



AGH



Euro - Centrum

Studia Podyplomowe

EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

w ramach projektu

**Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji
Zarządzania Energią**

**Urządzenia indukcyjne.
Falowniki do nagrzewania indukcyjnego.**

dr inż. Zbigniew Waradzyn

Studia Podyplomowe

EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Moduł 5: Efektywność energetyczna
w urządzeniach elektrotermicznych

**Urządzenia indukcyjne.
Falowniki do nagrzewania
indukcyjnego.**

dr inż. Zbigniew Waradzyn

Nagrzewanie indukcyjne

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

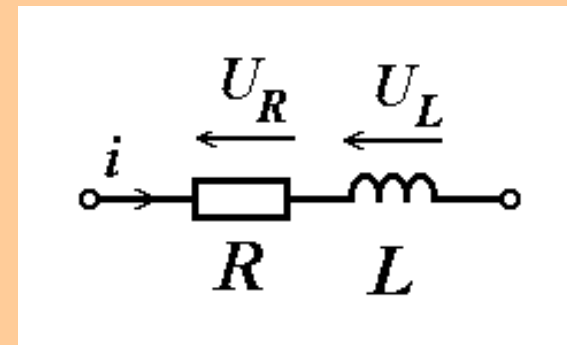
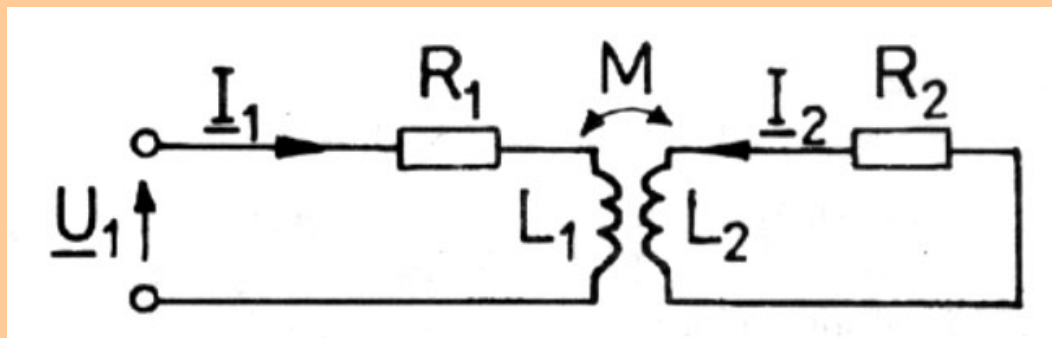


Indukcyjny układ grzejny

Źródłem koniecznego przy nagrzewaniu indukcyjnym pola elektromagnetycznego jest zespół przewodników przewodzących prąd (tzw. **wzbudnik**), mający najczęściej postać cylindrycznej lub płaskiej cewki zwykle jedno- lub wielozwojowej

Nagrzewany element **przewodzący** (wsad) umieszczony jest najczęściej wewnątrz wzbudnika.

Wzbudnik wraz z nagrzewanym wsadem tworzą tzw. **indukcyjny układ grzejny** wzbudnik – wsad.



Schemat zastępczy

Wykorzystywane zjawiska i prawa

1. Przepływ przez wzbudnik przemiennego prądu elektrycznego powoduje powstanie wokół wzbudnika (także we wsadzie) zmiennego w czasie pola magnetycznego.

I równanie Maxwella

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\delta \mathbf{D}}{\delta t}$$

2. Zmienne pole magnetyczne przenikające wsad indukują w nim siłę elektromotoryczną.

zjawisko indukcji elektromagnetycznej - prawo indukcji Faradaya

II równanie Maxwella

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t}$$

Ogólna treść powyższego prawa:

W **dowolnym obwodzie zamkniętym** umieszczonym w **zmieniającym się w czasie polu magnetycznym** indukują się siła elektromotoryczna proporcjonalna do prędkości zmian strumienia indukcji magnetycznej objętego poprzez ten obwód.

Wykorzystywane zjawiska i prawa –c.d

3. Jeśli obwód utworzony jest z przewodnika, to pod wpływem powstałej siły elektromotorycznej popłynie w nim prąd (tutaj: *prądy wirowe*).

prawo Ohma

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$$

4. Przepływ prądu przez przewodnik powoduje wydzielanie się w nim ciepła.

prawo Joule'a – Lenza $p_v = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \gamma E^2$

p_v - gęstość objętościowa mocy

Nagrzewanie indukcyjne – informacje ogólne

Nagrzewanie indukcyjne umożliwia precyzyjne dozowanie energii w ściśle określonych obszarach, co umożliwia znaczne obniżenie energochłonności procesów.

Częstotliwość od $16 \frac{2}{3}$ Hz do ok. 27 MHz.

Możliwa duża gęstość mocy - do ok. 35 kW/cm² (35 razy więcej niż przy nagrzewaniu płomieniowym).

Szybkość nagrzewania sięga 150 000 K/s.

Możliwe jest:

- nagrzewanie powierzchniowe,
- nagrzewanie skrośne,
- topienie.

Analiza nagrzewania indukcyjnego jest zwykle skomplikowana. Przyjmując odpowiednie uproszczenia rozróżnia się:

- falę płaską (opisaną równaniami wykładniczymi),
- falę walcową (opisaną przy użyciu funkcji Bessela).

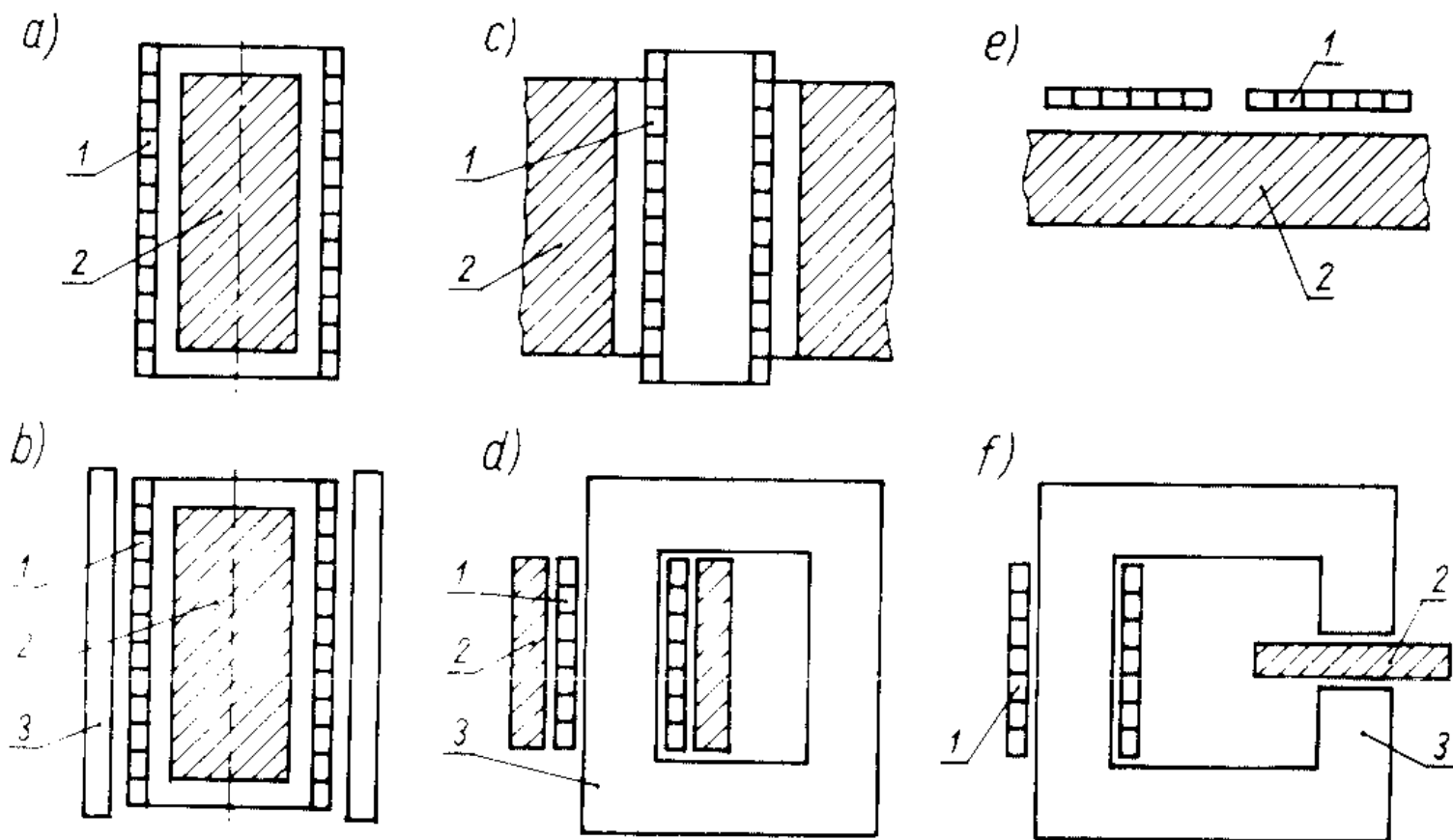
Nagrzewanie indukcyjne bezpośrednie i pośrednie

Nagrzewanie indukcyjne może być:

- bezpośrednio (energia cieplna nie jest doprowadzana do nagrzewanego przedmiotu (wsadu) z zewnątrz, lecz powstaje **wewnątrz** niego z energii pola elektromagnetycznego) - najczęściej stosowane,
- pośrednie (np. ciepło z *tygla przewodzącego* przekazywane jest do znajdującego się w tyglu materiału nieprzewodzącego).

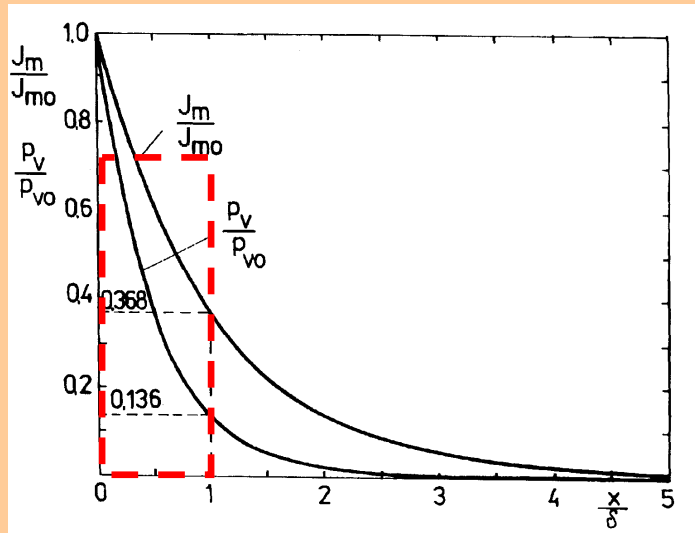
Przy nagrzewaniu indukcyjnym (bezpośrednim i pośrednim) mamy do czynienia z **bezstykowym** sposobem doprowadzenia energii.

Konfiguracje układów grzejnych



Rys. 13.31. Konfiguracje najczęściej spotykanych indukcyjnych układów grzejnych ze wsadem: a) we wnętrzu wzbudnika; b) we wnętrzu wzbudnika z bocznikami magnetycznymi; c) na zewnątrz wzbudnika; d) na zewnątrz wzbudnika z rdzeniem zamkniętym; e) poza wzbudnikiem; f) poza wzbudnikiem z rdzeniem ze szczeliną
1 wzbudnik, 2 wsad, 3 magnetowód

Rozkład prądu i mocy – fala płaska



$$x = \delta:$$

$$J = 0,368 J_{m0}$$

$$p_v = 0,135 p_{v0}$$

$$x = 3\delta:$$

$$J = 0,050 J_{m0}$$

$$p_v = 0,002 p_{v0}$$

J – gęstość prądu
w odległości x od
powierzchni wsadu,
 J_{m0} – gęstość prądu
na powierzchni

wsadu,

p_v – gęstość mocy
w odległości x od
powierzchni wsadu,

p_{v0} – gęstość mocy
na powierzchni
wsadu.

Zależność gęstości prądu oraz objętościowej gęstości mocy od odległości od powierzchni wsadu – (wsad to półpłaszczyzna przewodząca)

Nierównomierny rozkład gęstości prądu w półprzestrzeni można zastąpić równoważnym stałym rozkładem prądu o gęstości $\frac{J_m}{\sqrt{2}}$ w warstwie grubości δ (J_m – amplituda prądu na powierzchni wsadu)

W warstwie wsadu o grubości 3δ wydziela się 99,75% mocy całkowitej, czyli praktycznie cała moc.

Nagrzewanie indukcyjne – głębokość wnikania

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma}} = 502,29 \frac{1}{\sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \gamma}}$$

przy czym:

δ - **głębokość wnikania** prądu do wsadu, m

ω – pulsacja prądu we wzбудniku, s⁻¹

μ – przenikalność magnetyczna wsadu, H · m⁻¹

γ – konduktywność wsadu, $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

f – częstotliwość prądu we wzbudniku, Hz

μ_r – *względna* przenikalność magnetyczna wsadu

Nagrzewanie może być:

- skrośne (równomierne w całym przekroju) – małe f ,
- powierzchniowe – duże f .

Głębokość wnikania prądu - przykłady

Głębokość wnikania zależy od:

- rodzaju materiału,
- częstotliwości,
- temperatury.

δ [mm] dla $f = 50$ Hz

	20°C	1000°C
miedź	9.5	32.5
stal	2.8	85.0

δ [mm] dla $f = 100\ 000$ Hz
(zmniejszenie δ ok. 45 razy)

	20°C	1000°C
miedź	0.21	0.73
stal	0.06	1.90

Sprawność elektryczna nagrzewania indukcyjnego

$$\eta_e = \frac{P_2}{P_1 + P_2}$$

P_2 - moc czynna wydzielana we wsadzie, P_1 moc czynną traconą we wzbudniku, $P_2 + P_1$ - całkowita moc czynna pobierana przez układ grzejny.

Sprawność elektryczna nagrzewania -
wyrażenie uproszczone:

ρ_c - rezystywność miedzi,

ρ_w - rezystywność wsadu,

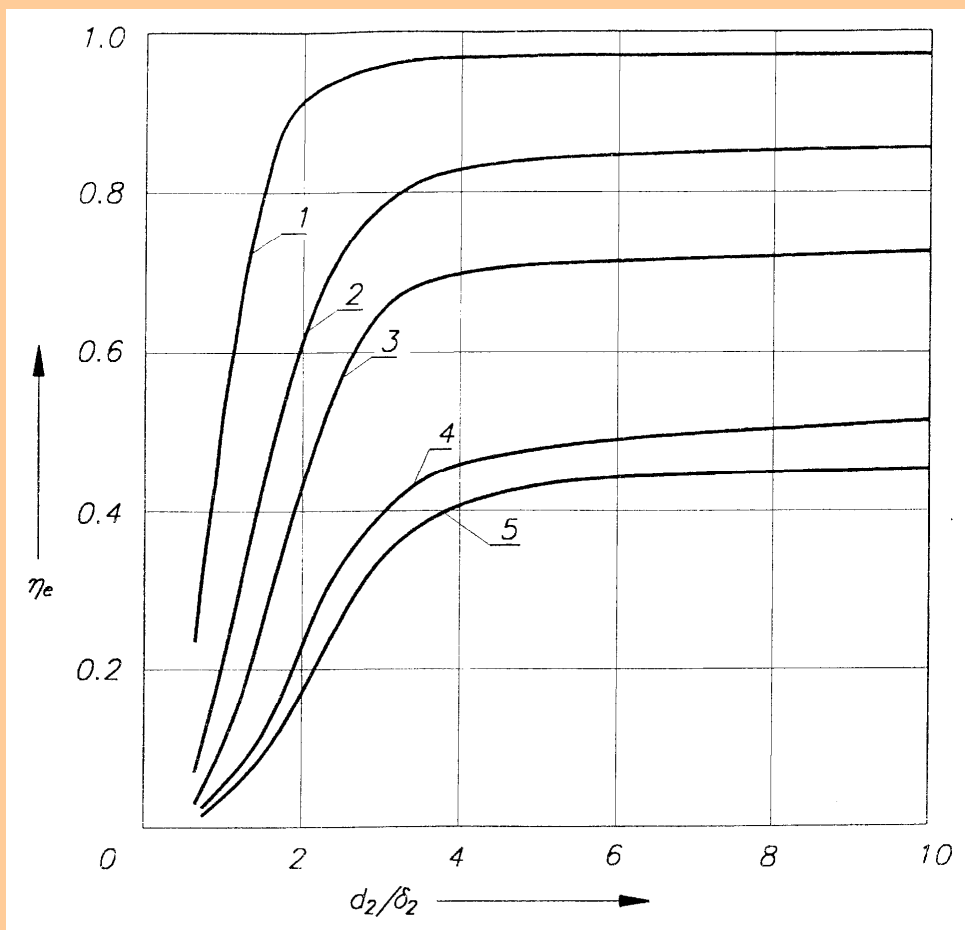
μ_w - względna przenikalność dielektryczna wsadu.

$$\eta_e = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_w \mu_w}}}$$

Wnioski:

- przy nagrzewaniu miedzi sprawność elektryczna jest niska - ok. 50 %, $\rho_c \approx \rho_w$
- sprawność ta jest szczególnie wysoka przy nagrzewaniu materiałów ferromagnetycznych $\mu_w \gg 1$

Sprawność elektryczna nagrzewania indukcyjnego



Sprawność elektryczna η_e indukcyjnego układu grzejnego przy nagrzewaniu:

1 – stali węglowej w temp.

600°C przy $\mu_2 = 40$,

2 – stali nierdzewnej w temp.

800°C przy $\mu_2 = 1$,

3 – miedzi w temp. 1100°C,

4 – aluminium w temp. 20°C,

5 – miedzi w temp. 20°C

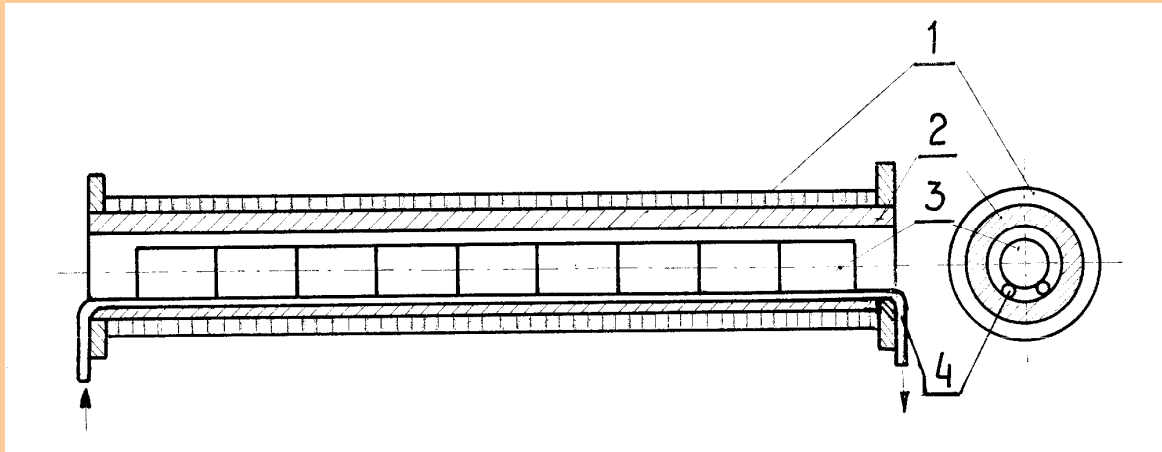
d_2 – średnica wsadu,

δ_2 – głębokość wnikania pola elektromagnetycznego do wsadu.

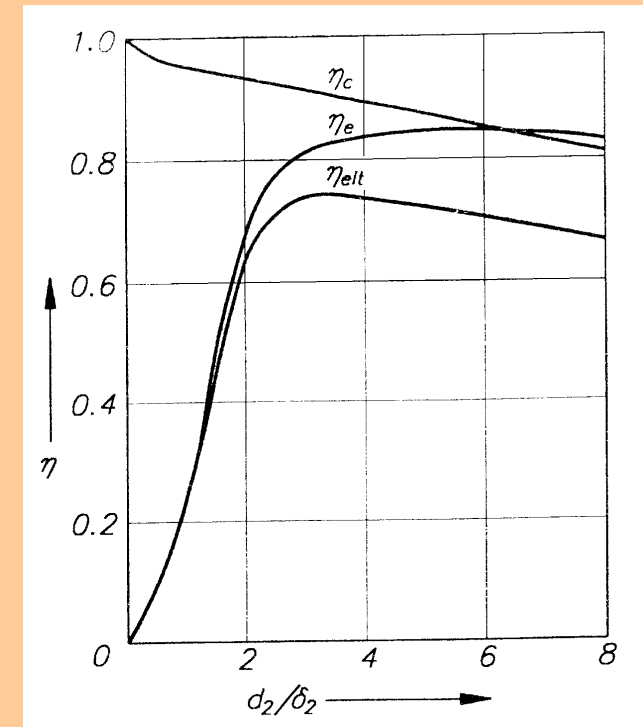
Zalecane średnice wsadów cylindrycznych nagrzewanych skrośnie

Wsad	Średnica wsadu d_2 , mm				
	0,05 kHz	0,5 kHz	2,4 kHz	8,0 kHz	500 kHz
Stal (do 720°C)	≥ 30	10 ÷ 40	5 ÷ 20	3 ÷ 10	0,4 ÷ 1,2
Stal (do 1200°C)	≥ 150	60 ÷ 200	30 ÷ 125	15 ÷ 50	2,5 ÷ 8
Mosiądz	≥ 110	40 ÷ 200	20 ÷ 125	10 ÷ 50	1,0 ÷ 15
Miedź, aluminium	≥ 50	16 ÷ 300	10 ÷ 160	4 ÷ 80	0,5 ÷ 20

Nagrzewnica indukcyjna

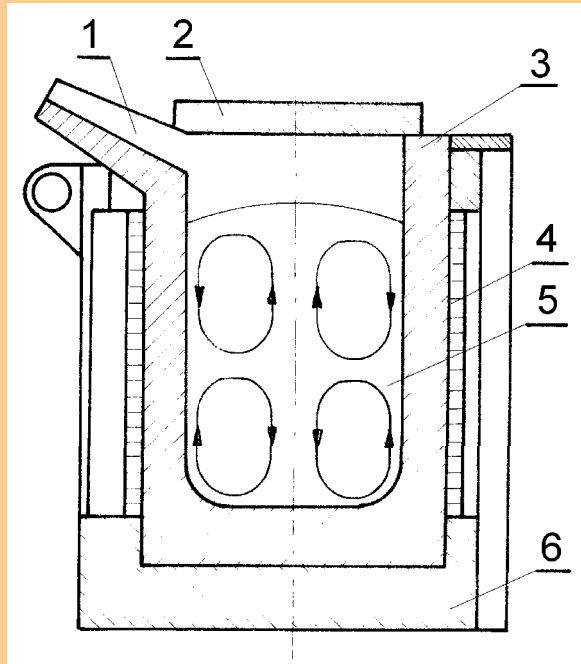


Szkic nagrzewnicy
indukcyjnej
1 – wzbudnik, 2 – rura
ceramiczna, 3 – wsad,
4 – prowadnice



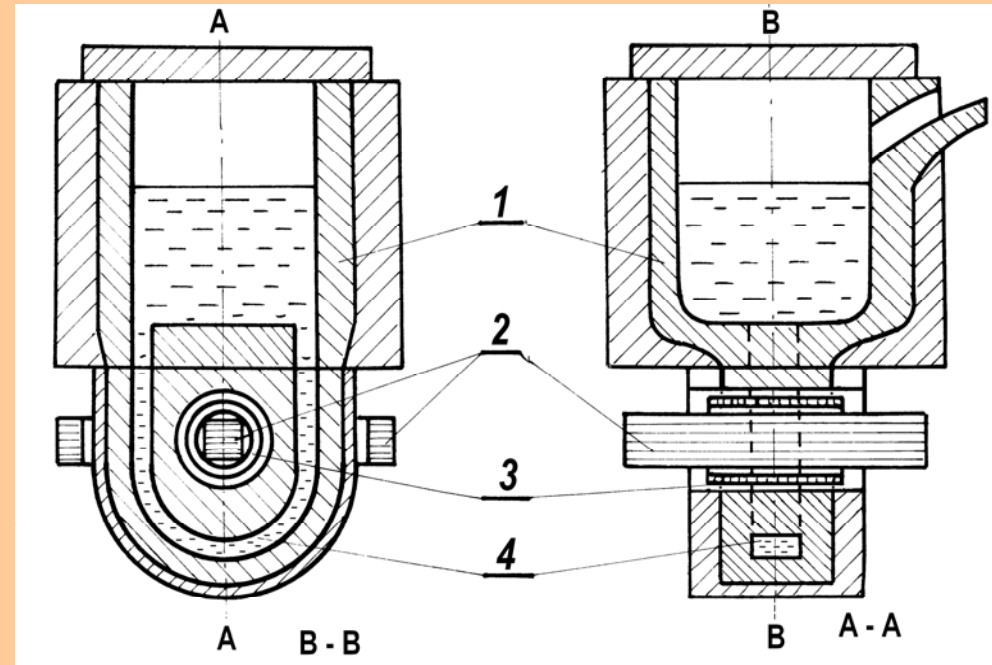
Sprawność
nagrzewnicy
skrośnej

Piece indukcyjne tyglowe i kanałowe



Szkic pieca indukcyjnego tyglowego:

- 1 – rynna spustowa,
- 2 – pokrywa,
- 3 – tygiel, 4 – wzbudnik,
- 5 – wsad,
- 6 – ogniotrwała podstawa



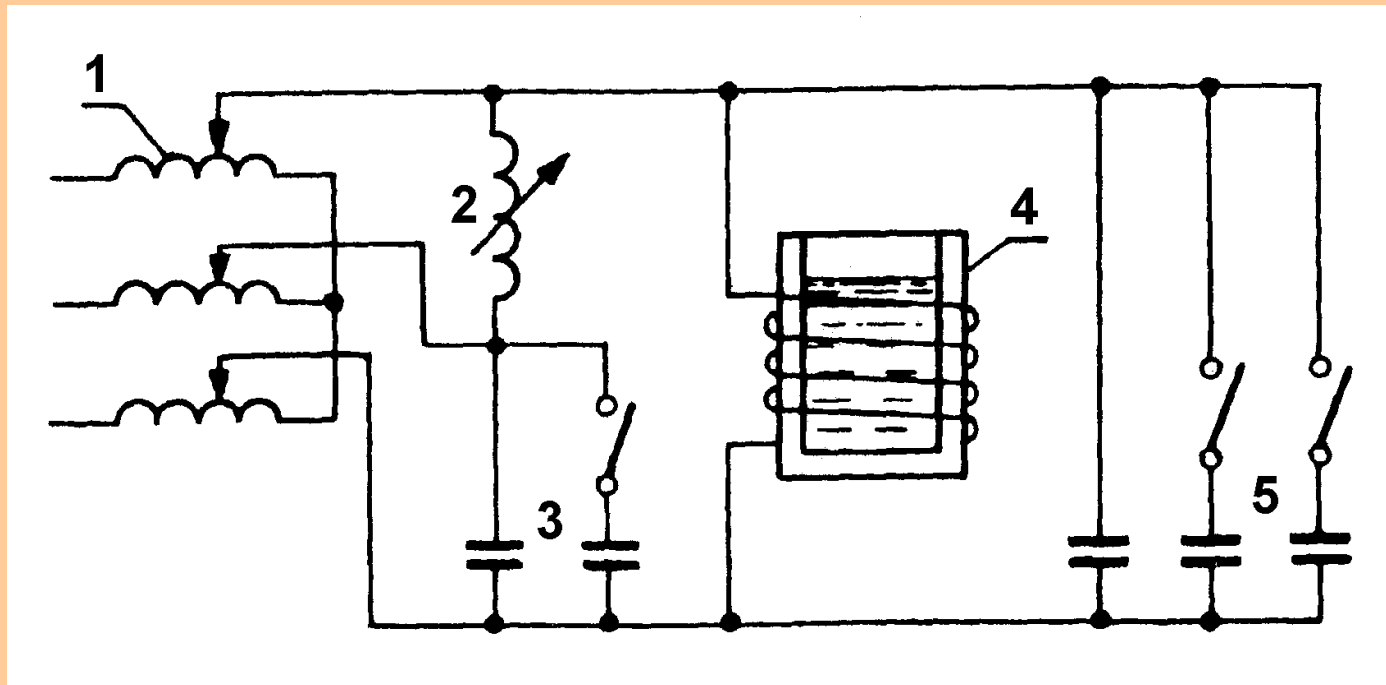
Szkic pieca indukcyjnego kanałowego
1 – zbiornik (wanna) pieca, 2 – zamknięty rdzeń ferromagnetyczny (blachy transformatorowe), 3 – wzbudnik (uzwojenie pierwotne), 4 – kanał z płynnym metalem (uzwojenie wtórne, zwój zwarty)

Piec kanałowy - właściwości

Właściwości pieca:

- z punktu widzenia elektrycznego piec kanałowy stanowi transformator z rdzeniem ferromagnetycznym i uzwojeniem wtórnym w postaci zwoju zwartego,
- zasilany napięciem sieciowym 50 Hz,
- metal w kanale musi być płynny, dlatego przy spuście nie opróżnia się całego pieca,
- przed ponownym uruchomieniem pieca należy:
 - po remoncie pieca zalać jego kanał metalem roztopionym w innym piecu,
 - lub w czasie remontu umieścić w kanale zwój zwarty z metalu przewidzianego do topienia w piecu.
- piece kanałowe służą głównie do:
 - topienia metali nieżelaznych i ich stopów,
 - przetrzymywania w stałej temperaturze lub przegrzewania ciekłych metali roztopionych w innych piecach.

Układ zasilania pieca indukcyjnego tyglowego o częstotliwości sieciowej



1 – transformator dopasowujący, 2 - dławik, 3 – bateria kondensatorów, 4 – piec indukcyjny, 5 - dodatkowa bateria kondensatorów

Źródła zasilania indukcyjnych urządzeń grzejnych

Moce indukcyjnych urządzeń grzejnych – od kilku watów do kilkudziesięciu megawatów.

Wykorzystywany zakres częstotliwości – od 16,67 Hz do 27,12 MHz.

Podstawowe źródła zasilania:

- cyklokonwertory – do 50 Hz,
- transformatory, regulatory indukcyjne, sterowniki tyrystorowe - 50 Hz,
- magnetyczne powielacze częstotliwości – od 150 Hz do 450 Hz,
- przetwornice maszynowe,
- **tyrystorowe i tranzystorowe przemienniki częstotliwości,**
- generatory lampowe,
- generatory tranzystorowe.

Wiele źródeł generuje prądy odkształcone od sinusoidy.

W większości przypadków nie ma to jednak istotnego znaczenia dla procesu nagrzewania.

Przeмиenniki częstotliwości do nagrzewania indukcyjnego

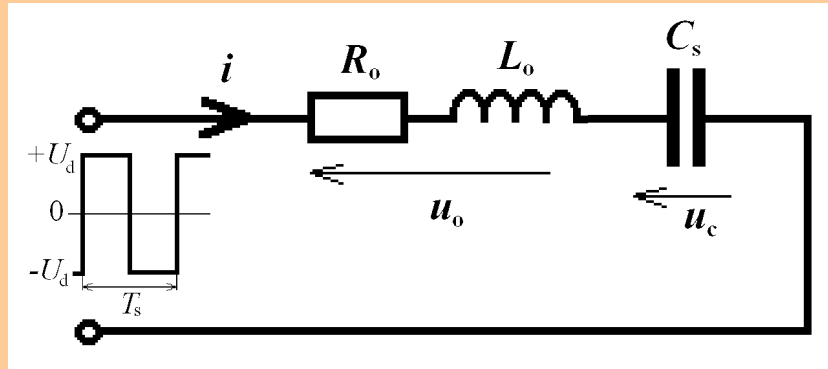


- **Prostownik** (przekształtnik *AC/DC*) przekształca napięcie przemiennie (*AC*) (tu: 3-fazowe) na napięcie stałe lub prąd stały (*DC*)
- **Falownik** (przekształtnik *DC/AC*) przekształca napięcie stałe / prąd stały (*DC*) na napięcie przemiennie / prąd przemienny (*AC*)

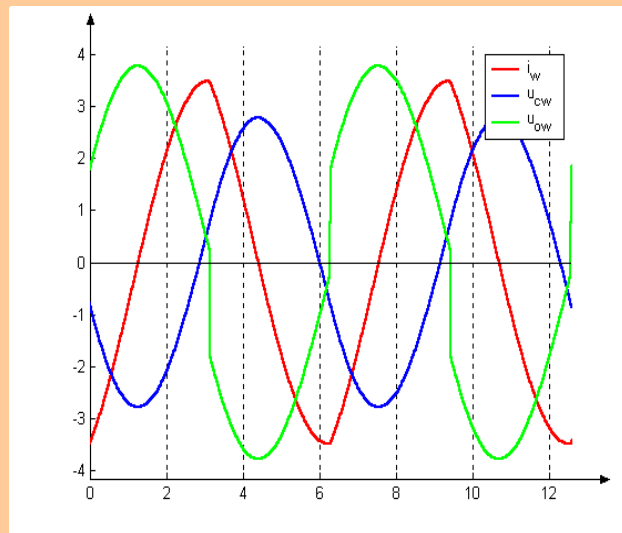
Od wielu lat obserwuje się dynamiczny rozwój przeмиenników częstotliwości, zwłaszcza tranzystorowych (dzięki postępowi w budowie tranzystorów mocy i mikroprocesorów):

- ich częstotliwości osiągają już górny zakres częstotliwości grzejnictwa indukcyjnego,
- ich sprawności są rzędu dziewięćdziesięciu kilku procent.

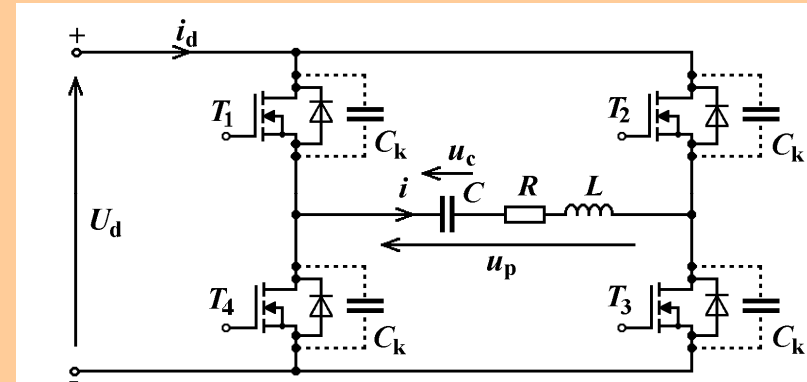
Falowniki szeregowe



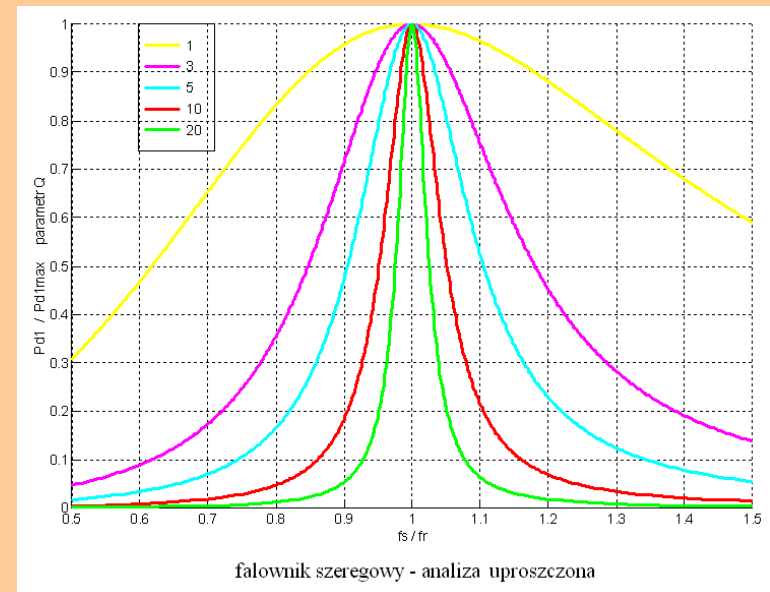
Zasada działania falownika napięciowego szeregowego



Przykładowe przebiegi prądu i napięć w falowniku

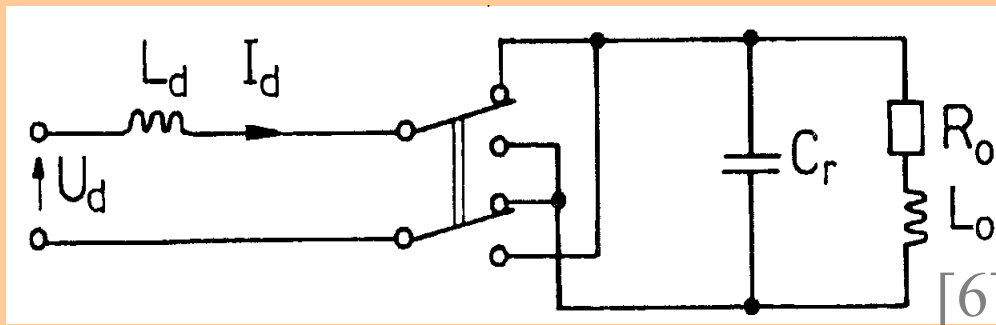


Falownik szeregowy mostkowy

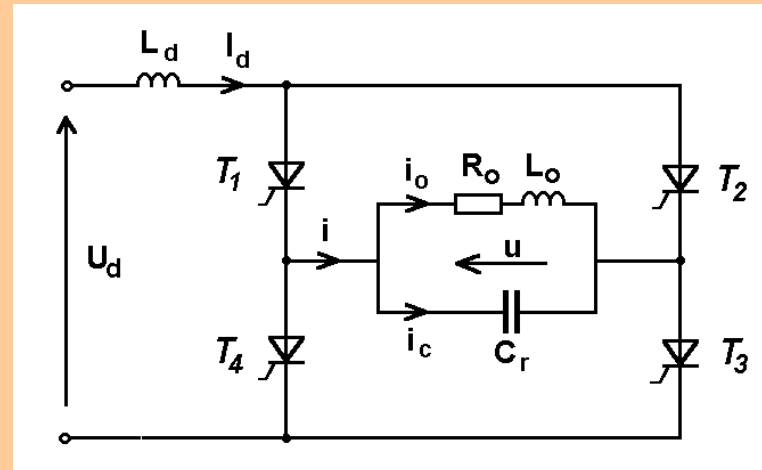


Względna moc falownika w funkcji względnej częstotliwości sterowania dla różnych dobroci Q

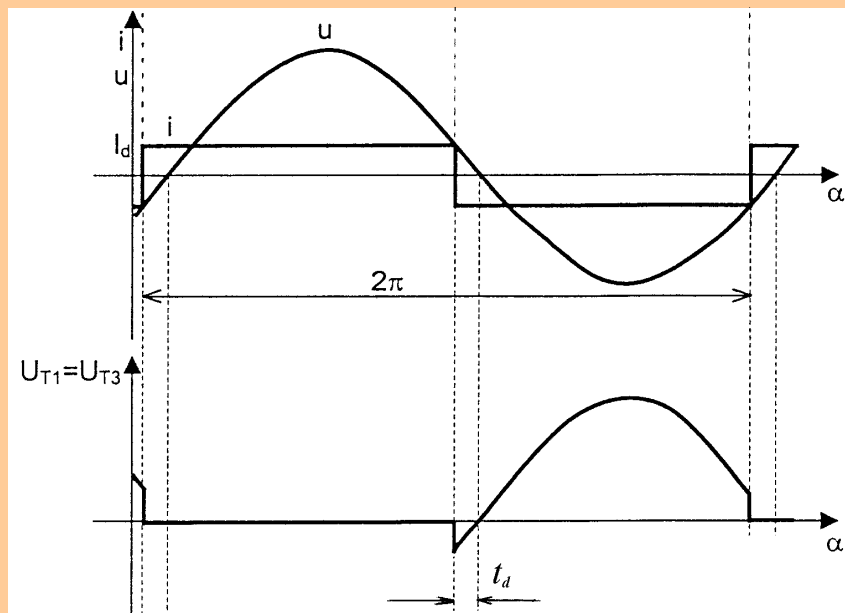
Równoległy falownik prądu



Zasada działania falownika równoległego prądu



Falownik równoległy prądowy
Największe moce - tyrystory

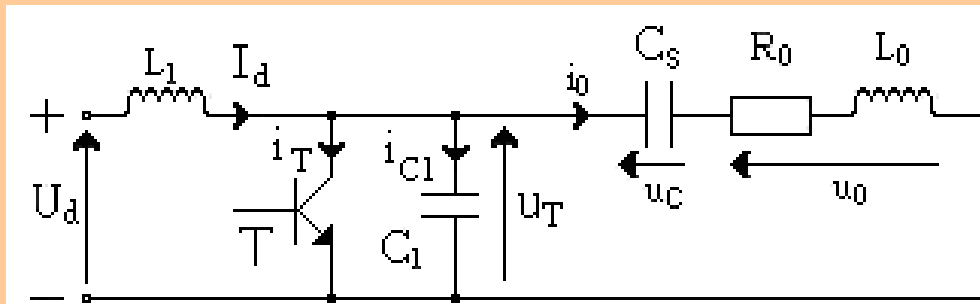


Przykładowe przebiegi prądu i napięć w falowniku

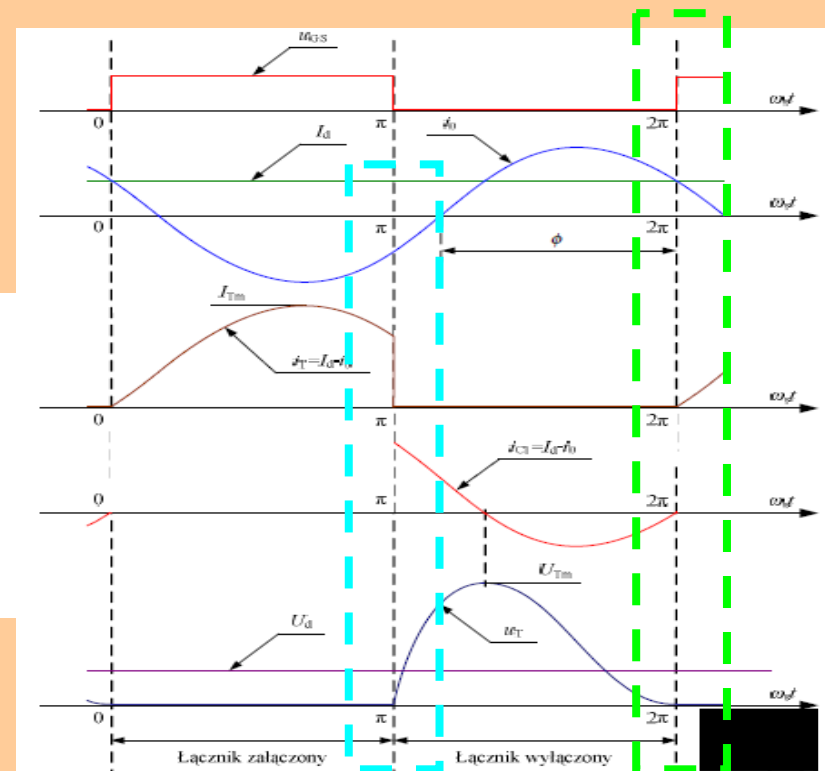
„Miękkie” przełączanie zaworów energoelektronicznych

Celem zwiększenia sprawności urządzeń oraz możliwości pracy przy dużych częstotliwościach zwraca się dużą uwagę na przełączanie tranzystorów przy bliskim zeru prądzie tranzystora (ZCS) lub napięciu na nim (ZVS), tzw. „miękkie”. Efektem jest zmniejszenie strat przełączania.

„Maksymalnie miękkie” przełączanie można uzyskać w falowniku klasy E.

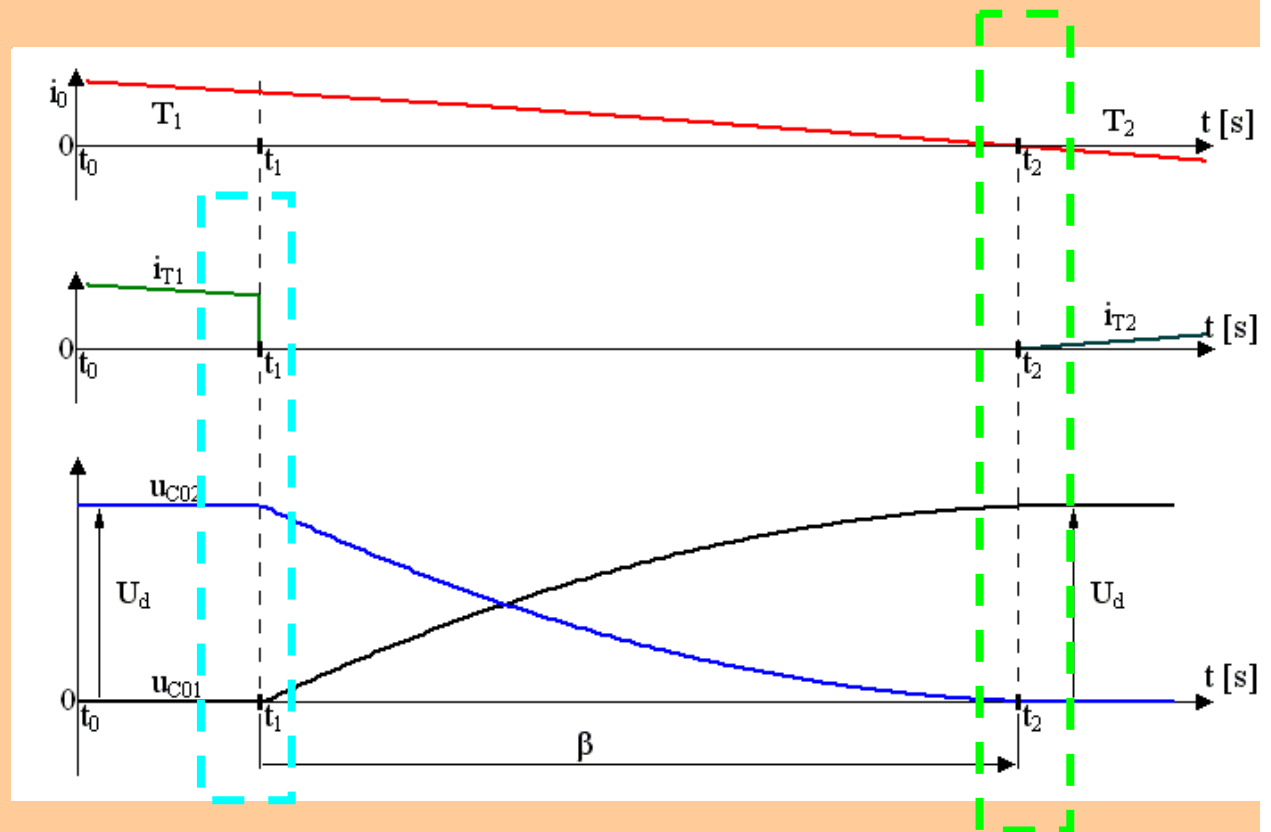
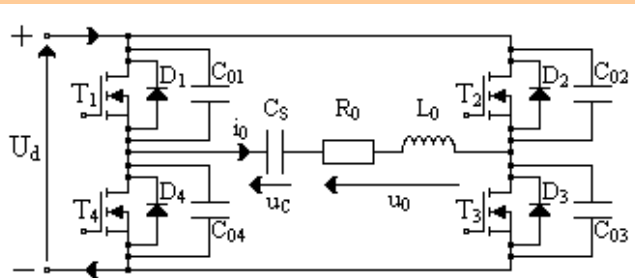


Falownik klasy E



Inny przykład miękkiego przełączania

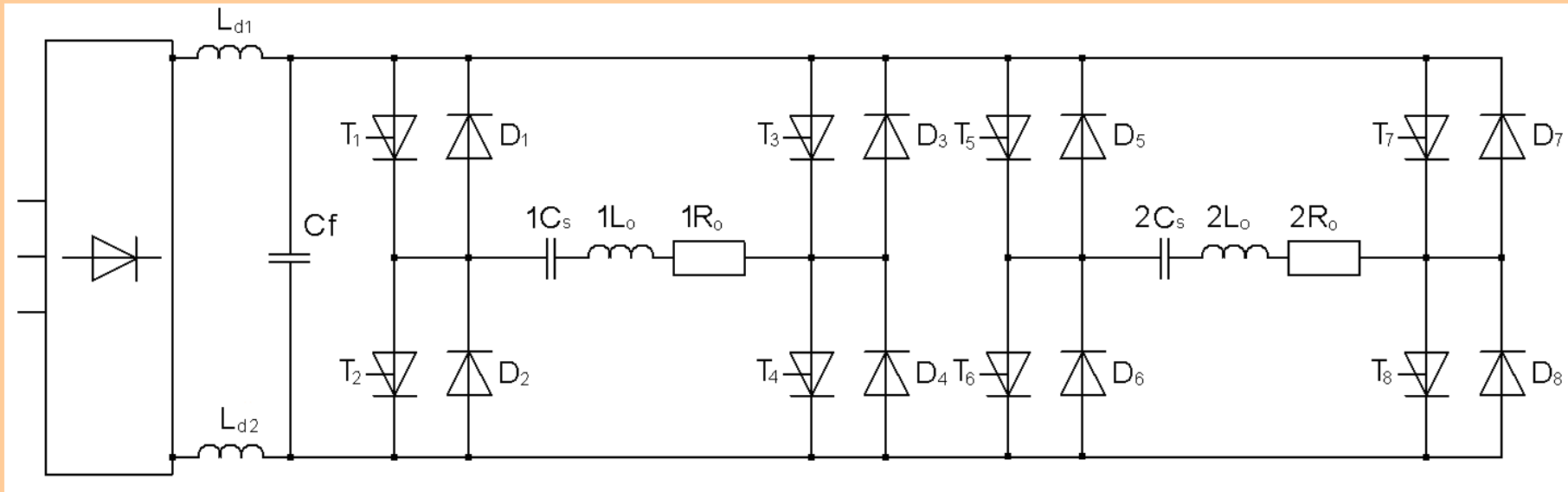
Szeregowy rezonansowy falownik napięcia klasy DE –
przełączanie optymalne



Wyłączanie T_1 i T_3 -
NZCS+ZVS

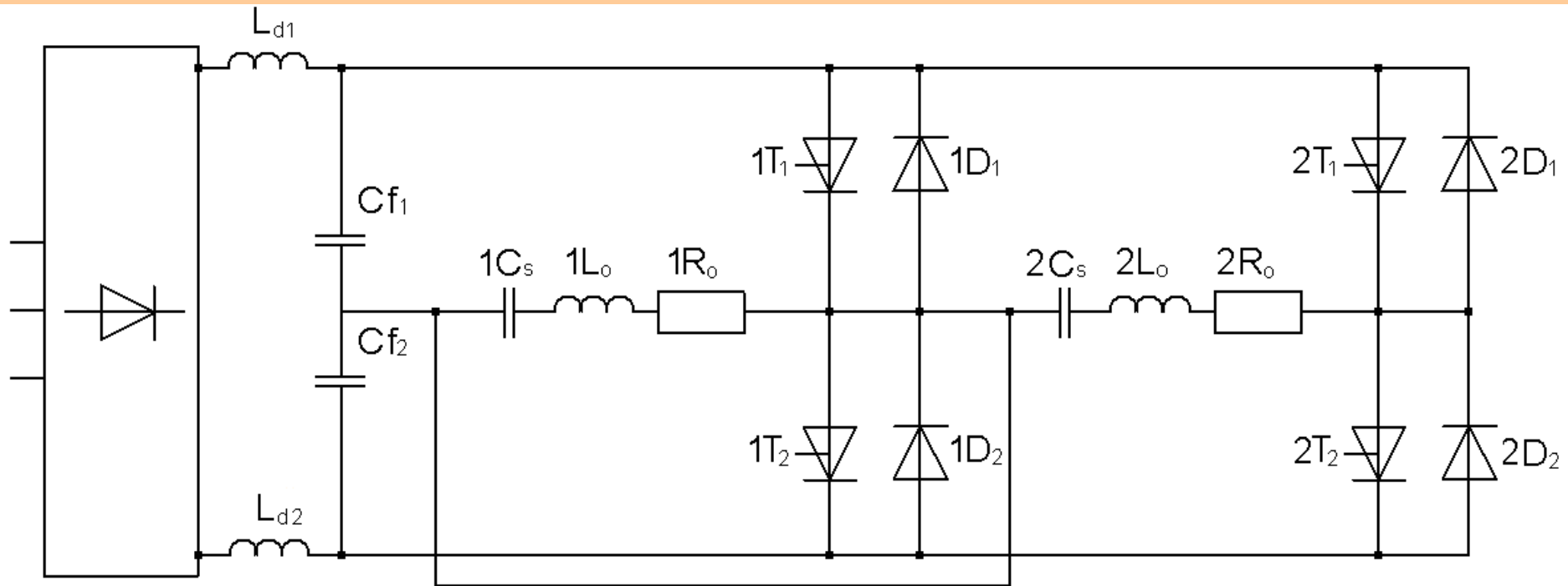
Załączanie T_2 i T_4 -
ZCS+ZVS

UKŁADY ZASILANIA WZBUDNIKÓW DWUTYGŁOWEGO PIECA INDUKCYJNEGO



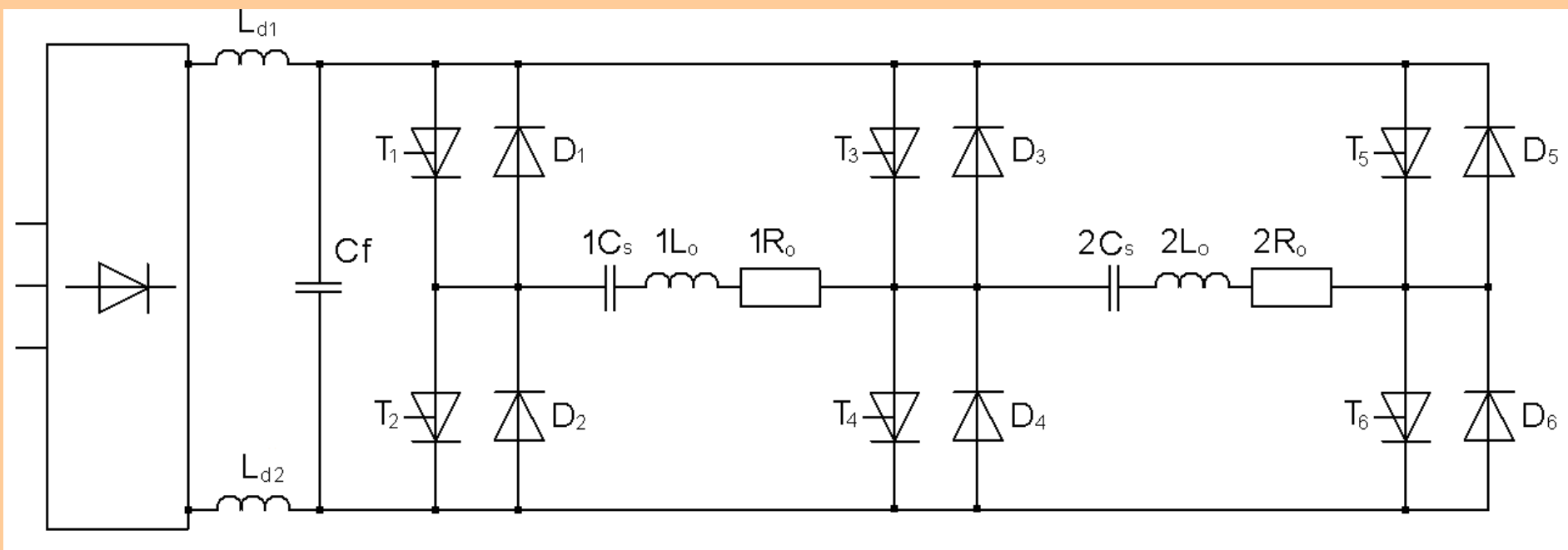
a) Zasilanie wzбудników z dwóch niezależnych falowników napięcia

UKŁADY ZASILANIA WZBUDNIKÓW DWUTYGŁOWEGO PIECA INDUKCYJNEGO (2)



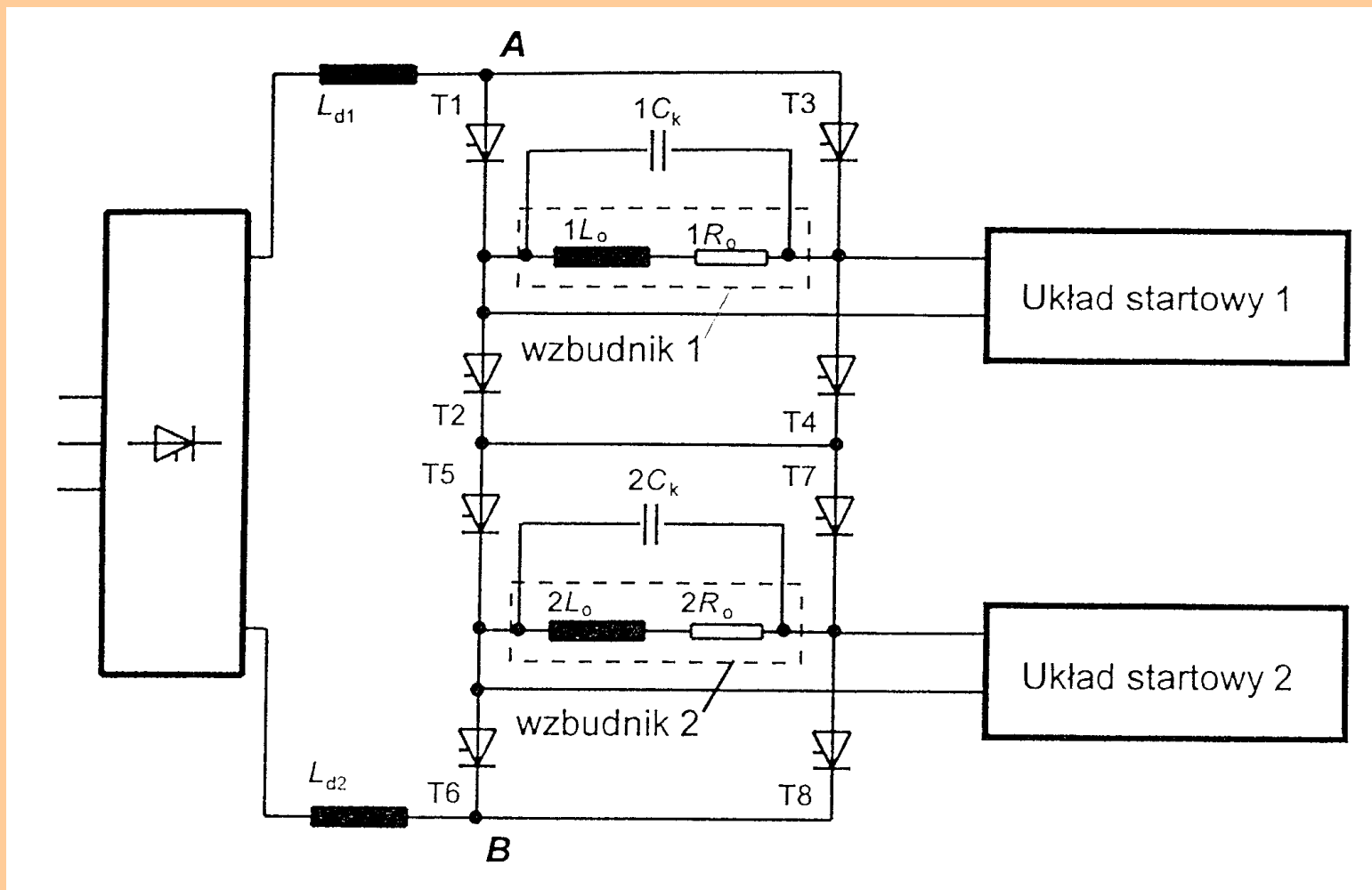
b) Zasilanie wzбудników z dwóch niezależnych falowników napięcia z dzieloną baterią kondensatorów filtru

UKŁADY ZASILANIA WZBUDNIKÓW DWUTYGŁOWEGO PIECA INDUKCYJNEGO (2)

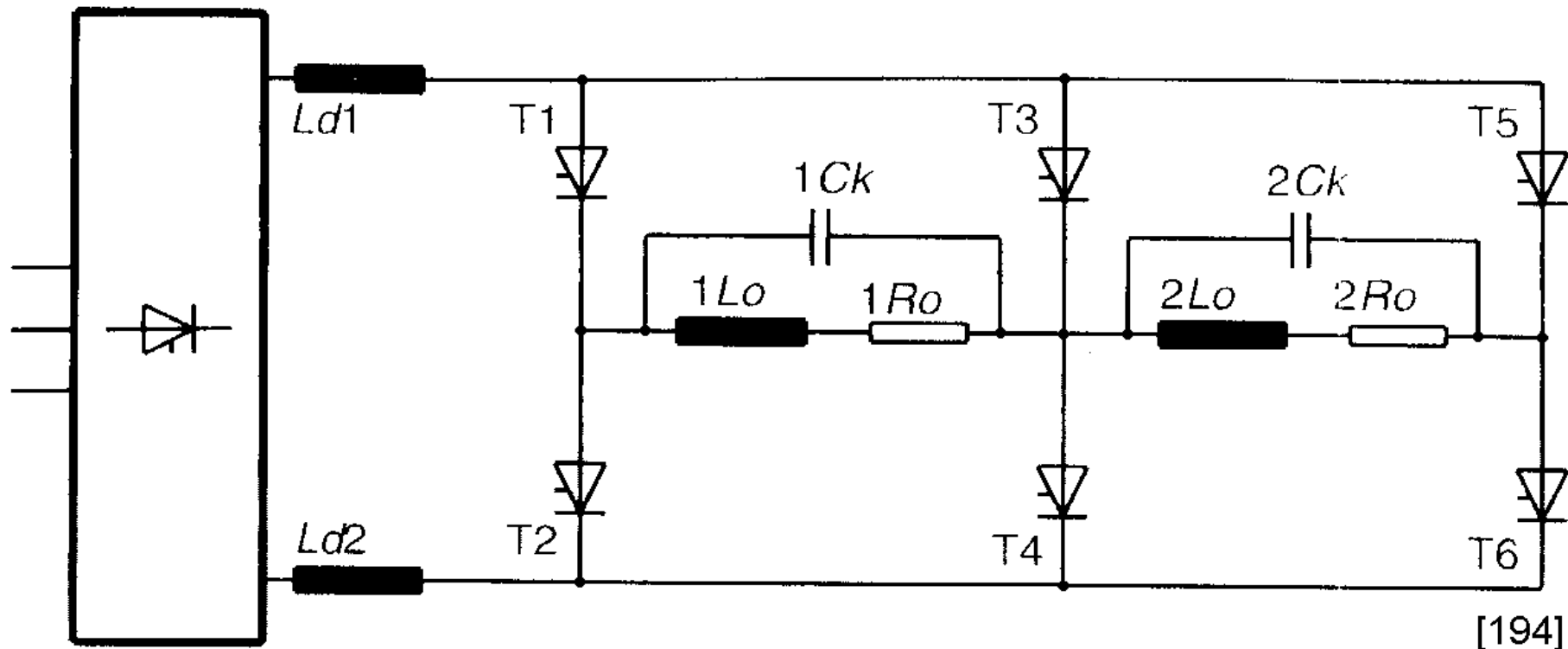


c) Zasilanie wzбудników z dwóch falowników napięcia w układzie oszczędnościowym

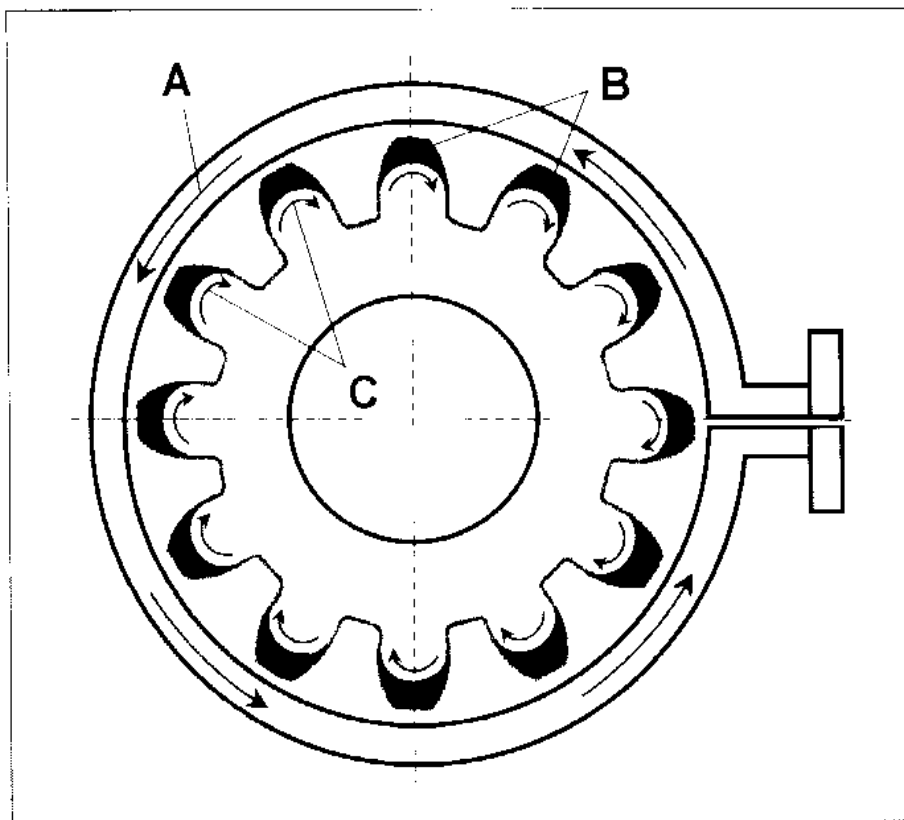
Przekształtnik tyrystorowy do zasilania dwutyglowego pieca indukcyjnego



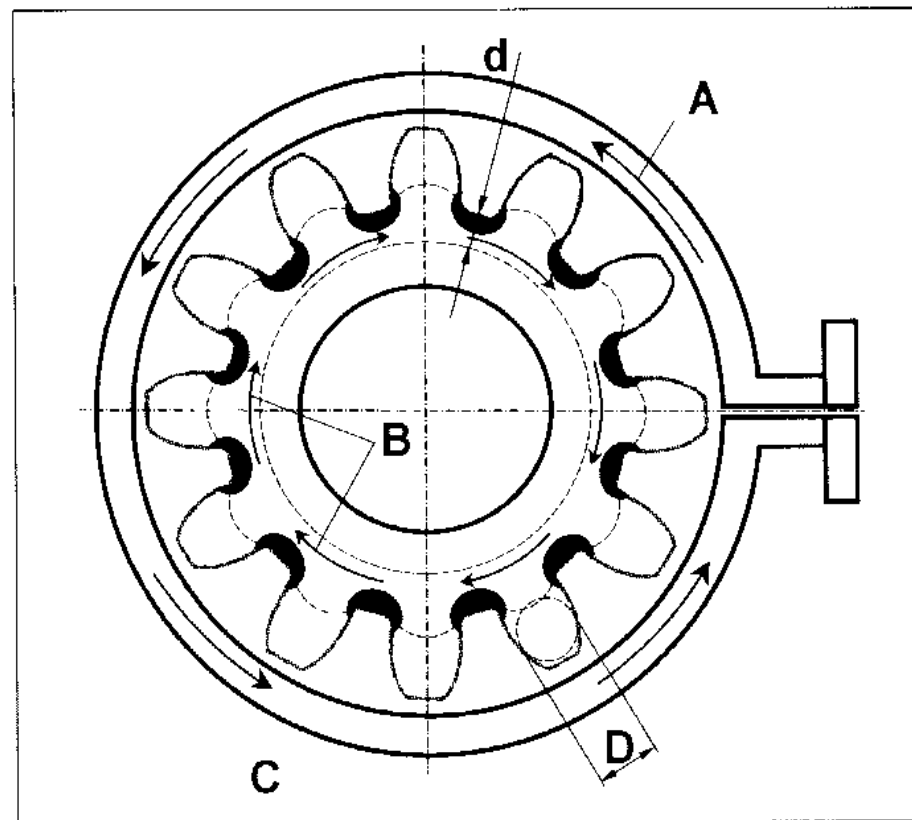
Przekształtnik tyrystorowy do zasilania dwutyglowego pieca indukcyjnego – układ oszczędnościowy



Nagrzewanie dwuczęstotliwościowe (1)



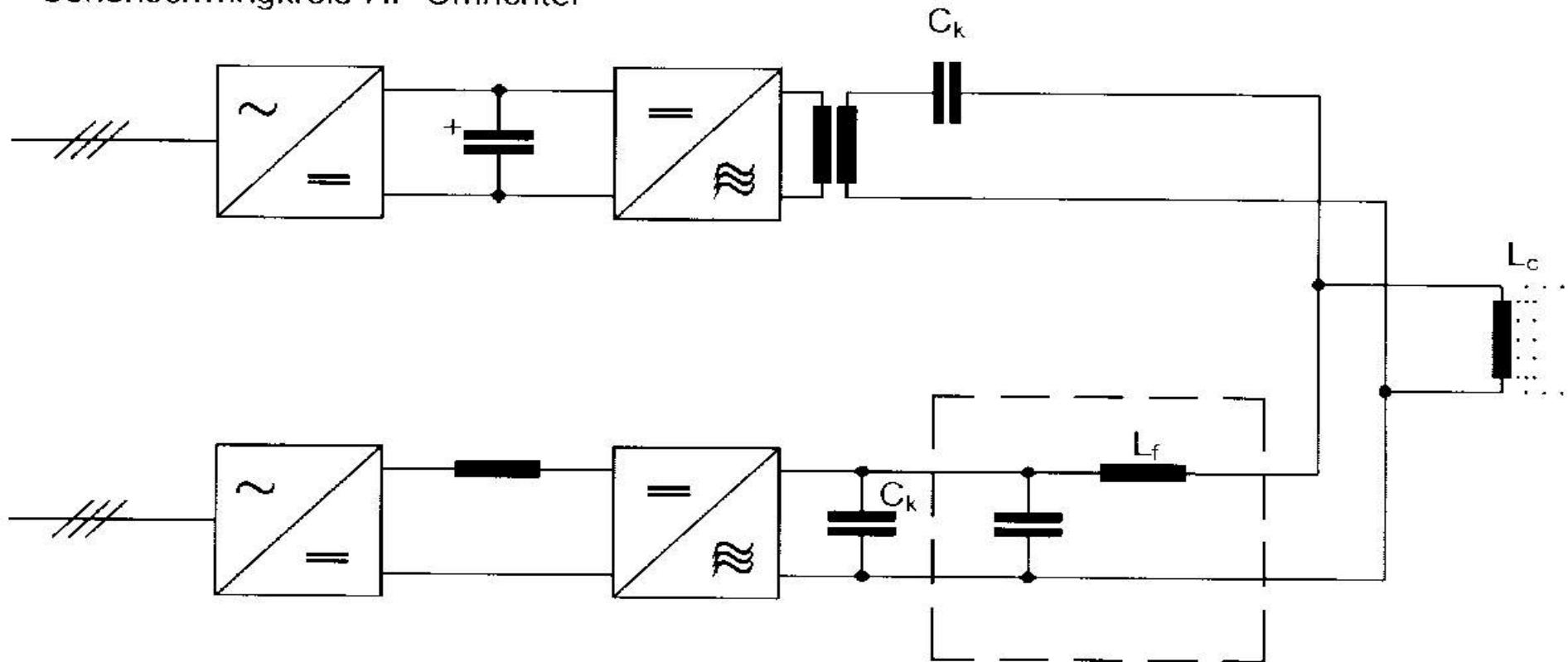
Nagrzewanie tylko wysoką częstotliwością



Nagrzewanie tylko średnią częstotliwością

Nagrzewanie dwuczęstotliwościowe (2)

Serienschwingkreis-HF-Umrichter



Parallelschwingkreis-MF-Umrichter

HF-Filter

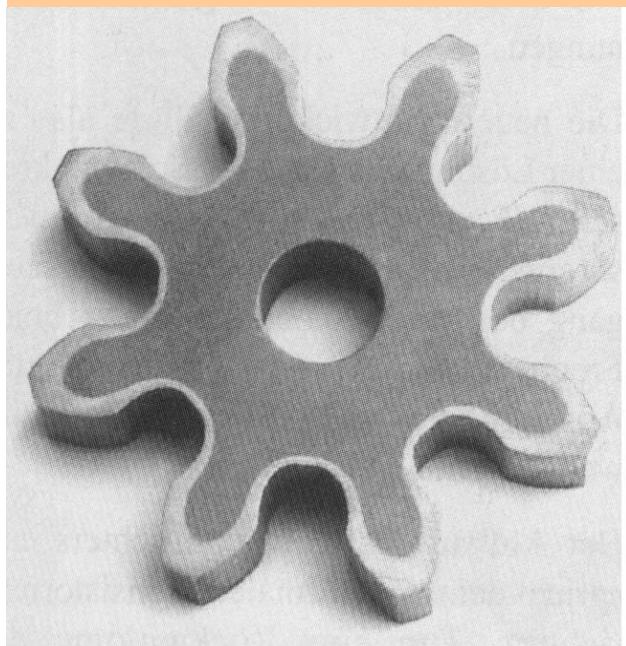
C_k : Kompensationskondensator

L_f : Frequenzfilterinduktivität

L_c : Spuleninduktivität

Nagrzewanie dwuczęstotliwościowe (3)

Efekt nagrzewania:



wysoką
częstotliwością



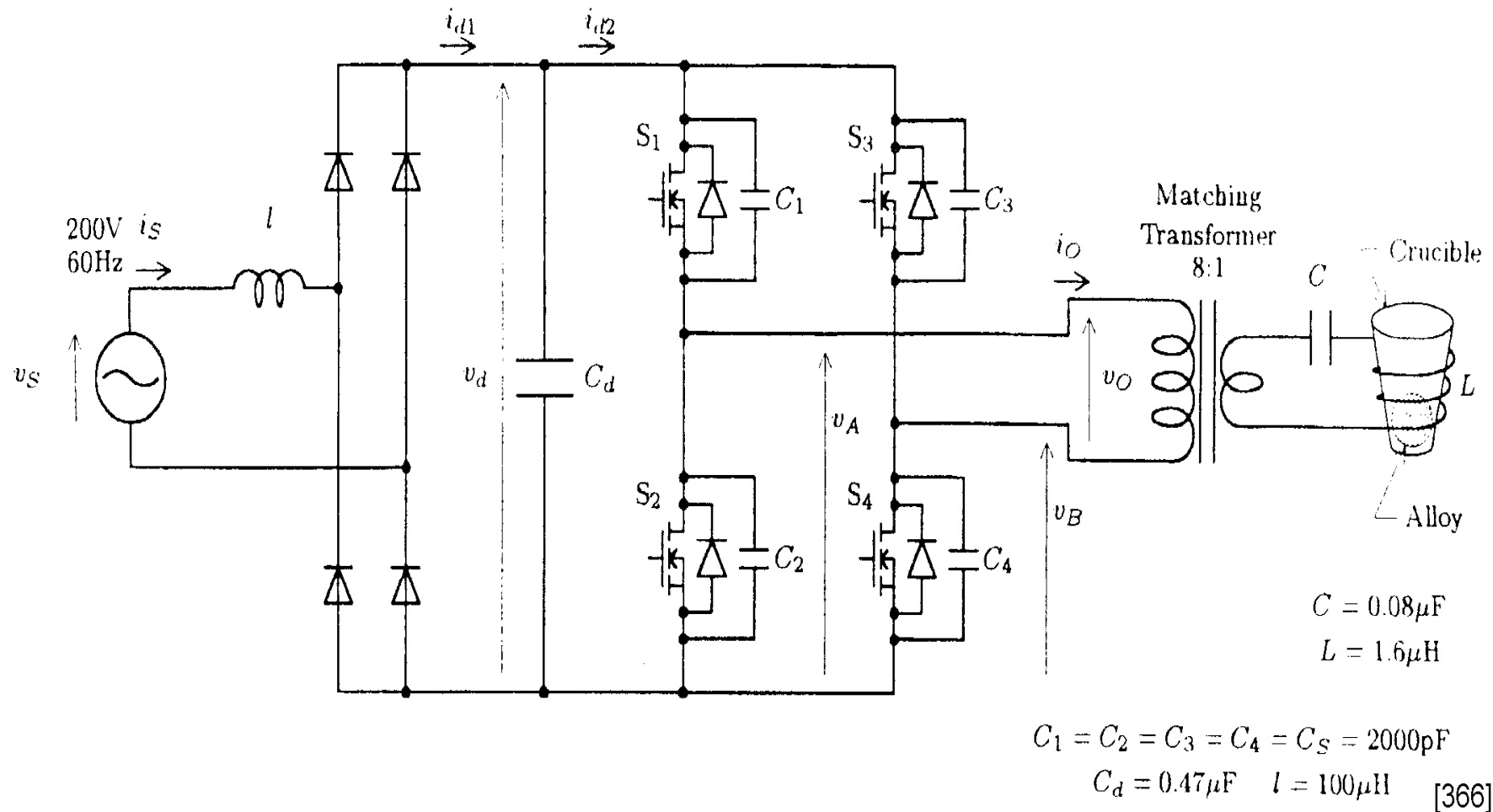
średnią
częstotliwością



obu
częstotliwościami

[19]

Przebiennik dla protetyków dentystycznych



Przykładowe parametry falownika: 4 kW, 450 kHz [20]

Praca przemiennika o małym ujemnym wpływie na sieć zasilającą

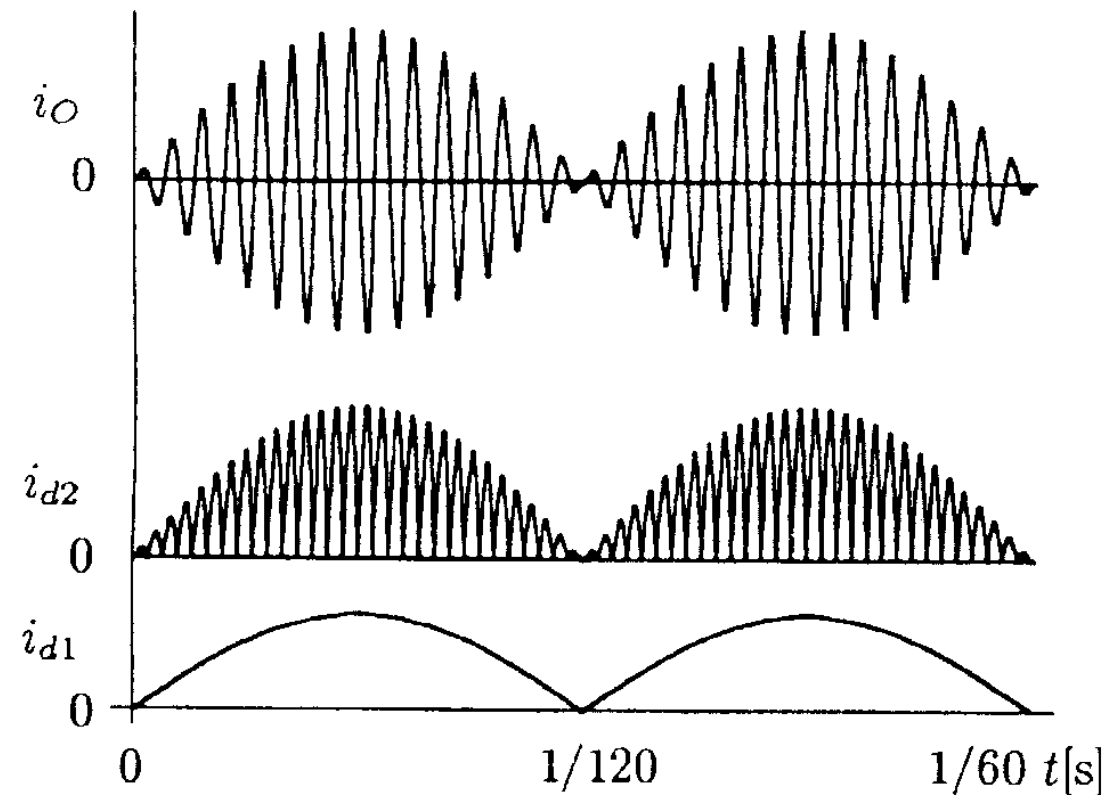


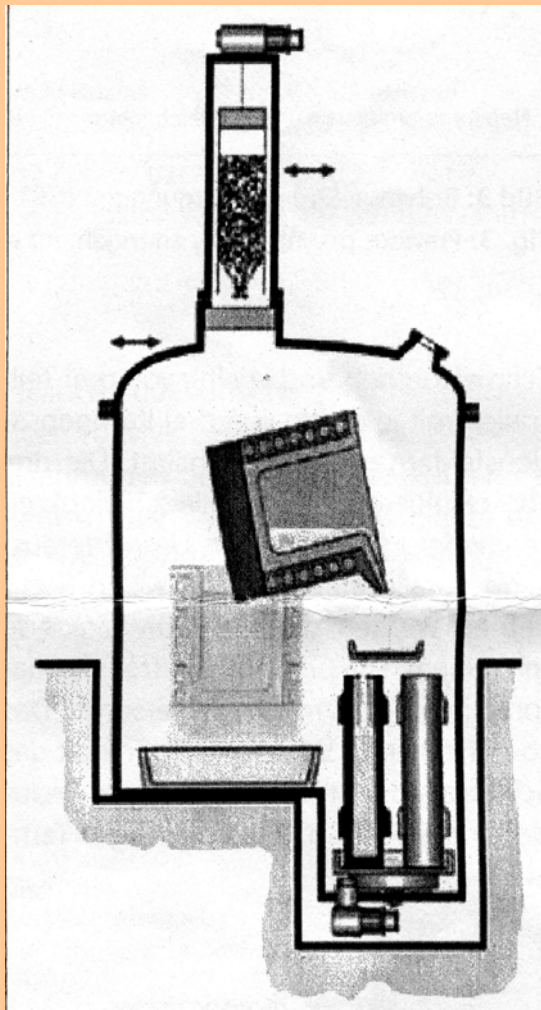
Fig. 2. Current waveforms of i_O , i_{d2} , and i_{d1} under assumption that operating frequency is 1.8 kHz and line frequency is 60 Hz.

[366]

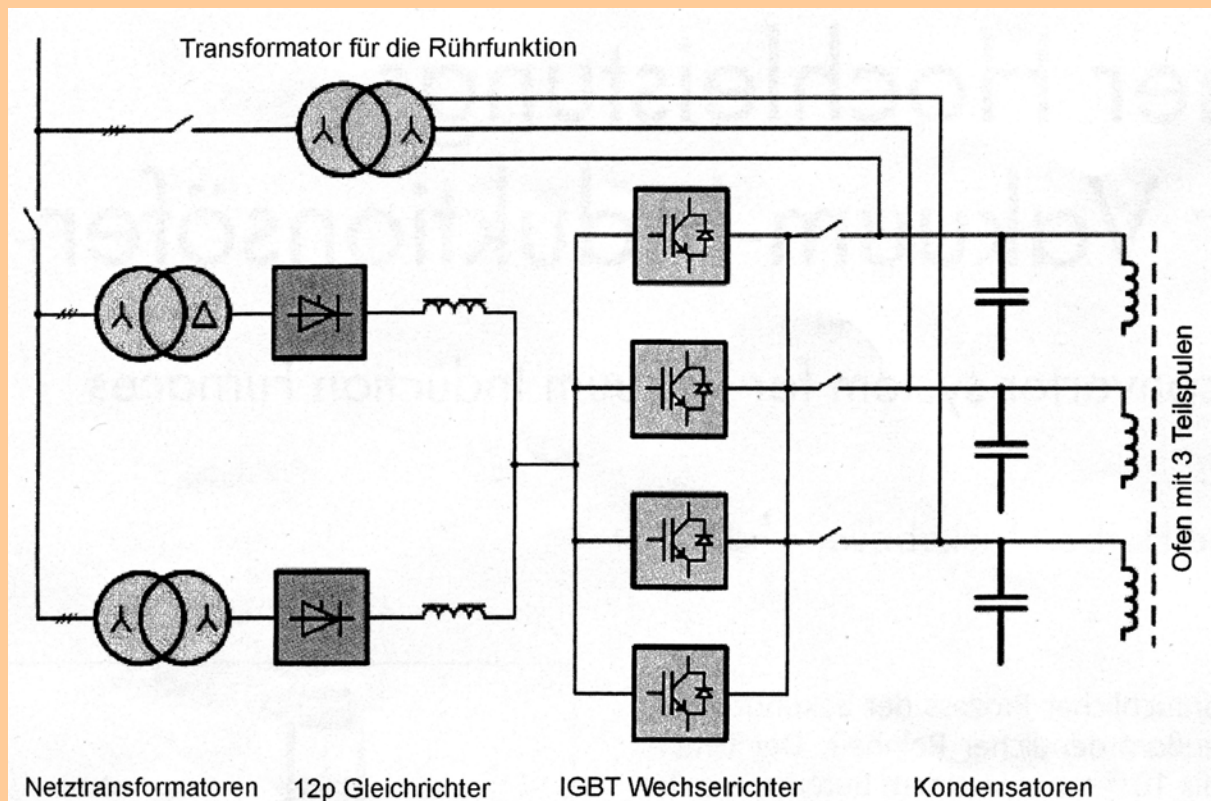
**Zasilanie pieca próżniowego
– jaki falownik zastosować?**

Opis stanu początkowego

W Austrii pracował piec indukcyjny próżniowy o częstotliwości pracy 150 Hz i mocy 4 MW, falownik z IGBT.

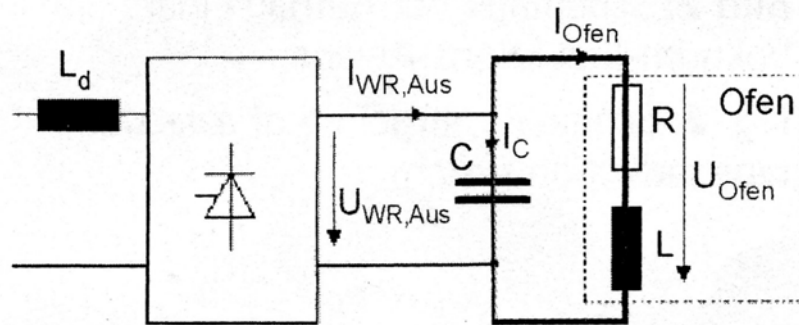


Piec umożliwia też indukcyjne mieszanie ciekłego metalu.



Analiza – falownik równoległy czy szeregowy?

Parallelschwingkreisumrichter



$$P = 4000 \text{ kW}$$

$$U_{Ofen} = 600 \text{ V}$$

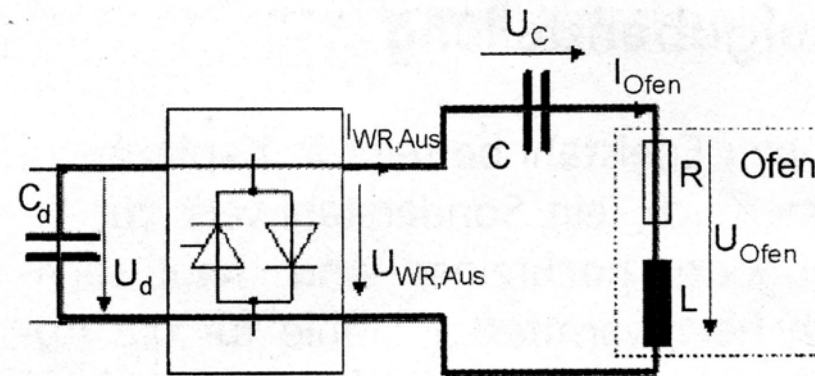
$$Q = 11$$

$$U_{WR,Aus} = U_C = U_{Ofen} = 600 \text{ V}$$

$$I_{WR,Aus} = \frac{P}{U_{WR,Aus}} = \frac{P}{U_{Ofen}} = \frac{4000 \text{ kW}}{600 \text{ V}} = 6667 \text{ A}$$

$$I_C \approx I_{Ofen} \approx Q \cdot I_{WR,Aus} = 73400 \text{ A}$$

Reihenschwingkreisumrichter



$$P = 4000 \text{ kW}$$

$$U_{Ofen} = 600 \text{ V}$$

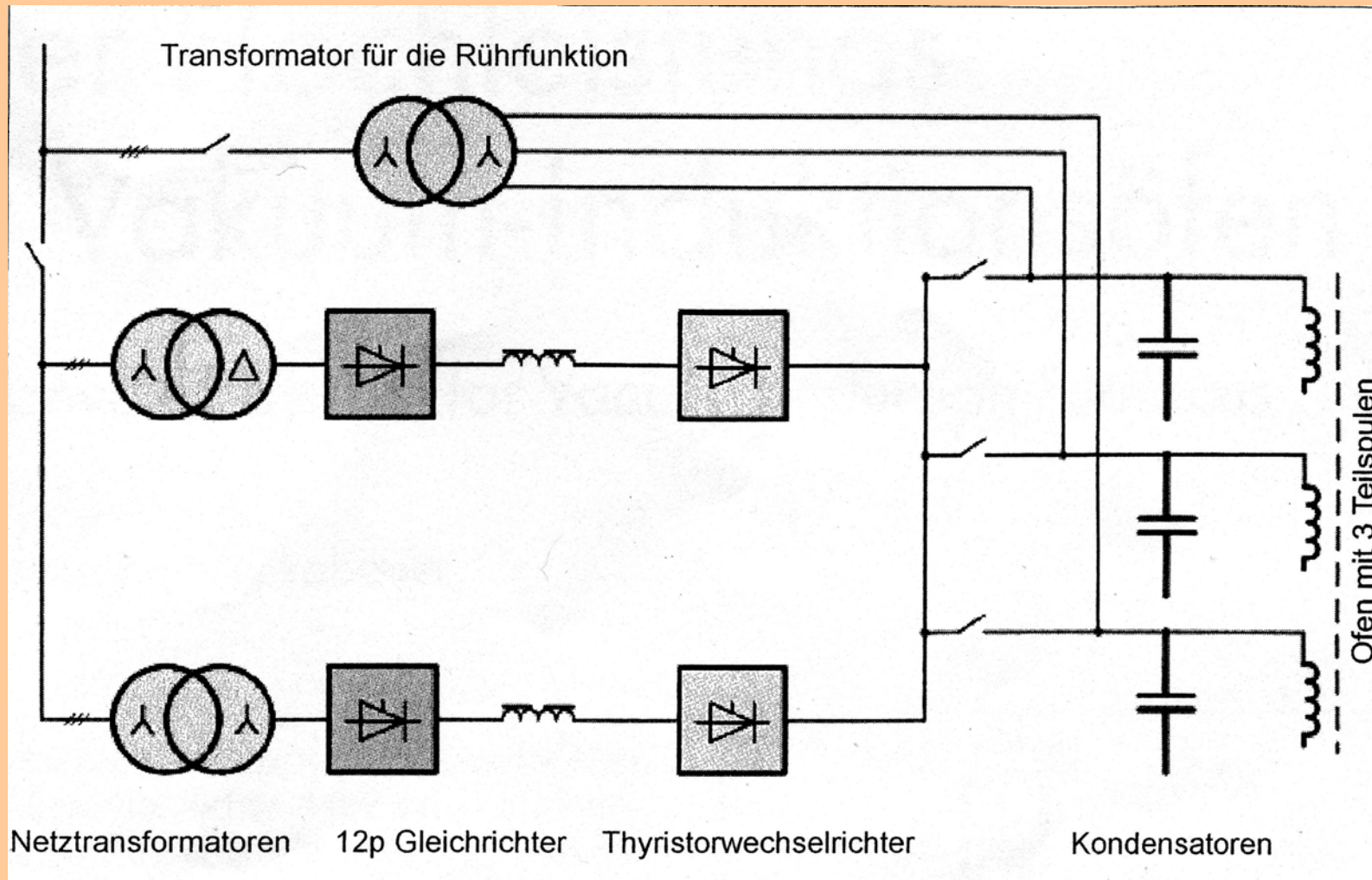
$$Q = 11$$

$$U_{WR,Aus} \approx \frac{U_{Ofen}}{Q} \approx \frac{U_C}{Q} = \frac{600 \text{ V}}{11} = 54,5 \text{ V}$$

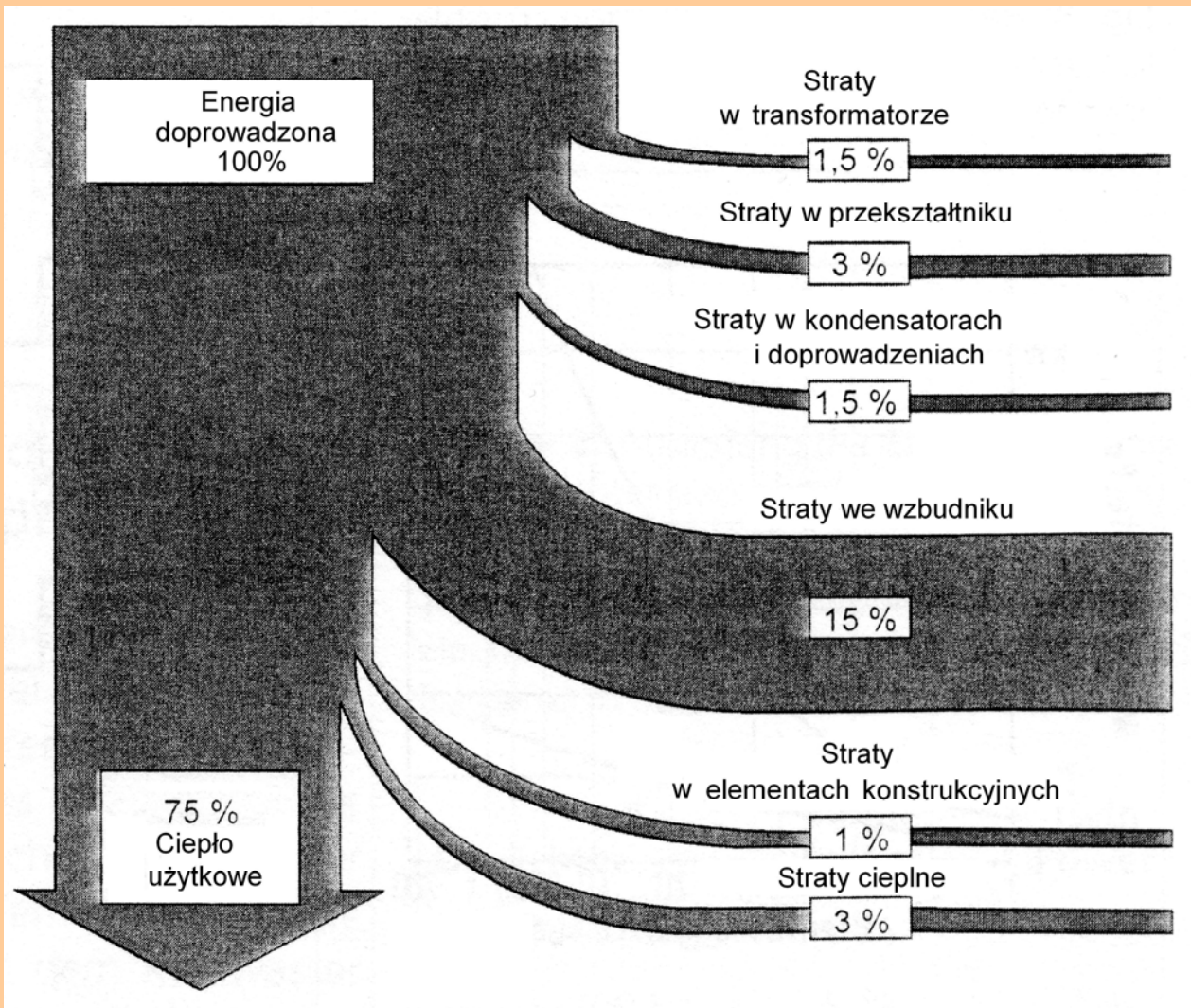
$$I_{WR,Aus} = \frac{P}{U_{WR,Aus}} = \frac{4000 \text{ kW}}{54,5 \text{ V}} = 73400 \text{ A}$$

$$I_{WR,Aus} = I_C = I_{Ofen} = 73400 \text{ A}$$

Rozwiązanie końcowe – falownik równoległy tyrystorowy



Przeptyw energii w indukcyjnym piecu tyglowym



Przeptyw energii w indukcyjnym piecu tyglowym średniej częstotliwości do topienia żeliwa (na podstawie [5 – Elektrowärme])

Największe straty – ogrzanie wody chłodzącej wzбудnik i kondensatory: możliwości odzysku ciepła

Zalety i wady nagrzewania indukcyjnego

Podstawowe zalety nagrzewania indukcyjnego:

- szybkość nagrzewania jest przeciętnie kilkakrotnie większa niż w metodzie płomieniowej,
- dzięki krótkim czasom nagrzewania straty na utlenianie metalu są praktycznie pomijalne,
- brak bezpośredniego styku wsadu ze źródłami energii ułatwia mechanizację i automatyzację nagrzewania,
- nagrzewnice indukcyjne mają kilkakrotnie mniejsze rozmiary niż piece płomieniowe o takiej samej przepływności (kg/h).

Podstawowa wada nagrzewania indukcyjnego:

- mała uniwersalność – zasilanie musi być dobrane do nagrzewanego wsadu.

Ważniejsze zastosowania grzejnictwa indukcyjnego

- nagrzewanie w obróbce plastycznej,
- nagrzewanie w obróbce cieplnej: hartowanie, odpuszczanie, wyżarzanie,
- topienie,
- lutowanie i zgrzewanie indukcyjne,
- niskotemperaturowe nagrzewanie wielkich powierzchni oraz rurociągów długodystansowych,
- nagrzewanie zbiorników w przemyśle chemicznym,
- nagrzewanie w procesach suszenia i wypalania lakierów,
- wygrzewanie w procesach odgazowywania (przy produkcji lamp elektronowych, lamp kineskopowych, wyłączników próżniowych itp.),
- topienie lewitacyjne,
- kuchnie indukcyjne.

Dziękuję za uwagę