

doi:10.15199/48.2018.05.25

## Wysokoczęstotliwościowy przekształtnik z obwodami rezonansowymi pracującymi z wielokrotnością częstotliwości przekształtnika na przykładzie zastosowania w nagrzewnicach indukcyjnych

**Streszczenie.** Niniejszy artykuł opisuje koncepcję obwodu rezonansowego pracującego z nieparzystą wielokrotnością częstotliwości przekształtnika w aplikacji wysokoczęstotliwościowej nagrzewnicy indukcyjnej. Przedstawiono nagrzewnicę o częstotliwości pracy 5 MHz, zbudowaną w oparciu o tranzystory w technologii węgla krzemu SiC.

**Abstract.** This paper deals with concept of resonant circuit operating with odd multiply frequency of converter in application of high frequency induction heater. 5 MHz induction heater based on modern silicon carbide transistors are shown. (*High-frequency converters with resonant circuits working with multiple converter frequency on an example of use in induction heaters*).

**Słowa kluczowe:** Przekształtnik wysokiej częstotliwości, przekształtnik rezonansowy, nagrzewnica indukcyjna, węgiel krzemu.

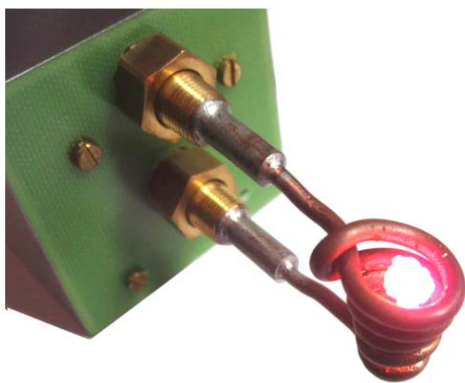
**Keywords:** High frequency converter, resonant converter, induction heater, silicon carbide.

### Wstęp

Współczesna energoelektronika, w której skład wchodzi urządzenia bazujące na przetwarzaniu energii za pomocą wysokoczęstotliwościowych układów przekształtnikowych, posiada wiele zastosowań przemysłowych. W przypadku grzania indukcyjnego półprzewodnikowe układy przekształtnikowe przyczyniły się do znacznego wzrostu sprawności pieców i nagrzewnic indukcyjnych.

Indukcyjne urządzenia grzewcze wykorzystywane są w wielu procesach technologicznych co determinuje ich konstrukcję i podstawowe parametry. Urządzenia przeznaczone do topienia metalu - piece indukcyjne - dzielimy na kilka typów w zależności od sposobu topienia metalu:

- piece indukcyjne z grzaniem bezpośrednim, w których prądy wirowe indukowane są bezpośrednio we wsadzie;
- piece indukcyjne z grzaniem pośrednim, w których prądy wirowe powodują nagrzewanie się tygla z umieszczonym w nim wsadem;
- piece do topienia lewitacyjnego - specyficzny rodzaj pieców z grzaniem bezpośrednim, w których prądy wirowe indukowane są we wsadzie; wsad na skutek działania silnego pola magnetycznego, lewituje w specjalnie przystosowanym do tego celu wzbudniku.



Rys.1. Wzbudnik ze wsadem lewitującym w polu elektromagnetycznym

### Urządzenia do nagrzewania indukcyjnego

W przeciwieństwie do pieców indukcyjnych, nagrzewnice indukcyjne nie są przeznaczone do topienia, a jedynie do nagrzewania elementów metalowych. Podstawowe zastosowanie nagrzewnic indukcyjnych w procesach technologicznych obróbki cieplnej metali to hartowanie, odpuszczanie, zmiękczenie, kucie, wyżarzanie i inne. Autorzy uważają za nowatorskie zastosowanie nagrzewnic indukcyjnych przy lutowaniu twardym oraz miękkim. Zarówno w piecach jak i nagrzewnicach indukcyjnych parametry urządzeń są determinowane właściwościami magnetycznymi wsadu.

Najistotniejszym parametrem, oprócz doboru mocy do wielkości granego wsadu, jest ustalenie głębokości strefy grzania, wynikającej z efektu nasłórkowego, co jest związane z przepływem prądu na małej głębokości od powierzchni przewodnika. Efekt ten jest tym większy im wyższa jest częstotliwość przepływającego prądu.

Proces doboru nagrzewnicy/pieca indukcyjnego do wybranego procesu technologicznego musi być zatem ściśle skalowany, ponieważ zastosowanie zbyt małej częstotliwości pracy układu przekształtnika uniemożliwi efektywne nagrzewanie małych detali metalowych, natomiast zbyt duża częstotliwość pracy spowoduje nagrzewanie większych detali jedynie na powierzchniach zewnętrznych.

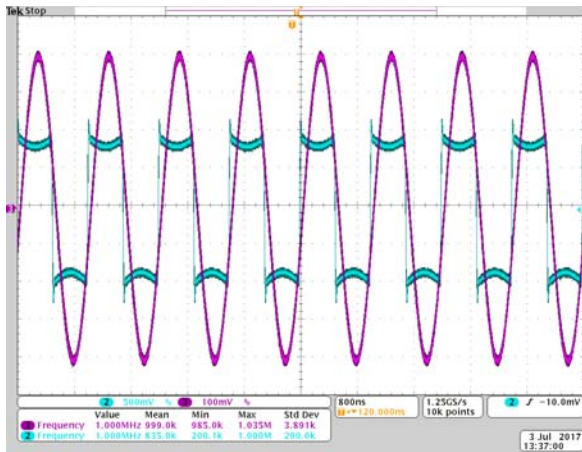
Wiele współczesnych procesów technologicznych takich jak np. lutowanie, wymaga efektywnego nagrzewania małych elementów, co wiąże się z koniecznością wysokiej częstotliwości pracy układów przekształtnikowych.

### Układy rezonansowe

Wzbudniki pieców i nagrzewnic indukcyjnych stanowią indukcyjność, która kompensowana jest, w zależności od typu układu, równoległą lub szeregową pojemnością dodatkową. Obwód rezonansowy złożony ze wzbudnika uzupełnionego kondensatorami rezonansowymi determinuje rezonansowy charakter pracy układu przekształtnika.

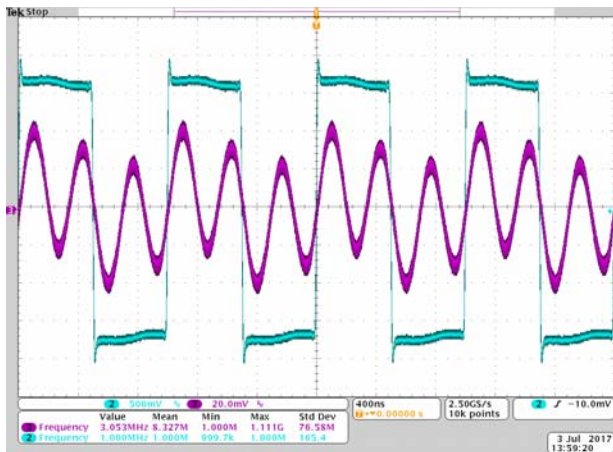
Rozwiązanie to pozwala na efektywną pracę układów przekształtnikowych dzięki występowaniu w obwodach mocy sinusoidalnych prądów lub napięć w zależności od tego, czy zastosowany jest szeregowy, czy równoległy obwód rezonansowy.

Postęp technologiczny w konstrukcji półprzewodników mocy spowodował pojawienie się komercyjnie dostępnych tranzystorów GaN i SiC, a także nowych szybkich tranzystorów MOSFET. Elementy te dają możliwość budowy wysokoczęstotliwościowych przekształtników, których częstotliwości pracy mogą osiągać rząd pojedynczych megaherców. Oczywiście prasa z wysokimi częstotliwościami, nawet przy miękkiej komutacji, wiąże ze sobą występowanie dynamicznych strat, co jest szczególnie istotne w urządzeniach średniej i dużej mocy.



Rys.2 . Oscylogram wzbudzenia układu rezonansowego z pojedynczą częstotliwością; cyan - napięcie przekształtnika, magenta - prąd wzбудnika

Proponowane rozwiązanie umożliwia osiągnięcie tej samej częstotliwości prądu płynącego we wzбудniku nagrzewnicy indukcyjnej, z trzy lub pięciokrotnie niższą częstotliwością pracy przekształtnika. Analogicznie – przekształtnik pracujący z określoną częstotliwością np. 1 MHz może być użyty do wygenerowania prądu wzбудnika o trzy- lub pięciokrotnie większej częstotliwości (3 MHz lub 5 MHz).

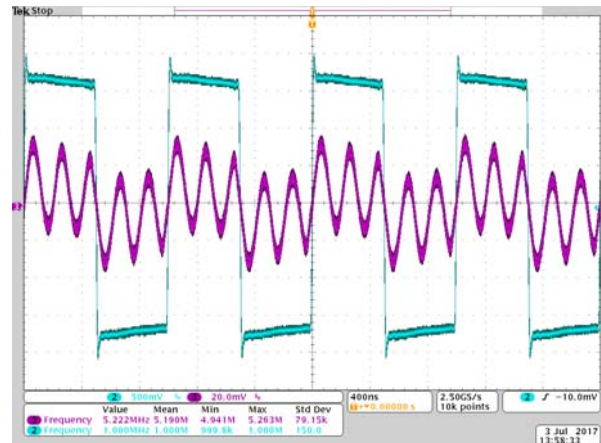


Rys.3. Oscylogram wzbudzenia układu rezonansowego jedną trzecią częstotliwości; cyan - napięcie przekształtnika, magenta - prąd wzбудnika

Indukcyjne urządzenia grzejne z tak wysoką częstotliwością pracy mogą mieć zastosowanie do nagrzewania drobnych elementów lub, w przypadku pieców indukcyjnych, bezpośredniego topienia nawet bardzo drobnego wsadu.

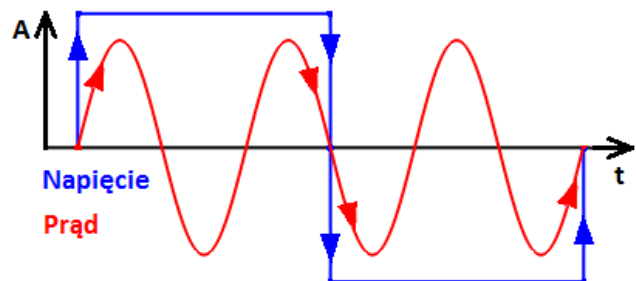
częstotliwości własnej obwodu rezonansowego. Wybór nieparzystej częstotliwości harmonicznej obwodu

rezonansowego spowodowany jest koniecznością podtrzymania drgań gasnących. W przypadku parzystej częstotliwości harmonicznej, cykliczne podawanie energii byłoby nieefektywne i wywoływałoby tłumienie wzbudzanych drgań.



Rys.4. Oscylogram wzbudzenia układu rezonansowego jedną piątą częstotliwości; cyan - napięcie przekształtnika, magenta - prąd wzбудnika

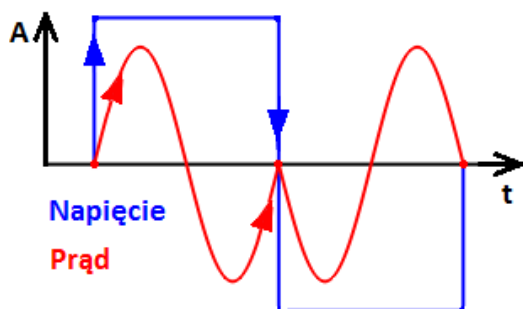
Na rysunkach 2, 3, 4 widoczne są oscylogramy przedstawiające wzbudzenia trzech różnych obwodów rezonansowych. Przebieg prostokątny jest przebiegiem napięciowym wyjścia przekształtnika. W każdym z trzech przypadków jego częstotliwość to około 1 MHz. Można zaobserwować komutację zgodną, zachodzącą w zerze prądu. Na rysunku 5 pokazano zasadę wzbudzenia rezonansu trzykrotnej częstotliwości przekształtnika.



Rys.5. Zasada wzbudzenia rezonansu trzykrotnej częstotliwości przekształtnika; niebieski - napięcie przekształtnika, czerwony - prąd wzбудnika

W przypadku komutacji niezgodnej (rys.6), zachodzącej przy innych niż nieparzyste krotności częstotliwości rezonansowej, obserwuje się wysokie straty wydzielane w układzie przekształtnika. Straty spowodowane tłumieniem energii układu rezonansowego przez układ przekształtnika oraz zmianą kierunku przepływu prądu.

Wzbudzenie obwodu rezonansowego niższą częstotliwością przekształtnika skutkuje drastycznie mniejszą efektywnością pobudzania drgań. W efekcie, wartości prądu płynącego we wzбудniku nagrzewnicy indukcyjnej są mniejsze, co przekłada się na mniejszą moc nagrzewnicy. Efekt ten można skompensować, podając do obwodu rezonansowego napięcie o większej wartości w celu wywołania przepływu prądu o zadanej wartości. Wzrost napięcia w obwodzie rezonansowym uzyskiwany jest poprzez zmianę przekładni transformatora dopasowującego.



Rys.6. Zasada wzbudzenia rezonansu dwukrotnej częstotliwości przekształtnika; niebieski - napięcie przekształtnika, czerwony - prąd wzbudnika

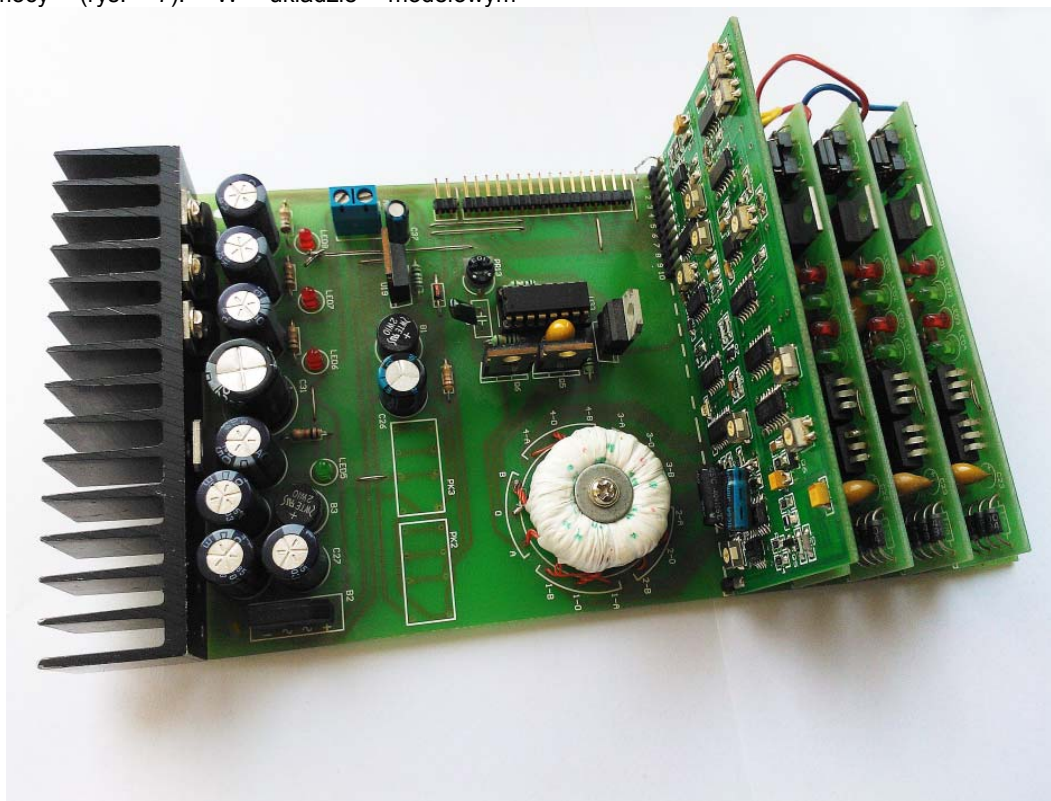
Przekształtnik wykonany został w topologii półmostka z zastosowaniem tranzystorów SiC, których użycie umożliwiło pracę z częstotliwością podstawową do 1,5 MHz. Układ sterowania przekształtnikiem realizuje automatyczną kontrolę częstotliwości, kompensując zmiany parametrów obciążenia.

Zostały wykonane testowe obwody rezonansowe na częstotliwości 1 MHz, 3 MHz oraz 5 MHz. Badania porównawcze wykazały konieczność zmiany napięcia zasilania obwodów rezonansowych w celu uzyskania zadanej mocy (rys. 7). W układzie modelowym

zrealizowano to zadanie poprzez zastosowanie transformatora dopasowującego wykonanego z użyciem rdzenia ferrytowego. Transformator umieszczony został pomiędzy wyjściem przekształtnika, a szeregowym obwodem rezonansowym stanowiąc jednocześnie dopasowanie impedancji tego obwodu. Na rysunku 8 pokazano układ sterowania opisywanego przekształtnika.



Rys.7. Piec indukcyjny wysokiej częstotliwości do przetopu proszków



Rys.8. Układ sterowania nagrzewnicą indukcyjną

Indukcyjność szeregową obwodu rezonansowego stanowi wzbudnik wykonany z jednego zwoju rurki miedzianej o średnicy zewnętrznej 3 mm. W trakcie testów porównawczych badana nagrzewnica pracowała z wsadem stanowiącym pręt mosiężny o średnicy 15 mm. Zostały również wykonane próby nagrzewania licy miedzianej złożonej z 120 odizolowanych od siebie drutów emaliowanych DNE 0,1 mm w celu określenia wpływu częstotliwości na efektywność nagrzewania drobnych wsadów. W tym przypadku druty emaliowane z których składała się lica stanowiły 120 wyodrębnionych wsadów.

Porównania temperatury wsadu wykazały znaczące różnice pomiędzy nagrzewnicą pracującą z częstotliwością 500 kHz o mocy 1 kW, a nagrzewnicą z częstotliwością 5 MHz pracującą z tą samą mocą. Przewidywane są dalsze badania praktyczne z użyciem nagrzewnicy 5 MHz do nagrzewania wsadów proszkowych.

Moc strat wydzielona w obwodzie przekształtnika w przypadku pracy z obwodami pracującymi z częstotliwością 1 MHz i 5 MHz nie ulegała wzrostowi i utrzymywała się w obu przypadkach na poziomie 30 W, co przy mocy przekształtnika wynoszącej 1 kW stanowi o sprawności



układu na poziomie 97%. Na rysunku 9 pokazano wzбудnik nagrzewnicy indukcyjnej z transformatorem.



Rys. 9. Widok wzbudnika nagrzewnicy z transformatorem

### Korzyści w zastosowaniach przemysłowych

Dzięki zastosowaniu techniki wzbudzania rezonansu na trzykrotnie lub pięciokrotnie wyższej częstotliwości niż częstotliwość przekształtnika prądu stałego, możliwe jest efektywne zbudowanie nagrzewnic dużej mocy rzędu 100 kW i więcej, z modułów tranzystorów IGBT. Przyjmując umownie bezpieczną granicę częstotliwości pracy dla wysokoprądowych modułów tranzystorów IGBT na poziomie 50 kHz, możemy uzyskać nagrzewnicę o realnej częstotliwości prądu wzbudnika rzędu 250 kHz.

### Korzystny efekt naskórkowy

W wielu procesach przemysłowych (np. powierzchniowe hartowanie indukcyjne) niezwykle ważna jest mała głębokość wnikania pola elektromagnetycznego. Dzięki zwiększeniu częstotliwości, za czym idzie zmniejszenie wnikania pola, możliwe jest zwiększenie gęstości mocy.

Nagrzewanie prądem wysokiej częstotliwości jest szczególnie korzystne podczas nagrzewania powierzchniowego np. przy hartowaniu. Istnieje wówczas możliwość zwiększenia dynamiki grzania materiału przy jego powierzchni z jednoczesnym brakiem nagrzewania się jego głębi.

### Wnioski

Stosowanie sterowania umożliwiającego zwiększenie częstotliwości prądu w obwodzie rezonansowym nagrzewnic indukcyjnych pozwala zwiększyć efektywność nagrzewania wsadów. Możliwe jest osiągnięcie większej gęstości mocy we wsadzie, co zwiększa szybkość nagrzewania. Do uzyskania danej częstotliwości pola elektromagnetycznego we wzbudniku możliwe jest nawet pięciokrotne obniżenie częstotliwości kluczowania, a co za tym idzie obniżenie strat komutacyjnych w półprzewodnikach przekształtnika.

### Autorzy:

mgr inż. Maciej Swadowski, student III stopnia, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, e-mail: [energoel@energoel.pl](mailto:energoel@energoel.pl) mgr inż. Krzysztof Zygoń, student III stopnia, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, e-mail: [krzysztof.zygon@gmail.com](mailto:krzysztof.zygon@gmail.com) inż. Andrzej Jąderko, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: [aj@el.pcz.czest.pl](mailto:aj@el.pcz.czest.pl)

### LITERATURA

- [1] Jąderko A., Swadowski M., Zygoń K.: Przekształtnik wysokiej częstotliwości z wykorzystaniem nowoczesnych tranzystorów GaN, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Studia i Materiały*, 35 (2015), nr 71, 29-39
- [2] Jąderko A., Swadowski M., Zygoń K.: Optymalizacja nowoczesnych zasilaczy impulsowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91(2015), nr 1, 152-155
- [3] Jąderko A., Swadowski M., Zygoń K.: Niskonapięciowy prostownik synchroniczny z wykorzystaniem nowoczesnych tranzystorów GaN, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93(2017), nr 1, 205-208