

WITOLD KOBOS, JACEK KUCHARSKI

Zakład Elektroniki Przemysłowej ENIKA Sp. z o.o., Łódź

Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej

BEZPRZEWODOWE ZASILANIE RUCHOMYCH WZBUDNIKÓW W NAGRZEWANIU INDUKCYJNYM OBRACAJĄCEGO SIĘ WALCA

W artykule przedstawiono projekt i metodę realizacji bezprzewodowego zasilania układu wzбудników wykorzystywanych do nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego, będącego elementem maszyny papierniczej. Zaproponowane rozwiązanie daje możliwość dostarczania mocy grzewczej w sposób elastyczny i selektywny do płaszcza walca, co pozwala uzyskać wysoką jakość regulacji temperatury jego powierzchni dla dowolnego profilu temperatury zadanej.

WPROWADZENIE

Nagrzewanie indukcyjne jest jednym z nowoczesnych, sprawnych i ekologicznych rozwiązań nagrzewania obracających się walców stalowych, wykorzystywanych między innymi w przemyśle papierniczym do suszenia i kalandrowania papieru. Zapewnienie odpowiedniej jakości tych procesów wiąże się z koniecznością utrzymania zadanego profilu temperatury na powierzchni walca niezależnie od zmieniających się warunków procesowych (różne warunki wymiany ciepła wynikające z konstrukcji walca, miejscowe obniżenie temperatury walca spowodowane np. zmienną wilgotnością taśmy papieru itp.). Wymaga to nie tylko stosowania precyzyjnych układów regulacji temperatury [1], ale także zapewnienia swoistej swobody i selektywności dostarczania mocy grzewczej do różnych obszarów płaszcza walca, co można osiągnąć stosując ruchome źródła energii grzewczej (wzбудniki) [2]. Istotnym utrudnieniem w realizacji takiego zadania jest znaczna wymagana prędkość ruchu wzбудnika wzdłuż tworzącej

walca oraz długotrwałości procesów technologicznych. W szczególności problem ten dotyczy odpowiednio trwałego połączenia elektrycznego poruszającego się wzbudnika z zasilającym go generatorem w.cz.. Spośród możliwych rozwiązań, takich jak: wykorzystanie podatnych przewodów przystosowanych do wielokrotnego gięcia czy zasilanie wzbudnika za pomocą ruchomego zestyku, najwięcej zalet wydaje się mieć wykorzystanie sprzężenia elektromagnetycznego do bezprzewodowego przekazywania energii elektrycznej. Rozwiązanie takie pozwala wyeliminować główne wady pozostałych, tzn. niebezpieczeństwo uszkodzenia przewodów giętkich na skutek wielokrotnego gięcia i dużych przyspieszeń, czy zakłócenia wywołane iskrzącym zestykiem. Ponadto zasilanie bezprzewodowe zapewnia separację galwaniczną obwodów, co może być ważną zaletą w warunkach przemysłowych.

1. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE I OGÓLNA KONCEPCJA UKŁADU ZASILANIA BEZPRZEWODOWEGO WZBUDNIKÓW

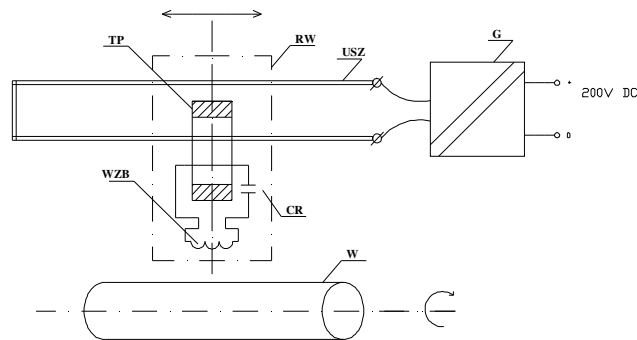
Podstawowym celem projektowanego układu jest zasilanie wzbudników nagrzewających indukcyjnie obracający się walec energią elektryczną pochodzącą z generatora w.cz., przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości ruchu liniowego wzbudnika nad powierzchnią walca wzdłuż jego tworzącej. Ważniejsze parametry techniczne projektowanego układu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ważniejsze parametry eksploatacyjne układu

Nazwa parametru	Wartość
Moc zasilania wzbudnika	≥ 1 kW
Częstotliwość pracy	≈ 20 kHz
Masa ruchomego zespołu wzbudnika	≤ 7 kg
Prędkość przesuwu wzbudników	≥ 1 m/s
Przyspieszenie przesuwu wzbudników	≈ 7 g
Liczba wzbudników	6
Izolacja galwaniczna między obwodami	$\geq 2,5$ kV

Tak sformułowane zadanie wymaga rozwiązania dwóch skojarzonych ze sobą problemów: mechaniczno-napędowego oraz elektrycznego. O ile w warstwie mechanicznej można to sprowadzić do zastosowania typowych w tym zakresie rozwiązań i właściwego dobrania dostępnych na rynku modułów i podzespołów, o tyle – jak wspomniano we wstępie – problem elektryczny wymaga w znacznym stopniu oryginalnego podejścia. Biorąc pod uwagę podstawowe

założenia i ograniczenia układu zasilania, zaproponowano rozwiązanie, którego ogólną koncepcję przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat koncepcyjny układu zasilania ruchomego wzbudnika

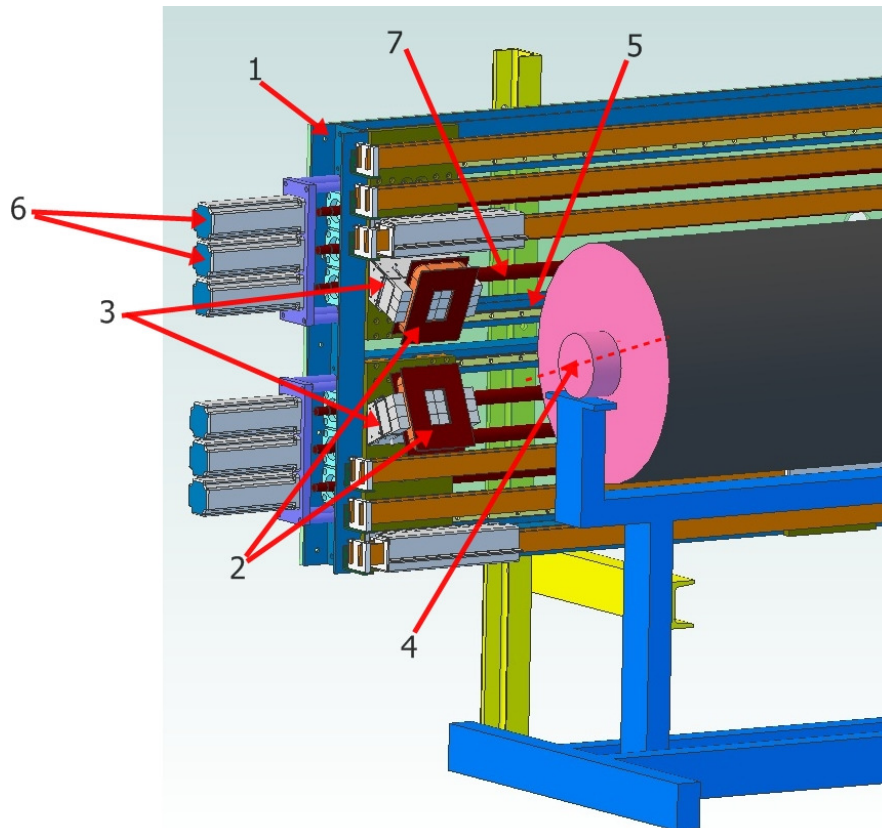
Bezprzewodowe przekazywanie energii elektrycznej do ruchomego wzbudnika (WZB) nagrzewającego obracający się walec (W) można uzyskać wykorzystując transformator pośredniczący (TP) z „rozciągniętym” uzwojeniem pierwotnym (USZ), połączonym z nieruchomym falownikiem (G). Takie uzwojenie, ułożone wzdłuż tworzącej walca, pozostawałoby nieruchome, podczas gdy rdzeń transformatora TP, połączony mechanicznie i elektrycznie ze wzbudnikiem, poruszałby się na specjalnie skonstruowanym wózku (RW) ruchem prostoliniowym nad powierzchnią walca. W takim układzie elektromagnetycznym w dowolnym położeniu rdzenia transformatora energia elektryczna przekazywana byłaby poprzez transformator TP z falownika G do wzbudnika WZB.

2. PROJEKT I REALIZACJA UKŁADU

2.1. WARSTWA MECHANICZNO-NAPĘDOWA

W projektowanym układzie nagrzewania indukcyjnego obracającego się walca stalowego zaplanowano wykorzystanie sześciu wzbudników, każdy o mocy ok. 1 kW, co zapewnia spełnienie wymagań technologicznych dotyczących temperatury roboczej osiąganey na powierzchni walca. Wzbudniki te wraz z ich układami napędowymi rozmieszczono w przestrzeni otaczającej walec w taki sposób, aby uzyskać szeroki zakres możliwości konfigurowania wzajemnego

położenia i ruchu wzbudników. Ilustracyjny fragment projektu konstrukcji układu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Układ mechaniczno-napędowy ruchomych wzbudników (opis w tekście)

Bazą konstrukcji jest umieszczona w płaszczyźnie pionowej rama nośna (1), do której mocowane są wszystkie elementy układu. Wzbudniki (2) osadzone są na indywidualnych wózkach (3) rozmieszczonych w dwóch sekcjach, z zapewnieniem symetrii względem osi podłużnej konstrukcji równoległej do tworzącej walca (4). Wózki te są mechanicznie powiązane ze sobą za pomocą prowadnic (5) stabilizujących ich ruch wzdłuż tworzącej walca. W celu obniżenia masy konstrukcji i ograniczenia ubocznych efektów oddziaływania pola magnetycznego na elementy układu, jako materiał konstrukcyjny wózków przyjęto aluminium. Liniowy ruch wózka wzdłuż tworzącej walca uzyskano poprzez zastosowanie pociągowej śruby kulowej (7) i nakrętki mocowanej do każdego wózka.

Śruby napędzane są indywidualnie za pomocą serwomechanizmów (6). Takie rozwiązanie pozwala na niezależne względem siebie przesuwanie wzbudników w rzędzie, oczywiście w granicach dostępnej przestrzeni w danej pozycji pracy. Projektując sposób mocowania wzbudników do wózków zadbano o to, aby zapewnić równomierną szczelinę pomiędzy wzbudnikiem a powierzchnią walca, niezależnie od położenia wzbudnika w układzie. Jednoczenie przyjęte wymiary konstrukcji układu umożliwiają „zaparkowanie” wszystkich wózków danej sekcji poza obrysem walca, co rozszerza możliwości konfiguracyjne układu w trakcie prowadzonych badań.

Rodzaje i parametry poszczególnych elementów układu napędowego dobrano na podstawie danych katalogowych, uwzględniając wymagania stawiane przez typowe procesy technologiczne realizowane z wykorzystaniem tego typu walców oraz zakres planowanych badań (por. tabela 1).

Punktem wyjścia było zapewnienie wymaganej prędkości ruchu liniowego wózków ze wzbudnikami przy uwzględnieniu szacowanej masy całego wózka oraz przyjętej długości konstrukcji. Biorąc pod uwagę długość walca (1200 mm) oraz planowaną możliwość „zaparkowania” wzbudników poza jego obrysem, długość śrub napędowych określono na 2000 mm. Średnicę śruby kulowej, skok jej gwintu oraz rodzaj nakrętki określono na podstawie obliczeń wytrzymałościowych, wykorzystując następujące zależności:

$$N_C = 2,71 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{f_M \cdot d_r}{L_t^2} \right) \quad (1)$$

$$N_p = 0,8 \cdot N_C$$

gdzie: N_C – krytyczna prędkość obrotowa [obr/min], f_M – współczynnik dla danego typu łożysk ($f_M = 0,692$), d_r – średnica rdzenia trzpienia śruby ($d_r = 21,8$ mm), L_t – odległość między łożyskami oporowymi ($L_t = 1990$ mm), N_p – maks. dopuszczalne obciążenie [obr/min].

Projektując układ napędowy, należy oprócz wymaganych parametrów technicznych uwzględnić także dostępność podzespołów, ich koszt oraz wytrzymałość, decydującą o trwałości układu. Uzyskanie dostatecznej trwałości napędu wymaga zastosowania śruby pracującej z możliwie niską prędkością obrotową. Można to zapewnić poprzez zastosowanie śruby o możliwie dużym skoku gwintu, zachowując jak najmniejszą jej średnicę (w rozwiązaniu przyjęto średnicę śruby jako 25 mm). Postępując zgodnie z tymi wytycznymi, dokonano doboru podzespołów, opisywanego napędu. Uwzględniając typoszereg dostępnych podzespołów,

została wytypowana śruba kulowa typu KGSR 2525-2000 o średnicy podziałowej 23,5 mm i skoku gwintu 25 mm oraz nakrętka kulowa typu KGMR 2525 FSC.

Z kolei osiągnięcie założonego przyspieszenia przesuwu wózka (ok. 7 g), wobec całkowitej masy wózka wraz ze wzбудnikiem (ok. 5 kg), wymaga stosowania momentu napędowego ok. 1,4 Nm. Oznacza to konieczność zastosowania serwosilnika o mocy nie mniejszej niż 176 W, co wynika z zależności:

$$P = 2\pi \frac{n}{60} M_n \quad (2)$$

gdzie: prędkość obrotowa śruby $n = 1200$ obr/min, $M_n = 1,4$ Nm.

Uwzględniając typoszereg dostępnych podzespołów, wybrano serwosilnik typu AC 60 SQA 13030 wraz ze sterownikiem o mocy 200 W.

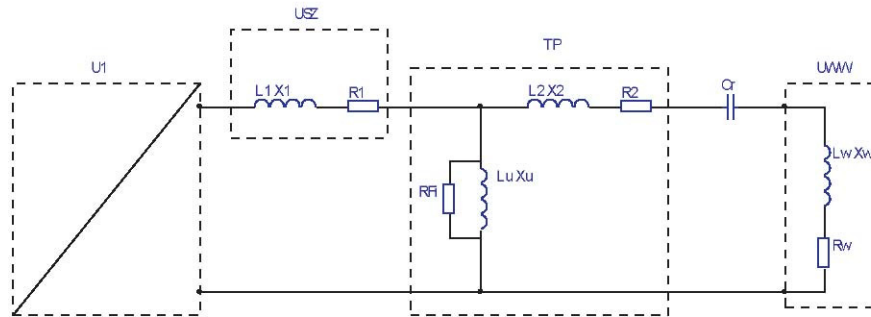
2.2. WARSTWA ELEKTRYCZNA

Zgodnie z przyjętą koncepcją, każdy z zamocowanych na ruchomym wózku wzбудników zasilany jest z generatora w.cz. poprzez związany mechanicznie z wózkiem transformator pośredniczący, którego „rozciągnięte” uzwojenie pierwotne stanowi nieruchomy układ szyn równoległych do tworzącej walca. W celu analizy warunków pracy takiego układu elektrycznego na rysunku 3 przedstawiono jego schemat zastępczy.

Ze względu na występowanie znacznej szczeliny powietrznej w układzie wzбудnik-walec, konieczne jest zapewnienie pracy układu elektrycznego w warunkach rezonansu, co gwarantuje odpowiednio wysoką sprawność pracy urządzenia. Rezonans ten, ze względu na złożony charakter obwodu widzianego z zacisków generatora w.cz., można uzyskać na różne sposoby. W projektowanym układzie przyłączono kondensator rezonansowy (CR) bezpośrednio do wzбудnika (umieszczając go w bezpośredniej bliskości wzбудnika na ruchomym wózku), tak aby tworzył wraz z cewką wzбудnika sprzężoną z powierzchnią nagrzewanego walca układ rezonansowy. Pozwala to na obniżenie wartości napięcia i prądu występujących w nieruchomych fragmentach obwodu, dzięki obciążaniu tych fragmentów jedynie mocą czynną wykorzystywaną do nagrzewania walca. Takie rozwiązanie ma również istotne znaczenie z punktu widzenia redukcji niekorzystnych zjawisk termicznych zachodzących w układzie – zmniejsza bowiem stopień nagrzewania się uzwojenia pierwotnego transformatora TP.

Szyny stanowiące uzwojenie pierwotne transformatora TP zbudowane zostały z płaskowników wykonanych z materiału izolacyjnego, na których wytwor-

rzono uzwojenie poprzez naklejenie kilku warstw taśmy miedzianej o grubości 0,089 mm przedzielonych warstwami taśmy izolacyjnej. Umożliwiło to ograniczenie całkowitej grubości uzwojenia, przy zachowaniu niezbędnej jego sztywności i zapewnieniu izolacji galwanicznej. Podczas ruchu wózka zmianie ulega odcinek układu szyn USZ, który stanowi uzwojenie pierwotne transformatora TP i jest sprzęgnięty z jego uzwojeniem wtórnym. Odpowiednia konstrukcja tego transformatora zapewnia jednak stałe i jednakowe sprzężenie magnetyczne z układem szyn pomimo zmiany położenia wózka.



Rys. 3. Schemat zastępczego układu elektrycznego bezprzewodowego zasilania ruchomych wzbudników

Parametry poszczególnych elementów obwodu obliczono wykorzystując zależności zawarte w [3, 4, 5].

- Indukcyjność własna układu szyn L_{USZ} :

$$L_{USZ} = \frac{\mu_0}{\pi} z^2 (b+c) \cdot \left[\ln \frac{2bc}{a+r} - \frac{c}{b+c} \ln(c + \sqrt{b^2 + c^2}) - \frac{b}{b+c} \ln(b + \sqrt{b^2 + c^2}) + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{2\sqrt{b^2 + c^2}}{b+c} - \frac{1}{2} + 0,447 \frac{a+r}{b+c} \right] \quad (3)$$

gdzie: wymiary uzwojenia (rys. 4a): $a = 0,03$ m, $b = 2,05$ m, $c = 0,03$ m, $r = 0,001$ m, liczba zwojów – $z = 3$,

- Rezystancja własna układu szyn R_{USZ} :

$$R_{USZ} = \frac{lz}{rS} \quad (4)$$

gdzie: długość jednego zwoju $l = 4,4$ m, liczba zwojów $z = 3$, r – rezystancja właściwa miedzi, pole przekroju uzwojenia $S = 2,136 \text{ mm}^2$.

- Indukcyjność rozproszenia transformatora pośredniczącego L_{TP} :

$$L_{TP} = \mu_0 z^2 \frac{L_{sr}}{L_u} \left(\frac{a_1}{3} + \delta + \frac{a_2}{3} \right) \quad (5)$$

gdzie (rys. 4b): długość średnia zwoju $L_{sr} = 0,42$ m, wysokość uzwojenia $L_u = 0,03$ m, grubość uzwojeń $a_1 = a_2 = 0,7$ mm, grubość szczeliny powietrznej $\delta = 5$ mm, ilość zwojów $z = 3$.

- Rezystancja uzwojenia wtórnego transformatora pośredniczącego R_{TP} :

$$R_{TP} = \frac{lz}{rS} \quad (6)$$

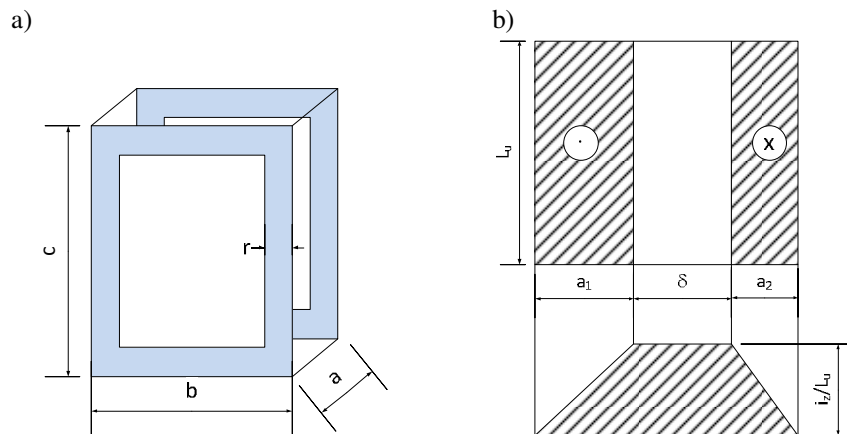
gdzie: długość jednego zwoju $l = 0,5$ m, liczba zwojów $z = 3$, r – rezystancja właściwa miedzi, pole przekroju uzwojenia $S = 2,136 \text{ mm}^2$.

- Indukcyjność magnesowania rdzenia transformatora pośredniczącego $L_{\mu TP}$ (obliczono na podstawie informacji katalogowych dla rdzenia ferrytowego typu E55/28/21):

$$L_{\mu TP} = AL \cdot z^2 \cdot n \quad (7)$$

gdzie: współczynnik indukcyjności zastosowanego rdzenia $AL = 6100 \text{ nH}$ (indukcyjność jednozwojowej cewki nawiniętej na danym rdzeniu), liczba zwojów $z = 3$, liczba rdzeni $n = 10$.

- Straty w rdzeniu oszacowano na podstawie informacji katalogowych dla rdzenia ferrytowego typu E55/28/21 i wyniosły one około $8,4 \text{ W}$, stąd odnosząc je do napięcia wyjściowego generatora wynoszącą 100 V , uzyskuje się wartość $R_{FeTP} \sim 1200 \Omega$.



Rys. 4. Poglądowe rysunki pomocne przy obliczaniu parametrów układu elektrycznego:
a) uzwojenie pierwotne transformatora TP (a – wysokość uzwojenia, b – długość szyn, c – odległość między szynami, r – grubość warstwy miedzi), b) fragment transformatora TP

Parametry obwodu wzbudnik-walec, z powodu złożoności występujących w nim zjawisk zostały oszacowane empirycznie. W tym celu doprowadzono układ do rezonansu, dobierając odpowiednią wartość pojemności kondensatora rezonansowego C_R ($C_R = 0,25 \mu\text{F}$). Następnie dla częstotliwości rezonansowej $f_R \approx 20 \text{ kHz}$ obliczono zastępczą indukcyjność układu wzbudnik-wsad jako $L_W \approx 250 \mu\text{H}$. Podobnie postąpiono przy wyznaczaniu rezystancji zastępczej R_w , gdzie podczas pracy urządzenia pomierzono moc wydzielaną w walcu oraz prąd układu szyn. Stąd dla mocy około 1 kW i prądu 12 A uzyskuje się wartość $R_w \approx 6,94 \Omega$.

Obliczone wg powyższych zależności wartości elementów układu elektrycznego zebrano w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości parametrów zastępczego układu elektrycznego

Parametr	Wartość
Indukcyjność własna układu szyn L_{USZ}	$10,85 \mu\text{H}$
Rezystancja własna układu szyn R_{USZ}	$0,11 \Omega$
Indukcyjność rozproszenia transformatora L_{TP}	$0,87 \mu\text{H}$
Rezystancja uzwojenia wtórnego R_{TP}	$0,013 \Omega$
Indukcyjność magnesowania rdzenia $L_{\mu TP}$	$540 \mu\text{H}$
Straty w rdzeniu (rezystancja zastępcza R_{FeTP})	1200Ω
Indukcyjność zastępcza układu wzbudnik-wsad L_W	$250 \mu\text{H}$
Rezystancja zastępcza układu wzbudnik-wsad R_w	$6,94 \Omega$

Wyznaczone parametry zastępczego układu elektrycznego posłużyły do obliczenia wartości spadków napięć oraz strat mocy w poszczególnych elementach układu.

Oszacowane w ten sposób spadki napięć na reaktancjach układu szyn i reaktancji rozproszenia transformatora pośredniczącego wskazują, iż obniżenie sprawności projektowanego układu (w stosunku do układu z nieruchomymi wzbudnikami) nie powinno przekroczyć 16%, co pozwala zapewnić wymaganą moc grzejną dostarczaną do walca. Z kolei wynikające z obliczeń straty mocy w układzie szyn, w uzwojeniu wtórnym i rdzeniu transformatora TP przy pełnej mocy obciążenia układu nie powinny doprowadzić do przegrzania konstrukcji.

3. PARAMETRY TECHNICZNE I EKSPLOATACYJNE UKŁADU

Weryfikacja eksperymentalna zbudowanego zgodnie z powyższymi wytycznymi układu napędu i bezprzewodowego zasilania wzbudników potwierdziła, iż spełnia on założone parametry techniczne przedstawione w tabeli 1. W szczególności uzyskiwane moce grzejne i prędkości ruchu wzbudników odpowiadają wymaganiom prowadzonych prac badawczych. Przykłady realizacji układu regulacji temperatury powierzchni walca z wykorzystaniem ruchomych wzbudników przedstawiono w [2].

W trakcie badań eksperymentalnych wykonano pomiary parametrów elektrycznych układu, uzyskując wysoką zgodność z oszacowaniami teoretycznymi przedstawionymi w pkt. 2.2. Bardzo ważnym parametrem układu, decydującym o jego trwałości i potwierdzającym poprawność przyjętych rozwiązań, jest temperatura pracy poszczególnych elementów układu. Przykładowe wyniki pomiarowe temperatur w różnych punktach układu przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Temperatura pracy wybranych elementów układu

Temperatura otoczenia	25°C
Temperatura powierzchni układu szyn	35°C
Temperatura uzwojenia wtórnego transformatora TP	33°C
Temperatura uzwojenia wzbudnika	42°C
Temperatura powierzchni walca	67°C

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły słuszność wybranej koncepcji układu zasilania oraz poprawność opracowanej konstrukcji, która spełniła założone wymagania zarówno w warstwie mechaniczno-napędowej, jak i elektrycznej. Urządzenie ma charakter prototypowy, tak więc przyjęte w nim rozwiązania

i zgromadzone doświadczenia mogą stanowić podstawę budowy takich układów o charakterze przemysłowym. Przykładowo, zaobserwowane stosunkowo niskie przyrosty temperatury niektórych podzespołów wskazują na możliwość zwiększenia mocy przenoszonej przez układ oraz zmniejszenie jego wymiarów i masy wózków, na których osadzone są wzbudniki. Może to dać wymierne efekty np. w postaci zmniejszenia kosztów konstrukcji przy zachowaniu lub poprawie parametrów eksploatacyjnych urządzenia.

PODZIĘKOWANIA

Prezentowane badania zrealizowano w ramach projektu badawczego N N519 579838 Narodowego Centrum Nauki.

LITERATURA

- [1] **Frączyk A., Urbanek P., Kucharski J.:** Modelling and optimal temperature control of in-duction heated rotating steel cylinder, 13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. Szczecin, 2007, ss. 351-355.
- [2] **Frączyk A., Urbanek P., Kucharski J.:** Algorytmy sterowania nagrzewaniem indukcyjnym wirującego walca stalowego za pomocą ruchomych wzbudników. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2010, rocznik 86, nr 2, ss. 42-46.
- [3] **Kalantarov P.L., Ceitlin L.A.:** Rascziot induktivnosti. Leningrad ENERGOATOM, IZDAT, 1986.
- [4] **Jegierski E.:** Transformatory. WNT, Warszawa 1975.
- [5] Karty katalogowe rdzeni ferrytowych EE 55/28/21.

WIRELESS POWER SUPPLY OF MOVING INDUCTORS FOR INDUCTION HEATING OF ROTATING CYLINDER

Summary

In the paper the design and implementation of wireless supply of inductors used for induction heating of the rotating steel cylinder. Such cylinders are often an important component of paper making machines. Proposed solution allows the heating power to be dissipated in cylinder mantel in a flexible and selective manner so that high accuracy of temperature control can be achieved.

Keywords: wireless power supply, induction heating, moving inductors.