

## Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	7
1. Wprowadzenie .....	9
1.1. Indukcyjne układy grzejne .....	10
1.2. Generatory do nagrzewania indukcyjnego .....	11
1.3. Dopasowanie energetyczne źródło-obciążenie przy jedno- i dwuczęstotliwościowym nagrzewaniu indukcyjnym .....	24
1.3.1. Transformatory dopasowujące .....	26
1.3.2. Rezonansowe układy dopasowujące .....	38
2. Podstawy teoretyczne nagrzewania indukcyjnego .....	51
2.1. Zagadnienie elektromagnetyczne .....	51
2.2. Zagadnienie cieplne .....	62
2.3. Zagadnienie elektromagnetyczno-cieplne .....	67
3. Metody obliczeniowe indukcyjnych układów grzejnych .....	68
3.1. Uprozczone metody obliczania parametrów elektrycznych schematu zastępczego .....	68
3.2. Metoda sieci przewodów elementarnych oraz obwodów cieplnych o parametrach skupionych .....	80
3.3. Metody polowe .....	83
4. Symulacja indukcyjnego nagrzewania okresowego przy zasilaniu wykorzystującym falownik napięcia z rezonansem szeregowym .....	88
4.1. Wpływ dobroci indukcyjnego układu grzejnego oraz czasu martwego przełączania łączników na kształt prądu i napięcia na wzbudniku .....	89
4.2. Wykorzystanie sieci przewodów elementarnych do modelowania indukcyjnego układu grzejnego .....	95
4.3. Symulacja nagrzewania indukcyjnego wspierana komercyjnym oprogramowaniem do obliczeń polowych .....	105
4.3.1. Algorytm polowych obliczeń elektromagnetyczno-cieplnych uwzględniających wpływ obciążenia na pracę rezonansowego źródła zasilania .....	109
4.3.2. Wpływ sposobu modelowania źródła zasilania na wyniki symulacji procesu indukcyjnego nagrzewania wsadu .....	120
5. Symulacja indukcyjnego nagrzewania okresowego przy zasilaniu wykorzystującym falownik prądu z rezonansem równoległym .....	131
6. Symulacja indukcyjnego nagrzewania okresowego przy zasilaniu wykorzystującym falownik z układem rezonansowym LLC .....	136
6.1. Wrażliwość falownika LLC na zmianę parametrów indukcyjnego układu grzejnego .....	139
6.2. Symulacja pracy falownika z aktywnym układem dopasowania impedancyjnego .....	143
7. Symulacja procesu dwuczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego .....	146

7.1. Algorytm sprzężonych obliczeń polowo-obwodowy indukcyjnego nagrzewania dwuczęstotliwościowego .....	147
7.2. Symulacja nagrzewania dwuczęstotliwościowego generatorem z układem korekcji dopasowania impedancyjnego .....	153
7.3. Weryfikacja eksperymentalna symulacji procesu nagrzewania dwuczęstotliwościowego .....	160
Podsumowanie i wnioski końcowe .....	164
Literatura.....	168
Streszczenie.....	175
Summary .....	176

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

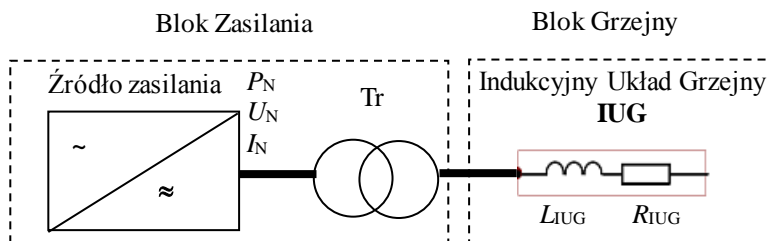
- $A$  – potencjał wektorowy, V·s/m;  
 $B$  – wektor indukcji magnetycznej, T;  
 $C$  – pojemność, F;  
 $D$  – wektor indukcji elektrycznej, C/m<sup>2</sup>;  
 $D$  – średnica wewnętrzna wzbudnika, m;  
 $E$  – wektor natężenia pola elektrycznego, V/m  
 $H$  – wektor natężenia pola magnetycznego, A/m;  
 $I$  – natężenie prądu, wartość skuteczna, A;  
 $\text{Im}\{\}$  – część urojona liczby zespolonej;  
 $J$  – wektor gęstości prądu, A/m<sup>2</sup>;  
 $L$  – długość (wysokość) wzbudnika, m;  
 $L_s$  – indukcyjność szeregową układu LLC, H;  
 $L_{\text{IUG}}$  – indukcyjność indukcyjnego układu grzejnego, H;  
 $P$  – moc czynna, W;  
 $R$  – rezystancja,  $\Omega$ ;  
 $\text{Re}\{\}$  – część rzeczywista liczby zespolonej;  
 $T$  – temperatura, °C;  
 $T_{\text{Curie}}$  – temperatura punktu przemiany magnetycznej, °C;  
 $T_M$  – czas martwy przełączania, s;  
 $U$  – napięcie, wartość skuteczna, V;  
 $Q$  – dobroć;  
 $Q_C$  – moc bierna pojemnościowa, var;  
 $Q_L$  – moc bierna indukcyjna, var;  
 $W$  – opór cieplny, K/W;  
 $\underline{Z}$  – impedancja zespolona,  $\Omega$ ;  
 $a$  – dyfuzyjność cieplna, m<sup>2</sup>/s;  
 $c$  – ciepło właściwe, J/(kg·K);  
 $d$  – średnica wsadu, m;  
 $f$  – częstotliwość, Hz;  
 $g$  – grubość, m;  
 $j$  – jednostka urojona;  
 $p$  – przekładnia transformatora;  
 $p_s$  – gęstość powierzchniowa mocy czynnej, W/m<sup>2</sup>;  
 $p_v$  – gęstość objętościowa mocy czynnej, W/m<sup>3</sup>;  
 $q$  – gęstość powierzchniowa strumienia cieplnego, W/m<sup>2</sup>;  
 $q_s$  – gęstość powierzchniowa mocy biernej, var/m<sup>2</sup>;  
 $q_v$  – gęstość objętościowa mocy biernej, var/m<sup>3</sup>;  
 $t$  – czas, s;  
 $\alpha_k$  – współczynnik konwekcyjnego przejmowania ciepła, W/(m<sup>2</sup>·K);  
 $\alpha_r$  – współczynnik radiacyjnego przejmowania ciepła, W/(m<sup>2</sup>·K);  
 $\gamma$  – konduktywność, S/m;

- $\delta$  – głębokość wnikania fali elektromagnetycznej, m;
- $\varepsilon$  – przenikalność elektryczna, F/m;
- $\lambda$  – przewodność cieplna właściwa, W/(m·K);
- $\mu$  – przenikalność magnetyczna, H/m;
- $\rho$  – rezystywność,  $\Omega \cdot m$ ;
- $\rho_M$  – gęstość masy, kg/m<sup>3</sup>;
- $\rho_V$  – gęstość objętościowa ładunku, C/m<sup>3</sup>;
- $\omega$  – pulsacja, rad/s.

# 1. WPROWADZENIE

Nagrzewanie indukcyjne jest powszechnie stosowaną metodą nagrzewania materiałów przewodzących, najczęściej obiektów (wsadów) metalowych w procesach technologicznych obróbki cieplnej, przeróbki plastycznej czy topienia. Ta elektrotermiczna metoda grzejna opiera się na wykorzystaniu zjawiska indukcji elektromagnetycznej [1], w myśl którego w każdym zamkniętym obwodzie przenikającym przez zmienny w czasie strumień magnetyczny indukuje się siła elektromotoryczna proporcjonalna do szybkości zmian strumienia. W przypadku przewodników elektrycznych prowadzi to do indukowania prądu elektrycznego (prądów wirowych), co skutkuje efektem grzejnym. Nagrzewanie indukcyjne, dzięki wykorzystaniu zjawiska przemagnesowywania (histereza magnetyczna oraz zjawisko następcze związane z opóźnieniem przemagnesowywania) może dotyczyć również nagrzewania ferromagnetycznych materiałów dielektrycznych. Zjawisko to wywołuje efekt cieplny również w litych ferromagnetycznych przewodnikach prądu elektrycznego, ale jest on zdecydowanie mniejszy [2] niż wywołany prądami wirowymi i w analizie ilościowej zwykle może być pominięty.

Nagrzewanie indukcyjne jest wykorzystywane głównie w zastosowaniach przemysłowych, choć w ostatnich latach [3] obserwuje się również szybki wzrost zastosowań domowych [4]-[6] i medycznych [7], [8]. Przemysłowe urządzenia do nagrzewania indukcyjnego dzieli się zwykle, ze względu na kryterium konstrukcyjne, na nagrzewnice traktowane jako urządzenia bezkomorowe oraz piece indukcyjne traktowane jako urządzenia komorowe [9]. W urządzeniach tych można zwykle, w dużym stopniu w zależności od realizowanego procesu technologicznego, wyodrębnić co najmniej kilka członów funkcjonalnych, tj. blok zasilający, grzejni, transportowy, pomiarowy czy chłodzący. Od strony realizowania procesu grzejnego podstawę każdego urządzenia do nagrzewania indukcyjnego stanowi blok zasilający i grzejni. Przy analizowaniu zagadnień elektrycznych zasadne jest wyodrębnienie z bloku zasilania samego źródła zasilania o znamionowych wartościach mocy  $P_N$ , napięcia  $U_N$  i prądu  $I_N$ , jak również zastąpienie bloku grzejnego jego modelem strukturalnym nazywanym indukcyjnym układem grzejnym IUG (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Główne człony funkcjonalne urządzenia do nagrzewania indukcyjnego

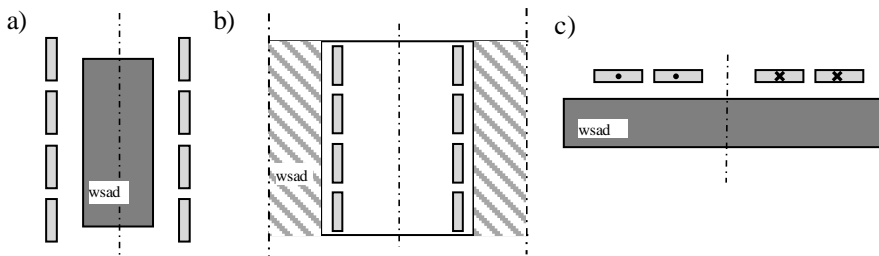
Połączenie tych dwóch członów stanowi układ pośredniczący (dopasowujący), którego głównym celem jest poprawa elastyczności nagrzewania indukcyjnego poprzez zwiększenie możliwości wykorzystywania źródła przez indukcyjne układy grzejne o różnych parametrach elektrycznych. Aby przy danej częstotliwości pracy możliwe było, bez przekraczania prądowych lub napięciowych parametrów znamionowych, przekazanie do IUG (obciążenia) całej znamionowej mocy źródła sygnału sinusoidalnie zmiennego, wymagane jest aby jego impedancja wyjściowa była równa impedancji wejściowej obciążenia. Przy znamionowej częstotliwości  $f_N$  pracy źródło charakteryzuje się zespoloną impedancją znamionową  $\underline{Z}_N = \underline{U}_N / \underline{I}_N$ , natomiast obciążenie impedancją  $\underline{Z}_{IUG} = R_{IUG} + j2\pi f_N L_{IUG}$ . W najprostszych rozwiązaniach technicznych układ dopasowujący stanowi transformator o odpowiednio dobranej przekładni  $p$ , pozwalający na uzyskanie równości modułów impedancji  $|Z_N| = p^2 / |Z_{IUG}|$ . W nagrzewaniu indukcyjnym jako źródła zasilania stosowane są niemal wyłącznie generatory rezonansowe. Przy przyjęciu, że pracują one w stanie rezonansu zagadnienie dopasowania energetycznego sprowadza się do dopasowania rezystancji dla rezonansowej częstotliwości pracy  $f_r$ .

## 1.1. Indukcyjne układy grzejne

Indukcyjne układy grzejne są modelami strukturalnymi rzeczywistych bloków grzejnych stanowisk do nagrzewania indukcyjnego. Stanowią one swoiste układy zastępcze rzeczywistych bloków grzejnych mając parametry geometryczne i fizyczne zbliżone do układów rzeczywistych, a wykonane uproszczenia wynikają z dążenia do uproszczenia opisu matematycznego, a tym samym możliwości zrealizowania obliczeń elektrycznych czy cieplnych układów rzeczywistych. To podejście pozwala na elastyczne budowanie IUG, w którym stopień zastosowanego uproszczenia wynika z posiadanych możliwości obliczeniowych. Występującej w praktyce niemal nieskończonej liczbie rozwiązań geometryczno-konstrukcyjnych bloków grzejnych można przypisać zbliżoną liczbę IUG. W zależności od wzajemnego usytuowania wzbudnika i wsadu mogą one być podzielone [2] na trzy zasadnicze konfiguracje, z których każda może dodatkowo dotyczyć układów rdzeniowych lub bezrdzeniowych (rys. 1.2).

Tego typu tradycyjny podział IUG jest w pewnym stopniu związany również ze stosowaniem uproszczonych metod obliczeniowych opartych o różnego typu schematy zastępcze. Przy aktualnie powszechnie stosowanym wykorzystywaniu numerycznych metod obliczeniowych (głównie metody elementów skończonych MES) powyższy podział IUG jest mało użyteczny. Bardziej praktyczne jest dzielenie IUG na modele dwu (2D) lub trójwymiarowe (3D), czy też zawierających lub nie elementy ruchome. Z punktu widzenia wzajemnego oddziaływania źródła i obciążenia (IUG) przedstawiony wyżej podział jest również mało użyteczny. W tym przypadku istotniejszy jest bowiem podział z punktu widzenia wartości rezystancji  $R_{IUG}$  oraz indukcyjności  $L_{IUG}$ , czy też skali ich zmiany

w trakcie procesu nagrzewania. Parametry IUG są ściśle związane z procesem technologicznym, w którym nagrzewanie indukcyjne jest wykorzystywane.



Rys. 1.2. Przykłady podstawowych konfiguracji IUG: a) wzbudnik otacza wsad, b) wsad otacza wzbudnik, c) wsad poza wzbudnikiem

Do głównych zastosowań przemysłowych nagrzewania indukcyjnego można zaliczyć:

- procesy hartowania zarówno jednoczesnego, jak i w posuwie,
- nagrzewanie przed kuciem, prasowaniem czy tłoczeniem,
- procesy lutowania,
- procesy odpuszczania i wyżarzania,
- procesy zgrzewania,
- topienie.

W kontekście współpracy źródło-obciążenie należy szczególnie wyraźnie rozgraniczyć tzw. okresowy i przelotowy [10] sposób pracy nagrzewnicy indukcyjnej. Praca okresowa dotyczy nagrzewania bez wzajemnego przemieszczania wsadu i wzbudnika. Szczególnie w przypadku nagrzewania wsadów ferromagnetycznych do temperatury końcowej wyższej od temperatury punktu przemiany magnetycznej (temperatury  $T_{Curie}$  punktu Curie) mamy wtedy do czynienia z dużymi zmianami parametrów elektrycznych IUG. W przypadku nagrzewania w przelocie (ruch wsadu w stosunku do wzbudnika) parametry elektryczne IUG są bardzo stabilne w trakcie nagrzewania (poza strefą początkową i końcową wsadu) co sprzyja wykorzystaniu dostępnej mocy źródła.

## 1.2. Generatory do nagrzewania indukcyjnego

W instalacjach do nagrzewania indukcyjnego można spotkać źródła zasilania bardzo różniące się zarówno sposobem pracy, konstrukcją, wyposażeniem, jak i znamionowymi parametrami mocy i częstotliwości. Wynika to zarówno z wymagań realizowanego procesu technologicznego (w którym nagrzewanie jest jedynie jednym z jego etapów), jak i uwarunkowań ekonomicznych i historycznych. Biorąc pod uwagę ten ostatni aspekt związany z rozwojem urządzeń

elektrycznych i energoelektronicznych można mówić o źródłach w postaci [3], [10], [11]:

- generatorów maszynowych – których początek intensywnego rozwoju należy datować na lata 20. XX wieku. Generatory maszynowe, to rozwiązania technicznie przestarzałe, ale nadal wykorzystywane w praktyce przemysłowej. Urządzenia tego typu charakteryzują się:
  - stałą wartością częstotliwości do 10 kHz niezależną od obciążenia,
  - mocami znamionowymi dochodzącymi do 2,5 MW,
  - sprawnością elektryczną rzędu 65-80%,
  - napięciami wyjściowymi rzędu 400-1600 V,
  - dużymi rozmiarami i wagą;
- generatorów lampowych – których początek intensywnego rozwoju można datować również na lata 20. XX wieku. Generatory te oparte o lampy próżniowe charakteryzują się:
  - wysokimi częstotliwościami pracy zwykle z zakresu 60-400 kHz, występują również rozwiązania do nagrzewania indukcyjnego na 27,12 MHz,
  - niską sprawnością elektryczną rzędu 50-60%,
  - wysokimi napięciami pracy dochodzącymi do 20 kV,
  - niską trwałością lampy rzędu kilku tysięcy godzin pracy,
  - łatwością zmiany dopasowania impedancyjnego;
- generatorów półprzewodnikowych:
  - tyrystorowych – intensywny rozwój od lat 60. XX wieku,
  - tranzystorowych IGBT – intensywny rozwój od lat 80. XX wieku,
  - tranzystorowych MOSFET – intensywny rozwój od lat 90. XX wieku,
  - tranzystorowych SiC MOSFET – intensywny rozwój od początku XXI wieku.

Schemat konwersji energii dla większości współczesnych generatorów do nagrzewania indukcyjnego można przedstawić [3] jak na rys. 1.3.



Rys. 1.3. Typowy schemat konwersji energii we współczesnych generatorach do nagrzewania indukcyjnego

Zastosowanie wejściowych filtrów przeciwzakłóceń służy do spełnienia wymogów kompatybilności elektromagnetycznej. W zależności od przyjętego systemu sterowania mocą wyjściową generatora przekształtniki AC/DC są wykonywane zarówno jako sterowane i niesterowane układy prostownicze,



lub oprócz samych układów prostowniczych zawierają dodatkowo przekształtniki DC/DC. Podstawowy człon współczesnego generatora stanowi przekształtnik DC/AC, falownik, którego zadaniem jest dostarczenie do wzbudnika prądu o wymaganej częstotliwości. W nagrzewaniu indukcyjnym stosowane są niemal wyłącznie [12] falowniki rezonansowe [13], zwykle w postaci pół-mostka lub pełnego mostka. Posiadają one najczęściej układy rezonansowe drugiego rzędu, szeregowy lub równoległy. W pierwszym przypadku obciążenie (układ rezonansowy) zawierające szeregowo połączoną indukcyjność może być traktowane jako swoiste źródło prądowe, co wymusza zasilanie takiego układu ze źródła napięcia (falownik napięcia). W drugim przypadku obciążenie posiada równoległe przyłączony kondensator, a więc może być traktowane jako źródło napięciowe, co z kolei wymusza zasilanie ze źródła prądowego (falownik prądu). Obie struktury falowników mogą być stosowane w układach nagrzewania indukcyjnego. Każda z nich ma swoje cechy charakterystyczne, które mogą stanowić zarówno wadę („-”) jak i zaletę („+”). Główne z nich zostały przedstawione [14] w tabeli 1.1. Ze względu na prostą konstrukcję oraz układ sterowania, falowniki napięcia z rezonansem szeregowym [12], [15] są częściej stosowane [11] w aplikacjach nagrzewania indukcyjnego. Falowniki z rezonansem równoległym stosowane są głównie tam, gdzie występuje konieczność zredukowania wartości prądu w łącznikach półprzewodnikowych lub przy niskich częstotliwościach pracy [11].

Tabela 1.1. Cechy charakterystyczne falowników z rezonansem szeregowym i równoległym stosowanych do nagrzewania indukcyjnego

<b>Falownik szeregowy</b>	<b>Falownik równoległy</b>
Prosta struktura, tani (+)	Możliwa praca na pusty wzbudnik (+)
Proste układy regulacji (+)	Odporność na zwarcia wzbudnika (+)
Możliwe zasilanie z prostownika niesterowanego (+)	Nie wymagane kondensatory na wysokie napięcia (+)
Regulacja mocy poprzez zmianę częstotliwości może nie być akceptowalna w pewnych aplikacjach (-)	Prądy w tranzystorach odpowiadające tylko mocy czynnej (+)
Trudności w sterowaniu przy wyjęciu (pusty wzbudnik) wsadu (-)	Skomplikowany układ sterowania (-)
Mała odporność na zwarcie wzbudnika (-)	Zasilanie z prostownika sterowanego lub choppera (-)
Duże prądy w tranzystorach (-)	Wymagany dławik wygładzający (-)