

**JERZY ZGRAJA**

Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej

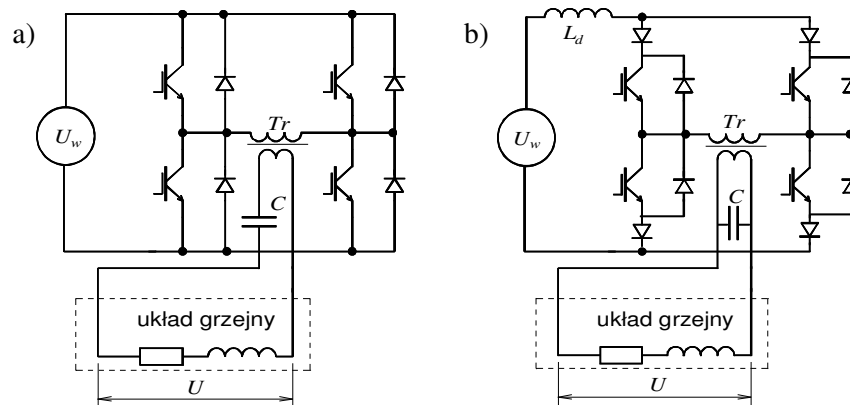
## **WSPÓŁPRACA INDUKCYJNEGO UKŁADU GRZEJNEGO Z SZEREGOWYM FALOWNIKIEM REZONANSOWYM**

*We współczesnych instalacjach nagrzewania indukcyjnego energo-elektroniczne źródła zasilania oparte o tranzystory mocy stanowią grupę dominującą. W pracy przeanalizowano symulacyjnie współpracę dwóch typowych indukcyjnych układów grzejnych z napięciowym falownikiem rezonansowym. Symulację oparto o sprzężoną analizę pola elektromagnetycznego AC z nieustalonym polem temperatury, z uwzględnieniem zmieniających się z temperaturą wsadu parametrów zasilania układu wzбудnik-wsad.*

### **WPROWADZENIE**

Nagrzewanie indukcyjnie jest współcześnie dominującą technologią przemysłowego nagrzewania wsadów metalowych przed obróbką cieplną czy przeróbką plastyczną. Przy opracowywaniu technologii, albo budowie elementów składowych nagrzewnicy czy pieca indukcyjnego technolodzy i projektanci wspomagają się obliczeniami symulacyjnymi. W zależności od realizowanego zadania dotyczyć to może połowych obliczeń np. pola elektromagnetycznego, temperatury, naprężeń czy przepływu, albo obwodowych obliczeń energoelektronicznych czy obliczeń układów regulacji. Te różnego typu obliczenia symulacyjne są bardzo często wykonywane w sposób autonomiczny i tak obliczenia polowe nie łączą się z obwodowymi obliczeniami energoelektronicznymi, czy obliczeniami układów regulacji. Do rzadkości należą np. przypadki w których indukcyjny układ grzejny jest symulowanym polowo obiektem regulacji, czy obliczenia energoelektroniczne źródła zasilania uwzględniają zmieniające się z temperaturą i kształtem sygnału wejściowego parametry układu wzбудnik-wsad [1]. Dotyczy to również symulacji pola elektromagnetycznego układu wzбудnik-wsad (UWW), które zazwyczaj są wykonywane niemal w oderwaniu od źródła zasilani, które jest traktowane jako zasilanie o stałym napięciu czy prądzie oraz częstotliwości. Stosunkowo rzadko prezentowane są próby [2], [3] symulacji współpracy indukcyjnego układu

grzejnego i zasilającego go generatora. Źródła zasilania współczesnych nagrzewnic indukcyjnych to głównie falowniki rezonansowego napięcia lub prądu, jak to przedstawiono schematycznie na rys. 1.



Rys. 1. Falownik tranzystorowy: a) napięcia, b) prądu do nagrzewania indukcyjnego

W tego typu rozwiązaniach, w których UWW stanowi zasadniczą część obwodu rezonansowego, zmiany jego parametrów elektrycznych w trakcie nagrzewania czy ruchu wsadu są powodem często znaczących zmian sygnału wyjściowego z generatora, co oddziałuje na nagrzewający się wsad. Uwzględnienie wzajemnej interakcji źródła i obciążenia ma więc istotne znaczenie z punktu widzenia symulacji procesu nagrzewania. Umiejętne symulowanie komputerowe tego oddziaływania może być użyteczne zarówno z punktu widzenia wiarygodności wyników symulacji, jak i do opracowania sposobów ograniczenia, czy wręcz sterowania tym wzajemnym oddziaływaniem poprzez wprowadzenie dodatkowych układów pośredniczących, dopasowujących między źródłem i UWW.

W pracy przedstawiono metodologię komputerowej symulacji sprzężonych obliczeń elektromagnetyczno-cieplnych UWW uwzględniających zmianę częstotliwości i napięcia zasilania wywołaną nagrzewaniem wsadu o zmiennych z temperaturą parametrach elektryczno-cieplnych. Przedstawiono również wstępne wyniki symulacji współpracy wybranych cylindrycznych UWW z falownikiem o rezonansie szeregowym.

### INDUKCYJNE NAGRZEWANIE WSADU JAKO SPRZĘŻONY PROBLEM ELEKTROMAGNETYCZNO-CIEPLNY

Z teoretycznego punktu widzenia analiza pola elektromagnetycznego UWW sprowadza się do rozwiązania równań Maxwella określającego pole magnetyczne:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (1)$$

oraz pole elektryczne

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mathbf{J} = 0, \quad \mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\gamma} \quad (2)$$

gdzie:  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  – wektor natężenia pola magnetycznego i elektrycznego,  $\mathbf{B}$  – wektor indukcji magnetycznej,  $\mathbf{J}$  – wektor gęstości prądu,  $\mu$  – przenikalność magnetyczna,  $\gamma$  – przewodność elektryczna.

Rozwiązanie powyższych równań jest realizowane na różne sposoby i przy stosowaniu różnych założeń upraszczających. Przy nagrzewaniu indukcyjnym zakłada się np. pomijalność prądu przesunięcia czy (poza specjalnymi instalacjami do nagrzewania wsadów o małej rezystywności [4] ) prądu indukowanego ruchem wsadu. Zagadnienie nieliniowości magnetycznej występujące dla wsadów ferromagnetycznych (które stanowią podstawowy asortyment indukcyjnie nagrzewanych wsadów) prowadzi w oczywisty sposób do potrzeby analizowania zjawisk elektromagnetycznych w domenie czasu. Względy praktyczne związane z uproszczeniem procesu obliczeniowego powodują mimo to, że obliczenia elektromagnetyczne (szczególnie sprzężone z obliczeniami cieplnymi) są bardzo często prowadzone w dziedzinie liczb zespolonych. Dążenie do zmniejszenia liczby zmiennych modelu obliczeniowego powodują wykorzystywanie w obliczeniach tzw. potencjałów wektorowych : magnetycznego  $\mathbf{A}$  lub elektrycznego  $\mathbf{T}$ .

Obliczenia pola temperatury we wsadzie prowadzą do rozwiązywania równania Fourier-Kirchhoffa:

$$\operatorname{div}[(-\lambda)\operatorname{grad}\vartheta] + \rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = p_v \quad (3)$$

gdzie:  $\lambda$  – przewodność cieplna właściwa,  $\rho$  – gęstość masy,  $c$  – ciepło właściwe,  $p_v$  – gęstość objętościowa strumienia cieplnego,

z uwzględnieniem odpowiednich warunków brzegowych i warunku początkowego.

Zależność występujących w równaniach (1) i (2) elektrycznych parametrów materiałowych od temperatury oraz będącej wynikiem działania pola elektromagnetycznego gęstości objętościowej strumienia cieplnego  $p_v$  w równaniu (3) powoduje oczywistą potrzebę wzajemnego połączenia obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych. Połączenie to może być również zrealizowane w różny sposób. Podstawowy sposób tzw. „sprzężenie silne” polega na

funkcyjnym połączeniu zależności opisujących oba pola i rozwiązywaniu ich jednocześnie, co ze względu na skalę trudności może być obecnie stosowane do analizy bardzo prostych przypadków, np. 1D. Sprzężenie „słabe”, iteracyjne to powszechnie stosowany sposób łączenia obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych. Dla przypadków w których mamy do czynienia z dużą równomiernością rozkładu pola temperatury i stosunkowo niewielkimi jej przyrostami, stosowane jest tzw. „jednokierunkowe” sprzężenie czy też połączenie obliczeń, polegające jedynie na przeniesieniu rozkładu źródeł ciepła z obliczeń elektromagnetycznych do obliczeń cieplnych.

### **REALIZACJA SPRZEŻONYCH OBLICZEŃ ELEKTRO-MAGNETYCZNO - CIEPLNYCH ZA POMOCĄ KOMERCYJNEGO PAKIETU FLUX®**

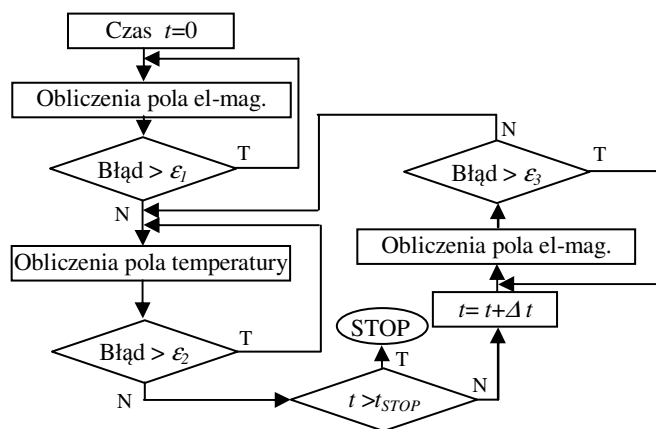
Symulacyjne obliczenia numeryczne pola elektromagnetycznego, czy cieplnego są obecnie możliwe do zrealizowania w układach 2D i 3D przy wykorzystaniu komercyjnych pakietów obliczeniowych np. [5] [6]. Korzystanie z pakietów komercyjnych wzbogacanych, w zależności od potrzeb, własnymi procedurami i programami współpracującymi wydaje się obecnie najbardziej efektywną formą prowadzenia badań naukowych w obszarach obejmujących obliczeniową analizę zjawisk elektromagnetyczno-cieplnych, tj. nagrzewanie indukcyjne.

W niniejszej pracy bazowano na oprogramowaniu komercyjnym Flux® francuskiej firmy CEDRAT. W pakiecie tym istnieje możliwość realizowania sprzężonych obliczeń elektromagnetyczno-cieplnych w układzie 2D i 3D. Obliczenia te (moduł Steady AC Magnetic Coupled to Transient Thermal) są oparte o wykorzystanie „słabego” sprzężenia iteracyjnego łączącego analizę harmonicznego w czasie pola elektromagnetycznego (moduł Steady AC Magnetic) opisanego w przestrzeni liczb zespolonych z analizą niustalonego pola temperatury (moduł Transient Thermal), jak to przedstawiono schematycznie na rys. 2.

Moduł do elektromagnetyczno-cieplnych obliczeń sprzężonych programu Flux® stanowi bardzo wygodne narzędzie do realizacji symulacji nagrzewania indukcyjnego. W stosunkowo łatwy sposób pozwala on zbudować dyskretny model geometryczny, a następnie określić model fizyczny zarówno dla części elektromagnetycznej, jak i cieplnej przy wykorzystaniu udostępnionych w programie poleceń.

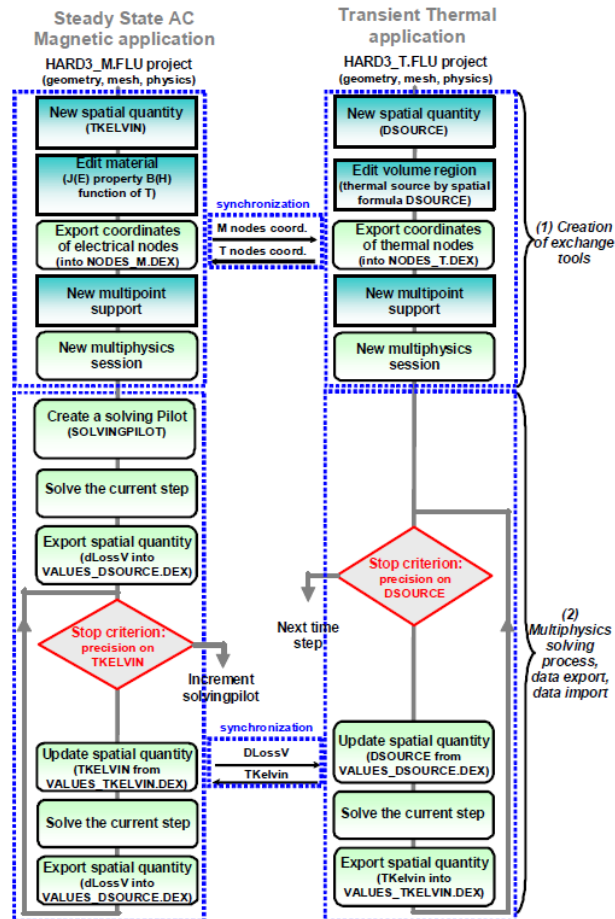
Stosowanie tego modułu niesie ze sobą niestety również bardzo istotne ograniczenia. Obliczenia elektromagnetyczne muszą być realizowane przy wykorzystaniu opisu harmonicznego pola z wykorzystaniem liczb zespolonych. Nie ma możliwości posługiwania się, szczególnie ważnym przy nagrzewaniu

wsadów ferromagnetycznych, opisem pola nieustalonego. Stosowanie tego opisu wprawdzie dramatycznie zwiększa koszt komputerowy obliczeń, ale w pewnych specyficznych przypadkach może być nieodzowne. Z punktu widzenia praktyki nagrzewania indukcyjnego dużo bardziej uciążliwym ograniczeniem omawianego modułu jest jednak konieczność wykonywania obliczeń dla ustalonej, stałej częstotliwości źródła zasilani, nie mówiąc już o uwzględnieniu wzajemnej interakcji źródła i obciążenia.



Rys. 2. Ogólny algorytm obliczeń sprzężonych pakietu Flux<sup>®</sup>

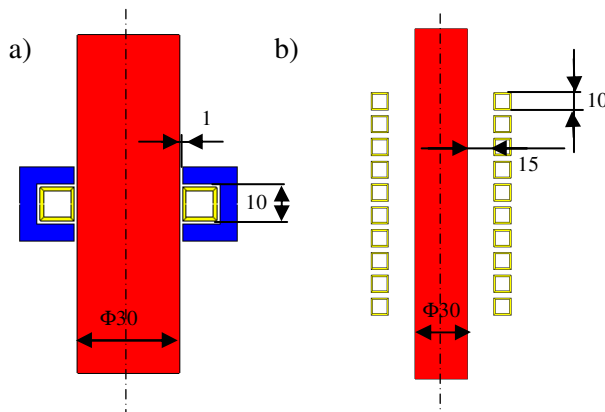
Rozwiązaniem tych problemów może być wykorzystanie udostępnionego w programie modułu Multiphysics. Pozwala on na łączenie pracy programu Flux<sup>®</sup> z pracą innych programów (w tym również innego procesu obliczeniowego programu Flux<sup>®</sup>) poprzez łączność opartą o wymianę plików dyskowych. Tego typu połączenie pracy programów wydaje się czasowo mało efektywne, ale w praktyce biorąc pod uwagę czas pojedynczych obliczeń polowych oraz ilość wzajemnych „kontaktów” programów nie przenosi się to zwykle na zauważalne zwiększenie całkowitego czasu obliczeń. Tego typu rozwiązanie daje duże możliwości rozwojowe. Pozwala ono wykorzystać oprogramowanie komercyjne do bardzo specjalizowanych zastosowań w tej ich części którą jest ono w stanie rozwiązać, nie zamykając jednocześnie użytkownikowi możliwości własnych twórczych działań. Przy tego typu podejściu użycie programu komercyjnego wymaga oczywiście dużo większej wiedzy programistycznej. W przypadku oprogramowania Multiphysics praca programu Flux<sup>®</sup> jest sterowana plikiem w języku Python. Ideę pracy z wykorzystaniem modułu Multiphysics dla przypadku dwóch projektów (Steady State AC oraz Transient Thermal) realizowanych jednocześnie przez dwa uruchomienia programu Flux<sup>®</sup> przedstawiono w [7] tak jak na rys. 3.



Rys. 3. Zasada wymiany danych między programami pracującymi z wykorzystaniem modułu Multiphysics [7]

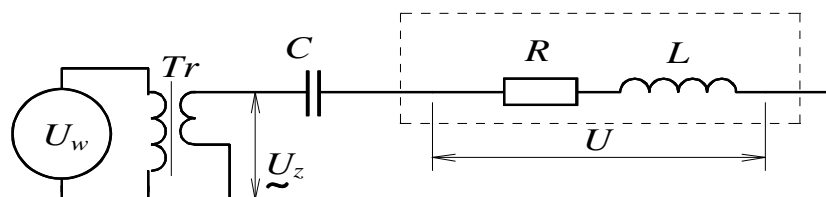
## WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

Analizę symulacyjną współpracy UWW ze źródłem zasilania przeprowadzono dla dwóch układów cylindrycznych, które arbitralnie uznano za reprezentatywne dla procesu obróbki cieplnej (hartowanie) rys. 4a oraz nagrzewania przed przeróbką plastyczną (np. kuciem) rys. 4.b. Zasadnicza różnica między rozważanymi UWW sprowadzała się do liczby zwojów wzbudnika (rys. 4a – 1 zwoj, rys. 4b – 10 zwojów) oraz wielkości szczeliny powietrznej między wzbudnikiem i wsadem (odpowiednio 1 mm i 15 mm).



Rys. 4. Rozważane układy wzbudnik-wsad do nagrzewania przed:  
a) obróbką cieplną, b) przeróbką plastyczną

Przyjęto, że UWW zostaną zasilone ze źródła w postaci falownika rezonansowego z rezonansem szeregowym, jak to przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat przyjętego zasilania układu wzbudnik-wsad

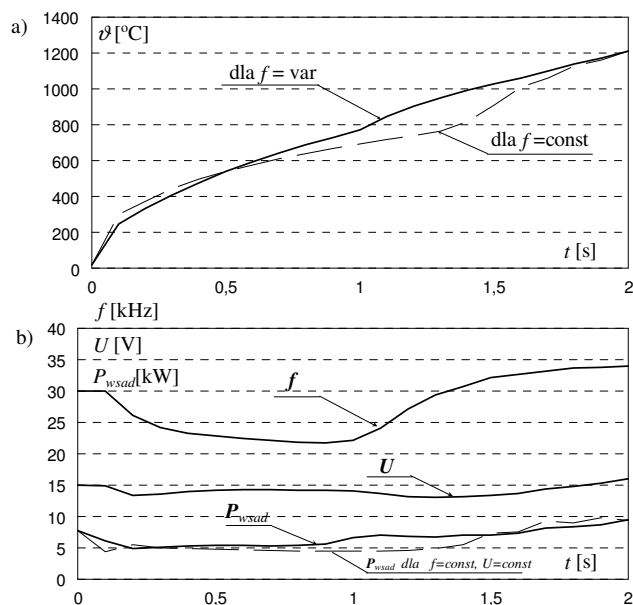
Jak przedstawiono w pracach [3] [8] dla UWW o dobroci  $Q = L/R > 4$  oraz typowych czasów martwych  $t_d$  załączania tranzystorów mniejszych od kilku do kilkunastu procent okresu  $T$  drgań, w prądowym sygnale wyjściowym takiego falownika dominuje pierwsza harmoniczna z błędem wartości RSM mniejszym od 2÷3 procent. Z tego też względu w rozważaniach, zakładających inne niż kątem wysterowania regulowanie mocy dostarczanej z falownika, posłużono się źródłem sinusoidalnym pierwszej harmonicznej  $U_z$  po stronie wtórnej transformatora dopasowującego – rys. 5. W rozważaniach pominięto dodatkowo czas martwy, przyjmując częstotliwość pracy równą częstotliwości rezonansu szeregowego.

Korzystając z modułu Multiphysics oraz modyfikując zawarty w [7] plik w języku Python, zrealizowano połączenie pracy programu Flux wykonującego obliczenia elektromagnetyczne AC z pracą tego programu realizującą nieustalone obliczenia cieplne. Synchronizację pracy oparto o pliki dyskowe sygnalizujące stan zakończenia danego typu obliczeń. Obliczenia elektromagnetyczne czekają więc na wykonanie obliczeń cieplnych i odwrotnie.

Tego typu podejście jest obarczone sygnalizowanym wyżej spowolnieniem związanych z wymianą danych poprzez dysk, ale nie ogranicza ono w niczym pracy wielordzeniowej czy wieloprocesorowej tyle, że dotyczy to zawsze jednocześnie jednego rodzaju obliczeń.

W zmodyfikowanym pliku sterującym wprowadzono dodatkowo procedury pozwalające na zmianę częstotliwości  $f$  i napięcia  $U$  zasilania UWW w funkcji zmieniających się z temperaturą jego wartości zastępczych  $R$  i  $L$ , przy stałości pojemności rezonansowej  $C$  oraz wartości skutecznej napięcia  $U_z$  z transformatora dopasowującego zasilanego przez falownik.

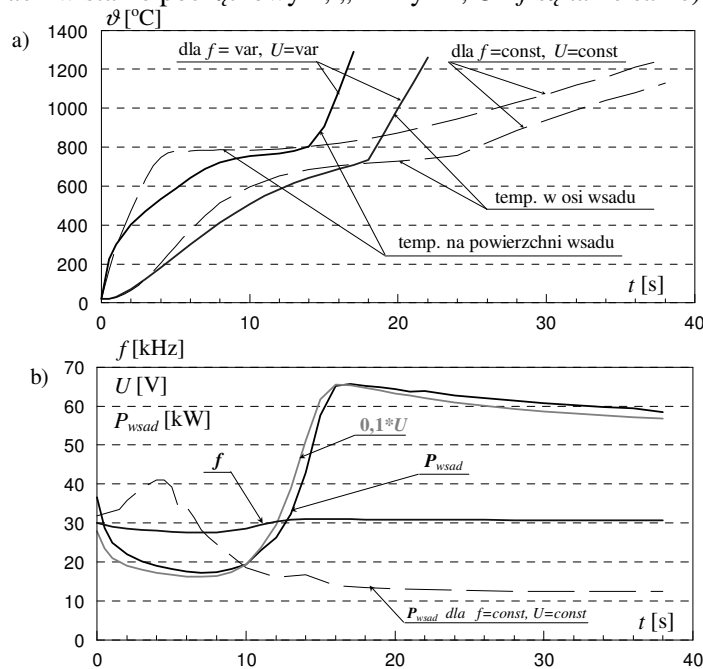
Przykładowe symulacje dla układu z rys. 4a zrealizowano do ferromagnetycznego wsadu stalowego o rezystywności  $\rho = 0,25 \cdot 10^{-6}(1+4 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta)$  przy wartości pojemności  $C = 0,426$  mF (rys. 5, co w stanie „zimny” daje częstotliwość rezonansową  $f = 30$  kHz) i napięciu wyjściowym z transformatora dopasowującego  $U_z = 9,0$  V (co w początkowym „zimny” stanie procesu daje wartość skuteczną napięcia na UWW  $U = 15$  V). Uzyskany przebieg czasowy temperatury powierzchni (w środkowej części pod wzbudnikiem) przedstawiono na rys. 6a. Na rys. 6b przedstawiono przebiegi częstotliwości  $f$  prądu, napięcia  $U$  na UWW oraz mocy  $P_{wsad}$  wydzielonej we wsadzie. Na rysunkach tych przedstawiono również przebiegi temperatury i mocy we wsadzie uzyskane przy posługiwaniu się modułem sprzężonym programu Flux, tj. przy stałej częstotliwości oraz przy założeniu stałości napięcia  $U$  na wzbudniku (w obu przypadkach w stanie początkowym, „zimnym”,  $U$  i  $f$  są takie same).



Rys. 6. Przebiegi a) temperatury oraz b) częstotliwości  $f$ , napięcia  $U$  na UWW i mocy  $P_{wsad}$  wydzielonej we wsadzie w trakcie nagrzewania



Dla tego samego typu wsadu nagrzewanego w układzie z rys. 4b zrealizowano przykładowe symulacje nagrzewania do przypadku wartości napięcia wyjściowego z transformatora dopasowującego  $U_z = 49,6$  V (co w początkowym „zimny” stanie procesu daje wartość skuteczną napięcia na UWW  $U = 280$  V). przy wartości pojemności rezonansowej  $C = 13,96$   $\mu$ F (co w stanie „zimny” daje, tak jak poprzednio, częstotliwość rezonansową  $f = 30$  kHz). Na rys. 7a przedstawiono uzyskane przebiegi czasowy temperatury powierzchni i w osi wsadu (w środkowej części pod wzbudnikiem). Na rys. 6b przedstawiono przebiegi zmian wartości częstotliwości  $f$  prądu, napięcia  $U$  na UWW oraz mocy wydzielonej we wsadzie. Tak jak poprzednio na rysunkach tych przedstawiono również przebiegi temperatury i mocy we wsadzie uzyskane przy posługiwaniu się modulem sprzężonym programu Flux, tj. przy stałej częstotliwości oraz przy założeniu stałości napięcia  $U$  na wzbudnik (w obu przypadkach w stanie początkowym, „zimnym”,  $U$  i  $f$  są takie same)



Rys. 7. Przebiegi a) temperatury oraz b) częstotliwości  $f$ , napięcia  $U$  i mocy  $P_{wsad}$  wydzielonej we wsadzie w trakcie nagrzewania w układzie z rys. 4b

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono przykładowe wyniki symulacji procesu nagrzewania wsadu przed obróbką cieplną (rys. 4.a) i przeróbką plastyczną (rys. 4.b) z uwzględnieniem współpracy UWW z falownikiem napięciowym. Przy prze-

prowadzanej analizie obliczeniowej, przyjęto szereg założeń upraszczających, np. że generator jest utrzymywany w stanie rezonansu. Przeprowadzona analiza została oparta o wykorzystanie programu komercyjnego Flux<sup>®</sup> zarówno do obliczeń cieplnych, jak i elektromagnetycznych. Praca programu była sterowana programowo (plikiem w języku Python) z wymianą danych przez dysk, co daje znacznie większe możliwości symulacyjne, np. pozwala na zmianę częstotliwości w trakcie obliczania pola elektromagnetycznego z wykorzystaniem liczb zespolonych. Zaprezentowane przykłady pokazały jak znaczny wpływ na wyniki symulacji procesu nagrzewania może mieć uwzględnienie występujących zmian częstotliwości oraz napięcia na wzbudniku, co jest szczególnie widoczne do układu z rys. 4b.

### LITERATURA

- [1] Kobos W., Zgraja J.: Obwodowy model rezonansowego falownika prądu współpracującego z indukcyjnym układem grzejnym', *Przegląd Elektrotechniczny* nr 7/2011, ss. 28-31.
- [2] Julegin A., Demidovich V. et.: Coupled modelling of induction systems: heaters and power sources, HES-13, 21-24 May 2013, Padua, pp. 237-243.
- [3] Zgraja J., Bereza J.: Computer simulation of induction heating system with series inverter, *The Int. J. for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, COMPEL*, Vol. 22, no. 1, 2003, pp. 48-57.
- [4] Fabbri M., Morandi A., and Ribani L.: DC induction heating of aluminum billets using superconducting magnets, *COMPEL*, Vol. 27, No. 2, pp. 480-490, 2008.
- [5] Cedrat, "Flux User's Guide" v.11.1, 2012.
- [6] ANSYS Maxwell 15 software documentation, ANSYS Inc., 2011.
- [7] Cedrat, "Induction heating with multiphysics coupling tutorial, 2D technical example", 2009.
- [8] Zgraja J.: Symulacja i optymalizacja komputerowa w analizie indukcyjnego nagrzewania powierzchni płaskich, Monografia, *Zeszyty Naukowe PŁ* nr 996, Łódź 2007.

*Praca finansowana ze środków NCBiR w ramach projektu Badań Stosowanych nr umowy PBS1/A4/2/2012.*

### COOPERATION OF INDUCTION HEATING SYSTEM WITH SERIES INVERTER

#### SUMMARY

*In modern system of induction heating the power electronic transistor inverter are usually used. In the paper the cooperation of two typical inductor-charge systems with series inverter was analysed. The influence of temperature changing of charge parameters has been taken into account.*

Keywords: induction heating, inverter.