



POLITECHNIKA ŁÓDZKA

Instytut Informatyki Stosowanej



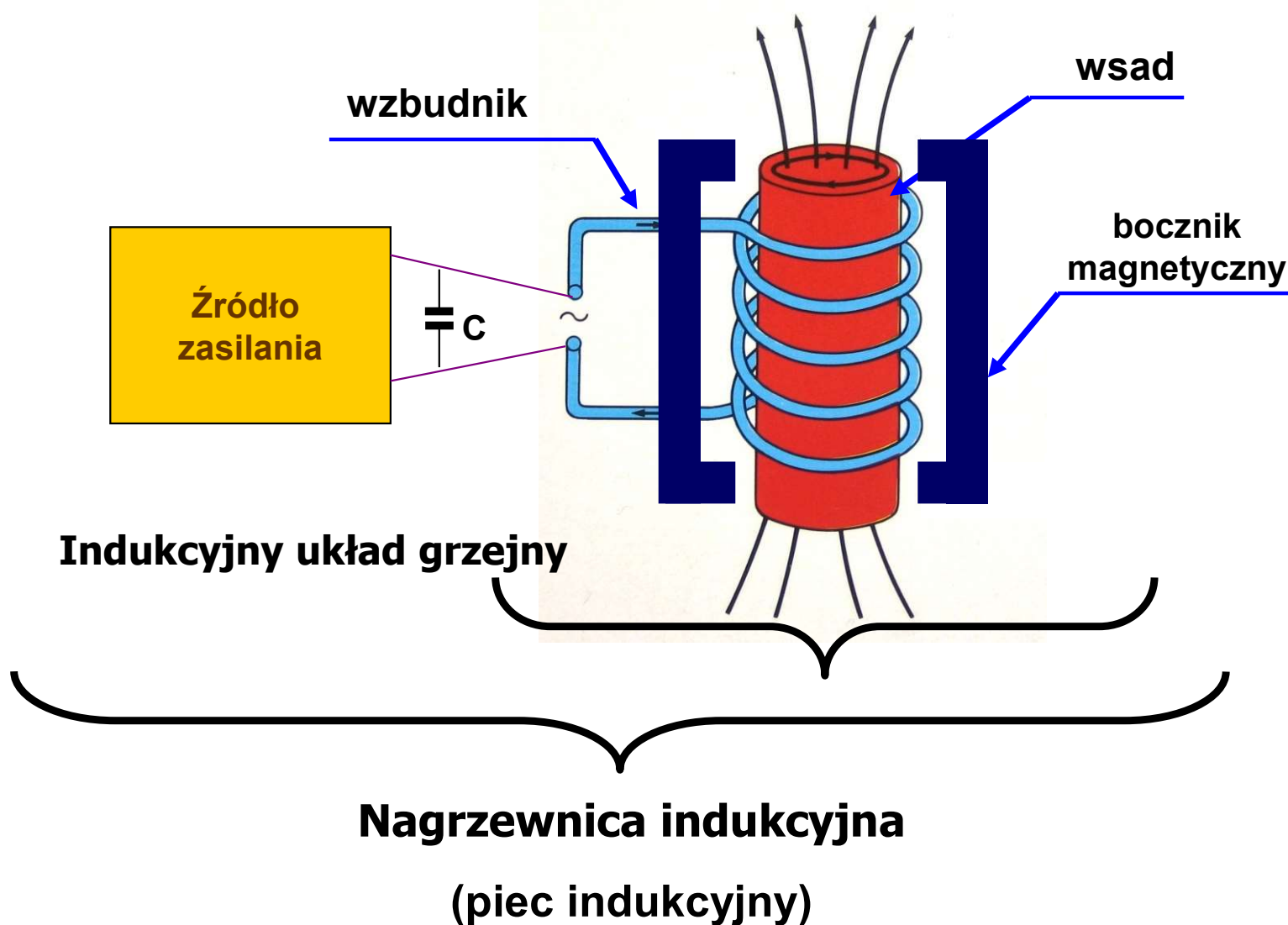
Jerzy Zgraja

Współpraca źródła z obciążeniem w falownikach rezonansowych do nagrzewania indukcyjnego

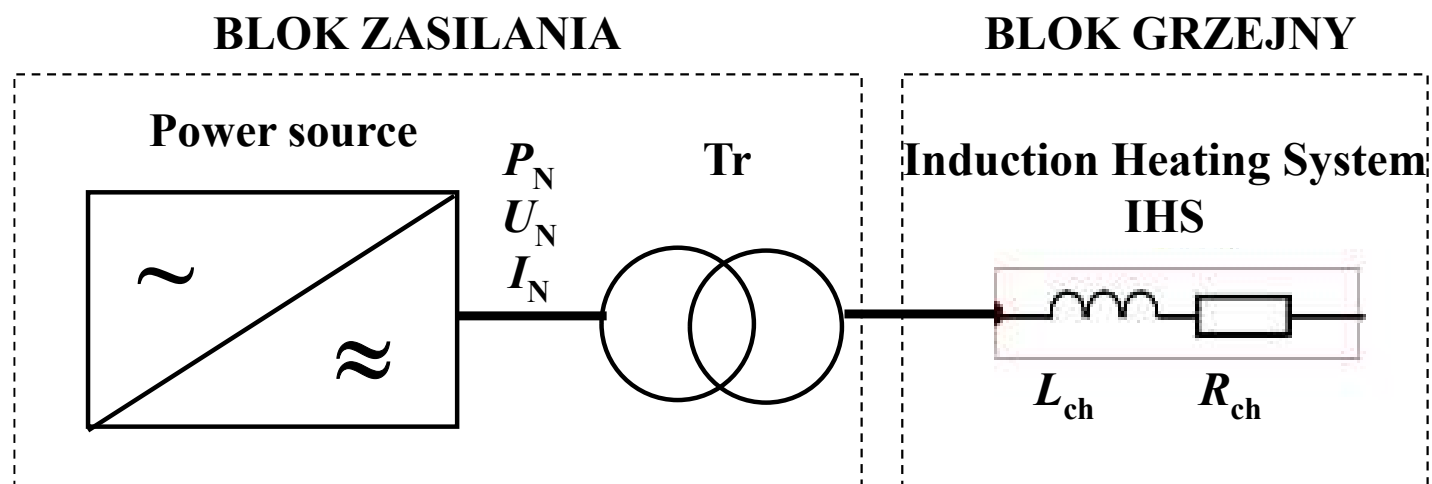
Na podstawie:

J. Zgraja, Współpraca źródła z obciążeniem w procesach nagrzewania indukcyjnego, Monografie PŁ, 2019

Stanowisko do nagrzewania indukcyjnego:



Stanowisko do nagrzewania indukcyjnego:



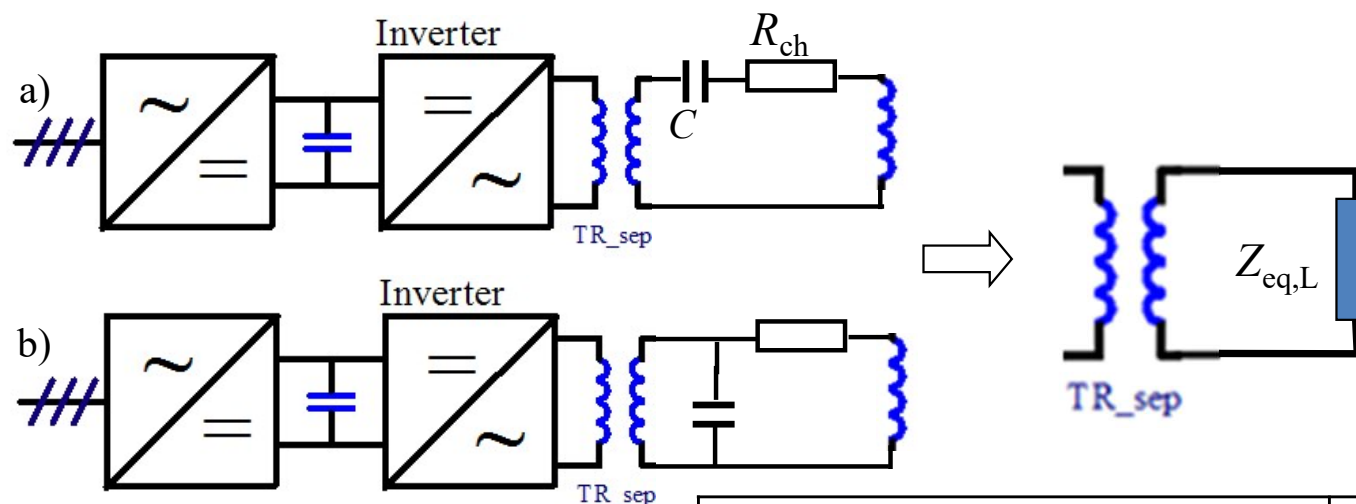
Główne człony funkcjonalne urządzenia do nagrzewania indukcyjnego.

Stanowisko do nagrzewania indukcyjnego:



Typowy schemat konwersji energii we współczesnych generatorach do nagrzewania indukcyjnego.

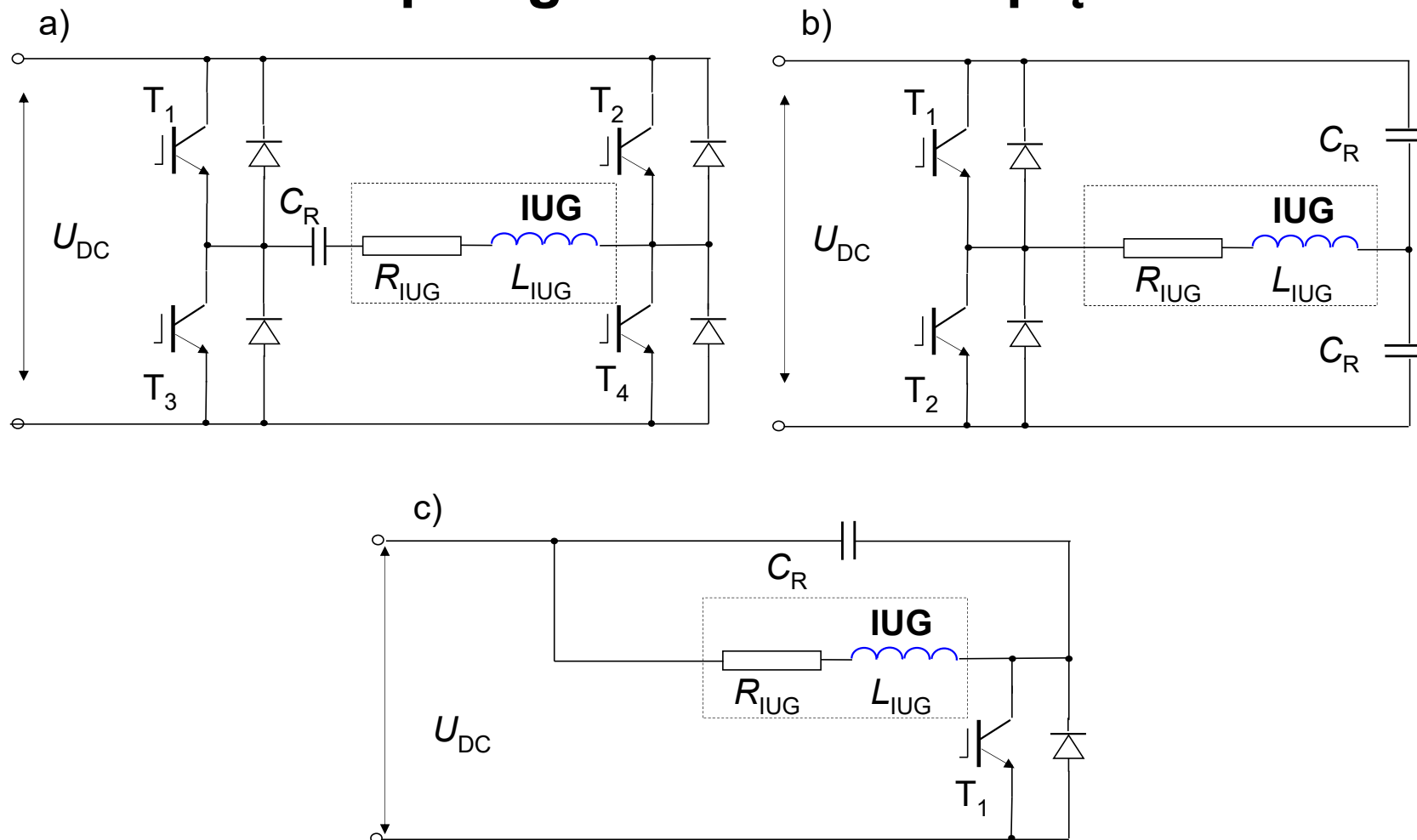
Generatory rezonansowe do nagrzewania indukcyjnego:



Topologie podstawowych układów rezonansowych falowników:
a) szeregowy, b) równoległy.

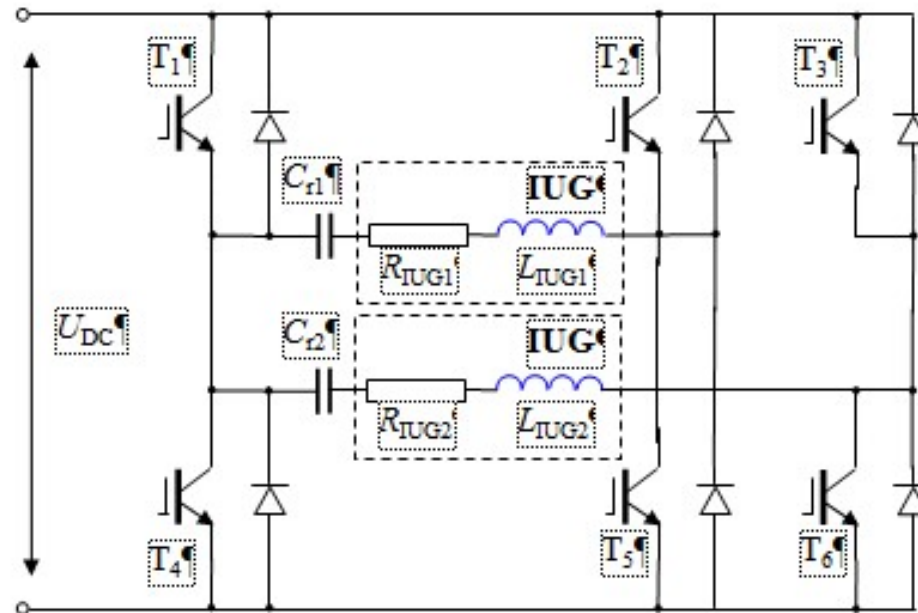
Falownik szeregowy	Falownik równoległy
Prosta struktura, tani (+)	Możliwa praca na pustym wzбудniku (+)
Proste układy regulacji (+)	Odporność na zwarcia wzбудnika (+)
Możliwe zasilanie z prostownika niesterowanego (+)	Nie wymagane kondensatory na wysokie napięcia (+)
Regulacja mocy poprzez zmianę częstotliwości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

Podstawowe topologie falownika napięcia:



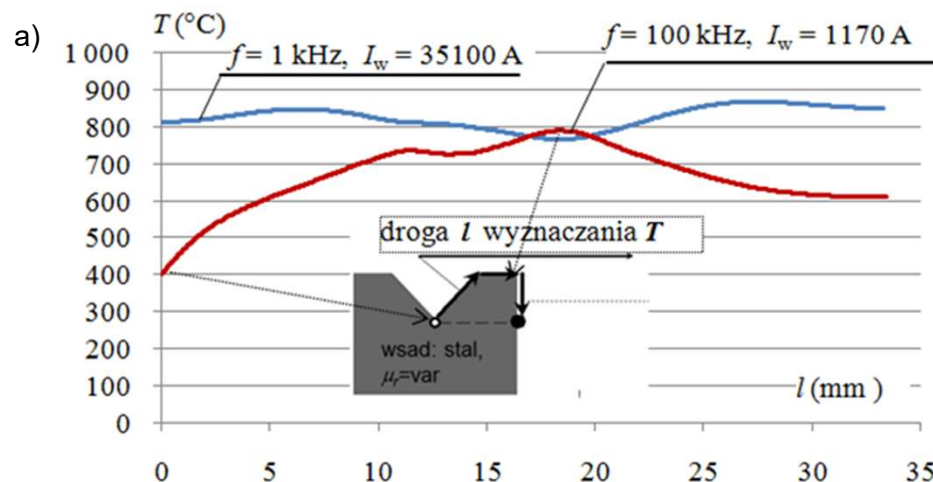
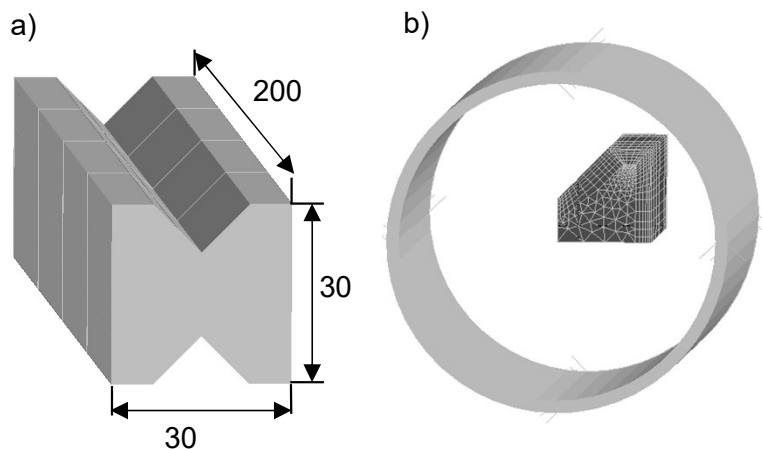
Podstawowe topologie falowników napięcia z rezonansem szeregowym: a) pełny mostek, b) pół-mostek, c) jedno-łącznikowy falownik quasi-rezonansowy.

Rozwiązania mniej typowe:

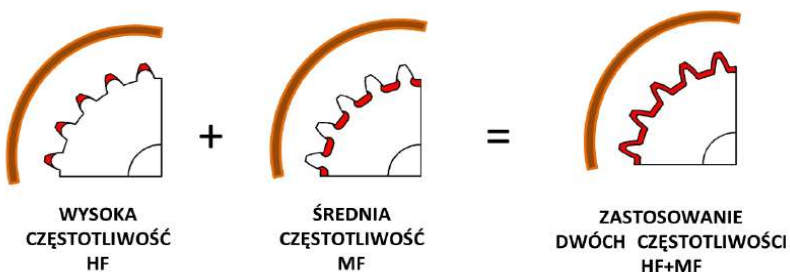


Układ mostkowy falownika dwuwyjściowego do zasilania dwóch IUG.

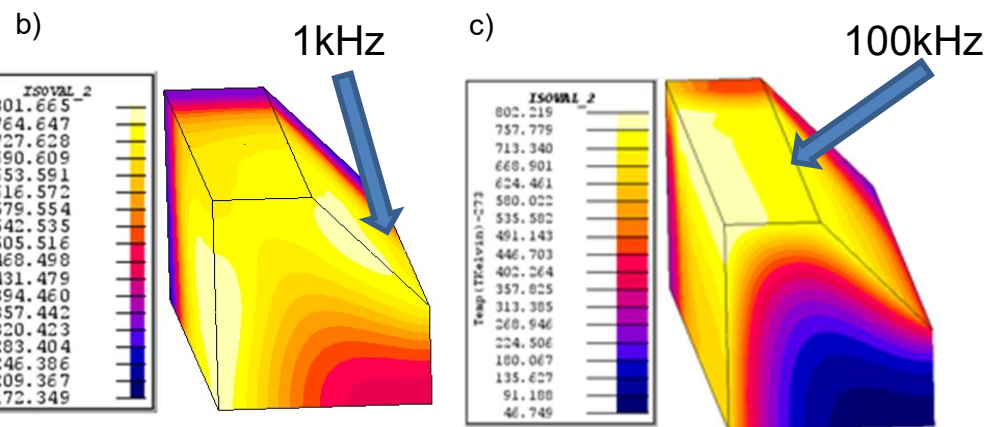
Nagrzewanie wsadu wklęsło-wypukłego:



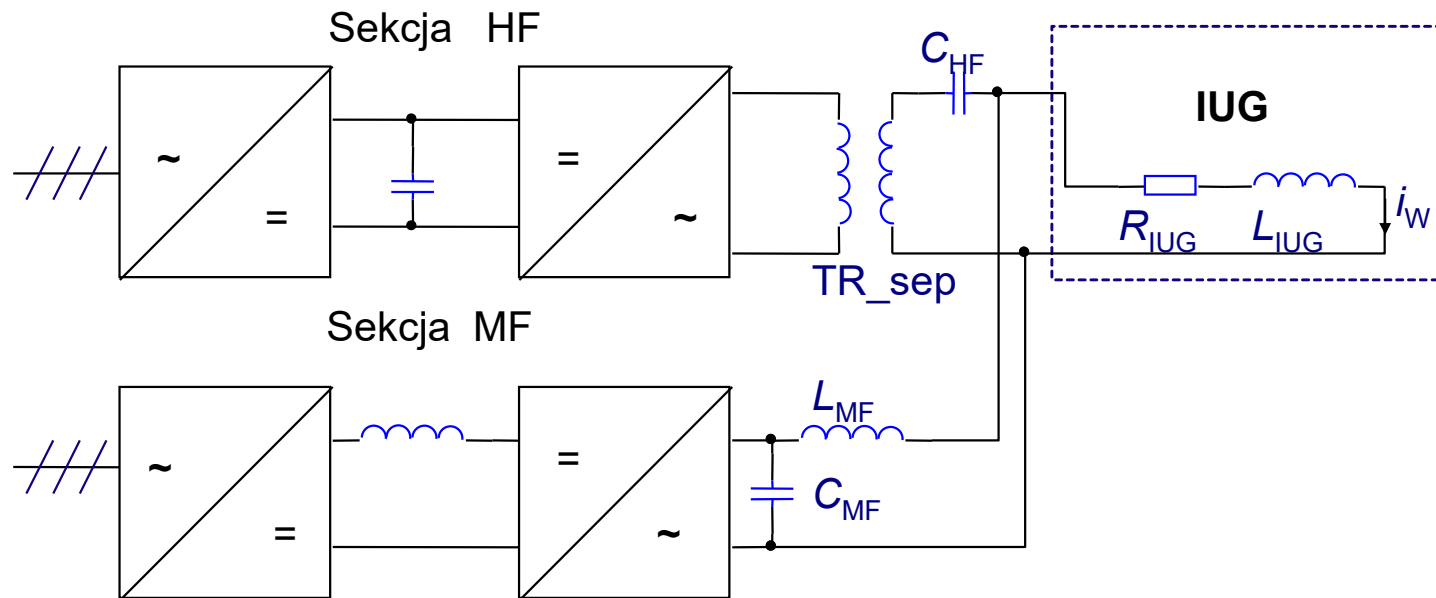
Indukcyjne nagrzewanie wsadu wklęsło-wypukłego:
a) wymiary nagrzewanego wsadu, b) numeryczny model obliczeniowy 3D.



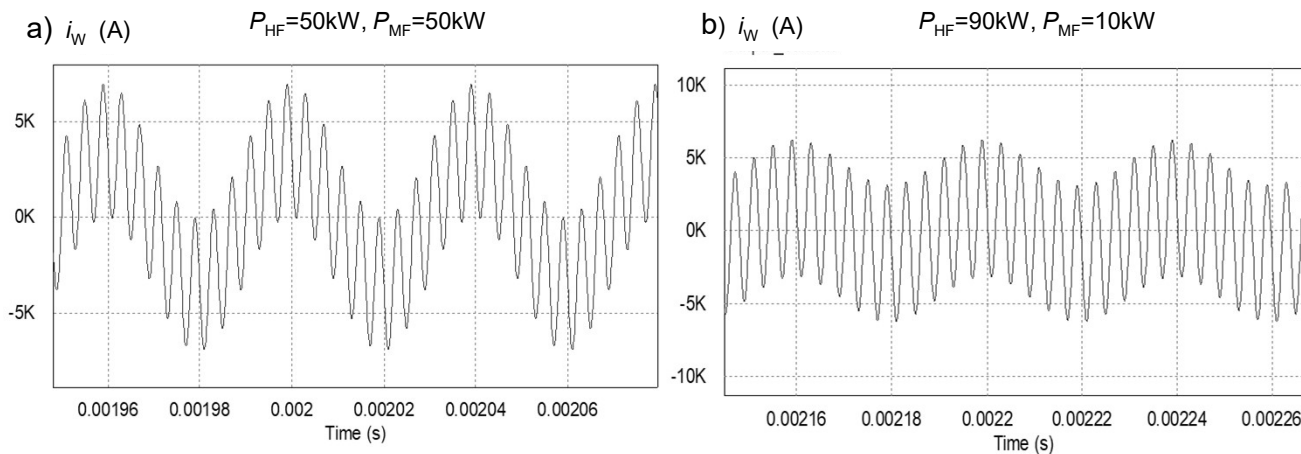
Indukcyjne, jednoczesne nagrzewanie dwuczęstotliwościowe kół zębatych we wzбудniku cylindrycznym.



Rozkład temperatury powierzchni wsadu wzdłuż linii l wyznaczonej na przekroju poprzecznym (a) oraz rozkłady temperatury na fragmencie powierzchni dla nagrzewania częstotliwością: b) $f=1\text{ kHz}$, c) $f=100\text{ kHz}$.

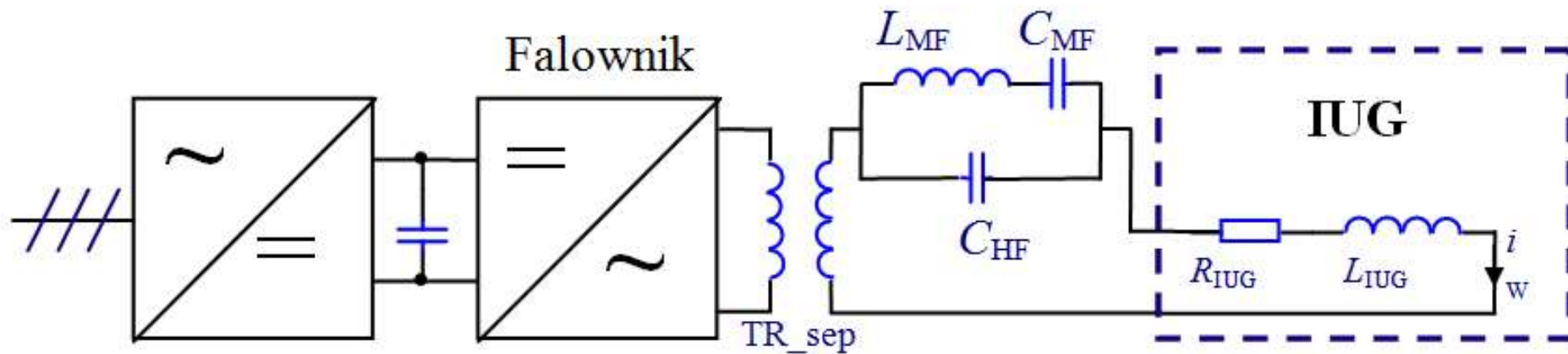


Dwufalownikowa topologia generatora do DFIH.



Przebiegi prądu we wzбудniku dla DFIH: a) moc HF $P_{HF} = 50 \text{ kW}$ i moc MF $P_{MF} = 50 \text{ kW}$, b) moc HF $P_{HF} = 90 \text{ kW}$ i moc MF $P_{MF} = 10 \text{ kW}$

Falownik sterowany jest sygnałem PWM (pulse width modulation) średniej częstotliwości MF kształtowanym sygnałem wysokiej częstotliwości HF

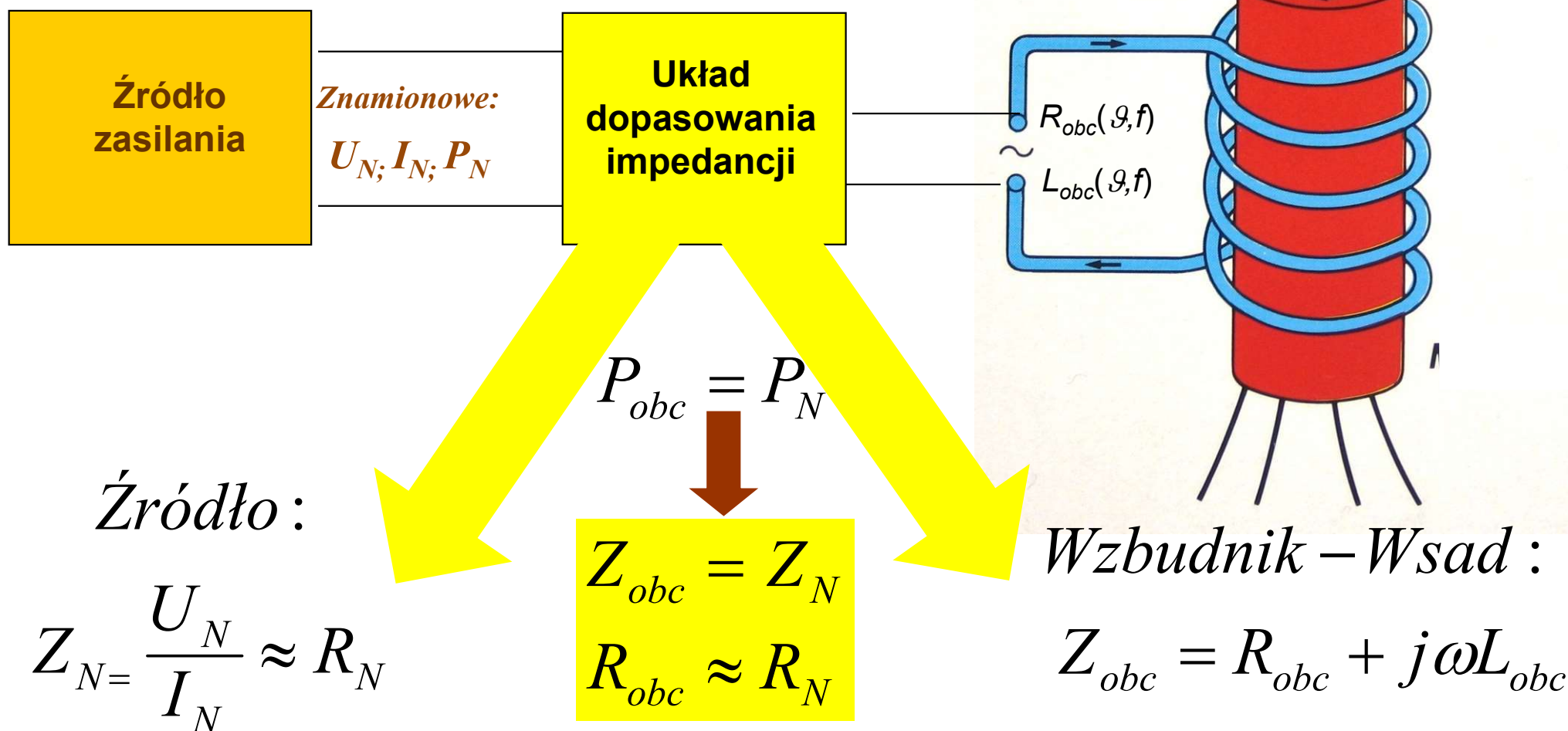


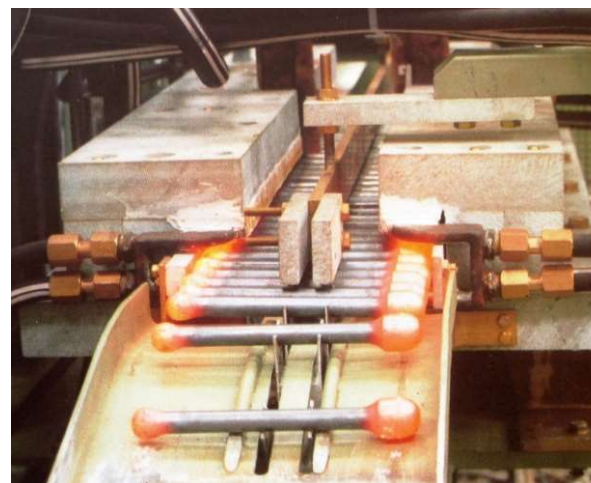
Topologia jednofalownikowego generatora do DFIH z szeregowym układem rezonansowym.

Dwa istotne aspekty współpracy źródła z obciążeniem dla indukcyjnych układach grzejnych IUG zasilanych z falowników rezonansowych:

- współpraca energetyczna źródło – obciążenie (dopasowanie impedancyjne),
 - wpływ rodzaju indukcyjnego układu grzejnego,
 - wpływ temperatury wsadu na dopasowanie energetyczne;
- zagadnienie sposobu realizacji symulacji komputerowej pracy IUG uwzględniającej interaktywną współpracę ze źródłem zasilania.

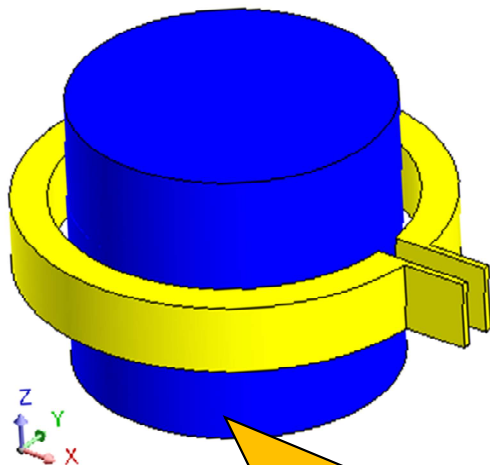
Parametry elektryczne :





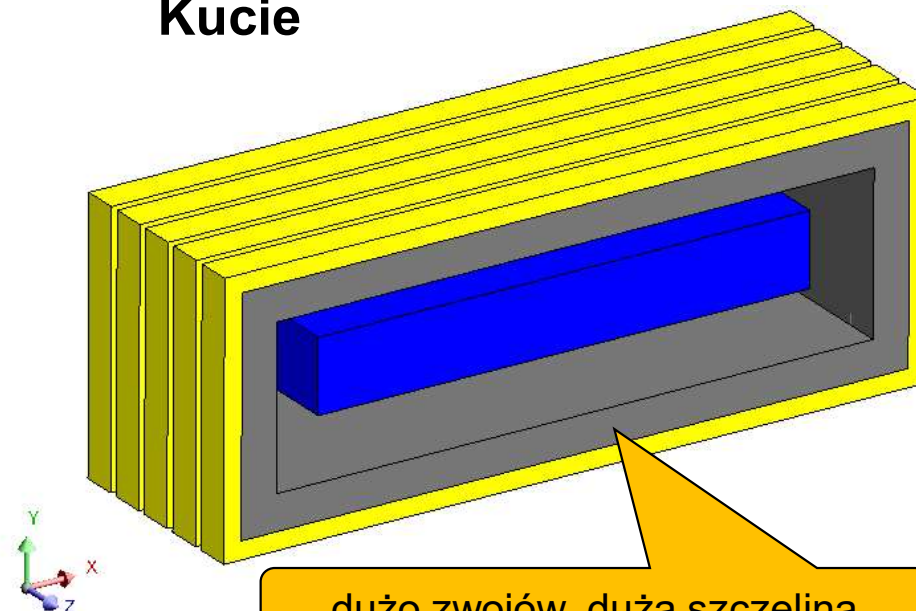
Typowe układy „wzbudnik-wsad”

Hartowanie



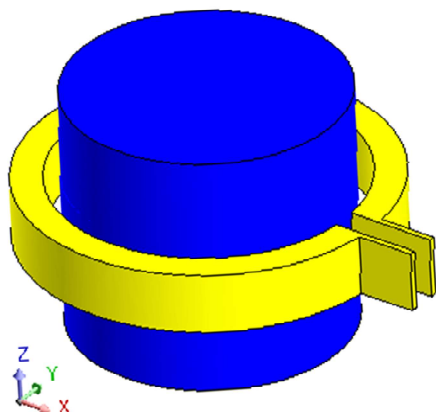
mało zwojów, mała szczelina

Kucie



dużo zwojów, duża szczelina

Przykładowe wartości parametrów elektrycznych (stal w stanie gorącym):



średnica wsadu: $d=30\text{mm}$
 średnica wzbudnika: $D=32\text{mm}$
 wysokość wzbudnika: $L=10\text{mm}$
 liczba zwojów: $z=1$
 częstotliwość: $f=30\text{kHz}$

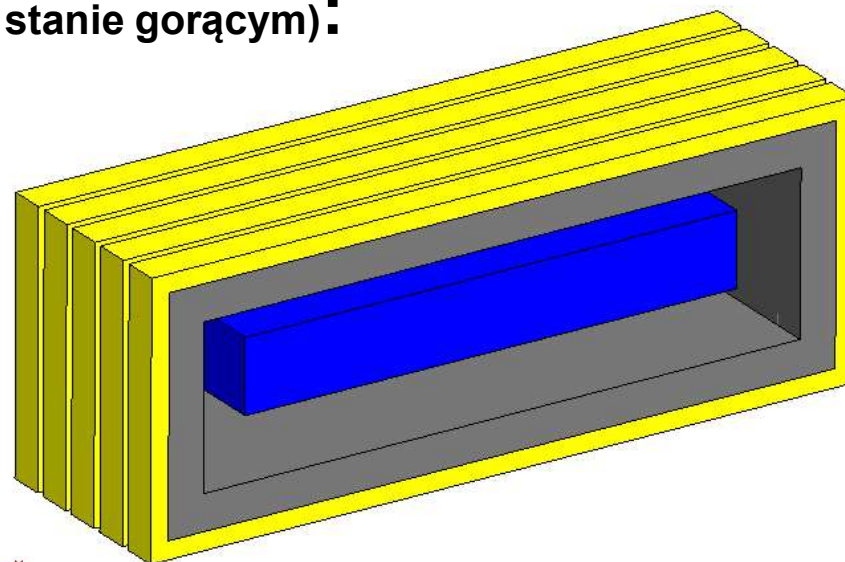
$$R_{obc1} = 3,5 \text{ m}\Omega \quad L_{obc1} = 31 \text{ nH}$$

$$\cos\varphi_1 = 0,52$$

np. dla źródła :

$$U_{N_DC} = 500\text{V}; P_N = 100 \text{ kW}$$

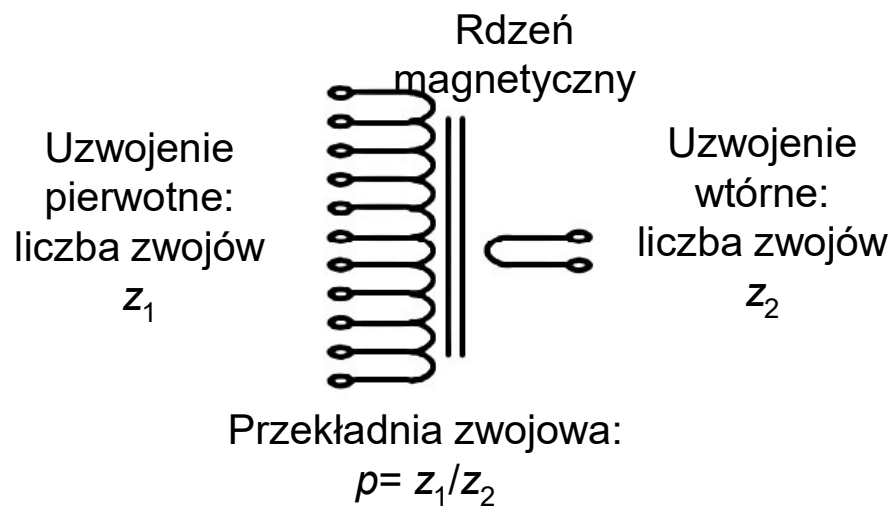
$$R_N = \frac{U_N^2}{P_N} = \frac{500^2}{100\,000} = 2,5\Omega$$



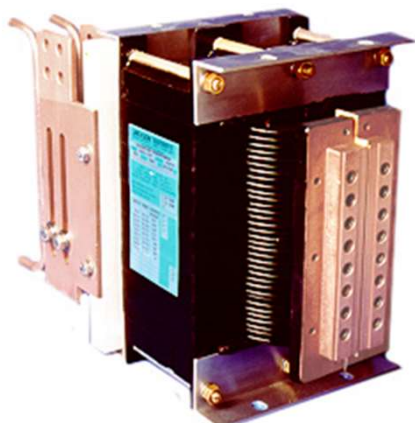
wym. wsadu $a \times b \times l$: $(50 \times 500 \times 50)\text{mm}$
 wym. wzb. $A \times B \times L$: $(110 \times 580 \times 60)\text{mm}$
 liczba zwojów: $z=5$
 częstotliwość: $f=30\text{kHz}$

$$R_{obc2} = 190 \text{ m}\Omega \quad L_{obc1} = 16,8 \text{ uH}$$

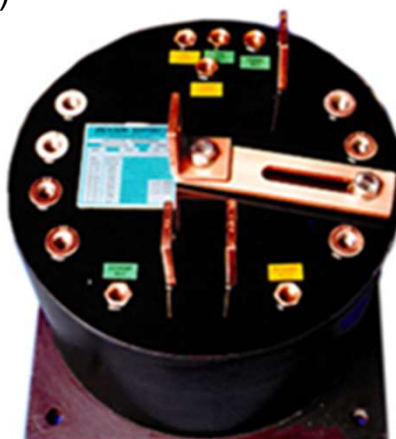
$$\cos\varphi_2 = 0,06$$



a)



b)

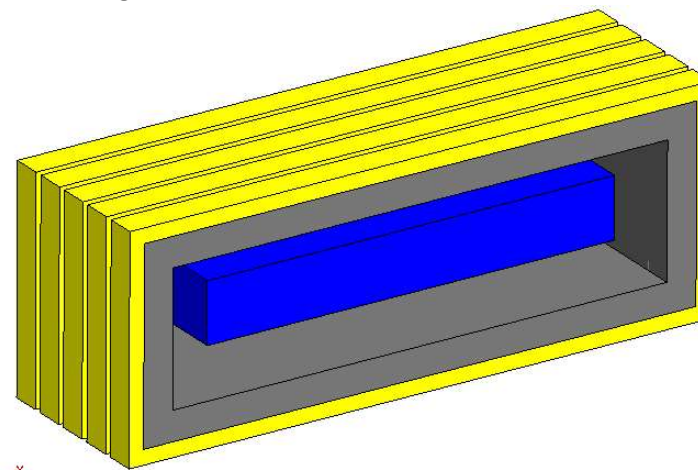
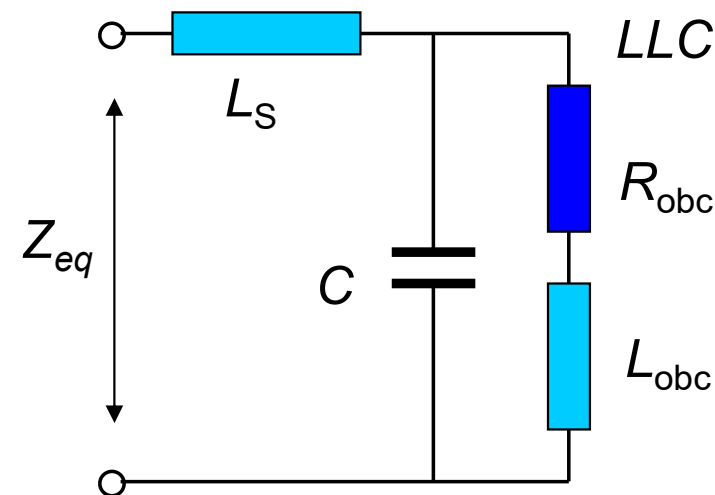
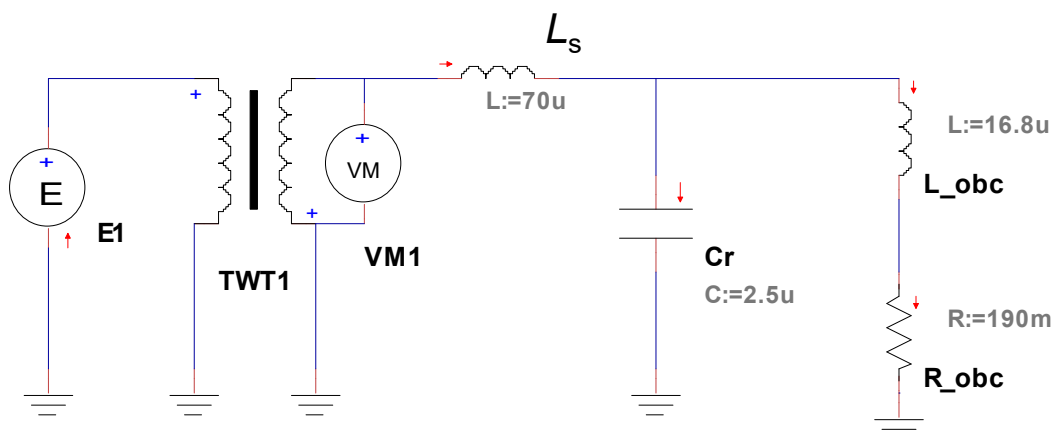
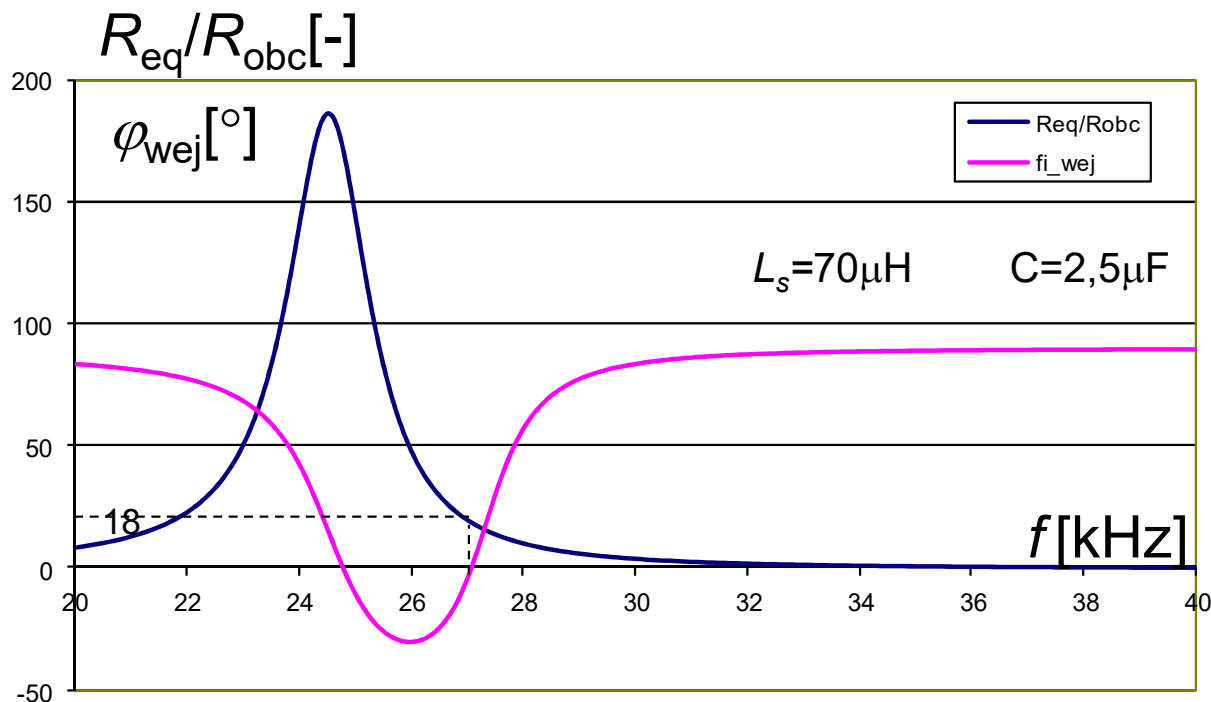


c)



Przykładowe rozwiązania transformatorów do nagrzewnic indukcyjnego firmy Jackson Transformer Co:
a) transformatory z rdzeniem kolumnowym, b) z rdzeniem toroidalnym, c) transformatory prostokątne.

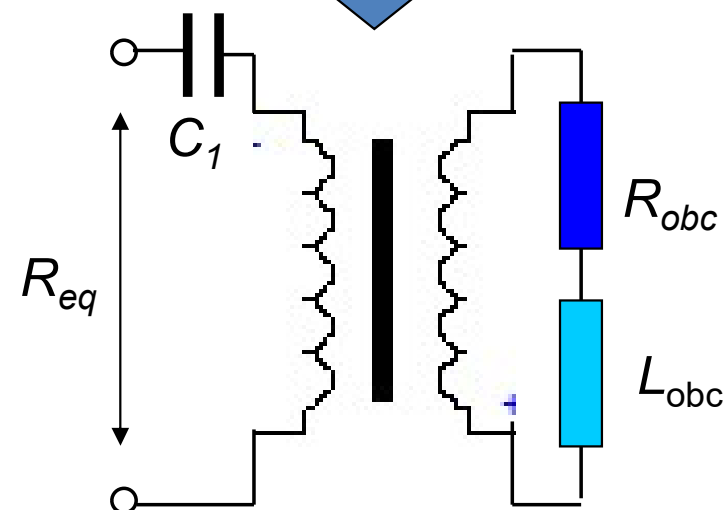
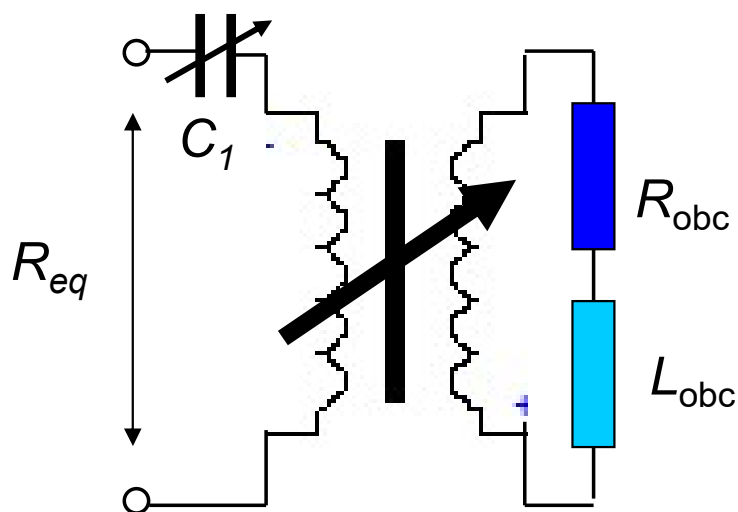
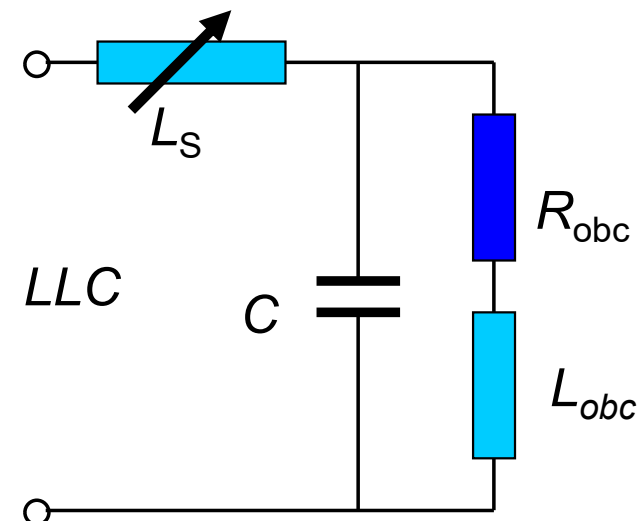
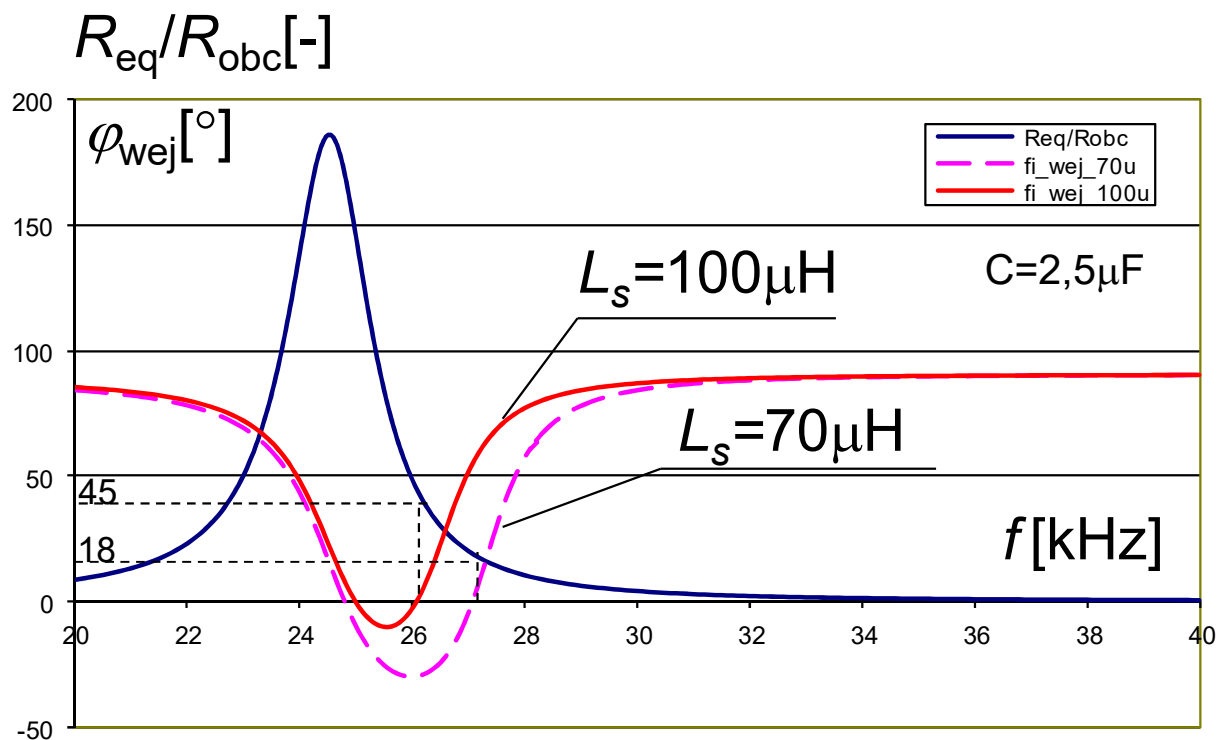
Układ rezonansowy 3 rzędu LLC:

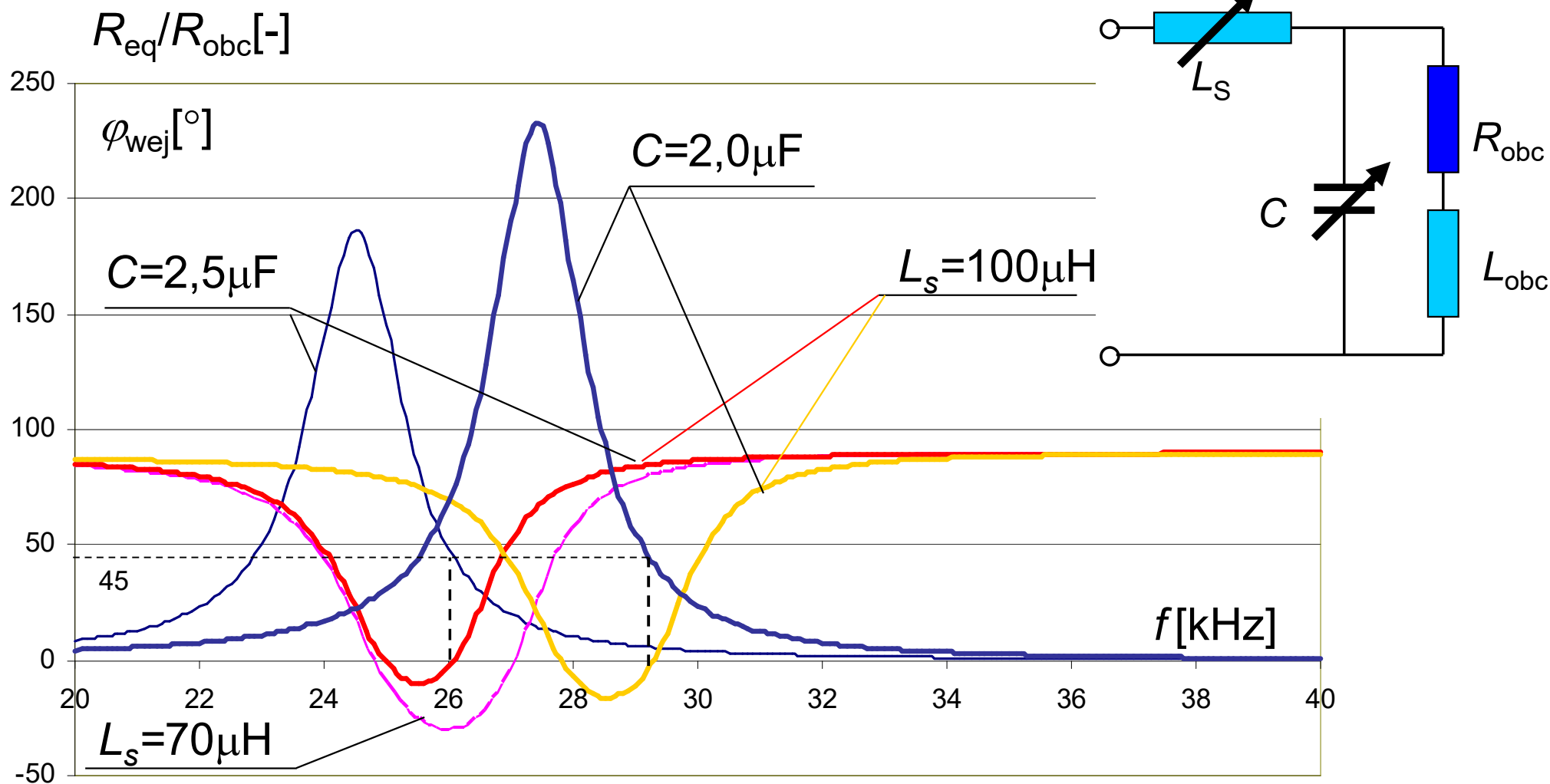


częstotliwość: $f=30kHz$

$$R_{obc} = 190 \text{ m}\Omega \quad L_{obc} = 16,8 \text{ uH}$$

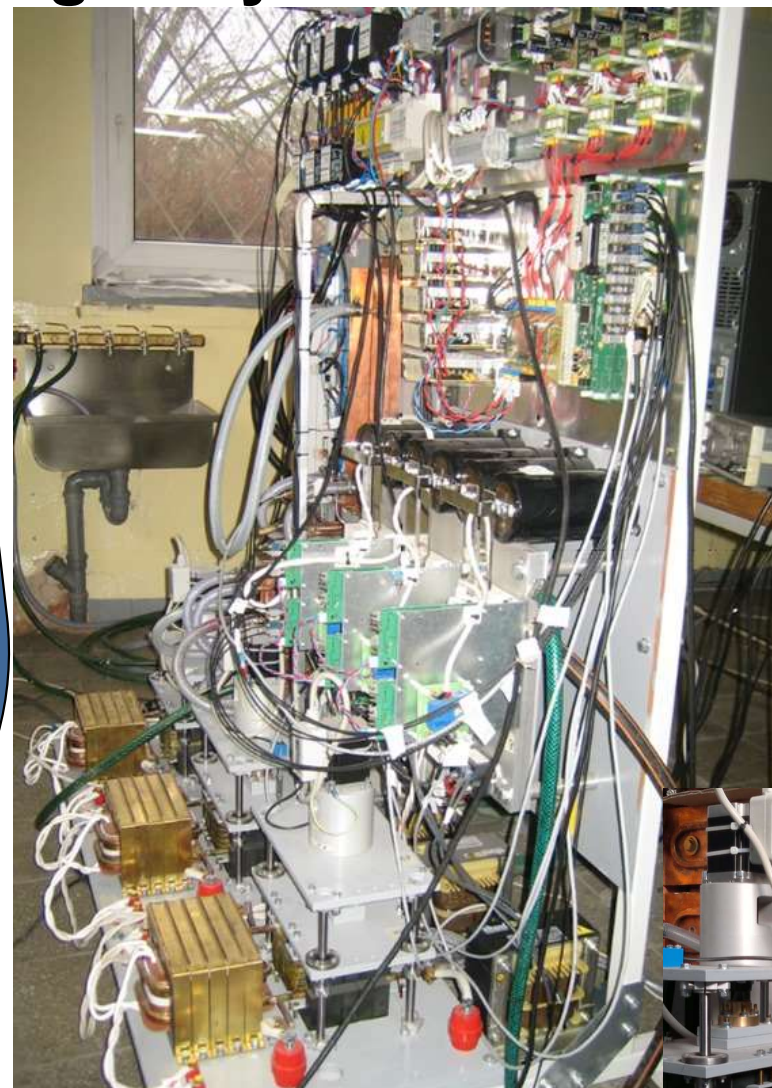
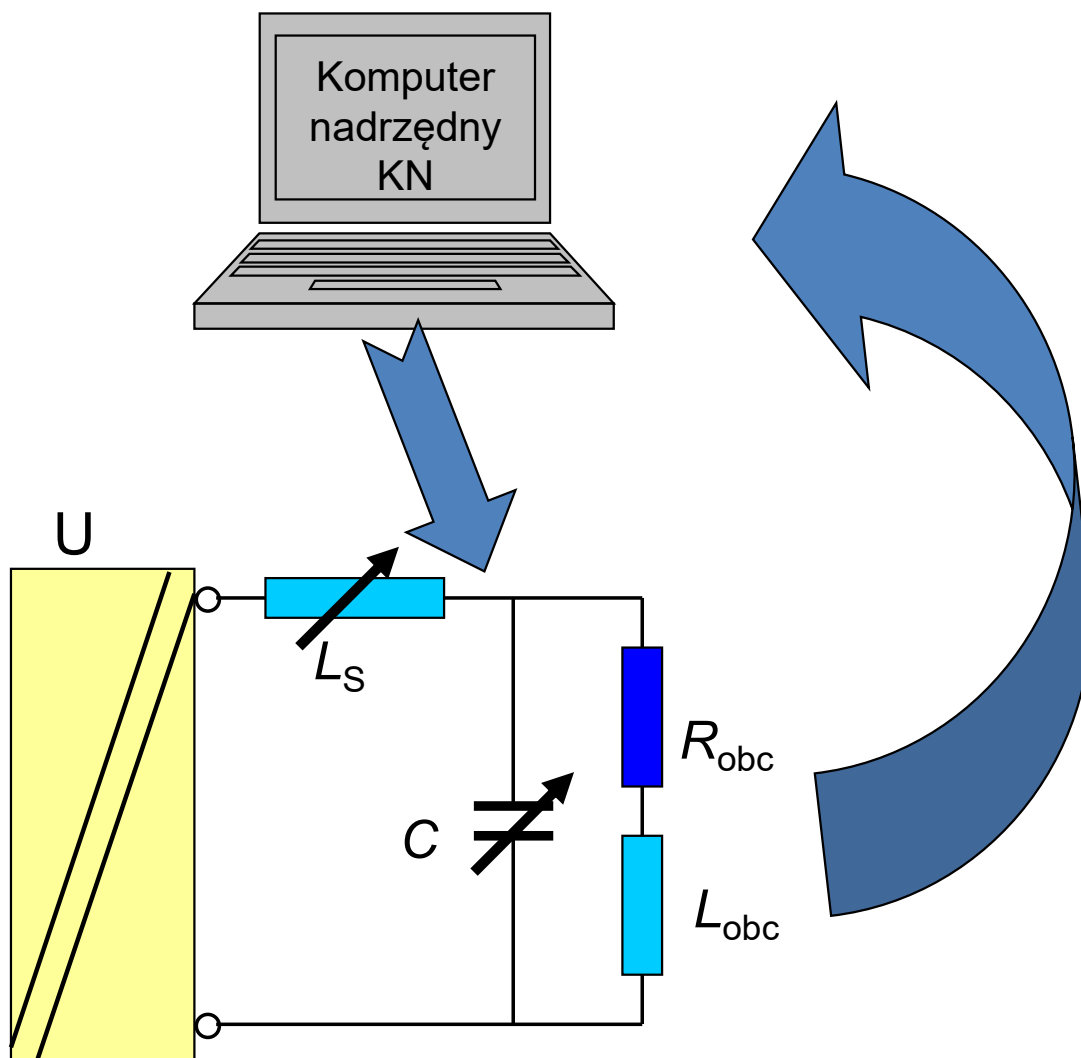
$$\cos \varphi_1 = 0,06$$



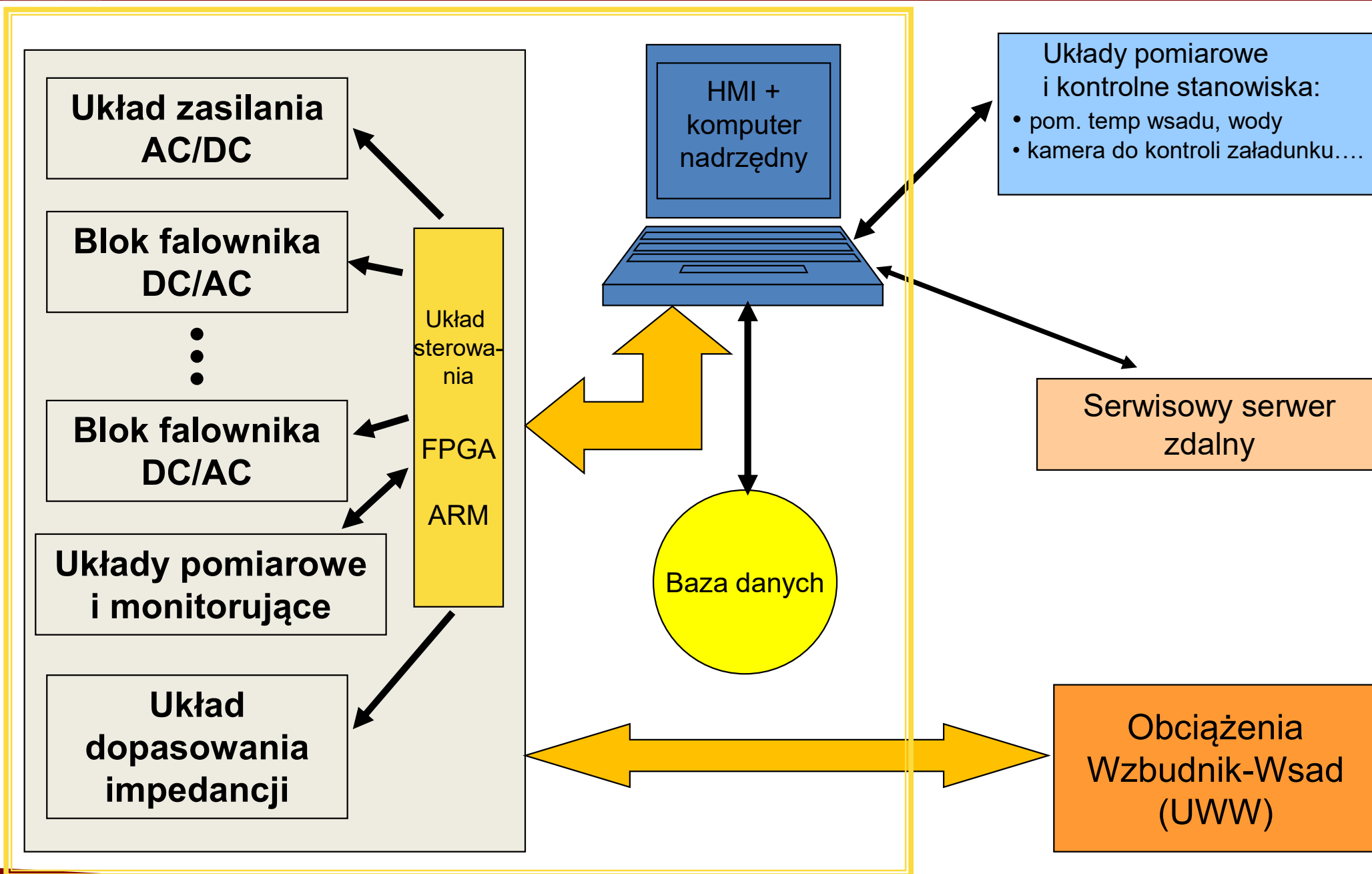


Zmiana rezystancji zastępczej w układzie LLC ($R_{L1} = 190 \text{ m}\Omega$ $L_{L1} = 16,8 \text{ uH}$)

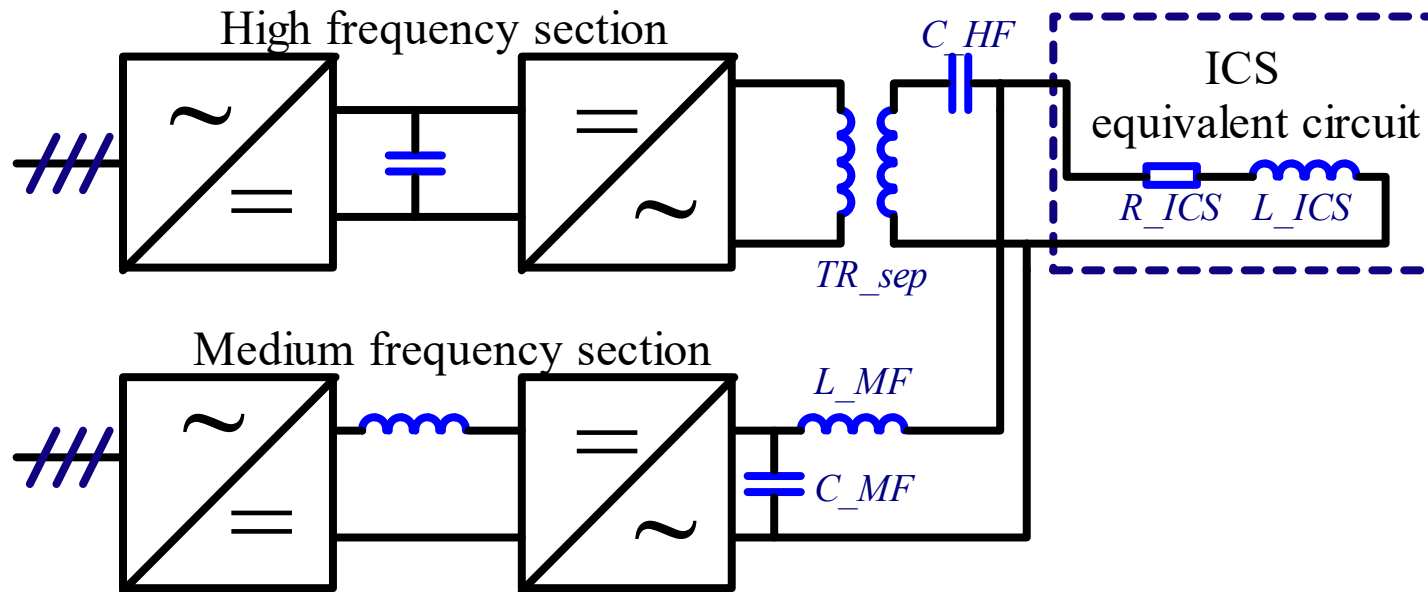
Generator z dopasowaniem „inteligentnym”:



Patent: „Sposób dopasowania nadążnego układu impedancji falownika do indukcyjnego nagrzewania oraz układ nadążnego dopasowania impedancji falownika do indukcyjnego nagrzewania”



Stosowane topologie:

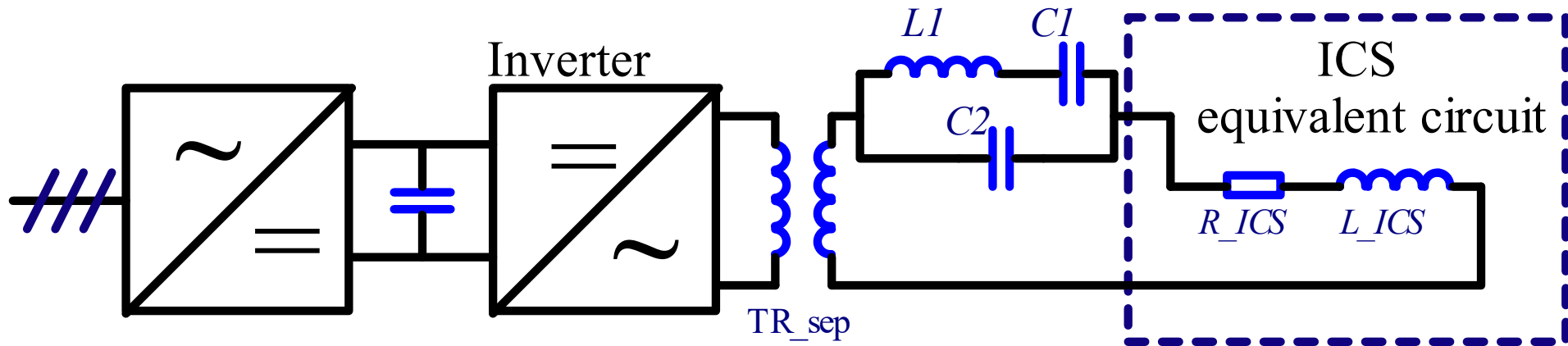


Topologia dwóch falowników dla niskiej i wysokiej częstotliwości (np. eldec)

Cechy:

- wykorzystanie zalet falowników rezonansowych, miękka komutacja zaworów,
- rozwiązanie specjalizowane do nagrzewania dwuczęstotliwościowego (mały udział harmoniczných).

Stosowane topologie:



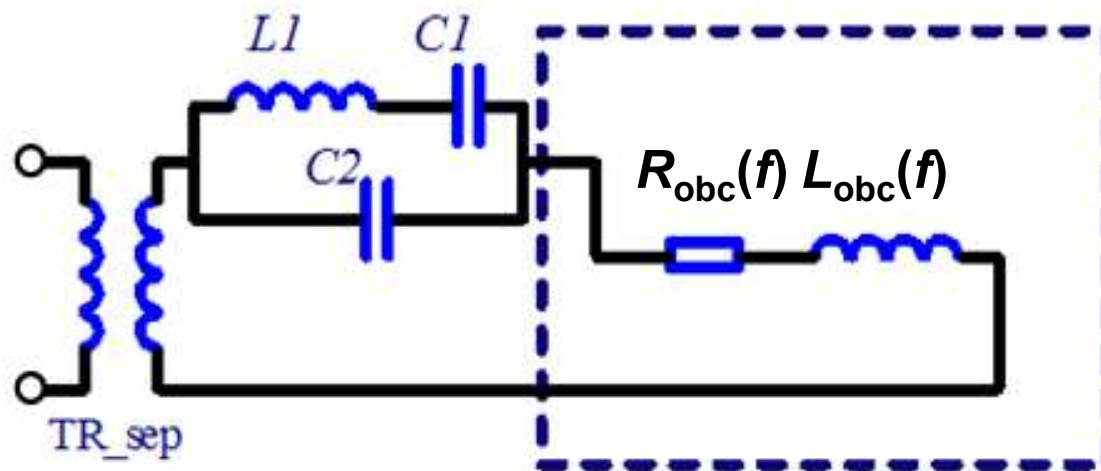
Topologia rezonansowego falownika szeregowego z układem LCC

Zalety:

- większa uniwersalność rozwiązania, które może być pełniej wykorzystane przez użytkowników stosujących zarówno jedno jak i dwuczęstotliwościowe nagrzewanie indukcyjne. Dla producenta większa unifikacja produktów ograniczające koszty projektowe.

Zagadnienie dopasowania impedancyjnego:

- w obu rozwiązaniach dopasowanie realizowane jedynie transformatorami dopasowującymi,
- dla rozwiązania (drugiego) ze wspólnym falownikiem występuje wspólny transformator dla niskiej (LF) i wysokiej (HF) częstotliwości.

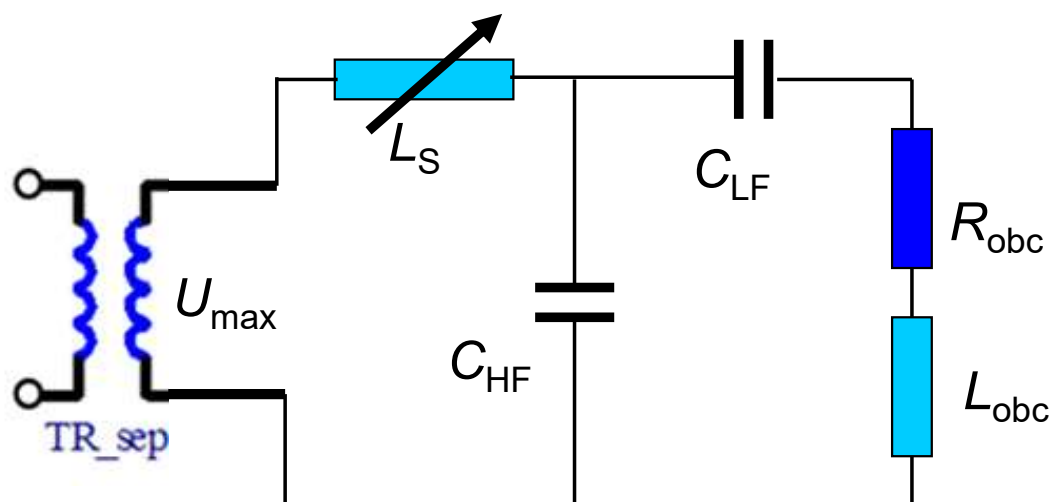


$$R_{wsadu} \sim \sqrt{f}$$

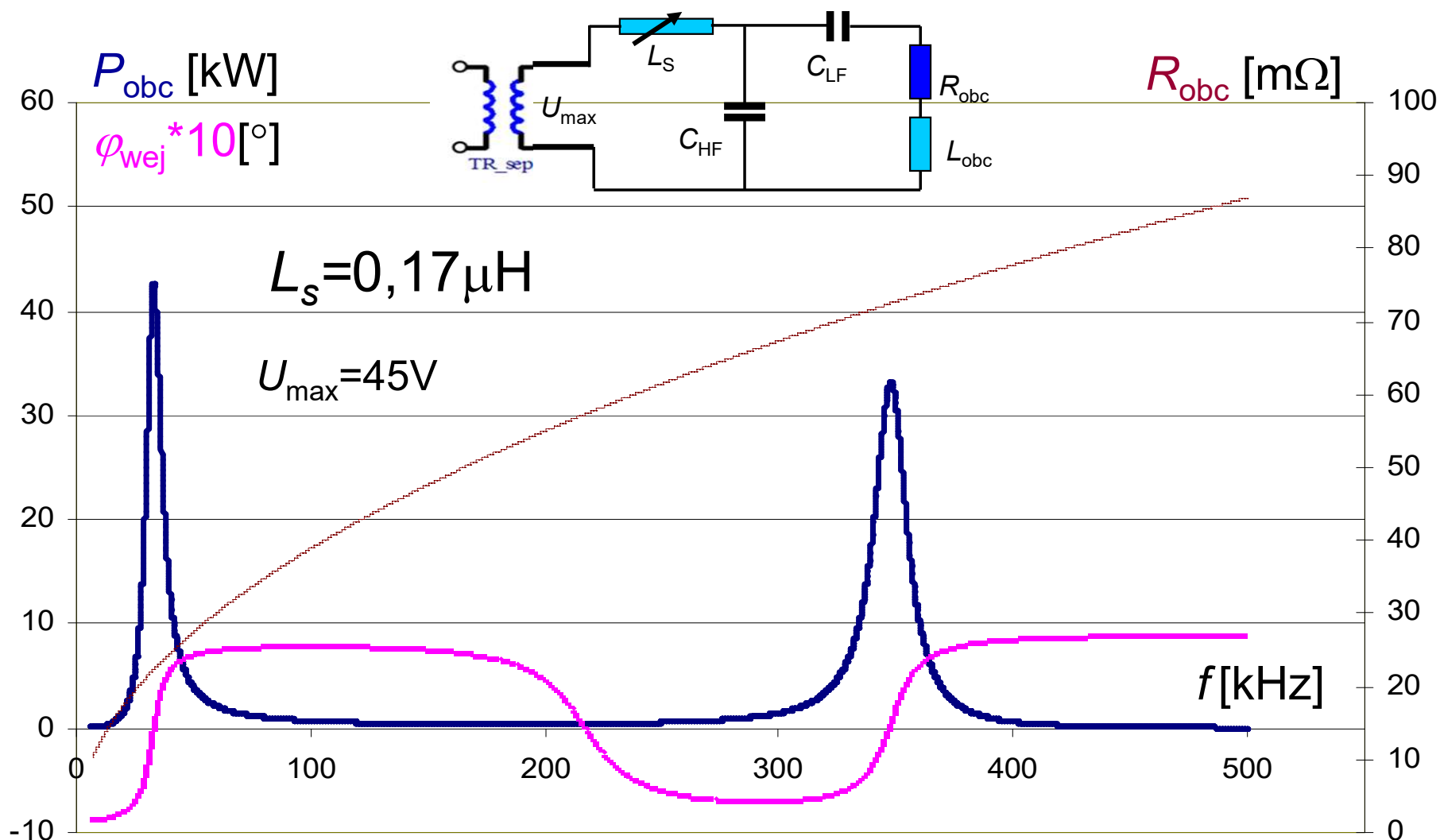
$$L_{wsadu} \sim \sqrt{\frac{1}{f}}$$

Regulowane dopasowanie impedancyjne:

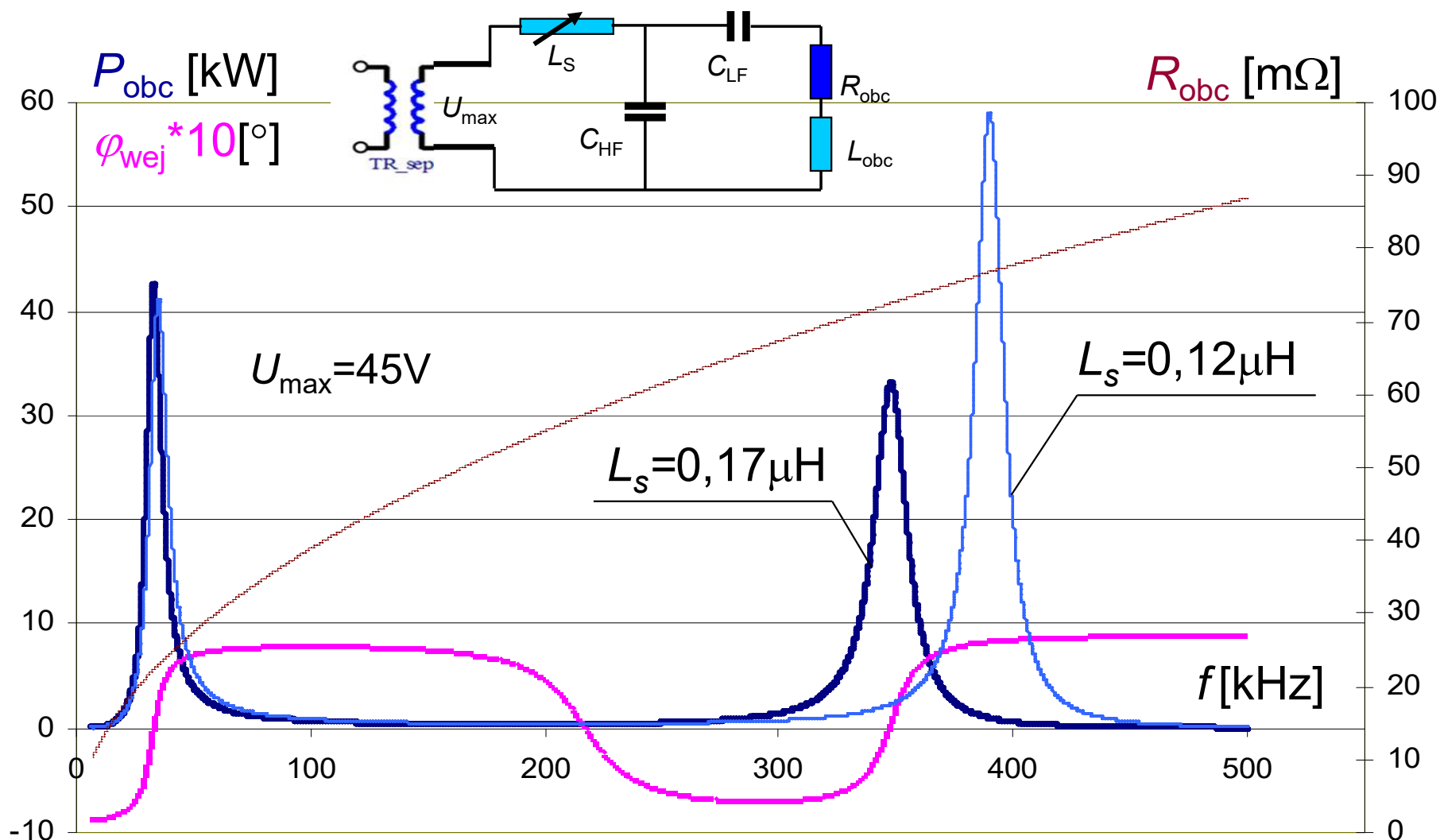
Rozwiązanie oparte na układzie rezonansowym 4 rzędu:



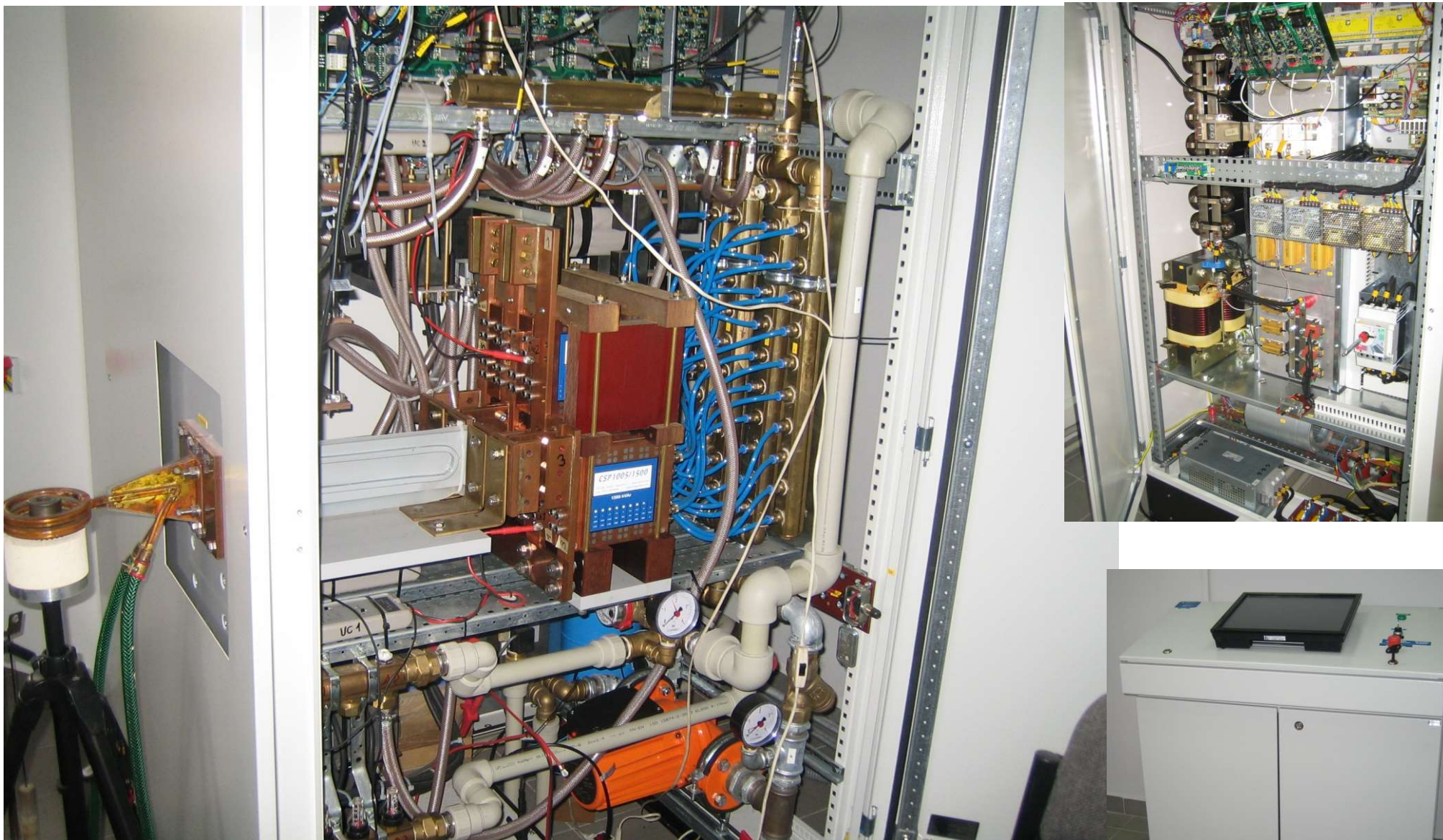
Patent: „Układ dwuczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego z samoczynnym statycznym i dynamicznym kompensowaniem zmian impedancji wsadu i sposób dwuczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego z samoczynnym statycznym i dynamicznym kompensowaniem zmian impedancji wsadu”



Maksymalna wartość mocy P_{obc} możliwej do wydzielenia w obciążeniu przy LF i HF (stała wartość napięcia zasilania), $L_s = 0,17 \mu\text{H}$.



Maksymalna wartość mocy P_{obc} możliwej do wydzielenia w obciążeniu przy LF i HF (stała wartość napięcia zasilania), dla różnych L_s .



Praca finansowana ze środków NCBiR : $P_N=100$ kW

Zagadnienie symulacji komputerowej procesu nagrzewania indukcyjnego:

- sprzężone obliczenia elektromagnetyczno-ciepłne **IUG** (MES 2D/3D)

Harmoniczne elektromagnetyczne +
nieustalone temperatury:

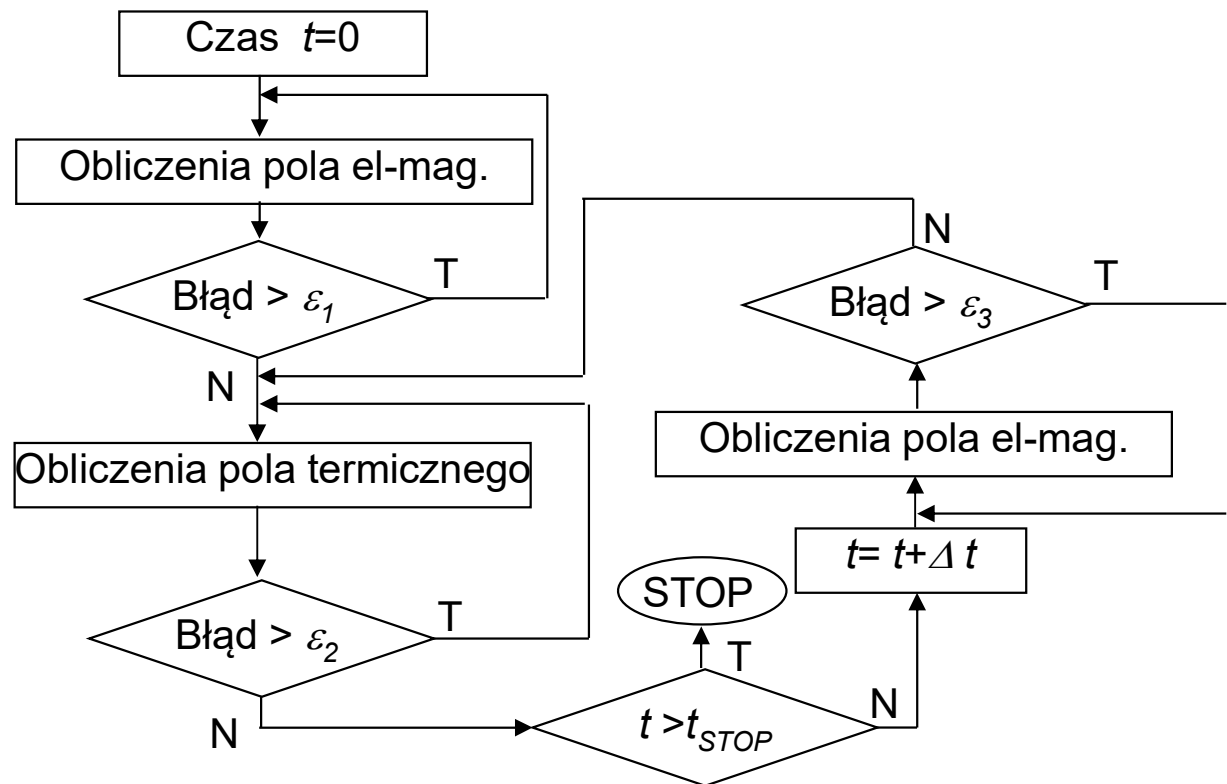
$$j \omega \gamma A + \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} A \right) = J$$

where: A – magnetic vector potential, J – current density, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – pulsation, f – frequency, μ – magnetic permeability, γ – conductivity.

$$\text{div}[(-k) \text{grad} T] + \rho_m c \frac{\partial T}{\partial t} = p_v$$

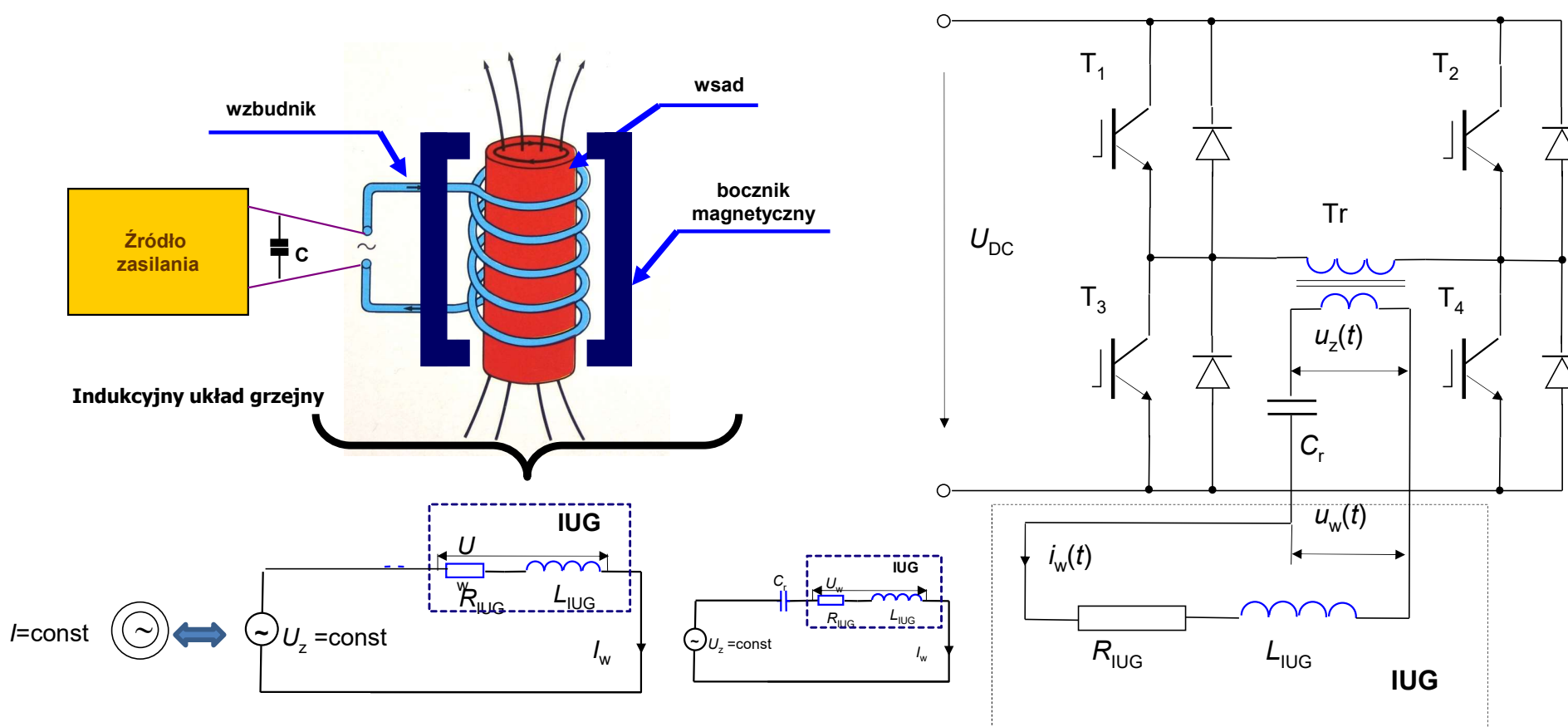
where: k – thermal conductivity, ρ_m – mass density, c – specific heat, p_v – volumetric density of heat flow.

taking into account the relevant boundary conditions and the initial condition



Zagadnienie symulacji komputerowej procesu nagrzewania indukcyjnego:

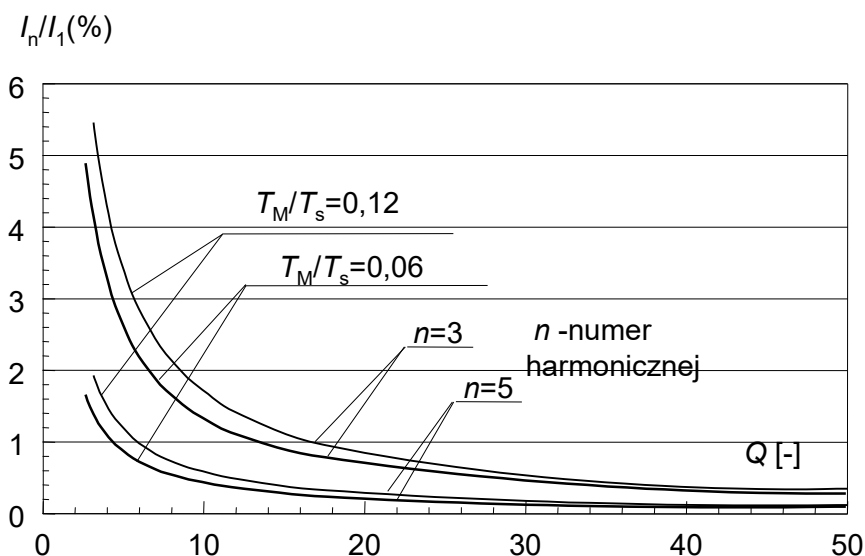
- sprzężone obliczenia elektromagnetyczno-ciepłne **IUG** (MES 2D/3D)



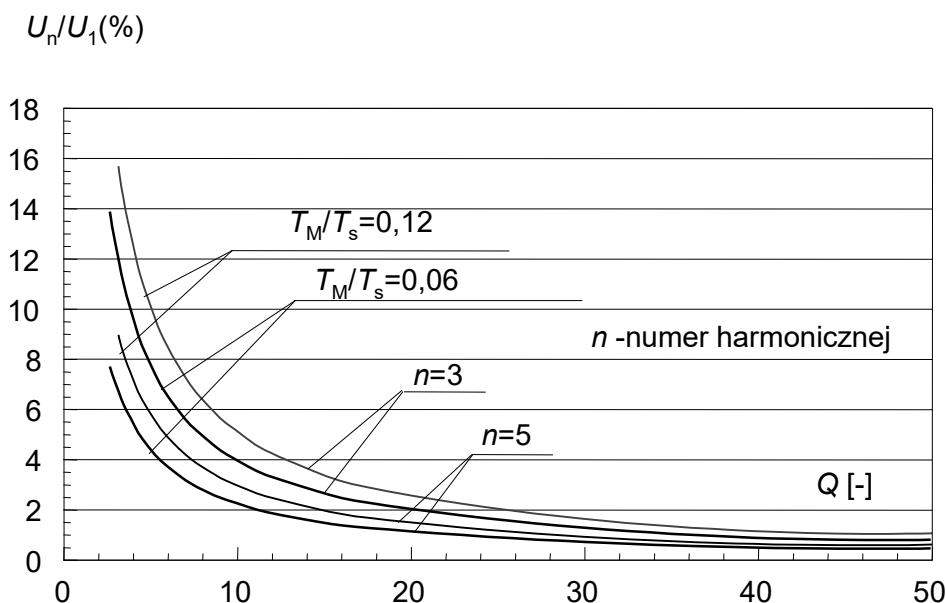
Co z harmonicznymi??

Przykładowe zasilanie IUG z falownika napięcia z rezonans szeregowym

Zagadnienie symulacji komputerowej procesu nagrzewania indukcyjnego:



Względny (w stosunku do pierwszej harmonicznej I_1) udział trzeciej I_3 i piątej I_5 harmonicznej prądu $i_w(t)$ wzbudnika w funkcji dobroci obciążenia i względnej wartości czasu martwego T_M/T_s .

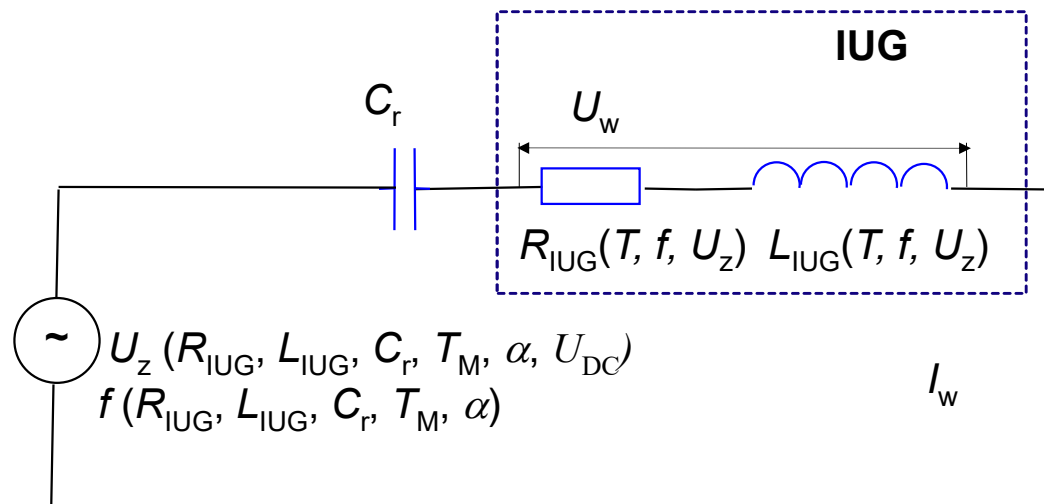


Względny (w stosunku do pierwszej harmonicznej U_1) udział trzeciej i piątej harmonicznej napięcia $u_w(t)$ na wzbudniku w funkcji dobroci obciążenia i względnej wartości czasu martwego T_M/T_s .

Pytania:

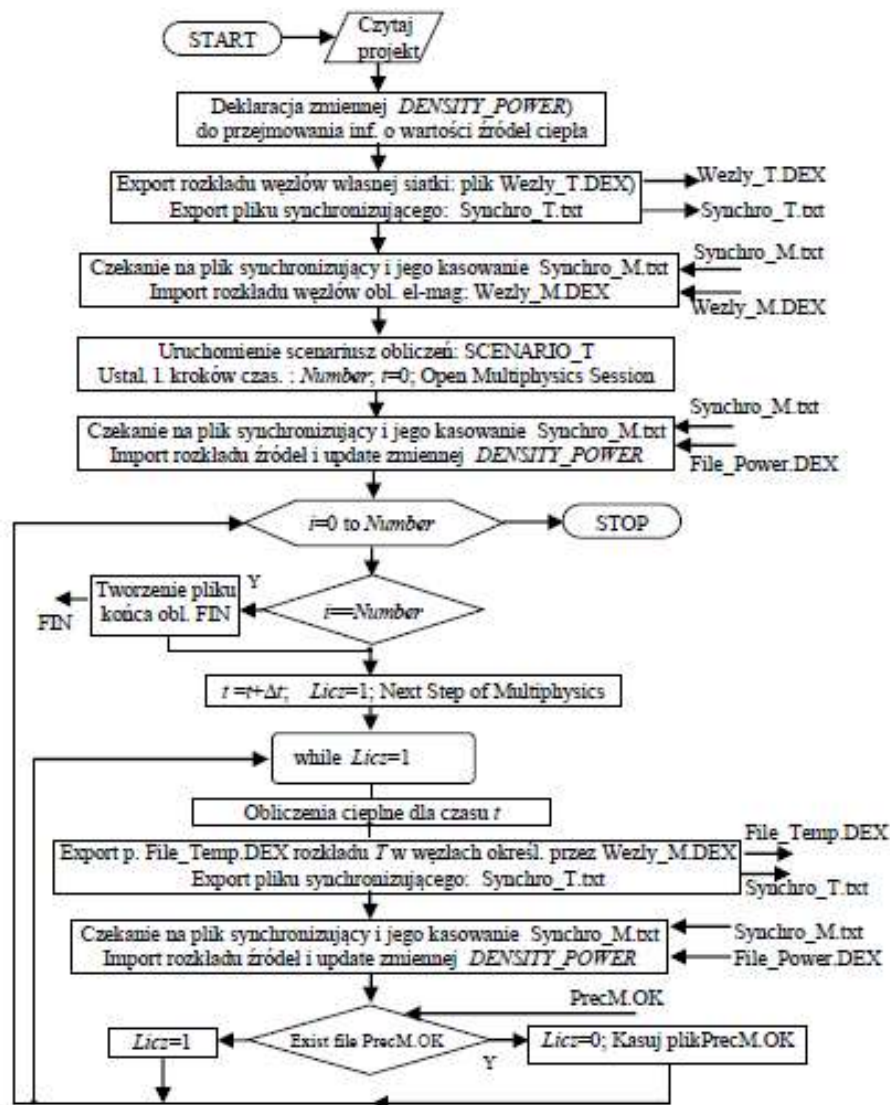
- Czy wystarczy uwzględniać jedynie bezpośredni wpływ zmiany temperatury wsadu na zastępcze wartości R_{obc} i L_{obc} obciążenia?
- A co z wpływem pośrednim wynikającym ze współpracy IUG ze źródłem zasilania (zwykle rezonansowym),
 - co z wpływem temperatury wsadu głównie na wartość częstotliwości rezonansowej (ale również pracę ograniczeń prądowo/napięciowych)?

Współpraca źródła sterowanego z nieliniowym obciążeniem liczonym polowo:

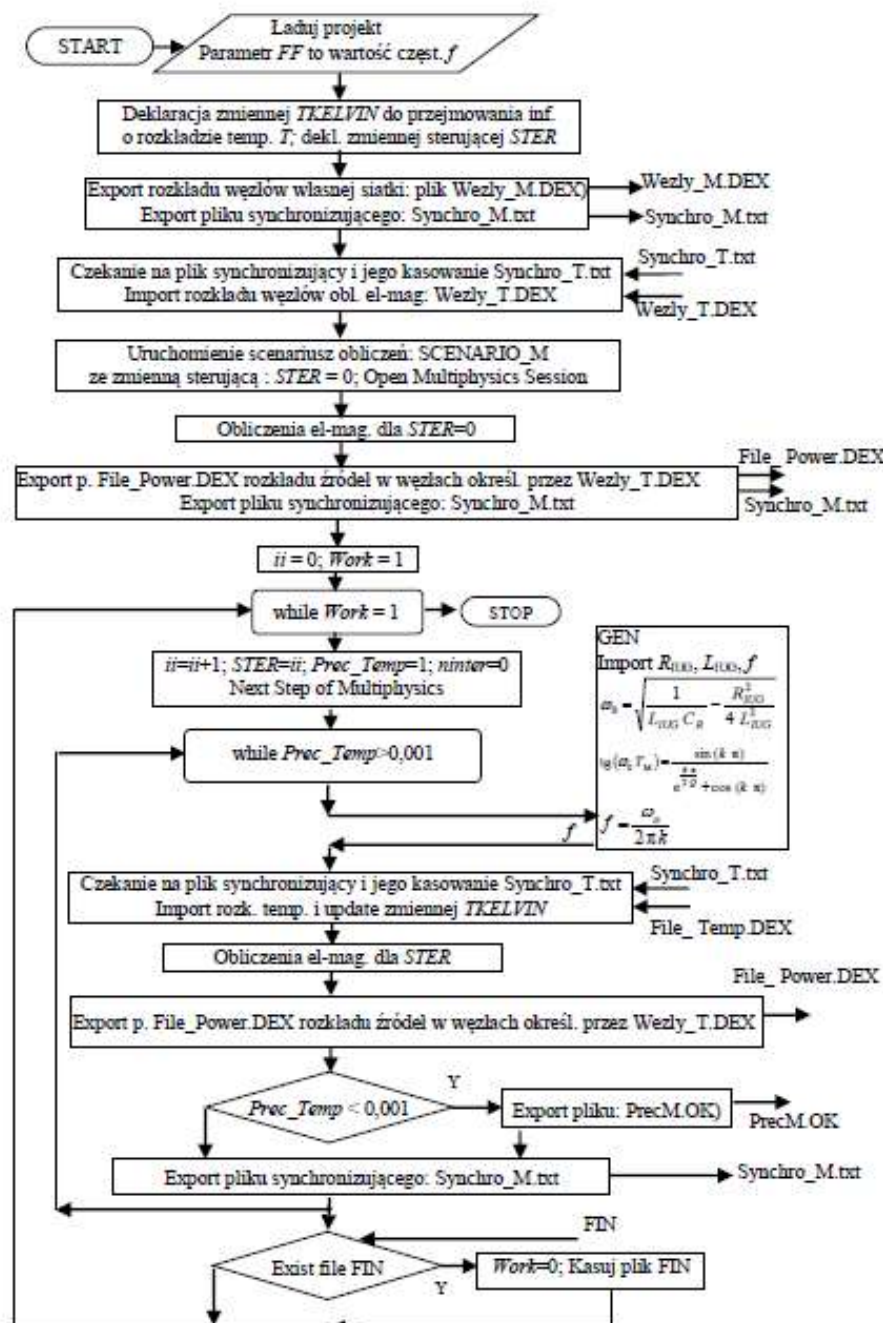


Przykład dla falownika napięcia z rezonansem szeregowym.

Obliczenia współbieżne:



Rys. 4.25. Algorytm sterowania obliczeniami pola termicznego programu do obliczeń polowych



Rys. 4.26. Algorytm sterowania obliczeniami pola elektromagnetycznego

Obliczenia współbieżne:

INDUCTION HEATING: load-inverter co-simulation

Mag. model of load:

Thermal model:

Flux Version:

System Version:

Inverter type:

Pn: kW

Un: V

Matching transf. ratio:

Resonance capacity - Known? uF

User's requirements

t_{HEATING}: s with t: s

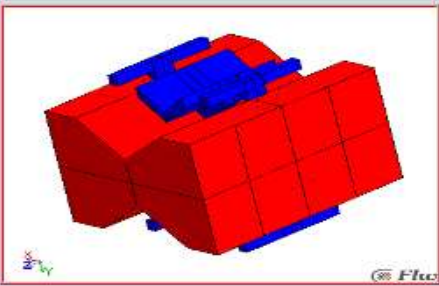
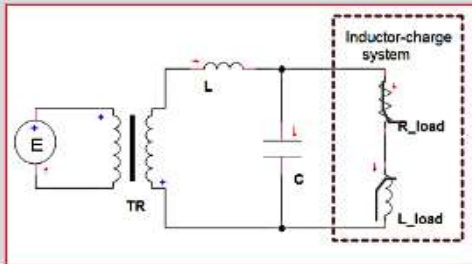
P=: kW

f=: kHz

RESULTS

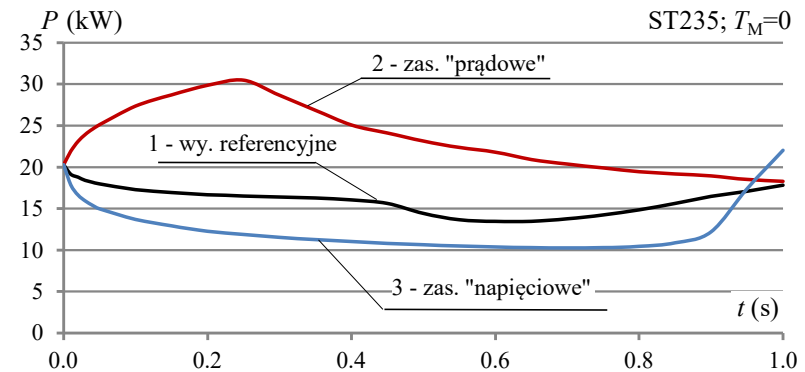
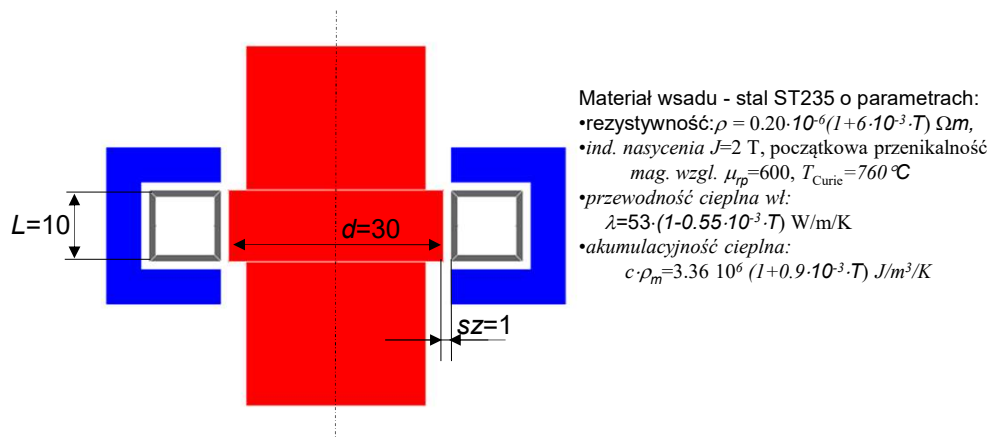
START: P= kW f= kHz

END: P= kW f= kHz

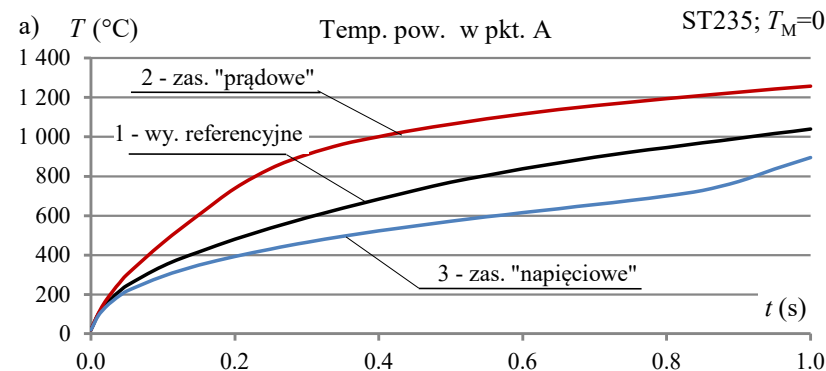
Interfejs programu zarządzającego sprzężeniem obliczeń polowych z modelami różnych źródeł zasilania.

Wpływ sposobu modelowania źródła zasilania na wyniki symulacji procesu indukcyjnego nagrzewania wsadu



Przebiegi czasowe mocy dostarczanej do IUG obliczone symulacyjnie przy różnym sposobie modelowania źródła zasilania.

Przykładowy IUG z wyposażonym w bocznik magnetyczny wzbudnikiem jednozwojnym.



Przebiegi czasowe temperatury powierzchni wsadu obliczone w punkcie A –środkowym w strefie nagrzewania.

Uwagi:

- przy indukcyjnym nagrzewaniu okresowym mamy do czynienia (szczególnie dla wsadów ferromagnetycznych) z dużymi zmianami zastępczych parametrów elektrycznych obciążenia, co skutkuje potrzebą znaczącego (wyraźnie przewyższającego średnią wartość mocy cyklu nagrzewania) podnoszenia mocy znamionowej wykorzystywanego źródła zasilania,
- stosowaniu układów rezonansowych wyższego rzędu z regulowaną indukcyjnością pozwala na dynamiczne dopasowanie impedancyjne znacząco redukując „widziane” przez falownik rezonansowy zmiany zastępczych parametrów elektrycznych obciążenia, co może w sposób istotny przyczynić się do lepszego wykorzystania mocy znamionowej źródła,
- już na etapie komputerowej symulacji MES procesu nagrzewania indukcyjnego możliwe i jednocześnie bardzo użyteczne jest symulowanie dynamicznej współpracy źródło-obciążenie. Obliczenia nie uwzględniające zmian częstotliwości pracy i systemów ograniczeń prądowo-napięciowych mogą prowadzić do znaczących błędów obliczeniowych.