiarów przekształtników wykonanych na podłożu Al (z lewej) i na podłożu epoksydowo – szklanym FR4 (z prawej)



Rys. 2. Widok układu mocy przetwornicy 5x5cm od strony elementów
Na rysunku 1 pokazano porównanie wymiarów przekształtników wykonanych na podłożu Al i na podłożu

epoksydowo – szklanym typu FR4. Na rysunku 2 pokazano widok układu mocy przetwornicy 5x5cm od strony elementów, natomiast na rysunku 3 widok od strony radiatora.



Rys. 3. Widok układu mocy przetwornicy 5x5cm od strony radiatora

Autorzy planują opracowanie przetwornicy izolowanej napięcia stałego, w której obwód, wykonany na laminacie o podłożu aluminiowym, służyłby do montażu zarówno elementów mocy jak i obwodów sterujących przetwornicy. Ponadto planowane jest wykonanie sieciowej, izolowanej przetwornicy dużej mocy z odseparowanym chłodzeniem wodnym. Na rysunku 4 pokazano przykładowy sposób montażu elementów chłodzących w przetwornicy.



Rys. 4. Przykładowy sposób montażu elementów chłodzących w przetwornicy

Analiza termowizyjna

W celu przedstawienia różnic rozkładu temperatur wykonano dwa identyczne układy modelowe. Zostały wykonane jako izolowane przetwornice podwyższające w topologii przeciwsobnej z pełnomostkowym prostownikiem wykonanym z diod Schottky'ego.

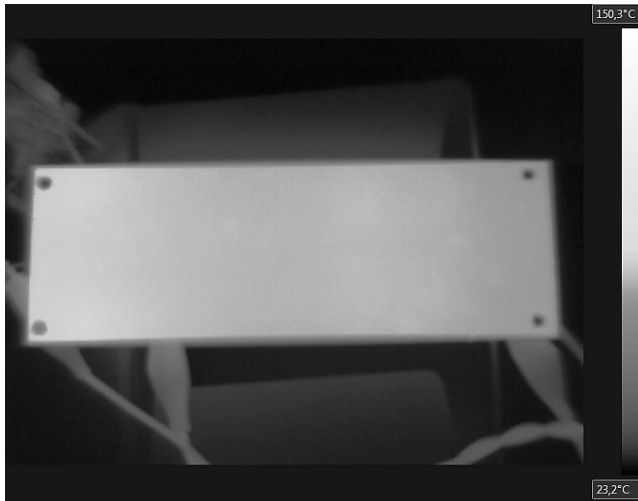
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono obrazy termograficzne od strony laminatu, dwóch identycznych obwodów, zbudowanych na dwóch różnych podłożach. Na rysunku 5 pokazano obwód oparty o laminat MCPCB. Można zaobserwować równomierny rozkład temperatury na powierzchni laminatu aluminiowego. Maksymalna temperatura obserwowana w miejscu montażu tranzystorów MOSFET wynosi 95°C . Minimalna temperatura podłoża aluminiowego wynosi 85°C po stronie montażu prostownika. Wynika z tego, że straty w tranzystorach kluczujących są wyższe, niż straty w diodach prostownika.

Na rysunku 6 pokazano obwód oparty o laminat szklano - epoksydowy typu FR4. Można zaobserwować nierównomierny rozkład temperatury. Nierównomierność spowodowana jest mniejszym przewodnictwem cieplnym materiału szklano - epoksydowego w porównaniu do aluminium. Maksymalna temperatura laminatu FR4 wynosi 145°C w miejscu montażu tranzystorów MOSFET. Wraz z oddalaniem się od miejsca montażu tranzystora temperatura maleje.

Maksymalna temperatura laminatu FR4 w miejscu montażu diod prostowniczych wynosi 119°C . Minimalna temperatura laminatu wynosi 48°C .

Wraz ze wzrostem temperatury złącz tranzystorów MOSFET rośnie ich rezystancja kanału źródło-dren, co przyczynia się do wzrostu strat i zmniejszenia sprawności układu.

Oba układy zostały zbadane w identycznych warunkach, z identyczną mocą wyjściową. Wszystkie obrazy termograficzne zostały przedstawione w gradacji szarości, w zakresie od 23°C do 150°C, przy temperaturze otoczenia równej 22°C. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono obrazy termograficzne od strony elementów, dwóch identycznych obwodów, zbudowanych na dwóch różnych podłożach.



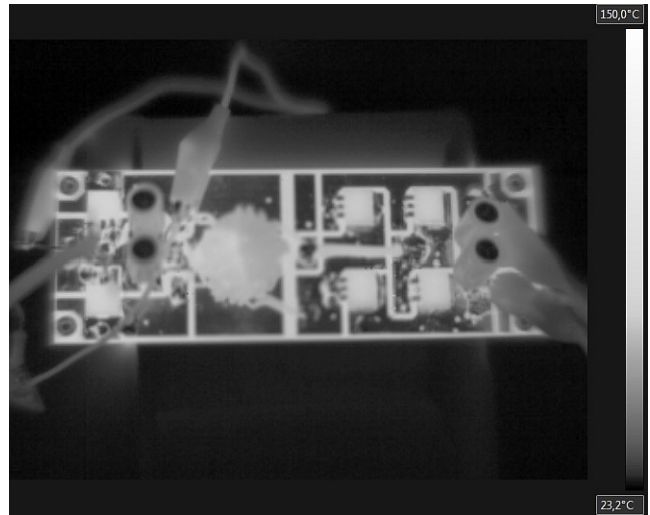
Rys. 5. Rozkład temperatury w układzie zbudowanym na laminacie o podłożu aluminiowym - widok od strony laminatu



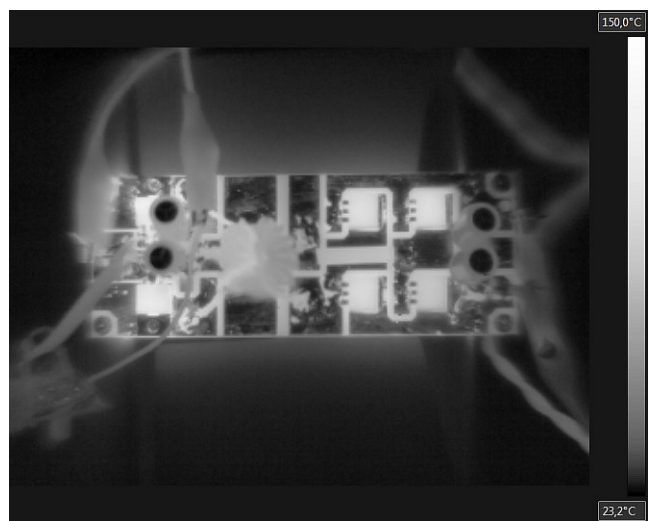
Rys. 6. Rozkład temperatury w układzie zbudowanym na laminacie FR4 - widok od strony laminatu

Wnioski

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.



Rys. 7. Rozkład temperatury w układzie zbudowanym na laminacie o podłożu aluminiowym - widok od strony elementów



Rys. 8. Rozkład temperatury w układzie zbudowanym na laminacie FR4 - widok od strony elementów

LITERATURA

- [1] Barlik R., Nowak M. i inni: *Układy energoelektroniczne*, (1982), PWN, Warszawa
- [2] Tunia M., Barlik R.: *Teoria przekształtników*, (2003), Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa
- [3] Januszewski S., Pytlak A., Rosnowska-Nowaczyk M.: *Energoelektronika – podręcznik*, (2012), WSiP, Warszawa
- [4] Baranowski J., Czajkowski G.: *Układy elektroniczne cz. II, Układy analogowe nieliniowe i impulsowe*, (2004), WNT, Warszawa
- [5] Jąderko A., Swadowski M., Zygoń K.: *Optymalizacja nowoczesnych zasilaczy impulsowych*, (2015), Przegląd Elektrotechniczny 1/2015, ss. 152-155

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 III stopnia, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: maciej940@gmail.com
mgr inż. Krzysztof Zygoń, student III stopnia, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: krzysztof.zygon@gmail.com