

Rezonansowy falownik prądowy pracujący z trzecią harmoniczną obwodu wzbudzenia

Streszczenie. W pracy przedstawiono prototyp falownika pracującego z potrójną częstotliwością układu wzbudzenia. Zastosowane rozwiązanie prototypu umożliwiło zastosowanie tradycyjnych metod sterowania falownika przy jednoczesnym podniesieniu jego częstotliwości roboczej. Na wykonanym prototypie przeprowadzone zostały pomiary: wyznaczono wartości prądu po stronie wtórnej oraz pokazano przebiegi czasowe wywołujące elementy mocy, a uzyskane wyniki w pełni potwierdziły funkcjonalność działania oraz dobrą i niezawodną pracę falownika.

Abstract. The paper presents a prototype inverter working with threefold frequency excitation system. The solution prototype possible to use traditional methods of controlling the inverter while increasing its operating frequency. The prototype made measurements were carried out: the values of secondary current, and showing a timing trigger the power components and the results obtained fully confirm the functionality of action and a good and reliable operation of the inverter. (**The resonant inverter current working with third harmonic excitation circuit**)

Słowa kluczowe: prototyp falownika, mostek typu H, rezonans, trzecia harmoniczna.

Keywords: power inverter prototype, H – bridge, resonance, third harmonic.

Wstęp

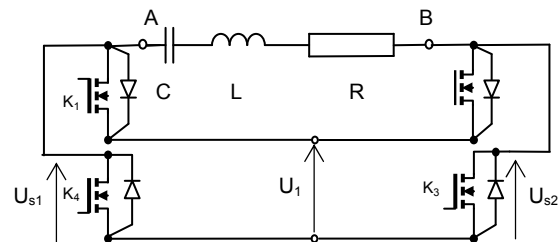
Falowniki są to urządzenia służące do przekształcania prądu stałego na prąd przemienny o częstotliwości dostosowanej do właściwości odbiornika energii a nie związanej z częstotliwością sieci, przy czym energię prądu stałego falownik pobiera z prostownika sieciowego. Stosowane są one powszechnie między innymi w technice ultradźwiękowej, grzejnictwie indukcyjnym, napędach elektrycznych, układach przetwarzania napięć [1,4]. Z jednej strony poszukuje się takich rozwiązań technicznych tych urządzeń, które są proste w konstrukcji, sprawne w działaniu i funkcjonalne, a z drugiej strony odbiorcy chcą otrzymać produkt niezawodny, tani w eksploatacji i dobrze aplikujący się do ich potrzeb. Wykorzystując zjawisko rezonansu po stronie roboczej unika się generowania zakłóceń od wyższych harmonicznnych. Podwyższając częstotliwości przełączeń uzyskuje się polepszenie jakości przekształcania energii i poprawę własności dynamicznych przekształtnika. Lepsze możliwości przekazywania energii elektrycznej daje układ szeregowy i dlatego on został zastosowany w rozważanym urządzeniu [1,2]. 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.

Działanie rezonansowego falownika szeregowego dla podstawowej harmonicznnej

Najczęściej stosowane są szeregowo falowniki pracujące w układzie rezonansowym dla podstawowej harmonicznnej [1]. Falownik jest zasilany napięciem stałym o wartości U_s , które przekazywane jest do układu rezonansowego L, C, R za pomocą kluczkowania, przy czym kondensator C , dodatkowo blokuje składową stałą źródła zasilania (rys. 1). Aby uzyskać duże prądy i jak najmniejsze straty mocy w falowniku stosuje się obwód rezonansowy szeregowy zawierający skupione elementy indukcyjne i pojemnościowe, dostrojony do częstotliwości rezonansowej układu roboczego. Częstotliwość ta zwykle jest dobrana w pewnym zakresie ograniczonym od góry przez właściwości dynamiczne elementów przełączających oraz wydzielającą się w nich mocą (powodującą ich nagrzewanie się) oraz dolną częstotliwością pasma fal radiowych tak, aby nie wprowadzać do nich zakłóceń przemysłowych.

Cały układ sterowania pracuje z wykorzystaniem pętli fazowej PLL, umożliwiającą samoczynne dostrajanie się do częstotliwości rezonansowej poprzez wyzwalania par

tranzystorów mocy (kluczy) nadążając za częstotliwością rezonansową układu. Zmienne wartości indukcyjności cewki L , bo ta wielkość najczęściej ulega zmianie, zależnie od aktualnych parametrów obwodu roboczego, powodują automatyczną zmianę częstotliwości wyzwalania poszczególnych par kluczy, co pociąga za sobą ciągłe nadążanie za zmianami parametrów obwodu roboczego.



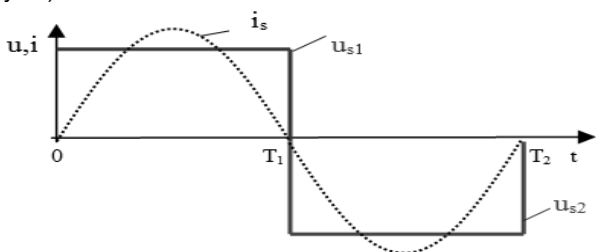
Rys.1. Schemat układu zasilania dla falownikowego obwodu rezonansowego

Zasilanie falownika zwykle jest realizowane w układzie pełnego mostka typu H. Aby pokazać szczegółowo sposób działania falownika, należy określić funkcjonowanie kluczy sterujących w czasie jednego pełnego cyklu pracy tego mostka, to jest od 0 do czasu T_2 . Czas od 0 do T_1 uzależniony jest od aktualnych parametrów obwodu dla częstotliwości podstawowej układu rezonansowego, regulatorem jest pętla fazowa PLL. Całkowity czas cyklu pracy podzielono na dwa równe okresy: od 0 do T_1 oraz od T_1 do T_2 . W czasie od 0 do T_1 załączane są klucze K_1 i K_3 a w czasie od T_1 do T_2 załączane są klucze K_2 i K_4 .

Procesowi załączania i wyłączania odpowiednich kluczy towarzyszy pojawienie się na wyjściu wymuszenia napięciowego w postaci napięcia przemiennego o przebiegu prostokątnym pobudzającego obwód rezonansowy do drgań elektrycznych o przebiegu sinusoidalnym. Globalny charakter zjawisk, zachodzących w układzie rezonansowym może być identyfikowany jako szeregowy stan nieustalony obwodu L, C, R pobudzanego przemiennym napięciem impulsowym.

W gałęzi obwodu rezonansowego niezbędny jest czujnik umożliwiający detekcję przejścia prądu przez zero. Znajomość chwili przejścia prądu przez zero jest niezbędna dla wysterowania odpowiednich par tranzystorów mocy typu MOSFET (kluczy sterujących) z zapewnieniem przerwy czasowej „death-time” służącej do wyeliminowania przypadków równoczesnego działania obu par kluczy.

Napięcie zasilające obwód rezonansowy po założeniu odpowiednich par kluczy (u_{s1} , u_{s2}) ma kształt prostokątny o dopuszczalnym 50% wypełnieniu i wartości równej napięciu zasilania U_I . Proces założenia i wyłączenia odpowiednich kluczy spowoduje pojawienie się na gałęzi rezonansowej L, C, R napięcie przemienne o przebiegu prostokątnym (rys.2).



Rys. 2. Przebiegi czasowe napięć sterujących obwód rezonansowy oraz przebieg podstawowej harmonicznej prądu w obwodzie rezonansowym przy dostrojeniu obwodu do częstotliwości pracy.

Odbiornik tworzy obwód szeregowy L, C, R dobrany dla warunku rezonansu prądu dla trzeciej harmonicznej, poddawany skokowemu wymuszeniu napięciowemu, w którym prąd nieustalony, dla każdej harmonicznej, ma przebieg oscylacyjny tłumiony. Włączenie kluczy K_1 i K_3 powoduje pojawienie się w obwodzie L, C, R odpowiedzi prądowej układu (prądu) na podanie na jego wejściu dodatniej wartości napięcia stałego. Gdy prąd ten przechodzi przez zero następuje wyłączenie pary tranzystorów K_1 i K_3 i włączenie pary tranzystorów K_2 i K_4 a w układzie L, C, R przepływa prąd stanowiący odpowiedź układu na ujemną wartość napięcia stałego.

Z jednej strony wygenerowany prąd w obwodzie jest odkształcony z drugiej strony dla każdej harmonicznej, ma on przebieg oscylacyjny tłumiony.

Weźmy pod uwagę dowolny obwód szeregowy L, C, R włączany na napięcie stałe U , znajdujący się przed komutacją w stanie bezenergetycznym, w którym pomiędzy parametrami obwodu zachodzi związek $R \ll 2\sqrt{L/C}$. W celu określenia przebiegu napięcia na kondensatorze bierze się pod uwagę się równanie różniczkowe:

$LCu_c'' + RCu_c' + u_c = 0$, gdzie napięcie na kondensatorze u_c : $u_c(0^+) = 0$, $u_c'(0^+) = 0$ a napięcie ustalone na kondensatorze $u_{cu} = U$, natomiast prąd jest określany z zależności $i = Cu_c'$. Równanie charakterystyczne tego równania różniczkowego, można zapisać w postaci:

$s^2 + sR/L + 1/(LC) = 0$, a przy podanym założeniu dotyczącym stosunku wartości elementów, pierwiastki równania charakterystycznego są zespolone i sprzężone: $s_1 = -\alpha + j\omega$, $s_2 = -\alpha - j\omega$, w których $\alpha = R/2L$, $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2}$. Napięcie nieustalone na kondensatorze,

będące rozwiązaniem równania różniczkowego można przedstawić w postaci: $u_c(t) = U + (A_1 \sin \omega t + A_2 \cos \omega t)e^{-\alpha t}$ gdzie A_1, A_2 stałe wyznaczone na podstawie warunków początkowych obwodu. Po określeniu stałych otrzymano wyrażenia na napięcie na kondensatorze:

$$(1) \quad u_c = U - \frac{Ue^{-\alpha t}}{\omega\sqrt{LC}} \sin(\omega t + \delta), \text{ gdzie } \operatorname{tg} \delta = \frac{\omega}{\alpha}.$$

Prąd w obwodzie L, C, R określany jest zależnością:

$$(2) \quad i = Cu_c' = \frac{Ue^{-\alpha t}}{\omega L} \sin \omega t$$

i ma on przebieg sinusoidalny o pulsacji ω zanikający zgodnie z wyrażeniem $e^{-\alpha t}$. Przy prawidłowym doborze parametrów obwodu L, C, R prąd każdej harmonicznej w tym obwodzie powinien mieć przebieg sinusoidalny tłumiony. Ponieważ realnie wyrażenie α ma niewielką wartość, a dla trzeciej harmonicznej oddziaływanie wyrażenia $e^{-\alpha t}$ na jej przebieg trwa bardzo krótki czas (w rzeczywistym układzie rzędu setek nanosekund) można założyć, że wartość modułu prądu trzeciej harmonicznej, przy stałych parametrach obwodu w interesującym nas czasie, nie ulega większym zmianom.

Stosując metodę Fouriera, prąd w obwodzie można przedstawić w postaci szeregu zawierającego nieparzyste harmoniczne, zgodnie z wyrażeniem:

$$(3) \quad i(t) = \frac{4U_w}{\pi} \sum_{n=1,3,5,7,\dots} \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(n\omega L - \frac{1}{n\omega C}\right)^2}} \frac{1}{n} \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

gdzie: U_w – wielkość amplitudy napięcia o przebiegu prostokątnym ($U_w = |u_{s1}| = |u_{s2}|$), n - numer harmonicznej, ω - pulsacja, φ_n - kąt przesunięcia fazowego n -tej harmonicznej, określane z zależności:

$$(4) \quad \varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{\left(n\omega L - \frac{1}{n\omega C}\right)}{R}$$

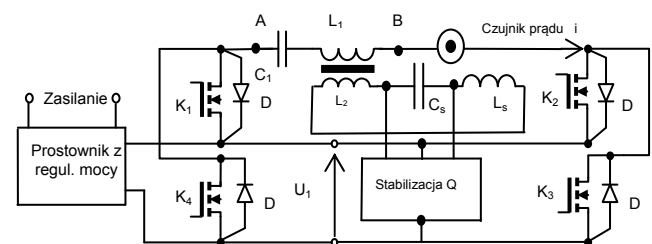
Rzeczywisty przebieg prądu w obwodzie rezonansowym L, C, R dla trzeciej harmonicznej wynika z superpozycji przebiegu oscylacyjnego tłumionego prądu i przebiegu prądu dla tej harmonicznej otrzymanej z metody Fouriera w którym $\varphi_3=0$. Wtedy prąd w obwodzie L, C, R z rezonansem prądowym, dla trzeciej harmonicznej ma postać:

$$(5) \quad i(t) = \frac{4U_w e^{-\alpha t}}{3\omega L R \pi} \sin 3\omega t$$

i jest prądem sinusoidalnym tłumionym zgodnie z zależnością $e^{-\alpha t}$.

Działanie rezonansowego falownika pracującego z trzecią harmoniczną prądu

Zasilanie falownika zostało zaprojektowane w układzie pełnego mostka typu H, w którego głównej gałęzi podłączony został transformator dopasowujący oraz kondensator C_1 blokujący składową stałą źródła zasilania (rys. 3).



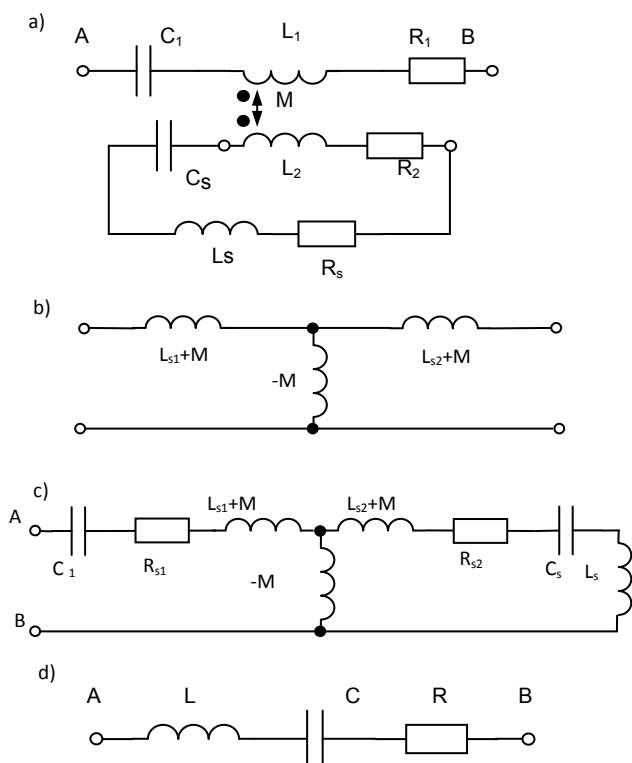
Rys.3. Rzeczywisty schemat falownika rezonansowego dla trzeciej harmonicznej. Przyjęto następujące oznaczenia: U_I - napięcie zasilania obwodu, K - tranzystory mocy typu MOSFET, D - diody zwrotne, L_1 - indukcyjność strony pierwotnej transformatora z rdzeniem ferrytowym, L_2 - indukcyjność strony wtórnej transformatora, L_5 - indukcyjność pozostałych elementów obwodu rezonansowego, C_5 - pojemność dołączona do strony wtórnej transformatora ferrytowego, R_2 - niewielka rezystancja strony wtórnej transformatora (tu pominięta).

Rezonans prądów występuje tylko dla trzeciej harmonicznej i dla tej harmonicznej prąd w obwodzie wyjściowym osiąga zdecydowanie największą wartość. Dlatego prądy generowane przez pierwszą i harmoniczne o

numerach większych od trzy mają wartość skuteczną mniejszą niż prąd trzeciej harmonicznej i wkład tych prądów w przekazywanie mocy przez falownik jest niewielki.

Zmiana wielkości przekazywanej mocy, realizowana jest za pomocą zmiany wartości stałego napięcia zasilania, a w praktycznych układach przy pomocy tzw. „chopera” (poprzez zmianę współczynnika wypełnienia napięcia stałego ładującego baterie kondensatorów).

Dostosowanie obwodu obciążenia do potrójonej częstotliwości rezonansowej układu pracy falownika umożliwia stosowanie tradycyjnych systemów wyzwania i kontroli jego pracy przy trzykrotnym podniesieniu częstotliwości roboczej obwodu wyjściowego.



Rys. 4. Schemat układu rezonansowego: a) schemat zastępczy układu rezonansowego z transformatorem, b) schemat zastępczy transformatora z rdzeniem ferrytowym c) przeniesiony na stronę pierwotną układ rezonansowy dla trzeciej harmonicznej d) wypadkowy schemat obwodu.

W falowniku wykorzystano zjawisko rezonansu prądów dla trzeciej harmonicznej w dwóch gałęziach pokazanych na schemacie zastępczym transformatora z rdzeniem ferrytowym (rys.4a). Na tym rysunku przedstawiony został schemat zastępczy transformatora dopasowującego, na którym oznaczono: L_1, R_1, L_2, R_2, M oznaczając kolejno: indukcyjności oraz rezystancje uzwojeń cewki pierwotnej 1 i wtórnej 2 transformatora oraz współczynnik indukcyjności wzajemnej pomiędzy uzwojeniami transformatora. Stronę wtórną transformatora dopasowującego obciążono przyłączoną szeregowo baterią kondensatorów bezindukcyjnych C_s i wzbudnikiem L_s, R_s . Elementy L_s, R_s wykonane zwykle w postaci jednego zwoju przewodu Litza lub jednego zwoju wykonanego z rurki miedzianej z przepływającą wewnątrz wodą odprowadzającą wydzielające się ciepło, stanowią odpowiednio indukcyjność i rezystancję obciążenia strony wtórnej uzwojenia transformatora. Pojemność C_1 strony pierwotnej transformatora jest to pojemność kondensatora blokującego składową stałą zasilania, natomiast pojemność C_s , włączona do strony wtórnej transformatora, jest

pojemnością kondensatora rezonansowego. Pojemność C_s jest tak dobrana, aby układ wyjściowy transformatora był w stanie rezonansu prądowego dla trzeciej harmonicznej a pozostałe elementy obwodu tworzyły od strony zacisków A-B obwód szeregowy L, C, R . Układ sterowania systemem kluczy K powoduje wzbudzenie obwodu wejściowego transformatora napięciami U_{s1} i U_{s2} powodując dostarczanie energii do pobudzenia drgań o potrójonej częstotliwości w obwodzie wyjściowym.

Na podstawie pomiarów wyznaczone zostały parametry schematu zastępczego transformatora, które odpowiednio wynoszą $L_{s1}=864$ [μH], $L_{s2}=6$ [μH]. Przy założeniu współczynnika sprzężenia $k=1$ (ferrytowy rdzeń transformatora), z zależności $M = k\sqrt{L_{s1}L_{s2}}$ została wyznaczona wartość współczynnika indukcyjności wzajemnej $M=72$ [μH] (rys. 4b). Parametry otrzymanego układu zastępczego transformatora wyjściowego wynoszą: $L_{s1}+M = 936$ [μH], $L_{s2}+M = 78$ [μH].

Przechodząc do opisu szczegółowego pracy tej części układu (rys 4c), kondensator C_s służy tylko do doprowadzenia obwodu do rezonansu prądów natomiast wartość rezystancji R_s jest niewielka. Występująca w gałęzi środkowej schematu zastępczego transformatora wielkość indukcyjności wzajemnej $-M$ jest zasadniczo pojemnością, natomiast $L_{s2}+M$ jest indukcyjnością, którą poprzez włączenie szeregowo z nią pojemności C_s i indukcyjności L_2 powoduje zbliżenie obu wymienionych gałęzi równoległych względem siebie, do częstotliwości rezonansu równoległego (rezonansu prądów) dla trzeciej harmonicznej. Mimo tego, że gałęzie te nie są idealnie dostrojone do częstotliwości rezonansowej to prąd cyrkulujący w obwodzie rezonansu równoległego ma stosunkowo dużą wartość, jednak na wskutek asymetrii (występowanie w obwodzie rezystancji uzwojenia wtórnego transformatora. R_{s2} powoduje pojawienie się na zaciskach A-B dodatkowego prądu wyrównawczego, który dostarcza energię do obwodu rezonansowego. W przypadku idealnego rezonansu równoległego prąd ten byłby równy zero a układ rezonansowy stanowiłby wówczas przerwę w obwodzie.

Dobierając odpowiednio wartość kondensatora C_s można regulować, w pewnym zakresie, wartość prądu wyrównawczego czyli prądu przepływającego przez klucze.

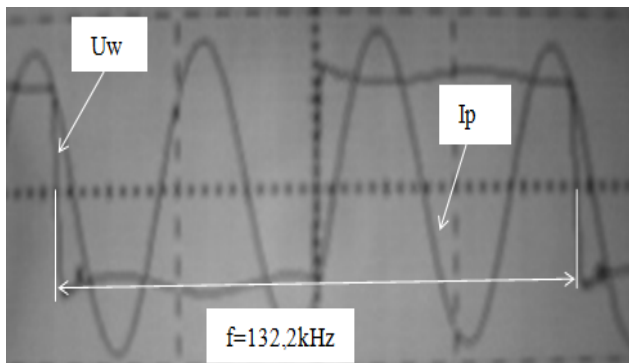
Wartości parametrów transformatora przeniesione na stronę pierwotną (rys. 4c), pozwalają na określenie wielkości zastępczych dla obwodu rezonansowego (jak np. dobroć obwodu) oraz jego częstotliwości roboczej.

Wypadkowy układ L, C, R widziany z zacisków A-B po wyeliminowaniu sprzężeń magnetycznych i uwzględnieniu zjawiska rezonansu został przedstawiony na rys.4d.

Zbudowany prototyp falownika i jego działanie

Prototyp falownika zbudowany został z przełączanych elementów mocy w postaci pełnego mostka pracującego w układzie typu H za pomocą metody kluczkowania [2] oraz sprzęgniętego z nim transformatora dopasowującego, oddzielającego galwanicznie obwody pierwotny i wtórny. Na wyjściu transformatora dopasowującego przyłączono szeregowo dodatkowe elementy tworzące obwód rezonansowy, składające się z baterii kondensatorów bezindukcyjnych oraz wzbudnika (powietrznej cewki indukcyjnej). Wielkością odniesienia w stosowanym układzie przekształtnikowym o obciążeniu rezonansowym jest pobudzające napięcie stałe o wartości U_w , które ma kształt prostokątny o maksymalnym, 50% wypełnieniu.

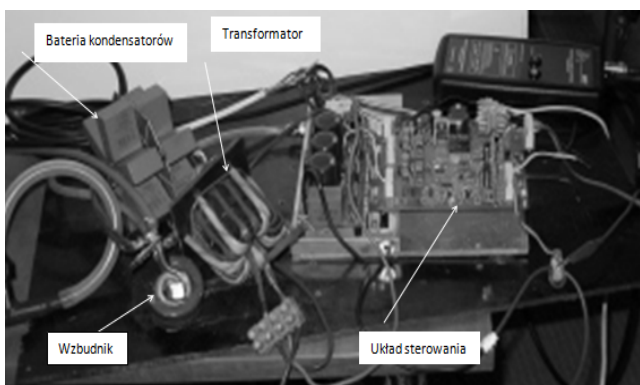
Rzeczywisty przebieg napięcia wymuszającego oraz przebieg prądu w gałęzi A-B (trzecia harmoniczna) pokazano na rys. 5.



Rys.5. Przebiegi po stronie pierwotnej transformatora, gdzie: U_w - przebieg napięcia wzbudającego w punkcie A, I_p - prąd strony pierwotnej transformatora.

Wyniki badania laboratoryjnego urządzenia

Na rys.6 pokazany został zbudowany i przetestowany model falownika pracującego z potrójną częstotliwością odniesiona do częstotliwości obwodu wzbudania.



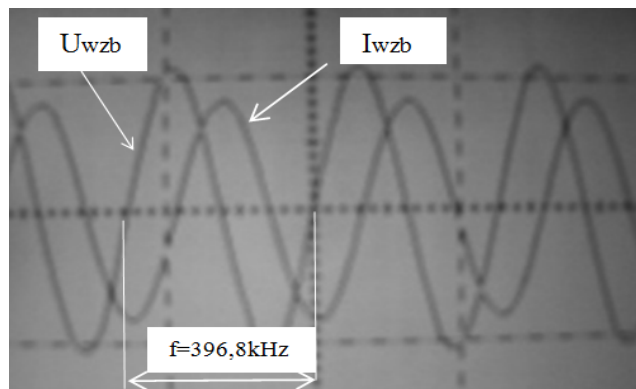
Rys.6. Prototyp zbudowanego falownika szeregowego pracującego z trzecią harmoniczną

Prąd roboczy I_{wzb} w zbudowanym prototypie (rys. 7) ma przebieg sinusoidalny minimalnie tłumiony o odpowiednio dobranej częstotliwości (poprzez dobór wartości pojemności C_s). Rezonans prądów występuje tylko dla trzeciej harmoniczej, dlatego dla trzeciej harmoniczej prąd w tym obwodzie osiąga zdecydowanie największą wartość (rys.7), większą niż prąd harmoniczej podstawowej. Wartości prądów generowanych przez piątą, siódmą i kolejne wyższe harmoniczne, ze względu na wzrost impedancji obwodu dla tych harmonicznych są dużo mniejsze i nie wnoszą istotnego wkładu w bilans mocy wyjściowej urządzenia. Do badania prototypu użyto baterii kondensatorów bez chłodzenia wodą, ograniczyło to możliwości pomiarowe do ok. 400 [W] mocy wyjściowej. Zmiana wartości mocy wyjściowej, realizowana jest przez zmianę wartości zasilającego napięcia stałego. Dostosowanie obwodu obciążenia do potrójonej częstotliwości rezonansowej układu pracy falownika umożliwia stosowanie tradycyjnych analogowych systemów wyzwalania i ciągłą kontrolę jego pracy przy podwyższonej częstotliwości roboczej obwodu wyjściowego.

Wstępne badania wykonane na prototypie jednofazowym przeprowadzono przy mniejszym obciążeniu mocy w celu optymalizacji konstrukcji falownika i systemu sterowania. Aktualnie prace skoncentrowane są na podniesieniu mocy wyjściowej falownika.

Po powiększeniu baterii kondensatorów w zasilaczu z pojemności 660 [μ F] do 1000 [μ F], np. w wykonaniu krajowej firmy MITRA (Kutno) [3], możliwe jest uzyskanie

mocy wyjściowej przekraczającej 2 [kW], co jest optymalnym rozwiązaniem dla zasilania jednofazowego. Istnieje również możliwość modernizacji falownika i przystosowanie go do zasilania z sieci trójfazowej o mocy wyjściowej zwiększonej do 7,5 [kW].



Rys.7. Wykresy przebiegów napięcia i prądu wzbudnika na wyjściu falownika (wartości między-szczytowe ($U_{wzb}=21,4[V]$, $I_{wzb}=82[A]$).

Do praktycznej realizacji prototypu wykorzystano elementy falownika pracującego na podstawowej częstotliwości zaprojektowanego i wykonanego przez mgr inż. Romana Czyżę z Politechniki Częstochowskiej, do którego został wykonany dodatkowy układ sterowania oraz zmodyfikowany transformator wyjściowy ze wzbudnikiem, dostrojonym do częstotliwości trzeciej harmoniczej.

Wnioski

Badania laboratoryjne potwierdziły zalety prototypu rezonansowego falownika prądowego z układem przełączania elementów mocy poniżej 150 [kHz], to jest poniżej pasma zakłóceń radioelektrycznych a jednocześnie pracę przy częstotliwości urządzeń przemysłowych wynoszących 450 [kHz]. Sprawdziła się zaproponowana w pracy [2] koncepcja potrójonej częstotliwości roboczej falownika co, w porównaniu do innych stosowanych rozwiązań, upraszcza układ sterowania ponieważ układ wzbudania pracuje poniżej częstotliwości pasma fal radiowych.

LITERATURA

- [1] Citko T., Tunia H., Winiarski B., Układy rezonansowe w energoelektronice, Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, t.23, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 2001, s. 288, ISBN 8388229281, 9788388229282
- [2] Gąsiorowski A., Posytek Z., Praktyczna realizacja rezonansowego falownika szeregowego pracującego z potrójną częstotliwością względem częstotliwości przełączania elementów, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), nr 12, 370-373, ISSN 0033-2097
- [3] Mitra-Kutno, Filtry i Kondensatory, Katalog, Mitra Sp. z o. o., Kutno, wydanie 2015 r
- [4] 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, s. 206, ISSN 0209-0597

Autorzy: dr inż. Aleksander Gąsiorowski, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Zakład Podstaw Elektrotechniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: alekq@el.pcz.czest.pl; dr inż. Zdzisław Posytek, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Zakład Energoelektroniki i Podstaw Telekomunikacji, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: zdzychu@el.pcz.czest.pl.