

Oszczędny jednofazowy falownik do grzania indukcyjnego z odzyskiem energii pracujący z trzecią harmoniczną

Streszczenie. W pracy przedstawiono praktyczne rozwiązanie techniczne falownika do grzania indukcyjnego, który jest prosty w konstrukcji, niezawodny w działaniu oraz w pełni funkcjonalny. Falownik został przebadany w Laboratorium Badawczym Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej, a uzyskane wyniki pomiarów w pełni potwierdziły możliwość adaptacji tego rozwiązania do zastosowań przemysłowych przy zasilaniu z sieci jednofazowej oraz możliwości regulacji mocy we wzбудniku w szerokim zakresie.

Abstract. The paper presents a practical technical solution for induction heating inverter that is simple in construction, reliable in operation and fully functional. The inverter has been tested in the Electrical Testing Laboratory of Czestochowa University of Technology, and the obtained results fully confirmed the possibility of adaptation of this solution for industrial applications with single-phase power supply and the possibility of regulating the power in a wide range of actuators. (**Sparing one phase converter for induction heating with recovering energy working with the third harmonic**).

Słowa kluczowe: jednofazowy falownik, wielkie częstotliwości, grzanie indukcyjne, zjawisko rezonansu dla trzeciej harmonicznej.

Keywords: single-phase inverter, high frequency, inductive heating, resonance for the third harmonic.

Wstęp

Falowniki są urządzeniami stosowanymi do przekształcania prądu stałego na prąd przemienny o częstotliwości dostosowanej do potrzeb odbiorcy energii, przy czym energię prądu stałego falownik pobiera najczęściej z prostownika zasilanego z sieci elektroenergetycznej. Częstotliwość prądu pracy falownika nie jest powiązana z częstotliwością sieci. Falowniki stosowane są powszechnie między innymi w pracy badawczej, technice ultradźwiękowej, grzejnictwie indukcyjnym, napędach elektrycznych, układach przetwarzania napięć [1,6].

W historii rozwoju elektrotechniki przemysłowej najpierw rozwiązano problemy wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej, potem budowy i eksploatacji maszyn i urządzeń elektrycznych. W tym czasie problem włączania urządzenia lub maszyny elektrycznej do sieci zasilającej były sprawą stosunkowo łatwą i prostą. Na przełomie XIX i XX wieku regulację mocy maszyn i urządzeń elektrycznych wykonawczych stosowano w bardzo ograniczonym zakresie wykorzystując proste i nieekonomiczne metody, a sama regulacja była stosowana głównie dla silników prądu stałego. Znaczącym postępowaniem było wprowadzenie do praktyki przemysłowej tzw. *Układu Leonarda* umożliwiającego ciągłą regulację prędkości obrotowej a więc i mocy wykonawczego silnika prądu stałego. Został zaprojektowany i zbudowany w 1893 roku przez amerykańskiego inżyniera elektryka i wynalazcę Harry'ego Warda Leonarda (1861-1915). Pierwsza połowa XX wieku związana była z powszechnym wykorzystaniem prądu przemiennego w przemyśle z zastosowaniem trójfazowego systemu przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Urządzenia prądu przemiennego (zwłaszcza silniki elektryczne), sprawiały duże trudności przy próbach regulacji ich mocy, dlatego często były używane metody mechaniczne rzadziej metody elektrotechniczne lub elektroniczne. W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX wieku znacząco rozwinęła się technika półprzewodnikowych elementów sterowanych. Zaczęto stosować półprzewodnikowe sterowane elementy mocy i budować różnego rodzaju przetworniki. Opracowanie i wyprodukowanie tyrystorów wyłączalnych typu GTO oraz tranzystorów mocy IGBT, na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku, pozwoliło na rozpoczęcie masowej produkcji stosunkowo tanich przemienników częstotliwości (przetwornic częstotliwości) stosowanych do regulacji mocy

różnego typu urządzeń przemysłowych. W ciągu ostatniego dziesięciolecia XX wieku technika wytwarzania przemienników stała się na tyle prosta, że przetwornice częstotliwości produkowane były przez wiele firm. Firmy te do dziś konkurują z sobą wymiarami, parametrami, jakością wykonania, możliwościami regulacji mocy i ceną. Powstające nowe elementy energoelektroniczne oraz zmieniające się technologie pozwalają dziś na poszukiwanie takich rozwiązań technicznych przemienników częstotliwości, które nie tylko pozwalają na optymalizację przemian energetycznych zachodzących w przemienniku, ale nie wprowadzają harmonicznych do sieci tak, że od strony sieci zasilającej prąd i napięcie na jej wejściu są ze sobą w fazie.

Od lat są poszukiwane takie optymalne rozwiązania techniczne falowników, które byłyby proste w konstrukcji, sprawne w działaniu i funkcjonalne, a jednocześnie mające obniżony pobór mocy przy współczynniku mocy bliskim jedności, przy możliwości odzysku energii z obwodu rezonansowego w celu ograniczenia przepięć na półprzewodnikowych elementach mocy.

Prace nad takim falownikiem prowadzone są w Katedrze Elektrotechniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej we współpracy z innymi wydziałami uczelni oraz Wydziałem Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie i firmą Mitra Sp. z o.o. Kutno od 2012 roku. Kolejne postępy osiągnięte w prowadzonych pracach przedstawiane były sukcesywnie od 2013 roku w Przeglądzie Elektrotechnicznym [2, 3, 4, 5]. Główny człon przedstawionego w tej pracy urządzenia jest podobny do falowników opisanych w artykułach [3,4]. Aktywny układ kompensacji współczynnika mocy PFC (od ang. *Power Factor Correction*) dokładnie opisany został w pracy [2] a falownik z takim układem kompensacyjnym został przedstawiony w pracy [5]. W przedstawionej obecnie pracy dodatkowo zastosowano układ odzysku energii, działający w przypadku wystąpienia przepięć rezonansowych ze względu np. na brak reakcji prądów wirowych w obwodzie wzбудnika spowodowanego brakiemprzewodzącego wsadu w tyglu. Przepięcia tego typu mogą powodować niestabilność pracy układu elektronicznego, powodując przebicia elementów energoelektronicznych lub przyspieszać starzenie się izolacji transformatora rezonansowego.

Wypadkowy współczynnik mocy PF i współczynnik zniekształcenia THD

Przyjmuje się, że zasilająca sieć elektryczna posiada „sztywne” napięcie sinusoidalne (minimalne zniekształcenia przebiegu napięcia sieciowego), to znaczy o wartości niezmiennych w czasie i niezależnej od obciążenia. Urządzenia elektryczne podłączone do takiej sieci mogą wpływać na przebieg w czasie prądu elektrycznego, który można przedstawić w postaci nieskończonej sumy funkcji harmonicznych (sinusoidalnych) o pulsacjach będących wielokrotnościami pulsacji funkcji odkształconej oraz pewnej wartości stałej. Dla niesinusoidalnych przebiegów okresowych prądu $i(t)$ można w ogólnym przypadku napisać [2]:

$$(1) \quad i(t) = \frac{I_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \sin(k\omega t + \alpha_k),$$

gdzie, składowa stała ma postać:

$$(2) \quad I_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(\omega t) dt$$

a wartość maksymalna określona jest z zależności:

$$(3) \quad I_{mk} = \sqrt{\left[\frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(\omega t) \sin k\omega t dt \right]^2 + \left[\frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(\omega t) \cos k\omega t dt \right]^2}$$

Kąt przesunięcia α_k pomiędzy prądem i napięciem dla każdej harmonicznej wyznacza się ze wzoru:

$$(4) \quad \alpha_k = \arctg \frac{\frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(\omega t) \cos k\omega t dt}{\frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(\omega t) \sin k\omega t dt}.$$

Wartość skuteczną przebiegu odkształconego prądu podanego zależnościami (2) i (3) można przedstawić wyrażeniem:

$$(5) \quad I_{rms} = \sqrt{I_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} (I_{mk}^2)}$$

Wielkość $I_1 = I_{m1}/\sqrt{2}$ jest definiowana jako wartość skuteczna pierwszej (podstawowej) harmonicznej prądu. Wyznaczenie poszczególnych składowych ze wzoru (1) pozwala obliczyć współczynnik zniekształcenia (odkształcenia) krzywej prądu, stanowiący miarę odkształcenia funkcji prądu od kształtu sinusoidalnego. Współczynnik ten jest wyrażony ilorazem wartości skutecznej pierwszej harmonicznej do wartości skutecznej całego przebiegu [2]

$$(6) \quad k_z = \frac{I_1}{I_{rms}}$$

Współczynnik k_z dla przebiegu sinusoidalnego przyjmuje wartość 1.

Straty przesyłu w elektroenergetycznej sieci zasilającej zależą od kwadratu prądu i są proporcjonalne do mocy pozornej występującej w odbiorniku. W przypadku teoretycznym, taka moc czynna jest całkowicie przekazywana do urządzenia a wtedy moc bierna jest równa zero. Dla rzeczywistego odbiornika moce czynna i bierna są całkowicie przez niego pobierane i wtedy $PF < 1$. Oprócz strat mocy czynnej wystąpią dodatkowo straty mocy biernej co powoduje przesunięcie fazowe pomiędzy prądem a napięciem zasilającym odbiornik energii. Jeśli przykładowo współczynnik PF będzie wynosił 0,5 przy stałych parametrach zasilania, to urządzenie musi pobrać dwa razy większy prąd, co spowoduje czterokrotny wzrost

strat mocy przesyłu [2,5]. Stawiane urządzeniom warunki optymalnej pracy wymagają minimalizacji zużycia energii elektrycznej przez odbiornik. Nieliniowe elementy będące częścią urządzenia, generują prądy harmoniczne, które wpływają na odkształcenie prądu całkowitego od przebiegu sinusoidalnego. Prąd ten może wpływać na pracę innych urządzeń przyłączonych do sieci. Na przykład transformator zasilający, którego obszar pracy znajduje w części nieliniowej charakterystyki magnesowania rdzenia, przy pełnym obciążeniu spowoduje powstawanie wyższych harmonicznych prądu przenoszących się na sieć zasilającą jak również może spowodować niepotrzebne zadziałanie zabezpieczeń. Zastosowanie kompensacji współczynnika mocy PF minimalizuje na wejściu odbiornika odkształcenia od prądu sinusoidalnego i minimalizuje kąt fazowy pomiędzy przebiegami napięć i prądów sieciowych w punkcie przyłączenia do sieci elektroenergetycznej. Ten proces jest nazywany korekcją współczynnika mocy lub poprawą (kompensacją) współczynnika mocy [2,5].

W wielu urządzeniach, ze względu na obsługiwany proces technologiczny, przebiegi napięć i prądów mają kąt fazowy $\varphi=0$, to znaczy wartości maksymalne przebiegu prądu i przebiegu napięcia występują w tym samym momencie a współczynnik mocy DP ($\cos\varphi$) dla podstawowego przebiegu 50 Hz jest zbliżony do jedności. Jeżeli w urządzeniu występują układy prostownicze dwupołkowe, wówczas przebieg prądu nie jest przebiegiem ciągłym, lecz ma charakter impulsowy. Wtedy celem kompensacji PFC jest redukcja wyższych harmonicznych prądu sieciowego. Przy założeniu „sztywnej” sieci (spełnione są wymagania jakości dostarczanej energii zgodnie z Normą PN/EN 50160) współczynnik mocy PF może być aproksymowany równaniem [2,5]:

$$(7) \quad PF \approx k_z = \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

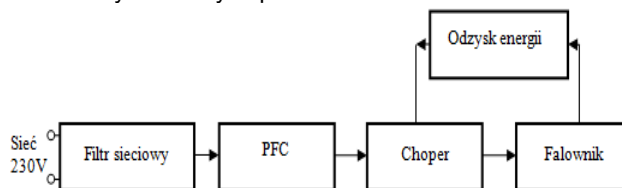
dla

$$(8) \quad THD_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=2}^{\infty} (I_{mk}^2)}}{\frac{I_{m1}}{\sqrt{2}}}$$

gdzie: współczynnik THD (skrót od ang. *Total Harmonic Distortion*) jest wypadkowym współczynnikiem odkształcenia a indeks i oznacza, że współczynnik ten jest określony dla prądu. Przy użyciu kompensacji PFC pożądane byłoby aby w końcowym przypadku współczynnik THD_i był równy zero.

Oszczędny jednofazowy falownik z odzyskiem energii

Wykorzystując zjawisko rezonansu szeregowego po stronie roboczej oraz trzecią składową harmoniczną unika się generowania zakłóceń od odfiltrowanych pozostałych harmonicznych. Przy niższej częstotliwości przełączeń, wykorzystując trzecią harmoniczną uzyskuje się polepszenie jakości przekształcania energii i poprawę własności dynamicznych przekształtnika.



Rys.1. Schemat blokowy oszczędnego jednofazowego falownika do grzania indukcyjnego

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy opracowanego jednofazowego falownika do grzania indukcyjnego pracującego z częstotliwością będącą trzecią harmoniczną od częstotliwości układu wyzwalania elementów mocy.

Od strony sieci 230 V został zaprojektowany i zainstalowany nowoczesny układ korektora współczynnika mocy (tzw. układ PFC), dzięki któremu falownik nie wprowadza do sieci wyższych harmonicznymi (przez co jest energooszczędny), ponieważ wtedy wypadkowy współczynnik mocy PF jest równy współczynnikowi mocy $\cos\varphi$ w przybliżeniu równemu 1. W normalnych warunkach, bez korektora współczynnika mocy jego wartość jest równa od 0,7–0,75. Jednocześnie dzięki podwyższeniu napięcia stałego w korektorze współczynnika mocy do 400 V możliwe jest osiągnięcie z sieci jednofazowej mocy wyjściowej rzędu 3,5 kW przy prądzie pobieranym z sieci nie przekraczającym 15 A. Aby wyeliminować wpływ częstotliwości przełączania w układzie PFC (częstotliwość przełączania korektora wynosi ok. 250 kHz) zastosowano od strony sieci typowy filtr przeciwzakłóceniuowy typu B84-112-B8110 firmy Siemens o prądzie 10 A.

Dzięki zastosowanemu chopperowi (przerwywaczowi prądu stałego) możliwa jest regulacja mocy wyjściowej falownika od 500 do 3500 W. Skutkuje to dużą elastycznością w możliwych jego zastosowaniach od lutowania do nagrzewania indukcyjnego i dalej aż po topienie tyglów metali.

Ponieważ urządzenie w przedstawionej obecnie wersji zostało zaprojektowane i wykonane jako technologiczne, to znaczy przeznaczone do przemysłowej pracy ciągłej, dlatego radiatory elementów mocy korektora, chopera i mostka typu H oraz kondensatora chłodzone są w obiegu zamkniętym wody.

Jeżeli w układzie wzbudnika wystąpią sytuacje związane z brakiem reakcji prądów wirowych na obwód rezonansowy to wówczas w obwodzie rezonansowym wystąpią przepięcia mogące uszkodzić półprzewodnikowe klucze (tranzystory typu MOS) na wskutek przekroczenia dopuszczalnego napięcia pracy. Aby takiemu zjawisku zapobiec zaproponowany został układ służący do zwrotu nadmiaru energii z obwodu rezonansowego do kondensatora w układzie zasilacza stałego (tzn. w choperze) poprzez układ pośredniczący w postaci transformatora separującego oraz układu prostowniczego. W przypadku pojawienia się przepięcia powyżej założonego poziomu, następuje zadziałanie układu skutkujące doładowywaniem baterii kondensatorów w zasilaczu. Dzięki takiemu rozwiązaniu unika się uszkodzenia elementów przełączających jak również zmniejsza się pobór mocy z sieci. Rozwiązanie takie może być energooszczędne a jednocześnie skutecznie zabezpiecza obwody główne falownika przed uszkodzeniami, które mogą być spowodowane brakiem odbioru energii we wzbudniku. Przykładowo sytuacja taka może wystąpić np. jeżeli tygiel grafitowy zostanie zastąpiony tygłem ceramicznym bez przewodzącego wsadu. Inną sytuacją jest, jeżeli we wzbudniku nie zostanie umieszczony element, w którym mogą się generować prądy wirowe,

Zwykle nie obciążony rezonansowy obwód wtórny transformatora wyjściowego falownika, jest w większości przypadków powodem uszkodzenia urządzeń stosowanych przy nagrzewaniu i topieniu indukcyjnym.

Jako pojemność rezonansową zastosowano wysokoczęstotliwościowy kondensator CSP 405 B firmy CELEM o pojemności $C=0,68 \mu\text{F}$ i napięciu przemiennym do 500 V zbudowany na bazie polipropylenu i miki. Kondensator w obudowie miedzianej, wykorzystujący kondukcyjne przewodnictwo ciepła, zapewnia bardzo dobre

warunki chłodzenia wodą, co w konsekwencji umożliwiło zmniejszenie wymiarów kondensatorów i znaczne obniżenie objętości kondensatora w stosunku do jego mocy. Kondensatory mikowe mogą pracować przy temperaturach powyżej 100 °C i częstotliwości rzędu 1 MHz.

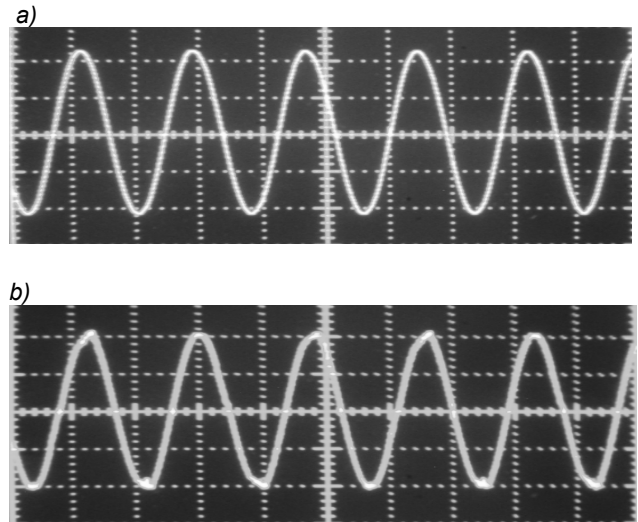
Użytkownicy chcą otrzymać produkt niezawodny, tani w eksploatacji i dobrze aplikujący się do ich potrzeb. Wykorzystując zjawisko rezonansu szeregowego po stronie roboczej oraz trzecią składową harmoniczną unika się generowania zakłóceń od odfiltrowanych pozostałych harmonicznymi. Przy niższej częstotliwości przełączeń, wykorzystując trzecią harmoniczną uzyskuje się polepszenie jakości przekształcania energii i poprawę własności dynamicznych przekształtnika. Ponieważ częstotliwości pracy falowników zbliżone są do dolnego pasma fal radiowych, dlatego jako zasadę przyjęto, aby nie osiągała ona częstotliwości pośredniej 455 kHz, stosowanej w radiotechnice.

Pomiary wykonane w czasie pracy falownika

Do pomiarów wykorzystano falownik (rys. 2) do którego został dobudowany aktywny korektor PFC oraz układ regulacji napięcia umożliwiający pracę w szerokim zakresie mocy wyjściowej. Dzięki układowi odzyskania energii urządzenie zostało w pełni zabezpieczone przed pojawieniem się w obwodzie głównym niepożądanych przepięć rezonansowych. Działania te spowodowały również znaczący wzrost sprawności całego urządzenia.

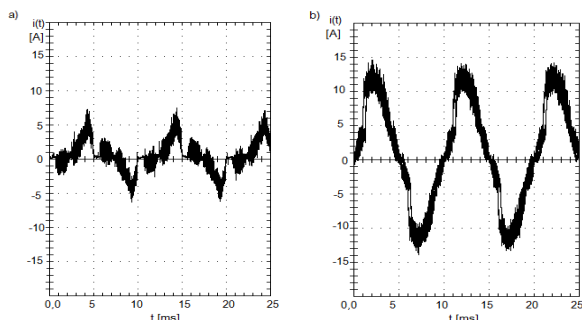


Rys.2. Widok wnętrza zaprojektowanego i zbudowanego urządzenia do grzania indukcyjnego



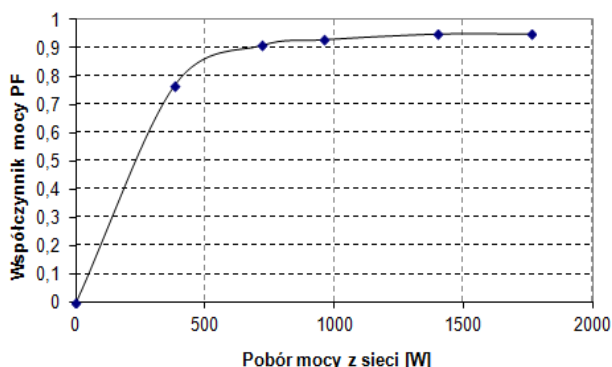
Rys.3. Oscylogramy przebiegów z korektorem PFC: a) – przebieg prądu we wzbudniku falownika $I_{pp} = 210 \text{ A}$, $f = 287 \text{ kHz}$, b) - przebieg napięcia na wzbudniku $U_{pp} = 21,3 \text{ V}$, $f = 287 \text{ kHz}$. Wielkości U_{pp} i I_{pp} są to wartości międzyszczytowe.

Przebiegi we wzбудniku (rys. 3a) zarejestrowano miernikiem CWT1 z cewką Rogowskiego o czułości 20 mV/A i paśmie przenoszenia od 0,1 Hz do 16 MHz, a napięcie na wzbudniku (rys.3b) oscyloskopem cyfrowym GW-Instek typu GDS-830.



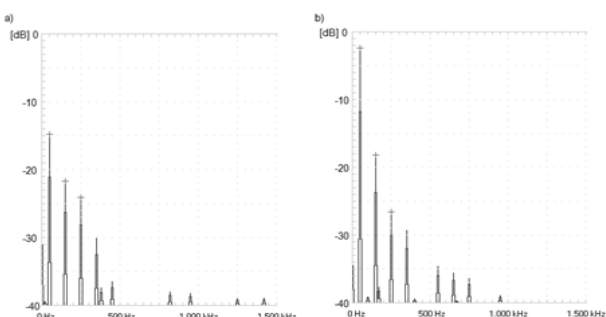
Rys. 4. Przebiegi prądu sieciowego z korektorem współczynnika mocy PFC bez filtra przeciwzakłócenieniowego a) dla poboru mocy 520 W, b) dla poboru mocy 1780 W

Rejestrację prądu sieciowego z korektorem PFC (rys.4) wykonano za pomocą przystawki oscyloskopowej typu SDS 200 o zakresie pracy od 0 do 200 MHz (łącznie z szybką transformacją Fouriera FFT) firmy Conrad, współpracującą z oprogramowaniem SoftScope. Maksymalne napięcie na wejściu 42 V_{pp} (rys.4). Przystawka typu SDS 200 współpracowała z sondą prądową HZ56 firmy Hameg o stałej 100 mV/A.



Rys.5. Wykres wypadkowego współczynnika mocy PF w funkcji poboru mocy falownika (z korektorem współczynnika mocy PFC)

Parametry sieciowe (z korektorem PFC): napięcie, prąd i moc czynną, zmierzono przy pomocy przystawki PZEM-061 a następnie z wyników pomiarów wyznaczono wypadkowy współczynnik mocy PF (rys. 5) .



Rys. 6. Rozkład harmonicznych prądu sieciowego z korektorem współczynnika mocy PFC bez filtra sieciowego a) dla poboru mocy 520 W, THDi=0,71, b) dla poboru mocy 1780 W, THDi=0,2

Rozkład harmonicznych prądu sieciowego wyznaczono na podstawie wyników otrzymanych z przystawki oscyloskopowej typu SDS 200 (rys. 6).

Wnioski

Na podstawie wieloletnich rozważań teoretycznych, kolejno budowanych modeli oraz prowadzonych testów i badań, udało się stworzyć optymalne urządzenie pracujące z trzecią harmoniczną (z częstotliwością do 400 kHz). Prowadzone w kolejnych latach badania pozwoliły na:

- ♦ zwiększenie współczynnika mocy całego układu do wartości zbliżonej do jedności

- ♦ ograniczenie strat mocy biernej i odkształcenia do minimum powodując że, faza prądu sieciowego jest taka sama jak faza napięcia sieciowego, a prąd pobierany z sieci ma wartość minimalną (nastąpiło zwiększenie mocy wyjściowej falownika przy zmniejszonym poborze prądu z sieci) ,

- ♦ dzięki zaprojektowanemu układowi odzysku energii udało się zabezpieczyć obwody główne falownika przed negatywnym wpływem przepięć rezonansowych wywoływanych przez brak odbioru energii od strony wzbudnika (brak reakcji prądów wirowych na pole magnetyczne wzbudnika).

Urządzenie idealnie nadaje się dla rolnictwa, ze względu na niewielkie gabaryt, jednofazowe zasilanie oraz błyskawiczny proces grzania niewielkich elementów metalowych.

Jako następny etap działań planuje się, z jednej strony wykorzystanie elementów mocy (typu MOSFET) opartych na węglu krzemu o wyższej dopuszczalnej temperaturze pracy, co powinno spowodować zmniejszenie parametrów geometrycznych układów chłodzących oraz zmniejszenie strat ciepłych w elementach obwodu, a z drugiej strony zmniejszenie (minimalizacja) zewnętrznego pola magnetycznego (pola rozproszenia) wokół wzbudnika przez zastosowanie do skupienia pola osłony z proszków ferromagnetycznych.

Autorzy: dr inż. Aleksander Gąsior, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa, E-mail: alekg@el.pcz.czest.pl; dr inż. Zdzisław Posytek, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa E-mail: zdzychu@el.pcz.czest.pl; dr hab. inż. Paweł Kielbasa, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Pawel.Kielbasa@ur.krakow.pl.

LITERATURA

- [1] Citko T., Tunia H., Winiarski B.; Układy rezonansowe w energoelektronice, Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, tom 23, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok (2001), 288 (ISBN 83-88229-28-1, ISBN-13 978-83-88229-28-2)
- [2] Gąsior A., Posytek Z., Wróbel M.; Aktywny korektor współczynnika mocy PFC w układach jednofazowych z prostownikiem dwupołkowym, Przegląd Elektrotechniczny 93 (2017), nr 1, 149-152 (ISSN 0033-2097).
- [3] Gąsior A., Posytek Z.; Praktyczna realizacja rezonansowego falownika szeregowego pracującego z potrójną częstotliwością względem częstotliwości przełączalnych elementów, Przegląd Elektrotechniczny 89 (2013), nr 12, 370-373 (ISSN 0033-2097)
- [4] Gąsior A., Posytek Z.; Rezonansowy falownik prądowy pracujący z trzecią harmoniczną obwodu wzbudzania, Przegląd Elektrotechniczny, 91 (2015), nr 12, 95-98, (ISSN 0033-2097)
- [5] Gąsior A., Posytek Z., Mudryk K.; Zoptymalizowany jednofazowy falownik do grzania indukcyjnego pracujący z trzecią harmoniczną, Przegląd Elektrotechniczny 93 (2016), nr 12, 37-40 (ISSN 0033-2097)
- [6] Mućko J.; Tranzystorowe falowniki napięcia z szeregowymi obwodami rezonansowymi, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy Rozprawy Nr 148, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz (2011), 206 (ISSN 0209-0597)