

Model prototypowego zoptymalizowanego piecyka indukcyjnego o częstotliwości pracy 370 kHz działającego z podstawową harmoniczną dla obwodu wzbudzenia

Streszczenie. W pracy przedstawiono prototyp optymalnego układu falownika pracującego z podstawową harmoniczną częstotliwości układu wzbudzenia z elementami mocy wykonanymi na bazie węgla krzemu. Wykorzystano mostkowy prostownik zasilany z układu jednofazowego lub trójfazowego podający napięcie stałe na wejście falownika. W falowniku zastosowano układ aktywnej korekcji współczynnika mocy PFC. Jako elementy wykonawcze zastosowano dwa rodzaje cewek wzbudnika: jednej umieszczonej w powietrzu oraz drugiej z zewnętrzną otuliną wykonaną z materiału ferromagnetycznego co zapewnia bezpieczeństwo przed polami elektromagnetycznymi obsłudze piecyka.

Abstract. The paper presents a prototype of the optimal inverter system working with the fundamental harmonic of the frequency of the excitation system with power elements made on the basis of silicon carbide. A bridge rectifier supplied from a single-phase or three-phase system was used, supplying DC voltage to the inverter input. The inverter uses an active power factor correction (PFC). As actuators, two types of inductor coils were used: one placed in the air and the other with an external envelope made of ferromagnetic material, which ensures the safety of electromagnetic fields in the operation of the stove. (Prototype optimized induction heater with 370 kHz operating frequency working with the fundamental harmonic of the excitation circuit).

Słowa kluczowe: falownik, układ PFC, urządzenie grzejne, bezpieczeństwo pracy.

Keywords: inverter, PFC circuit, heater, safety work.

Wstęp

W indukcyjnych urządzeniach grzewczych dla użytkownika istotnymi elementami są: mały pobór energii oraz wysoki współczynnik mocy - czyli niskie koszty eksploatacji, duża skuteczność działania oraz szybkość działania dostosowana do zaleceń technologicznych wykonywanego wyrobu. Przy braku możliwości zakupu urządzenia o wskazanych parametrach należy takie urządzenie zbudować. Przy budowie prototypu tego piecyka autorzy wykorzystali doświadczenie zdobyte w czasie prac, których wyniki przedstawiono w publikacjach [2,3]. Jak wykazały badania, lepsze możliwości przekazywania energii elektrycznej daje rezonans szeregowy [1,5] i taki układ został tu wykorzystany do grzania indukcyjnego w prototypowym zoptymalizowanym piecyku indukcyjnym o częstotliwości pracy 370 kHz działającym z podstawową harmoniczną obwodu wzbudzenia. Zastosowanie elementów półprzewodnikowych w postaci układu prostownikowego (jednofazowego lub trójfazowego) oraz zastosowanie metody kluczowania do generacji przebiegów prostokątnych wyższych częstotliwości, może prowadzić do powstawania w obwodzie przebiegów odkształconych.

Od 1 stycznia 2001 w krajach Unii Europejskiej zaczęła obowiązywać norma EN 61000-3-2 *Kompatybilność Elektromagnetyczna (EMC) Część 3-2: Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznego prądu (fazowy prąd zasilający odbiornik mniejszy od 16 amper)*, dotycząca ochrony publicznych sieci elektroenergetycznych przed przewodzoniami zakłóceniami poprzez ograniczenie wprowadzania harmonicznego prądu do sieci zasilającej przez urządzenia do niej podłączone. We współczesnym świecie nasyconym układami elektroniki, automatyki i mechatroniki za kształt prądu pobieranego z sieci odpowiedzialne są przede wszystkim przemysłowe układy prostownicze stanowiące pierwsze ogniwo łączące je z siecią elektroenergetyczną. Zastosowanie aktywnej korekcji współczynnika mocy PFC (skrót od ang. *Power Factor Correction*), pozwala na zwiększenie współczynnika mocy całego układu do wartości bliskiej jedności a dodatkowo zmniejsza całkowity pobór prądu z sieci elektroenergetycznej, sprowadzając go do przebiegu zbliżonego do sinusoidy [2,4]. W zastosowanym rozwiązaniu

technicznym, zwrócono uwagę na ochronę zdrowia i bezpieczeństwo elektromagnetyczne pracujących przy tym urządzeniu.

Wpływ urządzeń indukcyjnych na bezpieczeństwo pracy jego obsługi

Pole elektromagnetyczne jest obecne w środowisku pracy ludzi ze względu na powszechne wykorzystywanie energii elektrycznej w urządzeniach produkcyjnych oraz łączności bezprzewodowej. Obsługa maszyn i urządzeń elektrycznych w sposób nieprzerwany podlegają jego oddziaływaniu. Wiadomo, że skutki takiej ekspozycji zależą między innymi od stanu zdrowia pracującego, częstotliwości, poziomu, czasu oddziaływania oraz przestrzennego rozkładu pola elektromagnetycznego. Należy zwrócić uwagę, że oddziaływanie pola elektromagnetycznego na człowieka może być istotnie groźne jeżeli dotyczy ono pracowników zaopatrzonych w aktywne implanty medyczne (stymulatory serca, defibrylatory, pompy insulinowe, słuchowe). W przypadku oddziaływania bardzo silnego pola elektromagnetycznego, pracownicy posiadający również implanty pasywne (np. endoprotezy i stenty naczyniowe) mogą być zagrożone jego oddziaływaniem (ciepło wydzielane w implantach). Skutkiem bezpośrednim oddziaływania pola elektromagnetycznego na ludzi jest indukowanie w ich organizmach potencjałów elektrycznych, wywołujących przepływy w ich ciele prądów elektrycznych oraz wydzielanie się ciepła. Przy dostatecznie silnej ekspozycji prądy indukowane w organizmie mogą powodować stymulację centralnego i obwodowego układu nerwowego. Dodatkowo wydzielone w organizmie ciepło może powodować lokalny wzrost temperatury tkanek wewnętrznych lub powierzchniowych. Narażenie na silne pola elektromagnetyczne może doprowadzić do uszkodzenia termicznego organizmu lub do niekontrolowanego i nieprawidłowego działania układu nerwowego.

Jest oczywiste, że w zespole urządzeń pole elektromagnetyczne może wpływać na zdrowie ludzi oddziałując pośrednio, na zmiany funkcjonowania maszyn i urządzeń pod wpływem indukowanych w nich prądów elektrycznych pobudzanych przez inne maszyny i

urządzenia elektryczne. A te prądy przepływające podczas dotknięcia przez pracowników do części metalowych maszyn i urządzeń (zwane prądami kontaktowymi) mogą być znacznie większe niż prądy indukowane bezpośrednio w organizmie. Prąd kontaktowy może spowodować pobudzenie układu nerwowego pracownika oraz wywołać skutki termiczne.

Projektanci i wykonawcy prototypów elektrycznych urządzeń indukcyjnych często nie zwracają uwagi na ewentualne narażenie pracowników obsługi na zagrożenia oddziaływaniem pól elektromagnetycznych, zostawiając ten problem nabywającym. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej z czerwca 2013 roku [PN1], Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z listopada 2002 [PN2] oraz norma PN-T-06580 [PN3] podają minimalne wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane oddziaływaniem pola elektromagnetycznego, określają najwyższe dopuszczalne natężenia pola i promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości 0 [Hz] – 300 [GHz] a także podają metody pomiaru i oceny pola elektromagnetycznego na stanowisku pracy.

Parametry elektryczne prototypowego piecyka indukcyjnego

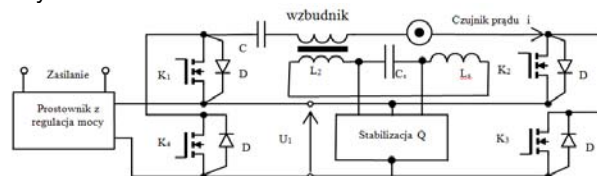
Układ piecyka z falownikiem oraz aktywną korekcją PFC zasilany jest napięciem sieciowym (jednofazowym lub trójfazowym), a napięcie stałe zasilające falownik może dochodzić do 400 [V] przy prądzie pobieranym z sieci rzędu 10 [A] i mocy pobieranej z sieci wynoszącej 2,4 [kW], przy współczynniku mocy PF dochodzącym do około 0,95.

Falownik jest zasilany napięciem stałym pochodzącym z mostka prostowniczego, które za pomocą zmiany współczynnika wypełnienia przekazywane jest do szeregowego układu rezonansowego po stronie wtórnej transformatora. Aby uzyskać duże prądy i jak najmniejsze straty mocy w falowniku układ roboczy dostrojony jest do częstotliwości rezonansowej $f=370$ [kHz]. Częstotliwość ta w pewnym zakresie jest ograniczona od góry przez właściwości dynamiczne elementów przełączających oraz wydzielającą się w nich mocą (powodującą ich nagrzewanie się).

Badania elektryczne piecyka indukcyjnego

Cały układ sterowania pracuje z wykorzystaniem pętli fazowej PLL, umożliwiającej samoczynne dostrajanie się do częstotliwości rezonansowej poprzez wyzwalania par tranzystorów mocy (klucze) nadążając za częstotliwością rezonansową układu. Zmienne wartości indukcyjności cewki wzbudnika, 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. W falowniku zastosowano układ aktywnej korekcji współczynnika mocy PFC dołączony od strony sieci zasilającej. Pozwoliło to na zwiększenie współczynnika mocy całego układu do wartości bliskiej jedności co jednocześnie zmniejszyło całkowity prąd pobierany z sieci. Dodatkowo ograniczono straty mocy biernej i odkształcenia do minimum, powodując równość fazy prądu wejściowego z fazą napięcia sieciowego zasilania, a prąd pobierany z sieci osiągał wartość minimalną. Spowodowało to zwiększenie mocy wyjściowej falownika przy niewiele większym poborze prądu z sieci. W układzie falownika piecyka wykorzystano nowoczesne elektroniczne elementy mocy wykonane na bazie węgla krzemowego (SiC) o wysokiej dopuszczalnej temperaturze pracy, co spowodowało wzrost sprawności całego urządzenia.

Zasilanie piecyka zostało zaprojektowane w układzie pełnego mostka H , w którego głównej gałęzi podłączony jest transformator dopasowujący oraz kondensator C blokujący składową stałą źródła zasilania (rys.1). Dodatkowo w gałęzi tej znajduje się czujnik prądu (umożliwiający detekcję przejścia prądu przez zero). Znajomość chwili przejścia prądu przez zero jest niezbędna dlaysterowania odpowiednich par tranzystorów mocy (kluczy sterujących) do zapewnienia przerwy czasowej tak zwanego „death-time” służącej do wyeliminowania przypadków równoczesnego włączenia obu par kluczy.



Rys.1. Przykładowy schemat prototypowego piecyka na częstotliwość 370 kHz zasilanego z układu mostkowego jednofazowego lub trójfazowego. Wybrane oznaczenia: K-klucz z tranzystorem MOSFET z kanałem N typu C2M0080120D firmy *Wolfsped Cree*, Stabilizacja Q – układ progowego ograniczania przepięcia,

Badanie prototypowego piecyka indukcyjnego

Do badań prototypowego piecyka zastosowano dwa rodzaje cewek wzbudnika. Obie cewki wzbudnika mają 6 zwojów i wykonane zostały z rurki miedzianej o średnicy ϕ 5 [mm], długość cewek wynosi 32 [mm] i jest równa ich średnicy zewnętrznej (zoptymalizowany kształt wzbudnika). W czasie pracy wzbudnika w rurkach płynie woda.

Pierwszy rodzaj stanowi nieosłonięta cewka wzbudnika umieszczona w powietrzu (rys 2). Jako drugi rodzaj zastosowano taką samą cewkę wzbudnika z zewnętrzną otuliną wykonaną z materiału ferromagnetycznego firmy *Fluxtrol* (rys. 3) o względnej przenikalności magnetycznej, dla stosowanego zakresu częstotliwościowego pracy prototypu grzejnika, wynoszącej $\mu_r = 10$. Ten elastyczny, plastyczny materiał twardnieje pod wpływem temperatury. Do wnętrza każdej cewki można wsunąć rurę nieferromagnetyczną, tygiel ceramiczny lub materiał diaferromagnetyczny.



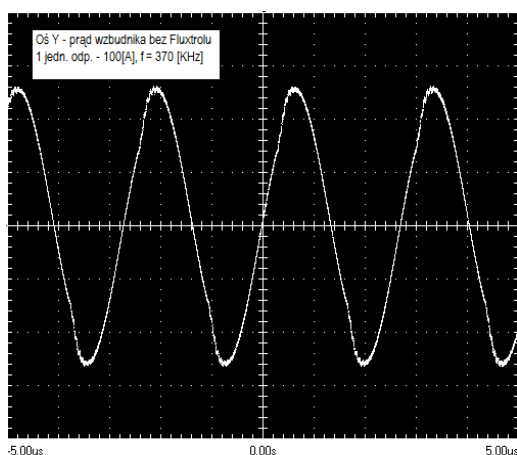
Rys.2. Cewka wzbudnika wykonanego z rurki miedzianej bez otuliny, z rurą ze stali nieferromagnetycznej umieszczoną wewnątrz.



Rys.3 Cewka wzbudnika wykonanego z rurki miedzianej, z otuliną wykonaną z materiału firmy Fluxtrol, z rurą nieferromagnetyczną we wnętrzu.

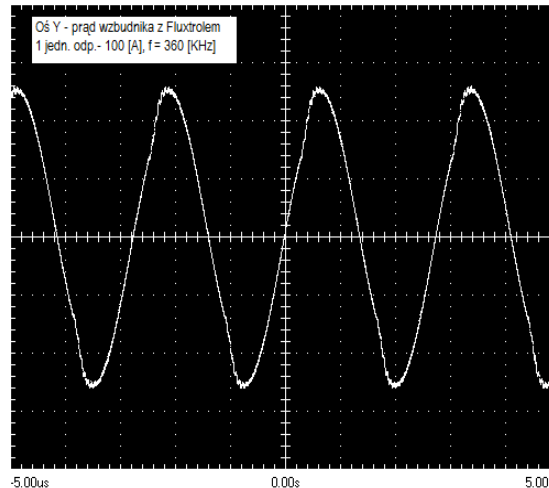
W celu przeprowadzenia badań prototypowego piecyka indukcyjnego do wnętrza cewek obu wzbudników wprowadzono centrycznie rury wykonane ze stali nieferromagnetycznej (austenitycznej) o średnicy zewnętrznej ϕ 20,5 [mm] i średnicy wewnętrznej ϕ 16,5 [mm] o długości 95 [mm].

Test zbudowanego piecyka przeprowadzono przy zastosowaniu zasilania trójfazowego piecyka oraz poborze mocy rzędu 1,2 [kW]. Wykonano pomiary prądu w cewce wzbudnika bez otuliny z Fluxtrolem (rys. 4) i z cewką, której zewnętrzną część otulono tym materiałem (rys. 5). Brak obłożenia Fluxtrolem cewki wzbudnika spowodował lekkie zwiększenie prądu (rzędu 1%,) oraz nieznaczne zmniejszenie napięcia na zaciskach cewki. Zastosowanie otuliny z Fluxtrolem spowodowało obniżenie częstotliwości pracy wzbudnika, zmniejszenie amplitudy przepływającego prądu w cewce wzbudnika i wzrost napięcia na cewce wzbudnika, przy niezmiennych parametrach zasilania obwodu prototypowego piecyka.



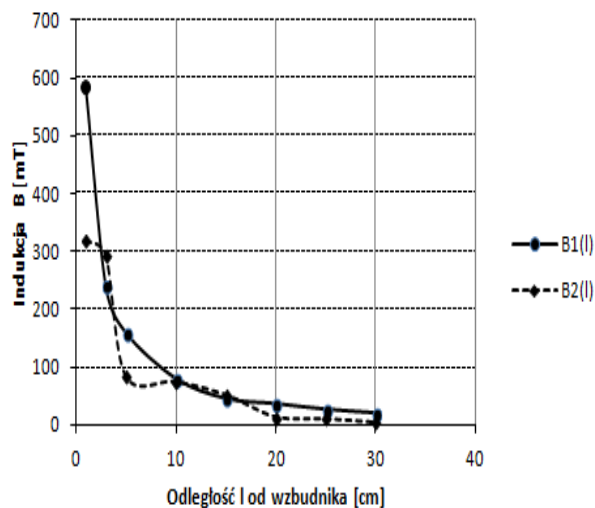
Rys. 4 Przebieg prądu w cewce wzbudnika bez otuliny. Częstotliwość pracy wyższa niż 370 [kHz] oraz wartość amplitudy prądu lekko mniejsza, natomiast wyższe jest napięcie. Związane jest to z rezonansem przy niższej częstotliwości.

W obu przypadkach pokazanych na rys. 4 i rys. 5 przebieg prądu w cewce wzbudnika nieznacznie odbiega od sinusoidy.



Rys. 5. Przebieg prądu w cewce z otuliną zewnętrzną wykonaną z Fluxtrolem. Częstotliwość pracy około 360 [kHz], wartość amplitudy prądu lekko mniejsza, natomiast wyższe jest napięcie. Związane jest to z rezonansem przy niższej częstotliwości.

Przeprowadzono również badania zmian wartości składowej magnetycznej natężenia pola elektromagnetycznego (dokładniej indukcji magnetycznej) w funkcji odległości l [cm] od brzegu miedzianej rurki wzbudnika, dla obu rodzajów cewek indukcyjnych wzbudnika (bez otuliny i w otulinie) umieszczonych w powietrzu (rys. 6). Tuż przy ścianie zewnętrznej rurki wzbudnika, indukcja magnetyczna B [mT] w cewce z otuliną jest ponad dwukrotnie mniejsza od indukcji magnetycznej tuż przy cewce wzbudnika bez otuliny. Wraz z oddalaniem się od brzegu cewki wzbudnika wartość indukcji magnetycznej w obu przypadkach maleje. Struktura otuliny Fluxtrol wpływa zapewne na to, że przebieg indukcji magnetycznej (na rys. 6) dla $B2(l)$ nie jest tak gładki i przewidywalny jak dla $B1(l)$. Zagadnienie kształtu i przebiegu krzywej $B2(l)$ wymaga zapewne dalszych badań.



Rys. 6. Przebieg indukcji magnetycznej B [mT] w funkcji odległości l [cm] od uzwojenia wzbudnika. Oznaczenia: $B1(l)$ – cewka wzbudnika nie otulona Fluxtrolem, $B2(l)$ – cewka wzbudnika na zewnątrz otulona Fluxtrolem.

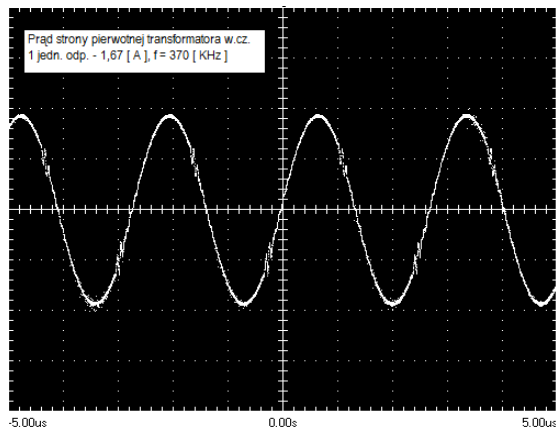
Pomiarów natężenia pola elektrycznego w powietrzu wokół cewek wzbudnika dokonano za pomocą miernika pola elektrycznego Tracer EF100 produkcji amerykańskiej (o dokładności pomiaru rzędu 1% i zakresie pomiarowym do 400 [kHz]) a następnie otrzymane wielkości przeliczono

w celu otrzymania indukcji magnetycznej w punktach pomiarowych. Otrzymane wartości naniesiono na wykres z rys. 6.

Według [6, str. 43, tab. 5] wartości graniczne indukcyjności magnetycznej (dopuszczalnej) B [μT] - ekspozycji zawodowej na pole elektromagnetyczne (według Dyrektywy Rady Europy 2004/40/EC - miary zewnętrzne), dla zakresu częstotliwości 0,065-1 [MHz] określona jest z zależności $B[\mu\text{T}]=2/f$, gdzie f jest częstotliwością w jednostkach z danego normowanego przedziału. Dla częstotliwości $f=370$ [kHz] wartość dopuszczalna indukcji magnetycznej wynosi $B=0,0054$ [μT]. Na podstawie pomiarów obsługa piecyka w sposób niezagrażony będzie mogła przebywać w odległości co najmniej 2 razy mniejszej dla urządzenia z cewką wzbudnika w otulinie.

Do pomiaru temperatury rury grzanej zastosowano termoparę typu k (NiCr-NiAl) wykonaną z pojedynczych drutów termoparowych o średnicy ϕ 0,2 [mm] każdy. Gorący koniec termopary zaklinowano w ścianie grzanej rurki w połowie strefy grzejnej. Sposób zamocowania spoiny końców termopary zapewnił powtarzalność pomiaru temperatury w testowanych rurach. Wykonano pomiar temperatury po czasie od uruchomienia piecyka wynoszącym 15 [s]. Otrzymując temperaturę 700 [°C] dla wzbudnika bez otuliny oraz temperaturę 750 [°C] dla wzbudnika z otuliną Fluxtrol. Różnica pomiędzy temperaturami wynosiła dla czasu 15 [s] - 50 [°C], wraz ze wzrostem czasu różnica ona aż do osiągnięcia stabilnej temperatury pracy prototypowego optymalizowanego piecyka indukcyjnego.

Na rys. 7 przedstawiono przebieg prądu po stronie pierwotnej transformatora wyjściowego



Rys. 7. Przebieg prądu po stronie pierwotnej transformatora w układzie mostka H dla częstotliwości rezonansowej. Pomiaru dokonano przekładnikiem prądowym o przekładni prądowej strony wtórnej do pierwotnej 50/1, obciążenie strony wtórnej przekładnika prądowego stanowi rezystor 15 [Ω].

Na rysunku 7 przebieg sinusoidy jest zakłócony. Widoczne na przebiegu zakłócenia związane są z pracą czopera podczas przełączania par tranzystorów w mostku typu H.

Wnioski

Pokrycie otuliną zewnętrznej powierzchni cewki wzbudnika spowodowało:

- zagęszczenie pola magnetycznego w jej wnętrzu a tym samym uzyskiwanie wyższych temperatur we wsadzie (nieferromagnetycznej rurze),
- zminimalizowanie wartości emisji pola elektromagnetycznego na zewnątrz cewki z otuliną w powietrzu otaczającym cewkę, powinno zwiększyć bezpieczeństwo obsługi.

Nałożenie otuliny umożliwiło obniżenie pobieranej energii z sieci zasilającej przy podobnych wyjściowych parametrach technologicznych grzania.

Działania te i przeprowadzone badania były przejawem dążenia autorów do tego, aby w przyszłym wykonaniu przemysłowym piecyka, przy jego częstotliwości pracy, spełniał on warunki dotyczące promieniowania pola elektromagnetycznego na zewnątrz określonego w wymaganiach emisji pola [PN2].

Autorzy: dr inż. Aleksander Gąsior, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: alekg@el.pcz.czest.pl; dr inż. Maciej Gliniak, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: m.gliniak@ur.krakow.pl; dr inż. Zdzisław Posytek, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: zdzychu@el.pcz.czest.pl.

PRZEPISY PRAWA I NORMY OCHRONY PRACY

- [PN1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca dyrektywę 2004/40/WE. Dz.Urz. L 179/1, z 29.6.2013.
- [PN2] Rozporządzeniu Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 27 czerwca 2016 roku zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Załącznik 2, Część E. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz. (Dz. U. RP z 30 czerwca 2016 roku, poz. 952).
- [PN3] PN-T-06580:2002 Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Arkusze 01. Terminologia. Arkusze 03. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy

LITERATURA

- [1] Cítko T., Tunia H., Winiarski B., Układy rezonansowe w energoelektronice, Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, tom 23, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 2001, s. 288 (ISBN 83-88229-28-1, ISBN-13 978-83-88229-28-2)
- [2] Gąsior A., Posytek Z., Rezonansowy falownik prądowy pracujący z trzecią harmoniczną obwodu wzbudzenia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 12, 95-98 (ISSN 0033-2097).
- [3] Gąsior A., Posytek Z., Drózd T., Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwosci popiołu metodą rurową, *Przegląd Elektrotechniczny* 91(2015), nr1, 144-147, ISSN 0033-2097.
- [4] Kazimierczuk M. K., Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd. (2015), p. 960 (ISBN 978-1-119-00954-2).
- [5] 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).
- [6] Zmyślony M., Politański P., Zagrożenia zdrowia i izochrona zdrowia pracujących w narażeniu na pola i promieniowanie elektromagnetyczne 0-300 GHz, *Instytut Medycyny Pracy im. Profesora J. Nofera, Łódź* 2009, s. 55. (ISBN 978-83-60818-38-1).