!Energoelektronika
1 Wykład 6
piątek, 18 października 2019 10:17

Wykład 6

Energoelektronika – sterowniki prądu przemiennego

dr inż. Grzegorz Tarchała

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Plan wykładów

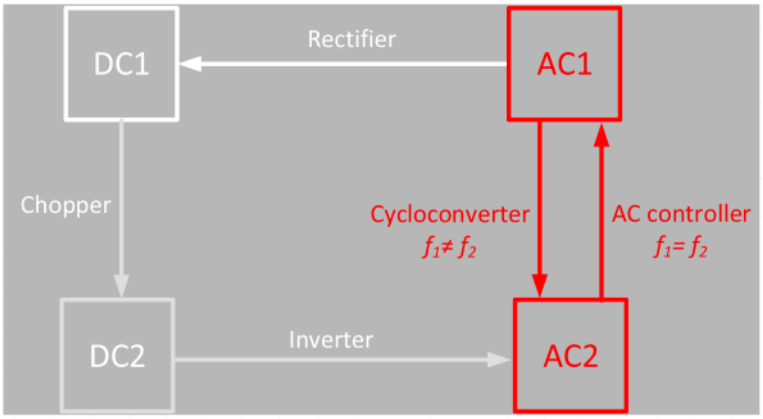
- Sterowniki 1-fazowy
- Sterownik 3-fazowy
  - Z przewodem neutralnym
  - Bez przewodu neutralnego
- Cyklokonwertory (bezpośrednie przemienniki częstotliwości z komutacją zewnętrzną)

4

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Cztery rodzaje konwersji



- brak buforów pośrednich

Sterowniki prądu przemiennego

Zastosowanie sterowników prądu przemiennego

Zastosowanie sterowników AC:

- Przemysłowe i domowe ogrzewanie, grzanie indukcyjne
- Sterowanie oświetleniem (ściemniacze)
- Sterowanie wartością skuteczną napięcia w układach zmiany liczby odczepów transformatora
- Układy łagodnego rozruchu silników indukcyjnych (ang. soft-start)

- soft-start to w rzeczywistości sterowniki trójfazowe

Sterowniki prądu przemiennego

Klasyfikacja sterowników prądu przemiennego

1. Klasyfikacja ze względu na liczbę faz wyjściowych:

- 1-fazowe
- 3-fazowe

2. Klasyfikacja ze względu na rodzaj sterowania:

- Sterowanie fazowe
- Sterowanie impulsowe (integracyjne)
- Sterowanie z modulacją PWM

3. Klasyfikacja ze względu na rodzaj konwersji:

- Regulatory napięcia przemiennego AC
- Bezpośrednie przemienniki częstotliwości z komutacją naturalną (cyklokonwertory)
- Bezpośrednie przemienniki częstotliwości z komutacją wewnętrzną

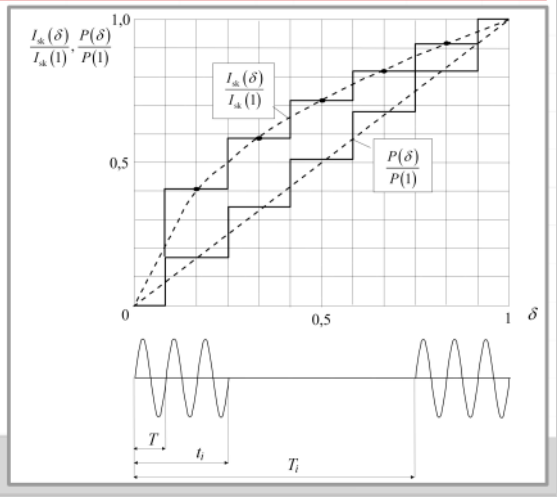
- pytanie na egzaminie inżynierskim: jaka jest różnica między przemiennikiem częstotliwości bezpośrednim a pośrednim?
  - odp: bezpośredni to układ bezpośrednio zmieniający częstotliwość z jednej na drugą, pośredni: układ prostownik + falownik
- falownik - zasilany napięciem stałym; przemiennik - prostownik + falownik;

Sterowniki prądu przemiennego

Sterowniki impulsowe

Sterowanie impulsowe (sterowanie integracyjne)

$$\delta = \frac{t_i}{T_i}$$

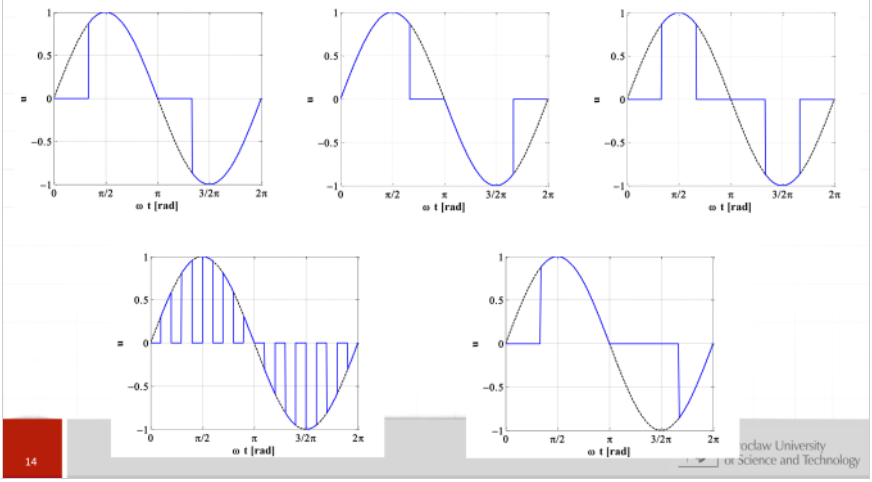


12

- sterowanie najprostsze, gdy stała czasowa jest duża (woda w czajniku)
- nie skupiamy się na tym, warto wiedzieć że jest taka możliwość

Sterowniki prądu przemiennego

Rodzaje sterowania fazowego

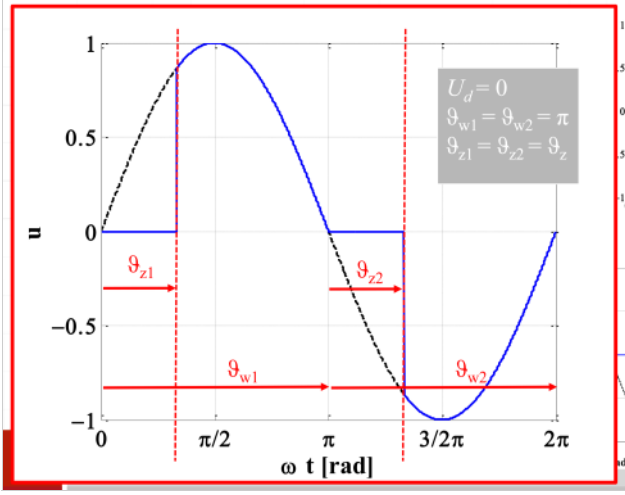


14

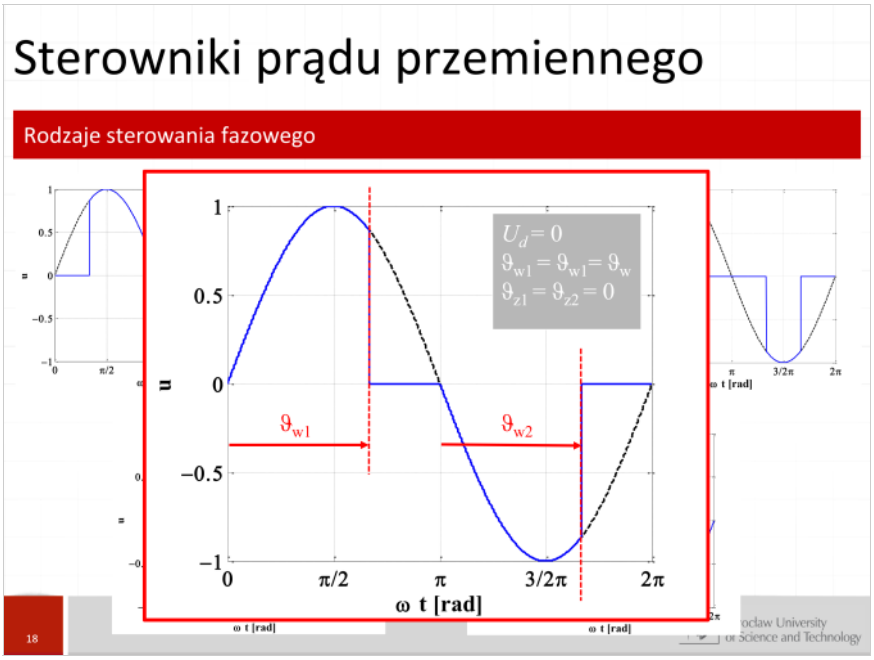
- najprostsze rozwiązanie: poczekać do odpowiedniej chwili i załączyć

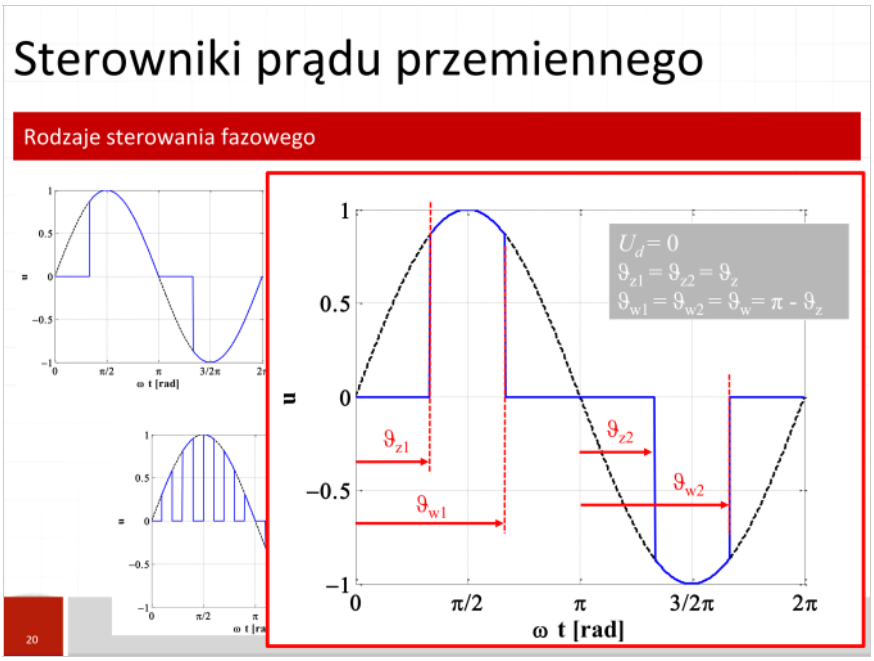
Sterowniki prądu przemiennego

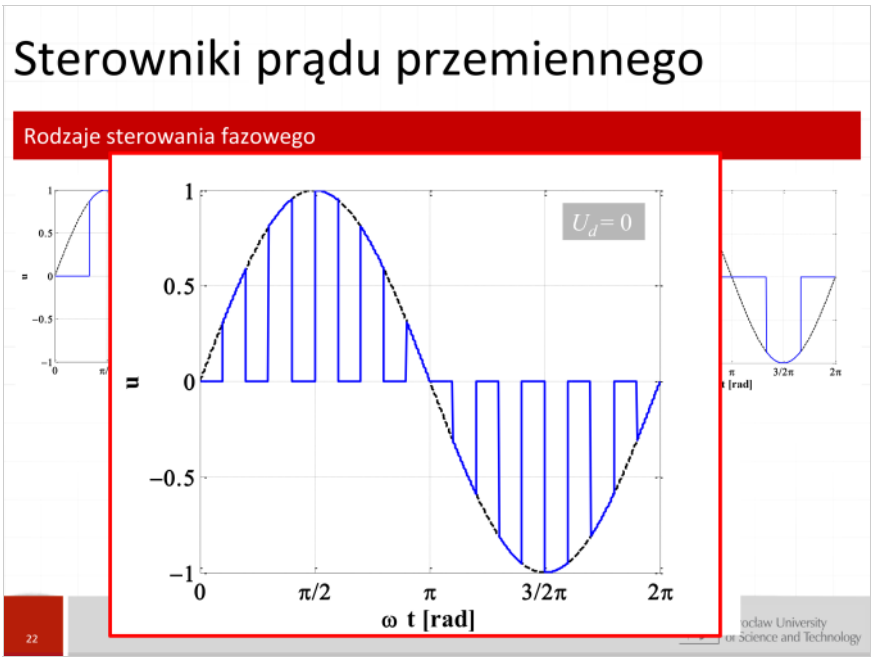
Rodzaje sterowania fazowego



- powinna być symetria (wartość średnia równa 0)
- możemy zmieniać kąt od 0 do 180 stopni
- stosuje się tyrystory



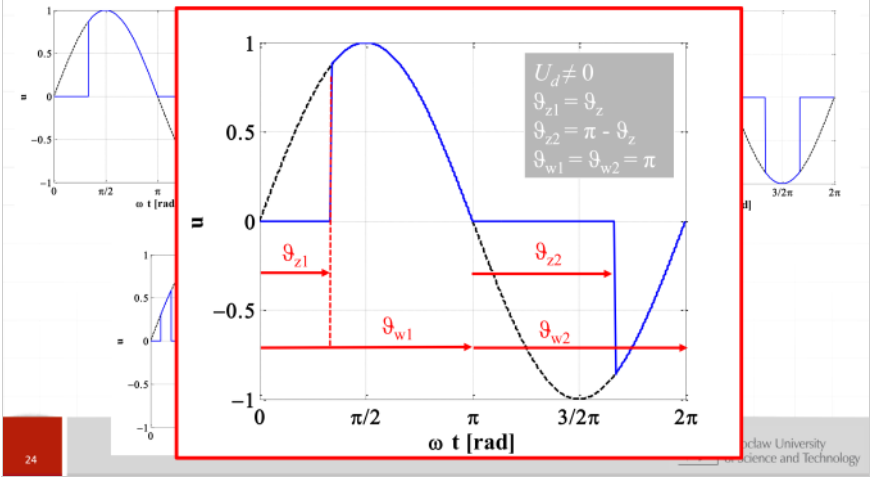




- modulacja PWM - nie będziemy o tym mówić;

Sterowniki prądu przemiennego

Rodzaje sterowania fazowego



- pojawia się składowa stała, niekorzystne rozwiązanie

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, schemat blokowy

Prądy zasilający i prąd obciążenia:

$$i_s = i_0 = i_{T1} + i_{T2}$$

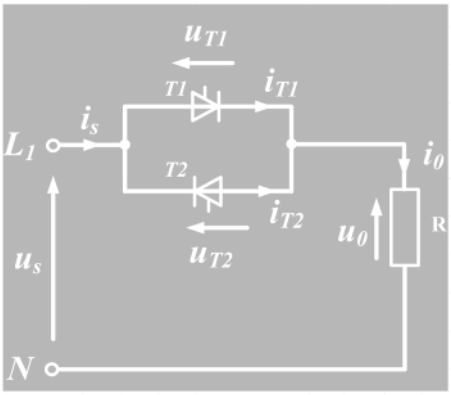
Napięcie obciążenia:

$$u_0 = R i_0$$

Napięcie zasilające:

$$u_s = U_m \sin(\omega t),$$

$$U_m = \sqrt{2} U$$



- wcielenie idei powyżej w życie;
- nie załączymy dwóch tyrystorów naraz
- prąd zasilający i prąd obciążenia jest równy sumie dwóch prądów

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, schemat blokowy

Prądy zasilający i obciążenia:

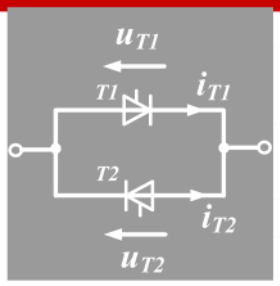
$$i_s = i_0 = i_T$$

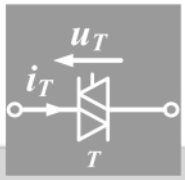
Napięcia tyrystorów i triaka:

$$u_T = u_{T1} = u_{T2} = u_s - u_0$$

Napięcie zasilające:

$$u_s = U_m \sin(\omega t)$$





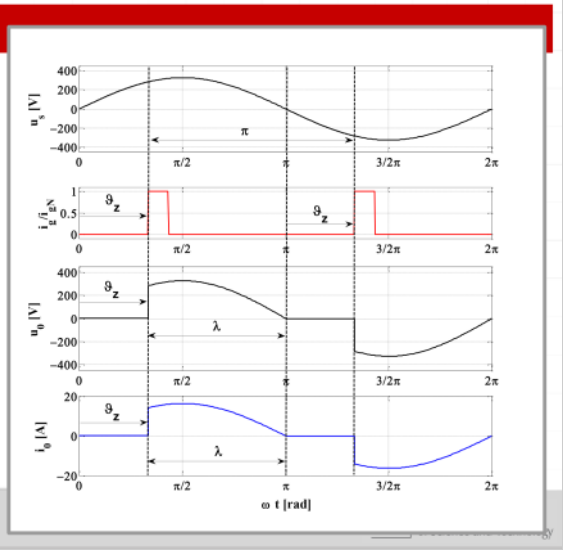
TRIAC – TRIode for Alternating Current

Sterowniki prądu przemiennego

Obciążenie typu R

Kąt załączenia – ϑ_z

Kąt przewodzenia – λ



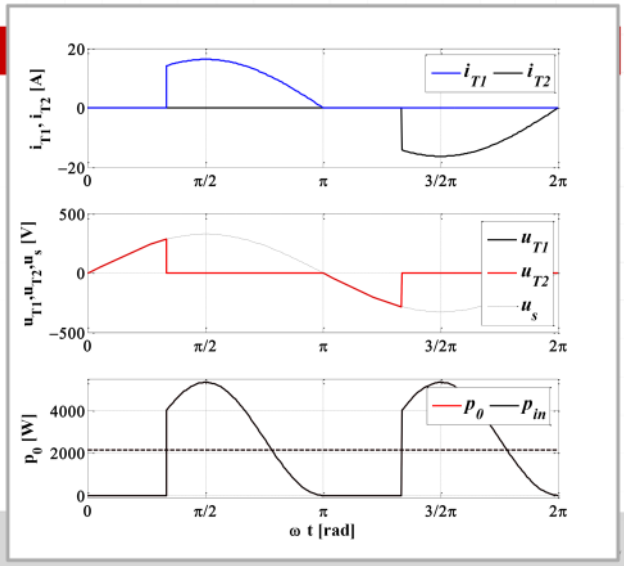
Sterowniki prądu przemiennego

Obciążenie typu R

Prądy tyrystorów

Napięcia tyrystorów

Moc czynna (chwilowa)



Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, napięcie

Napięcie zasilające:

$$u_s = U_m \sin(\omega t)$$

Napięcie obciążenia:

$$u_0 = U_m \sin(\omega t),\ \left(\vartheta_z \le \omega t < \pi\right) \vee \left(\vartheta_z + \pi \le \omega t < 2\pi\right)$$

Wartość skuteczna napięcia:

$$U_{0,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\vartheta_z}^{\pi} \left(U_m \sin(\omega t)\right)^2 \mathrm{d}\omega t} = U_m \sqrt{\frac{\Delta(\vartheta_z)}{\pi}},$$

$$\Delta(\vartheta_z) = \pi - \vartheta_z + \frac{1}{2}\sin 2\vartheta_z$$

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, napięcie

Maksymalna wartość napięcia (dla ϑ_z=0):

$$U_{0,rms,max} = U$$

Wartość średnia napięcia pół-okresowego:

$$U_{0,\text{mean}} = \frac{1}{\pi}\int_{\vartheta_z}^{\pi}\sqrt{2}U\sin(\omega t)\mathrm{d}\omega t = U\frac{\sqrt{2}}{2\pi}\left(1+\cos\vartheta_z\right)$$

Maksymalna wartość $U_{0,\,mean}$ (dla ϑ_z=0)

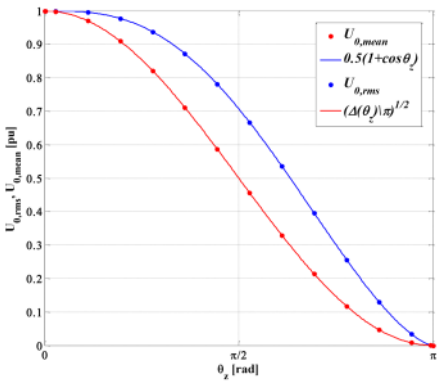
$$U_{0,\text{mean,max}} = U\frac{\sqrt{2}}{\pi} \approx 0.45U$$

Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Charakterystyki sterowania dla obciążenia typu R, napięcia

Układ względny:
Baza = maksymalna wartość



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, prąd obciążenia

Prąd obciążenia:

$$i_0 = \frac{u_0}{R}$$

$$i_0 = \frac{U_m}{R}\sin(\omega t),\ \left(\vartheta_z \le \omega t < \pi\right) \vee \left(\vartheta_z + \pi \le \omega t < 2\pi\right)$$

Wartość skuteczna prądu:

$$I_{0,rms} = \frac{U_{0,rms}}{R} = \frac{U}{R}\sqrt{\frac{\Delta(\vartheta_z)}{\pi}},$$

Maksymalna wartość skuteczna prądu (dla ϑ_z=0):

$$I_{0,rms} = \frac{U_{0,rms,\max}}{R} = \frac{U}{R}$$

Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, prąd obciążenia

Prądy tyrystorów

$$i_{T1} = i_0,\ \left(\vartheta_z \le \omega t < \pi\right)$$

$$i_{T2} = i_0,\ \left(\vartheta_z + \pi \le \omega t < 2\pi\right)$$

Wartość średnia prądów:

$$I_{\mathrm{T1,mean}} = \frac{U_{0,\mathrm{mean}}}{R} = \frac{U}{R}\frac{\sqrt{2}}{2\pi}\left(1+\cos\vartheta_z\right),$$

$$I_{T2,mean} = -I_{T1,mean}$$

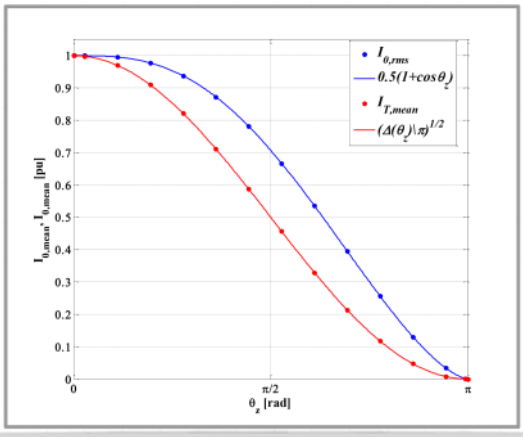
Maksymalna wartość prądu tyrystora T1 (dla ϑ_z=0):

$$I_{0,\mathrm{mean,max}} = \frac{U_{0,mean,max}}{R} = \frac{U}{R}\frac{\sqrt{2}}{\pi} \approx 0.45\frac{U}{R}$$

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Charakterystyki sterowania dla obciążenia typu R, prądy



Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, moc

Chwilowa moc czynna

$$p_0 = u_0 i_0$$

Moc czynna i bierna:

$$P_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} p_0 \mathrm{d}\omega t = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_0 i_0 \mathrm{d}\omega t$$

$$P_0 = S_0 = I_{0rms}U_{0,rms} = RI_{0,rms}^2 = \frac{U_{0,rms}^2}{R}$$

$$P_0 = \frac{U^2}{R}\frac{\Delta(\theta_z)}{\pi}, Q_0 = 0$$

Maksymalna moc czynna: $P_0 = \dfrac{U^2}{R}$

Chwilowa moc pobierana z sieci:

$$p_s = u_s i_s$$

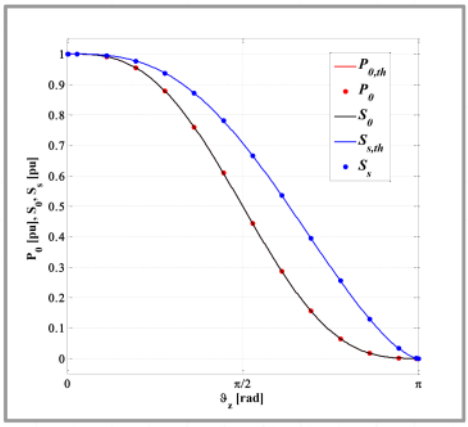
Moc pozorna pobierana z sieci:

$$S_s = UI_{s,rms} = UI_{0,rms}$$

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Charakterystyki sterowania dla obciążenia typu R, moce



Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, współczynnik mocy

Sprawność:

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + \Delta P}$$

$\Delta P = 0$ dla idealnego tyrystora

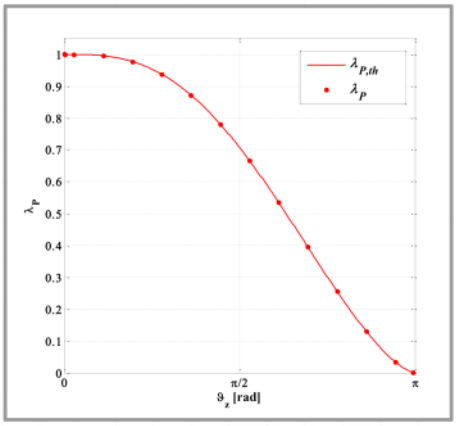
Współczynnik mocy:

$$\lambda_P = \frac{P_0 + \Delta P}{S_s}$$

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, współczynnik mocy



Wrocław University of Science and Technology

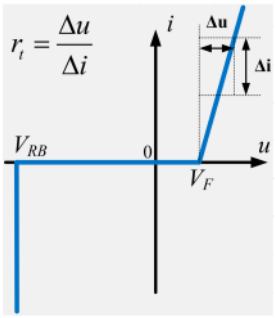
Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, straty mocy

Straty mocy:

$$\Delta P = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} u_{T1} i_{T1} \mathrm{d}\omega + \frac{1}{\pi}\int_{\pi}^{2\pi} u_{T2} i_{T2} \mathrm{d}\omega$$

$$\Delta P = 2V_f I_{T1,mean} + \cancel{\frac{1}{2} r_t I_{0,rms}^2}$$



Napięcie zasilające:

$$u_s = U_m \sin(\omega t)$$

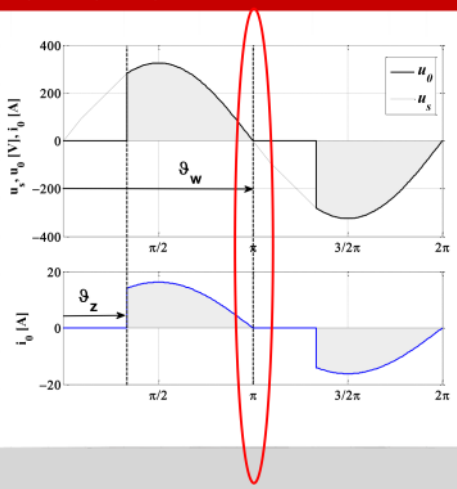
Napięcie obciążenia w przypadku spadku napięcia V_f:

$$u_0 = U_m \sin(\omega t) - V_f, \left(\vartheta_z \le \omega t < \vartheta_w\right) \vee \left(\vartheta_z + \pi \le \omega t < \vartheta_w + \pi\right)$$

Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

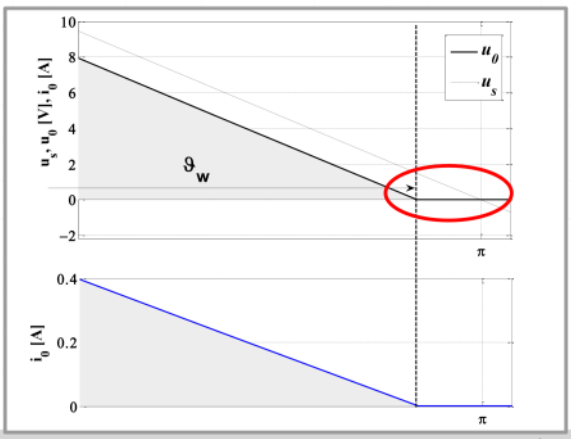
Sterownik 1-fazowy, straty mocy



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, straty mocy



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, straty mocy

Kąt wyłączenia: $u_0 = U_m \sin(\vartheta_w) - V_f = 0 \Rightarrow \vartheta_w = \arcsin\left(\frac{V_f}{U_m}\right)$

Wartość średnia napięcia:

$$U_{0,mean} = \frac{1}{2\pi}\int_{\vartheta_z}^{\vartheta_w} \sqrt{2}U\sin(\omega t)\mathrm{d}\omega t = \frac{1}{2\pi}\left(\sqrt{2}U(-\cos\vartheta_w + \cos\vartheta_z) - V_F(\vartheta_w - \vartheta_z)\right)$$

Wartość skuteczna:

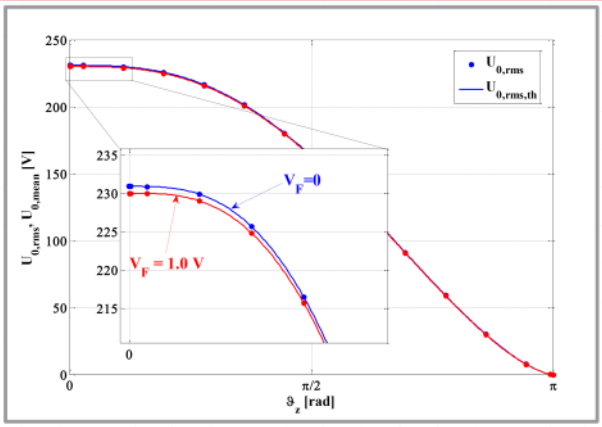
$$U_{0,\mathrm{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\vartheta_z}^{\vartheta_w}\left(\sqrt{2}U\sin(\omega t)\right)^2 \mathrm{d}\omega t} =$$

$$\sqrt{\frac{2}{\pi}\left(U^2\Delta(\vartheta_z,\vartheta_w) + \sqrt{2}UV_f\left(\cos\vartheta_w - \cos\vartheta_z\right) + \frac{1}{2}V_F^2\left(\vartheta_w - \vartheta_z\right)\right)}$$

$$\Delta(\vartheta_z,\vartheta_w) = -\frac{1}{2}\left(\left(\sin\vartheta_w\cos\vartheta_w - \sin\vartheta_z\cos\vartheta_z\right) - \left(\vartheta_w - \vartheta_z\right)\right)$$

Sterowniki prądu przemiennego

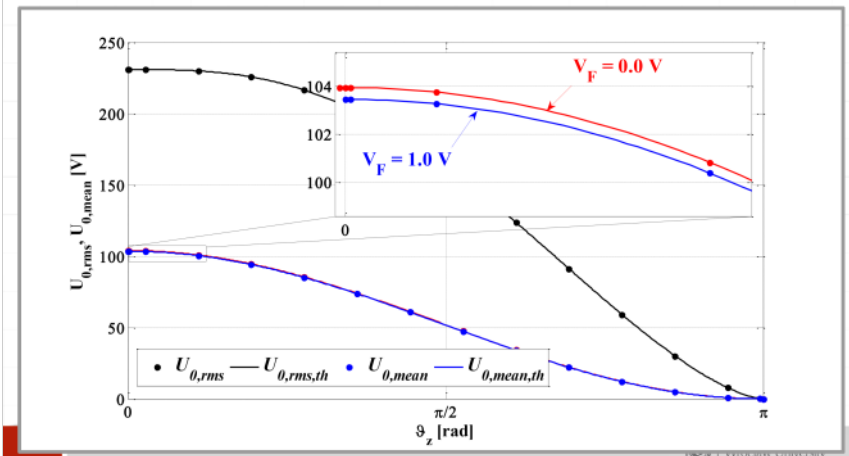
Sterownik 1-fazowy, straty mocy



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, straty mocy



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

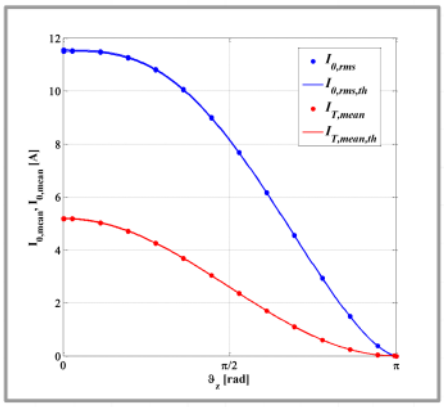
Sterownik 1-fazowy, straty mocy

Wartość skuteczna prądu

$$I_{0,rms} = \frac{U_{0,rms}}{R}$$

Wartość średnia prądu tyrystora

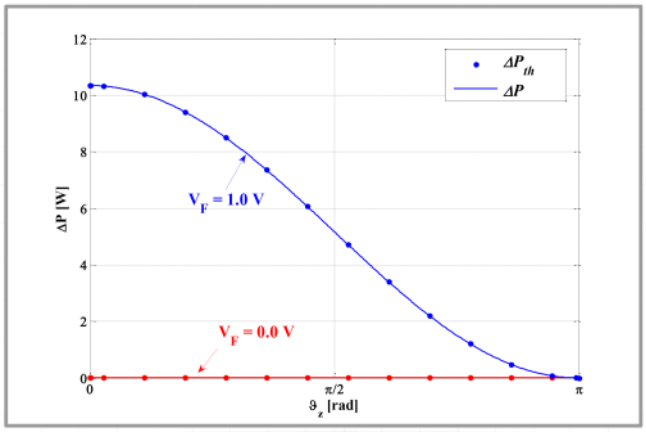
$$I_{T1,mean} = \frac{U_{0,mean}}{R}$$



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

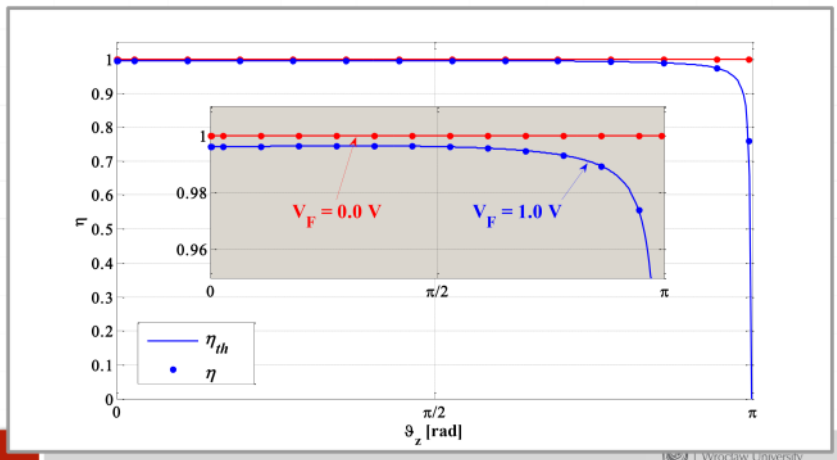
Sterownik 1-fazowy, straty mocy



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

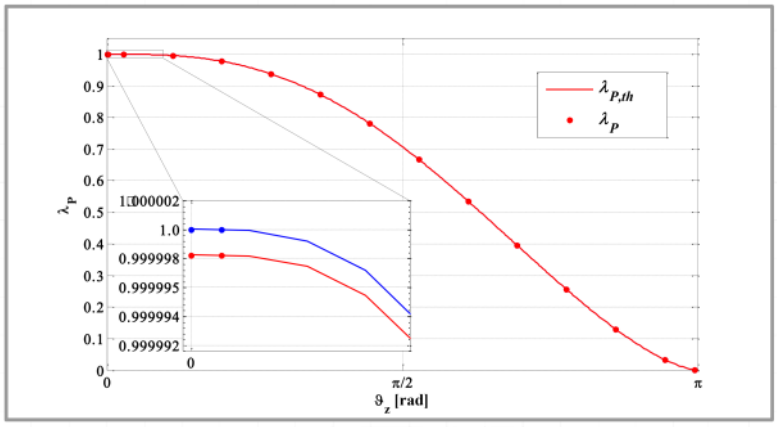
Sterownik 1-fazowy, sprawność



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

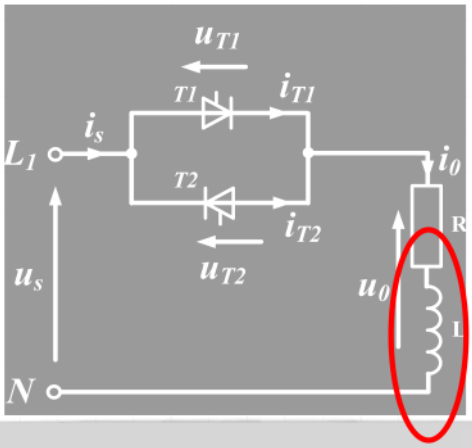
Sterownik 1-fazowy, współczynnik mocy



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

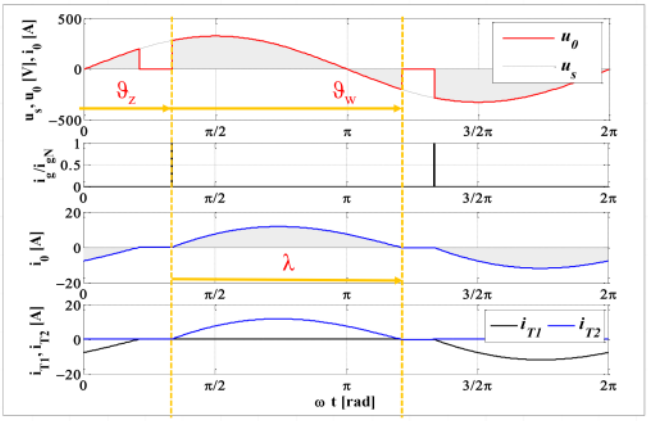
Sterownik 1-fazowy, obciążenie RL



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, obciążenie typu RL



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, obciążenie typu RL

$$u_s = u_L + u_R + \Delta u_T$$

$$U_m \sin(\omega t) = \underbrace{L\frac{\mathrm{d}i_0}{\mathrm{d}t} + Ri_0}_{u_0} + \Delta u_T$$

Napięcie obciążenia

$$u_0 = U_m \sin(\omega t) - \Delta u_T,\ \left(\vartheta_z \le \omega t < \vartheta_w\right) \vee \left(\vartheta_z + \pi \le \omega t < \vartheta_w + \pi\right)$$

Prąd obciążenia (dla idealnego tyrystora, Δu_T=0):

$$i_0 = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}\left(\sin\left(\omega t - \varphi\right) - \sin(\vartheta_z - \varphi)\mathrm{e}^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \vartheta_z)}\right),$$

$$\omega t \in \left(\vartheta_z, \vartheta_w\right),\ \vartheta_z \in \left(\vartheta_{cr}, \pi\right)$$

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, obciążenie typu RL, kąt graniczny

$$\vartheta_z \in \left(\vartheta_{cr}, \pi\right)$$

Kąt graniczny

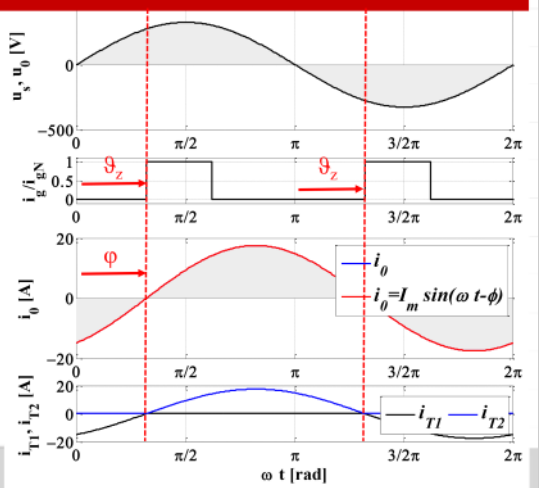
$$\vartheta_{cr} = \varphi$$

$$\Downarrow$$

$$\vartheta_z \in \left(\varphi, \pi\right)$$

Kąt obciążenia

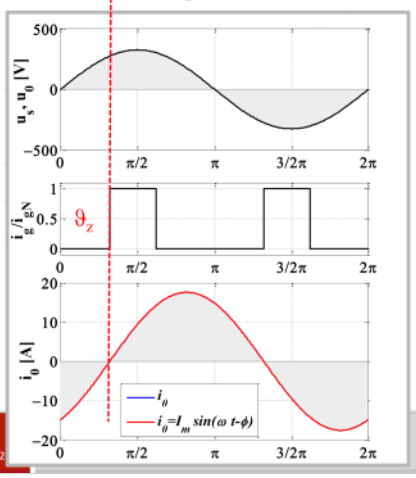
$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$



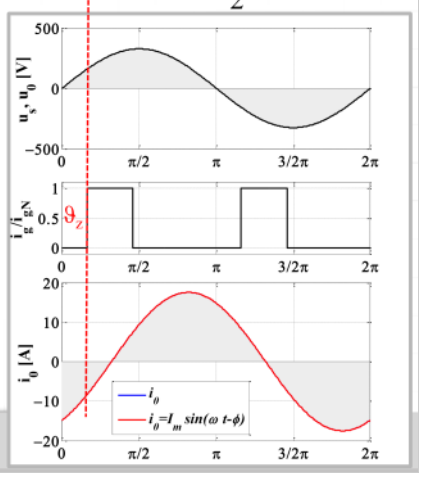
Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, obciążenie typu RL, kąt graniczny

$$\vartheta_z = \varphi$$



$$\vartheta_z = \frac{1}{2}\varphi$$



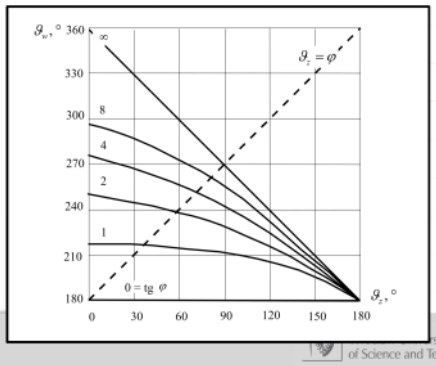
Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 1-fazowy, obciążenie typu RL, kąt wyłączenia

Prąd obciążenia (dla tyrystora idealnego, Δu_T=0):

$$i_0 = \frac{U_m}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}\left(\sin(\omega t-\varphi)-\sin(\vartheta_z-\varphi)e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t-\vartheta_z)}\right),$$

$$\omega t \in (\vartheta_z, \vartheta_w) \quad \vartheta_z \in (\vartheta_{cr}, \pi)$$



Kąt wyłączenia:

$$i_0 = 0$$

$$\omega t = \vartheta_w$$

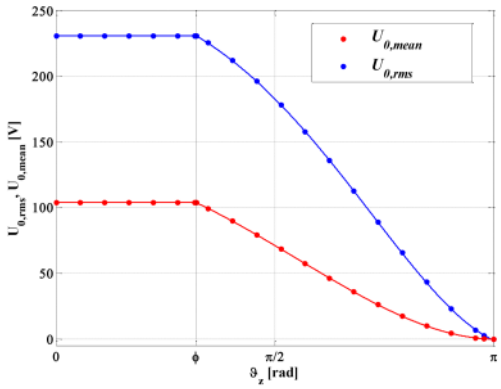
$$e^{-\frac{R}{\omega L}(\vartheta_w-\vartheta_z)} = \frac{\sin(\vartheta_w-\varphi)}{\sin(\vartheta_z-\varphi)},$$

$$\vartheta_w = f(\vartheta_z, \varphi)$$

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

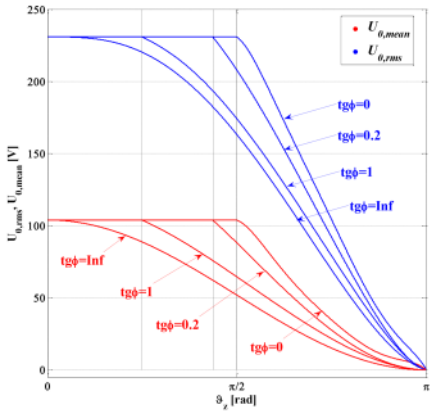
Charakterystyki sterowania dla obciążenia typu RL, napięcia



Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

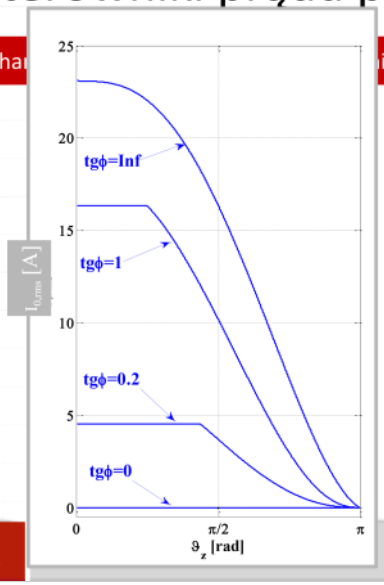
Charakterystyki sterowania dla obciążenia typu RL, napięcia

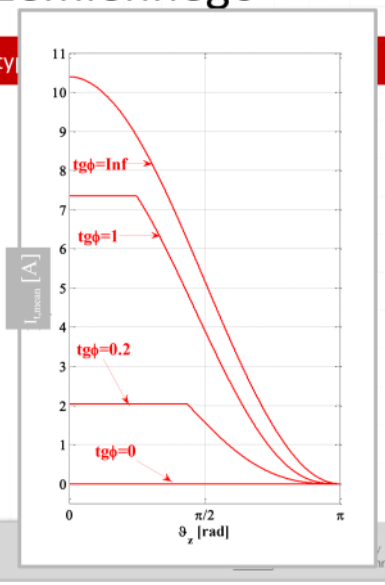


Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Char ia ty

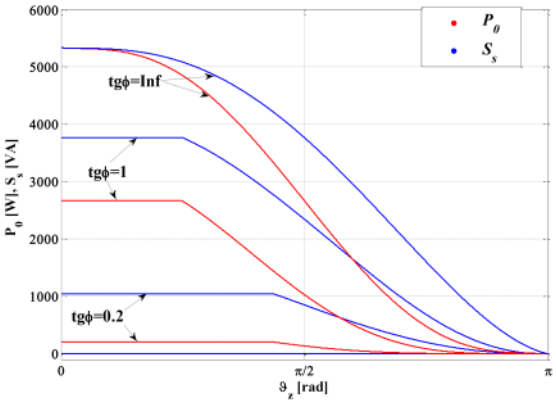




90

Sterowniki prądu przemiennego

Charakterystyki sterowania dla obciążenia typu RL, moce

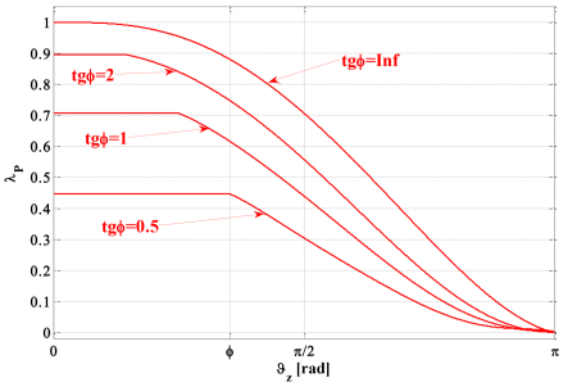


92

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Charakterystyki sterowania dla obciążenia typu RL, współczynnik mocy

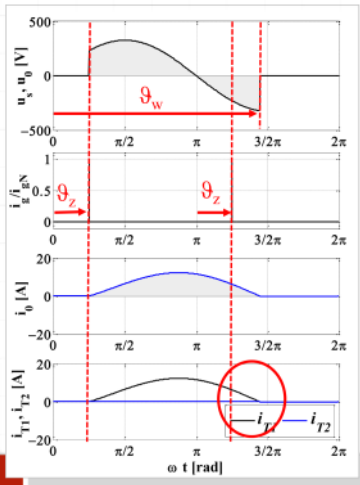


94

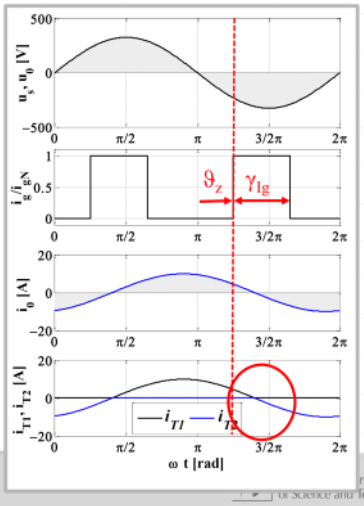
Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Krótkie prądy bramkowe

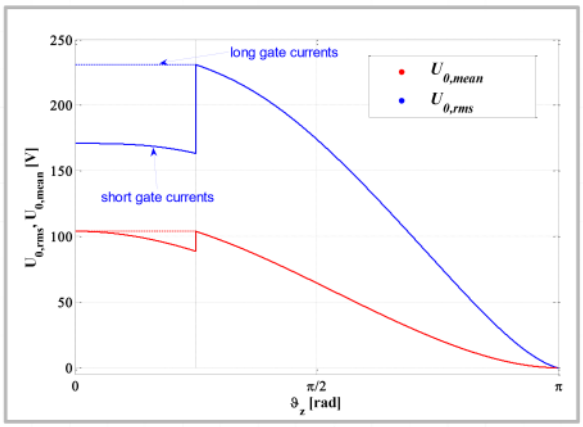


Długie prądy bramkowe



Sterowniki prądu przemiennego

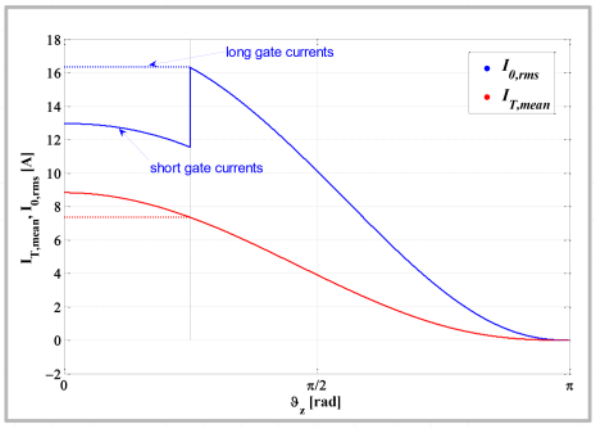
Wpływ długości prądów bramkowych, charakterystyki sterowania



Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Wpływ długości prądów bramkowych, charakterystyki sterowania



Wroclaw University of Science and Technology

Dziękuję za uwagę!

!Energoelektronika
1 Wykład 7

piątek, 18 października 2019 10:19

Wykład 7

Energoelektronika – sterowniki prądu przemiennego, cyklokonwertory

dr inż. Grzegorz Tarchała

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Plan wykładu

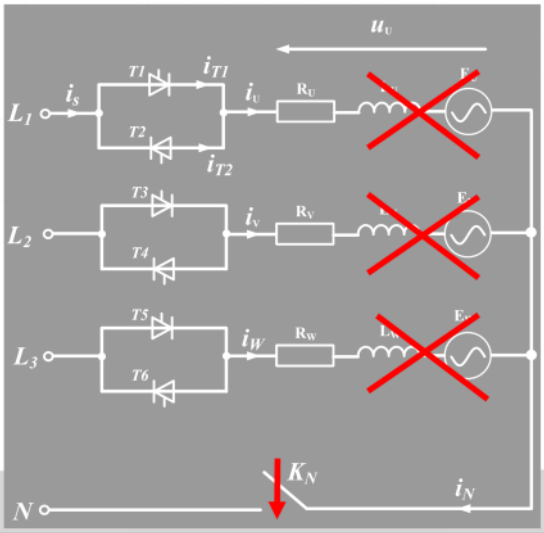
- 3-fazowe sterowniki prądu przemiennego
  - Z przewodem neutralnym
  - Bez przewodu neutralnego
  - Układ łagodnego rozruchu silników indukcyjnych
- Cyklokonwertory

4

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

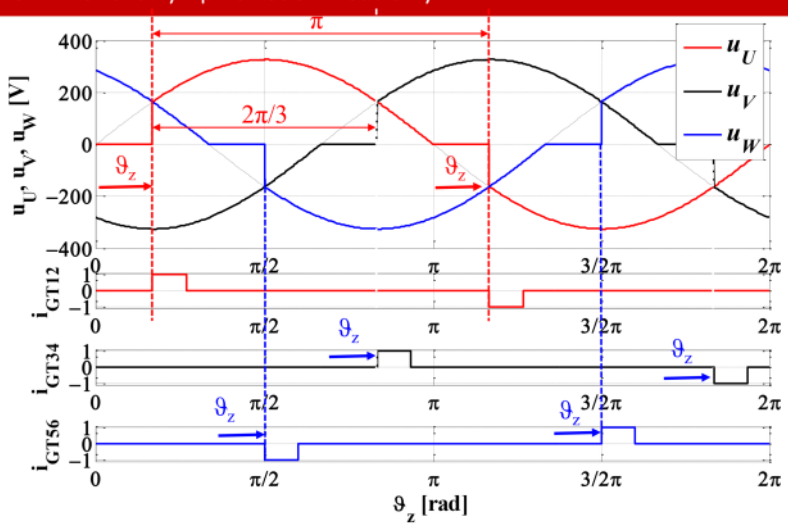
Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym



Wroclaw University of Science and Technology

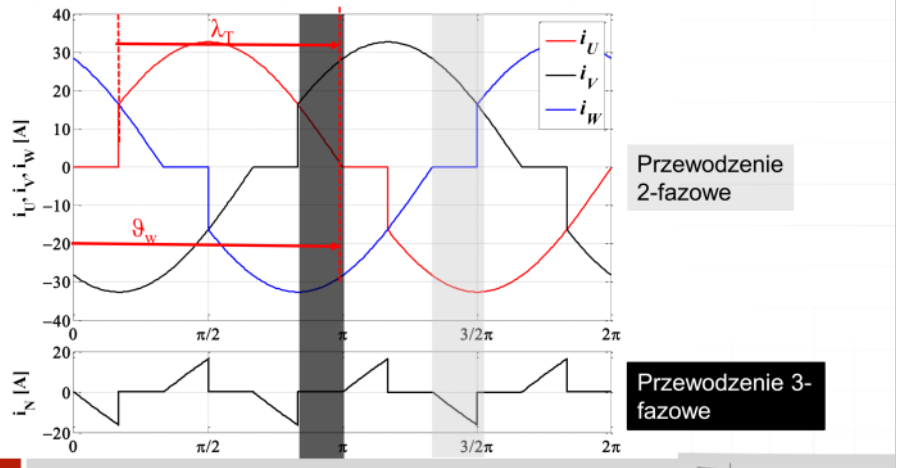
Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym



Sterowniki prądu przemiennego $\vartheta_z \in \left(0, \frac{\pi}{3}\right)$

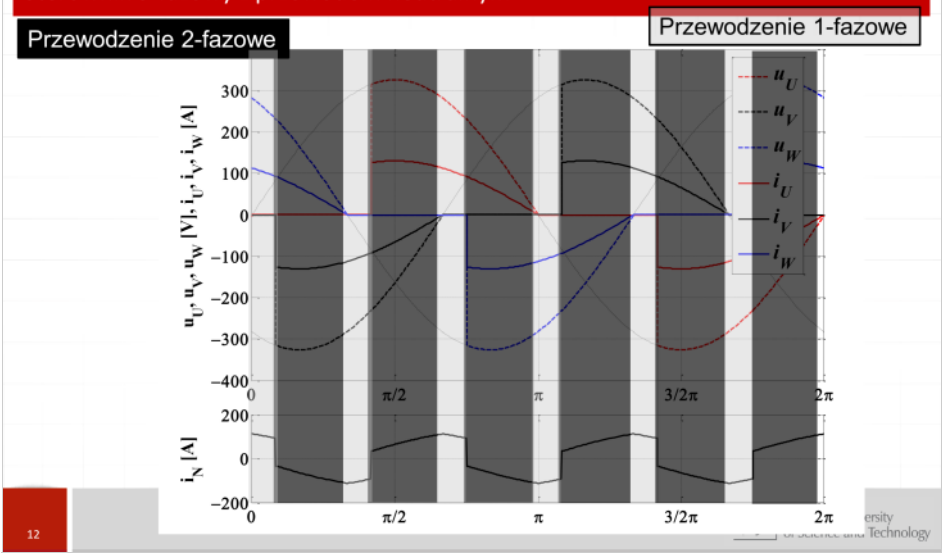
Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym



Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego $\vartheta_z \in \left(\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right)$

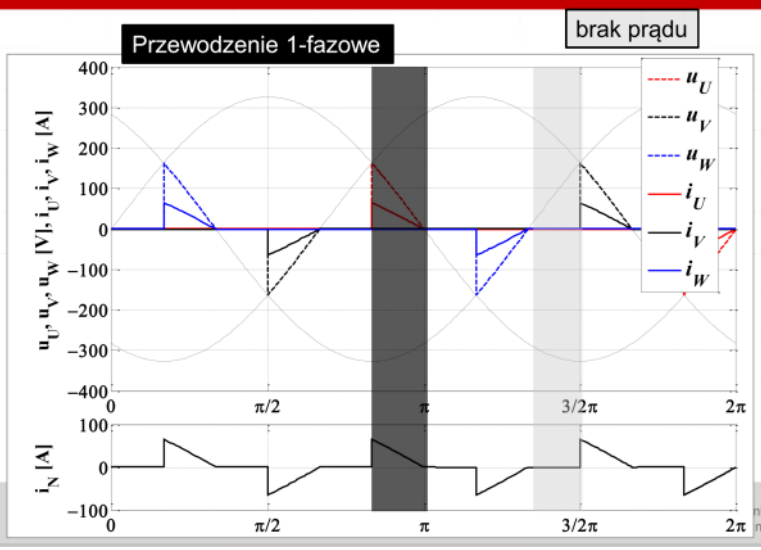
Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym



- kiedyś zakładano, że w przewodzie neutralnym płyną małe prądy
- kąt sterowania 0 - 3pi
- zaznaczony obszar: przewodzenie na przemian dwufazowe lub trójfazowe

Sterowniki prądu przemiennego $\vartheta_z \in \left(\frac{2\pi}{3}, 2\pi\right)$

Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym



- dla większych kątów sterujących mamy przewodzenie jednofazowe - im większy kąt, tym mniej faz

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym

Napięcie średnie jedno-połówkowe

$$U_{0,\text{mean},3\text{ph}} = \frac{1}{2\pi}\int_{\vartheta_z}^{\pi}\sqrt{2}U\sin(\omega t)\mathrm{d}\omega t = U\frac{\sqrt{2}}{2\pi}(1+\cos\vartheta_z) = U_{0,\text{mean},1\text{ph}}$$

Napięcie skuteczne:

$$U_{0,rms,3ph} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\vartheta_z}^{\pi}\left(\sqrt{2}U\sin(\omega t)\right)^2\mathrm{d}\omega t} = U\sqrt{\frac{\Delta(\vartheta_z)}{\pi}} = U_{0,rms,1ph},$$

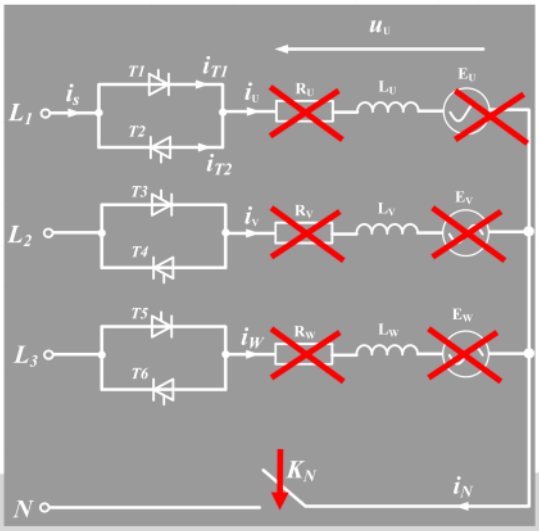
$$\Delta(\vartheta_z) = \pi - \vartheta_z + \frac{1}{2}\sin 2\vartheta_z$$

Moc czynna $\quad P_{0,3\text{ph}} = 3U_{0,\text{rms},3\text{ph}}I_{0,\text{rms},3\text{ph}} = 3\frac{U}{R}\frac{\Delta(\vartheta_z)}{\pi} = 3P_{0,1ph}$

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym, obciążenie typu L



Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym, obciążenie typu L

1. region	2. region	3. region	4. region
$0 < \vartheta_z < \pi/2$	$\pi/2 < \vartheta_z < 2/3\pi$	$2/3\pi < \vartheta_z < 5/6\pi$	$5/6\pi < \vartheta_z < \pi$
Ciągłe prądy i napięcia obciążenia, stała wartość średnia i skuteczna, zerowy prąd przewodu neutralnego	Przewodzenie 2- lub 3-fazowe, niezerowy prąd w przewodzie neutralnym	Przewodzenie 1- lub 2- fazowe, niezerowy prąd w przewodzie neutralnym	Przewodzenie 1-fazowe lub brak przewodzenia, niezerowym prąd w przewodzie neutralnym

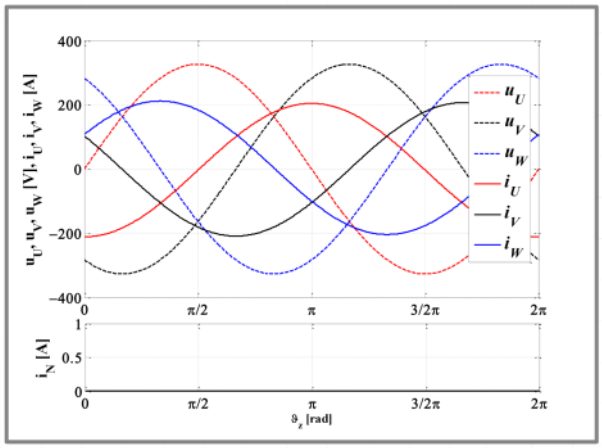
Sterowniki prądu przemiennego $0 < \vartheta_z < \pi/2$

Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym, obciążenie typu L

Prąd obciążenia:

$$i_u = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_m = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L}$$



Przewodzenie 3-fazowe

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego $\pi/2 < \vartheta_z < 2/3\pi$

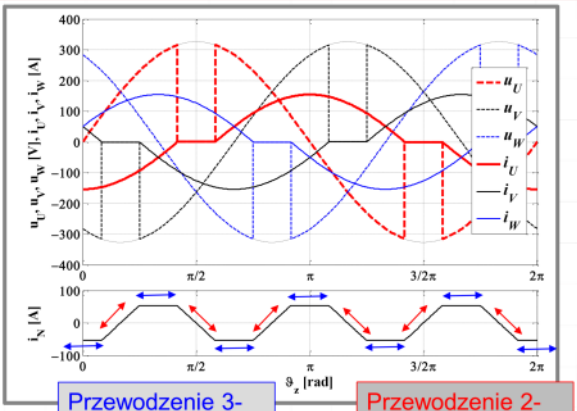
Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym

Prąd obciążenia

$$i_u = I_m(\cos\vartheta_z - \cos\omega t)$$

$$I_m = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L}$$

$$\omega t \in (\vartheta_z, \vartheta_w)$$



Przewodzenie 3-fazowe

Przewodzenie 2-fazowe

Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

$2/3\pi < \vartheta_z < 5/6\pi$

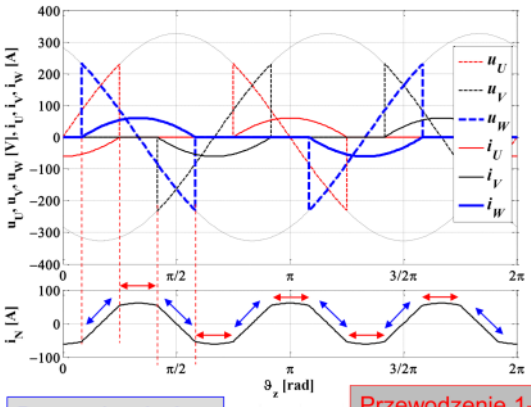
Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym

Prąd obciążenia:

$$i_u = I_m\left(\cos\vartheta_z - \cos\omega t\right)$$

$$I_m = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L}$$

$$\omega t \in \left(\vartheta_z, \vartheta_w\right)$$



Przewodzenie 2-fazowe

Przewodzenie 1-fazowe

Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

$5/6\pi < \vartheta_z < \pi$

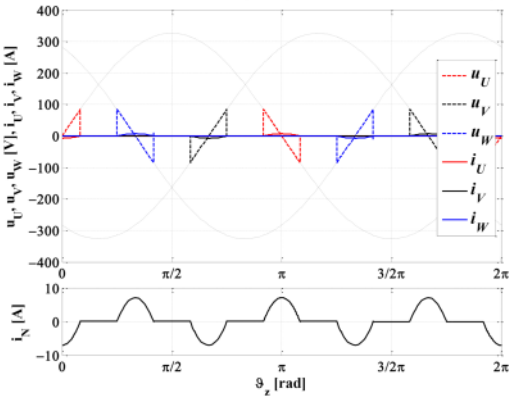
Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym

Prąd obciążenia:

$$i_u = I_m\left(\cos\vartheta_z - \cos\omega t\right)$$

$$I_m = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L}$$

$$\omega t \in \left(\vartheta_z, \vartheta_w\right)$$



Przewodzenie 1-fazowe

Brak przewodzenia

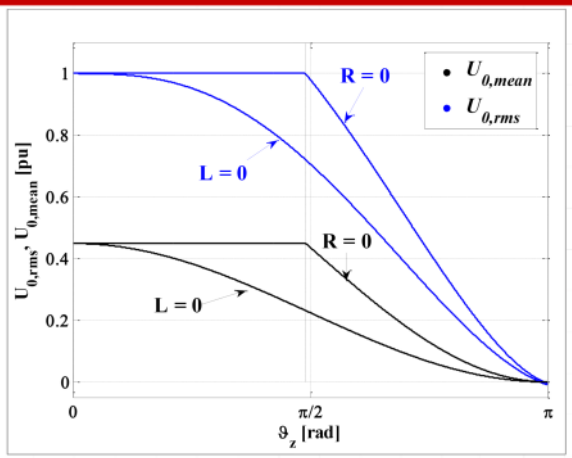
Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym - charakterystyki

Wartość bazowa

$$U_b = \max(U_{0,rms})$$



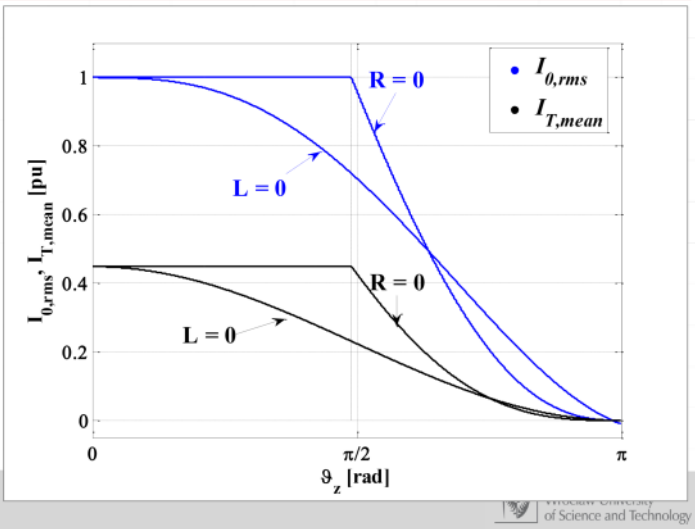
Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym - charakterystyki

Wartość bazowa

$$I_b = \max(I_{0,rms})$$



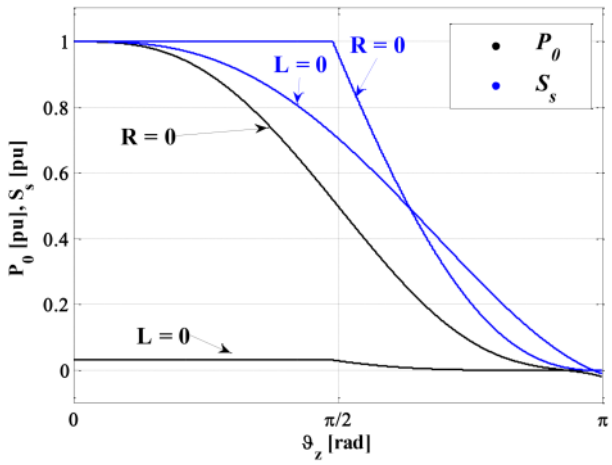
of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym - charakterystyki

Wartość bazowa

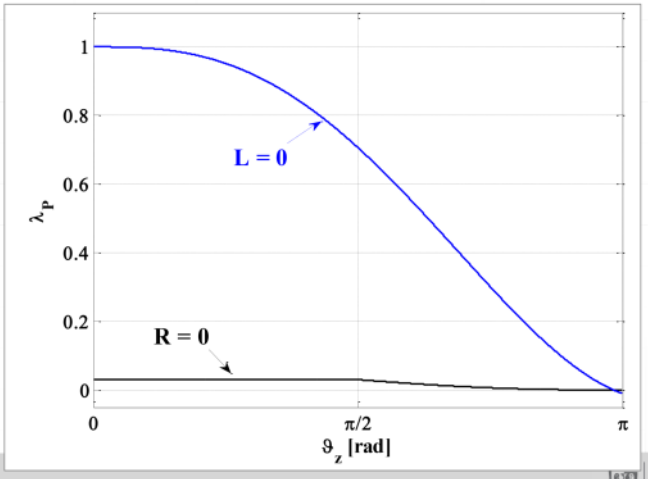
$$S_b = \max(S_s)$$



Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

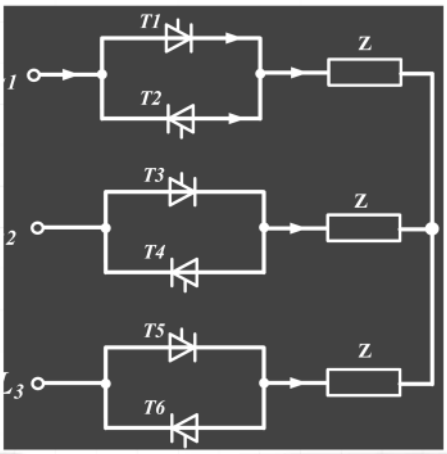
Sterownik 3-fazowy z przewodem neutralnym - charakterystyki

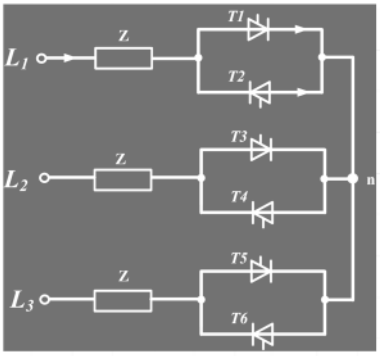


Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego, połączenie w gwiazdę

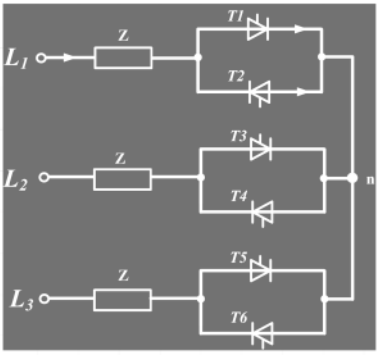


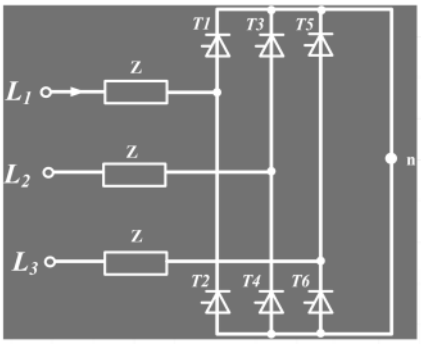


Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego

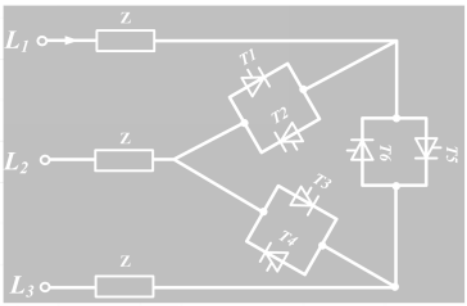


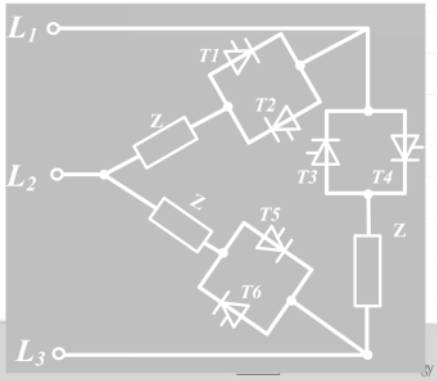


Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego, połączenie w trójkąt

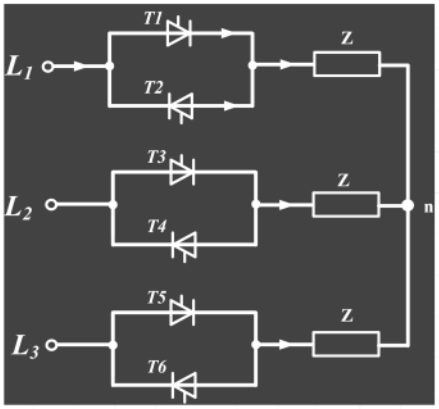




Sterowniki prądu przemiennego

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego – połączenie w gwiazdę

Liczba tyrystorów	Napięcie obciążenia
3 tyrystory załączone	Napięcie fazowe - u_{L1}, u_{L2}, u_{L3}
2 tyrystory załączone	Połowa napięcia międzyfazowego $u_{L12}/2$, $u_{L13}/2$, $u_{L23}/2$,
1 tyrystor załączony	0



Wrocław University of Science and Technology

- aby płynął prąd, muszą być załączone co najmniej 2 tyrystory

Sterowniki prądu przemiennego

Dzielnik napięcia

$$(\text{for } Z_U = Z_V = Z)$$

$$u_{L12} = u_{L1n} + u_{nL2} = 2u_Z$$

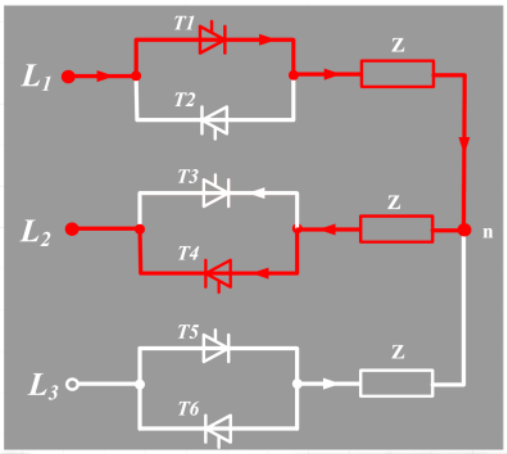
$$u_U = u_{L1n}$$

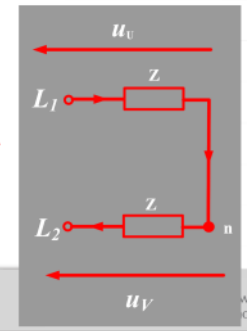
$$u_V = -u_{nL2}$$

$$\Downarrow$$

$$u_U = \frac{1}{2}u_{L12}$$

$$u_V = -\frac{1}{2}u_{L12}$$



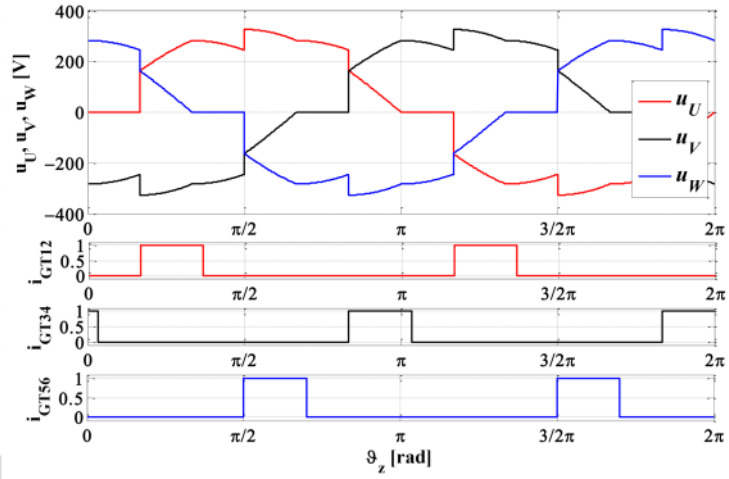


w University
ce and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

$$0 < \vartheta_z < \pi/3$$

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego – połączenie w gwiazdę - R

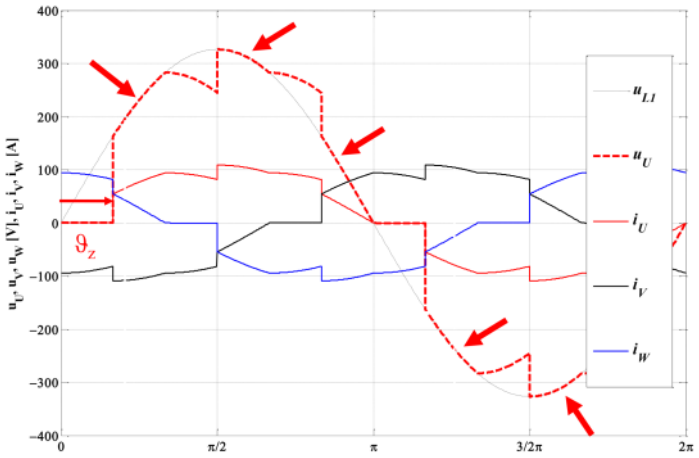


Wrocław University
of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

$0 < \vartheta_z < \pi/3$

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego – połączenie w gwiazdę - R

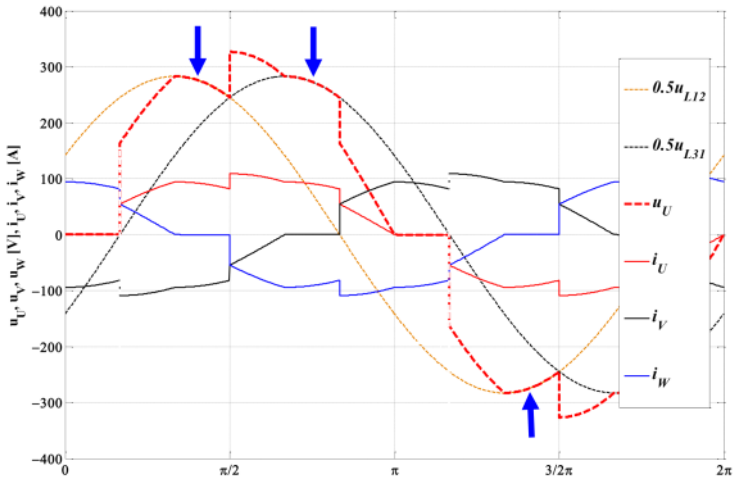


Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

$0 < \vartheta_z < \pi/3$

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego – połączenie w gwiazdę - R



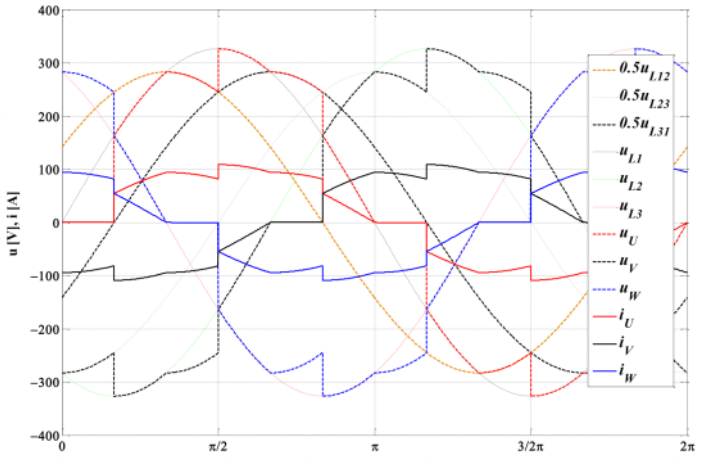
Wrocław University of Science and Technology

- czerwone strzałki - napięcie fazowe

Sterowniki prądu przemiennego

$0 < \vartheta_z < \pi/3$

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego – połączenie w gwiazdę - R

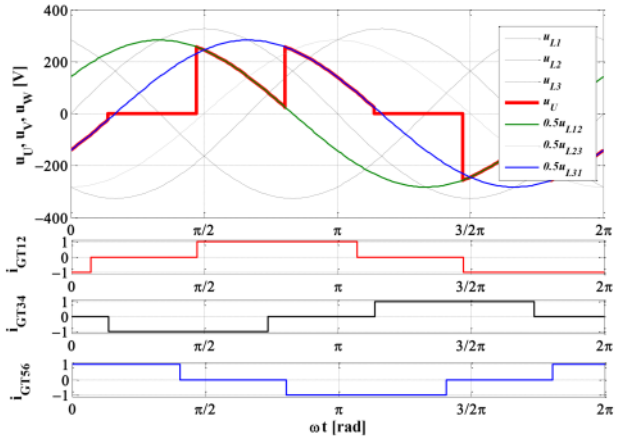


Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

$\pi/3 < \vartheta_z < \pi/2$

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego – połączenie w gwiazdę - R

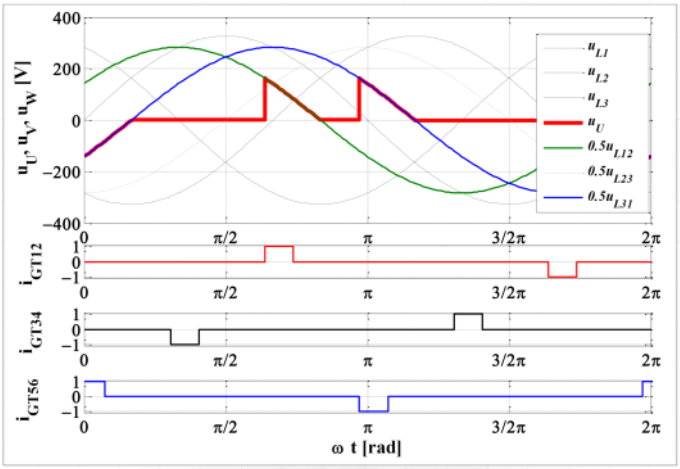


Wroclaw University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

$\pi/2 < \vartheta_z < 5\pi/6$

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego – połączenie w gwiazdę - R

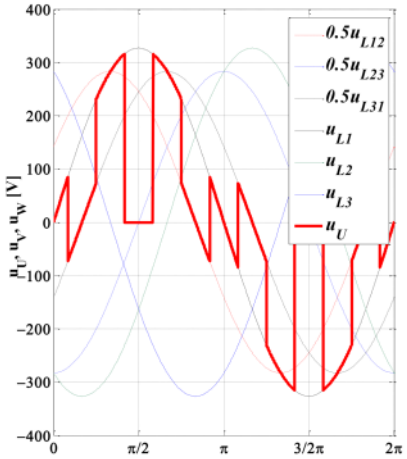


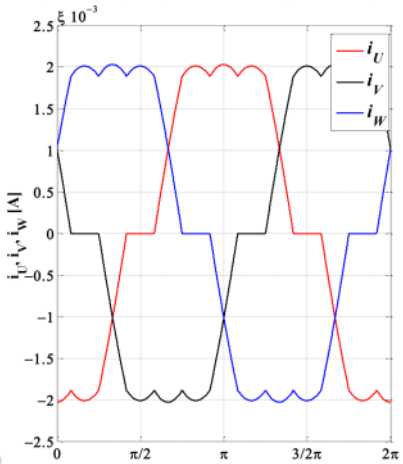
Wrocław University of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

1. region: $\pi/2 < \vartheta_z < 2\pi/3$

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego – połączenie w gwiazdę - L





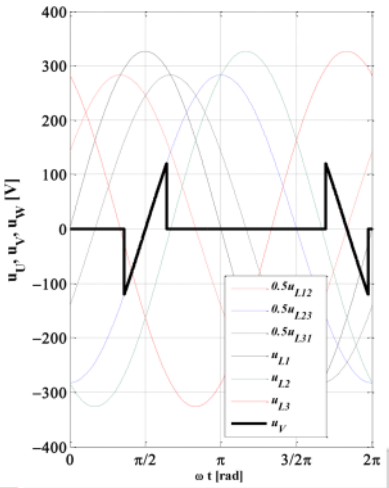
Wrocław University of Science and Technology

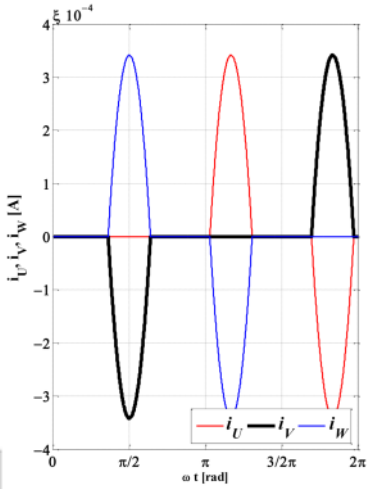
- te "brzuszki" to problem dla sieci zasilającej

Sterowniki prądu przemiennego

2. region: $2\pi/3 < \vartheta_z < 5\pi/6$

Sterownik 3-fazowy bez przewodu neutralnego – połączenie w gwiazdę - L



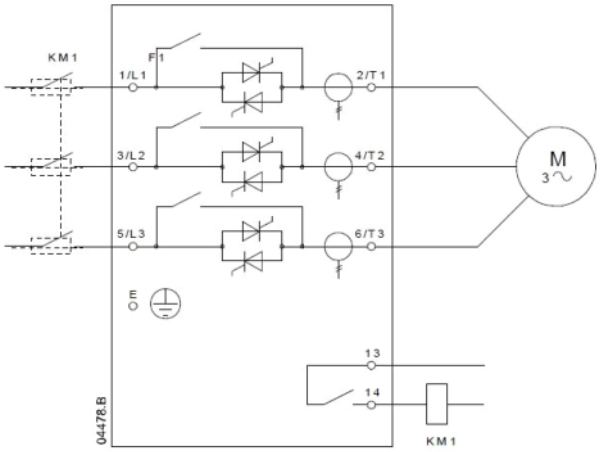


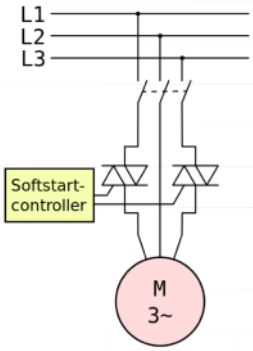
Sterowniki prądu przemiennego

Soft-start, układ łagodnego rozruchu silników indukcyjnych

Sterowniki prądu przemiennego

Soft-start

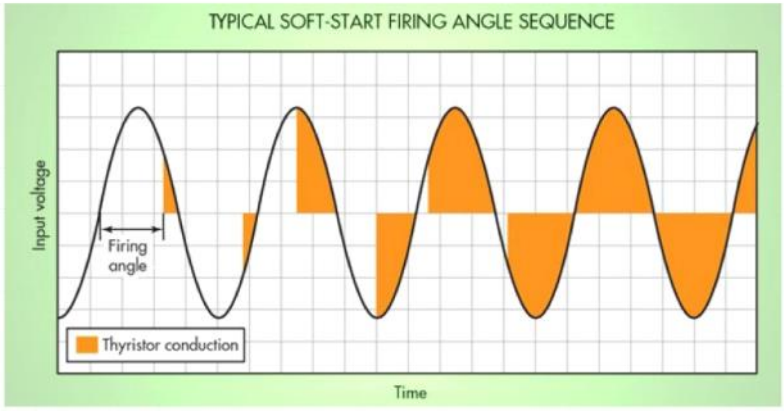




Wroclaw University
of Science and Technology

Sterowniki prądu przemiennego

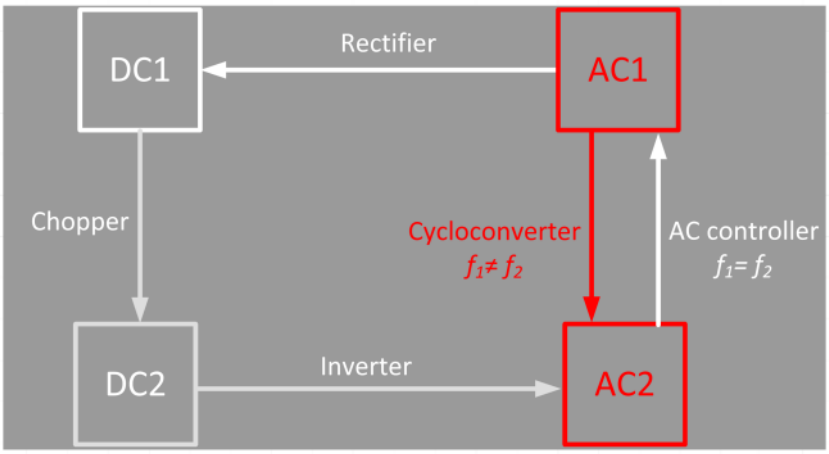
Soft-start



Wroclaw University
of Science and Technology

Cyklokonwertory

Cztery rodzaje konwersji napięcia



Wrocław University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Właściwości

- Zastosowania:
  - Napędy prądu przemiennego o niskiej prędkości i dużej mocy (indukcyjnego i synchroniczne), napędy walcarek, napędy wyciągów górniczych, napędy statków, napędy w cementowniach,
  - Samoloty (wysoka, zmieniająca się częstotliwość do 50 Hz)
  - Trakcja elektryczna (z 50 Hz do 16 2/3 Hz)
- Zalety:
  - Przekształcanie napięcia AC o jednej częstotliwości na napięcia AC o innej częstotliwości
  - Brak szyny DC (jednorazowa konwersja energii)
  - Brak elementów komutujących
- Wady:
  - Pobór dużej mocy biernej
  - Limit minimalnej częstotliwości wyjściowej (około połowa częstotliwości zasilającej?)
  - Wyższe harmoniczne

Wrocław University of Science and Technology

Cyklokonwertory

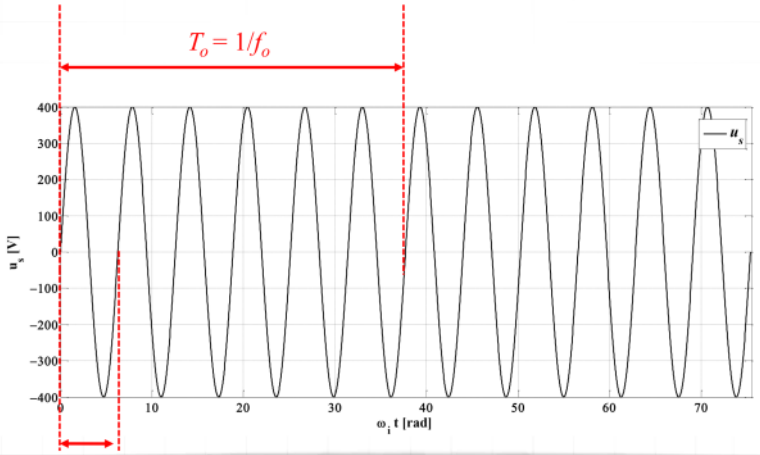
Klasyfikacja

- Ze względu na rodzaj sterowania:
  - Blocking mode cycloconverters,
  - Circulating current mode cycloconverters
- Ze względu na liczbę faz zasilania:
  - 1-phase,
  - 3-phase,
- Ze względu na liczbę faz wyjściowych:
  - 1-phase,
  - 3-phase,
- Ze względu na liczbę pulsów

Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Zasada działania

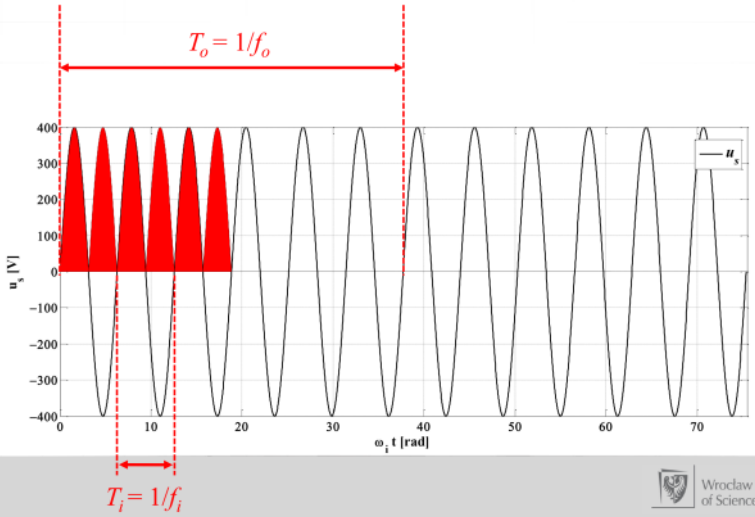


$T_i = 1/f_i$

Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Zasada działania

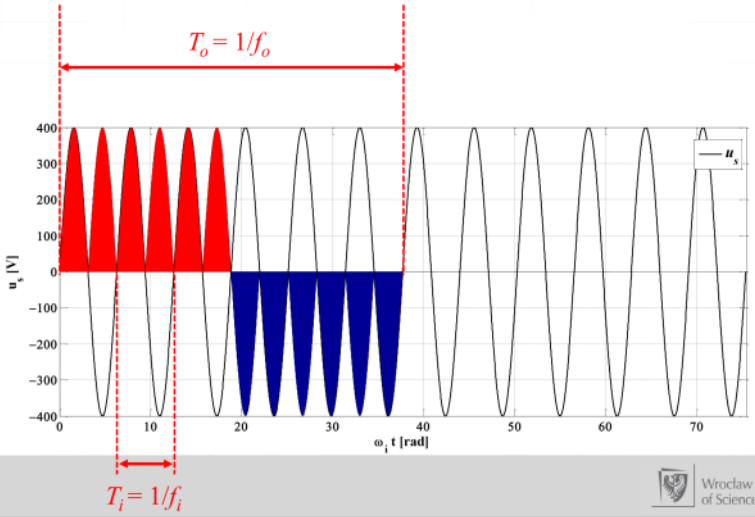


78

Wrocław University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Zasada działania

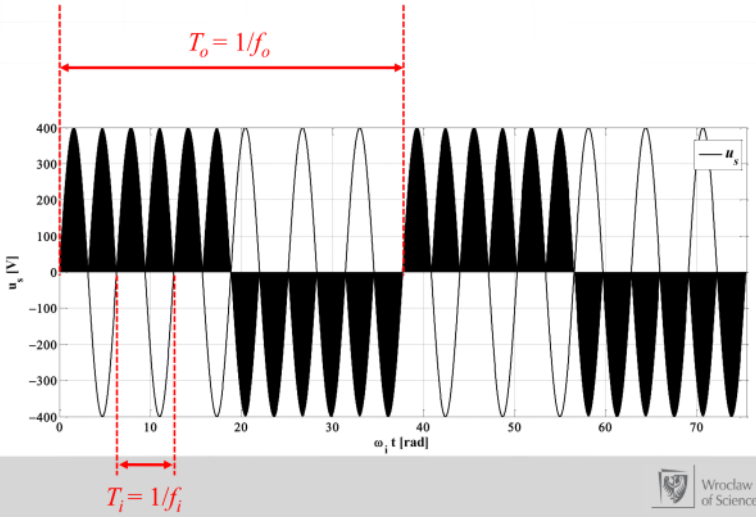


80

Wrocław University of Science and Technology

Cyklokonwertory

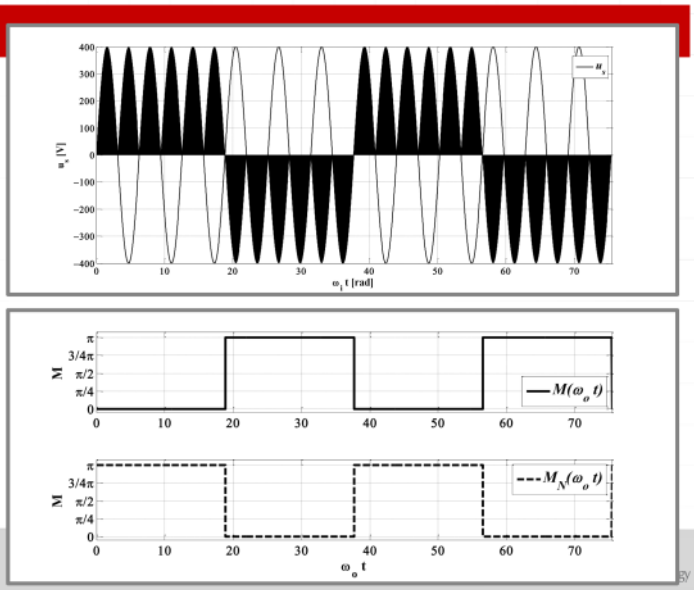
Zasada działania



Wrocław University of Science and Technology

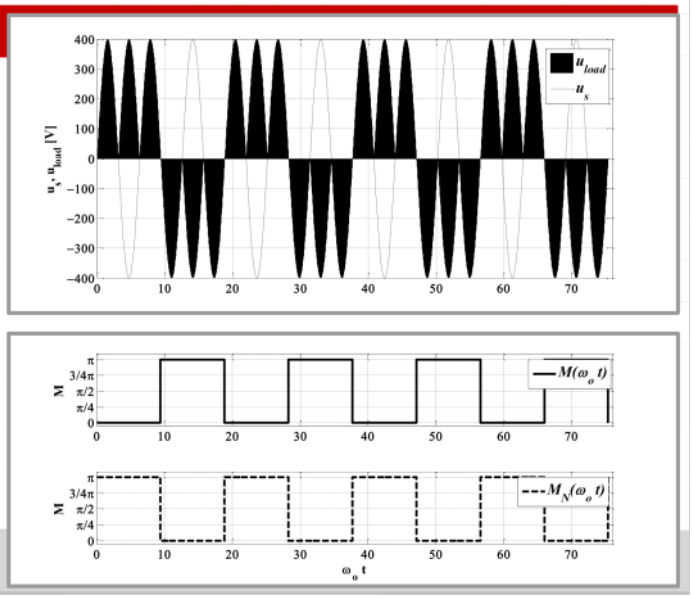
Cyklokonwertory

Funkcja modulująca



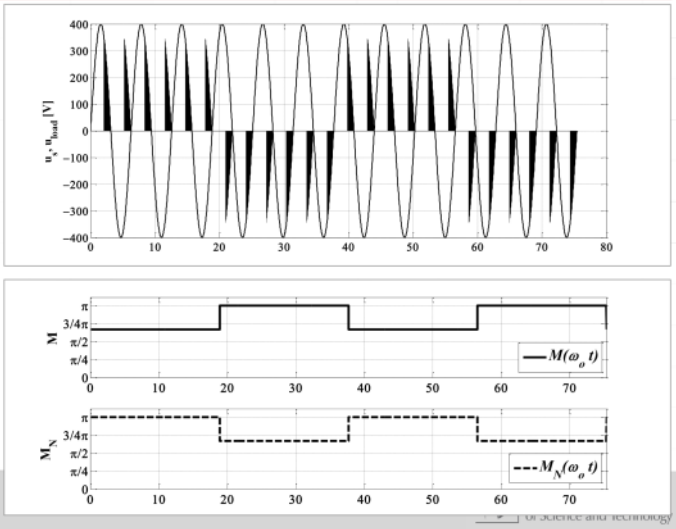
Cyklokonwertory

Funkcja modulująca



Cyklokonwertory

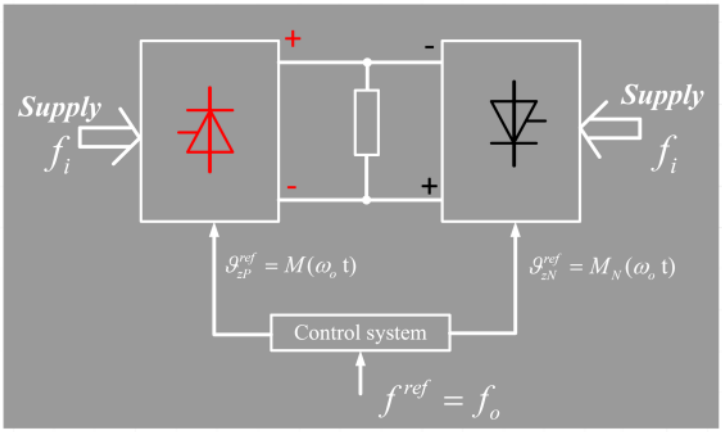
Funkcja modulująca



Cyklokonwertory

Schemat blokowy

BLOCKING MODE



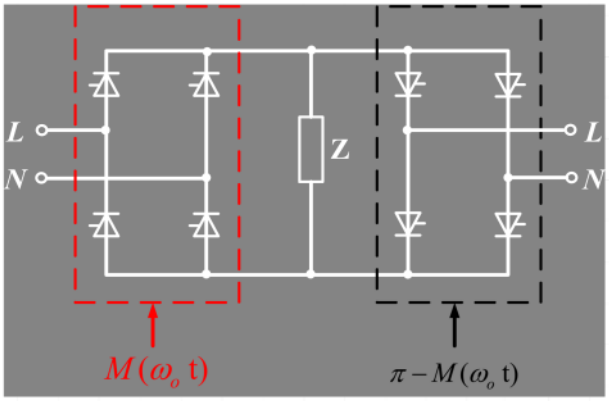
Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

BLOCKING MODE

Schemat blokowy, 1-phase cycloconverter

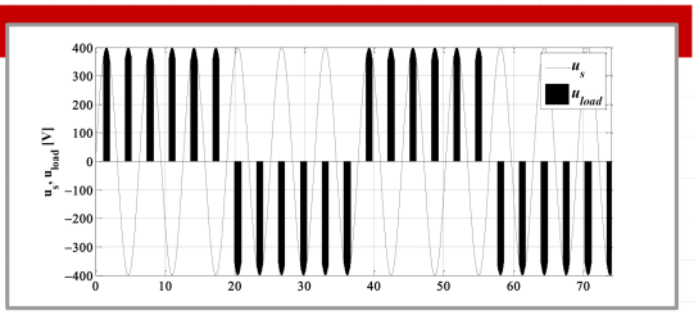
1 faza wejściowa, 1 faza wyjściowa - 2 pulsy



Wroclaw University of Science and Technology

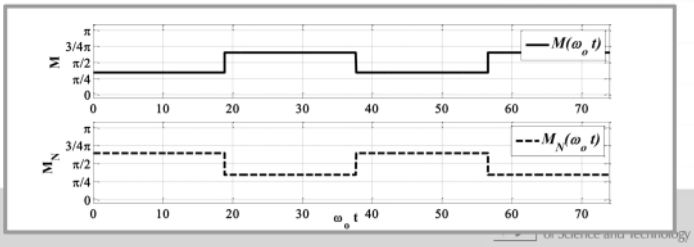
Cyklokonwertery

Funkcja modulująca



Funkcja modulująca

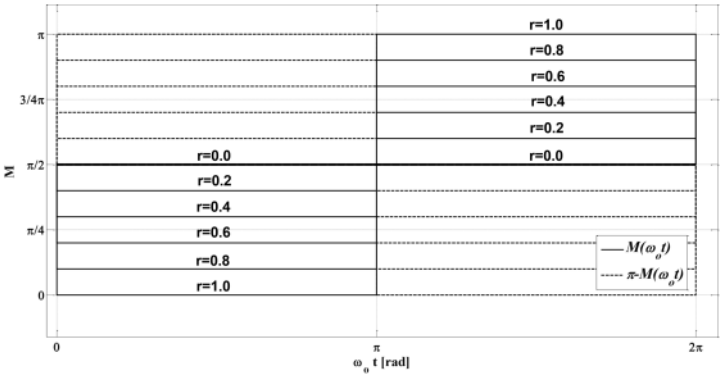
$$M_N(\omega t) = \pi - M(\omega t)$$



Cyklokonwertery

$$M(\omega t) = \frac{\pi}{2} \pm r\frac{\pi}{2}$$

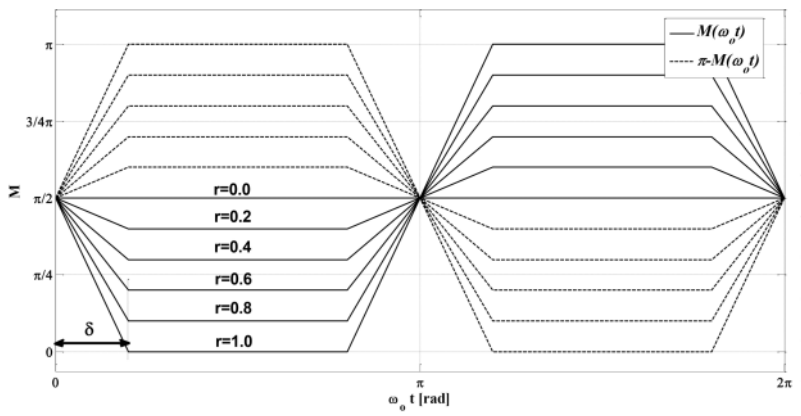
Funkcja modulująca



Wrocław University of Science and Technology

Cyklokonwertery

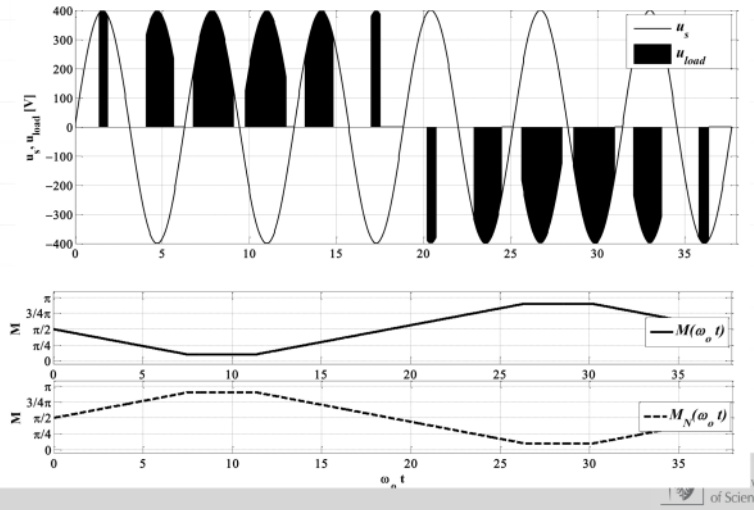
Modulacja trapezoidalna



Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertery

Modulacja trapezoidalna



w University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Funkcja modulująca arccos

Napięcie wyprostowane:

$$U_{load} = U_{d0} \cos \alpha$$

Napięcie zadane:

$$u_{load} = U_{om} \sin \omega_o t$$

Modulacja kąta załączenia:

$$\alpha(t) = \arccos r \sin \omega_o t$$

Wyjście cyklokonwertora:

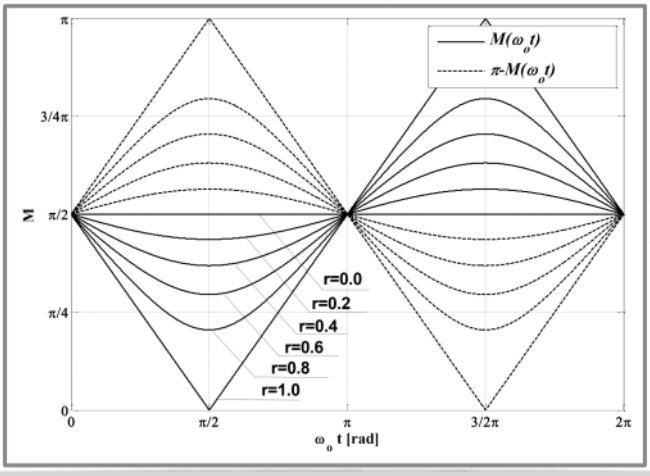
$$u_{load} = U_{d0} \cos \alpha = U_{d0} \cos\left(\arccos r \sin \omega_o t\right) = r U_{d0} \sin \omega_o t$$

Współczynnik modulacji: $r = \dfrac{U_{o,m}}{U_{d0}}$

Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

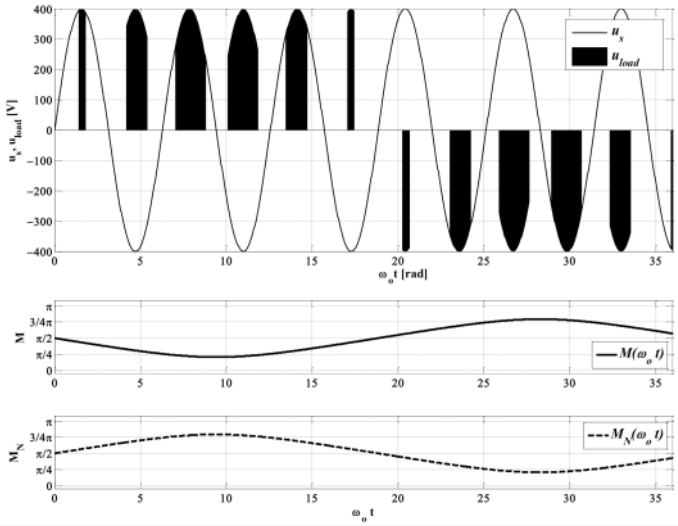
Funkcja modulująca arccos



Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

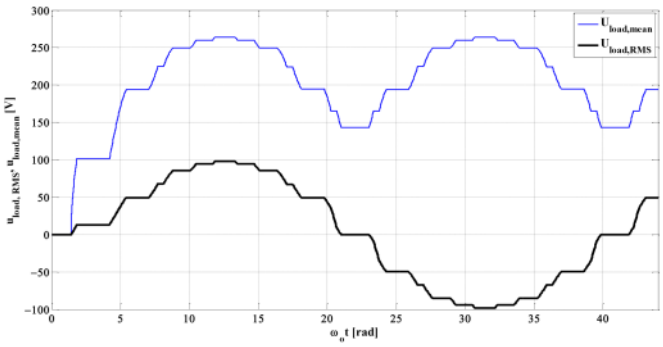
Funkcja modulująca arccos



Cyklokonwerory

Funkcja modulująca arccos

$$U_{load,RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\omega_i t-2\pi}^{\omega_i t} u_{load}^2 \mathrm{d}\omega_i t}$$



RMS <-> mean

Wrocław University of Science and Technology

Cyklokonwerery

$(q=2)$

Funkcja modulująca arccos

Parametry:

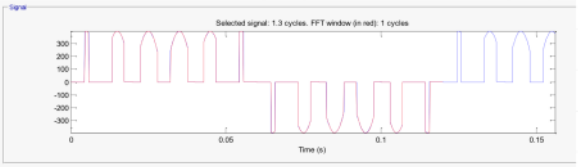
$f_i = 50\ \text{Hz}$

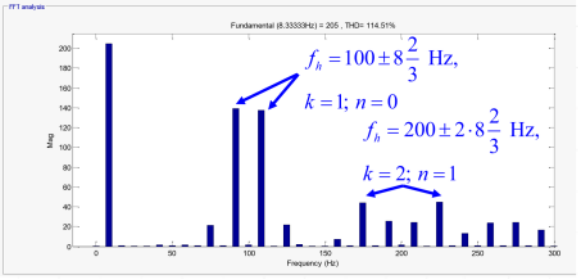
$f_0 = 8\frac{2}{3}\ \text{Hz}$

Wyższe harmoniczne:

$f_h = qkf_i \pm (2n-1)f_o,$

$k = 1,2,...; n = 0,1,2...$





Cyklokonwertory

Schemat blokowy

Częstotliwość wejściowa:

$f_s = f_i$

Częstotliwość zadana:

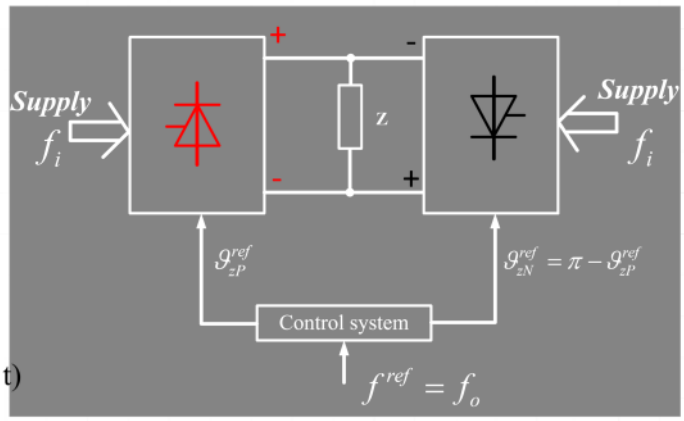
$f^{ref} = f_o$

Zadane kąty załączenia:

$\vartheta_{zP}^{ref}(t) = \mathrm{M}(\omega_o\, t)$

$\vartheta_{zN}^{ref}(t) = \pi - \mathrm{M}(\omega_o\, t)$

$\omega_o = 2\pi f_o$

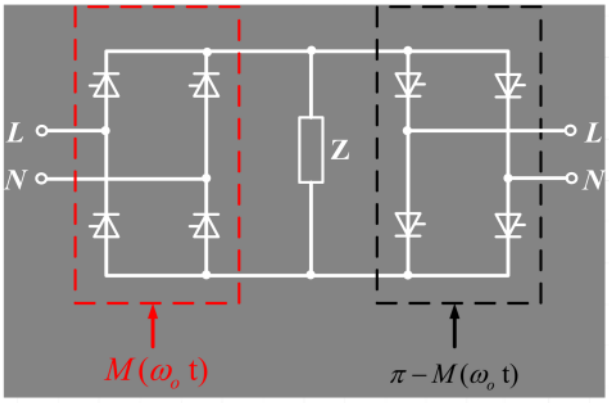


M(t) - funkcja modulująca

Cyklokonwertory

Schemat blokowy, 1 faza

1 faza wejściowa, 1 faza wyjściowa - 2 pulsy



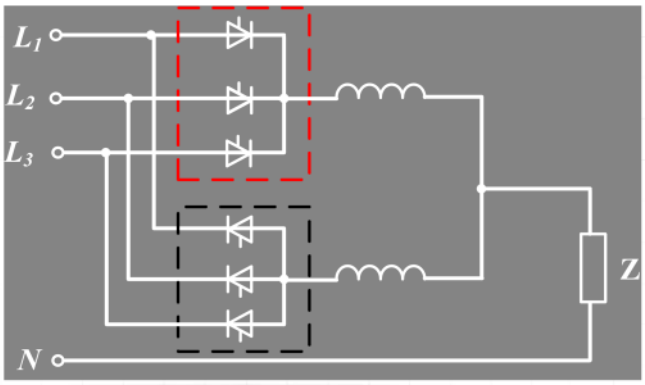
Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Schemat blokowy, 3 fazy

3 fazy wejściowe, 1 faza wyjściowa - 3 pulsy

CIRCULATING CURRENT MODE



IGR – intergroup reactor

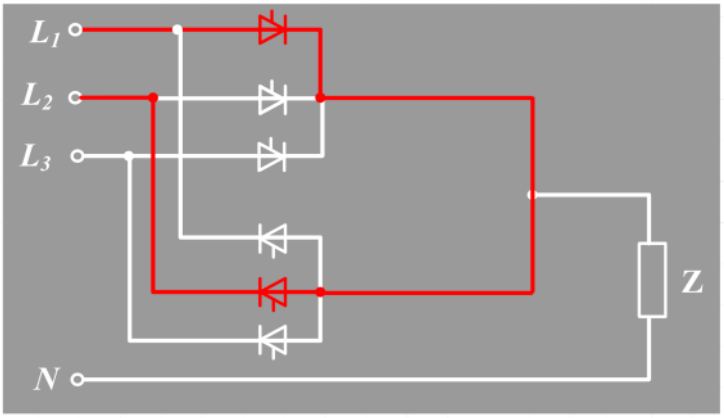
Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Schemat blokowy, 3-fazowy cyklokonwertor

3 input phases,
1 output phase
- 3 pulses

BRAK IGR - ZWARCIE!

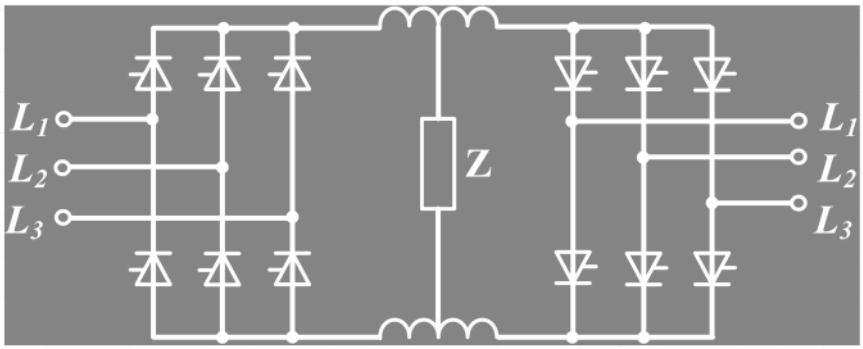


Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Schemat blokowy, 3 fazy

3 fazy wejściowe, 1 faza wyjściowa - 6 pulsów

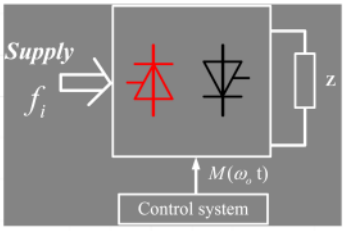


Wroclaw University of Science and Technology

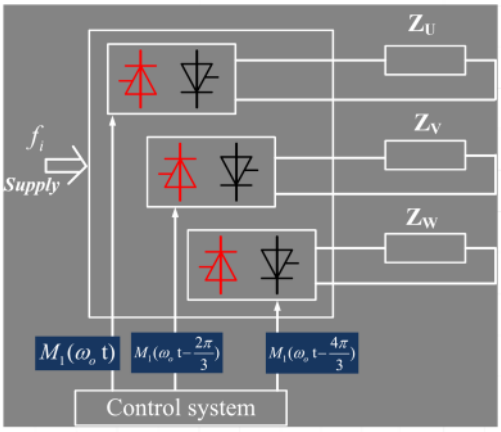
Cyklokonwertory

Schematy blokowe

Cyklokonwertor 1-fazowy



Cyklokonwertor 3-fazowy

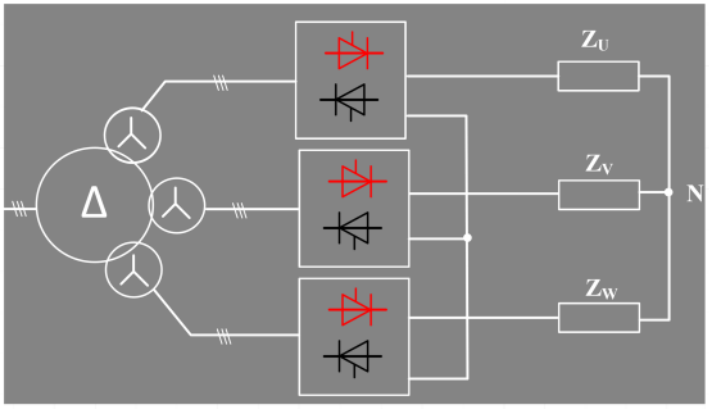


Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Schemat blokowy

3 fazy wejściowe, 1 faza wyjściowa - 3 pulsy



Wroclaw University of Science and Technology

Cyklokonwertory

Cyklokonwertor 12-pulsowy

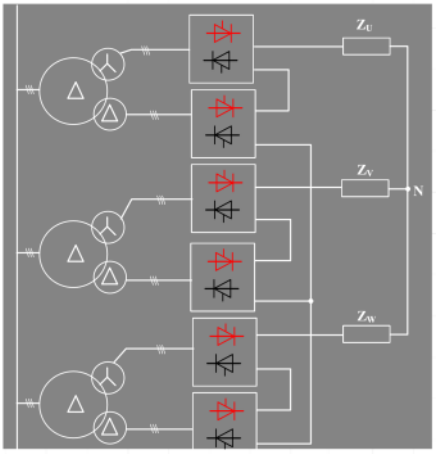
3 fazy wejściowe, 3 fazy wyjściowe - 12 pulsów

Zalety:

- Najmniejsze zakłócenia
- Najniższe straty
- Maksymalna częstotliwość zasilania

Dla napędów AC:

- Najniższe oscylacje momentu
- Najszybsze odpowiedzi momentu i prądów



Wrocław University of Science and Technology

Cycloconverters

Blocking mode vs ciculating current mode

Blocking mode cycloconverters:

- No IGR (cost, size, etc.),
- Only one converter operates at any time - low losses and higher efficiency,
- During the zero time, current is zero - distortion in current and voltage,
- Complex harmonics patterns,
- Current reversal is more problematic,

Circulatin current mode cycloconverters:

- IGR,
- Two converters can operate at any time, one in rectification mode, the other one in the inverter operation mode,
- Smoother load voltage,
- Less harmonics, easier harmonics patterns,
- No current reversal problem

Hybrid blocking-circulating mode cycloconverter - advantages of both types, smaller IGR, blocking mode in most of the time, circulating mode only in case of small currents.

Wrocław University of Science and Technology

Cycloconverters

Higher harmonics

Both types:

- No storage devices (capacitors, inductors) - instantaneous input and output power are equal
- Higher number of pulses - less harmonics,
- Harmonics at pnf_i+/-Nf_o, p- number of pulses, N - integer, n - integer

Blocking mode cycloconverters:

- Input frequency close to supply frequency - the harmonics increase,
- Subharmonics when $f_o/f_i>0.2$

Circulatin current mode cycloconverters:

- N is limited to n+1
- Subharmonics when $f_o/f_i>0.6$

Wroclaw University of Science and Technology

Dziękuję za uwagę!

Wroclaw University of Science and Technology

!Energoelektronika 1 Wykład 8

piątek, 18 października 2019 10:20

Wykład 8

Przekształtniki DC/DC

dr inż. Grzegorz Tarchała

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Wrocław University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

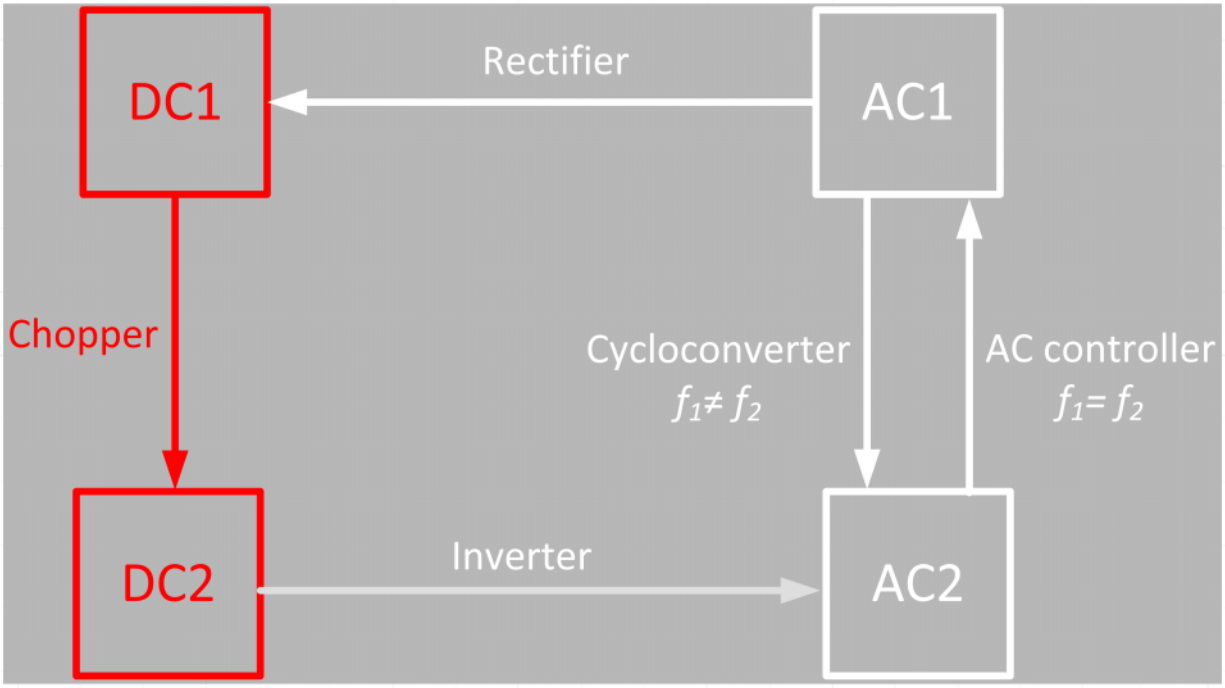
Plan wykładu

- Przekształtnik jedno-kwadrantowy obniżający napięcie (buck)
  - Przetwornik tranzystorowy
  - Przetwornik tyrystorowy
- Przekształtnik mostkowy (buck)
- Przekształtnik podwyższające napięcie (boost)
- Przekształtnik obniżająco-podwyższające napięcie (buck-boost converters)
- Przekształtnik Ćuk'a (buck-boost)

Wrocław University of Science and Technology

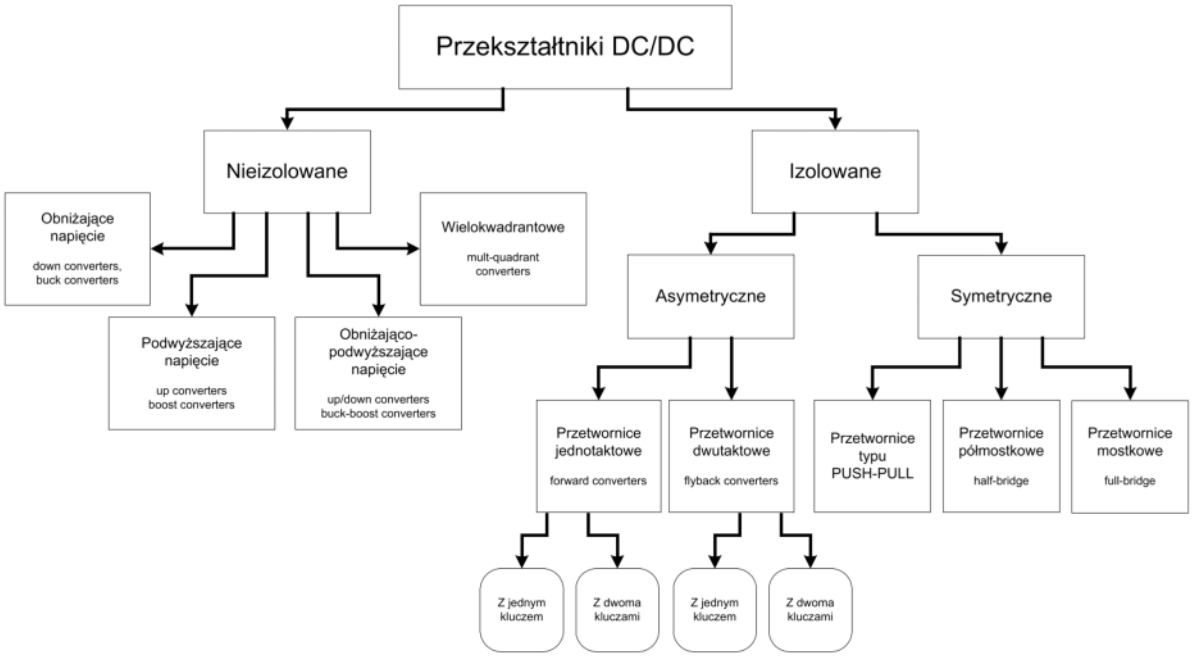
Przekształtniki DC/DC

Klasyfikacja rodzajów konwersji



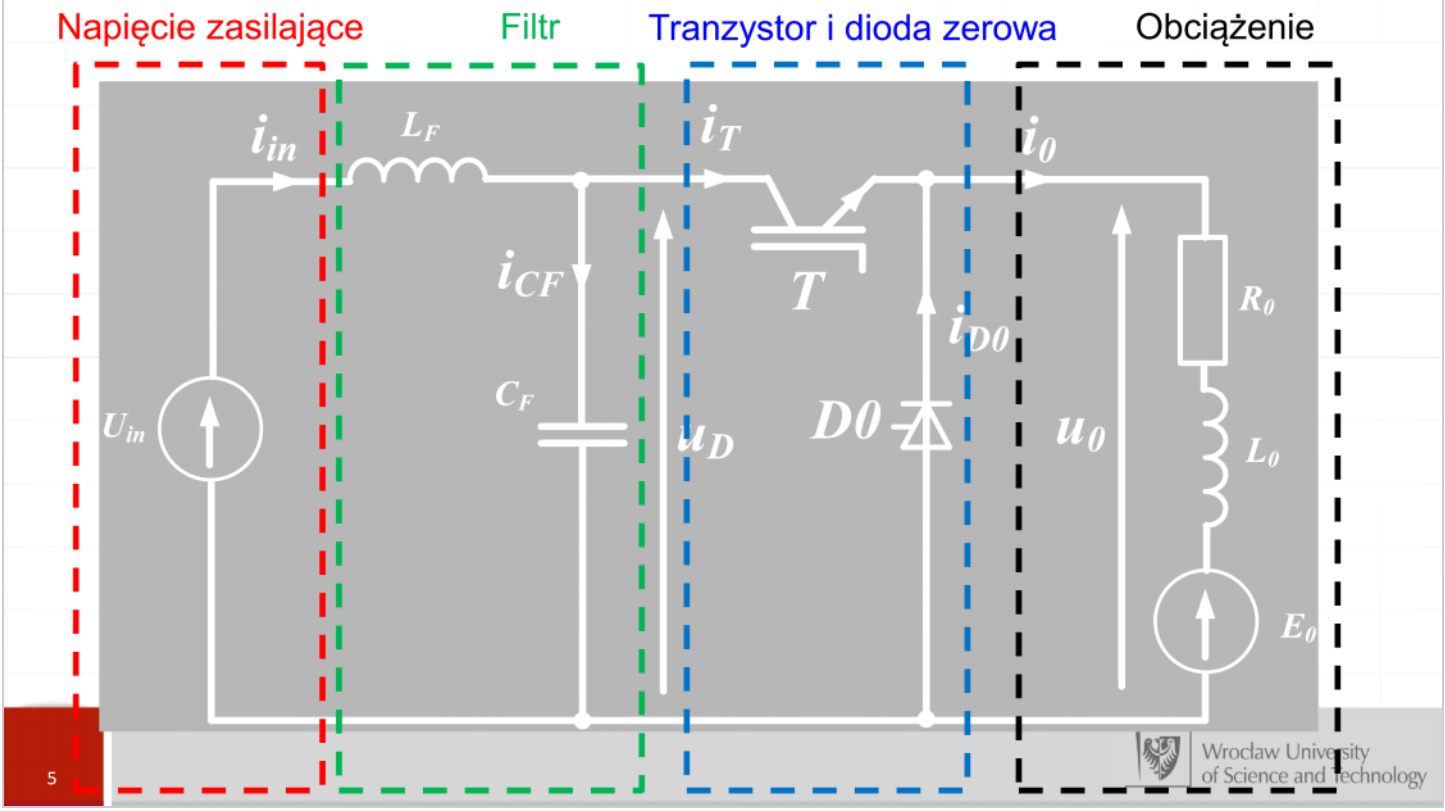
Przekształtniki DC/DC

Klasyfikacja



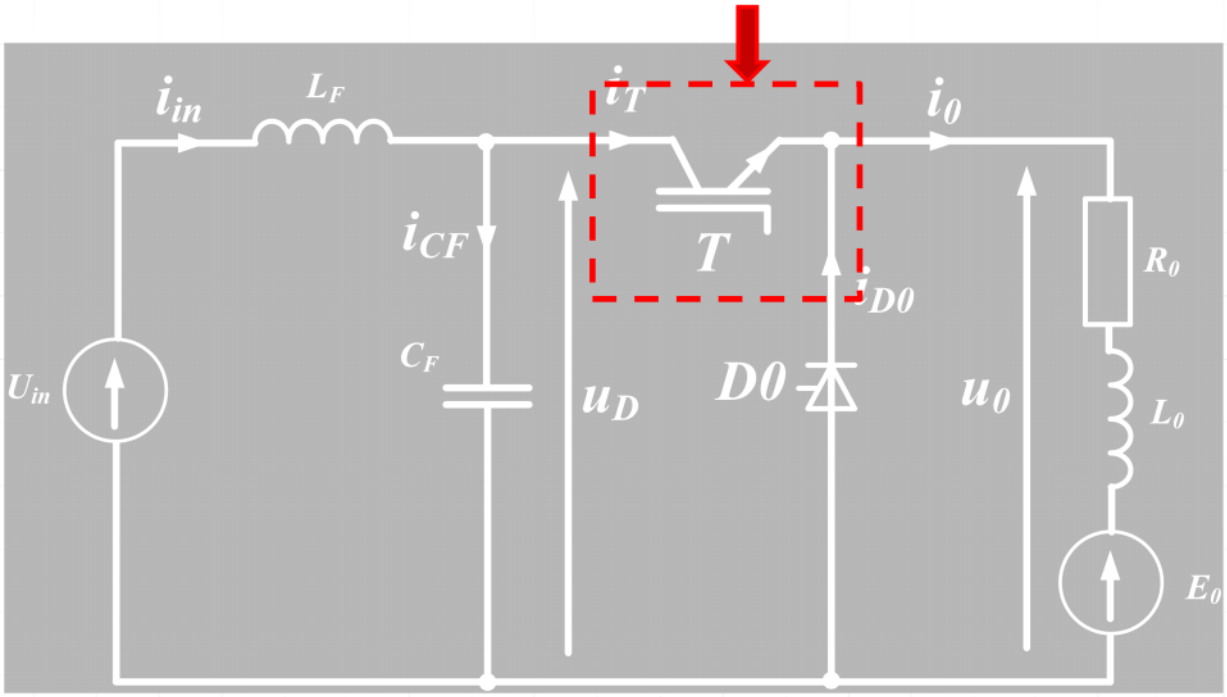
Przekształtniki DC/DC

Przetwornik DC/DC – obniżający napięcie



Przetworniki DC/DC

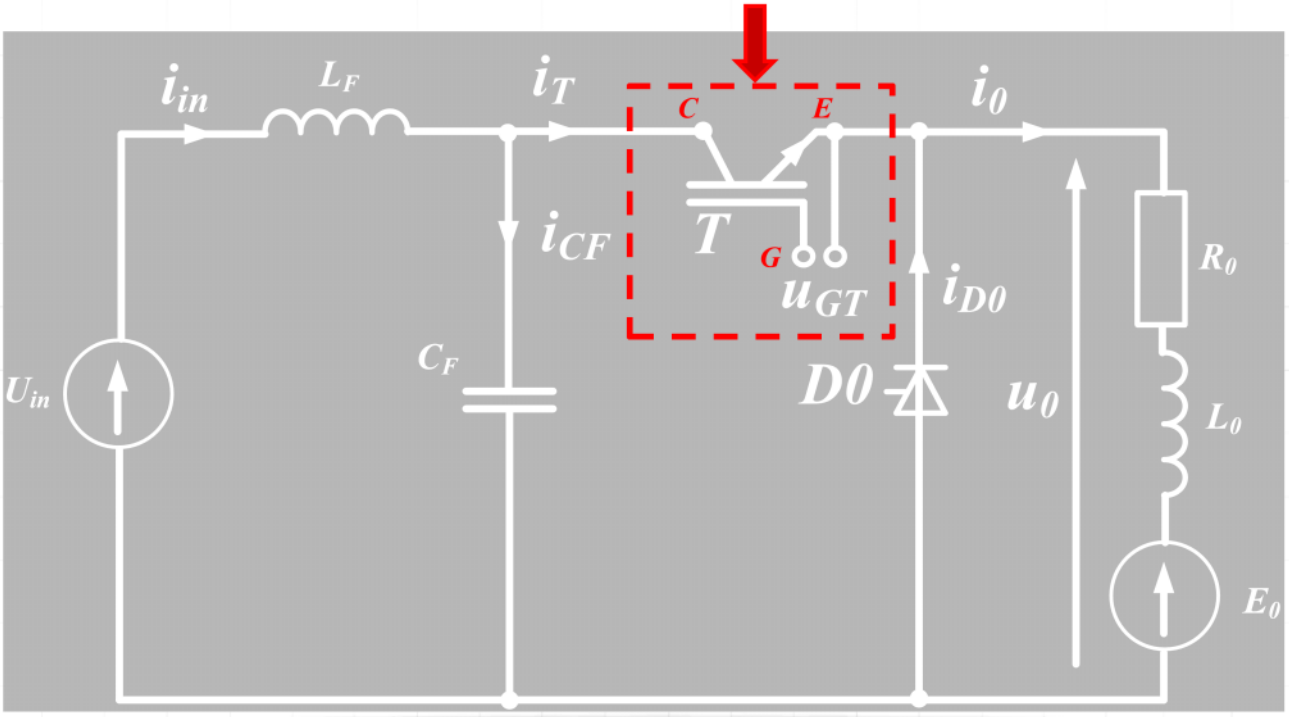
Przetwornik DC/DC obniżający napięcia, sygnał sterujący



Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Przetwornik DC/DC obniżający napięcia, sygnał sterujący

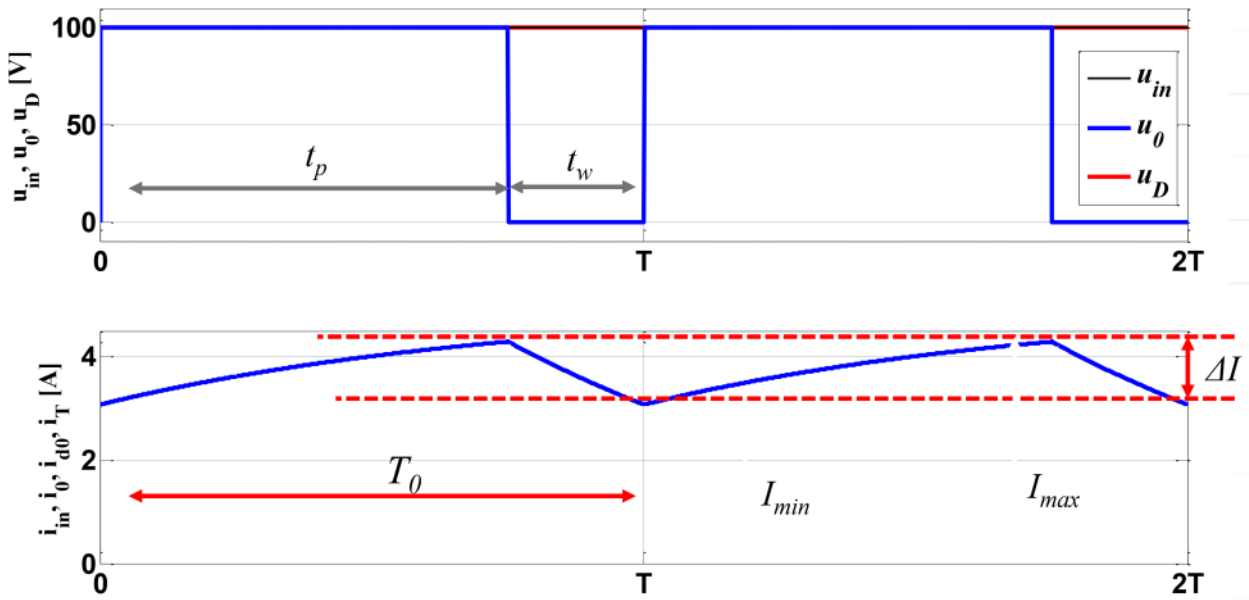


Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Przebiegi czasowe

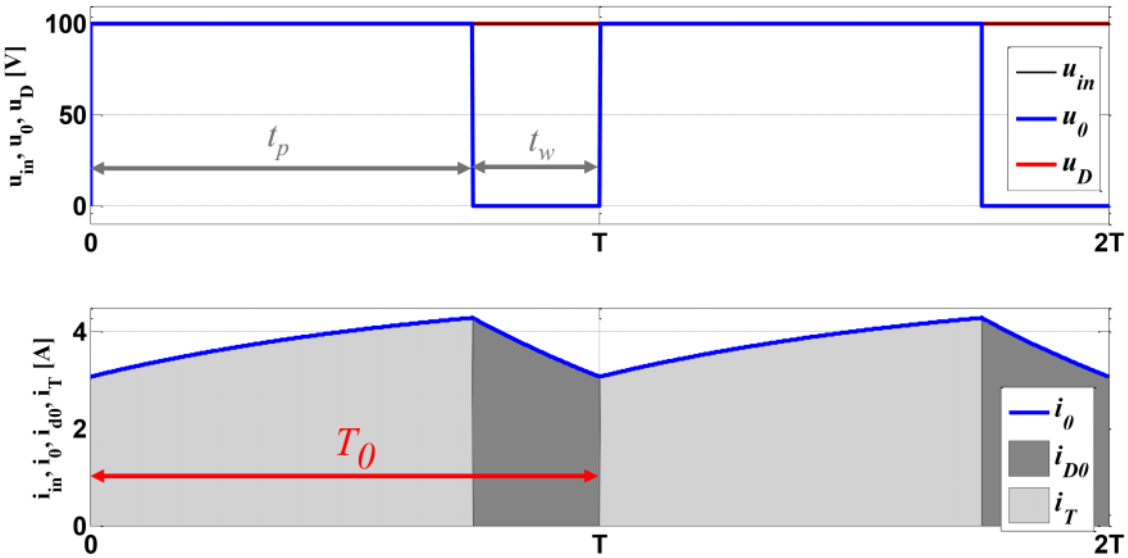
Prąd ciągły



Przetworniki DC/DC

Przebiegi czasowe

Prąd ciągły

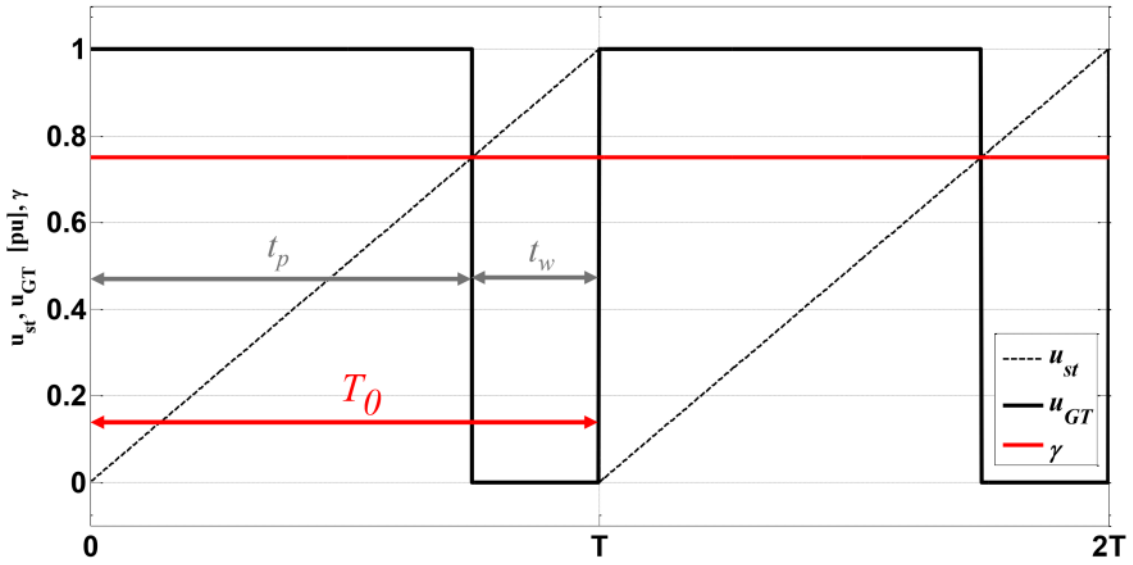


9

Wrocław University of Science and Technology

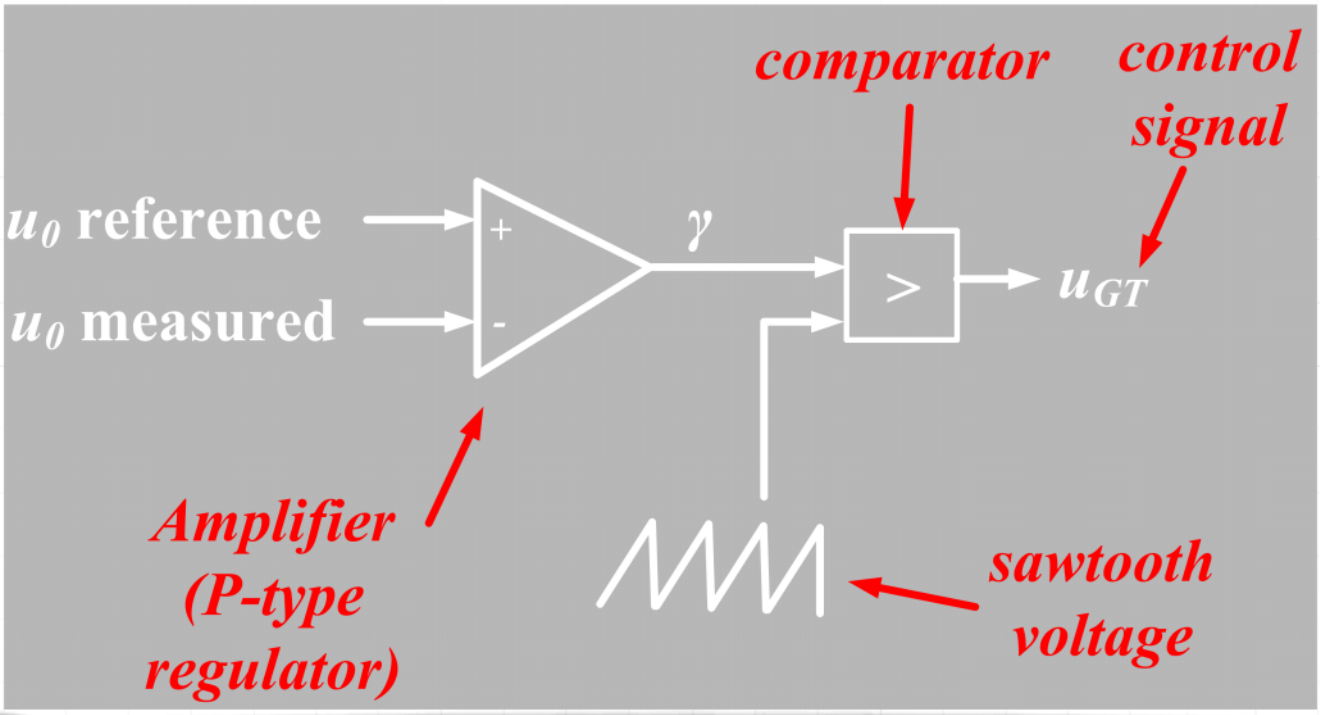
Przetworniki DC/DC

Sterowanie



Przetworniki DC/DC

Układ sterowania



Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Sposoby modulacji napięcia

Napięcie średnie:

$$U_0 = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} u_0(\mathrm{t})\,\mathrm{dt} = \frac{1}{T_0}\int_0^{t_p} u_D(\mathrm{t})\,\mathrm{dt}$$

Dla $u_d(\mathrm{t}) = \mathrm{const} = U_d$:

$$U_0 = \frac{t_P}{T_0}U_D = \frac{t_p}{t_p + t_w}U_D$$

$$U_0 = \gamma U_d$$

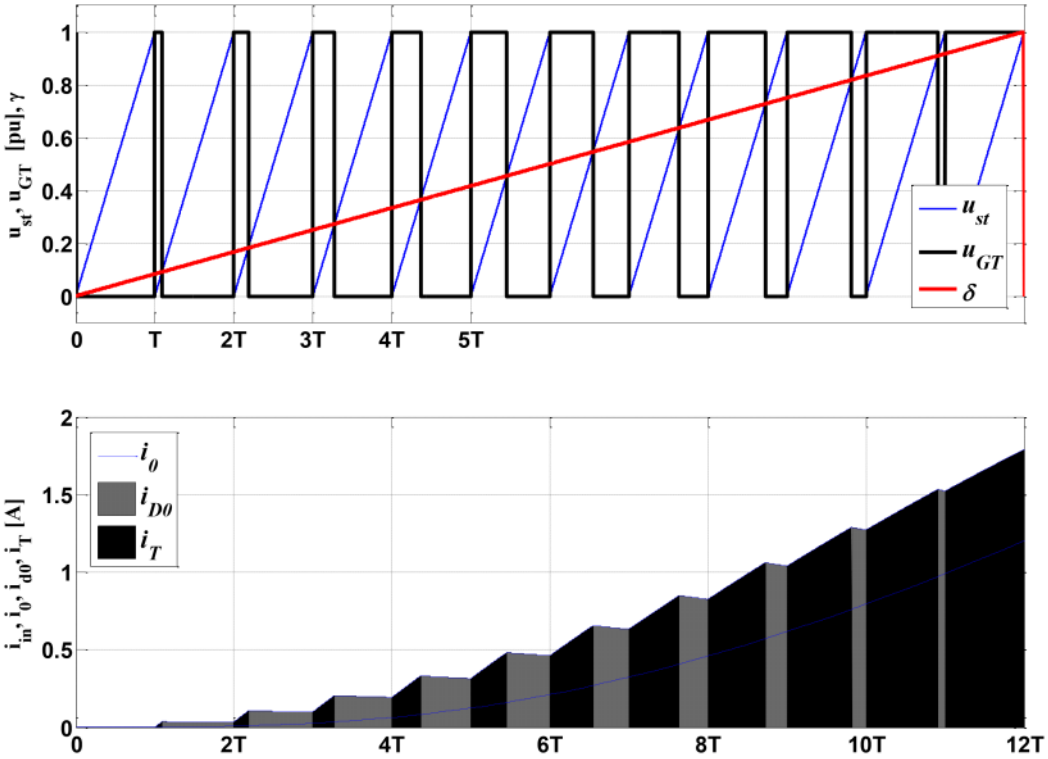
$$\gamma = \frac{t_p}{T_0}, \quad \gamma \in <0,1>$$

Trzy rodzaje modulacji napięcia:

- Modulacja szerokości impulsów (ang. PWM)
- Modulacja częstotliwości impulsów (ang. PFM)
- Modulacja szerokościowo-częstotliwościowa (PW-PFM)

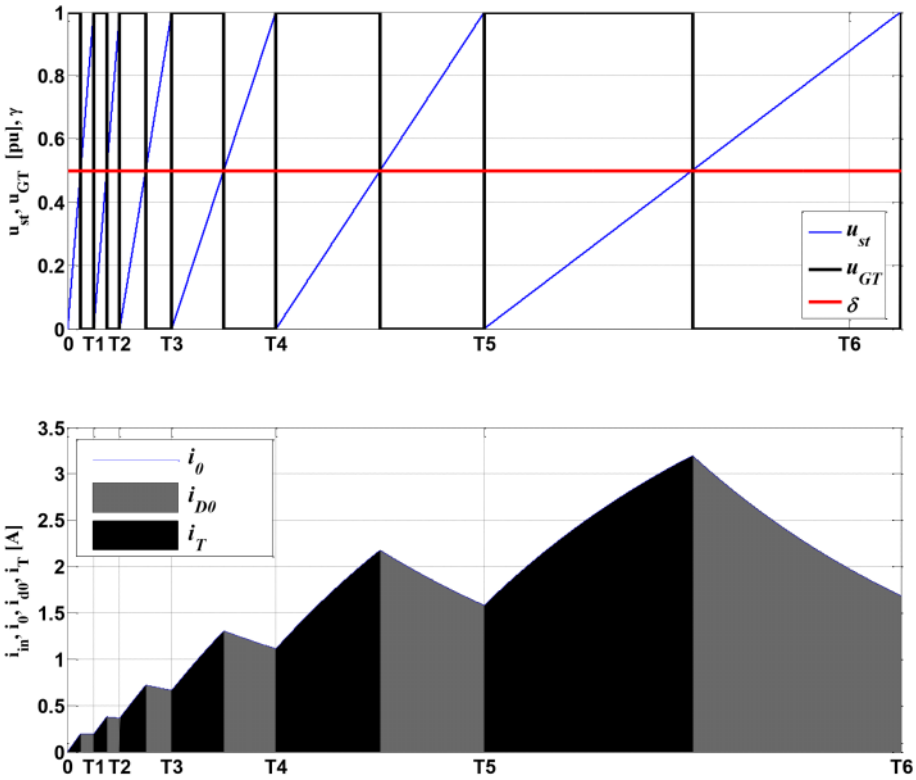
Przetworniki DC/DC

Modulacja szerokości impulsów (MSI, ang. PWM)



Przetworniki DC/DC

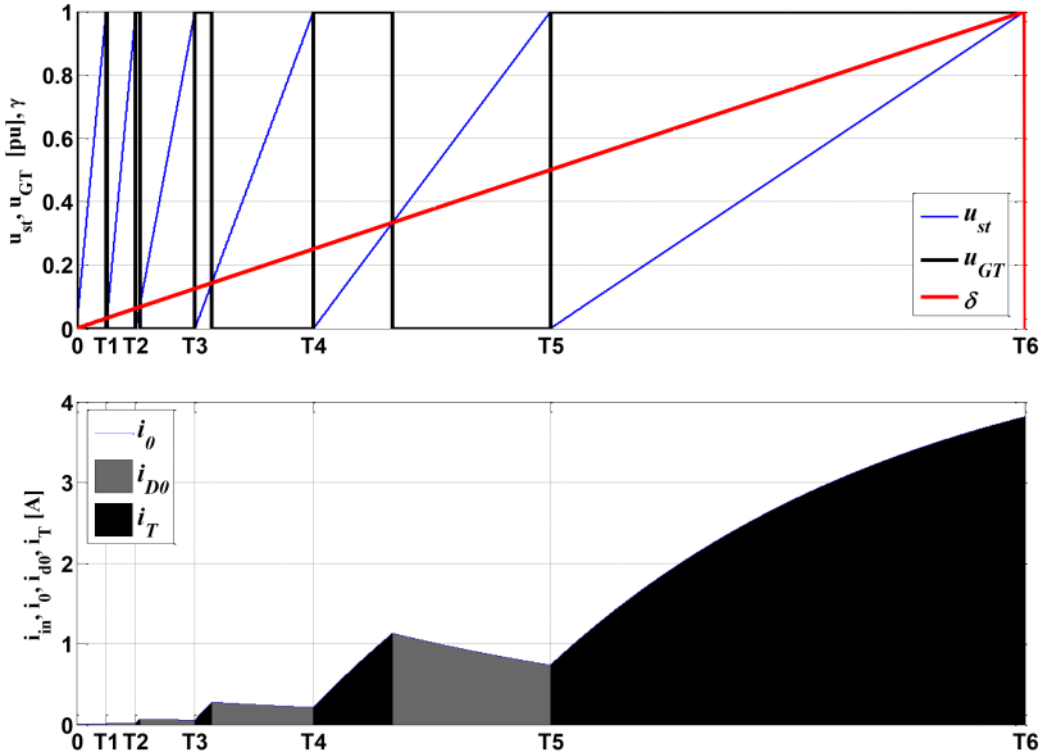
Modulacja częstotliwości impulsów (PFM)



ocław University
Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Modulacja szerokościowo-częstotliwościowa



15

Przetworniki DC/DC

Prądy przetowrnika

Średni prąd wyjściowy (gdy prądy ciągłe):

$$I_0 = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} i_0(\mathrm{t})\,\mathrm{dt} = \frac{U_0 - E_0}{R_0} = \frac{\gamma U_D - E_0}{R_0}$$

Prąd zasilania:

$$I_d = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} i_T(t)\mathrm{d}t = I_0\frac{t_p}{T_0} = I_0\gamma$$

Stosunek prądów i napięć: $\frac{U_0}{U_d} = \frac{I_d}{I_0} = \gamma$

Moc: $P_d = U_d I_d = U_0 I_0 = P_0$

Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Równania napięciowe

Średni prąd wyjściowy (gdy prądy ciągłe):

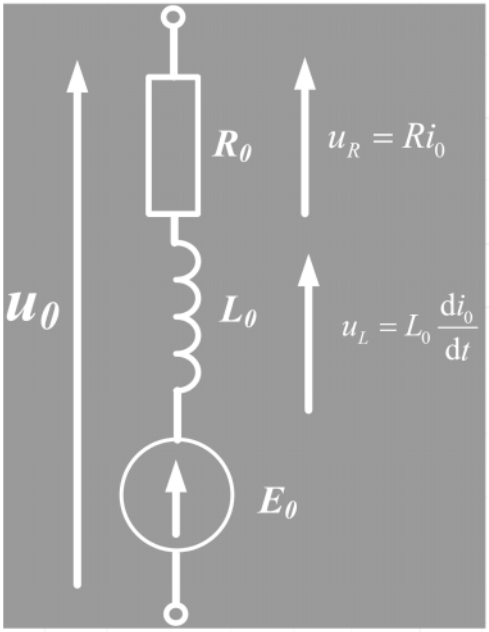
$$I_0 = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} i_0(\mathrm{t})\,\mathrm{dt} = \frac{U_0 - E_0}{R_0} = \frac{\gamma U_D - E_0}{R_0}$$

Równanie napięciowe, gdy tranzystor załączony:

$$U_d = R_0 i_0 + L_0 \frac{\mathrm{d}i_o}{\mathrm{d}t} + E_0,\ \ i_0 = i_T, i_{D0} = 0$$

Równanie napięciowe, gdy tranzystor wyłączony:

$$0 = R_0 i_0 + L_0 \frac{\mathrm{d}i_o}{\mathrm{d}t} + E_0,\ \ i_0 = i_{D0}, i_T = 0$$



Przetworniki DC/DC

Oscylacje prądu

Minimalna i maksymalna wartość prądu (w stanie ustalonym):

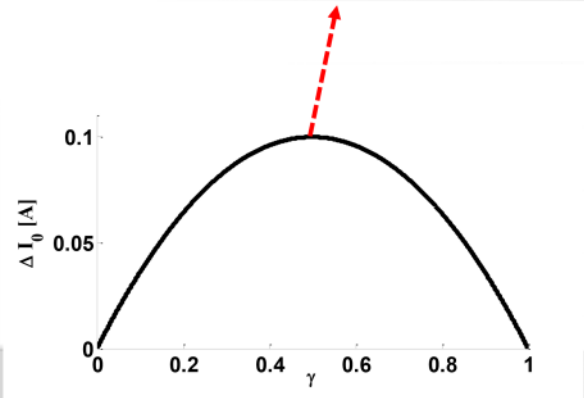
$$I_{0\min} = \frac{U_d}{R_0}\frac{e^{\frac{-t_w}{T_E}}-1}{e^{\frac{-T_0}{T_E}}-1} - \frac{E_0}{R_0}$$

$$I_{0\max} = \frac{U_d}{R_0}\frac{1-e^{\frac{-t_p}{T_E}}}{1-e^{\frac{-T_0}{T_E}}} - \frac{E_0}{R_0}$$

$$\Delta I_{0\max} = \frac{U_d}{R_0}\frac{\left(1-e^{\frac{-T_0}{2T_E}}\right)^2}{1-e^{-\frac{T_0}{T_E}}}$$

Oscylacje prądu:

$$\Delta I_0 = I_{0\max} - I_{0\min} = \frac{U_d}{R_0}\frac{\left(1-e^{\frac{-t_p}{T_E}}\right)\left(1-e^{\frac{-t_w}{T_E}}\right)}{1-e^{-\frac{T_0}{T_E}}}$$



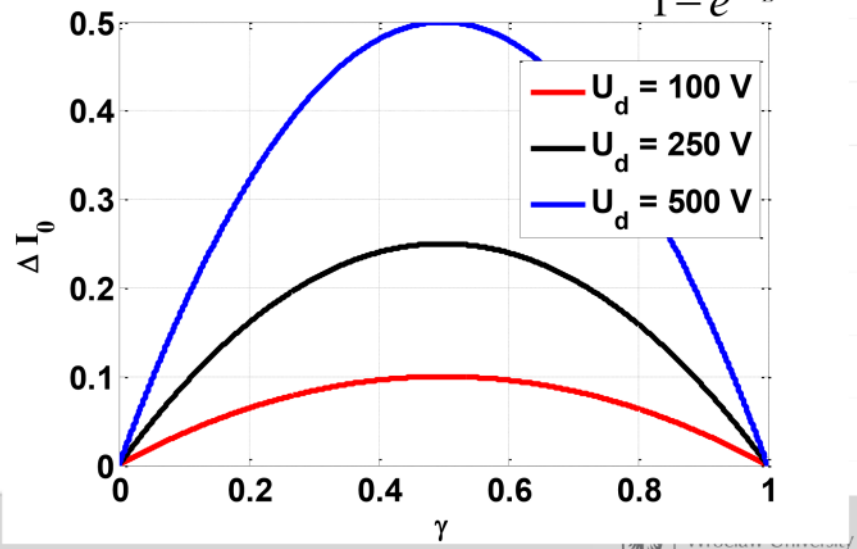
Przetworniki DC/DC

Oscylacje prądu

Oscylacje prądu

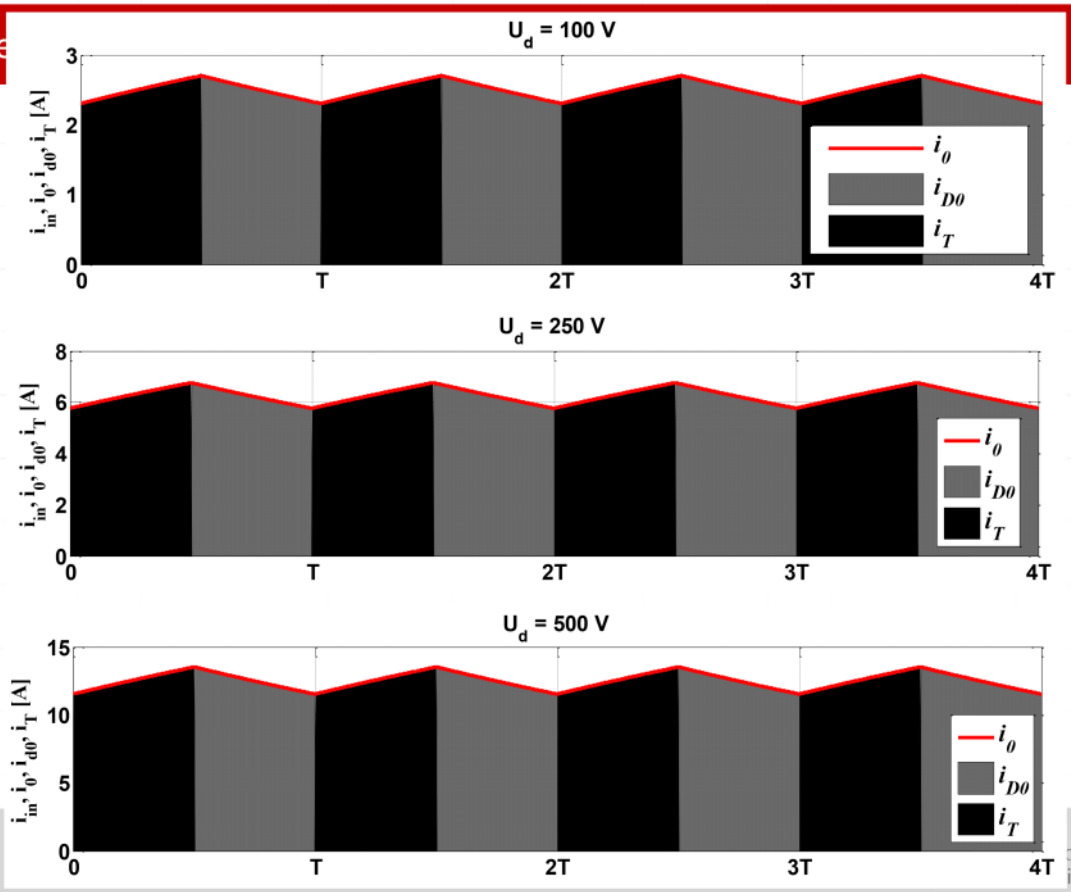
$$\Delta I_0 = f\left(U_d, R_0, L_0, T_0, \gamma\right)$$

$$\Delta I_0 = I_{0\max} - I_{0\min} = \frac{U_d}{R_0} \frac{\left(1 - e^{\frac{-t_p}{T_E}}\right)\left(1 - e^{\frac{-t_w}{T_E}}\right)}{1 - e^{-\frac{T_0}{T_E}}}$$



Przetworniki DC/DC

Oscylacje



20

Przetworniki DC/DC

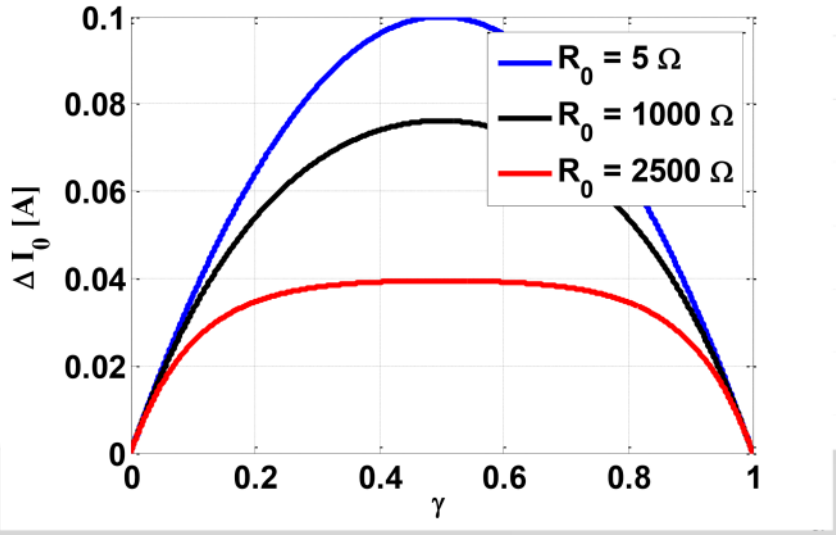
Oscylacje prądu

Oscylacje prądu

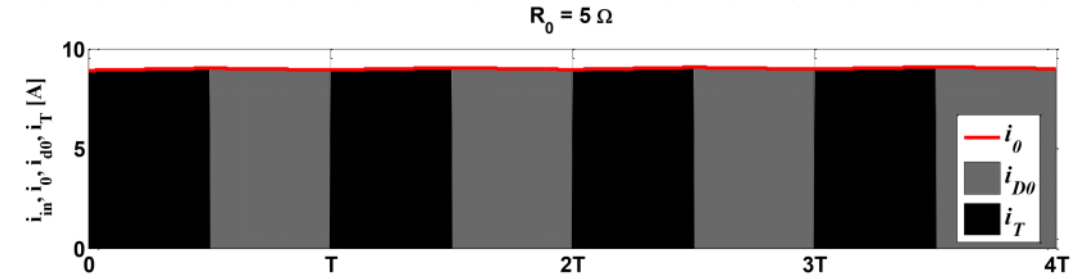
$$\Delta I_0 = f\left(U_d, R_0, L_0, T_0, \gamma\right)$$

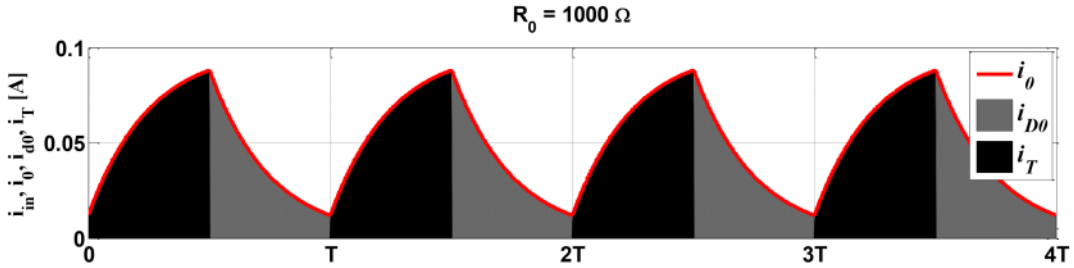
$$T_E = \frac{L_0}{R_0}$$

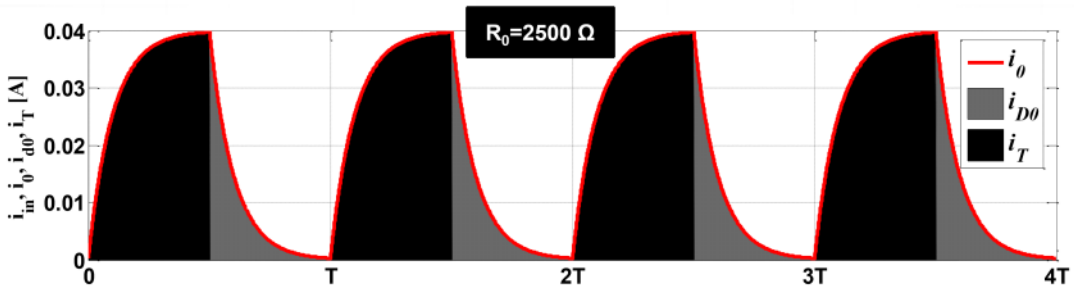
$$\Delta I_0 = I_{0\max} - I_{0\min} = \frac{U_d}{R_0} \frac{\left(1 - e^{\frac{-t_p}{T_E}}\right)\left(1 - e^{\frac{-t_w}{T_E}}\right)}{1 - e^{-\frac{T_0}{T_E}}}$$



Przetworniki DC/DC







Przetworniki DC/DC

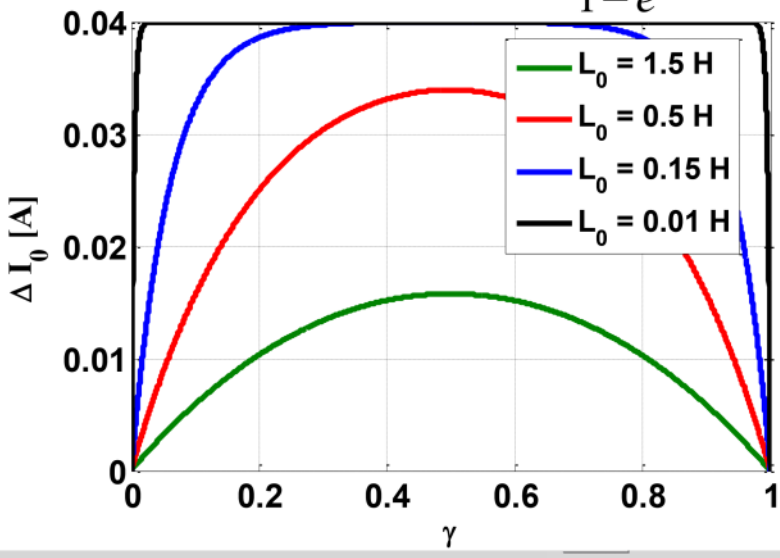
Oscylacje prądu

Oscylacje prądu:

$$\Delta I_0 = f\left(U_d, R_0, L_0, T_0, \gamma\right)$$

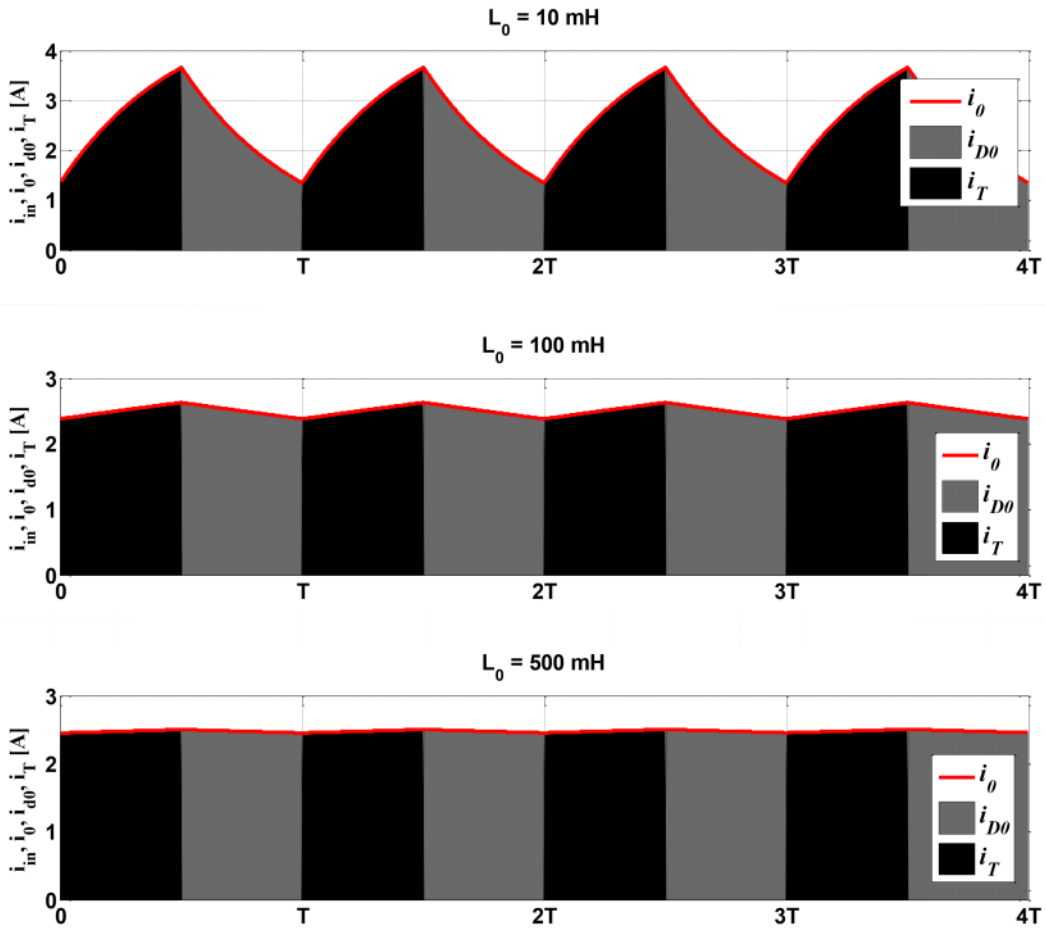
$$T_E = \frac{L_0}{R_0}$$

$$\Delta I_0 = I_{0\max} - I_{0\min} = \frac{U_d}{R_0} \frac{\left(1 - e^{\frac{-t_p}{T_E}}\right)\left(1 - e^{\frac{-t_w}{T_E}}\right)}{1 - e^{-\frac{T_0}{T_E}}}$$



23

Przetworniki DC/DC



24

Przetworniki DC/DC

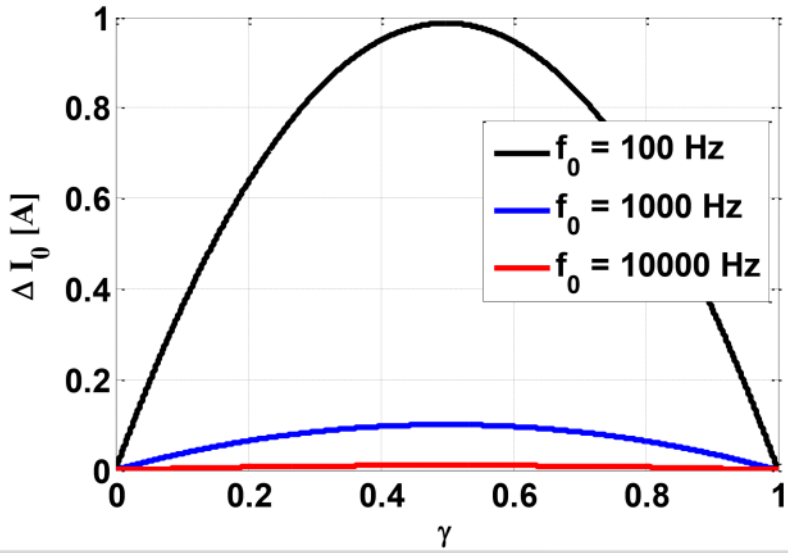
Oscylacje prądu

Current oscillations:

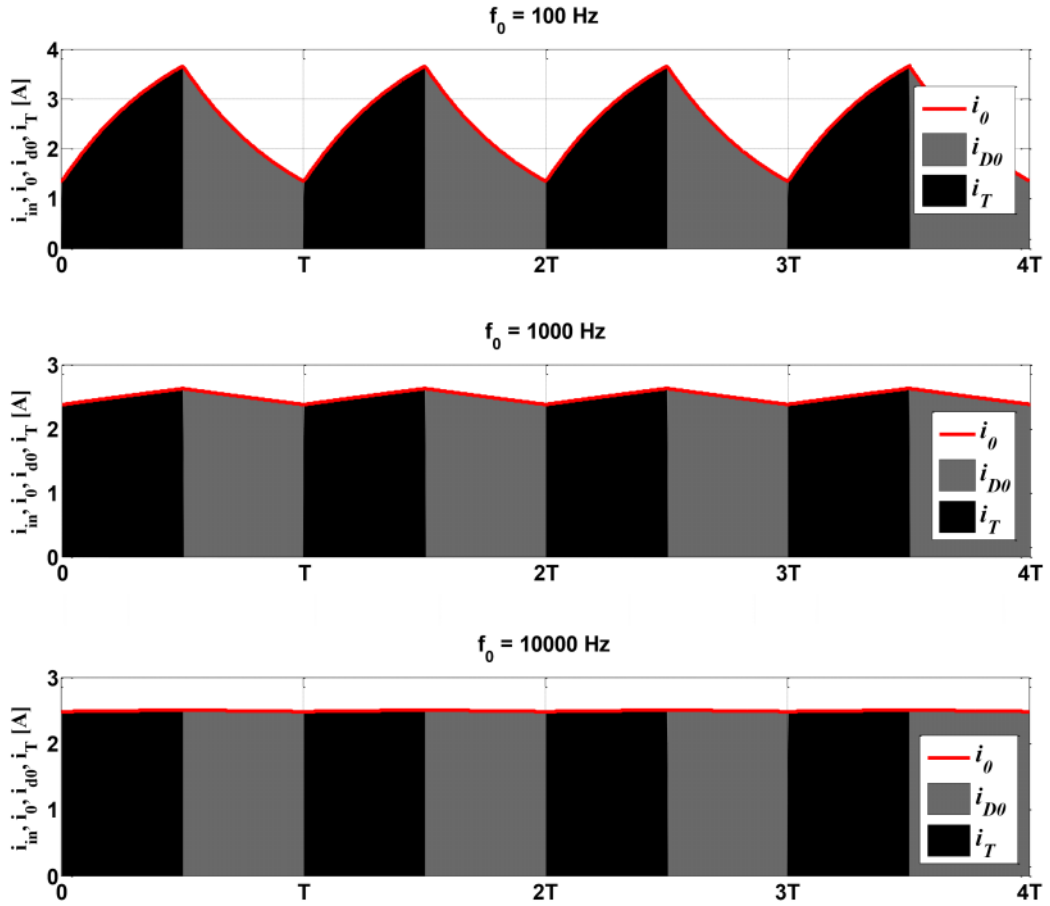
$$\Delta I_0 = f\left(U_d, R_0, L_0, T_0, \gamma\right)$$

$$T_0 = \frac{1}{f_0}$$

$$\Delta I_0 = I_{0\max} - I_{0\min} = \frac{U_d}{R_0} \frac{\left(1 - e^{\frac{-t_p}{T_E}}\right)\left(1 - e^{\frac{-t_w}{T_E}}\right)}{1 - e^{-\frac{T_0}{T_E}}}$$



Przetworniki DC/DC



26

Przetworniki DC/DC

$$\frac{T_0}{T_E} << 1$$

Uproszczenie

Kiedy tranzystor załączony:

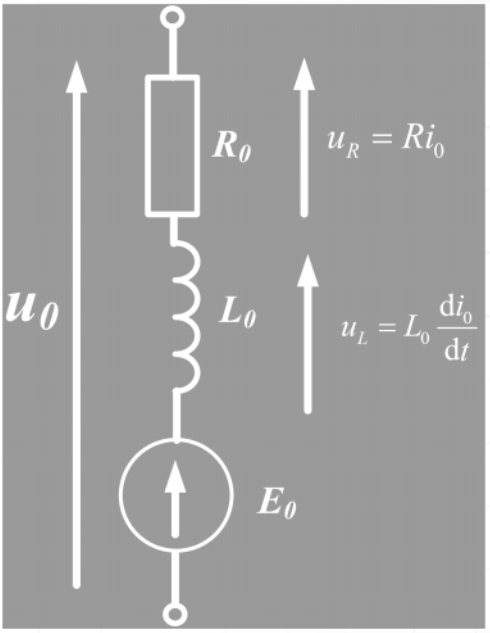
$$U_d = Ri_0 + L\frac{\Delta i_o}{t_p} + E_0$$

Kiedy tranzystor wyłączony:

$$0 = Ri_0 + L\frac{\Delta i_o}{t_w} + E_0$$

Oscylacje prądu:

$$\Delta I_0 = \frac{U_d}{f_0 L_0}\gamma(1-\gamma)$$



Przetworniki DC/DC

Prądy nieciągłe

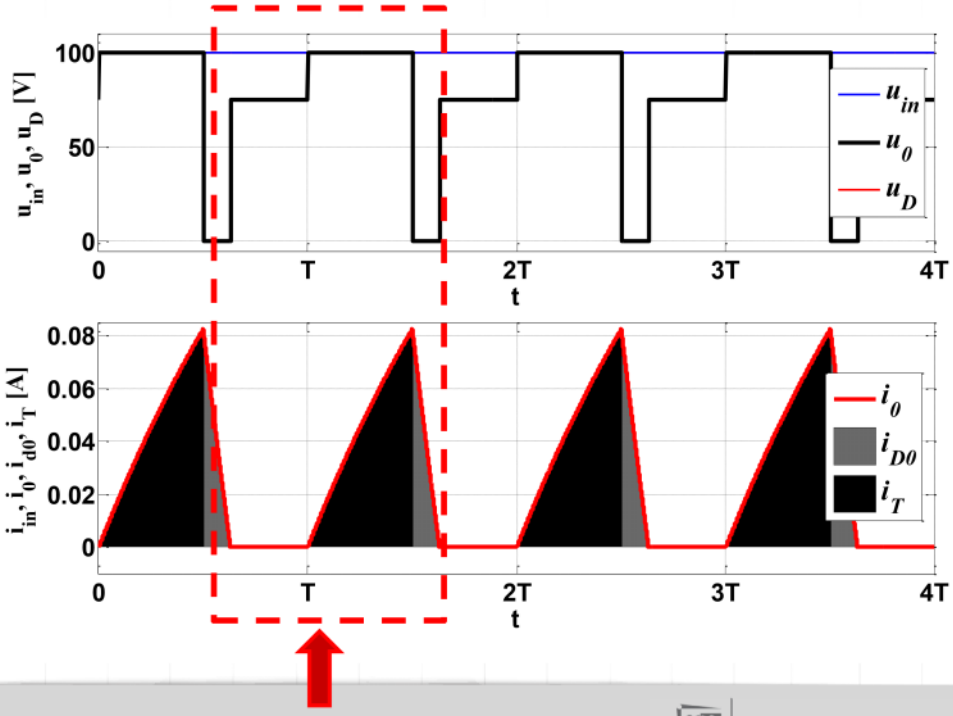
Prąd nieciągły:

$$I_0 < 0.5\Delta I_o$$

Prąd nieciągły:

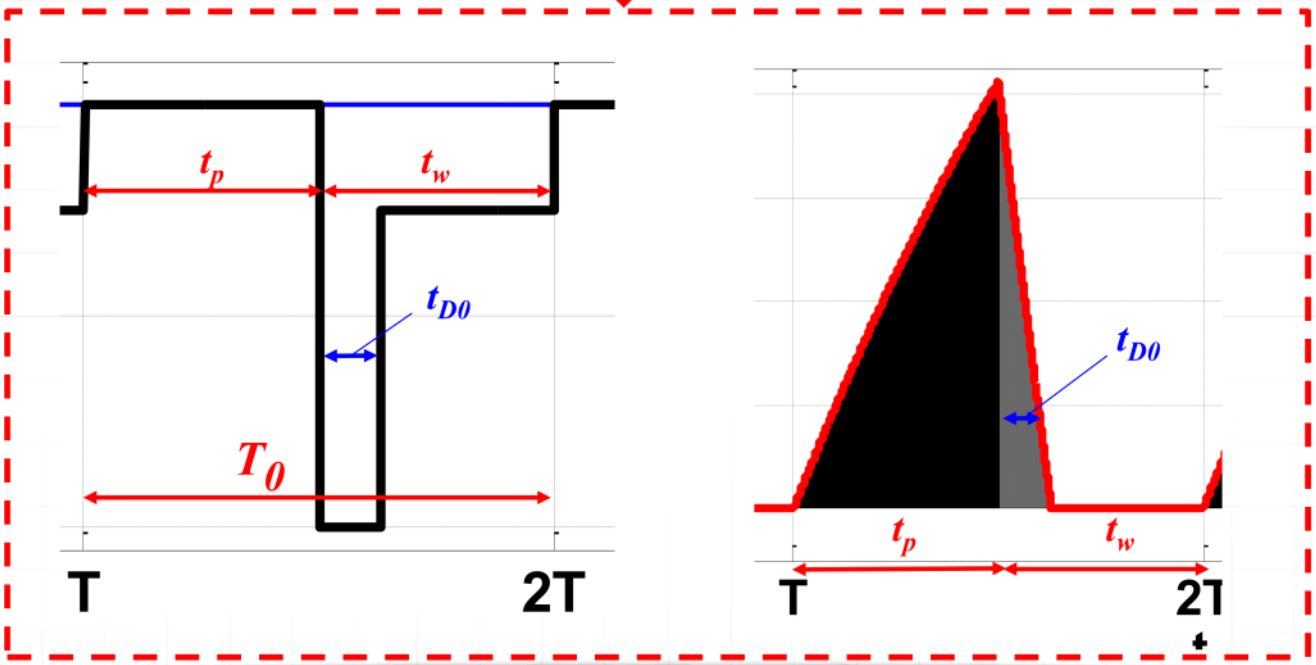
$$\frac{I_0}{I_{sc}} < \frac{\gamma(1-\gamma)}{2T_E f_o},$$

$$I_{sc} = \frac{U_d}{R_0}$$



Przetworniki DC/DC

Prądy nieciągłe



Przetworniki DC/DC

Prądy nieciągłe

Wartość średnia prądu wyjściowego

$$I_0 = \frac{U_d (U_d - U_0)\gamma^2}{2U_0 L_0 f_0}$$

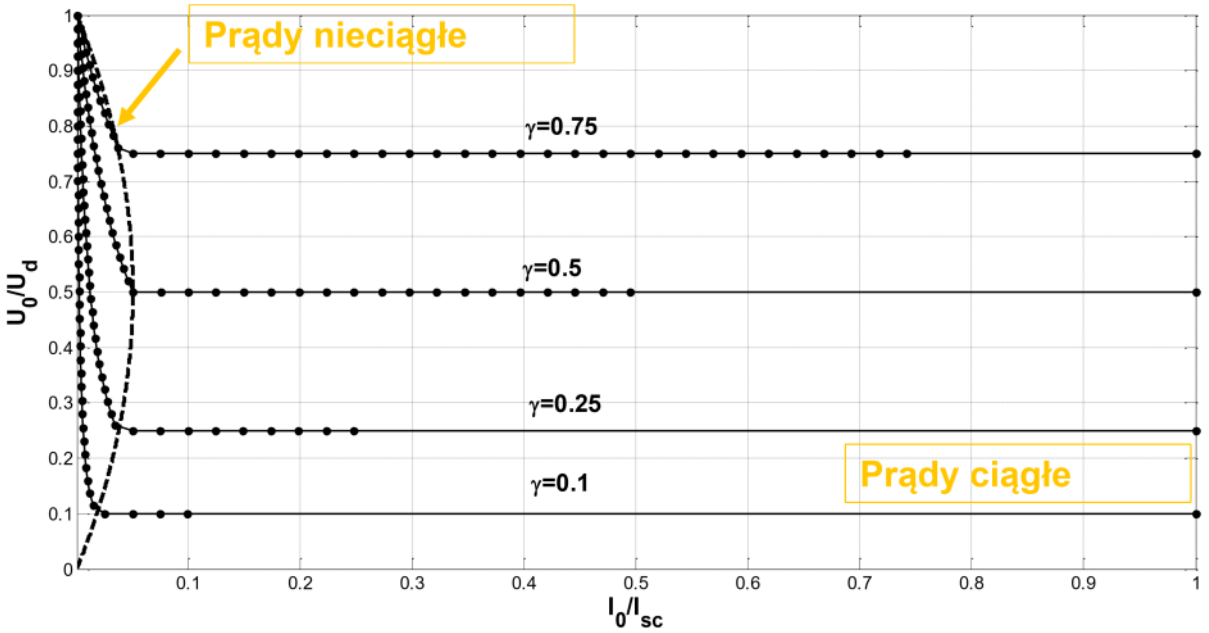
Wartość względna prądu wyjściowego

$$\frac{I_0}{I_{sc}} = \frac{\gamma^2}{2 f_0 T_E}\left(\left(\frac{U_0}{U_d}\right)^{-1} - 1\right)$$ (ch-ka wyjściowa)

Wrocław University of Science and Technology

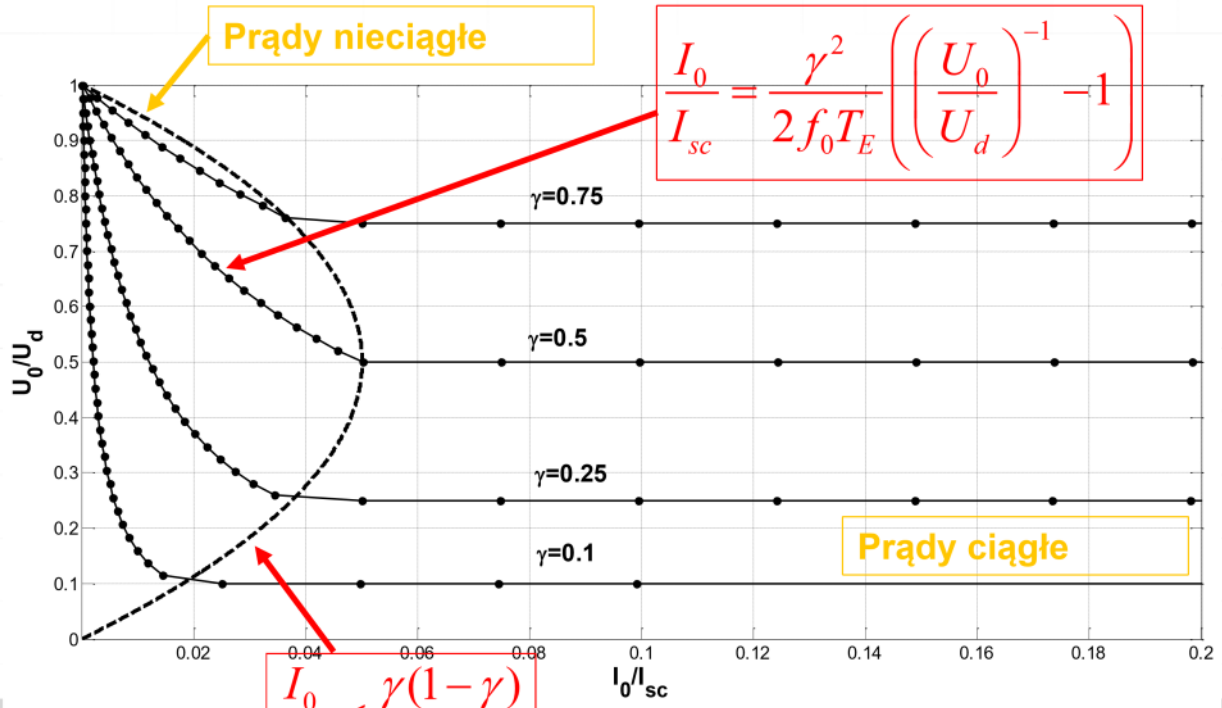
Przetworniki DC/DC

Ch-ki wyjściowe



Przetworniki DC/DC

Ch-ki wyjściowe



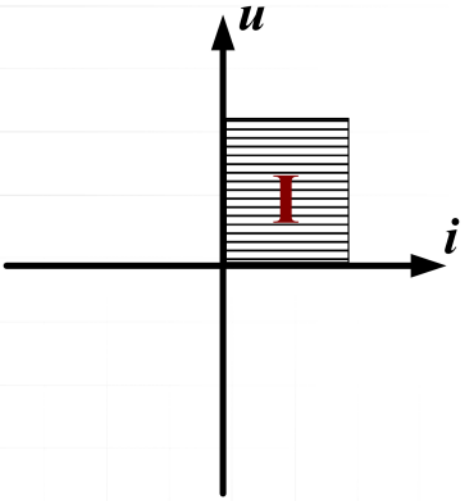
$$\frac{I_0}{I_{sc}} = \frac{\gamma^2}{2 f_0 T_E}\left(\left(\frac{U_0}{U_d}\right)^{-1} - 1\right)$$

$$\frac{I_0}{I_{sc}} < \frac{\gamma(1-\gamma)}{2 T_E f_o}$$

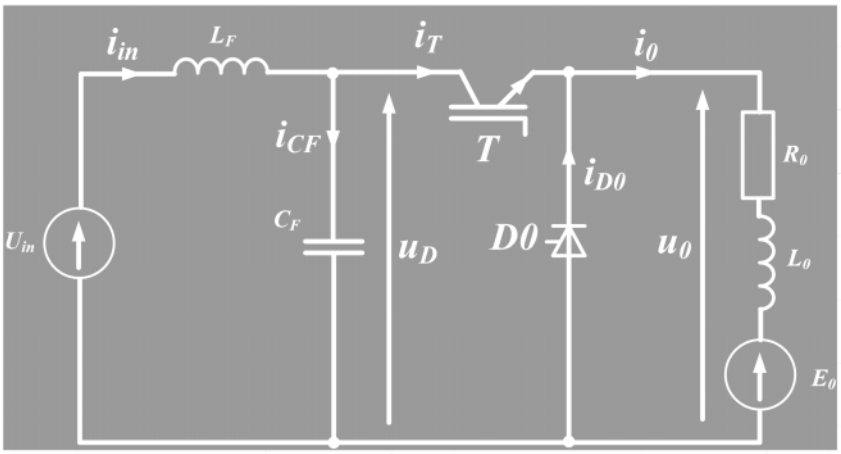
Przetworniki DC/DC

Przetwornik jedno-kwadrantowy

u-i charakterystyka:



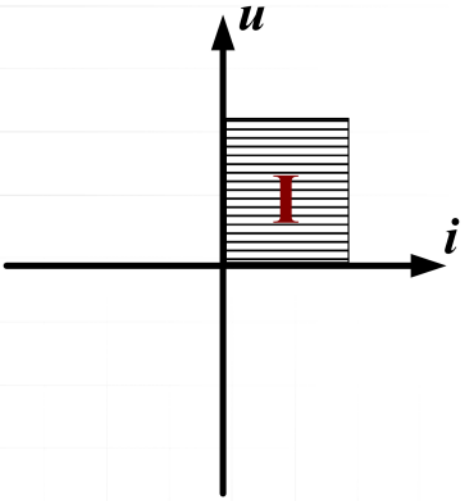
Schemat blokowy:



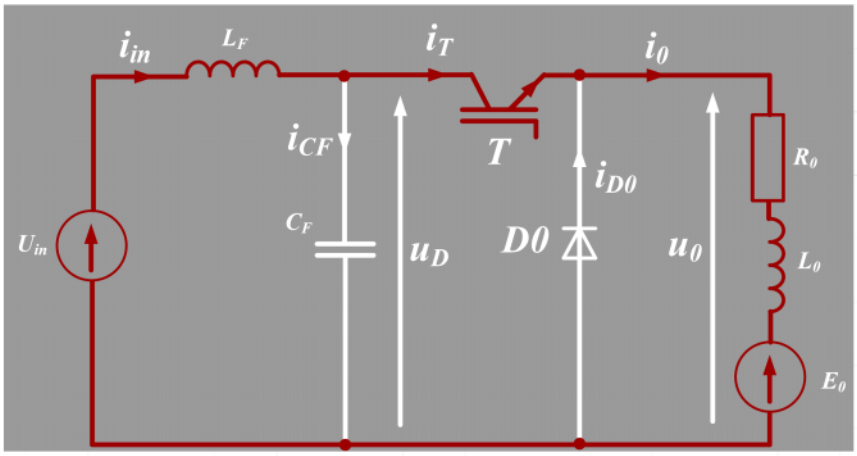
Przetworniki DC/DC

Przetwornik jedno-kwadrantowy

u-i ch-ka:



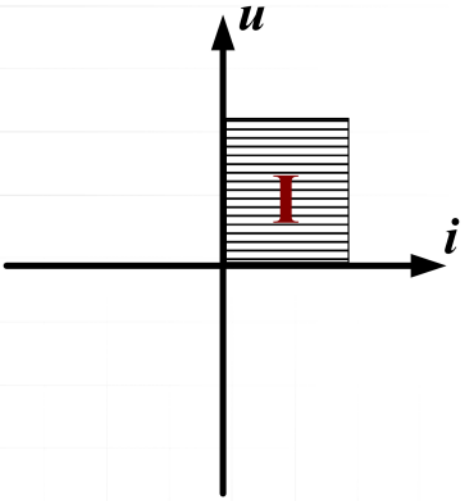
Schemat blokowy:



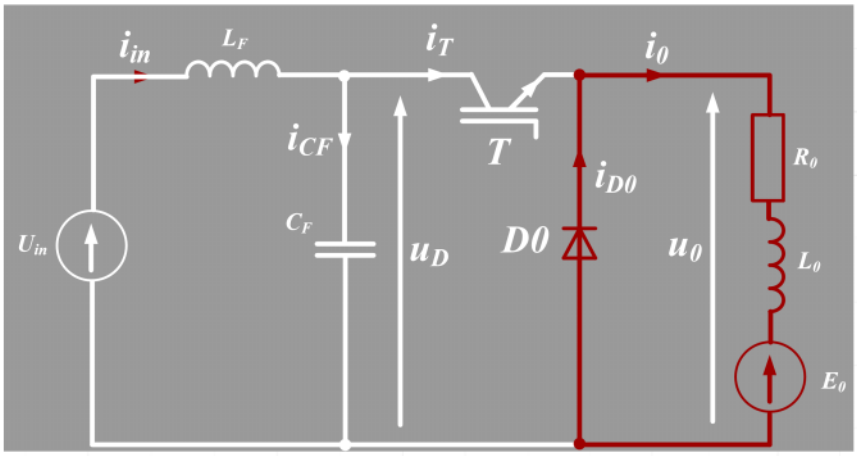
Przetworniki DC/DC

Przetwornik jedno-kwadrantowy

u-i ch-ka:



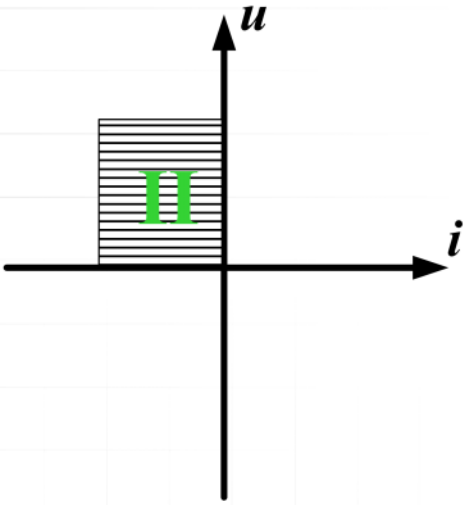
Schemat blokowy:



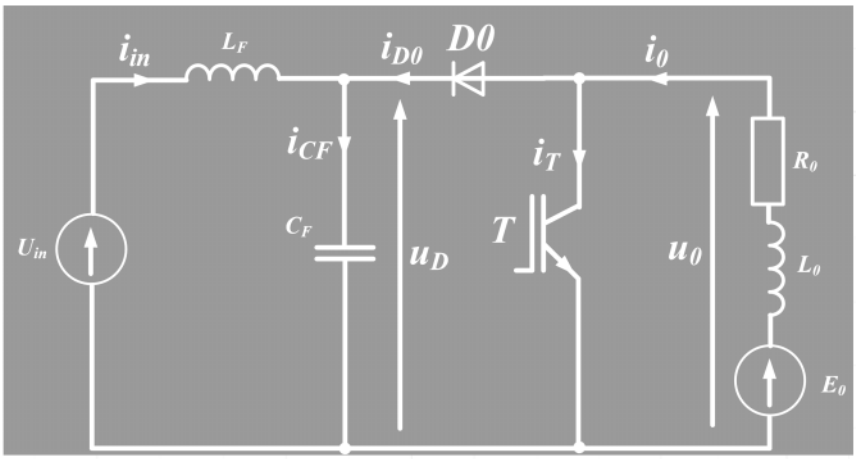
Przetworniki DC/DC

Przetwornik jedno-kwadrantowy

u-i ch-ka:

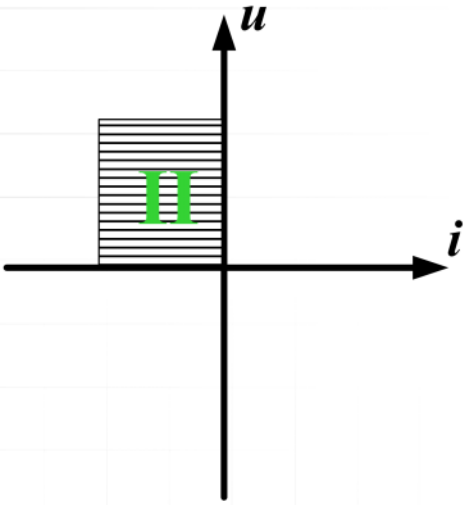


Schemat blokowy

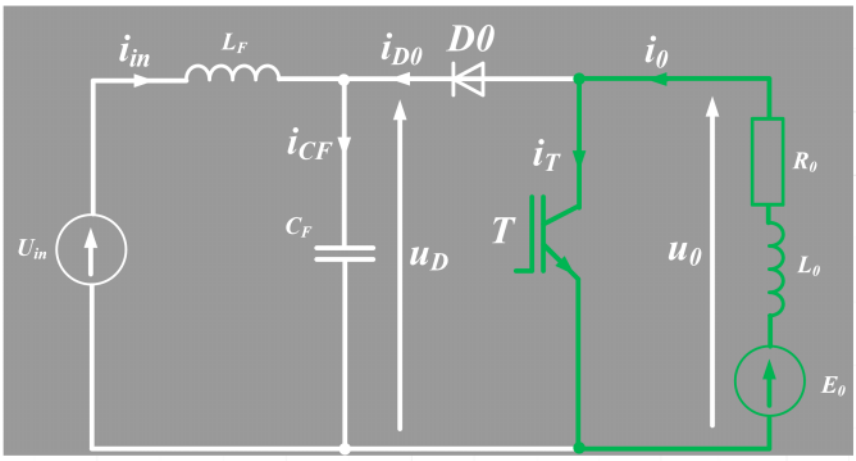


Przetwornik jedno-kwadrantowy

u-i ch-ka:



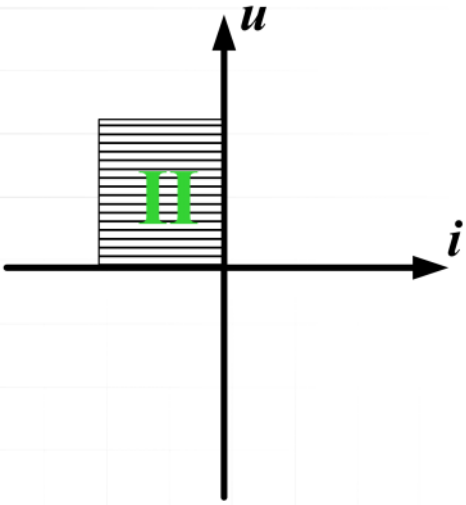
Schemat blokowy



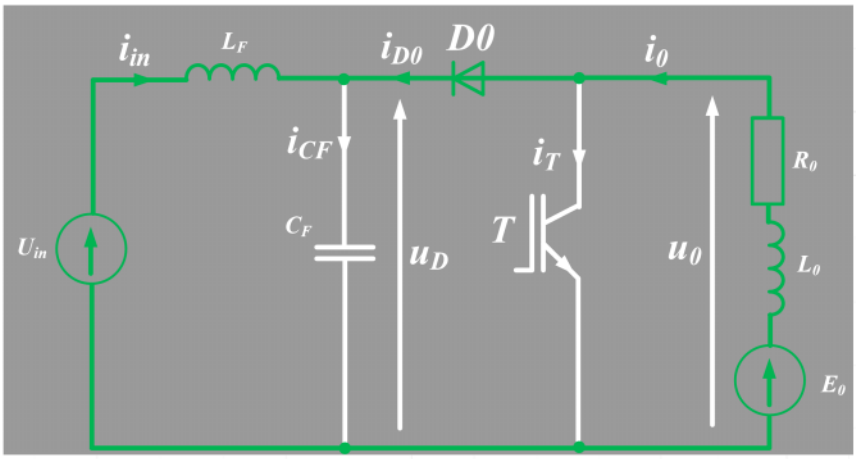
Przetworniki DC/DC

Przetwornik jedno-kwadrantowy

u-i ch-ka:



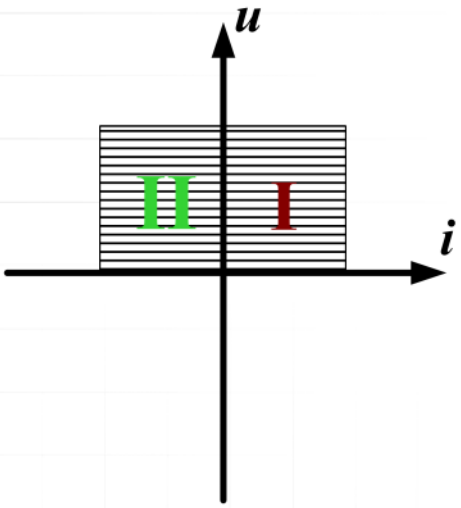
Schemat blokowy



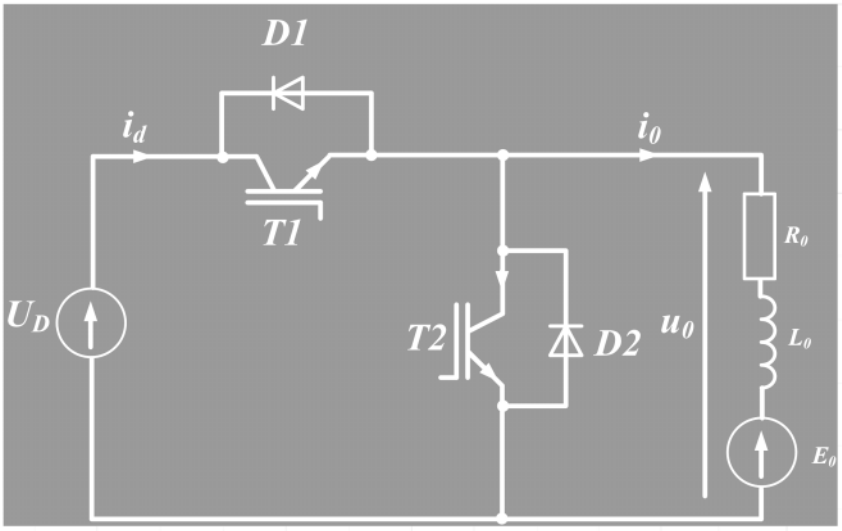
Przetworniki DC/DC

Przetwornik dwu-kwadrantowy

u-i ch-ka:



Schemat blokowy



Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

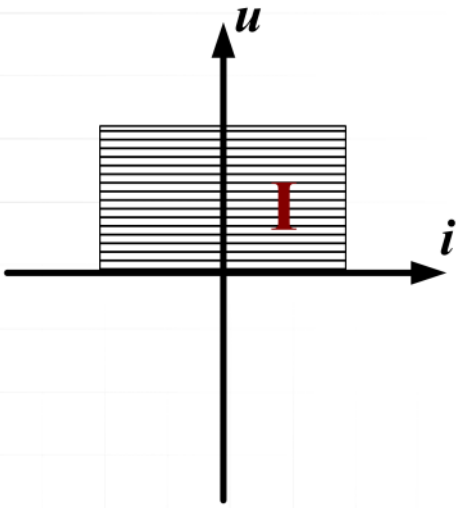
Przetwornik dwu-kwadrantowy

$$U_0 = \gamma U_d$$

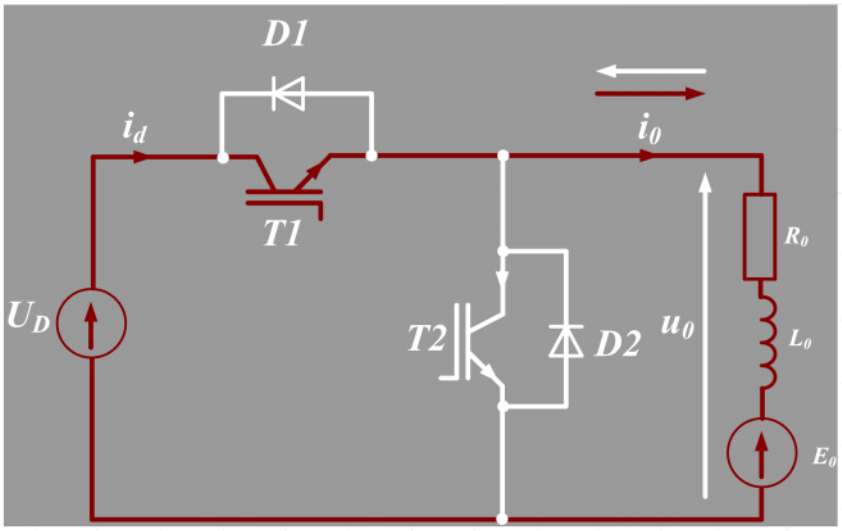
$$I_0 = \frac{\gamma U_d - E_0}{R_0}$$

$$I_0 > 0, \text{when } E_0 < U_d$$

u-i ch-ka:



Schemat blokowy



Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

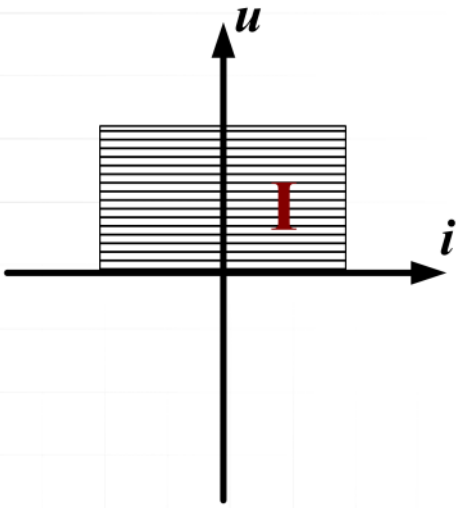
$$U_0 = \gamma U_d$$

$$I_0 = \frac{\gamma U_d - E_0}{R_0}$$

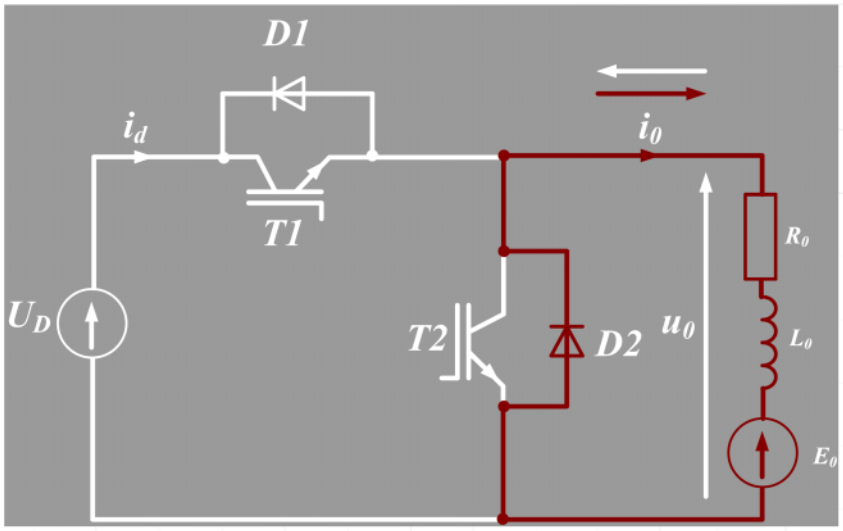
$$I_0 > 0, \text{when } E_0 < U_d$$

Przetwornik dwu-kwadrantowy

u-i ch-ka:



Schemat blokowy:



Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

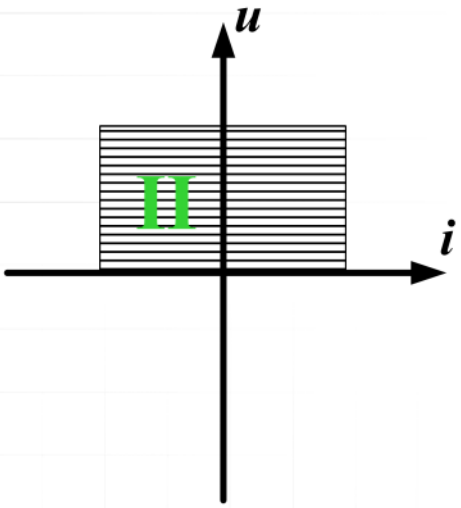
$$U_0 = \gamma U_d$$

$$I_0 = \frac{\gamma U_d - E_0}{R_0}$$

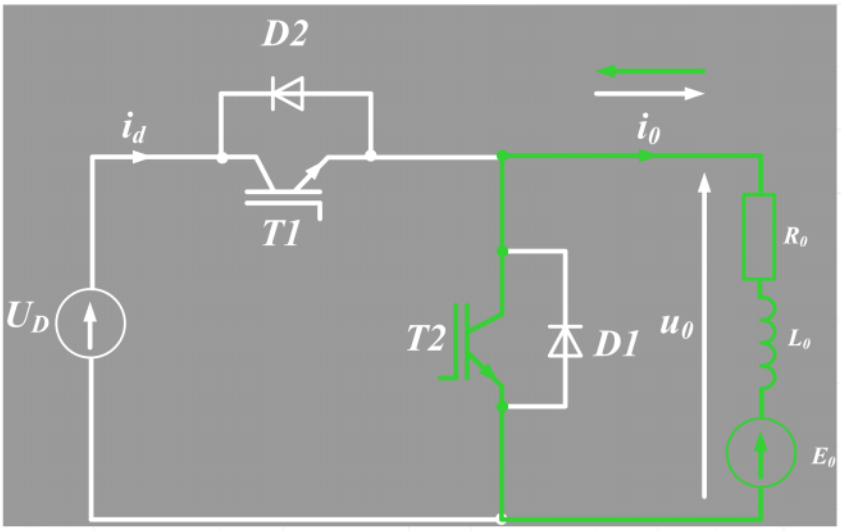
$$I_0 < 0, \text{when } E_0 > \gamma U_d$$

Przetwornik dwu-kwadrantowy

u-i ch-ka:



Schemat blokowy



Przetworniki DC/DC

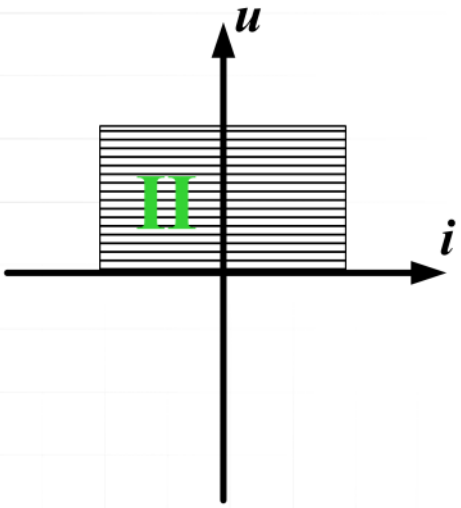
$$U_0 = \gamma U_d$$

$$I_0 = \frac{\gamma U_d - E_0}{R_0}$$

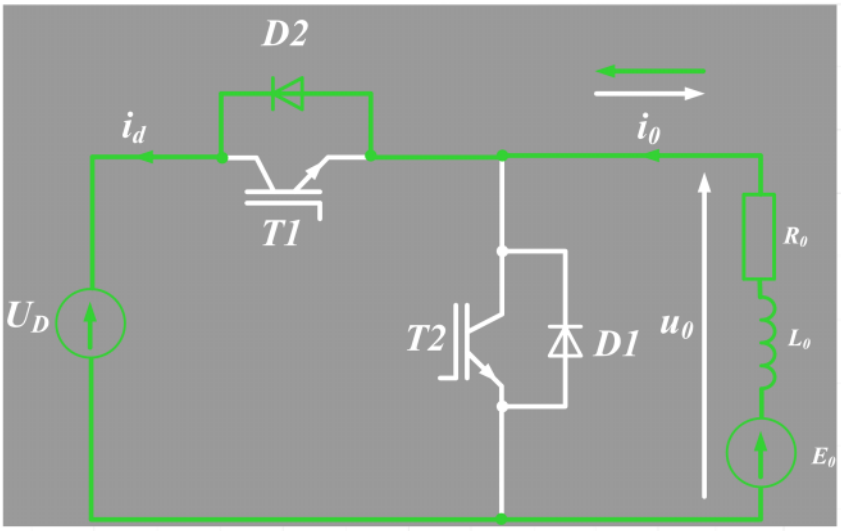
$$I_0 < 0, \text{when } E_0 > \gamma U_d$$

Przetwornik dwu-kwadrantowy

u-i ch-ka:



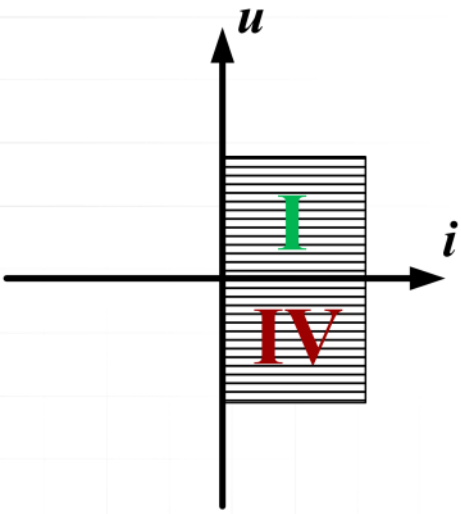
Schemat blokowy:



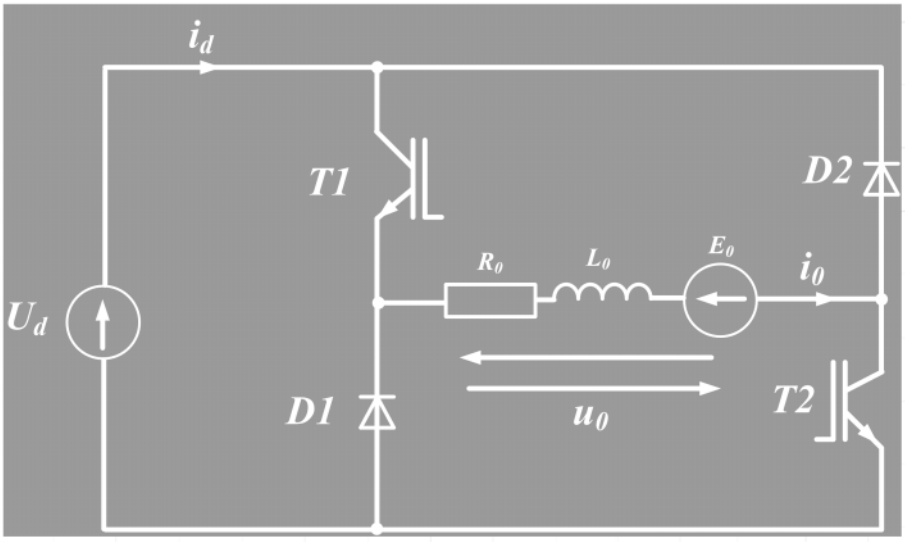
Przetworniki DC/DC

Przetwornik dwu-kwadrantowy

u-i ch-ka:



Schemat blokowy:

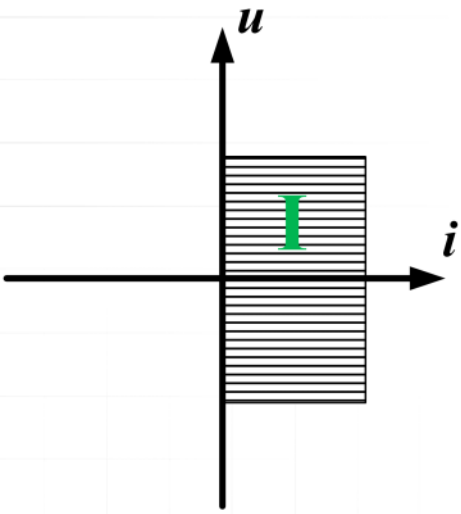


Wrocław University of Science and Technology

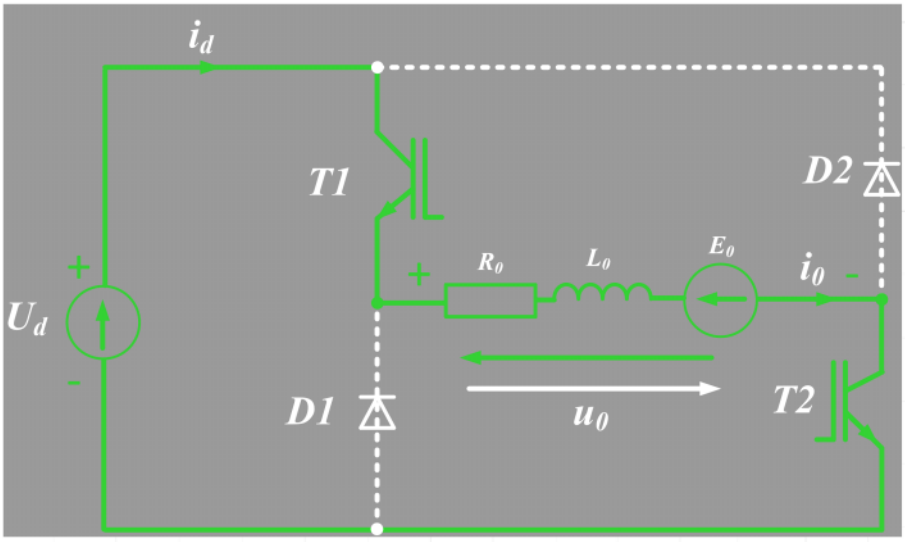
Przetworniki DC/DC

Przetwornik dwu-kwadrantowy

u-i ch-ka:



Schemat blokowy:

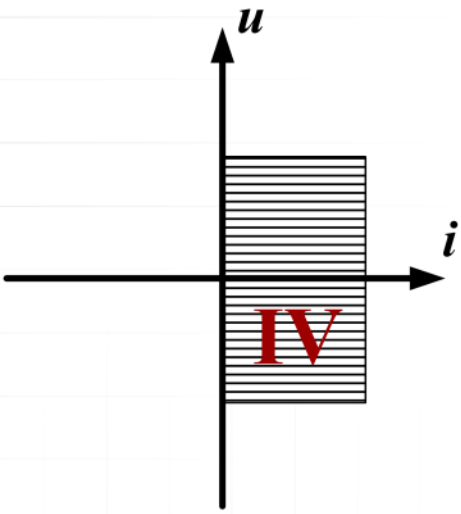


Wrocław University of Science and Technology

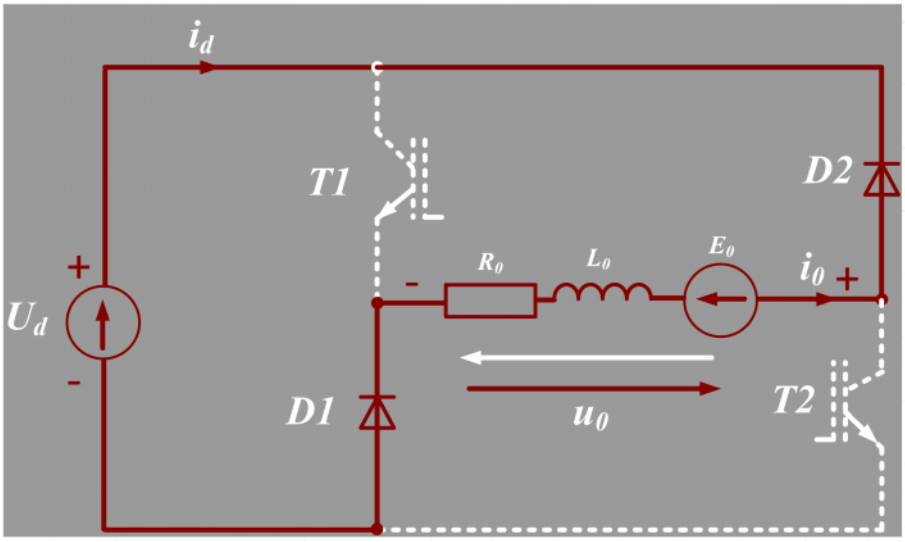
Przetworniki DC/DC

Przetwornik dwu-kwadrantowy

u-i ch-ka:



Schemat blokowy:

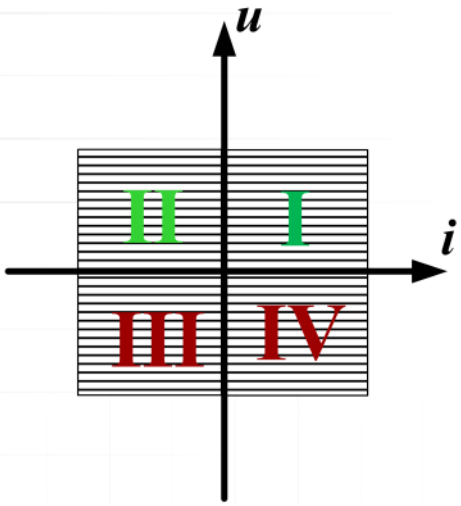


Wrocław University of Science and Technology

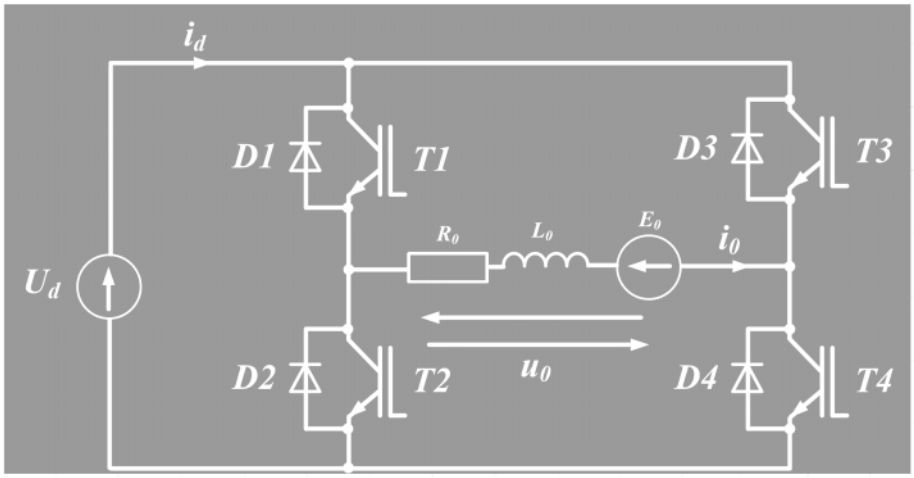
Przetworniki DC/DC

Przetwornik cztero-kwadrantowy

u-i ch-ka:



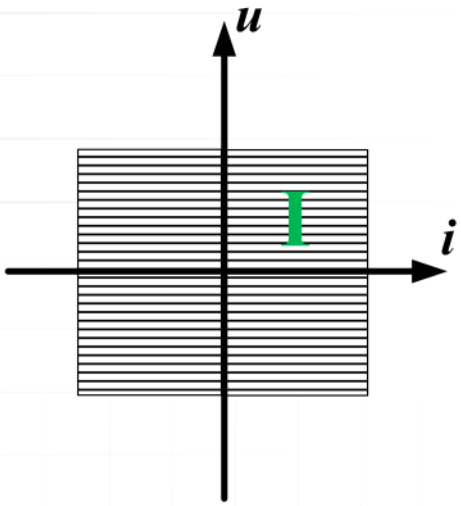
Schemat blokowy:



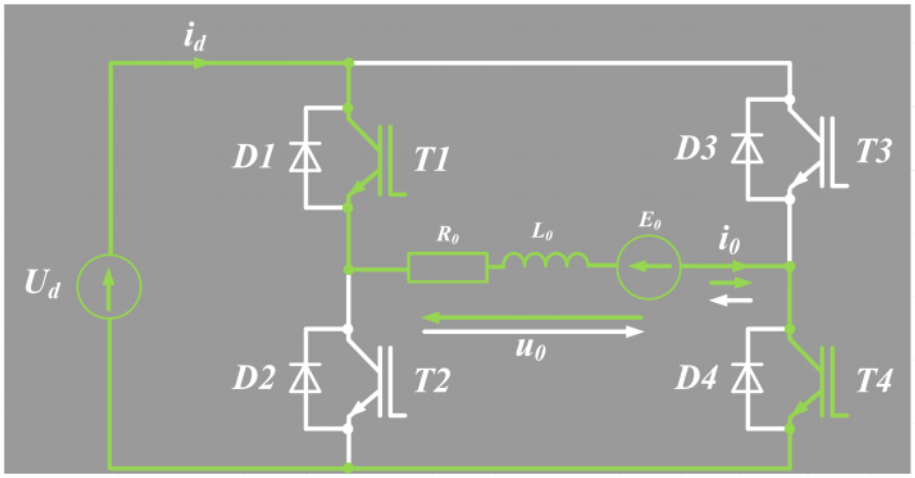
Przetworniki DC/DC

Przetwornik cztero-kwadrantowy

u-i ch-ka:



Schemat blokowy:

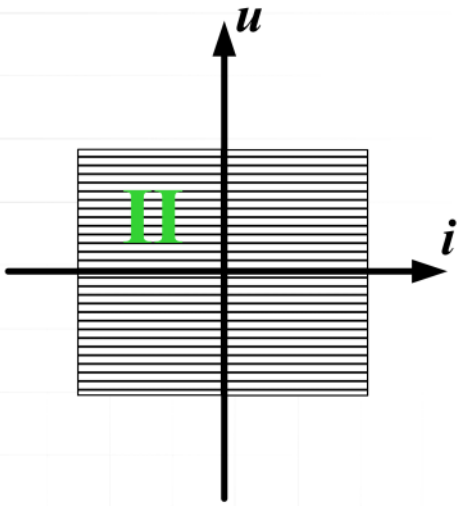


(Bipolar voltage switching)

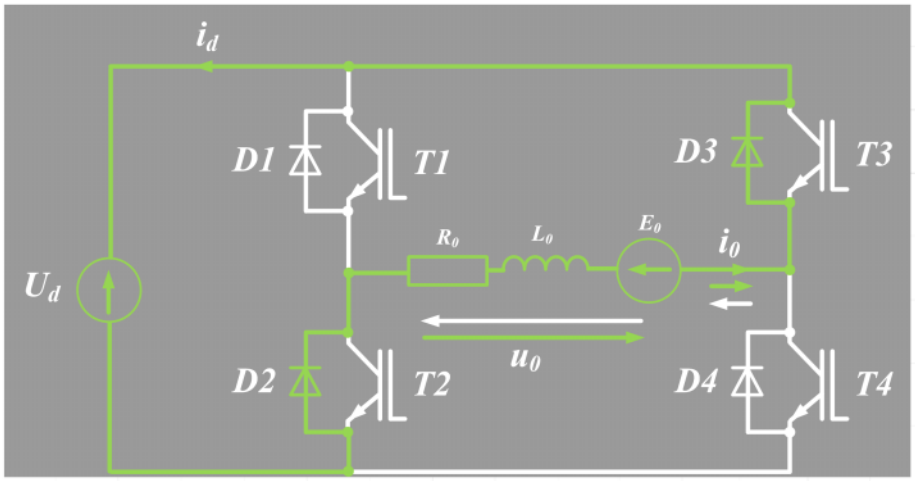
Przetworniki DC/DC

Przetwornik cztero-kwadrantowy

u-i ch-ka:



Schemat blokowy:

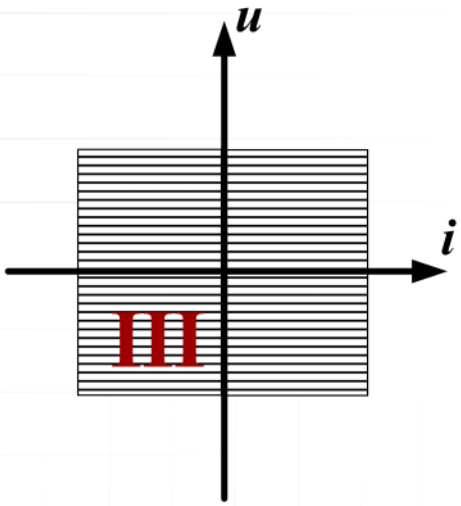


(Bipolar voltage switching)

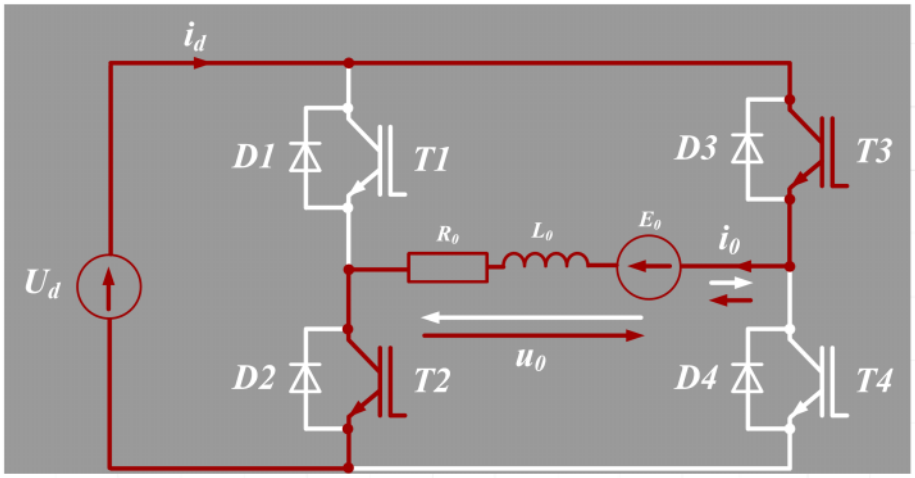
Przetworniki DC/DC

Przetwornik cztero-kwadrantowy

u-i ch-ka:



Schemat blokowy:

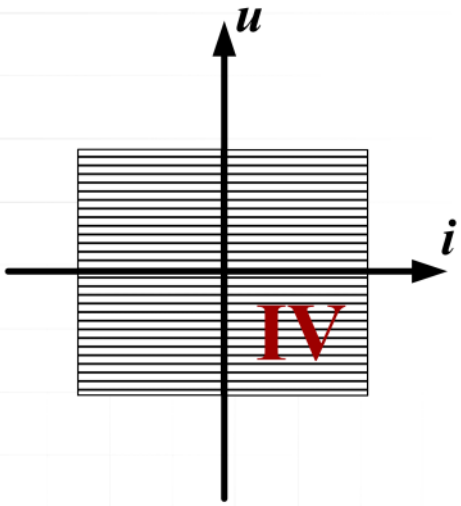


(Bipolar voltage switching)

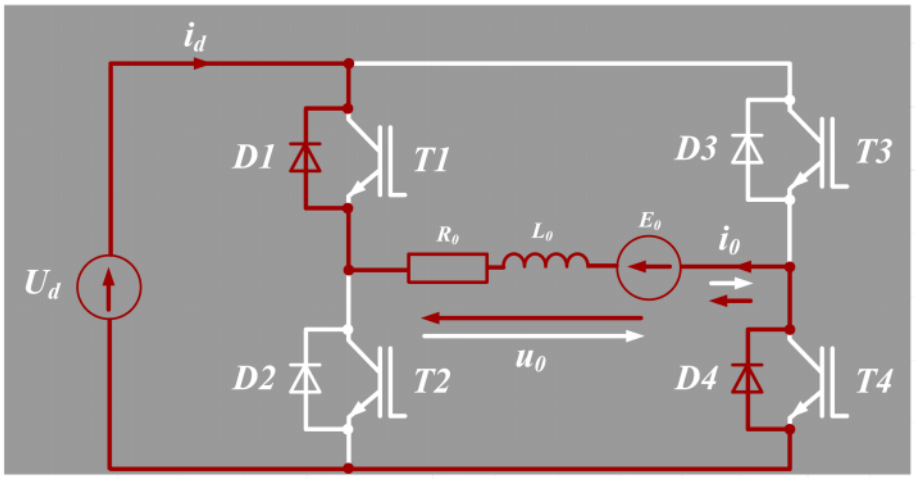
Przetworniki DC/DC

Przetwornik cztero-kwadrantowy

u-i ch-ka:



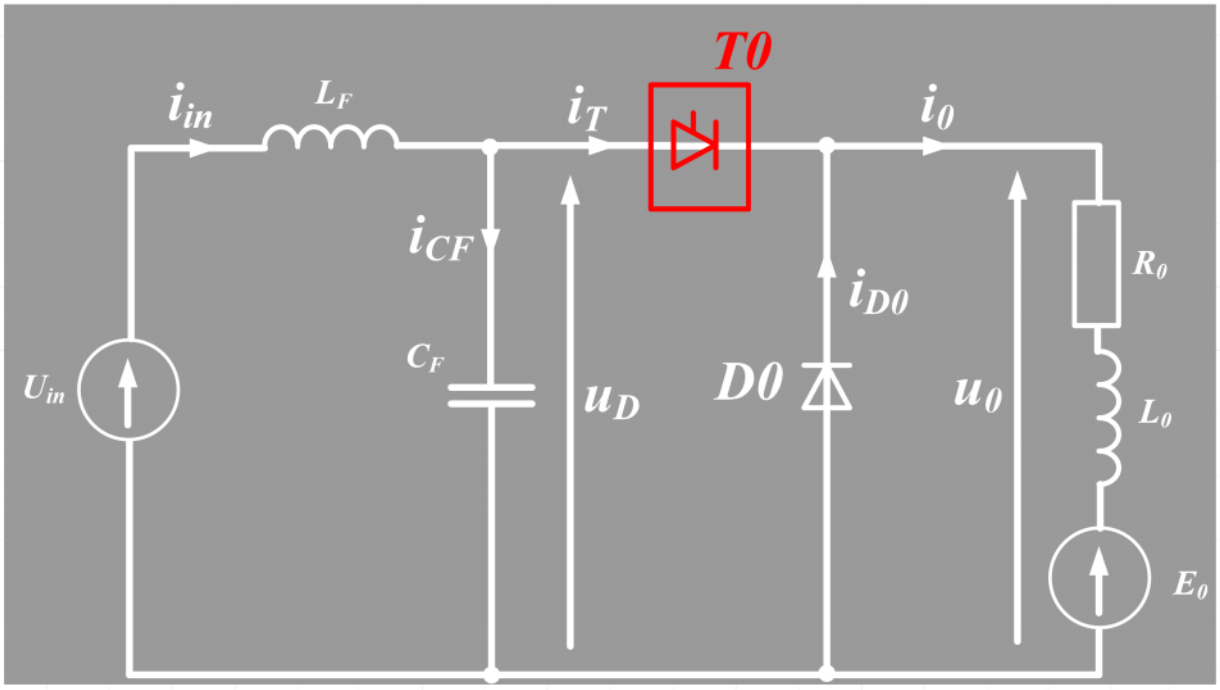
Schemat blokowy:



(Bipolar voltage switching)

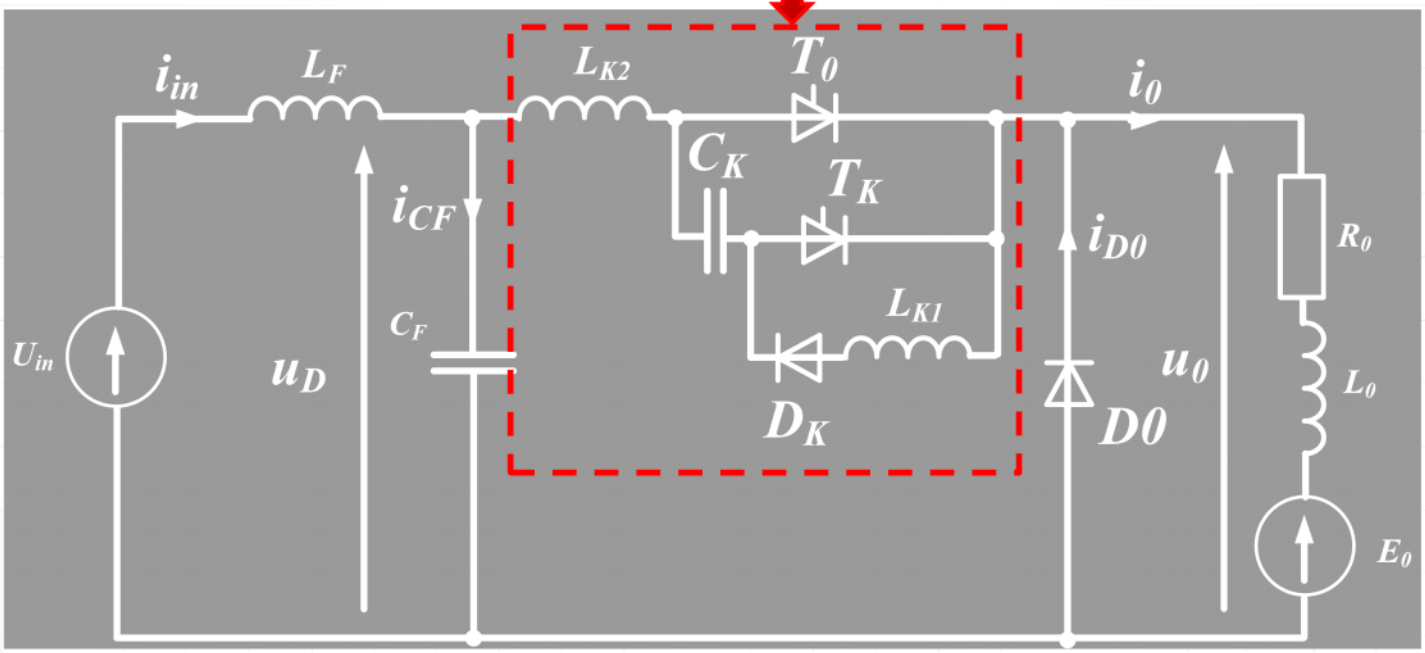
Przetworniki DC/DC

Przetwornik DC/DC obniżający napięcie z tyrystorem



Przetworniki DC/DC

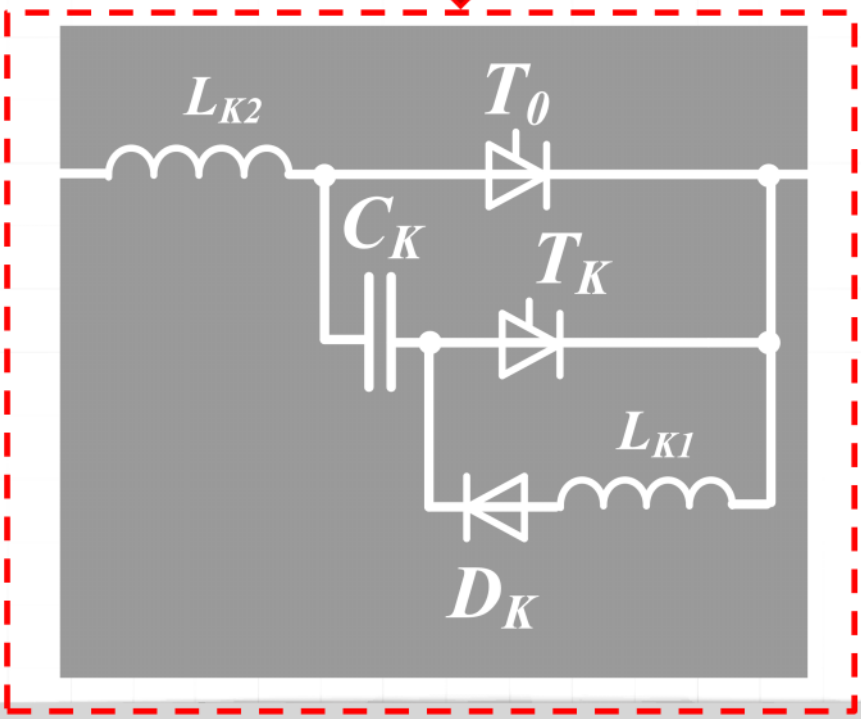
Przetwornik DC/DC obniżający napięcie z tyrystorem



Wrocław University of Science and Technology

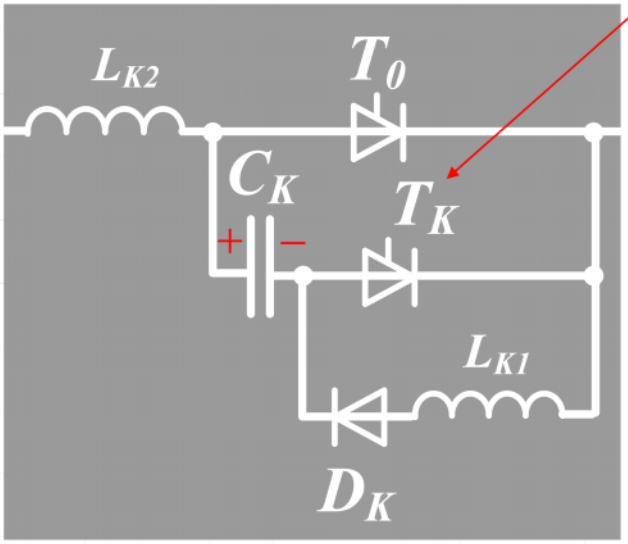
Przetworniki DC/DC

Przetwornik DC/DC obniżający napięcie z tyrystorem



Przetworniki DC/DC

Komutacja wymuszona tyrystora

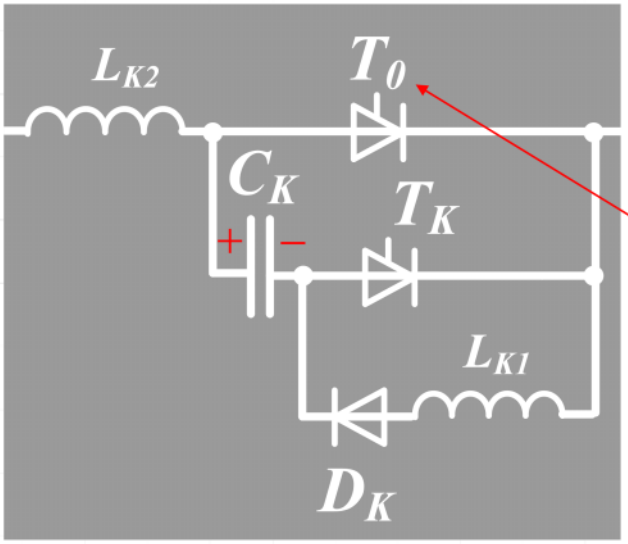


Krok 1. – T_K jest załączone (ładowanie wstępne kondensatora C_k) (L_{K2}-C_K-T_K-$R_0L_0E_0$-L_{K2}):

$$u_{CK} \approx U_d$$

Przetworniki DC/DC

Komutacja wymuszona tyrystora



Krok 2a – załączenie T_0 (T_k – wyłączone, komutacja z D_0 na T_0)

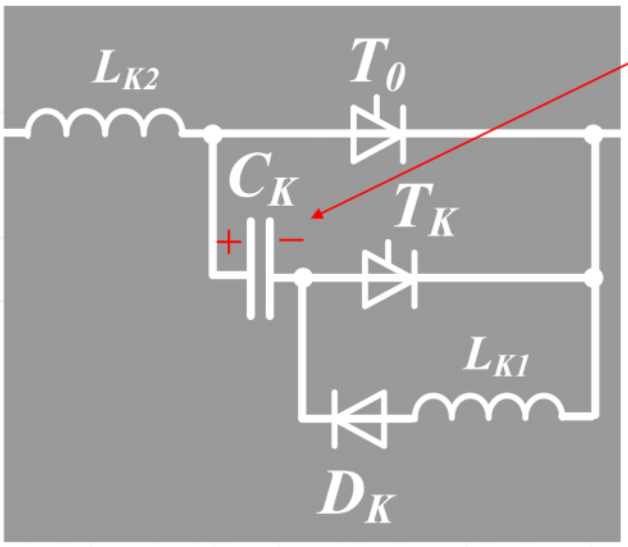
Czas komutacji:

$$t_{0k} = \frac{U_d}{L_{k2}}$$

Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Komutacja wymuszona tyrystora



Krok 2b.

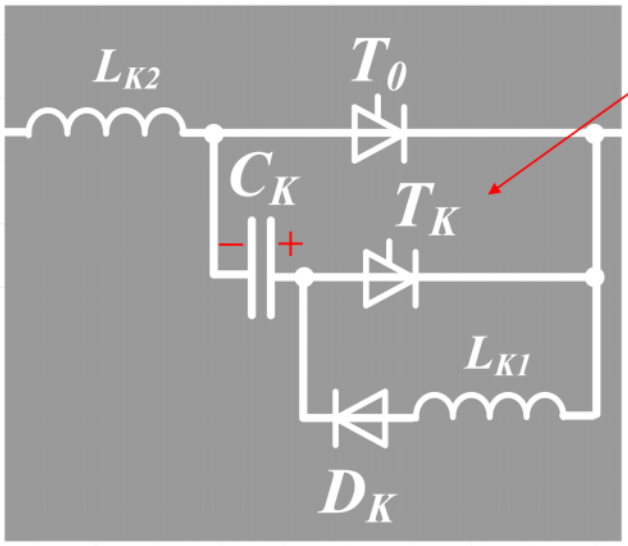
$$i_{D0} = 0$$

$$i_0 = i_{T0}$$

$$u_0 = u_c = U_d$$

Przetworniki DC/DC

Komutacja wymuszona tyrystora



Krok 2c. Obwód rezonansowy
(C_K-T_0-L_{K1}-D_K-C_K)

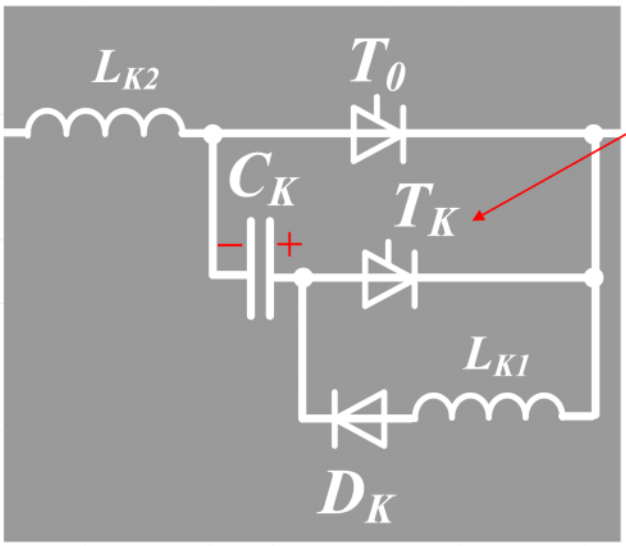
$$t_0 = \pi\sqrt{C_K L_{K1}}$$

$$I_{CK,max} = U_d\sqrt{\frac{C_K}{L_{K1}}}$$

$$u_c = -U_d$$

Przetworniki DC/DC

Komutacja wymuszona tyrystora



3. T_K załączone
(L_{K2}-C_K-T_K-$R_0L_0E_0$-L_{K2})

$$u_0 = U_d + u_{CK} \approx 2U_d$$

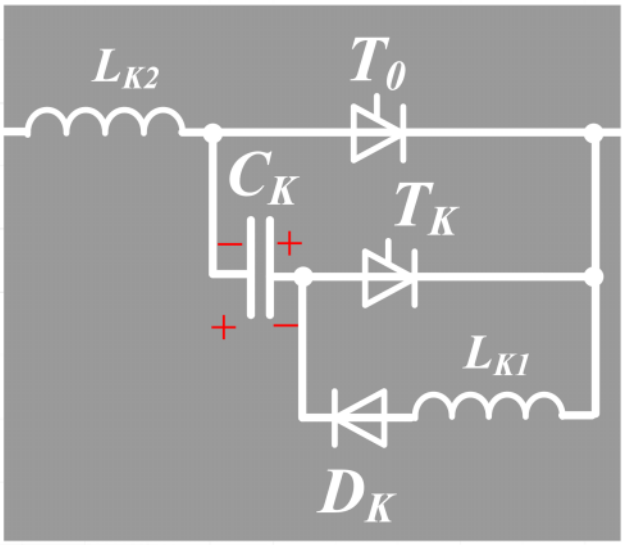
$$u_{T0} = -U_d$$

$$i_{CK} = -i_0$$

$$i_{T0} = 0$$

Przetworniki DC/DC

Komutacja wymuszona tyrystora



Krok 4.

$$u_{CK} \uparrow \mathrm{u}_o \downarrow$$

$$i_{CK} = -i_0$$

$$\Delta t = \frac{2U_d C_K}{I_0}$$

Krok 5. Powrót do stanu początkowego

$$u_0 = U_d$$

$$u_{CK} = U_d$$

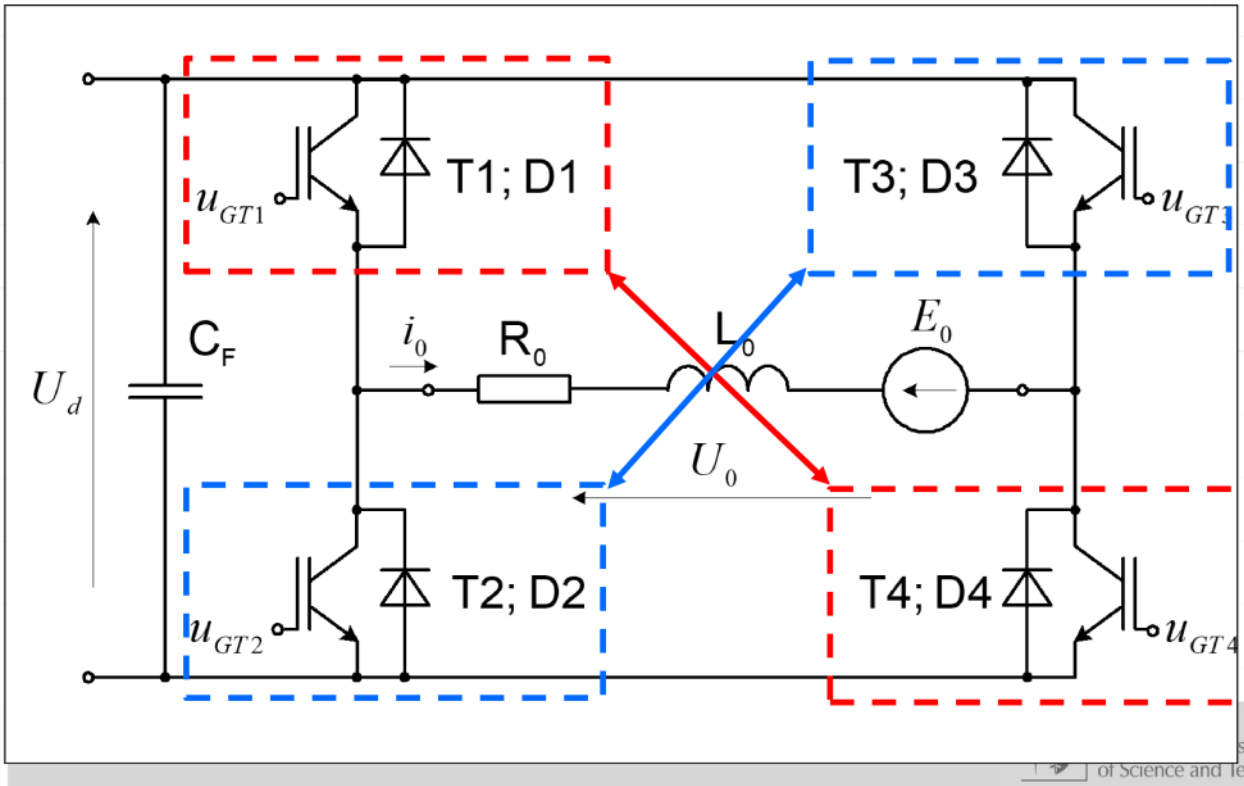
$$i_{CK} = 0$$

$$i_{T0} = 0$$

Przetworniki DC/DC

Sterowanie symetryczne

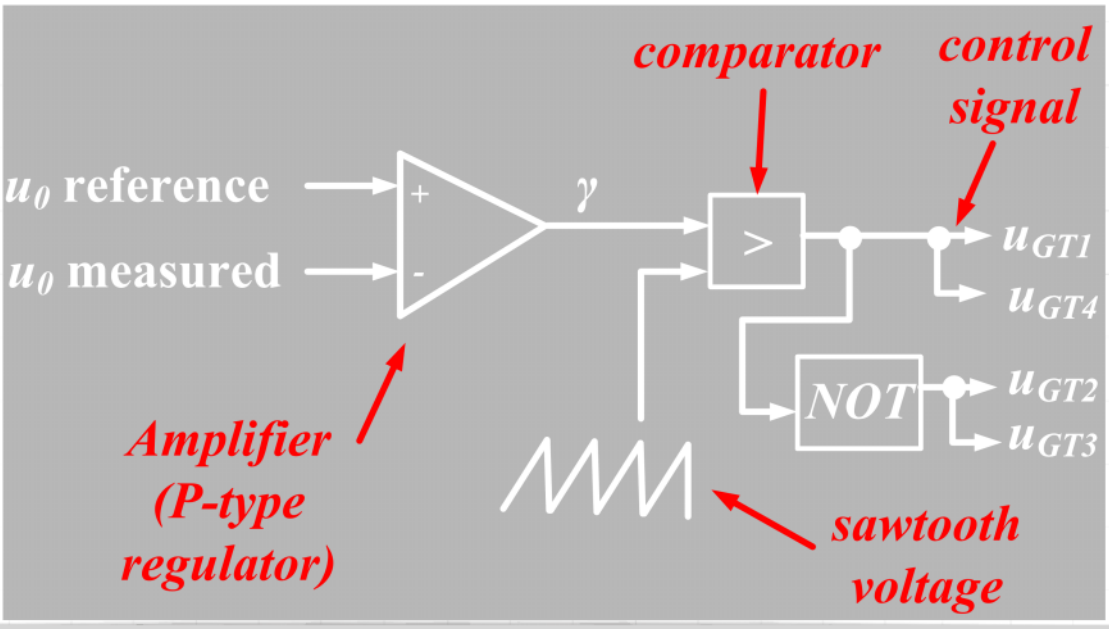
Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)



Przetworniki DC/DC

Sterowanie symetryczne, schemat blokowy

Sterowanie symetryczne

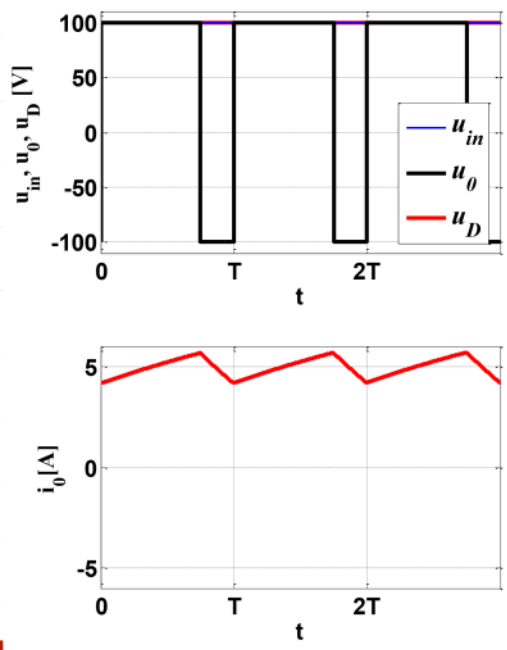


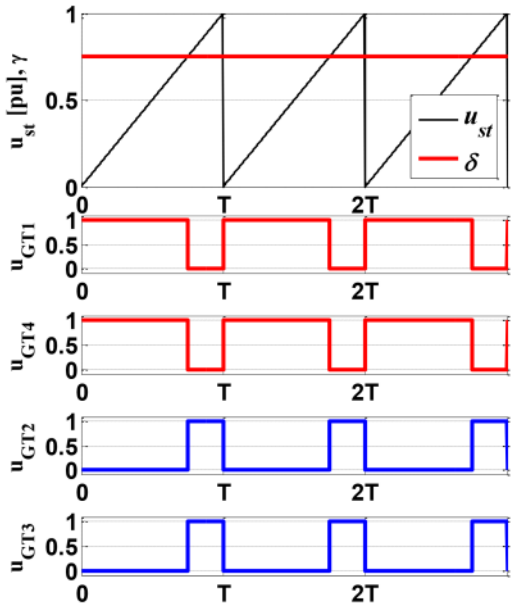
Przetworniki DC/DC

Sterowanie symetryczne

Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)

γ >0.5



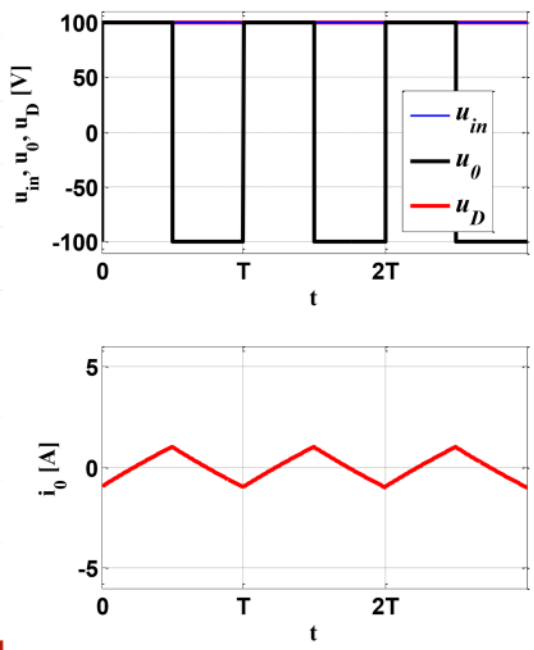


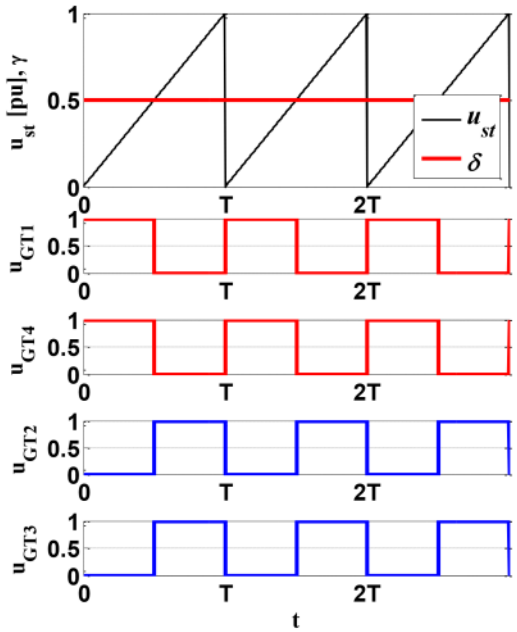
Przetworniki DC/DC

Sterowanie symetryczne

Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)

γ =0.5





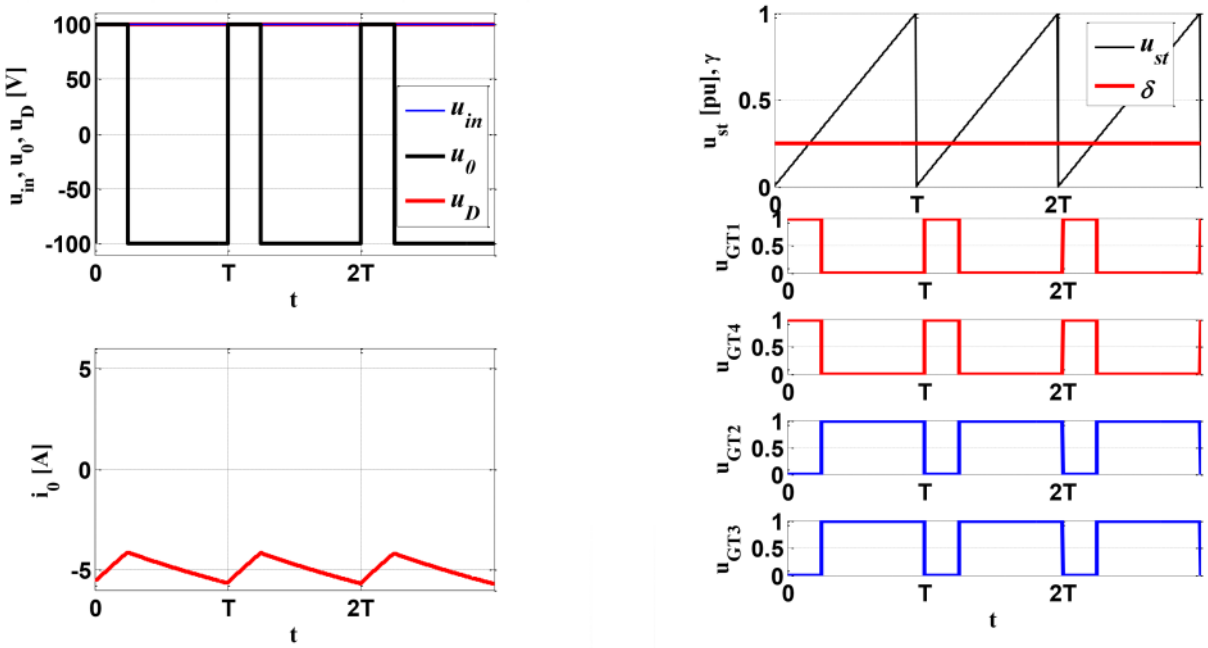
Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Sterowanie symetryczne

Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)

γ <0.5



Przetworniki DC/DC

Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)

Sterowanie symetryczne

Napięcie średnie

$$U_0 = U_d \frac{t_p - t_w}{T_0} = \frac{2t_p - T_0}{T_0} = U_d(2\gamma - 1)$$

Średnia wartość prądu:

$$I_0 = \frac{U_0 - E_0}{R_0} = \frac{U_d(2\gamma - 1) - E_0}{R_0}$$

Oscylacje prądu:

$$\Delta I_0 = \frac{2U_d}{f_0 L_0}\gamma(1-\gamma)$$

Wrocław University of Science and Technology

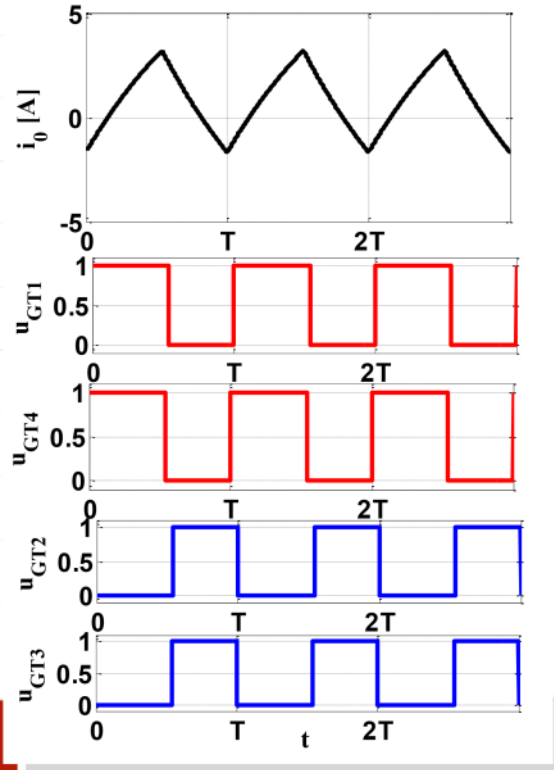
Przetworniki DC/DC

Sterowanie symetryczne - modyfikacja

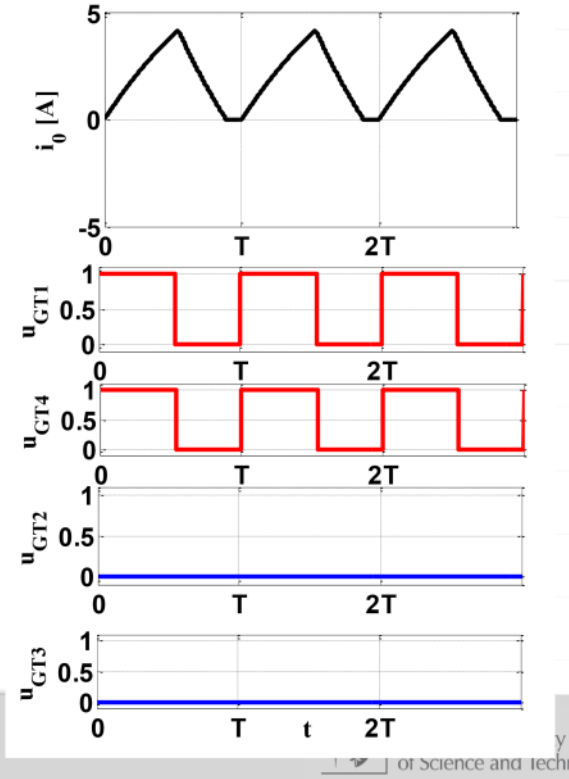
$$I_0 < \frac{1}{2}\Delta I_0 \Rightarrow u_{GT2}, u_{GT3} = 0$$

$$\text{or} \quad I_0 > -\frac{1}{2}\Delta I_0, \Rightarrow u_{GT1}, u_{GT4} = 0$$

Bez modyfikacji



Z modyfikacją



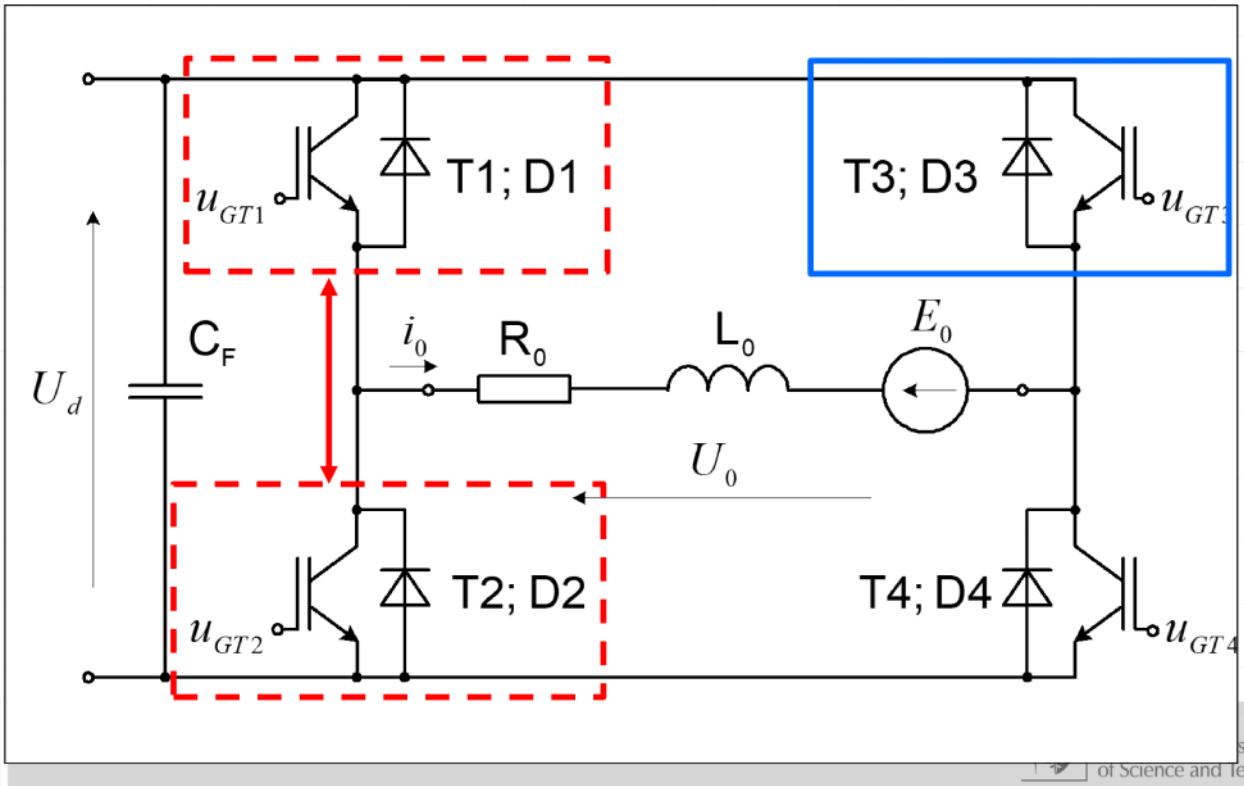
67

of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Sterowanie niesymetryczne

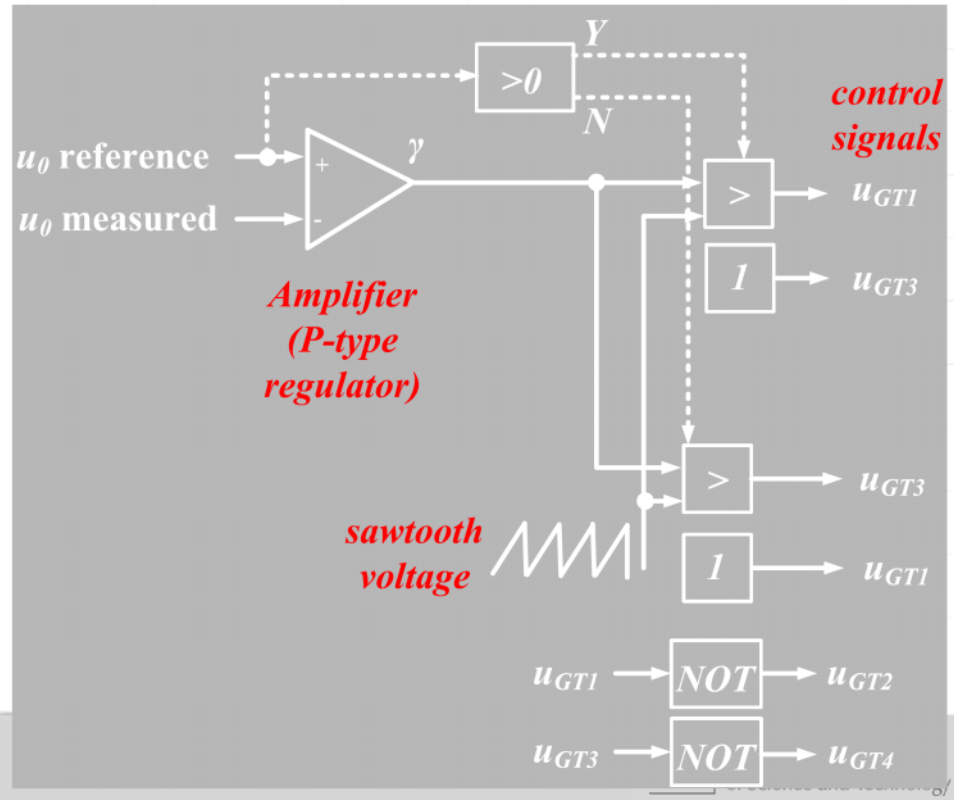
Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)



Przetworniki DC/DC

Sterowanie niesymetryczne, schemat blokowy

Sterowanie niesymetryczne

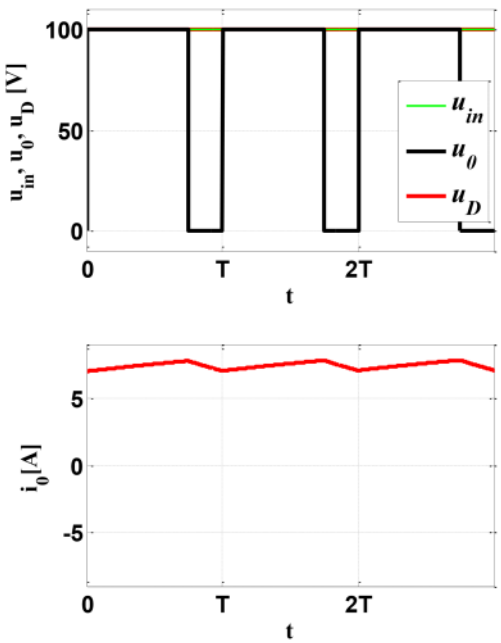


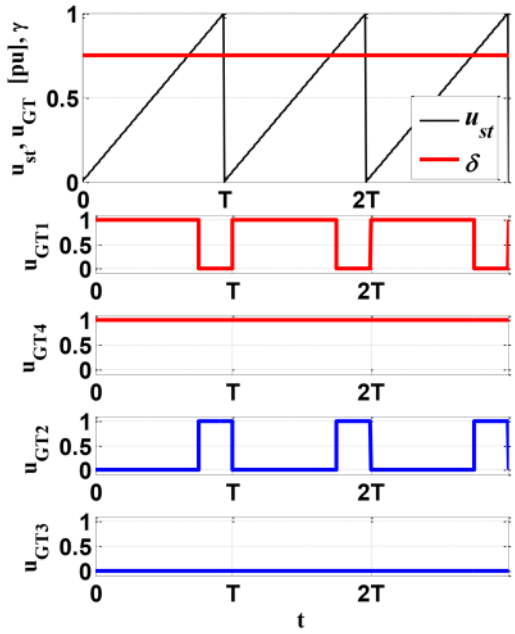
Przetworniki DC/DC

Sterowanie niesymetryczne

Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)

γ >0.5, $U_{0,ref}$>0





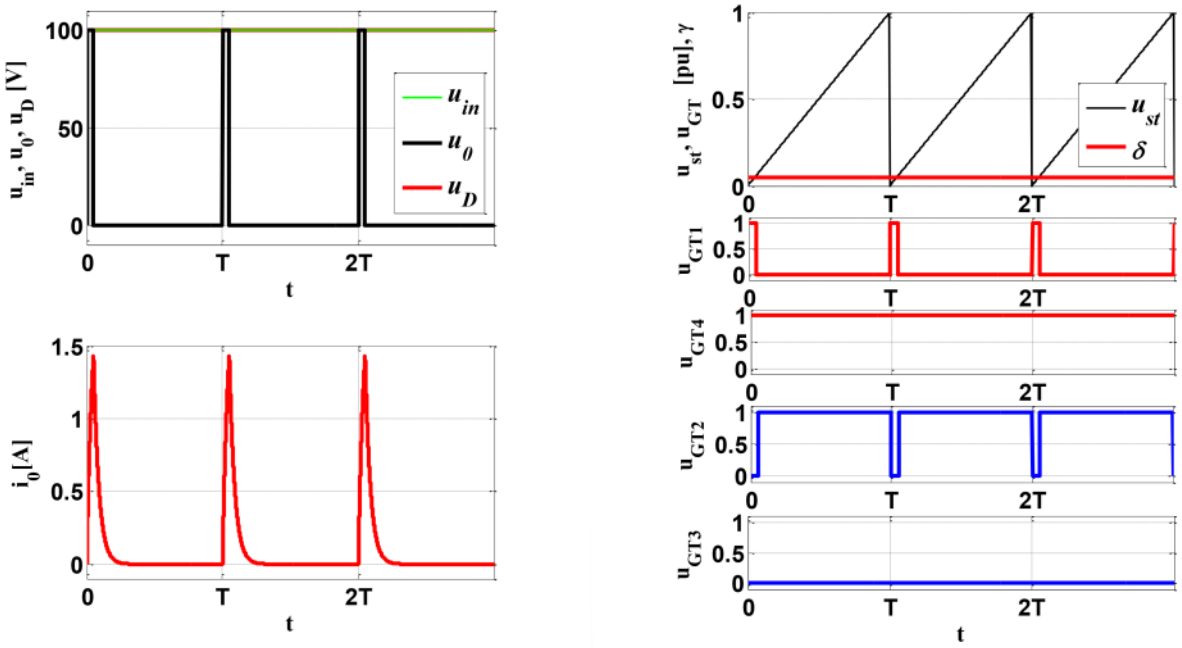
Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Sterowanie niesymetryczne

Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)

γ =0.05, $U_{0,ref}$>0



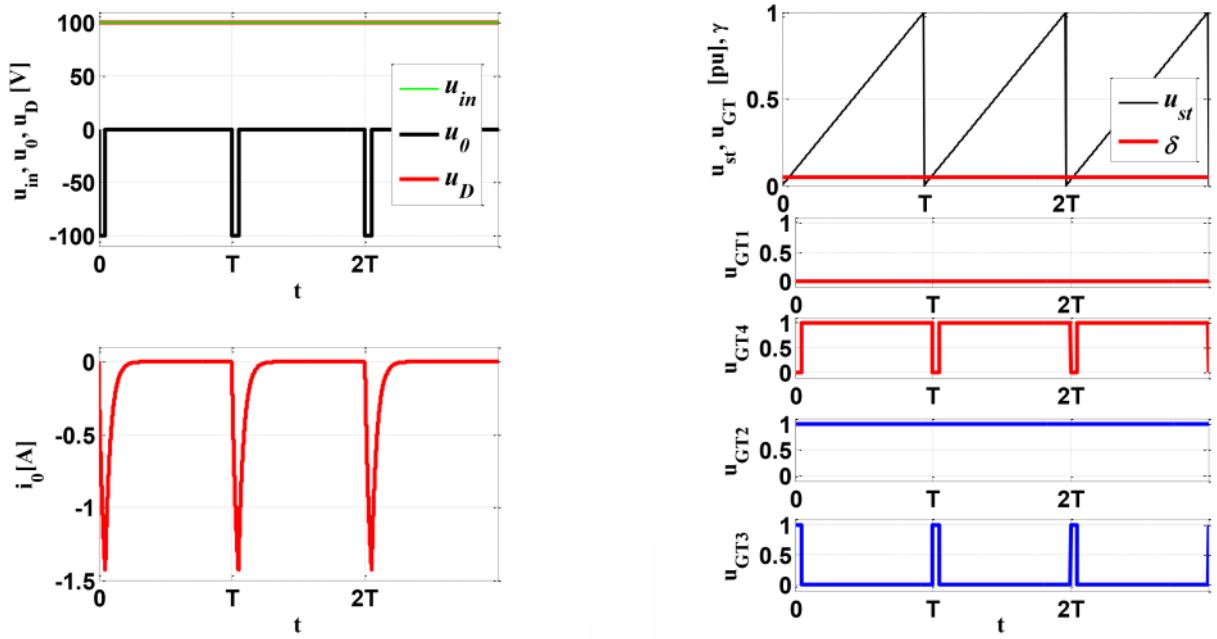
Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Sterowanie niesymetryczne

Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)

γ =0.05, $U_{0,ref}$<0



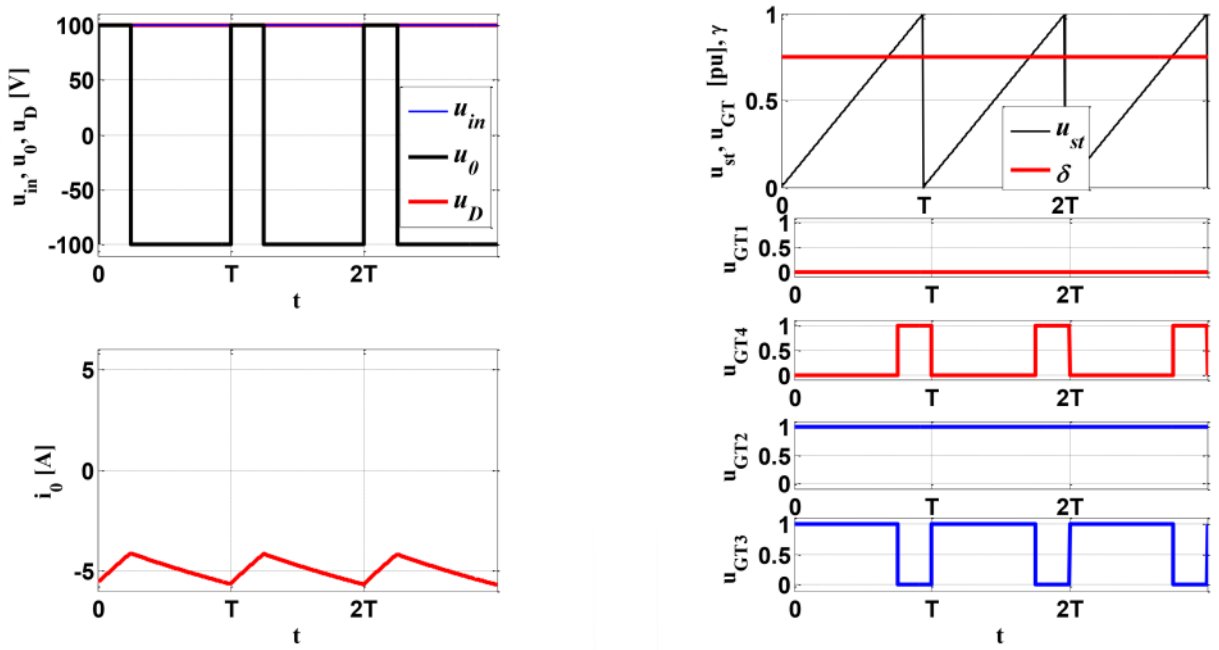
Wrocław University of Science and Technology

Przetworniki DC/DC

Sterowanie niesymetryczne

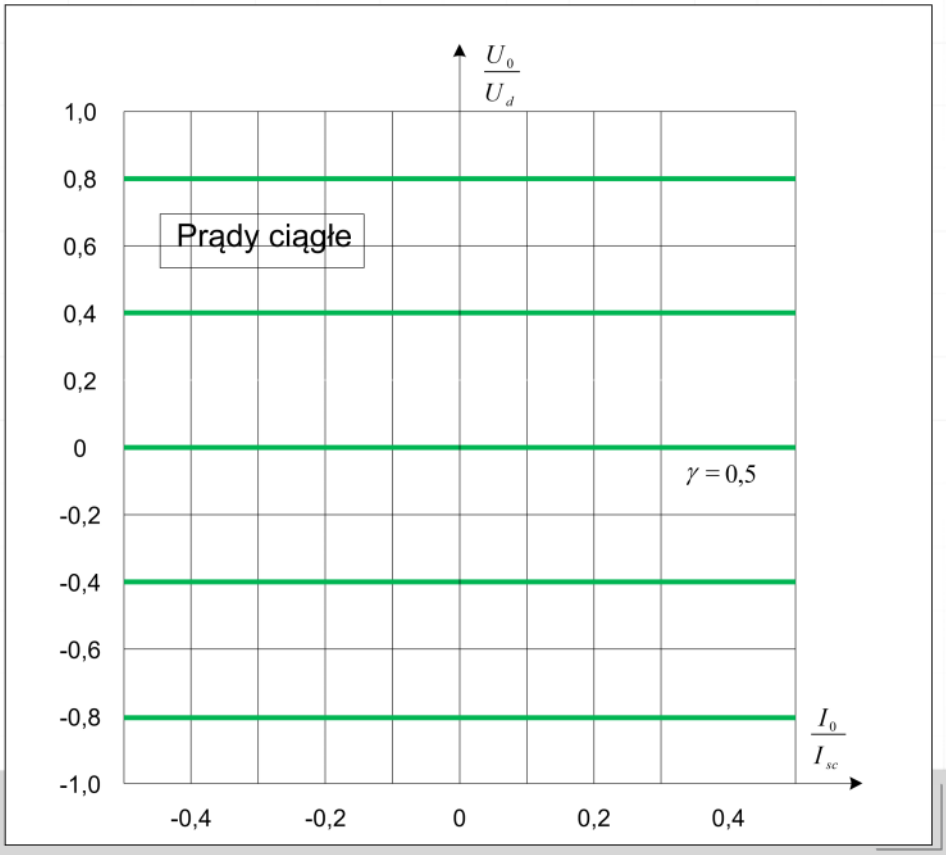
Przetwornik mostkowy (cztero-kwadrantowy)

γ>0.5, $U_{0,ref}$<0



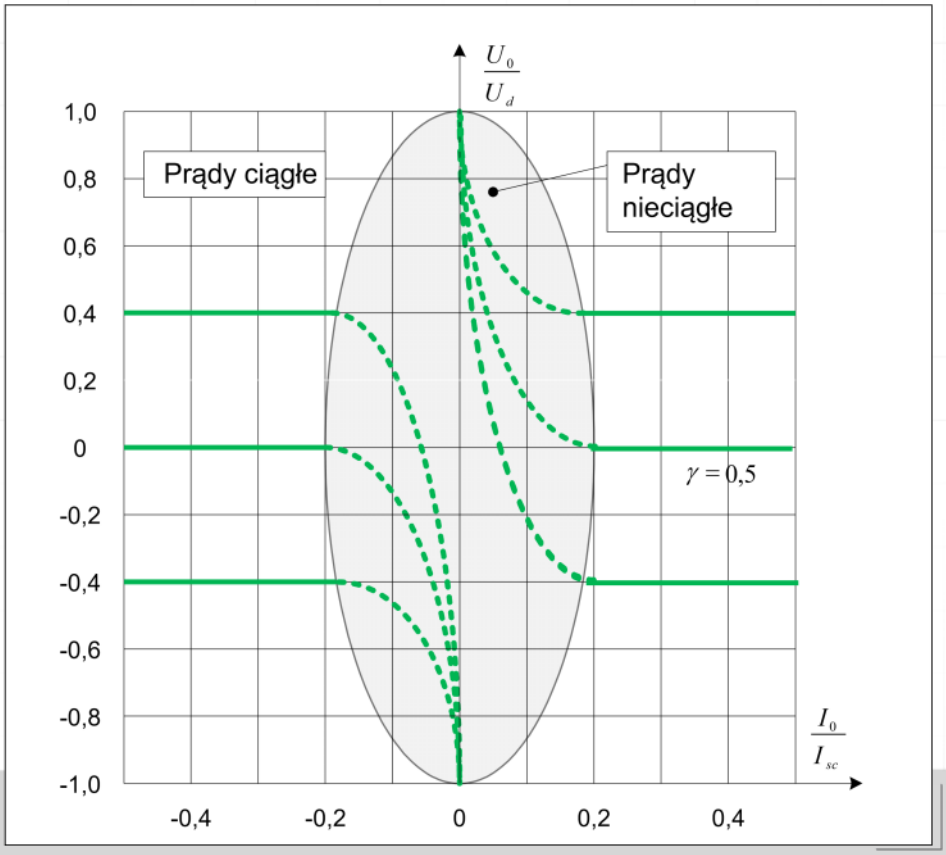
Przetworniki DC/DC

Charakterystyki wyjściowe, sterowanie symetryczne



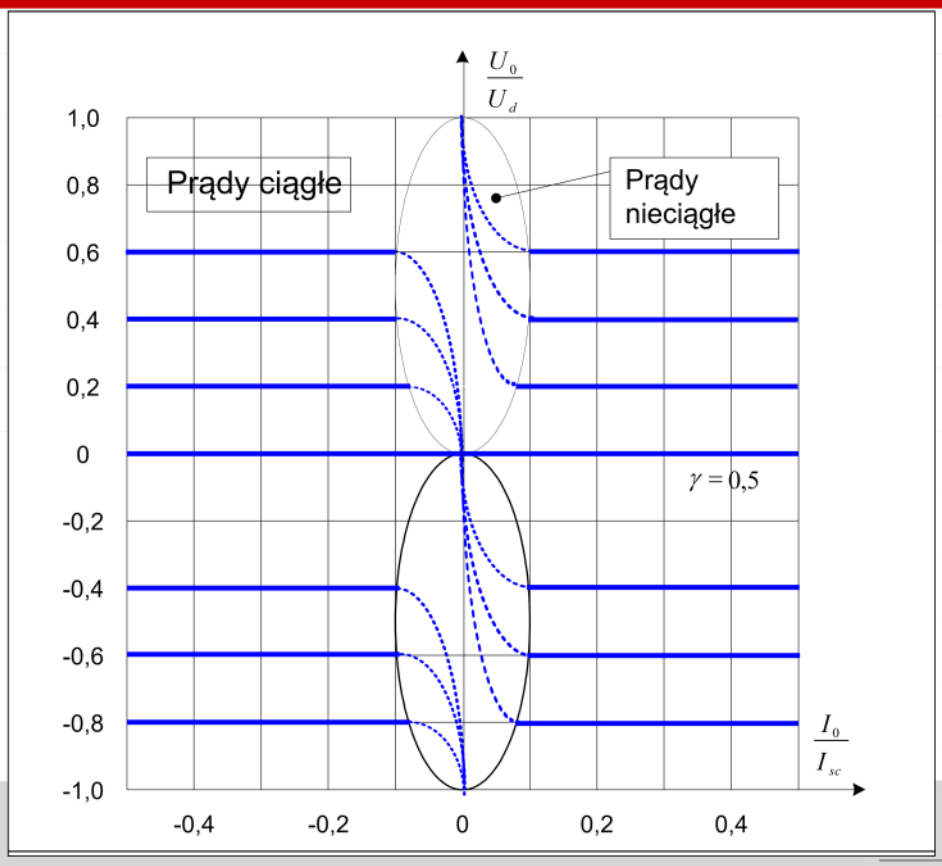
Przetworniki DC/DC

Charakterystyki wyjściowe, sterowanie symetryczne z modyfikacją



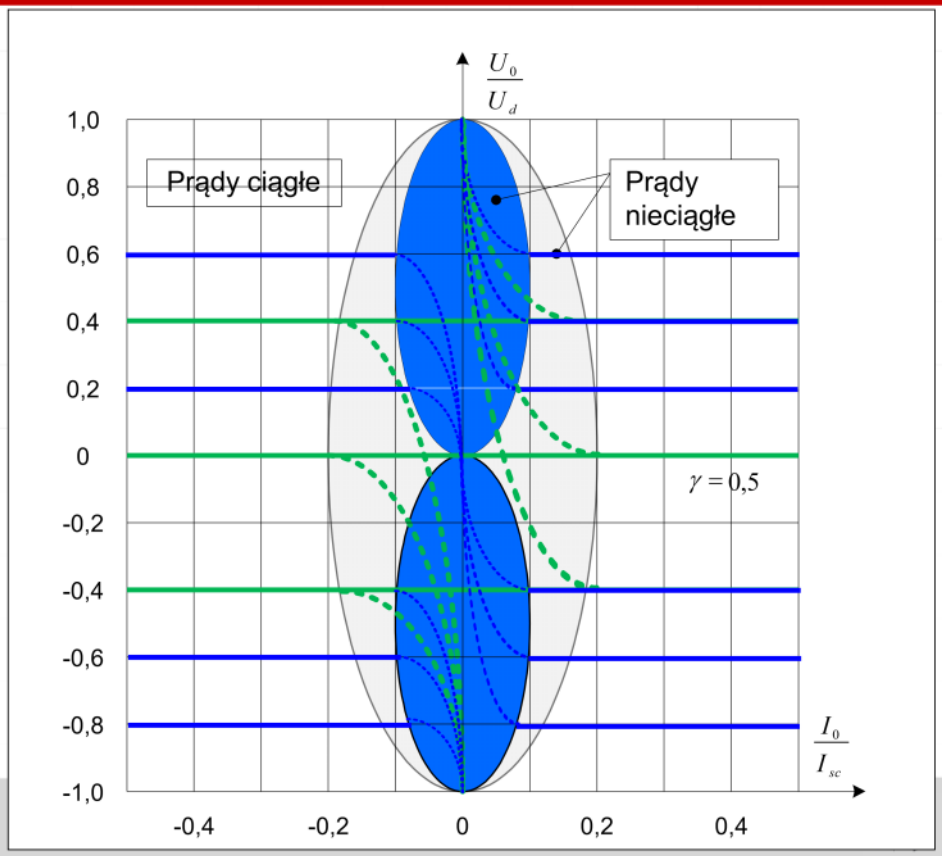
Przetworniki DC/DC

Charakterystyki wyjściowe, sterowanie niesymetryczne



Przetworniki DC/DC

Charakterystyki wyjściowe



Wrocław University of Science and Technology

Dziękuję za uwagę!

!Energoelektronika
1 Wykład 9
piątek, 18 października 2019 10:22

Wykład 9
Przekształtniki DC/DC – cd.

dr inż. Grzegorz Tarchała

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Wrocław University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Plan wykładu

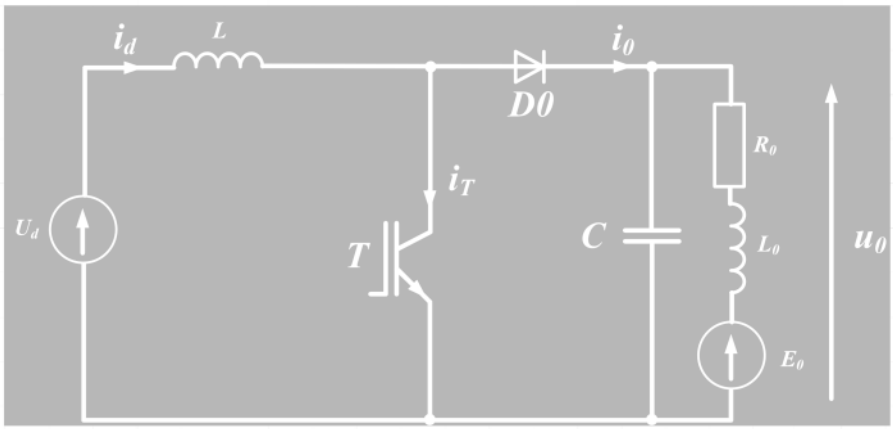
- Przekształtnik podwyższający napięcie
- Przekształtniki obniżająco-podwyższające napięcie:
  - SEPIC
  - Przekształtnik Ćuk'a
- Przekształtnik mostkowy – układy sterowania napięciem i prądem

2

Wrocław University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

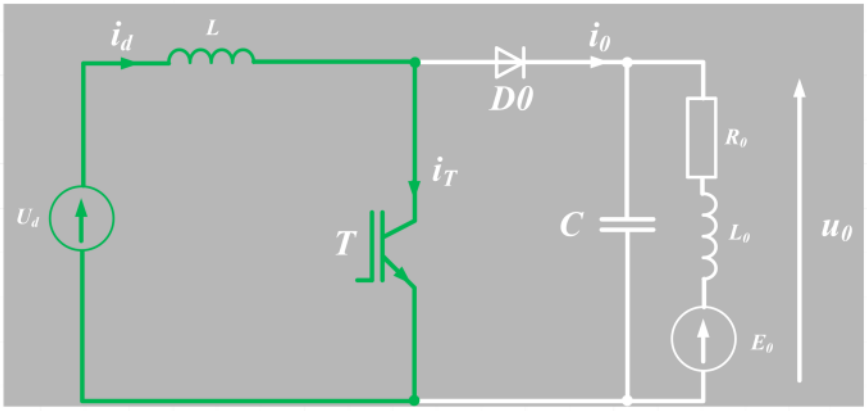
Przekształtnik podwyższający napięcie



Wroclaw University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

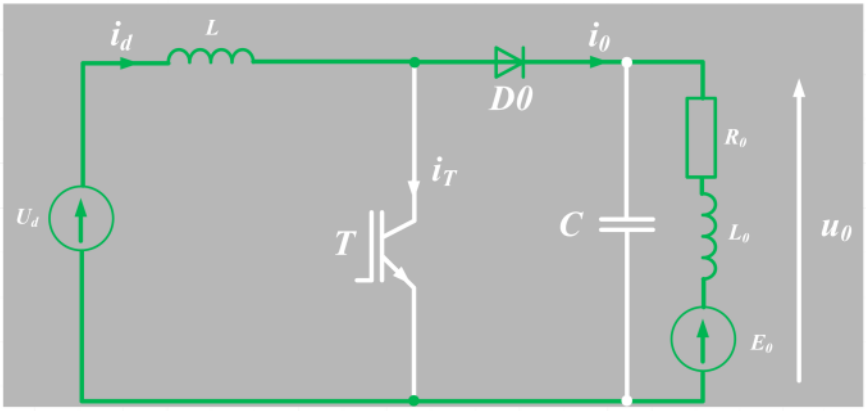
Przekształtnik podwyższający napięcie



Wroclaw University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik podwyższający napięcie



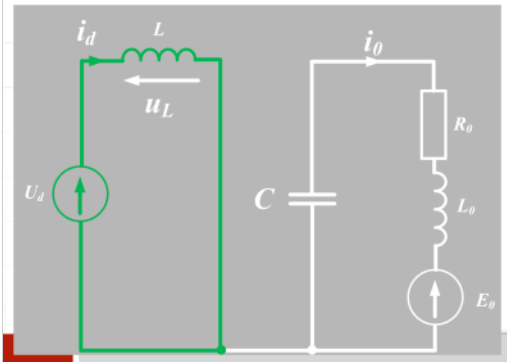
Wroclaw University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik podwyższający napięcie

Tranzystor T – ON

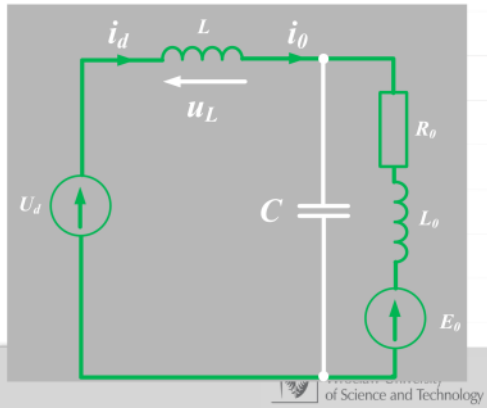
$$u_L = U_d$$



Tranzystor T – OFF

$$u_L = U_d - u_0$$

$$(U_d = u_L + u_0)$$



of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik podwyższający napięcie

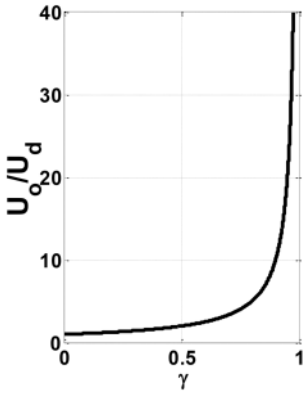
Średnie napięcie cewki

$$U_L = \int_0^{T_0} u_l(\mathrm{t})\mathrm{d}t = 0$$

$$\int_0^{t_p} u_l(\mathrm{t})\mathrm{d}t + \int_{t_p}^{T_0} u_l(\mathrm{t})\mathrm{d}t = 0$$

$$U_d \gamma T_0 + (1-\gamma) T_0 (U_0 - U_d) = 0$$

$$U_0 = \frac{1}{1-\gamma} U_d$$



Wroclaw University of Science and Technology

- "jak będziecie rysować na kolokwium, to się nie pomylcie..."

Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik podwyższający napięcie

Średnie napięcie cewki

$$U_L = \int_0^{T_0} u_l(\mathrm{t})\mathrm{d}t = 0$$

$$\int_0^{t_p} u_l(\mathrm{t})\mathrm{d}t + \int_{t_p}^{T_0} u_l(\mathrm{t})\mathrm{d}t = 0$$

$$U_d \gamma T_0 + (1-\gamma) T_0 (U_0 - U_d) = 0$$

$$U_0 = \frac{1}{1-\gamma} U_d$$

Średnia moc

$$P_d = P_0$$

$$U_d I_d = U_0 I_0$$

Średni prąd obciążenia

$$I_0 = (1-\gamma) I_d$$

$$I_0 = \frac{U_0 - E_0}{R_0}$$

Wroclaw University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik podwyższający napięcie

Prąd cewki:

$$i_L(t) = I_L + \Delta i_L$$

$$\Delta i_L = \frac{1}{L}\int u_L(t)\mathrm{d}t$$

$$I_L = I_d = \frac{1}{1-\gamma}\frac{U_0 - E_0}{R_0}$$

Oscylacje prądu cewki:

$$\Delta i_L = \frac{1}{L}U_d \gamma T_0,\ t \in (0, t_p)$$

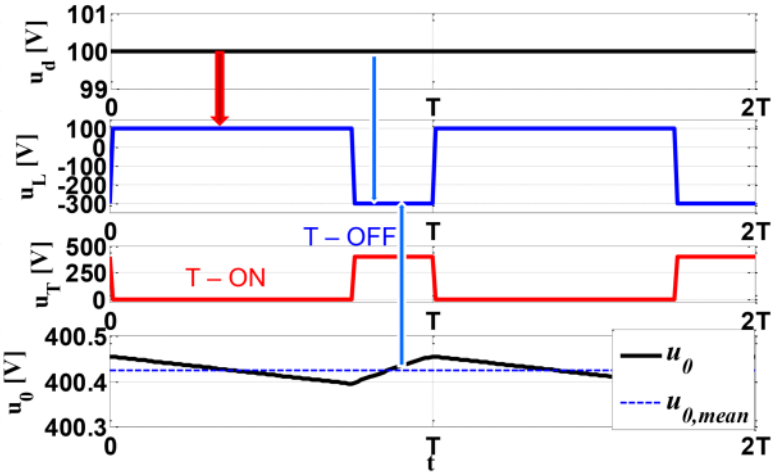
$$\Delta i_L = \frac{1}{L}(U_0 - U_d)(1-\gamma)T_0,\ t \in (t_p, T_0)$$

Przekształtniki DC/DC

$U_0 = 4U_d$

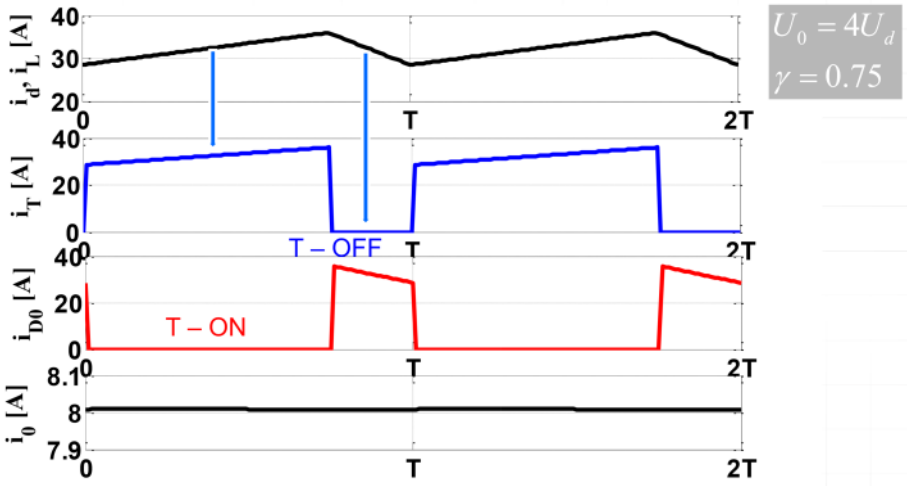
$\gamma = 0.75$

Przekształtnik podwyższający napięcie



Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik podwyższający napięcie



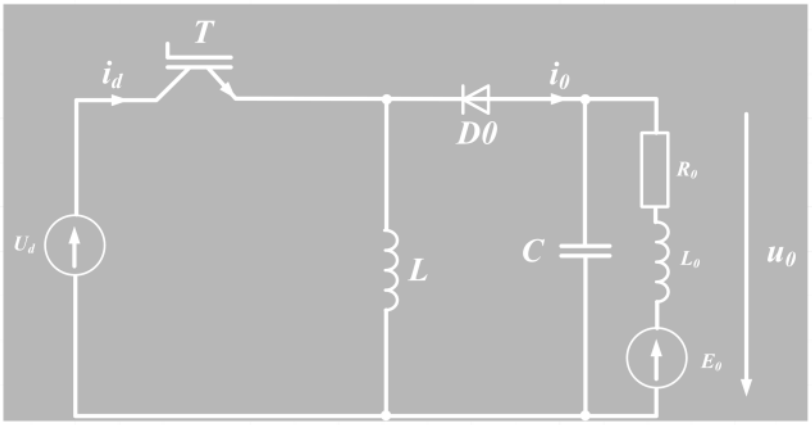
$U_0 = 4U_d$

$\gamma = 0.75$

Wrocław University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik obniżająco-podwyższający napięcie



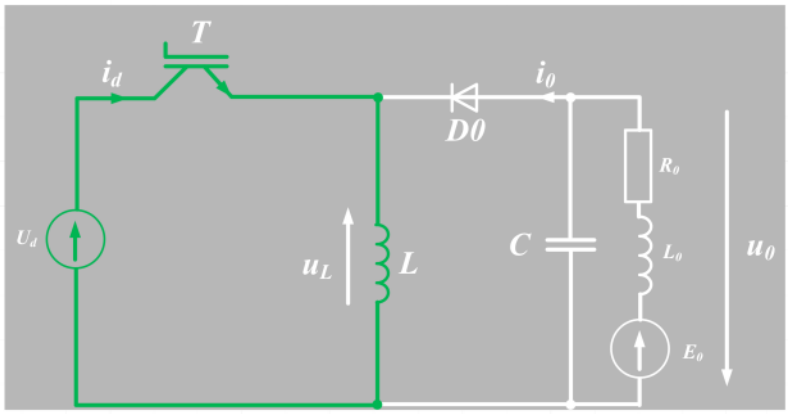
Wymaganie: możliwość otrzymania napięcia niższego oraz większego niż wejściowe
Napięcie wyjściowe: przeciwna polaryzacja niż napięcie wejściowe

Wrocław University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik obniżająco-podwyższający napięcie

Tranzystor T – ON

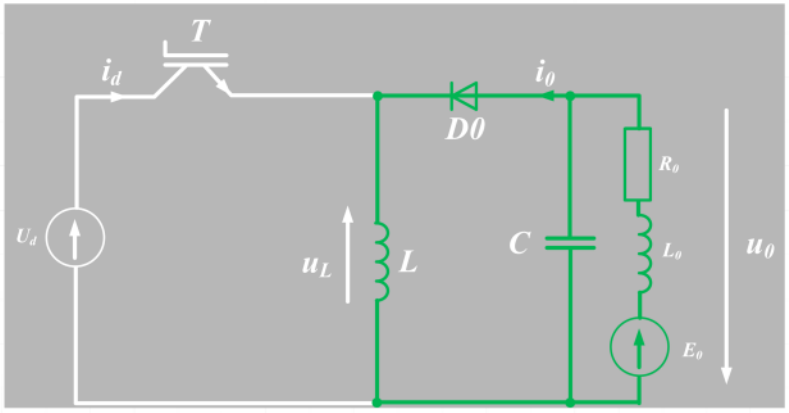


Wrocław University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik obniżająco-podwyższający napięcie

Tranzystor T – OFF



Wrocław University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Przekształtnik obniżająco-podwyższający napięcie

Średnie napięcie cewki:

$$U_L = \int_0^{T_0} u_l(\mathrm{t})\mathrm{d}t = 0$$

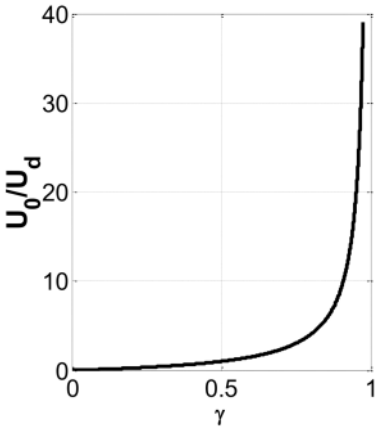
$$\int_0^{t_p} u_l(\mathrm{t})\mathrm{d}t + \int_{t_p}^{T_0} u_l(\mathrm{t})\mathrm{d}t = 0$$

$$U_d \gamma T_0 + (1-\gamma)T_0(-U_0) = 0$$

$$U_d \gamma = (1-\gamma)U_0$$

$$U_0 = \frac{\gamma}{1-\gamma}U_d \qquad U_0 = \frac{1}{1-\gamma}U_d$$

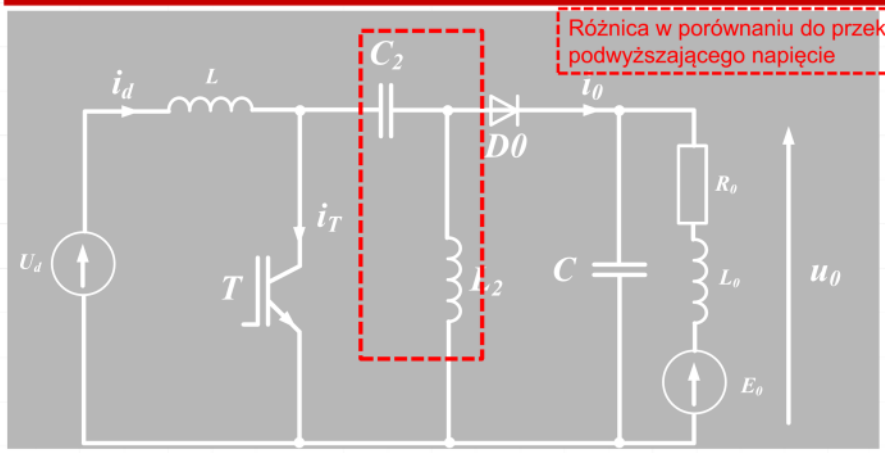
$$(buck-boost) \qquad (boost)$$



Przekształtniki DC/DC

SEPIC – Single-ended primary inductor converter (Buck-boost)

Różnica w porównaniu do przekształtnika podwyższającego napięcie

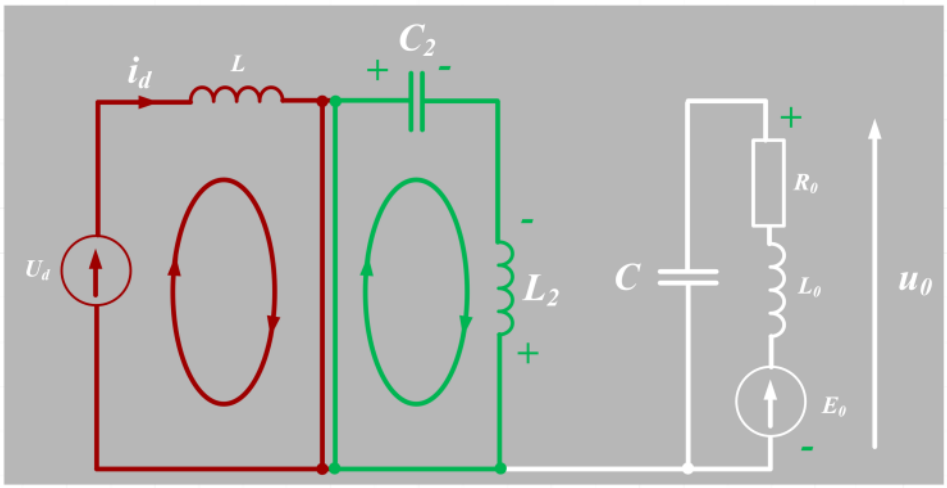


Wymaganie: relatywnie niskie oscylacje prądu

Napięcie wyjściowe: taka sama polaryzacja jak napięcie zasilania

Przekształtniki DC/DC

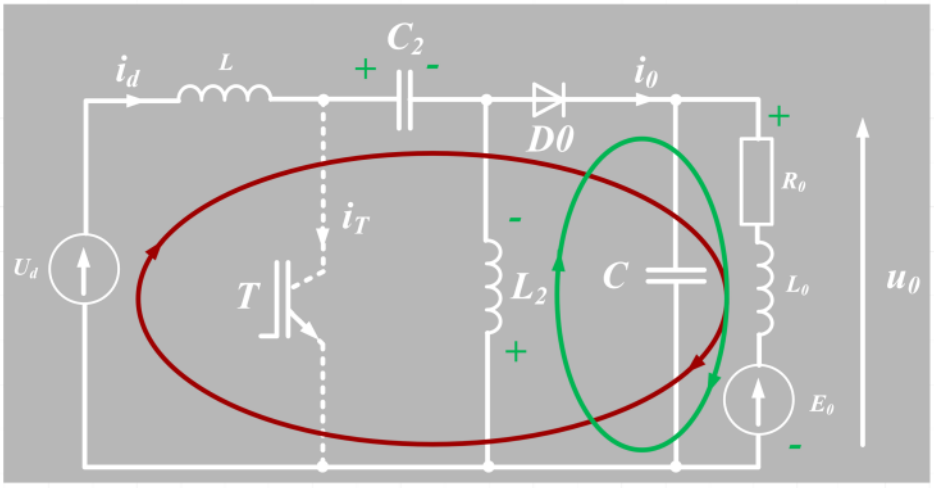
SEPIC – Single-ended primary inductor converter (Buck-boost)



Wroclaw University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

SEPIC – Single-ended primary inductor converter (Buck-boost)



Wroclaw University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

SEPIC – Single-ended primary inductor converter (Buck-boost)

Napięcie średnie cewki:

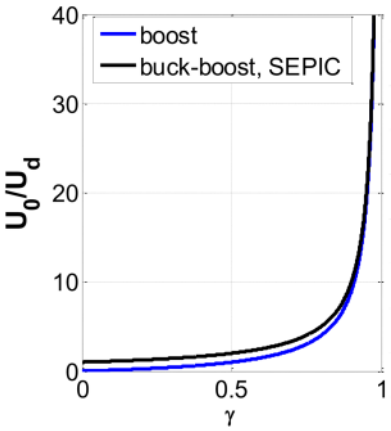
$$U_{L2} = \int_0^{T_0} u_{L2}(\mathrm{t})\mathrm{d}t = 0$$

$$\int_0^{t_p} u_{L2}(\mathrm{t})\mathrm{d}t + \int_{t_p}^{T_0} u_{L2}(\mathrm{t})\mathrm{d}t = 0$$

$$U_{C2}\gamma T_0 + (1-\gamma)T_0(-U_0) = 0$$

$$U_d\gamma = (1-\gamma)U_0$$

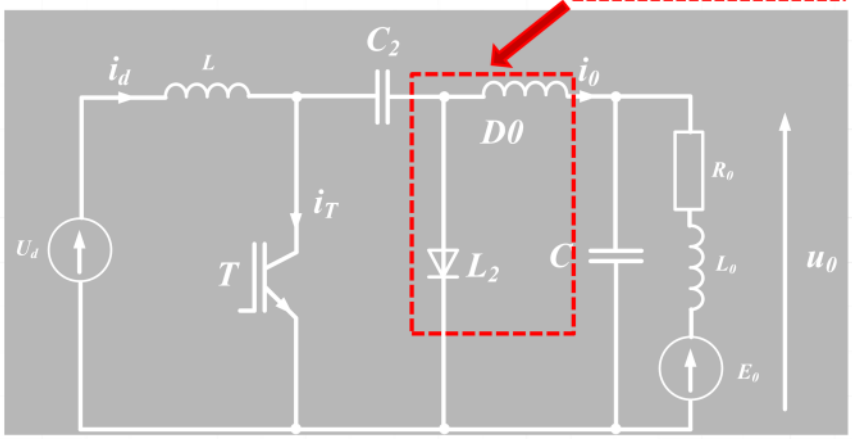
$$U_0 = \frac{\gamma}{1-\gamma}U_d$$



Przekształtniki DC/DC

Ćuk converter

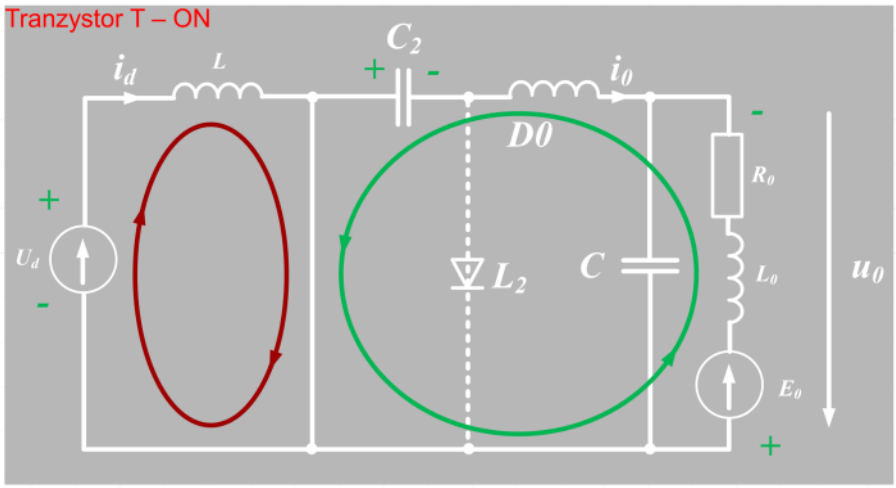
Różnica w porównaniu do SEPIC



Wymaganie: niepulsujące prądy wejściowe i wyjściowe
Napięcie wyjściowe: przeciwna polaryzacja

Przekształtniki DC/DC

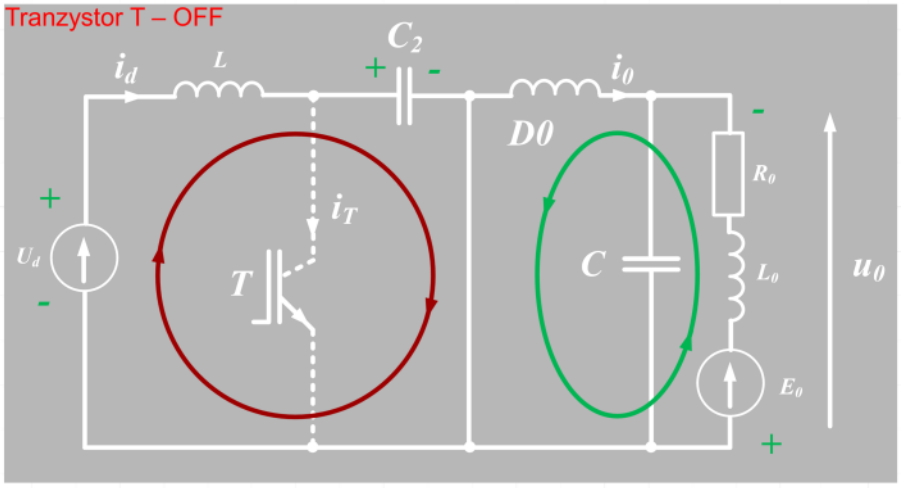
Ćuk converter



Wroclaw University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Ćuk converter



Wroclaw University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

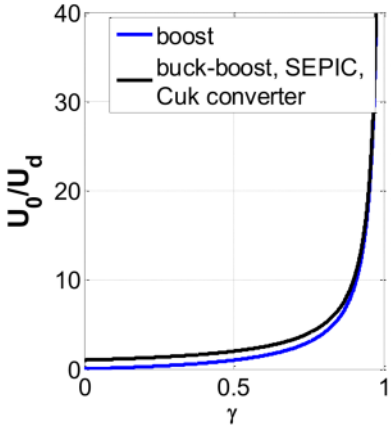
Ćuk converter

Napięcie wyjściowe:

$$U_0 = \frac{\gamma}{1-\gamma} U_d$$

Prąd wyjściowy:

$$I_0 = \frac{1-\gamma}{\gamma} I_d$$



Wrocław University of Science and Technology

Przekształtniki DC/DC

Metody konwersji - porównanie

Kryterium		Buck	Boost	Buck-boost
Napięcie tranzystora		U_d	U_0	U_d+U_0
Prąd tranzystora		I_0	I_d	I_d+I_0
Wartość skuteczna prądu		$\sqrt{\gamma} I_0$	$\sqrt{\gamma} I_d$	$\sqrt{\gamma}(I_d+I_0)$
Prąd średni	Tranzystor	γI_0	γI_d	$\gamma(I_d+I_0)$
	Dioda	$(1-\gamma)I_0$	$(1-\gamma)I_d$	$(1-\gamma)(I_d+I_0)$
Prąd cewki		I_0	I_d	I_d+I_0
Wpływ L na C		znaczny	mały	mały
Prąd pulsujący		wejściowy	wyjściowy	oba

Ned Mohan, *First course on power electronics and drives, MNPERE, 2003*
And B. Carsten, *Converter component load factors; a performance limitation of various topologies,* PCI Proceedings, June 1998, pp. 31-49

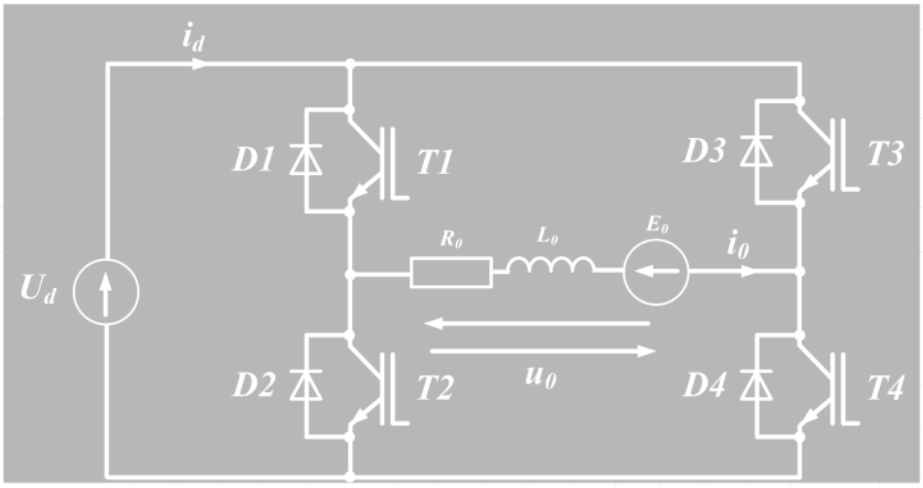
Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania

Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania przekształtnikiem

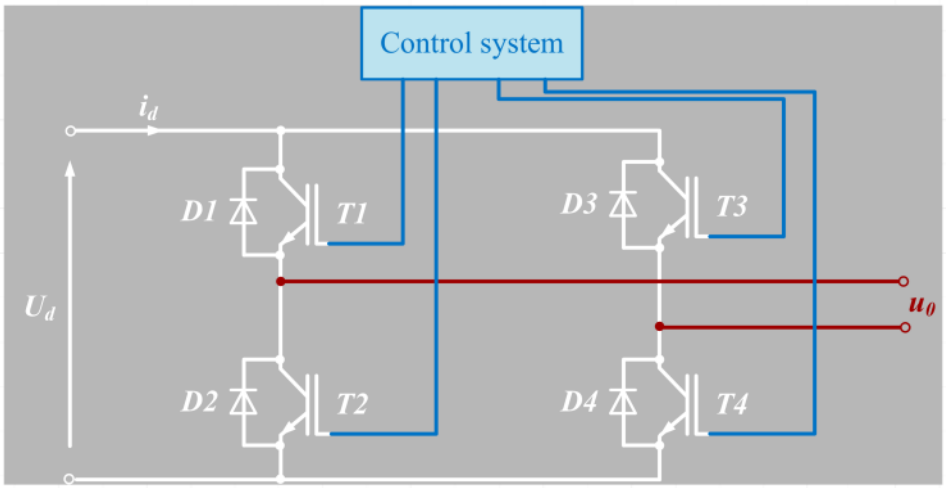
Układ sterowania przekształtnikiem mostkowym



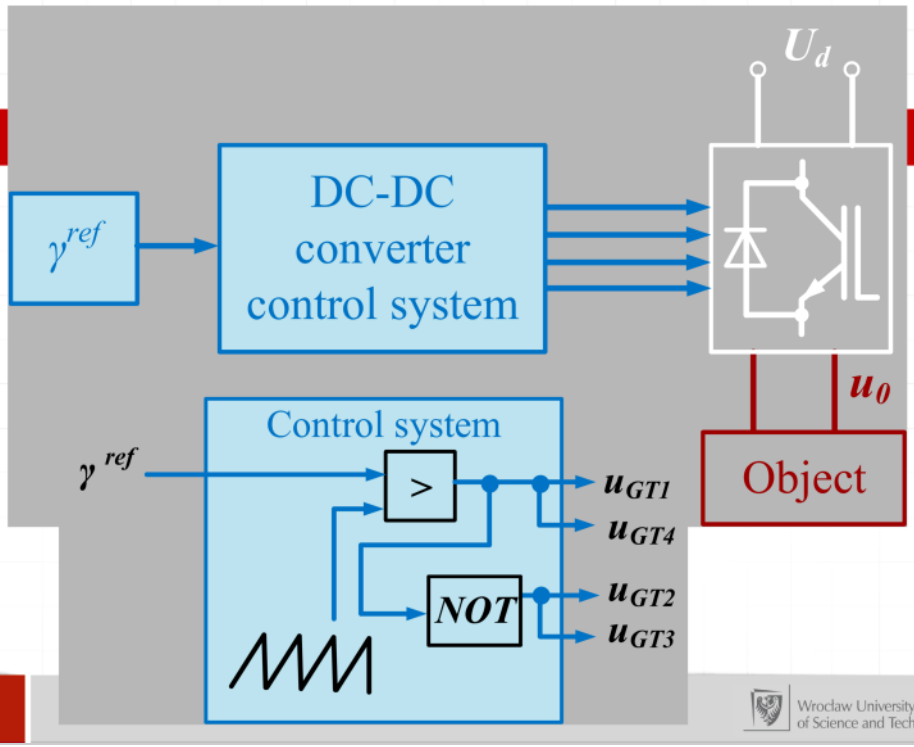
Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania przekształtnikiem

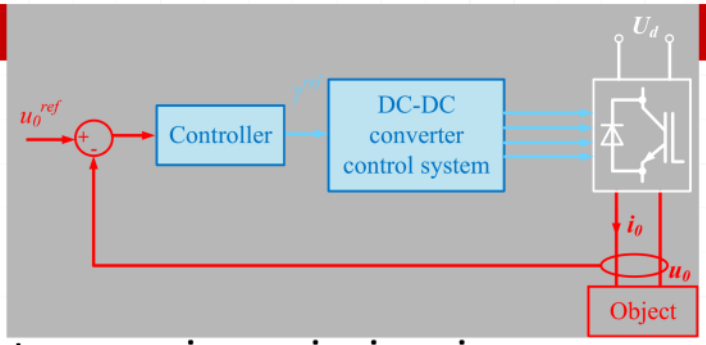
Układ sterowania przekształtnikiem mostkowym



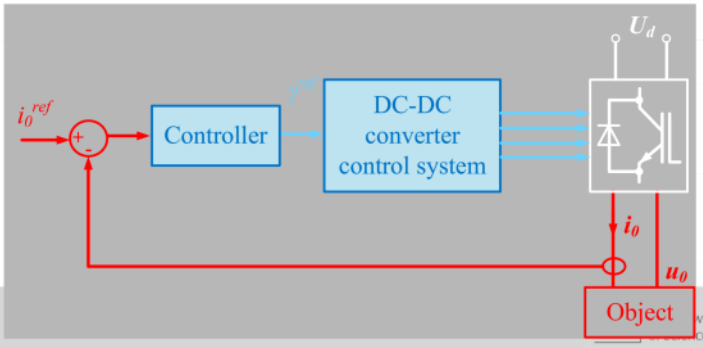
Wroclaw University of Science and Technology



Wroclaw University of Science and Technology

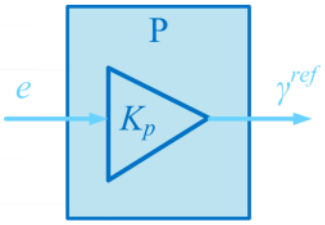


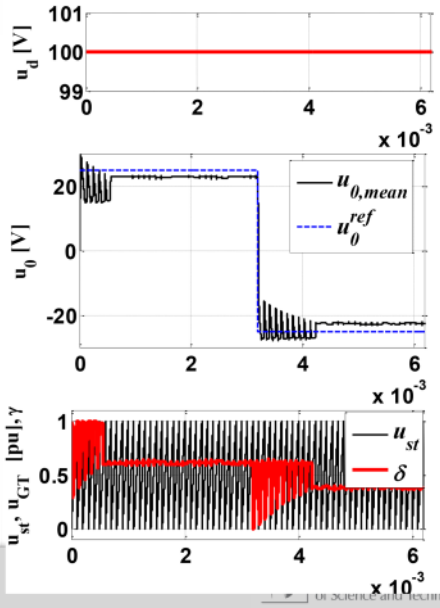
Metody sterowania napięciem i prądem



Układy sterowania przekształtnikiem

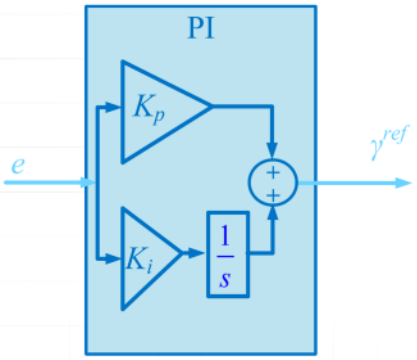
Sterowanie napięciem, regulator typu P, obciążenie RL

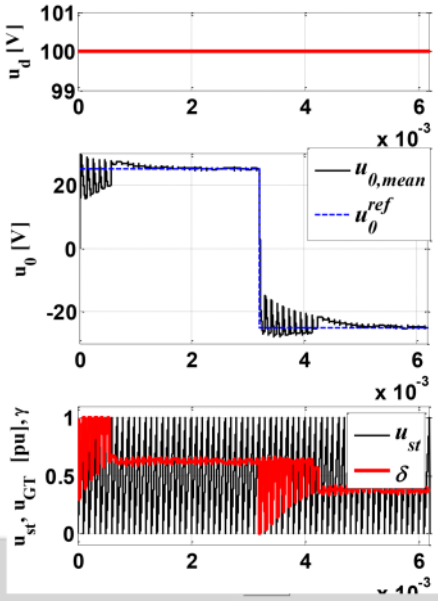




Układy sterowania przekształtnikiem

Sterowanie napięciem, regulator typu PI, obciążenie RL

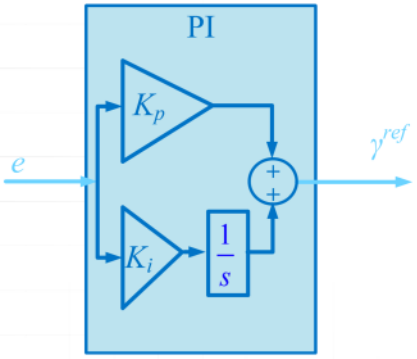


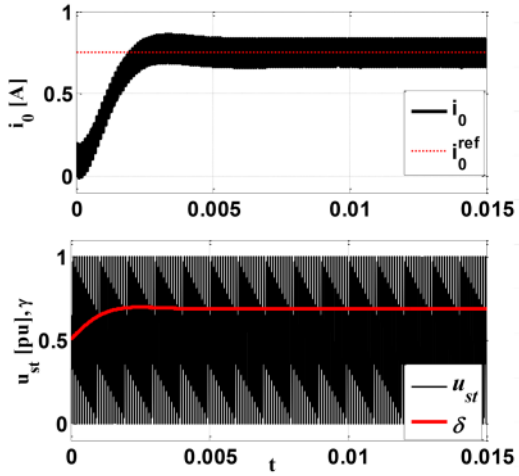


31

Układy sterowania przekształtnikiem

Sterowanie prądem, regulator PI, obciążenie RL



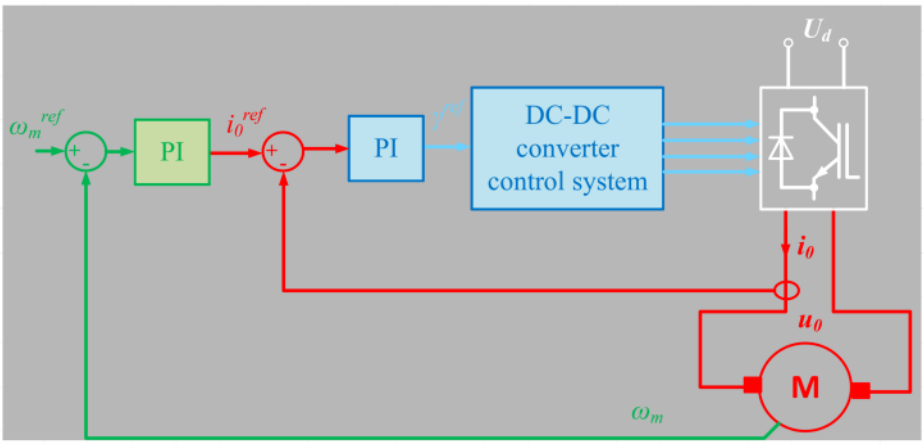


32

Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania przekształtnikiem

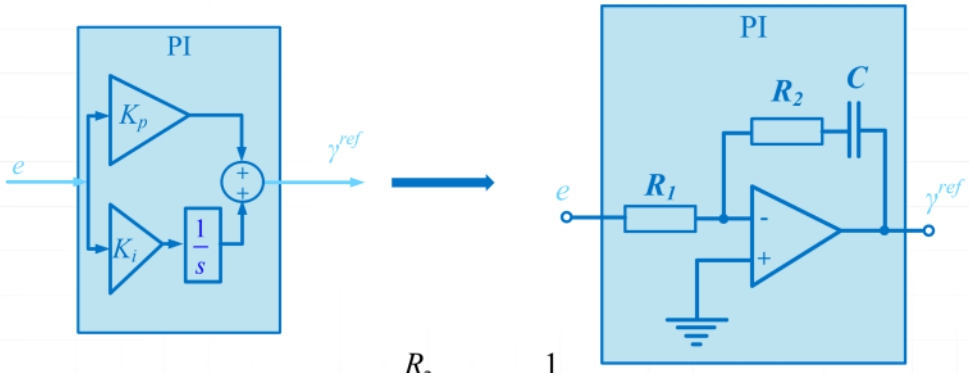
Zastosowanie przekształtnika – sterowania prędkością silnika prądu stałego



Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania przekształtnikiem

Implementacja analogowa regulatorów

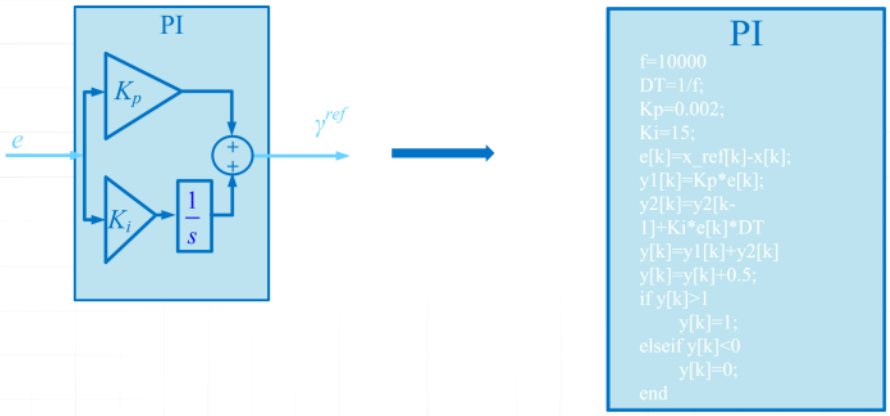


$$K_p = \frac{R_2}{R_1}, K_i = \frac{1}{R_2 C}$$

Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania przekształtnikiem

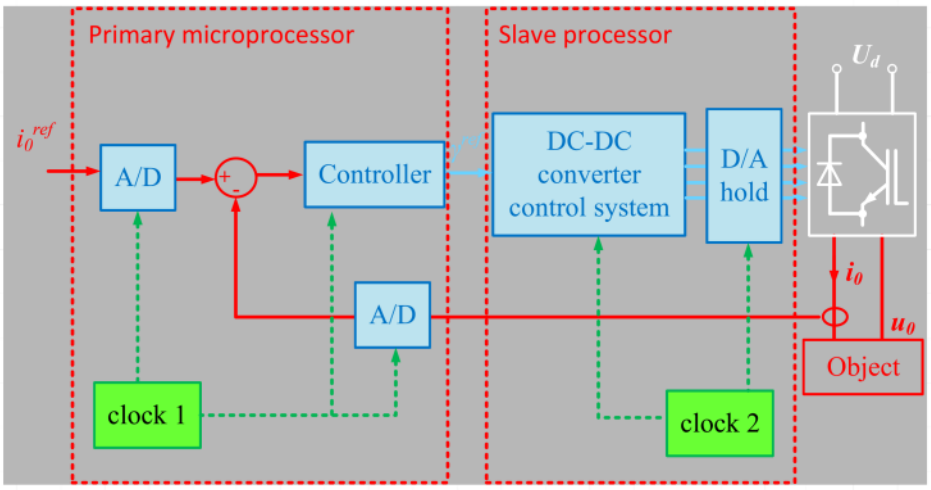
Implementacja cyfrowa regulatorów



Wroclaw University of Science and Technology

Układy sterowania przekształtnikiem

Implementacja cyfrowa regulatorów



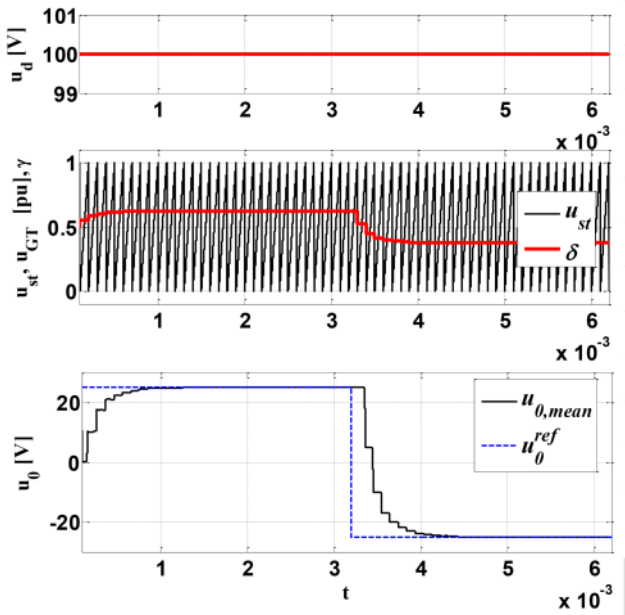
Wroclaw University of Science and Technology

Układy sterowania przekształtnikiem

Implementacja cyfrowa regulatorów

PI

```
f=10000
DT=1/f;
Kp=0.002;
Ki=15;
e[k]=x_ref[k]-x[k];
y1[k]=Kp*e[k];
y2[k]=y2[k-
1]+Ki*e[k]*DT
y[k]=y1[k]+y2[k]
y[k]=y[k]+0.5;
if y[k]>1
      y[k]=1;
elseif y[k]<0
      y[k]=0;
end
```

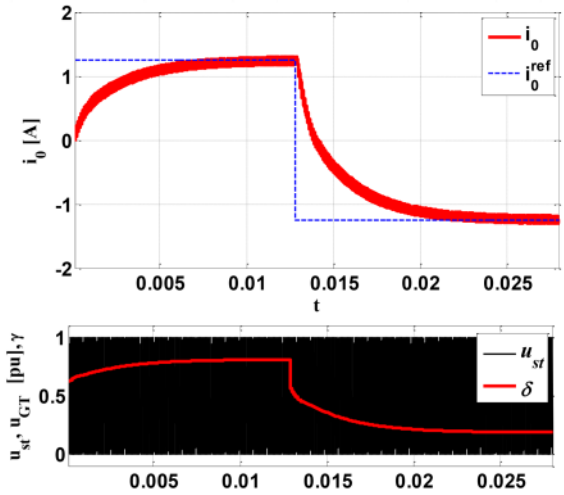


Układy sterowania przekształtnikiem

Implementacja cyfrowa sterowania prądem

PI

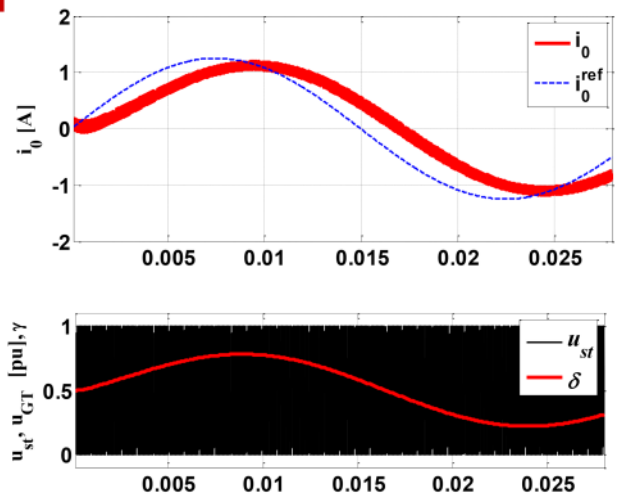
```
f=10000
DT=1/f;
Kp=0.1;
Ki=100;
e[k]=x_ref[k]-x[k];
y1[k]=Kp*e[k];
y2[k]=y2[k-
1]+Ki*e[k]*DT
y[k]=y1[k]+y2[k]
y[k]=y[k]+0.5;
if y[k]>1
      y[k]=1;
elseif y[k]<0
      y[k]=0;
end
```



Wrocław University of Science and Technology

Układy sterowania przekształtnikiem

Falownik?



Wrocław University of Science and Technology

Dziękuję za uwagę!

Wrocław University of Science and Technology

!Energoelektronika
1 Wykład 10
piątek, 18 października 2019 10:23

Wykład 10
Falowniki jednofazowe

dr inż. Grzegorz Tarchała

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Rodzaje klasyfikacja falowników

- Falowniki:
  - Jednofazowe:
    - Półmostkowe,
    - Mostkowe,
  - Trójfazowe,
  - Wielofazowe,
- Falowniki:
  - Falownik prądu,
  - Falownik napięcia,
- Falowniki:
  - O prostokątnej fali napięcia,
  - Z modulacją szerokości impulsów,
  - Rezonansowe:
    - Szeregowe,
    - Równoległe,
    - Szeregowo-równoległe
- Falowniki:
  - Tranzystorowe,
  - Tyrystorowe,
- Falowniki:
  - Dwupoziomowe,
  - Wielopoziomowe,

2 Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Klasyfikacja metod modulacji szerokości impulsów (MSI)

Metody modulacji MSI:

- Z sygnałem nośnym
  - Sinusoidalna (naturalna) (SPWM) [1ph, 3ph]
  - Sinusoidalna z sygnałem kolejności zerowej [3ph]
  - Nieciągła [3ph]
- Z eliminacją wybranych harmonicznych [1ph, 3ph]
- O fali prostokątnej [1ph, 3ph]
- Wektorowa(SVM, SV-PWM) [3ph]
- Ze sprzężeniem zwrotnym[1ph, 3ph]
  - Ze sprzężeniem prądowym
    - Z regulatorami histerezowymi
    - Z regulatorami liniowymi
  - Ze sprzężeniem napięciowym
- Losowa [1ph, 3ph]

Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

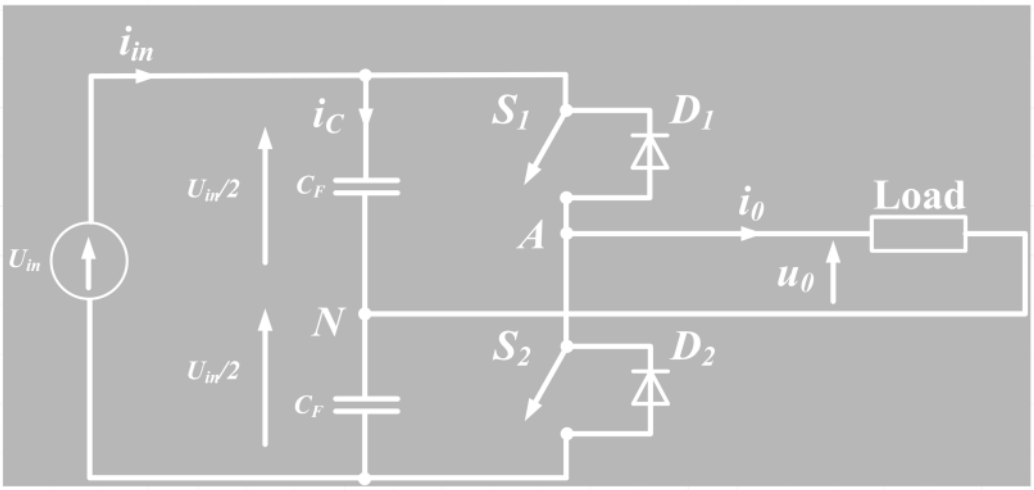
Zastosowania falowników

- Zasilacze awaryjne (ang. Uninterruptible power supplies, UPS),
- Sterowanie silników prądu przemiennego,
- Przenośne urządzenia AGD,
- Pojazdy elektryczne/hybrydowe,
- Przemysłowe systemy sterowania,
- Grzanie indukcyjne,
- Układy energii odnawialnej (RES): fotowoltaika, energetyka wiatrowa,
- Linie zasilania HVDC,
- Paralizatory

Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

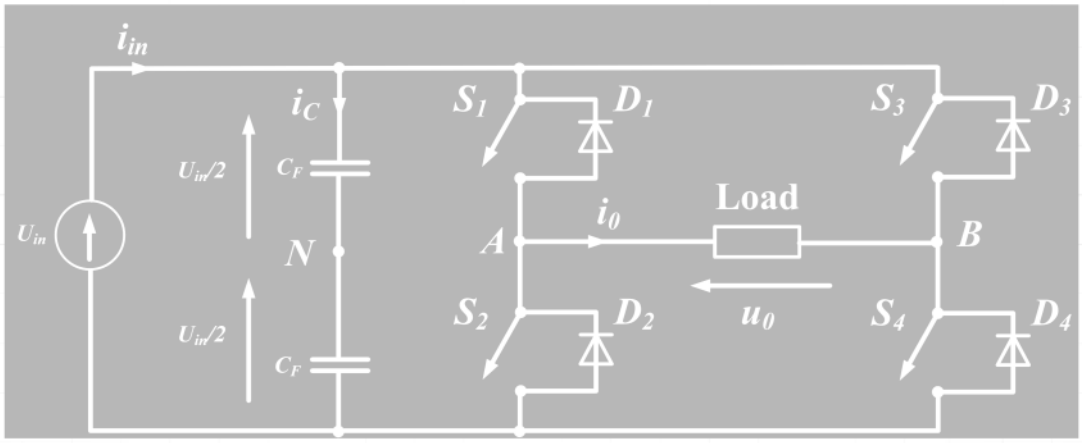
Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

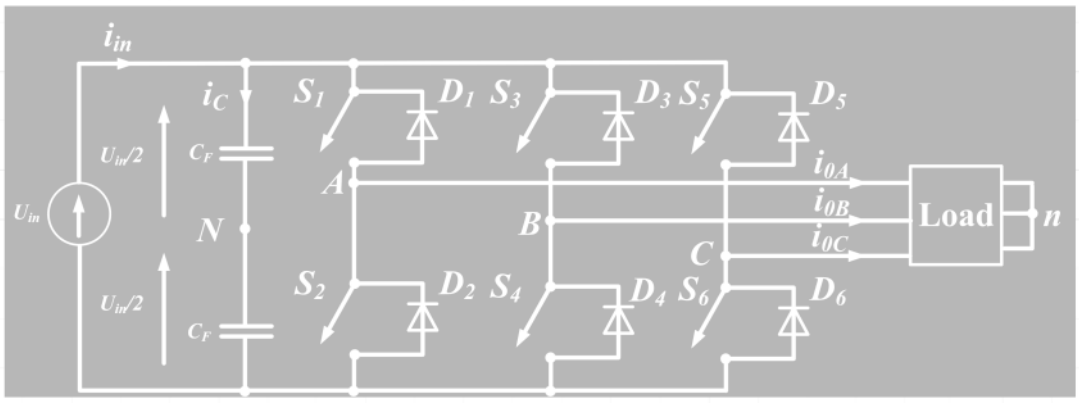
Falownik napięcia jednofazowy, mostkowy



Wrocław University of Science and Technology

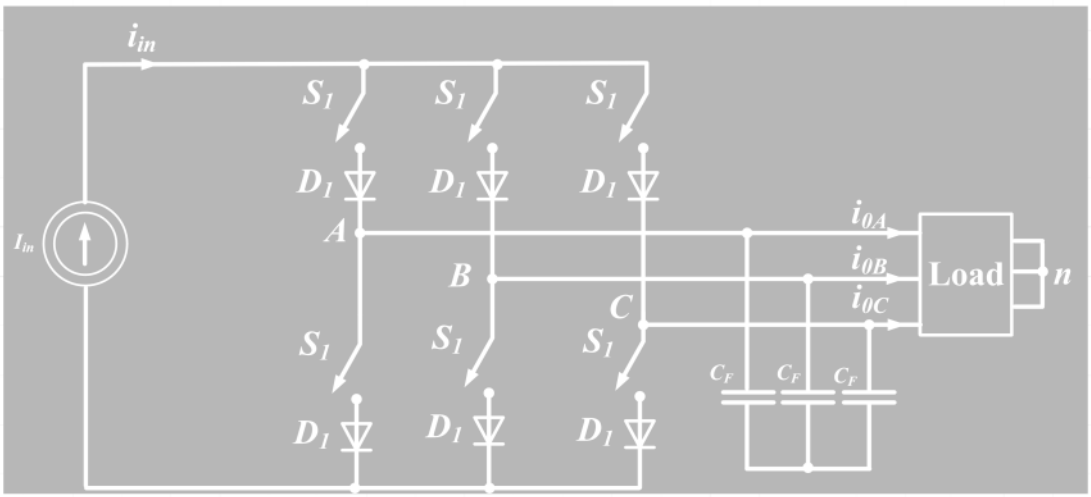
Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia trójfazowy



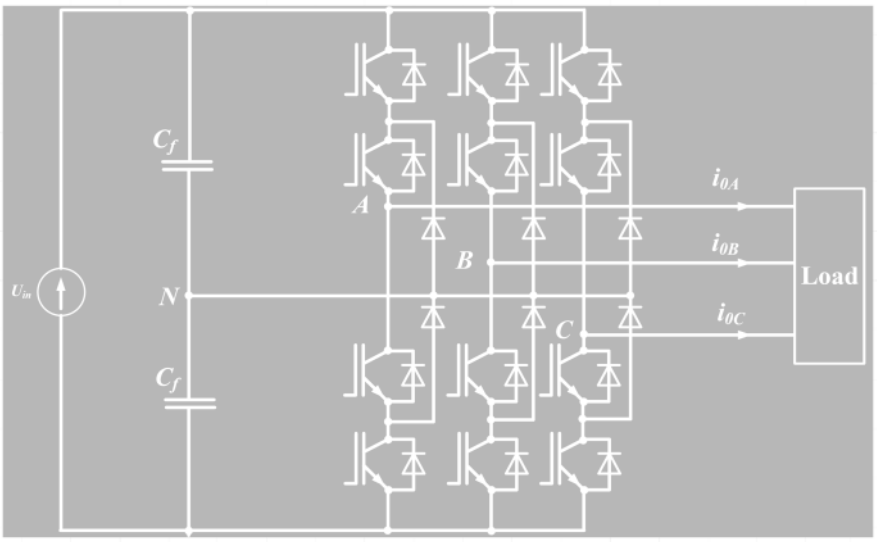
Falowniki jednofazowe

Trójfazowy falownik prądu



Falowniki jednofazowe

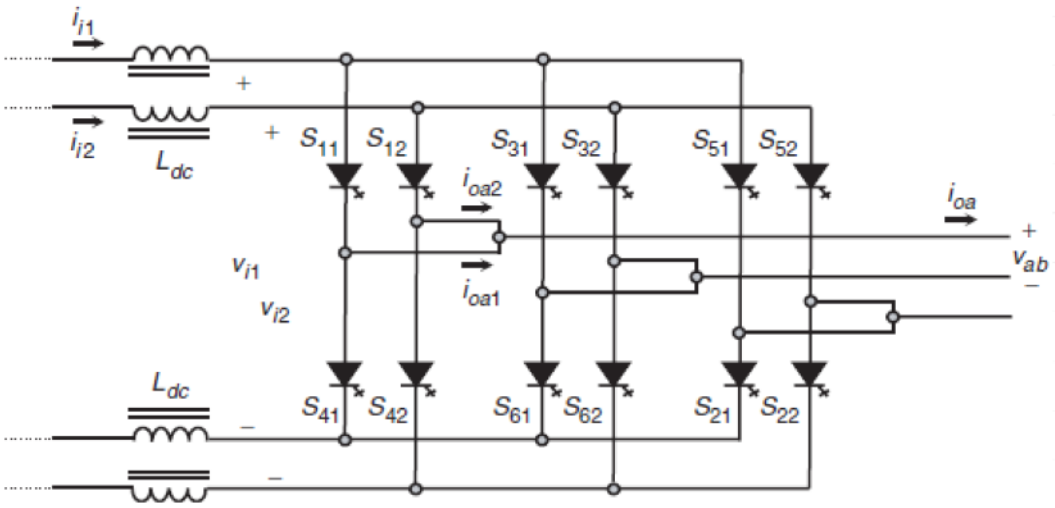
Falownik napięcia trójfazowy, trójpoziomowy



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik prądu trójpoziomowy, trójfazowy



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

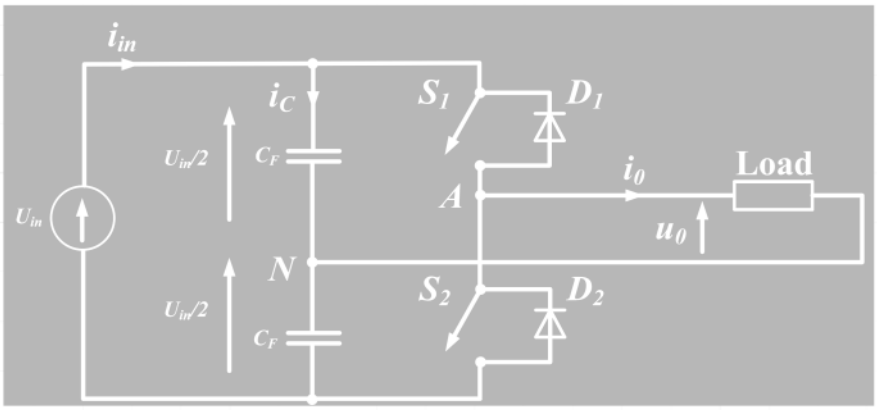
Plan wykładu

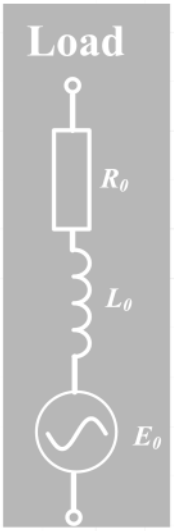
- Falowniki
  - Jednofazowe:
    - Półmostkowy
    - Mostkowy:
      - » Sterowanie bipolarne
      - » Sterowanie unipolarne

Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy



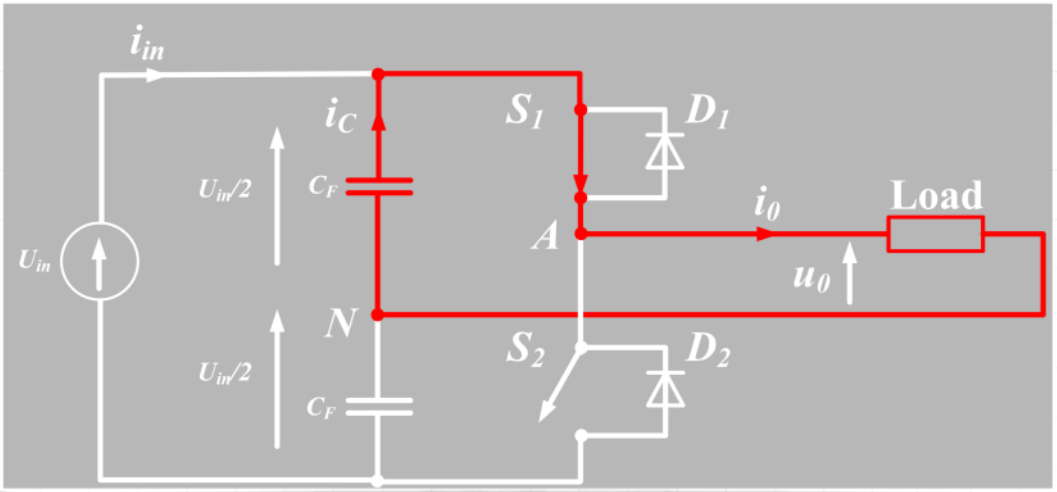


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy

$S_1 = 1,\ S_2 = 0,\ i_0 > 0,\ u_0 = U_{in}/2$

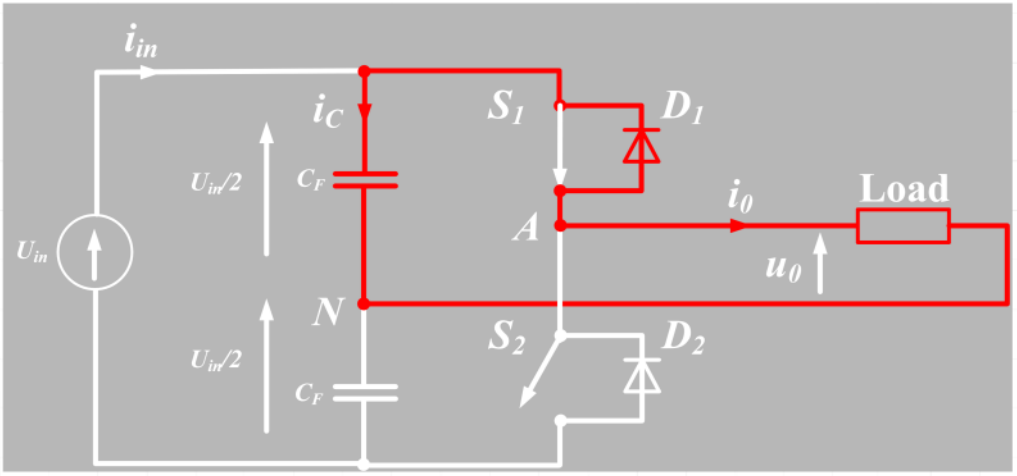


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy

$S_1 = 1,\ S_2 = 0,\ i_0 < 0,\ u_0 = U_{in}/2$

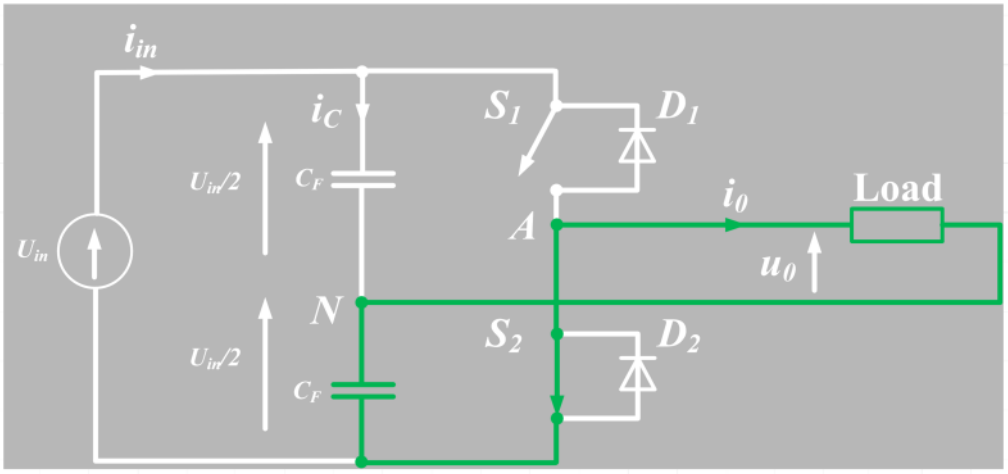


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy

$S_1 = 0$, $S_2 = 1$, $i_0 < 0$, $u_0 = -U_{in}/2$

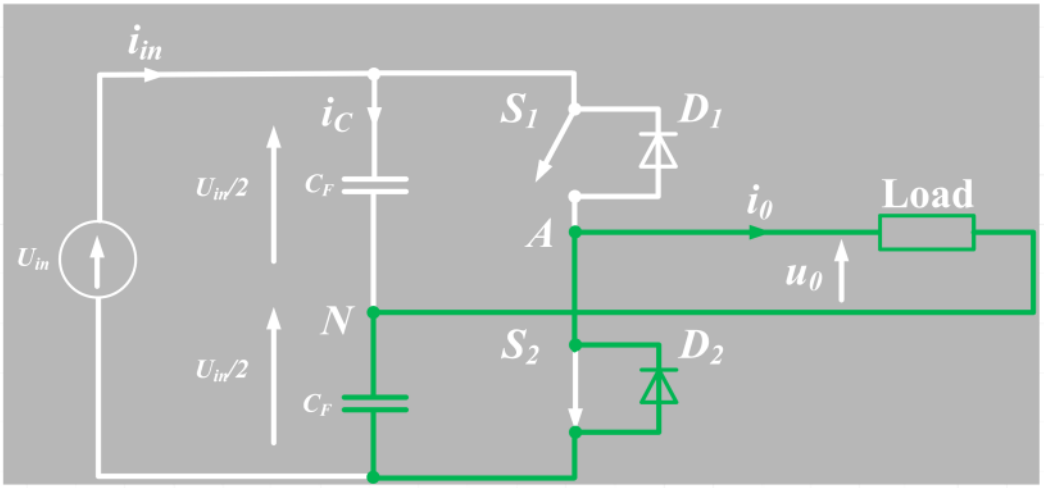


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy

$S_1 = 0$, $S_2 = 1$, $i_0 > 0$, $u_0 = -U_{in}/2$

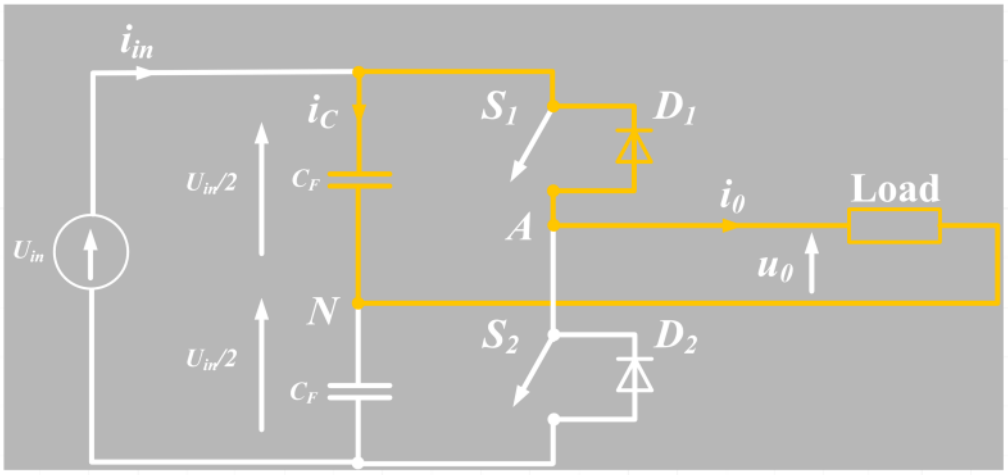


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy

$S_1 = 0,\ S_2 = 0,\ i_0 > 0,\ u_0 = U_{in}/2$

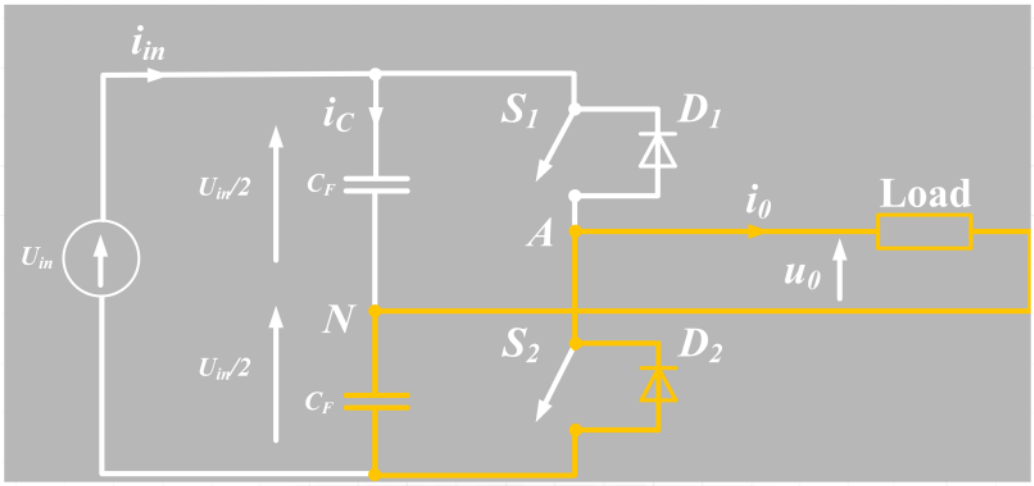


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy

$S_1 = 0,\ S_2 = 0,\ i_0 < 0,\ u_0 = -U_{in}/2$



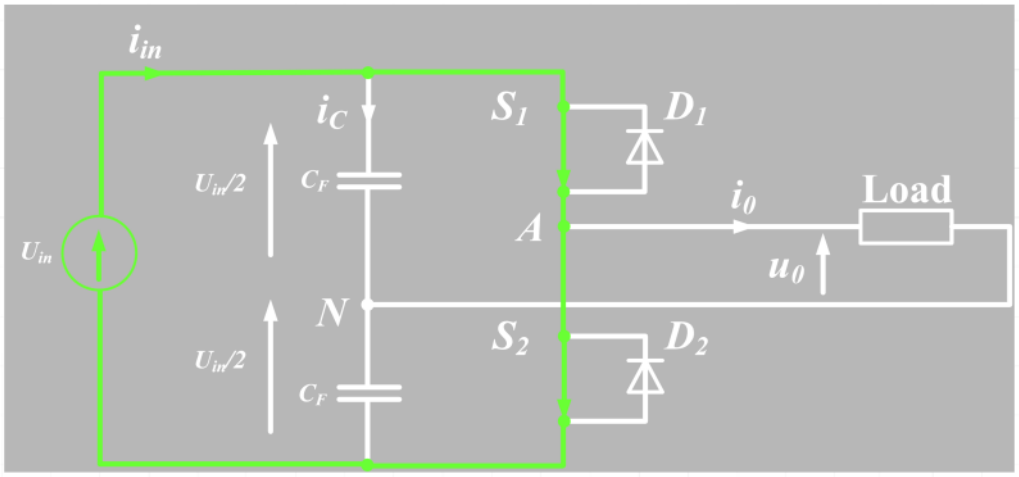
Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy

Zwarcie!

$S_1 = 1$, $S_2 = 1$, $u_0 = 0$



Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, półmostkowy

Nr	Stan	Przyrząd przewodzący prąd	Napięcie wyjściowe	Typ
1	$S_1 = 1$ $S_2 = 0$	S_1 – gdy $i_0>0$ D_1 – gdy $i_0<0$	$u_0 = U_{in}/2$	zdefiniowane
2	$S_1 = 0$ $S_2 = 1$	S_2 – gdy $i_0<0$ D_2 – gdy $i_0>0$	$u_0 = -U_{in}/2$	zdefiniowane
3	$S_1 = 0$ $S_2 = 0$	D_1 – gdy $i_0<0$ D_2 – gdy $i_0>0$	$u_0 = U_{in}/2$ $u_0 = -U_{in}/2$	niezdefiniowane
4	$S_1 = 1$ $S_2 = 1$	S_1, S_2	$u_0 = 0$	zwarcie!

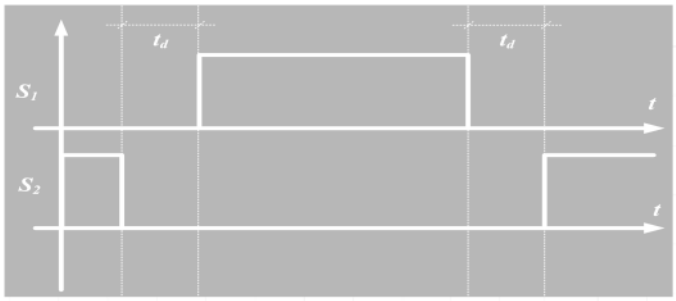
Falowniki jednofazowe

Jak unikać zwarć, czyli tzw. czas martwy

Czas martwy (ang. dead-time) – czas pomiędzy załączaniem i wyłączaniem tranzystorów tej samej gałęzi falownika (zależny od wykorzystanych tranzystorów, ca. 1-3 μs), niezbędny żeby uniknąć zwarć układu zasilającego.

Wpływ czasu martwego:

- Chwilowa utrata możliwości sterowania (stan niezdefiniowany)
- Zniekształcenie napięcia wyjściowego



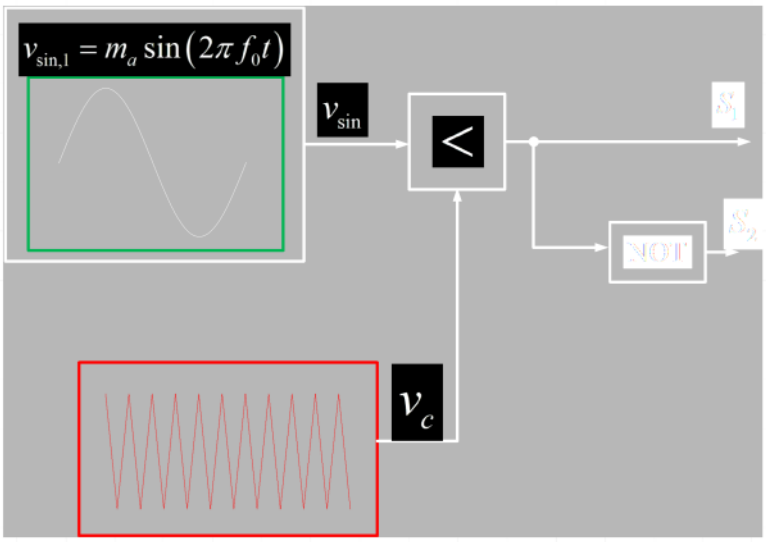
Metody kompensacji czasu martwego

Wrocław University of Science and Technology

- ponoć na kolosie będzie dead-time

Falowniki jednofazowe

Sinusoidalna metoda modulacji napięcia dla jednofazowego falownika napięcia



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Trójkątny sygnał nośny

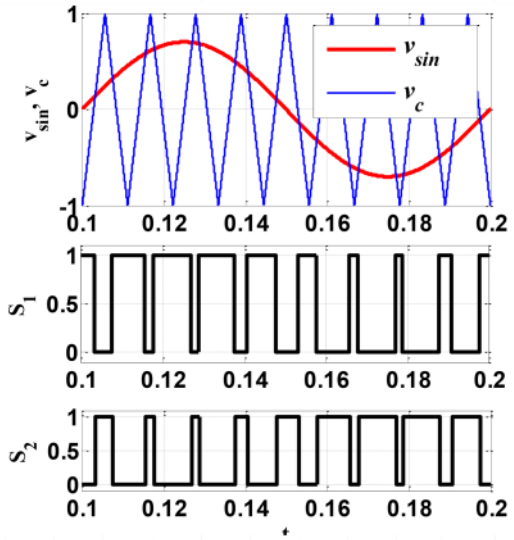
Sinusoidalna metoda modulacji napięcia dla jednofazowego falownika napięcia

$v_{sin} = v_{sin,max} \sin(2\pi f_0 t)$ – sygnał modulujący

v_c – sygnał nośny

f_0 – częstotliwość wyjściowa (zadana)

f_c – częstotliwość sygnału nośnego



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Piłokształtny sygnał nośny

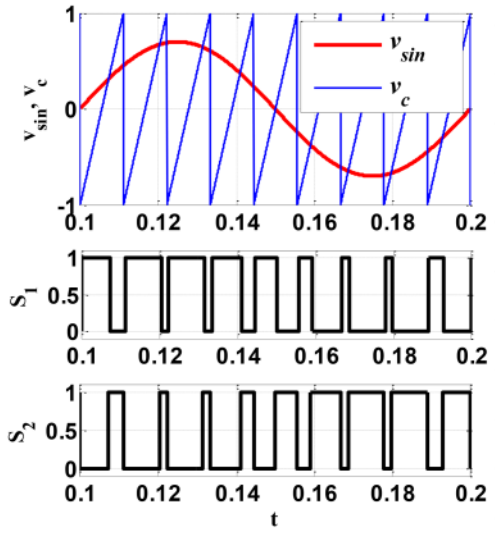
Sinusoidalna metoda modulacji napięcia dla jednofazowego falownika napięcia

m_a – współczynnik modulacji (współczynnik amplitudowy)

$$m_a = \frac{v_{sin,max}}{v_{c,max}}$$

m_f – znormalizowana częstotliwość sygnału nośnego (współczynnik częstotliwościowy)

$$m_f = \frac{f_c}{f_o}$$



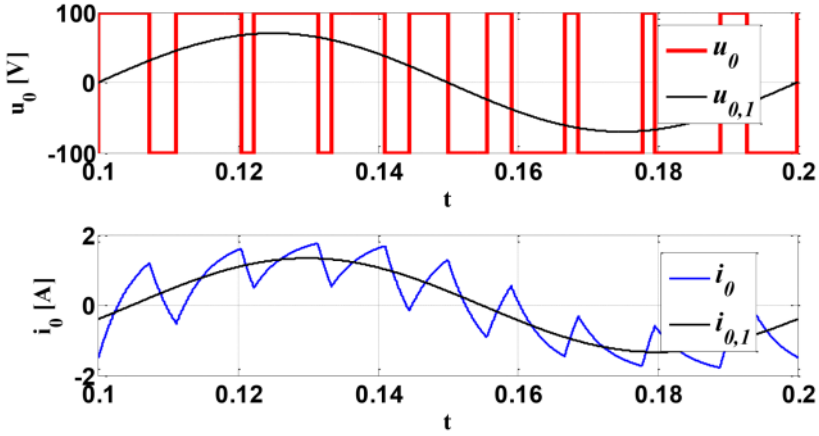
Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Piłokształtny sygnał nośny

Przebiegi prądu i napięcia

$$U_d = 200\,\mathrm{V}, R_0 = 50\,\Omega, L_0 = 250\,\mathrm{mH}, E_0 = 0\,\mathrm{V}$$



Wrocław University of Science and Technology

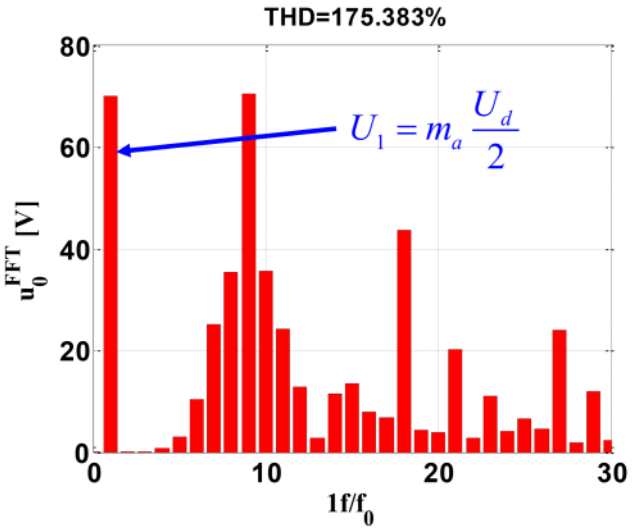
Falowniki jednofazowe

Piłokształtny sygnał nośny

FFT napięcia

Total Harmonic Distortion (THD)

$$THD_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{n} U_k^2}}{U_1} 100\%$$

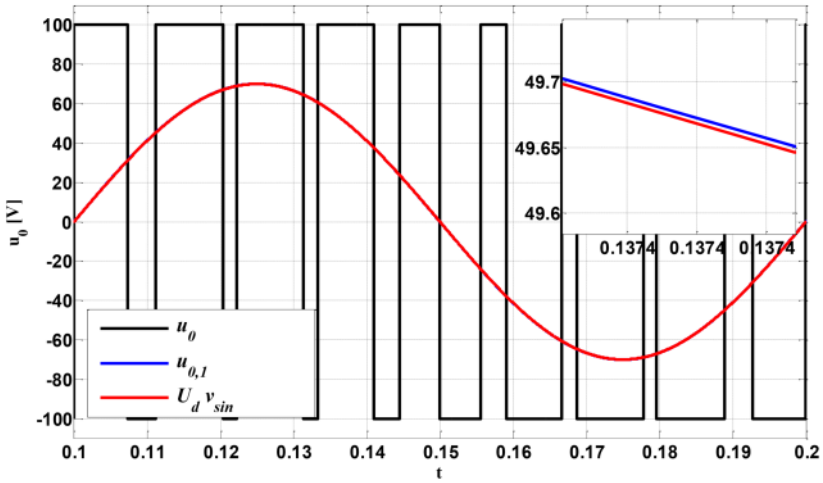


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Piłokształtny sygnał nośny

Pierwsza harmoniczna napięcia



Wrocław University of Science and Technology

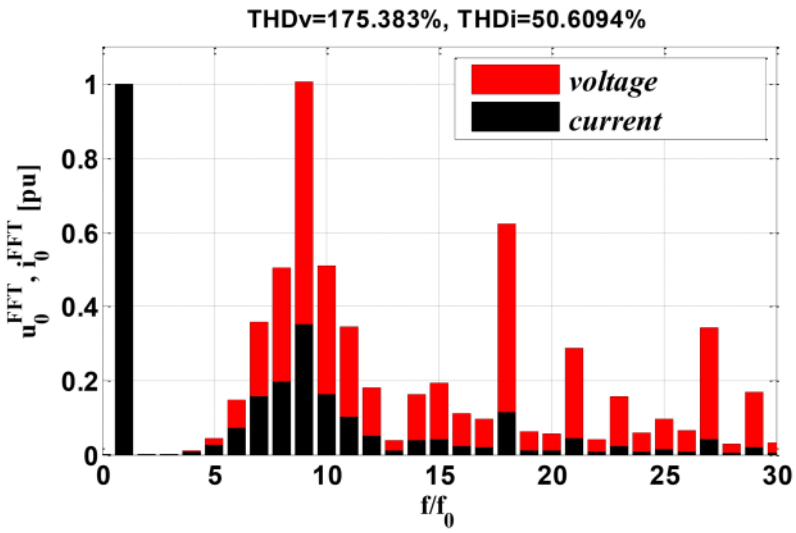
Falowniki jednofazowe

Piłokształtny sygnał nośny

FFT prądu i napięcia

$m_a = 0.7$

$m_f = 9$



Wrocław University of Science and Technology

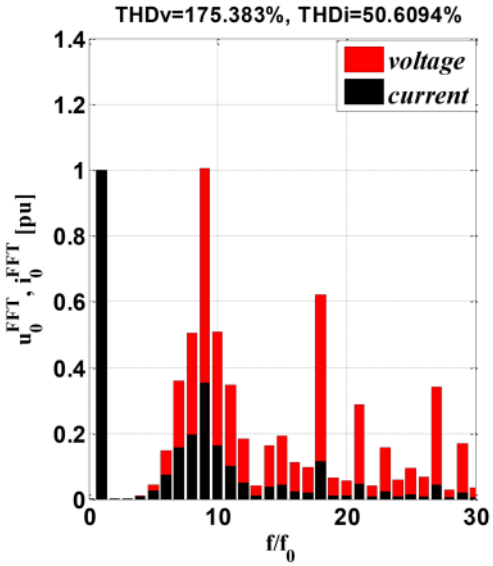
Falowniki jednofazowe

$m_a = 0.7$

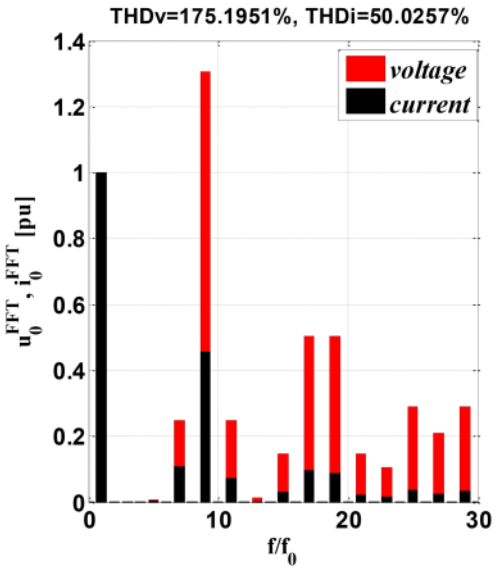
$m_f = 9$

FFT prądu i napięcia

Piłokształtny sygnał nośny



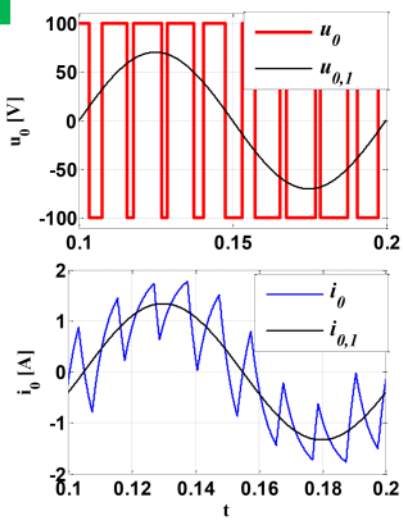
Trójkątny sygnał nośny

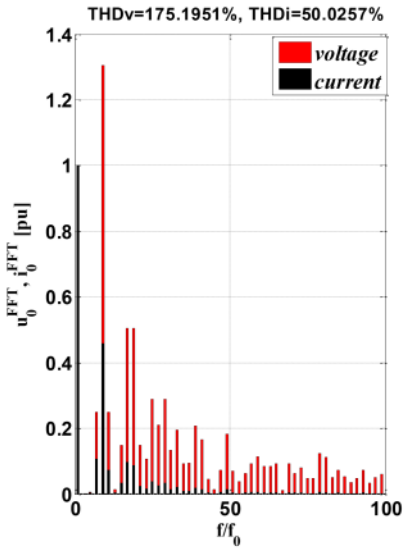


Falowniki jednofazowe

FFT napięcia

$m_f = 9$





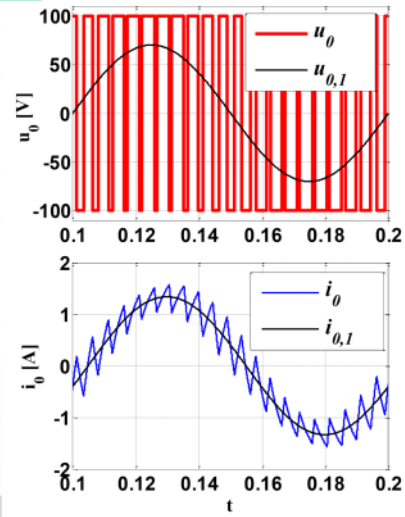
Trójkątny sygnał nośny

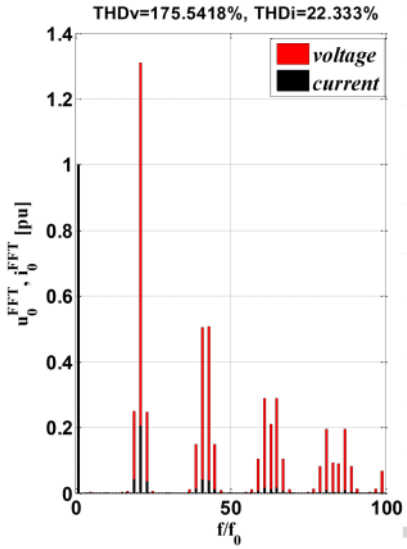
Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

FFT napięcia

$m_f = 21$





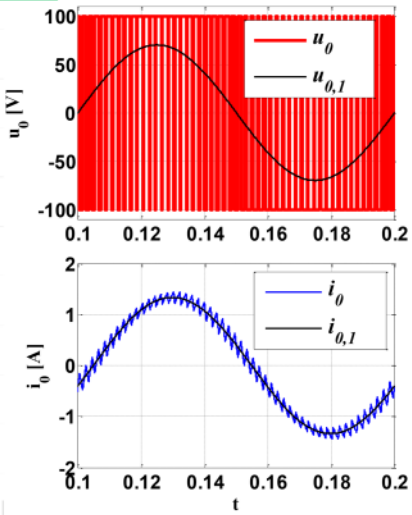
Trójkątny sygnał nośny

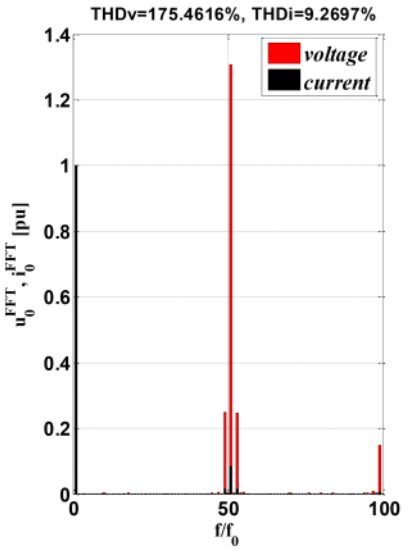
Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

FFT napięcia

$m_f = 51$





Trójkątny sygnał nośny

Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

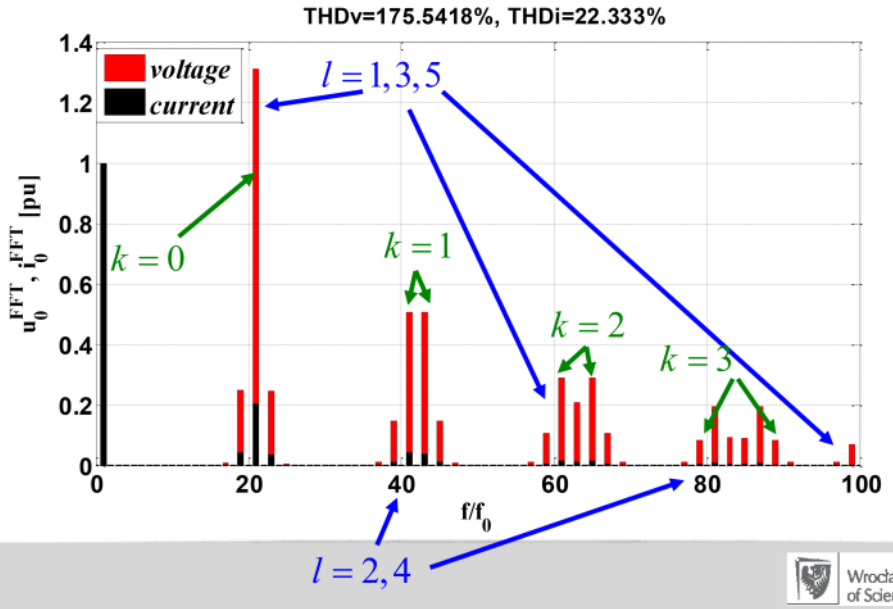
$h = lm_f \pm k,$

$k = 0, 2, 4...; \text{for } l = 1, 3, 5...$

$k = 1, 3, 5... \text{for } l = 2, 4, 6...$

FFT napięcia

$m_f = 21$



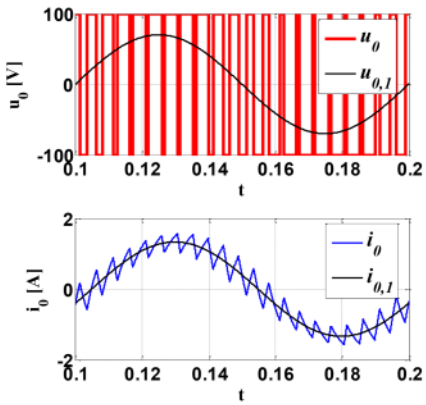
Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

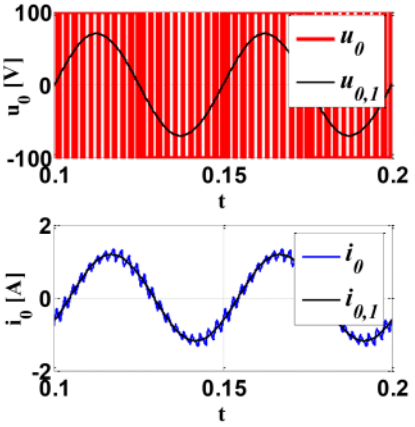
Różne częstotliwości wyjściowe

$m_f = 21$

$f_{out} = 10\,\text{Hz}$



$f_{out} = 20\,\text{Hz}$



Wrocław University of Science and Technology

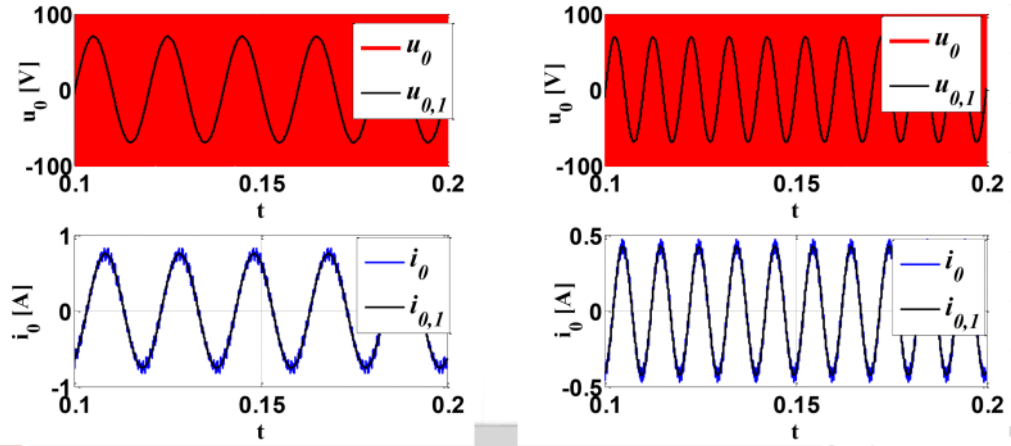
Falowniki jednofazowe

Różne częstotliwości wyjściowe

$m_f = 21$

$f_{out} = 50\,\text{Hz}$

$f_{out} = 100\,\text{Hz}$



Wrocław University of Science and Technology

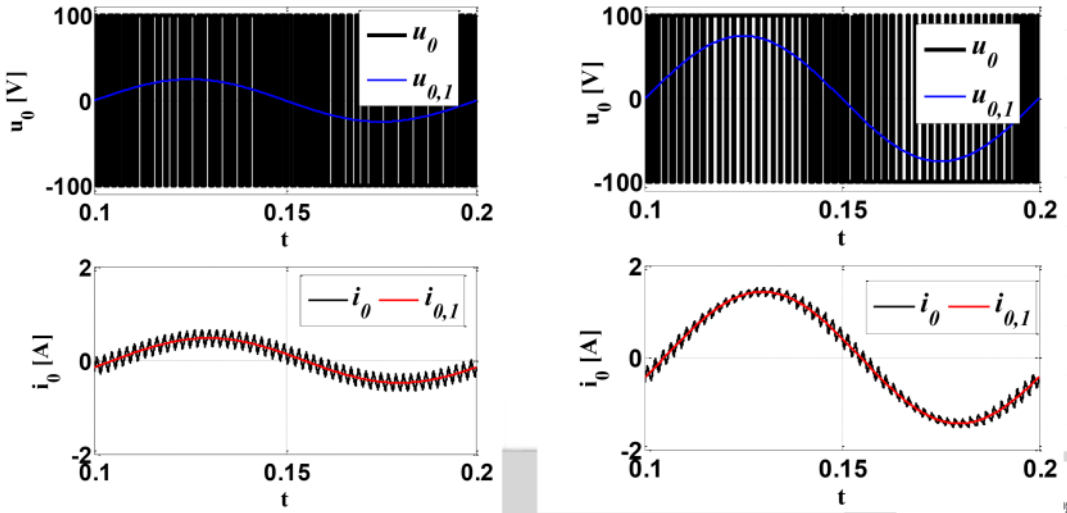
Falowniki jednofazowe

Różne wartości amplitud sygnału wyjściowego

$m_f = 21$

$m_a = 0.25$

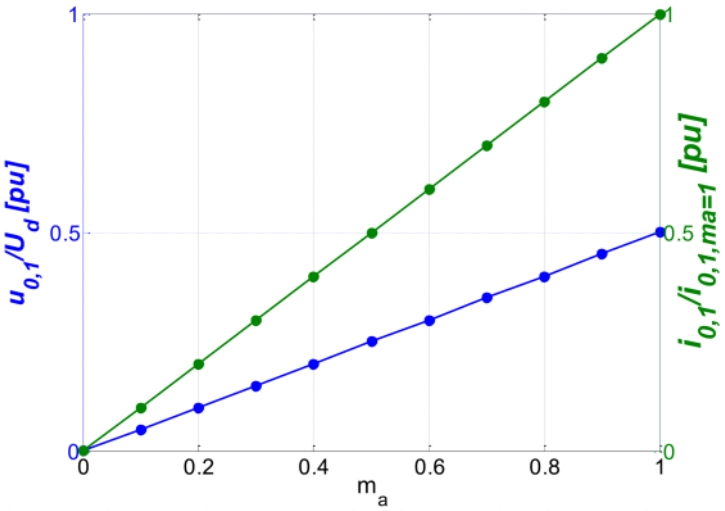
$m_a = 0.75$



Falowniki jednofazowe

Charakterystyki (napięcie i prąd w funkcji współczynnika modulacji)

Charakterystyka liniowa, tylko dla współczynnika modulacji w zakresie od 0 do 1



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

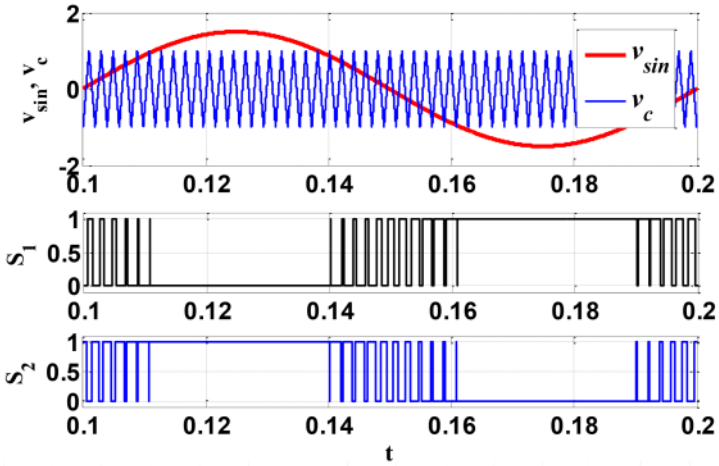
Nadmodulacja

$m_a = 1.5$

Nadmodulacja, zaleta: wyższe wartości napięcia i prądu

Nadmodulacja, wada:

- Harmoniczne nisko-częstotliwościowe
- Nieliniowość charakterystyki

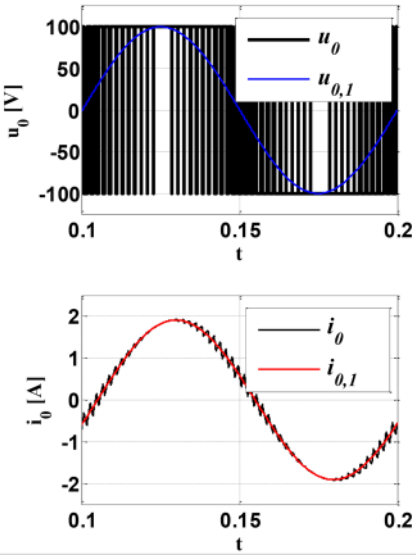


Wrocław University of Science and Technology

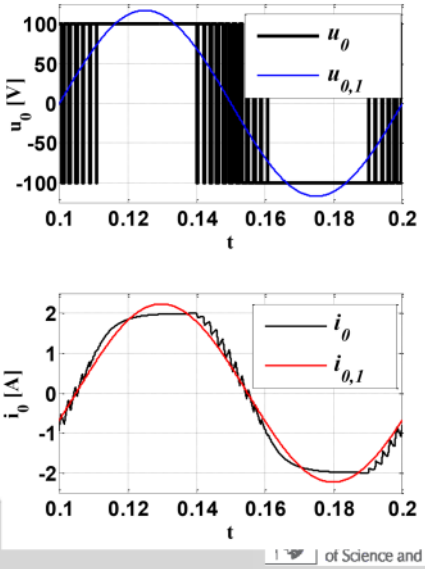
Falowniki jednofazowe

Nadmodulacja

$m_a = 1.0$



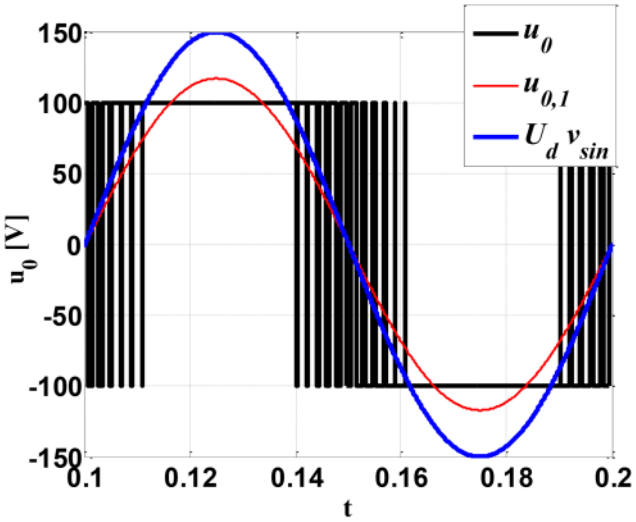
$m_a = 1.5$



Falowniki jednofazowe

Nadmodulacja, napięcie zadane vs napięcie wyjściowe

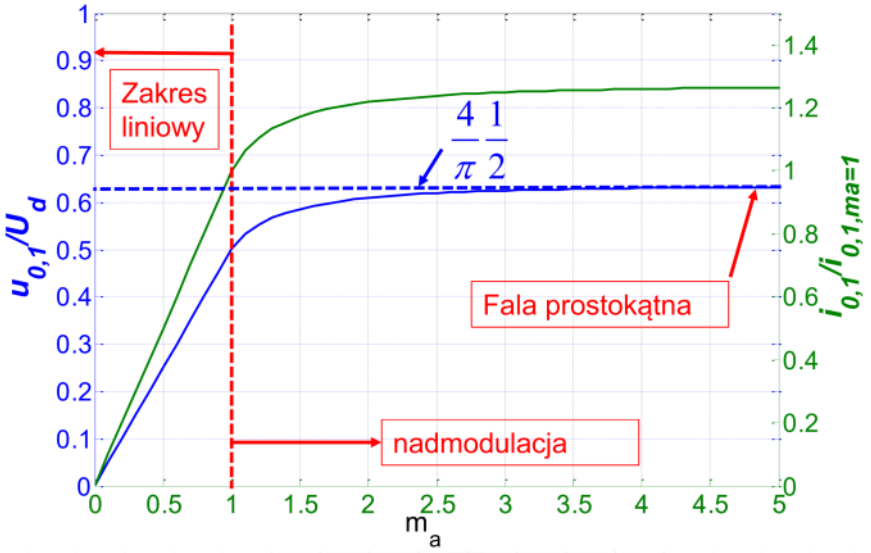
$m_a = 1.5$



Falowniki jednofazowe

$m_a = 1.5$

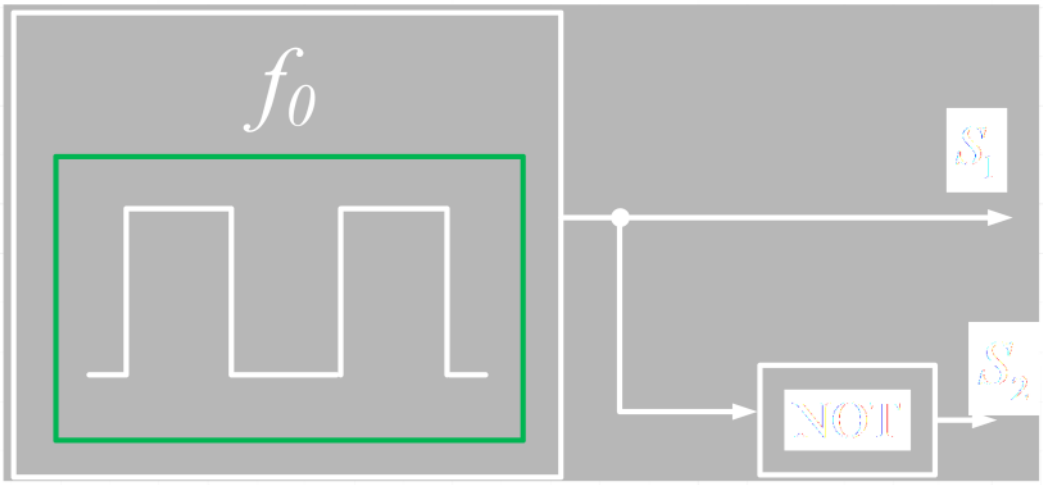
Pełne charakterystyki sterowania



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falowniki z prostokątną falą wyjściową



Wrocław University of Science and Technology

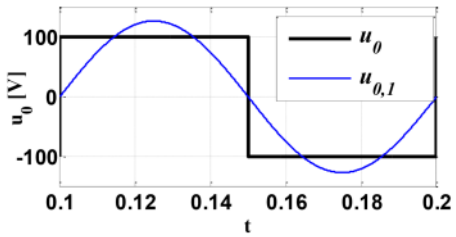
Falowniki napięcia

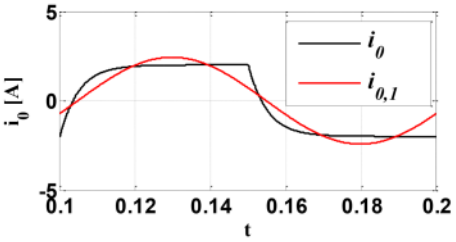
$h = 1,3,5...$

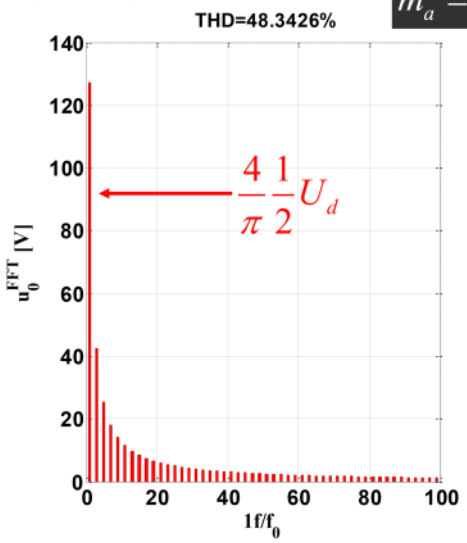
$U_1 = \frac{4}{\pi}\frac{1}{2}U_d,\ U_k = \frac{U_1}{h}$

Falowniki z prostokątną falą wyjściową

$m_a = \infty$



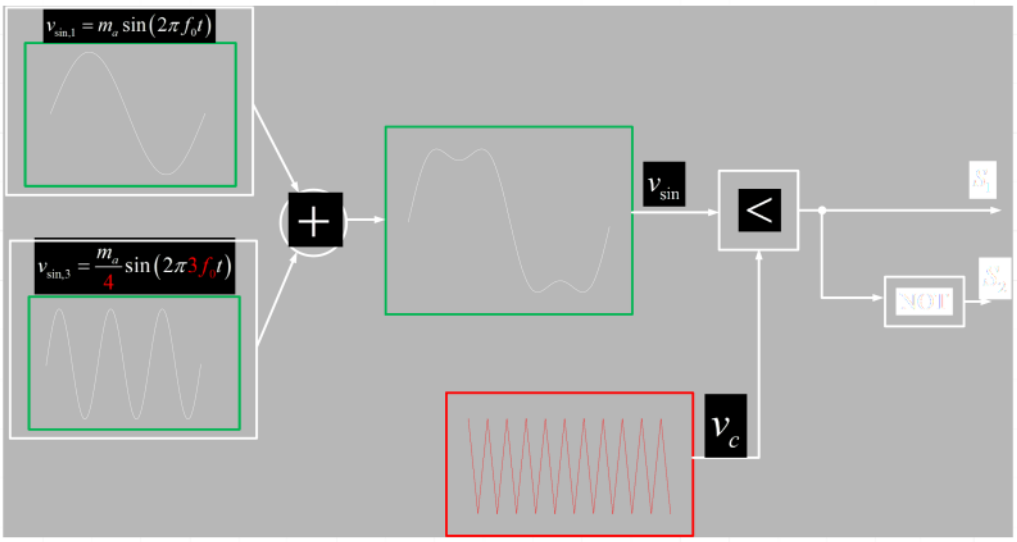




Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

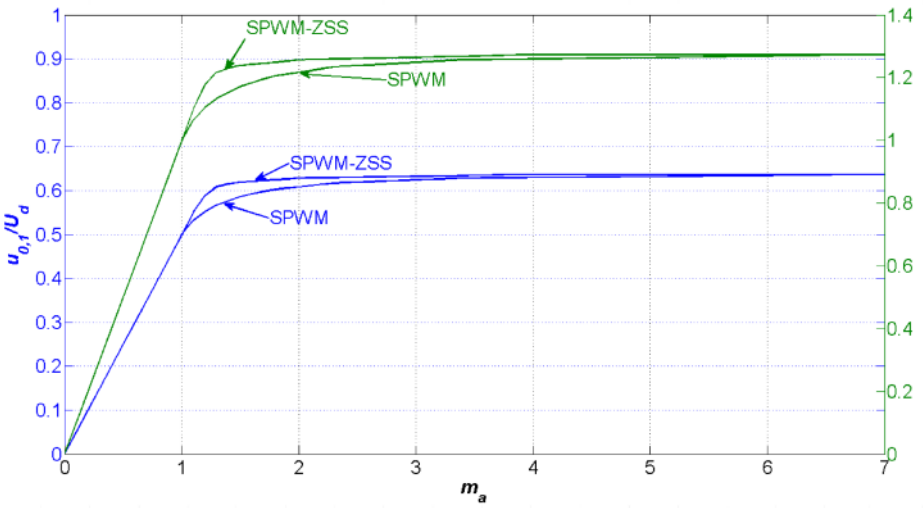
Sygnał kolejności zerowej



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Sygnał kolejności zerowej



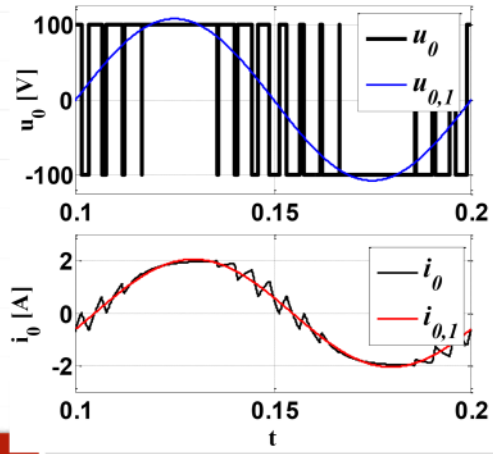
Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

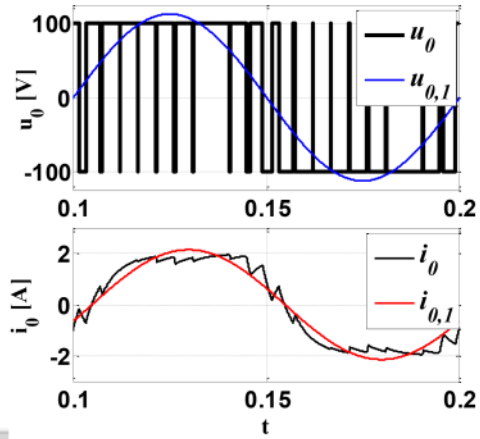
$m_a = 1.15$

Sygnał kolejności zerowej

SPWM



SPWM-ZSS



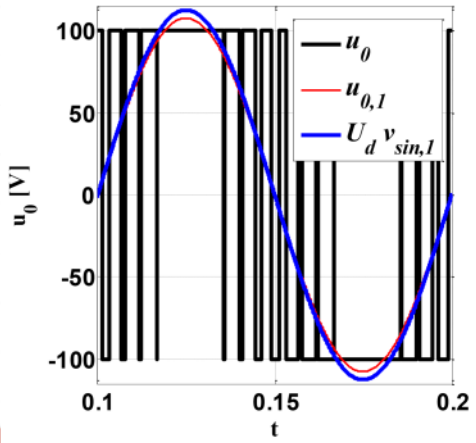
Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

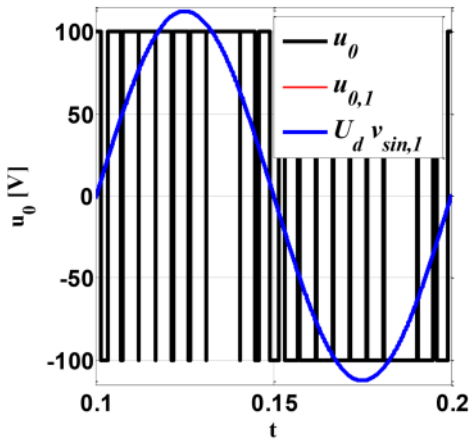
$m_a = 1.15$

Sygnał kolejności zerowej

SPWM



SPWM-ZSS



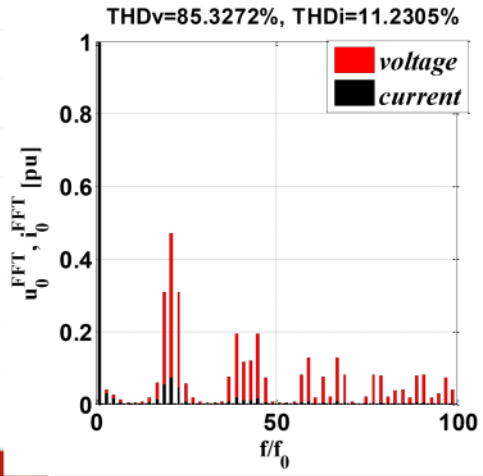
Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

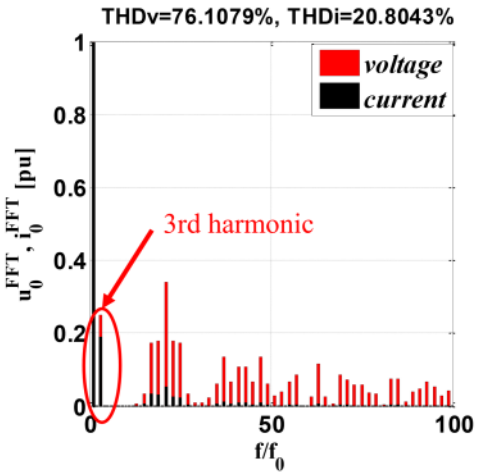
$m_a = 1.15$

Sygnał kolejności zerowej

SPWM



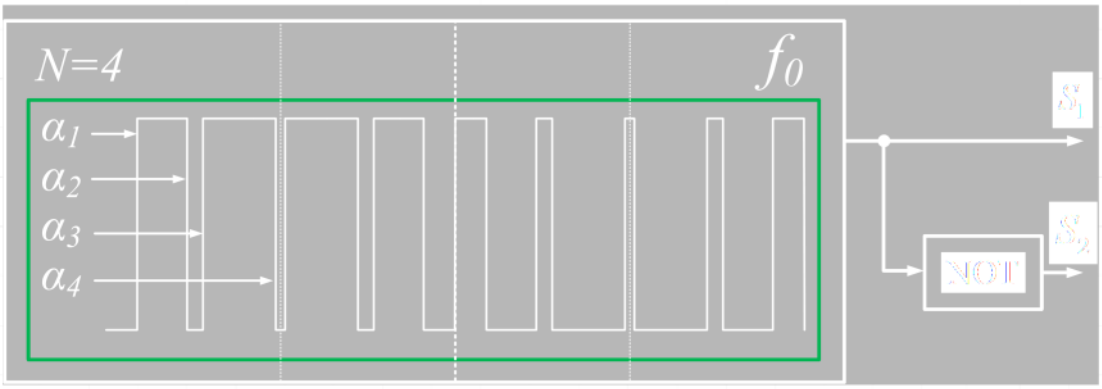
SPWM-ZSS



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Modulacja szerokości impulsów z eliminacją wybranych harmonicznych



$$t_k = \frac{\alpha_k}{\omega_0}$$

Falowniki jednofazowe

Modulacja szerokości impulsów z eliminacją wybranych harmonicznych

Modulacja szerokości impulsów z eliminacją wybranych harmonicznych:

- Symetria względem połowy i ćwiartki fali – eliminacja harmonicznych parzystych
- Dla N załączeń i wyłączeń (w pierwszej ćwiartce fali), istnieje możliwość regulacji amplitudy pierwszej harmonicznej i eliminacja N-1harmonicznych

$$\begin{cases} -\sum_{k=1}^{N}(-1)^k \cos(\alpha_k) = \frac{1}{2} + \frac{\pi m_a}{8}, \\ -\sum_{k=1}^{N}(-1)^k \cos(3\alpha_k) = \frac{1}{2} \\ -\sum_{k=1}^{N}(-1)^k \cos(5\alpha_k) = \frac{1}{2} \\ \vdots \\ -\sum_{k=1}^{N}(-1)^k \cos(n\alpha_k) = \frac{1}{2}, n = 2N-1 \end{cases}$$

Falowniki jednofazowe

Modulacja szerokości impulsów z eliminacją wybranych harmonicznych

N=3

$$\begin{cases} \cos(1\alpha_1)-\cos(1\alpha_2)+\cos(1\alpha_3)=\dfrac{1}{2}+\dfrac{\pi m_a}{8}, \\ \cos(3\alpha_1)-\cos(3\alpha_2)+\cos(3\alpha_3)=\dfrac{1}{2} \\ \cos(5\alpha_1)-\cos(5\alpha_2)+\cos(5\alpha_3)=\dfrac{1}{2} \end{cases}$$

N=4

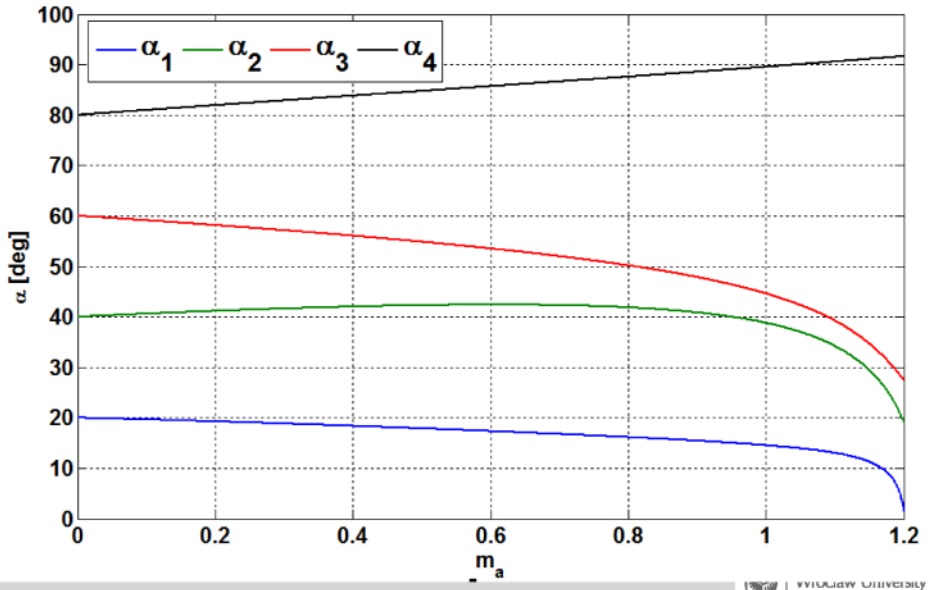
$$\begin{cases} \cos(1\alpha_1)-\cos(1\alpha_2)+\cos(1\alpha_3)-\cos(1\alpha_4)=\dfrac{1}{2}+\dfrac{\pi m_a}{8}, \\ \cos(3\alpha_1)-\cos(3\alpha_2)+\cos(3\alpha_3)-\cos(3\alpha_4)=\dfrac{1}{2} \\ \cos(5\alpha_1)-\cos(5\alpha_2)+\cos(5\alpha_3)-\cos(5\alpha_4)=\dfrac{1}{2} \\ \cos(7\alpha_1)-\cos(7\alpha_2)+\cos(7\alpha_3)-\cos(7\alpha_4)=\dfrac{1}{2} \end{cases}$$

Wrocław University of Science and Technology

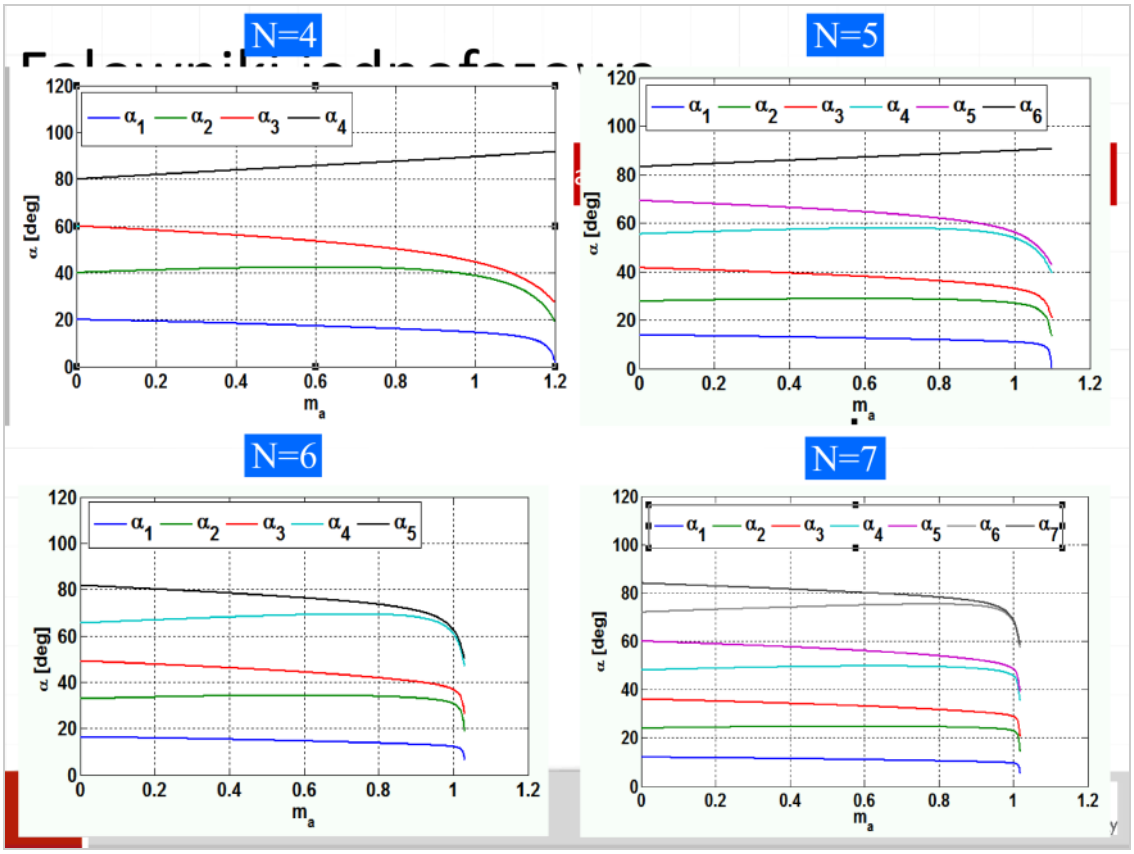
Falowniki jednofazowe

Modulacja szerokości impulsów z eliminacją wybranych harmonicznych

N=4

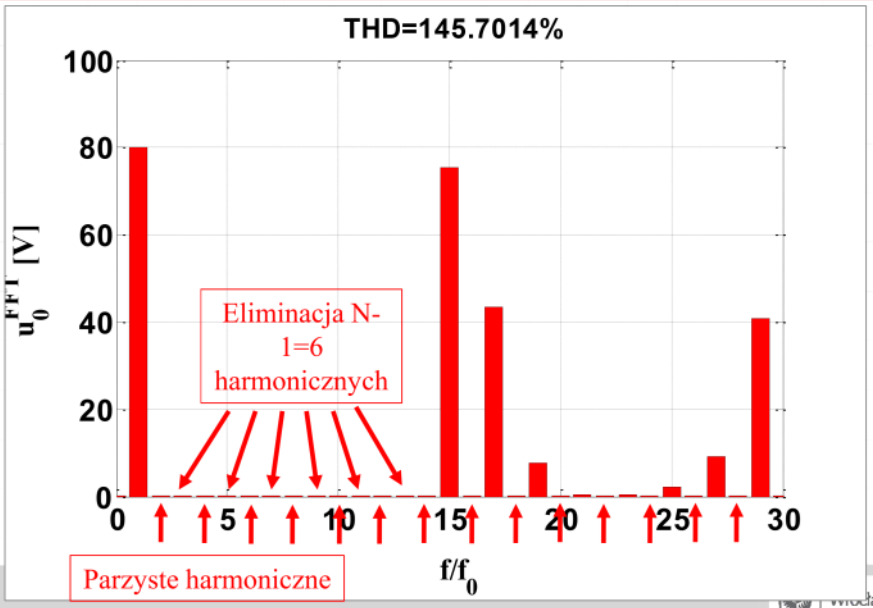


Wrocław University of Science and Technology



Falowniki jednofazowe

Modulacja szerokości impulsów z eliminacją wybranych harmonicznych

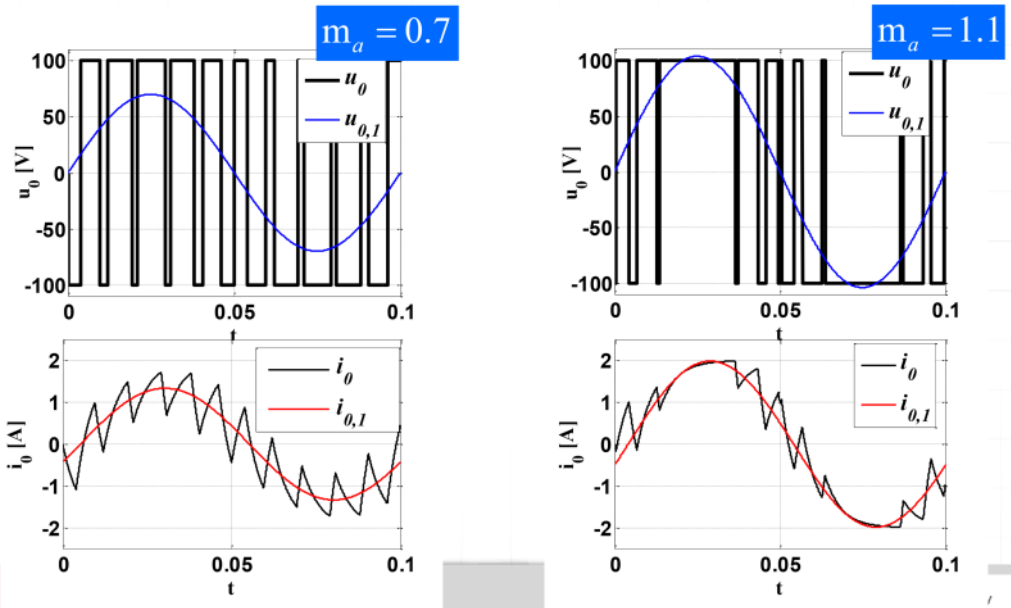


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

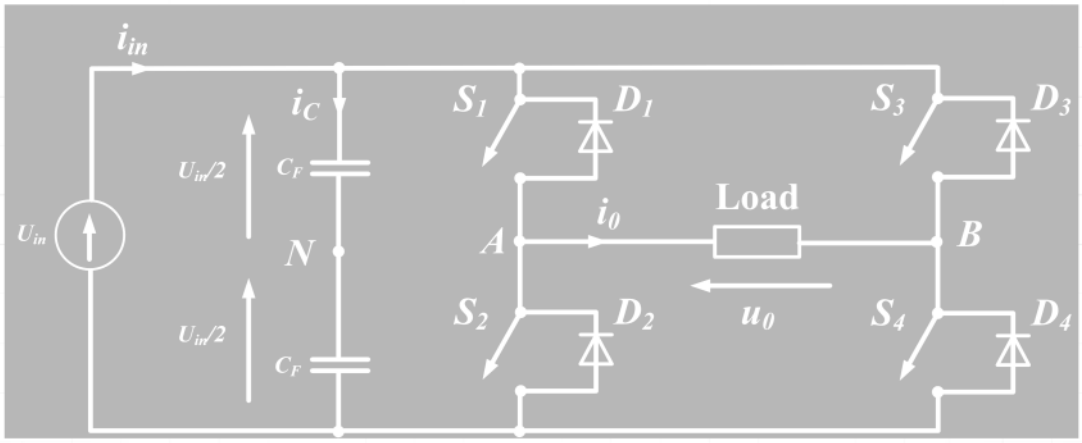
N=5

Modulacja szerokości impulsów z eliminacją wybranych harmonicznych



Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, **mostkowy**



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, **mostkowy**

Nr	Stan	Elementy przewodzące prąd	Napięcie wyjściowe	Typ
1	$\mathbf{S_1 = 1}$, $S_3 = 0$ $S_2=0$, $\mathbf{S_4=1}$	S_1,S_4 – gdy $i_0>0$ D_1,D_4 – gdy $i_0<0$	$u_0 = U_{in}$	zdefiniowane
2	$S_1 = 0$, $\mathbf{S_3 = 1}$ $\mathbf{S_2 = 1}$, $S_4 = 0$	S_2,S_3 – gdy $i_0<0$ D_1,D_4 – gdy $i_0>0$	$u_0 = -U_{in}$	zdefiniowane
3	$\mathbf{S_1 = 1, S_3 = 1}$ $S_2 = 0$, $S_4 = 0$	S_1,D_3 – gdy $i_0>0$ D_1,S_3 – gdy $i_0<0$	$u_0 = 0$	zdefiniowane
4	$S_1 = 0$, $S_3 = 0$ $\mathbf{S_2 = 1, S_4 = 1}$	S_2,D_4 – gdy $i_0<0$ D_2,S_4 – gdy $i_0>0$	$u_0 = 0$	zdefiniowane
5	$\mathbf{S_1 = 1}$, $S_3 = 0$ $\mathbf{S_2 = 1}$, $S_4 = 0$	S_1,S_2	$u_0 = 0$	zwarcie!
6	$S_1 = 0$, $\mathbf{S_3 = 1}$ $S_2 = 0$, $\mathbf{S_4 = 1}$	S_3,S_4	$u_0 = 0$	zwarcie!

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, **mostkowy**, sterowanie **bipolarne**

Nr	Stan	Elementy przewodzące prąd	Napięcie wyjściowe	Typ
1	$\mathbf{S_1 = 1}$, $S_3 = 0$ $S_2=0$, $\mathbf{S_4=1}$	S_1,S_4 – gdy $i_0>0$ D_1,D_4 – gdy $i_0<0$	$u_0 = U_{in}$	zdefiniowane
2	$S_1 = 0$, $\mathbf{S_3 = 1}$ $\mathbf{S_2 = 1}$, $S_4 = 0$	S_2,S_3 – gdy $i_0<0$ D_1,D_4 – gdy $i_0>0$	$u_0 = -U_{in}$	zdefiniowane

Sterowanie bipolarne, tylko dwa poziomy napięć -> napięcie wyjściowe analogiczne jak w przypadku falownika półmostkowego, jedynie:

u_0 (mostkowy) = 2 x u_0 (półmostkowy)

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, **mostkowy**, sterowanie **unibipolarne**

Nr	Stan	Elementy przewodzące prąd	Napięcie wyjściowe	Typ
1	$\mathbf{S_1 = 1}$, $S_3 = 0$ $S_2=0$, $\mathbf{S_4=1}$	S_1,S_4 – gdy $i_0>0$ D_1,D_4 – gdy $i_0<0$	$u_0 = U_{in}$	zdefiniowane
2	$S_1 = 0$, $\mathbf{S_3 = 1}$ $\mathbf{S_2 = 1}$, $S_4 = 0$	S_2,S_3 – gdy $i_0<0$ D_1,D_4 – gdy $i_0>0$	$u_0 = -U_{in}$	zdefiniowane
3	$\mathbf{S_1 = 1, S_3 = 1}$ $S_2 = 0$, $S_4 = 0$	S_1,D_3 – gdy $i_0>0$ D_1,S_3 – gdy $i_0<0$	$u_0 = 0$	zdefiniowane
4	$S_1 = 0$, $S_3 = 0$ $\mathbf{S_2 = 1, S_4 = 1}$	S_2,D_4 – gdy $i_0<0$ D_2,S_4 – gdy $i_0>0$	$u_0 = 0$	zdefiniowane

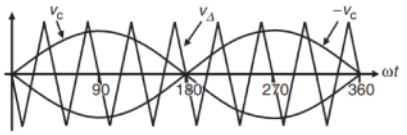
Napięcie na wyjściu: U_{in}, $-U_{in}$, 0.

Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Falownik napięcia jednofazowy, **mostkowy**, sterowanie **unibipolarne**

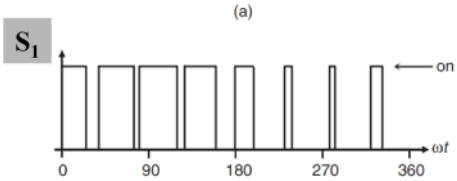
Dwa sygnały modulujące:



(a)

Sterowanie tranzystorem S_1

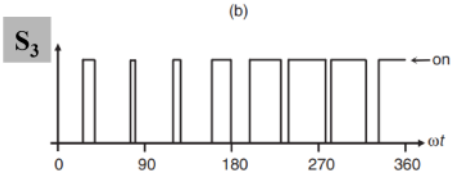
S2=neg(S1)



(b)

Sterowanie tranzystorem S_3

S4=neg(S3)



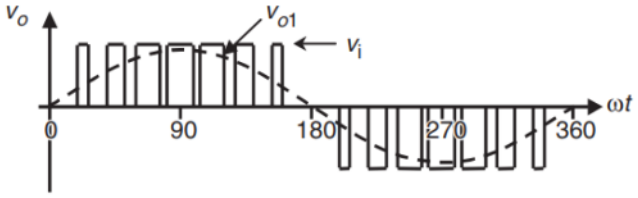
(c)

Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

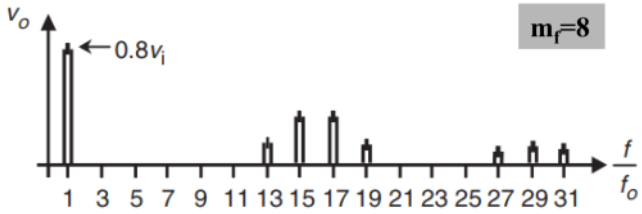
Falownik napięcia jednofazowy, **mostkowy**, sterowanie **unibipolarne**

Napięcie wyjściowe:



FFT napięcia wyjściowego:

h=l m_f+/- k,
l=2,4,6…
k=1,3,5…



Jakość napięcia i prądu (mostkowy sterowany unipolarne) >
Jakość napięcia i prądu (mostkowy sterowany bipolarnie)

Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

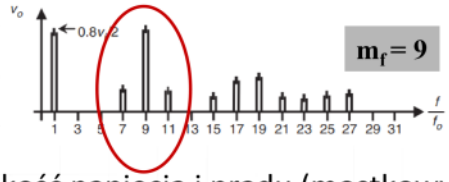
Falownik napięcia jednofazowy, **mostkowy, porównanie**

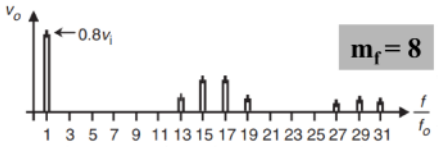
Sterowanie bipolarne:
(m_f nieparzyste)

h=l m_f+/- k,
l=1,2,3…
k=2,4,5…

Sterowanie unipolarne:
(m_f parzyste)

h=l m_f+/- k,
l=2,4,6…
k=1,3,5…



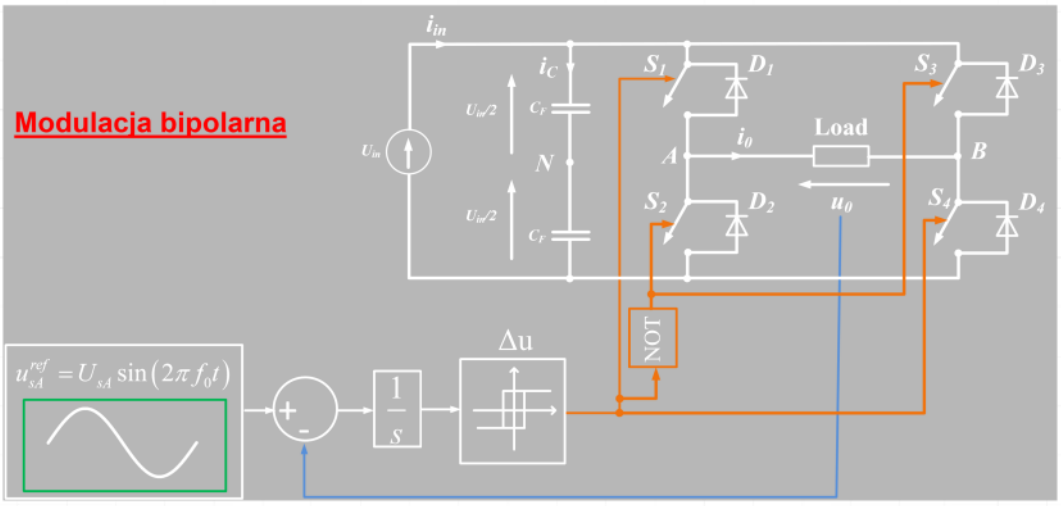


Jakość napięcia i prądu (mostkowy sterowany unipolarne >
Jakość napięcia i prądu (mostkowy sterowany bipolarnie)

Wrocław University of Science and Technology

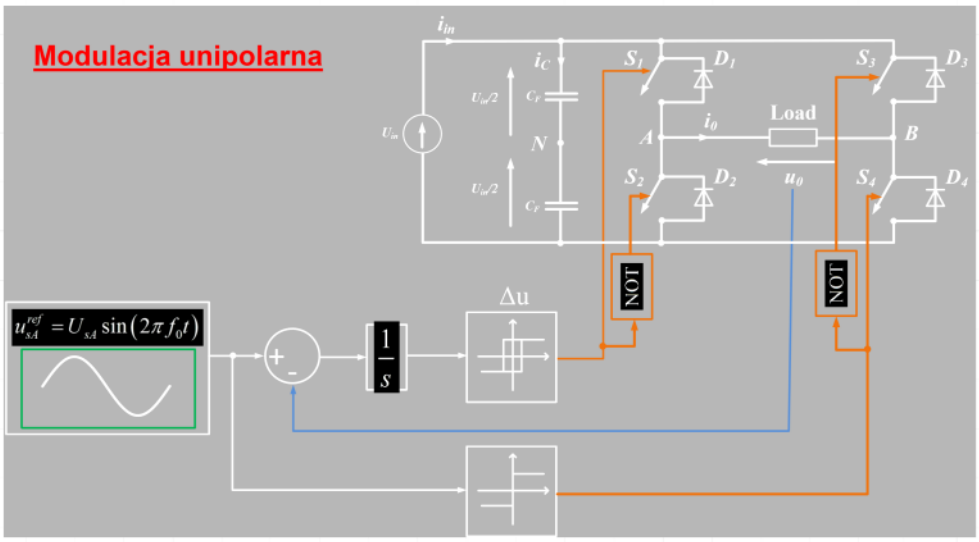
Falowniki jednofazowe

Modulacja ze sprzężeniem napięciowym



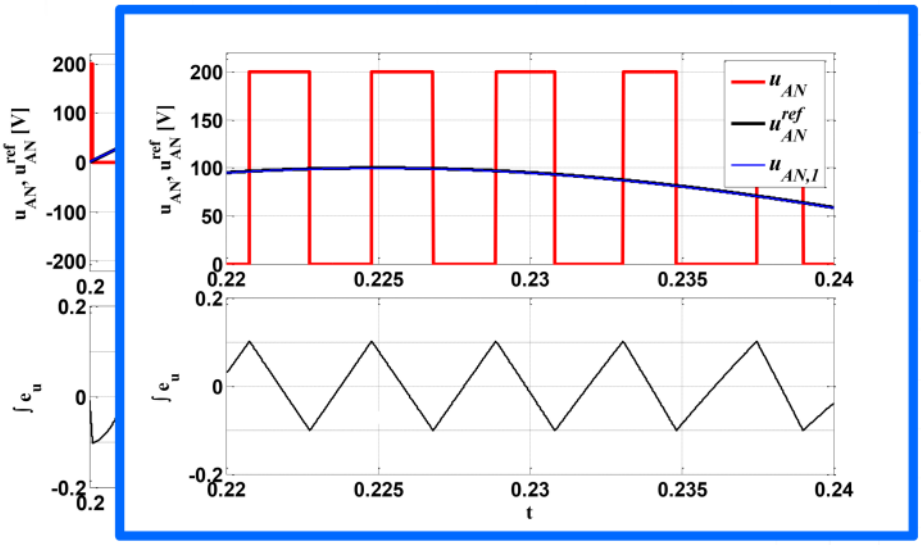
Falowniki jednofazowe

Modulacja ze sprzężeniem napięciowym



Falowniki jednofazowe

Modulacja ze sprzężeniem napięciowym — Modulacja unipolarna



Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Modulacja ze sprzężeniem napięciowym — Modulacja unipolarna

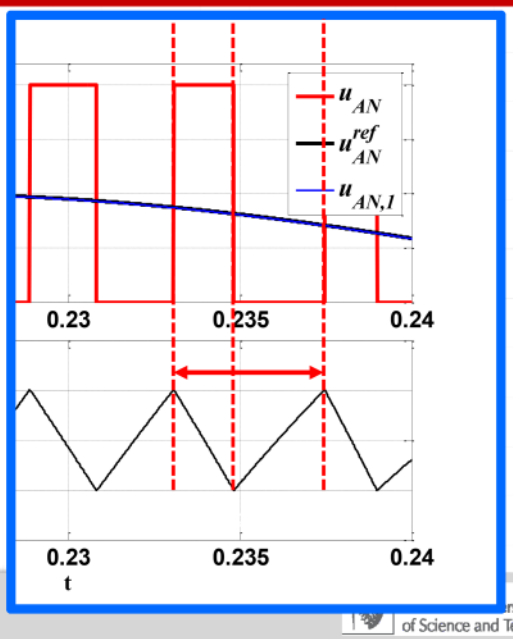
$$\int_{t_1}^{t_2}\left(u_0^{ref}-U_d\right)\mathrm{d}t=-\Delta u$$

$$\int_{t_2}^{t_3}u_0^{ref}\,\mathrm{d}t=\Delta u$$

$$\Downarrow$$

$$\int_{t_1}^{t_3}u_0^{ref}\,\mathrm{d}t=U_d\frac{t_2-t_1}{t_3-t_1}=U_d\gamma$$

$$\gamma=\frac{t_2-t_1}{t_3-t_1}=\frac{\Delta t}{T_0}$$

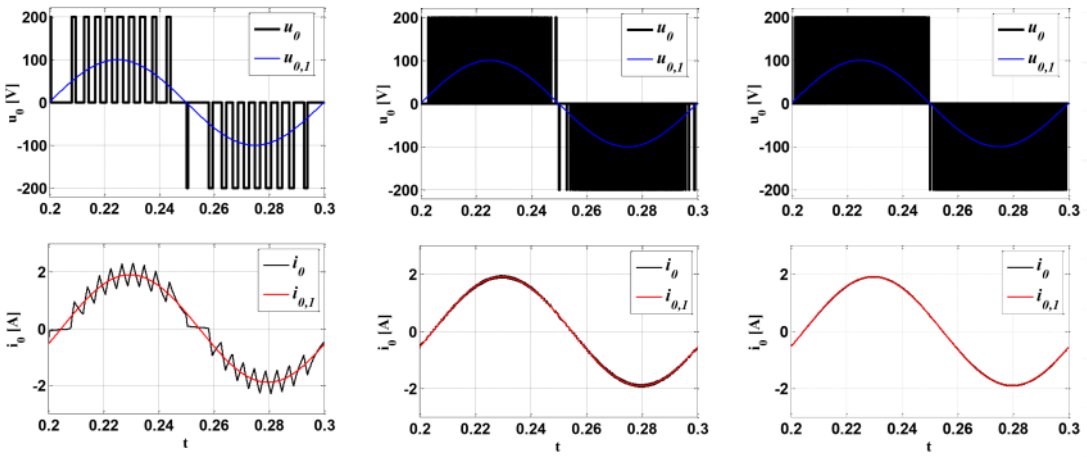


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Modulacja ze sprzężeniem napięciowym — Modulacja unipolarna

Δu = 0.1 **Δu= 0.01** **Δu = 0.001**

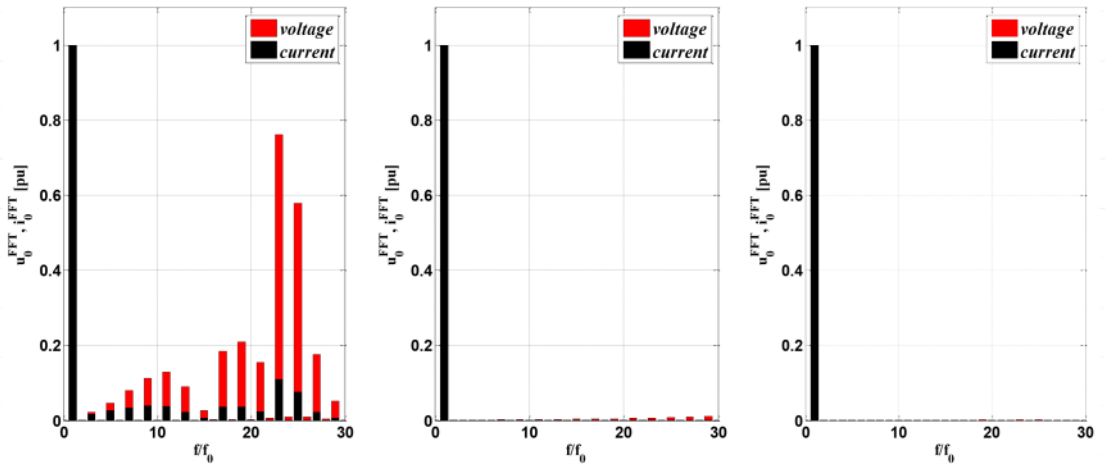


Wrocław University of Science and Technology

Falowniki jednofazowe

Modulacja ze sprzężeniem napięciowym — Modulacja unipolarna

Δu = 0.1 **Δu= 0.01** **Δu= 0.001**



Wrocław University of Science and Technology

Dziękuję za uwagę!