

INDUKCYJNE PODGRZEWANIE WODY UŻYTKOWEJ W ZAMKNIĘTYCH ZBIORNIKACH FERROMAGNETYCZNYCH

Streszczenie

W artykule omówiono problem ogrzewania indukcyjnego w przypadku zbiorników ciepłej wody użytkowej. Omówiono zjawisko naskórkowości związane z indukcją elektromagnetyczną oraz pokazano głębokość wnikania prądu w typowe materiały wykorzystywane w procesach nagrzewania indukcyjnego w zależności od częstotliwości. Pokazano najczęściej wykorzystywane topologie układów do grzania indukcyjnego tj. półmostkowy szeregowy i układ quasi-rezonansowy. Przedstawiono i omówiono zasadę działania ciekawszych rozwiązań stosowanych wspólnie do indukcyjnego ogrzewania pojemnościowych zbiorników wodnych. Omówiono, także zbudowany prototyp indukcyjnego podgrzewacza wody wraz z jego najważniejszymi parametrami. Podano schemat budowy i zasadę działania, oraz przedstawiono najważniejsze cechy zaprojektowanego urządzenia.

WSTĘP

Grzanie indukcyjne jest to nagrzewanie elektryczne polegające na generacji ciepła przy przepływie prądów wirowych wywołanych zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej w elementach sprzężonych magnetycznie.

Jest to metoda znana już od przełomu XIX i XX wieku i nadal szeroko wykorzystywana zarówno w przemyśle jak i w gospodarstwach domowych. O ile płyty indukcyjne wykorzystywane w naszych domach stały się już dawno standardem, to wykorzystanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej do pozyskania ciepłej wody użytkowej (C.W.U) nie znalazło jeszcze tak wielu zwolenników.

Na świecie istnieje już wiele rozwiązań pozwalających na ogrzewanie zbiorników wodnych poprzez zjawisko indukcji elektromagnetycznej, dlatego też w dalszej części artykułu przedstawiono najciekawsze z nich.

Producenci zamkniętych zbiorników wodnych wykorzystują różne konfiguracje indukcyjnych systemów grzewczych, często oparte o sterowanie z wykorzystaniem mikrokontrolerów. Rzadziej spotyka się układy, które mają jedną częstotliwość pracy i moc ustaloną na określonym poziomie.

Pomimo większej złożoności systemu indukcyjnego, w stosunku do popularnej grzałki elektrycznej, urządzenia te są ciekawą alternatywą jako metoda pozyskiwania C.W.U. W najprostszym ujęciu nagrzewanie indukcyjne to działanie zmiennego pola elektromagnetycznego na zbiornik wodny, który jest wykonany z materiału ferromagnetycznego (blacha stalowa). W materiale tym wydzielane jest ciepło, na skutek zjawiska histerezy magnetycznej oraz w wyniku działania prądów wirowych. W tym przypadku ciepło może być generowane bezpośrednio w materiale, który otacza wodę, podgrzewając ją tym samym. Większy nakład poniesionych kosztów, przy jego realizacji może być zrekompensowany wyższą trwałością i

dłuższym okresem działania urządzenia grzewczego. Na skutek grzania indukcyjnego w miejscu wydzielanego ciepła nie obserwuje się powstawania kamienia kotłowego, co bezpośrednio przyczynia się do utrzymania wysokiej sprawności urządzenia na niezmiennym poziomie w czasie długiego okresu eksploatacji.

1. ZJAWISKO NASKÓRKOWOŚCI

Przy projektowaniu indukcyjnych urządzeń grzewczych, zwracana jest szczególna uwaga na obwód rezonansowy, który tworzy uzwojenie indukcyjne wraz z dołączoną pojemnością. Na skutek zjawiska rezonansu, wartość prądu w obwodzie osiąga duże wartości. Uzwojenie indukcyjne musi być w stanie poradzić sobie z tym dużym prądem o wysokiej częstotliwości, dlatego też przy budowie uzwojeń indukcyjnych jest bardzo często wykorzystywana lica, składająca się z wielu izolowanych drutów nawojowych, zamiast z pojedynczego.

Nierównomierny w przekroju poprzecznym rozkład gęstości prądu przemiennego płynącego wewnątrz przewodnika elektrycznego nazywany jest zjawiskiem naskórkowości. Na powierzchni przewodnika prąd przemienny osiąga największą gęstość natomiast wraz ze zbliżaniem się do środka przewodnika gęstość maleje by w środku osiągnąć swoją minimalną wartość [6].

Na nierównomierność rozkładu prądu wpływa częstotliwość prądu oraz pole przekroju poprzecznego przewodnika. Im wyższa jest częstotliwość tym bliżej powierzchni przewodnika płynie prąd. Zjawisko to ma wpływ na wzrost efektywnej rezystancji przewodnika czego skutkiem są powstające w nim straty mocy.

Tab. 1. Przewodność i głębokość wnikania dla wybranych przewodników w temperaturze pokojowej [opracowanie własne]

Materiał	Przewodność (S/m)	Głębokość wnikania x 10 ⁻³ [m]					
		1kHz	10kHz	30kHz	100kHz	300kHz	1MHz
Miedź	5,80 x 10 ⁷	2,061	0,652	0,376	0,206	0,119	0,065
Aluminium	3,72 x 10 ⁷	2,593	0,820	0,473	0,259	0,150	0,082
Złoto	4,44 x 10 ⁷	2,382	0,753	0,435	0,238	0,138	0,075
Srebro	6,17 x 10 ⁷	2,004	0,634	0,366	0,200	0,116	0,063
Stal 1010	6,99 x 10 ⁶	0,602	0,190	0,110	0,060	0,035	0,019

Głębokość wnikania δ [m] wyraża się wzorem:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (1)$$

gdzie:

μ – przenikalność magnetyczna bezwzględna [H/m],

f – częstotliwość [Hz],

ρ – rezystywność materiału [Ωm].

2. UKŁADY STOSOWANE W PODGRZEWACZACH INDUKCYJNYCH

W typowych indukcyjnych podgrzewaczach wody, przede wszystkim wyróżnia się układy: półmostkowy szeregowy i quasi – rezonansowy. W każdym z tych układów można wyróżnić podzespoły takie jak: prostownik, falownik i wzбудnik (Rys. 1).

Każdy z tych układów ma swoje wady i zalety. Konwerter półmostkowy (Rys. 2) charakteryzuje się prostą konstrukcją, niską ceną i stabilnością układu przełączającego, jednak wymaga on dwóch obwodów oraz zsynchronizowanych przełączeń.

W układach quasi-rezonansowych (Rys. 3) jest tylko jeden tranzystor, dzięki czemu układ jest mniej skomplikowany, prostszy w serwisie i tańszy, jednak jest to układ mniej stabilny pod względem częstotliwości.

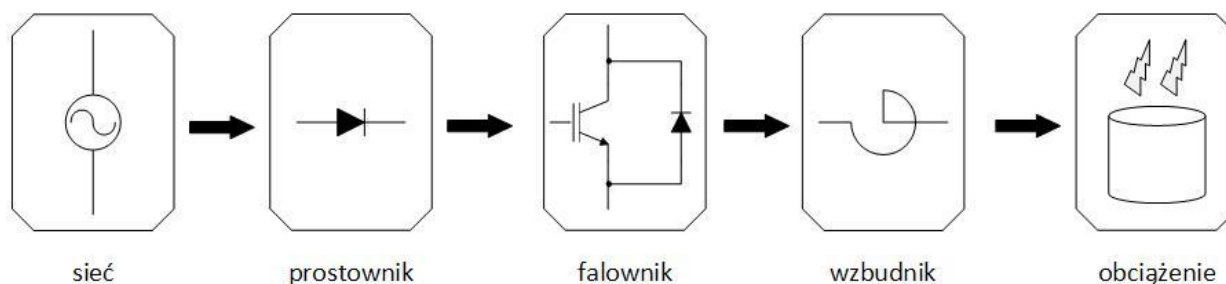
3. OPISY PATENTOWE

Do chwili obecnej pojawiło się wiele opisów patentowych dotyczących grzania indukcyjnego, a w szczególności podgrzewania wody w zbiornikach zamkniętych. Poniżej wyszczególniono cztery z

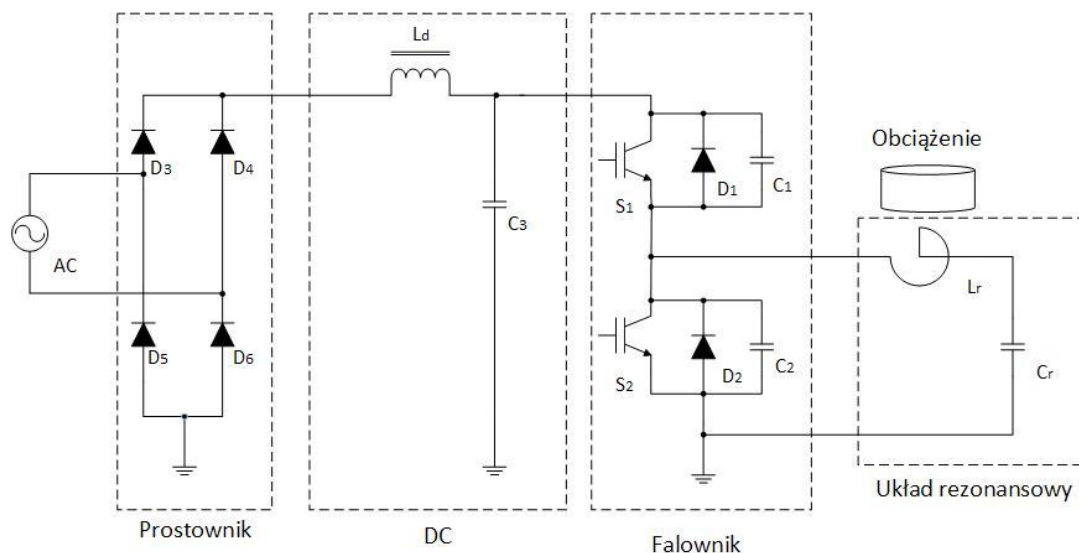
nich.

1. Elektryczny pojemnościowy ogrzewacz wody (nr zgłoszenia wynalazku 385218 - Kospel S.A.)
2. Wysokoczęstotliwościowy elektromagnetyczny ogrzewacz indukcyjny (ang. High frequency electromagnetic induction heater, nr publikacji JP7029673);
3. Element grzewczy do zbiornika z ciepłą wodą (ang. Heating element for hot water tank - nr publikacji CH681044);
4. Elektryczny ogrzewacz wody typu indukcyjnego (ang. Induction type water electric heater - Krasnojarskij Gosudarstvennyj Agrarnyj Universitet, Int. Cl. F 24 H 1/20)

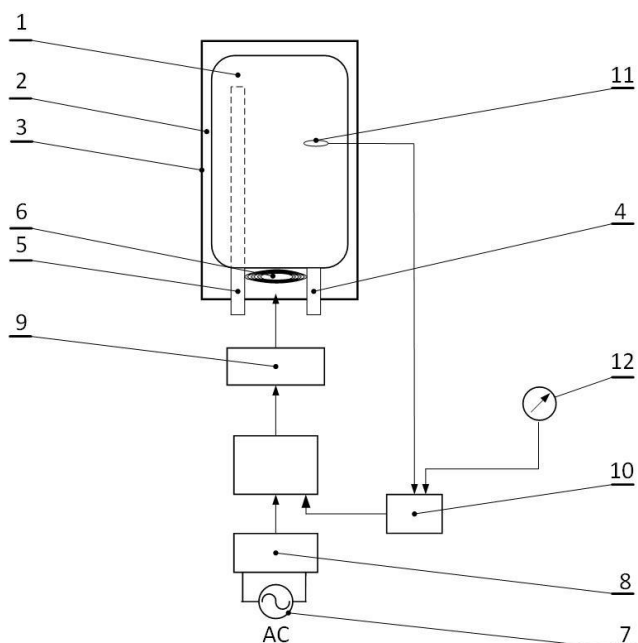
Istotą wynalazku zaproponowanego przez firmę Kospel S.A. jest cyt. "elektryczny pojemnościowy ogrzewacz wody, składający się z zbiornika (1) wody ogrzewanej i elektromagnetycznego, indukcyjnego układu grzeijnego, w którym elektroniczny stopień załączania (9) mocy z zasilacza (7) do cewki indukcyjnej (6) posiada wejście impulsów sterujących ze sterownika (10), sprzężonego z czujnikiem temperatury (11) i z regulatorem (12) temperatury wody. Indukcyjny układ grzeijny stanowią metalowe ściany zbiornika (1) w zestawieniu ze spiralną cewką indukcyjną (6), która jest zwinięta z izolowanego przewodnika elektrycznego i umieszczona bezstykowo przy jednej ze ścian zbiornika(1)" (Rys. 4.) [2].



Rys. 1. Składowe elementy urządzenia do nagrzewania indukcyjnego [opracowanie własne]

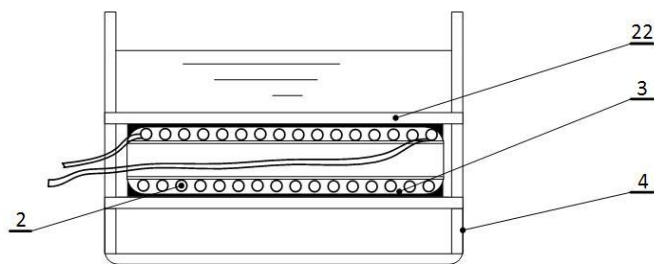


Rys. 2. Układ półmostkowy szeregowy [1]



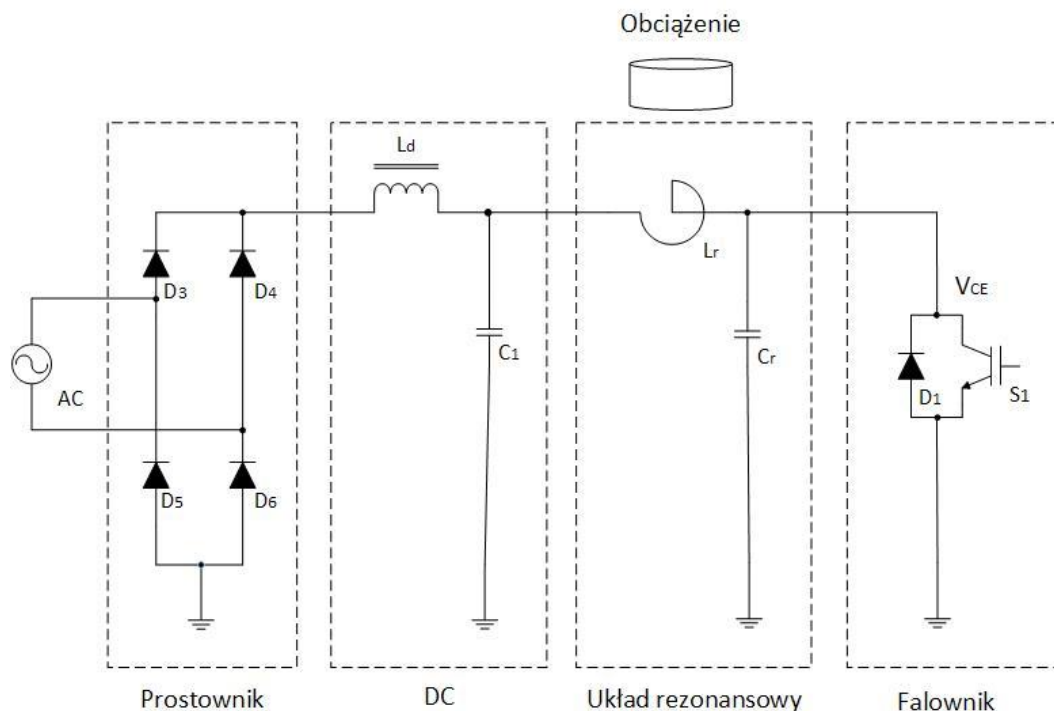
Rys. 4. Elektryczny pojemnościowy podgrzewacz wody - patent nr 1 [2]

Kolejne rozwiązanie (Rys. 5) zostało przygotowane przez firmę Fugi Electric CO LTD. Urządzenie według patentu JP7029673 składa się z cewki indukcyjnej (2) do przenoszenia prądu o wysokiej częstotliwości i z metalowego cylindrycznego elementu grzewczego. Za pomocą cewki podgrzewany jest metalowy cylinder (3) tworzący jednocześnie zespół grzewczy, który jest bezpośrednio przymocowany do zbiornika wypełnionego cieczą (1). Przekazywanie ciepła następuje wprost z układu z cewką do zbiornika z podgrzewanym płynem. Zaletą tego układu jest brak występowania rdzenia ferromagnetycznego, a generowane ciepło z cewki jest efektywnie przekazywane do cieczy, gdzie poprzez ścianki następuje przekazanie ciepła do właściwego zbiornika.

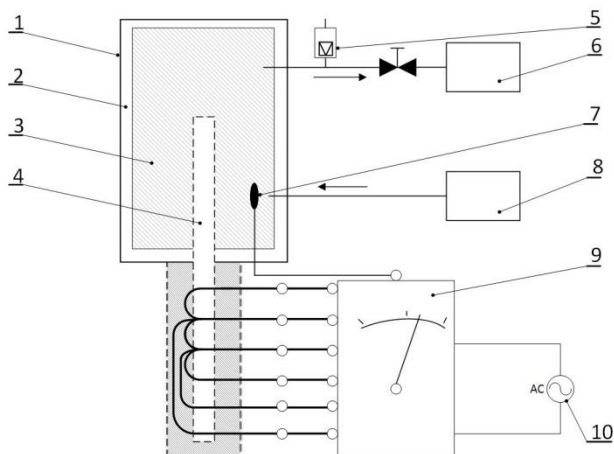


Rys. 5. Podgrzewacz wody - patent nr 2 [3]

Trzecim przedstawianym rozwiązaniem jest urządzenie o nr patentu CH681044 (Rys. 6.), firmy Gnosis ETS. W tym rozwiązaniu w zbiorniku wodnym (1) umieszczony został częściowo element grzewczy (4) w postaci pręta wykonanego z materiału ferromagnetycznego. Zbiornik wodny jest izolowany termicznie (2). Wylot ciepłej wody (6) znajduje się w górnej części zbiornika, a wlot zimnej wody w jego dolnej części (8). Przed zaworem wylotu ciepłej wody znajduje się zawór bezpieczeństwa (5). Czujnik temperatury (7) generuje sygnał dla układu regulacji temperatury (9), który jest zasilany z zasilacza (10). Wystająca poza zbiornik część pręta jest owinięta uzwojeniem grzewczym. Poprzez zjawisko indukcji uzwojenie podgrzewa pręt, który następnie oddaje ciepło do cieczy (3) znajdującej się w zbiorniku. Taki sposób podgrzewania cieczy znacznie ogranicza zjawisko osadzania się kamienia i korozji, przez co może być on wykorzystywany m.in. w przemyśle farmaceutycznym.

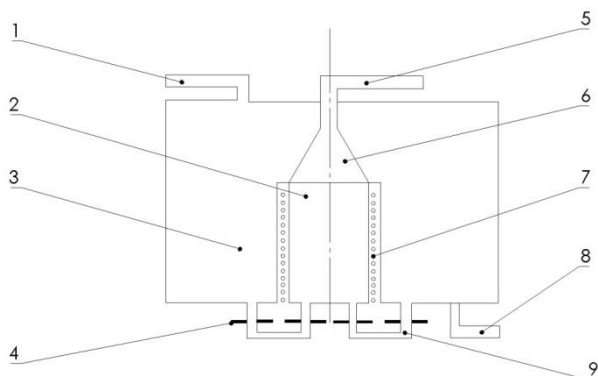


Rys. 3. Układ quasi-rezonansowy [1]



Rys. 6. Podgrzewacz wody - patent nr 3 [4]

Podgrzewacz wody według patentu nr 4 (Rys. 7.) składa się z wewnętrznego cylindrycznego zbiornika (2) dostarczającego ciepłą wodę i otaczającego go zewnętrznego cylindrycznego zbiornika wody zimnej (3).



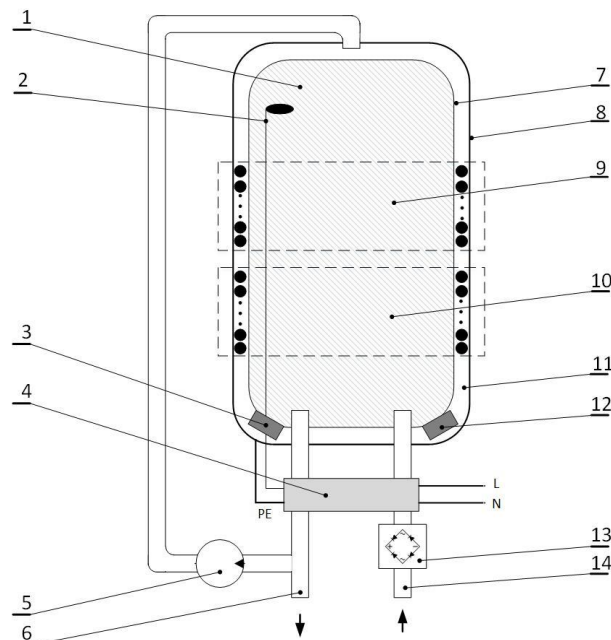
Rys. 7. Podgrzewacz wody - patent nr 4 [5]

W dolnej części zbiornika zewnętrznego jest wlot zimnej wody (8). Wylot wody (5) gorącej następuje z wewnętrznego zbiornika, a wody ciepłej z wylotu (1) umieszczonego w zewnętrznym zbiorniku. Pomiędzy zbiornikami znajduje się cylindryczna wnęka, w której jest umieszczona cewka indukcyjna (7). Woda ze zbiornika zewnętrznego przepływa swobodnie do zbiornika wewnętrznego poprzez zespół rurek przepływowych (9) i złączy hydraulicznych (4). Dzięki zjawisku indukcji elektromagnetycznej podgrzewane są ścianki

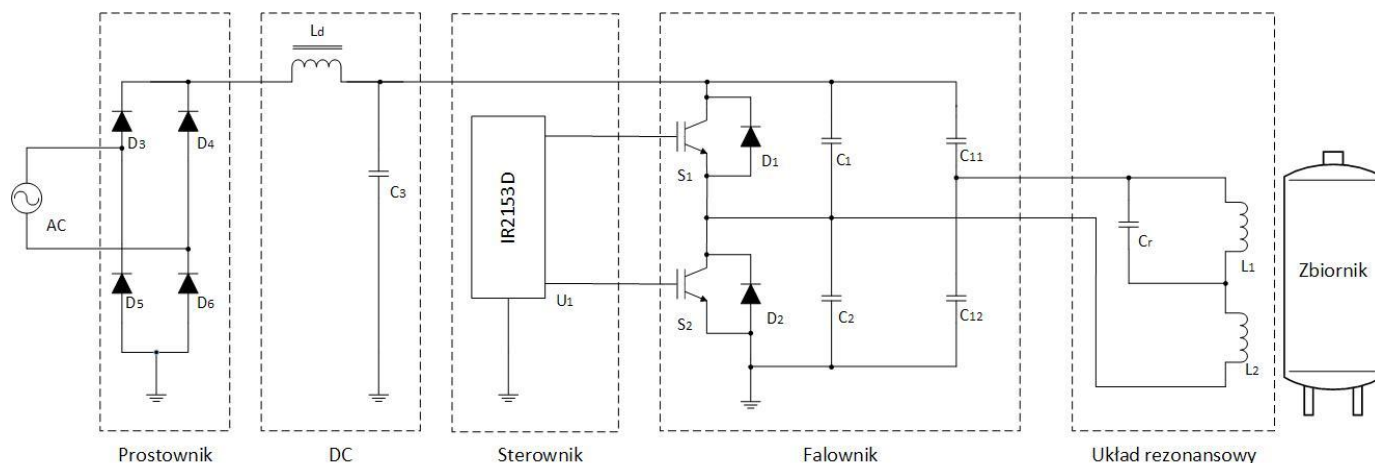
zbiornika przy cewce, jednocześnie oddając swoje ciepło do wody w zbiorniku. W zewnętrznym zbiorniku woda jest wstępnie podgrzewana, a przepływając przez zbiornik wewnętrzny woda podgrzewana jest do jeszcze wyższej temperatury. Perforowany stożek (6) skonstruowany jest w taki sposób, że przy zamkniętym zaworze (5) podgrzana woda w zbiorniku (2) przepuszczana jest do zbiornika nr (3).

4. PROTOTYP INDUKCYJNEGO PODGRZEWACZA WODY UŻYTKOWEJ

Konstrukcję prototypowego indukcyjnego podgrzewacza wody przedstawiono na rys. 8. Indukcyjny podgrzewacz wody użytkowej składa się z układu elektronicznego (4) oraz uzwojeń indukcyjnych (9,10) przekazujących energię do zbiornika wodnego (7). Woda (1) w zbiorniku wodnym (7) jest ogrzewana bezpośrednio poprzez metalowe ścianki zbiornika. Zbiornik na powierzchni bocznej jest izolowany (11) termicznie, a jego zewnętrzna osłona (8) jest wykonana z materiału nierferromagnetycznego. Czujnik temperatury (2) został zamocowany w górnej części zbiornika wodnego, na jego powierzchni zewnętrznej.



Rys. 8. Prototypowy indukcyjny podgrzewacz wody [opracowanie własne]



Rys. 9. Schemat blokowy indukcyjnego podgrzewacza wody [opracowanie własne]

W tym układzie zbiornik wodny jest traktowany jako rdzeń umieszczony w cewce, a wydzielane ciepło w ściankach zbiornika związane jest głównie z stratami histerezowymi w materiale z którego jest wykonany zbiornik. Dużym wyzwaniem jest zrezygnowanie z aktywnego chłodzenia podzespołów i zastosowanie jedynie chłodzenia pasywnego, przy utrzymaniu wysokiej sprawności całego systemu grzewczego.

Obiecującym rozwiązaniem konstrukcyjnym było umieszczenie dwóch uzwojeń (9,10) jako elementów przekazujących energię magnetyczną do zbiornika. W układzie elektronicznym rolę uzwojenia rezonansowego pełni cewka L1, podczas gdy uzwojenie L2 jest wykorzystywane jako dławik w układzie, gdzie spełnia rolę regulatora mocy urządzenia. Modyfikując liczbę zwojów uzwojenia L2 wpływamy na moc czynną urządzenia. Indukcyjność uzwojeń L1 i L2 została dobrana wraz z pojemnością kondensatorów w obwodzie rezonansowym w taki sposób, aby moc czynna urządzenia była równa 2kW +/- 5%. Częstotliwość obwodu rezonansowego wynosi 27kHz. Aby podwyższyć sprawność podgrzewania indukcyjnego, elementy elektroniczne, takie jak mostek prostowniczy (13), tranzystory IGBT (3,12), nagrzewające się w trakcie pracy urządzenia, umieszczono w bezpośrednim kontakcie ze zbiornikiem wodnym. Mostek prostowniczy umieszczono na wlocie zimnej wody (14). Skutkuje to odprowadzeniem ciepła do zbiornika wodnego dzięki czemu nie jest wymagane chłodzenie aktywne.

Aby zapewnić jednolity rozkład temperatury wody w zbiorniku podczas badań woda była mieszana w zbiorniku poprzez pompę cyrkulacyjną (5) na wylocie króćca ciepłej wody (6), tak aby w całej swojej objętości posiadała jednakową temperaturę.

Kolejną istotną cechą zaprojektowanego układu jest wyeliminowanie mikroprocesora jako podzespołu sterującego pracą tranzystorów mocy IGBT. Układ działa według schematu pokazanego na rys. 9.

Do sterowania został wykorzystany układ elektroniczny IR2153D. Poprzez odpowiednie dobranie parametrów RC w układzie IR2153D uzyskuje się odpowiednią częstotliwość kluczowania tranzystorów IGBT.

Przemiana energii elektrycznej na ciepłą zachodzi w ferromagnetycznym zbiorniku wodnym w wyniku indukowania prądów wirowych oraz nagrzewania materiału przez zjawisko histerezy magnetycznej.

PODSUMOWANIE

Grzanie wody z wykorzystaniem indukcyjnych podgrzewaczy, może być ciekawą alternatywą w odniesieniu do grzania z wykorzystaniem grzałek elektrycznych, które są podatne na mikropęknięcia i obrastanie kamieniem, co skutkuje zmniejszeniem sprawności grzania. Eliminując z pojemnościowego ogrzewacza wody grzałkę elektryczną, i traktując sam zbiornik jako źródło ciepła, zyskujemy większą żywotność urządzenia, ponieważ kamień na wewnętrznej powierzchni ogrzewacza nie powstaje. Dodatkową zaletą zastosowania indukcyjnego systemu grzewczego jest brak konieczności usuwania wody podczas awarii układu grzewczego, wymieniany jest tylko podzespół nie mający kontaktu fizycznego z ogrzewaną wodą.

Z przeprowadzonych badań wstępnych zaprojektowanego urządzenia wynika, że charakteryzuje się on wysoką sprawnością działania $\eta > 95\%$. Obecnie działające urządzenia grzewcze np. kuchnie indukcyjne działają ze sprawnością od 70 do 85%. Zaprojektowany układ pracuje stabilnie przy zadanej częstotliwości i może być stosowany jako urządzenie grzewcze C.W.U.

BIBLIOGRAFIA

1. Fairchild Semiconductor Corporation, AN-9012 Induction Heating System Topology Review, (Rev. 1.0.4) 2000.
2. Biuletyn Urzędu Patentowego Nr 24 (937) 2009 str. 32
3. Espacenet Patent search <http://worldwide.espacenet.com/> Publication number: JP7029673
4. Espacenet Patent search <http://worldwide.espacenet.com/> Publication number: CH681044
5. Espacenet Patent search <http://worldwide.espacenet.com/> Publication number: CH681044
6. B. P. Feynman. Feynmana wykłady z fizyki Elektrozność i magnetyzm Elektrodynamika. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2004

INDUCTIVE HEATING OF DOMESTIC HOME WATER IN FERROMAGNETIC TANKS

Abstract

The article discusses the problem of induction heating in domestic hot water tanks. The phenomenon of skin effect related to electromagnetic induction is described, and current penetration depth into typical materials used in the processes of induction heating, depending on frequency, is demonstrated. The most frequently used topologies of induction heating systems are shown, that is half-bridge series circuit and quasi resonance circuit. The article presents operating principle of interesting modern solutions used for induction heating of volume water tanks. The paper further describes the constructed prototype of induction water heater together with its most important parameters. The diagram and operating principle of the device are given, and the most important characteristics of the designed heater are presented.

Autorzy:

dr inż. **Sebastian Pecolt** – Katedra Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej, Wydział Technologii i Edukacji, Politechnika Koszalińska, ul. Śniadeckich 2, 75 – 453 Koszalin

mgr inż. **Katarzyna Peplińska-Matysiak** – Katedra Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej, Wydział Technologii i Edukacji, Politechnika Koszalińska, ul. Śniadeckich 2, 75 – 453 Koszalin

mgr inż. **Leon Charkiewicz** – Katedra Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej, Wydział Technologii i Edukacji, Politechnika Koszalińska, ul. Śniadeckich 2, 75 – 453 Koszalin

prof. dr hab. inż. **Tomasz Krzyżyński** – Katedra Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej, Wydział Technologii i Edukacji, Politechnika Koszalińska, ul. Śniadeckich 2, 75 – 453 Koszalin