

Wykład 11

Falowniki trójfazowe

dr inż. Grzegorz Tarchała



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Falowniki trójfazowe

Plan wykładu

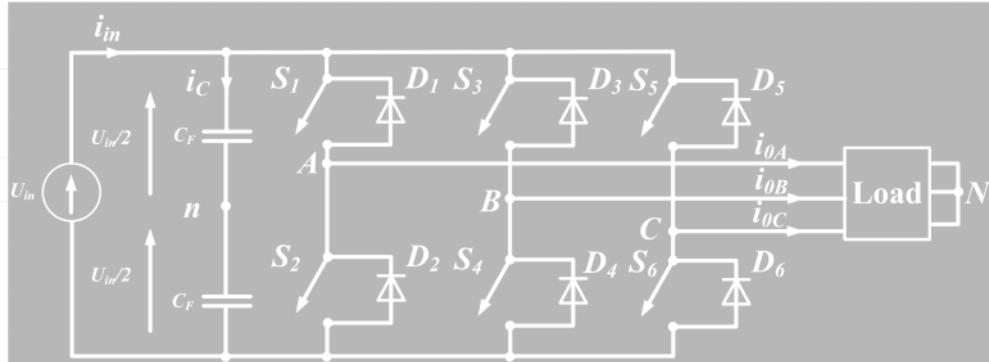
- Falowniki napięcia:
 - Schemat blokowy, zależności
 - Metody modulacji:
 - » Modulacja sinusoidalna
 - » Modulacja z sygnałem kolejności zerowej
 - » Modulacja z eliminacją harmonicznych
 - » Modulacja wektorowa
 - » Modulacja ze sprzężeniem prądowym
 - » Modulacja ze sprzężeniem napięciowym
 - » Modulacja losowa
- Falowniki prądu



Wrocław University
of Science and Technology

Falowniki trójfazowe

Falownik napięcia (ang. Voltage Source Inverter, VSI)

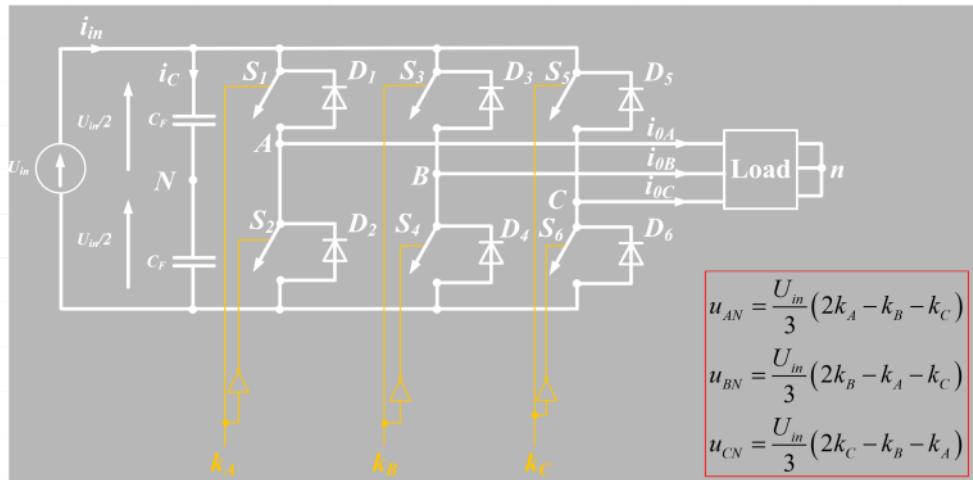


5



Falowniki trójfazowe

Falownik napięcia, schemat blokowy, sygnały sterujące

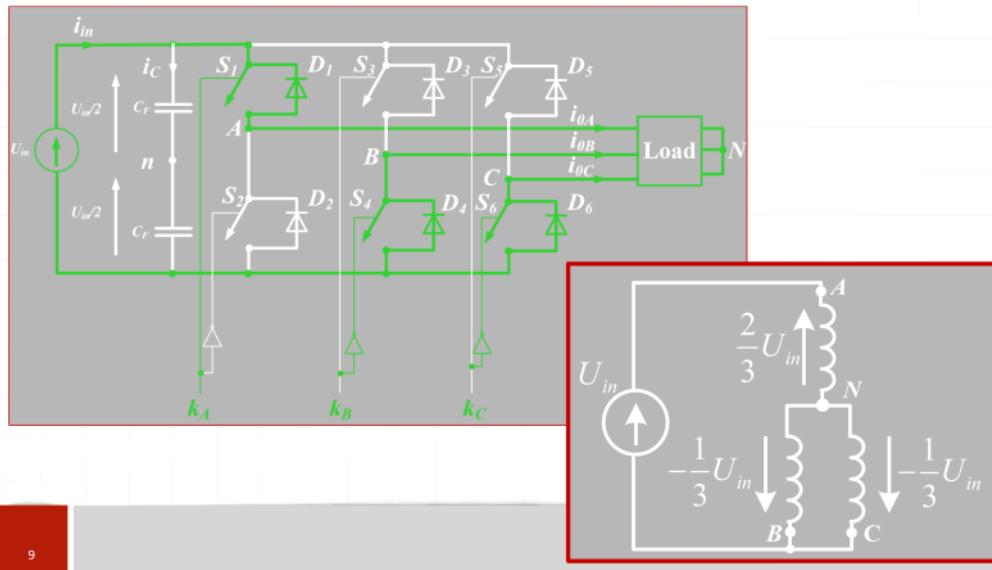


7



Falowniki trójfazowe

Falownik napięcia – schemat blokowy



9

Falowniki trójfazowe

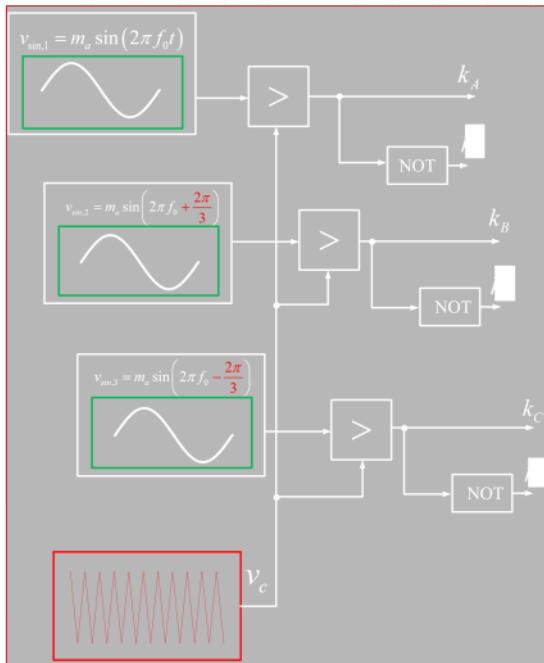
Modulacja sinusoidalna

Amplitudowy współczynnik modulacji:

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

Częstotliwościowy współczynnik modulacji:

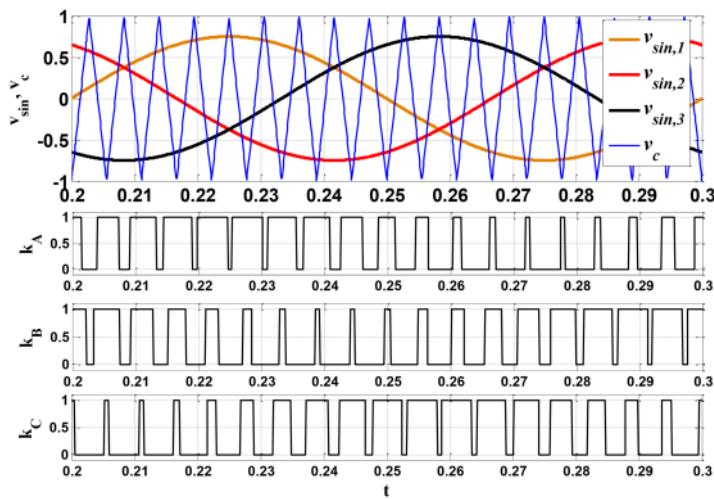
$$m_f = \frac{f_c}{f_o}$$



11

Falowniki trójfazowe

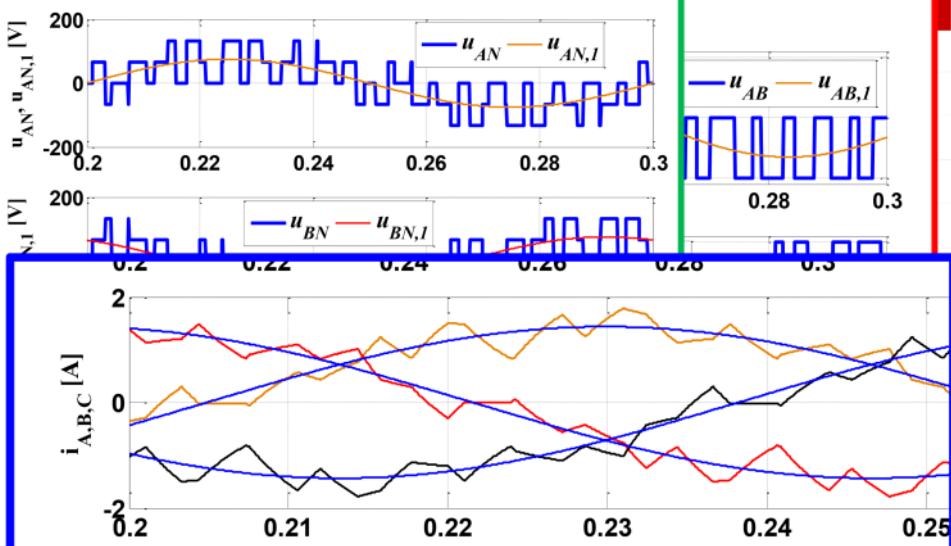
Sygnały modulujące, nośny i sterujące



13

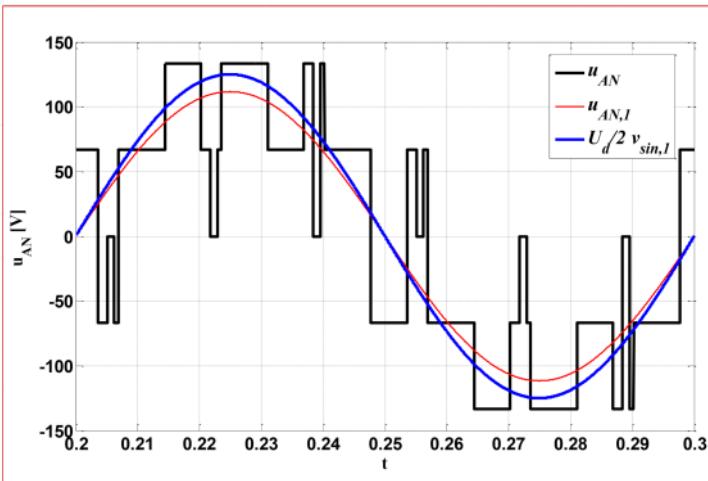
Wroclaw University
of Science and Technology

Falowniki trójfazowe



15

Falowniki trójfazowe



$$m_a = 0.75$$

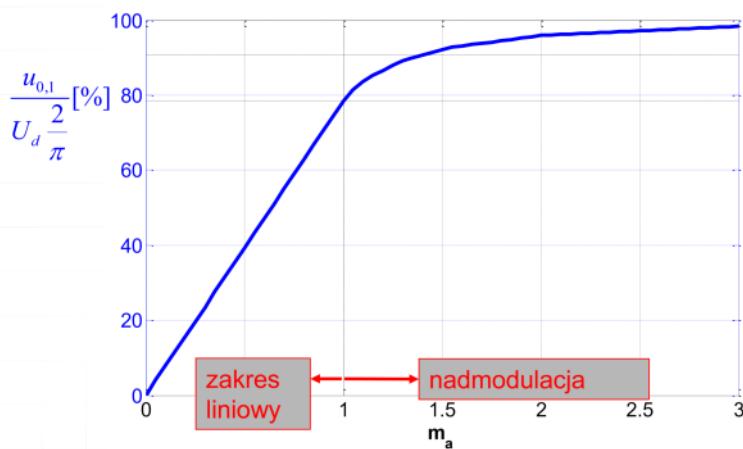
$$m_a = 1$$

$$m_a = 1.25$$

17

Falowniki trójfazowe

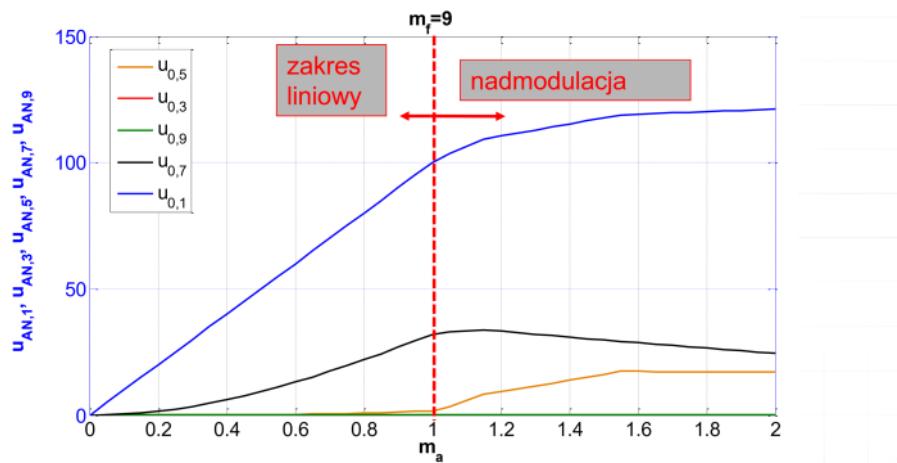
Charakterystyka sterowania



19

Falowniki trójfazowe

Wyższe harmoniczne



21

 Wrocław University
of Science and Technology

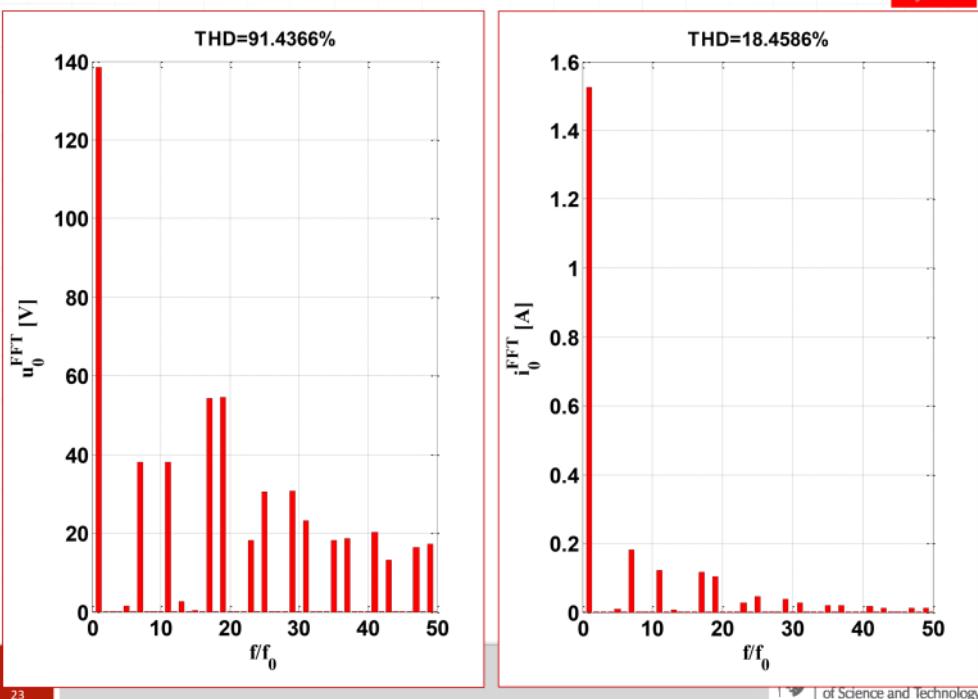
Napięcie

Prąd

 $m_f = 9$

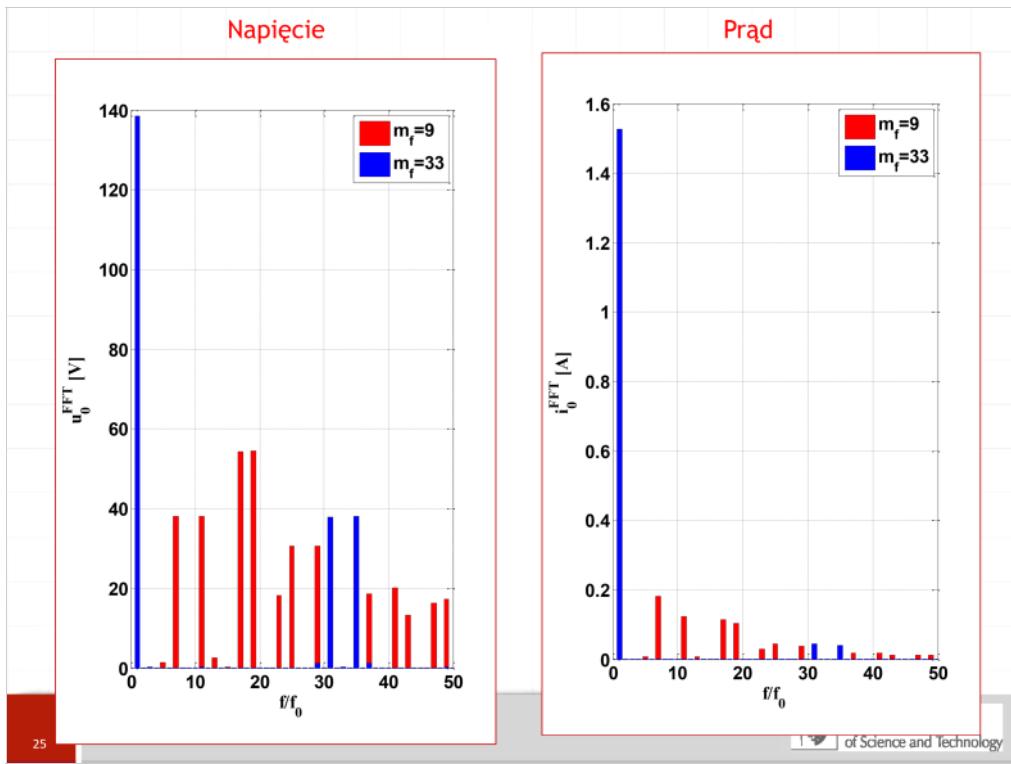
THD=91.4366%

THD=18.4586%



23

 Wrocław University
of Science and Technology



Falowniki trójfazowe

Napięcia

Zakres liniowy
 $0 < m_a \leq 1$

Napięcia fazowe:

$$0 < u_{AN,1} \leq \frac{U_{in}}{2}$$

$$0 < u_{BN,1} \leq \frac{U_{in}}{2}$$

$$0 < u_{CN,1} \leq \frac{U_{in}}{2}$$

Nadmodulacja
 $m_a > 1$

$$\frac{U_{in}}{2} < u_{AN,1} \leq \frac{4}{\pi} \frac{U_{in}}{2}$$

$$\frac{U_{in}}{2} < u_{BN,1} \leq \frac{4}{\pi} \frac{U_{in}}{2}$$

$$\frac{U_{in}}{2} < u_{CN,1} \leq \frac{4}{\pi} \frac{U_{in}}{2}$$

Napięcia międzyfazowe:

$$u_{AB,1} = m_a \sqrt{3} \frac{U_{in}}{2}$$

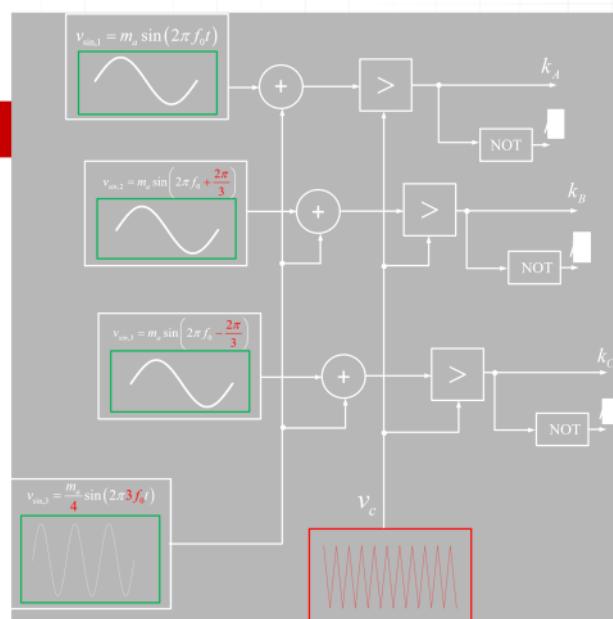
$$u_{BC,1} = m_a \sqrt{3} \frac{U_{in}}{2}$$

$$u_{CA,1} = m_a \sqrt{3} \frac{U_{in}}{2}$$

Falowniki trójfazowe

Modulacja napięcia

Modulacja sinusoidalna z sygnałem kolejności zerowej (SPWM)



Wersja 1a

29

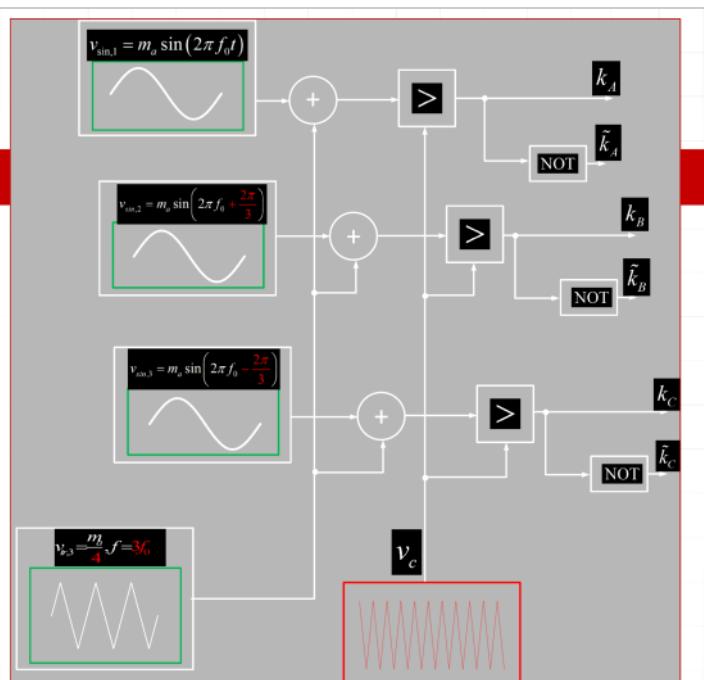


Wroclaw University
of Science and Technology

Falowniki trójfazowe

Modulacja napięcia

Modulacja sinusoidalna z sygnałem kolejności zerowej (SPWM)



Wersja 1b

31



Wroclaw University
of Science and Technology

Falowniki trójfazowe

Modulacja napięcia

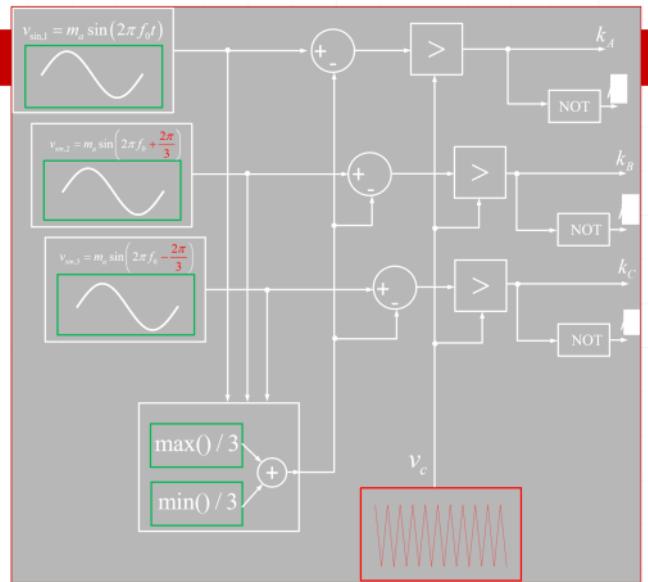
Modulacja sinusoidalna z sygnałem kolejności zerowej (SPWM)

Wersja 2

33

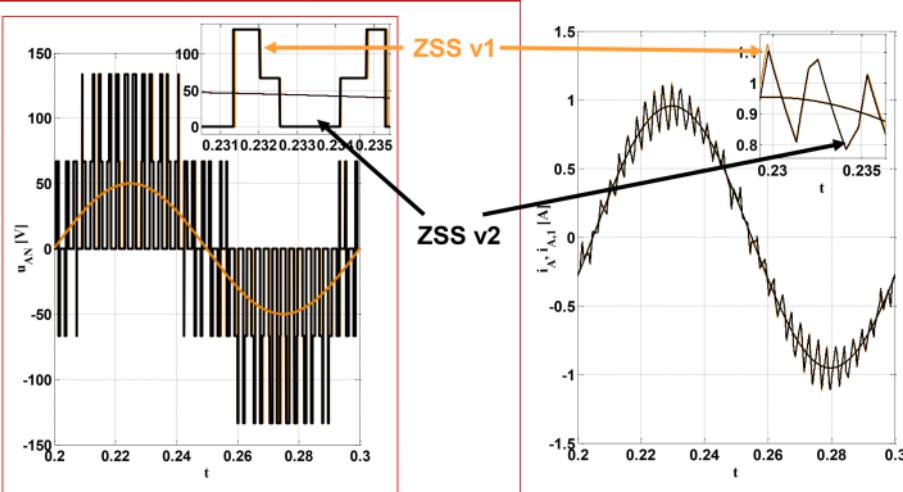


Wroclaw University
of Science and Technology



Falowniki trójfazowe

SPWM-ZSS, porównanie



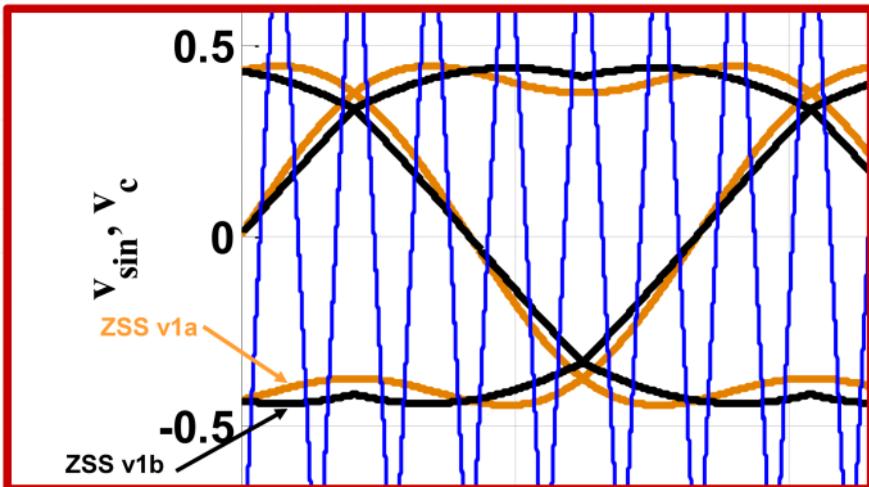
35



Wroclaw University
of Science and Technology

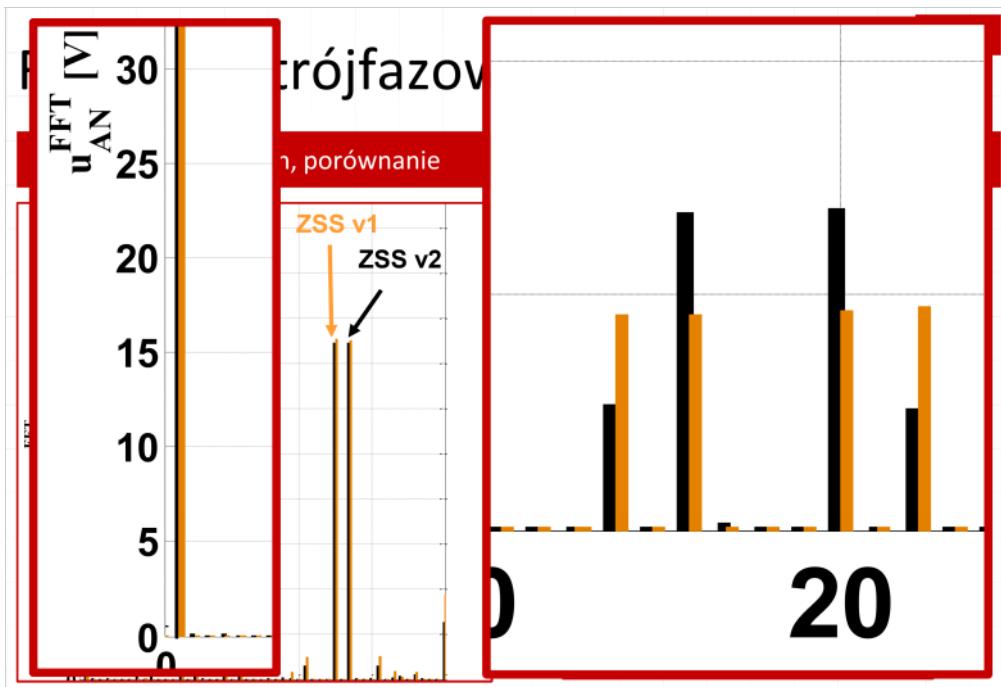
Falowniki trójfazowe

SPWM-ZSS, porównanie



37

Wroclaw University
of Science and Technology

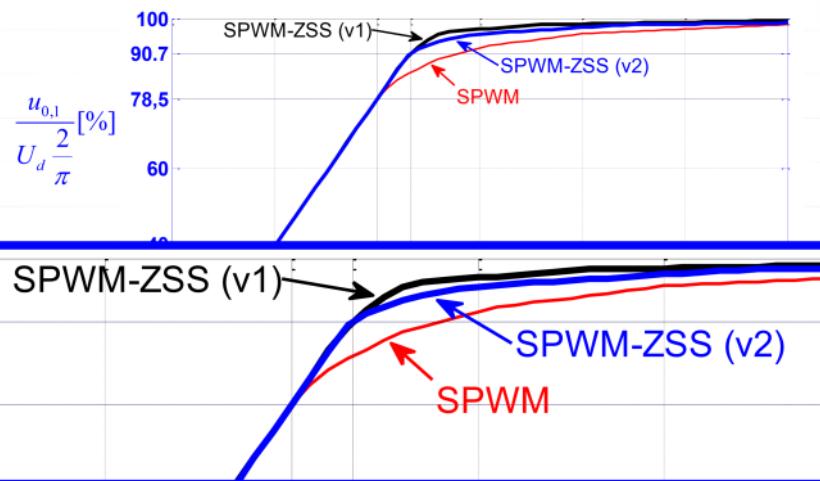


39

Wroclaw University
of Science and Technology

Falowniki trójfazowe

Charakterystyka sterowania, porównanie

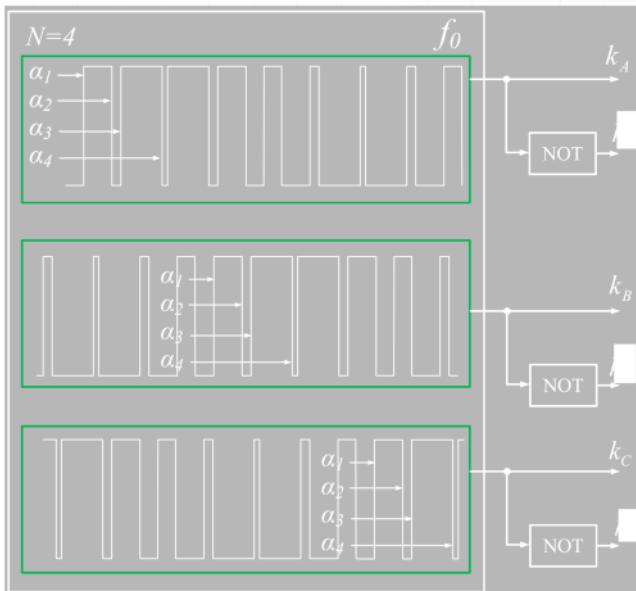


41



Falowniki trójfazowe

Modulacja z eliminacją
harmonicznych niskiego
rzędu



43



Falowniki trójfazowe

Modulacja z eliminacją harmonicznych niskiego rzędu

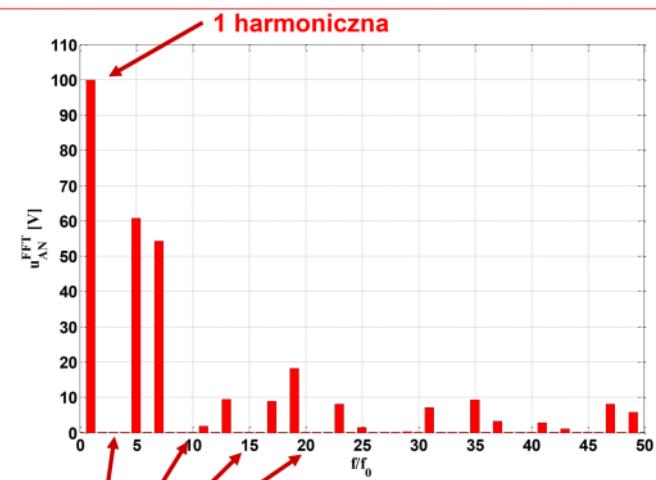
$$\begin{aligned} -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(\alpha_k) &= \frac{1}{2} + \frac{\pi m_a}{8}, \\ -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(3\alpha_k) &= \frac{1}{2} \\ -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(5\alpha_k) &= \frac{1}{2} \\ -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(7\alpha_k) &= \frac{1}{2} \\ -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(9\alpha_k) &= \frac{1}{2} \\ &\vdots \\ -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(n\alpha_k) &= \frac{1}{2}, n = 2N-1 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(\alpha_k) &= \frac{1}{2} + \frac{\pi m_a}{8}, \\ -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(5\alpha_k) &= \frac{1}{2} \\ -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(7\alpha_k) &= \frac{1}{2} \\ &\vdots \\ -\sum_{k=1}^N (-1)^k \cos(n\alpha_k) &= \frac{1}{2}, n = 2N-1 \end{aligned}$$

Falowniki trójfazowe

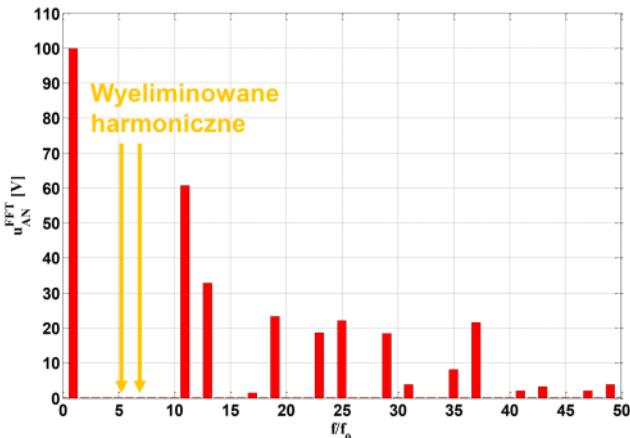
Modulacja z eliminacją harmonicznych niskiego rzędu



N=1

Falowniki trójfazowe

Modulacja z eliminacją harmonicznych niskiego rzędu

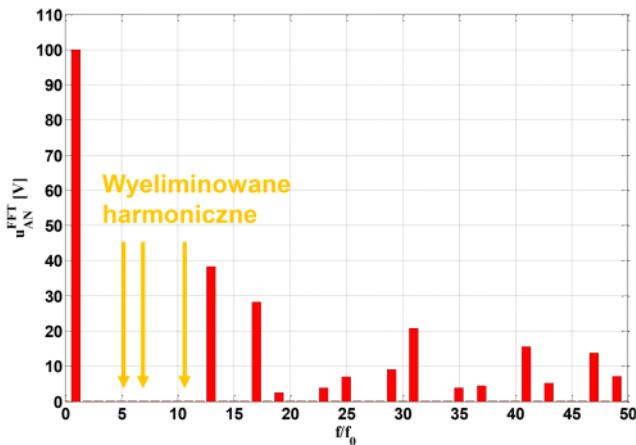


$N=3$

49

Falowniki trójfazowe

Modulacja z eliminacją harmonicznych niskiego rzędu

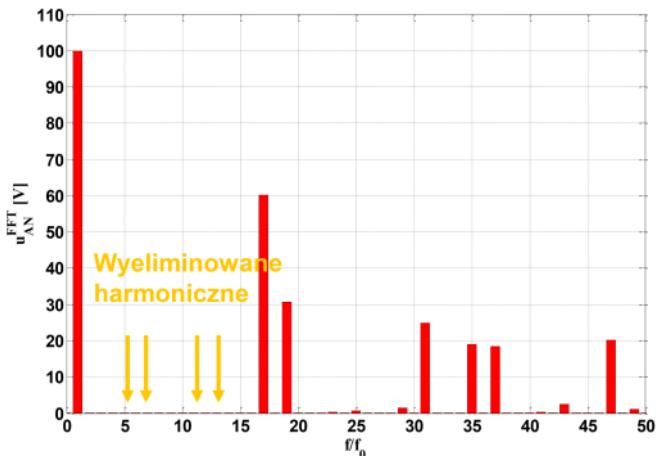


$N=4$

51

Falowniki trójfazowe

Modulacja z eliminacją harmonicznych niskiego rzędu



N=5

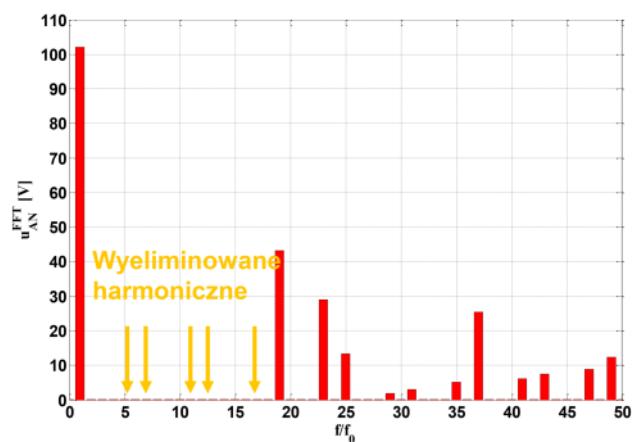
53



Wrocław University
of Science and Technology

Falowniki trójfazowe

Modulacja z eliminacją harmonicznych niskiego rzędu



N=6

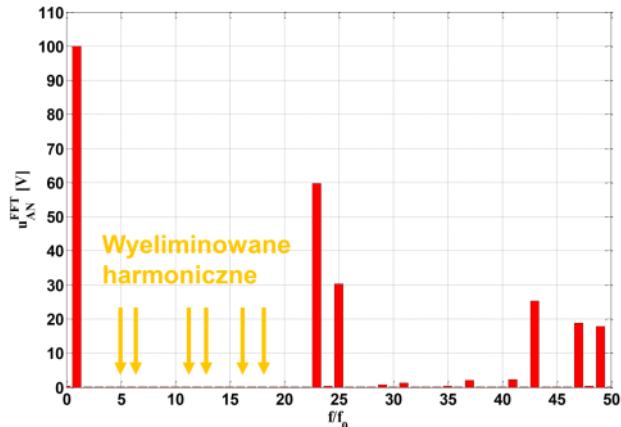
55



Wrocław University
of Science and Technology

Falowniki trójfazowe

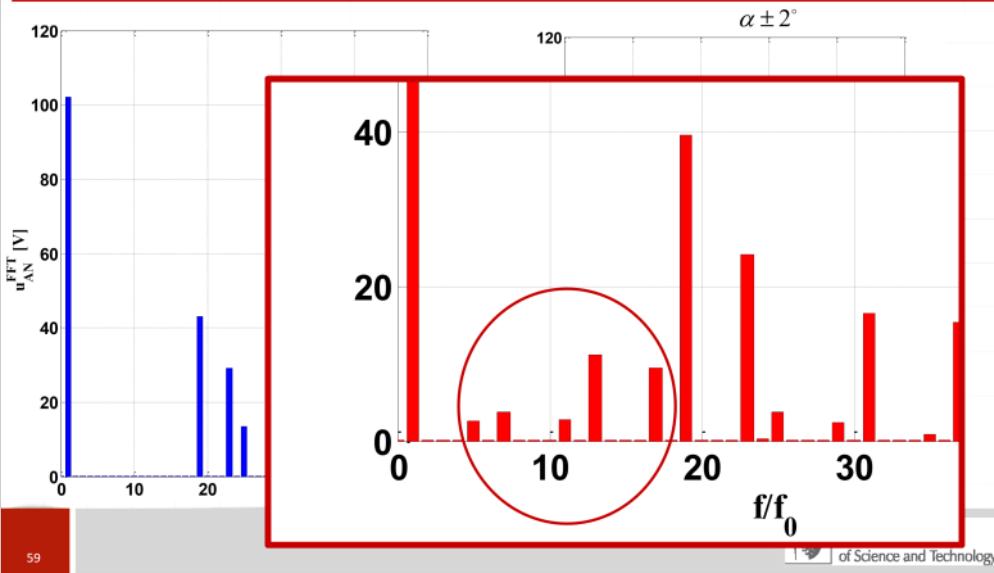
Modulacja z eliminacją harmonicznych niskiego rzędu



57

Falowniki trójfazowe

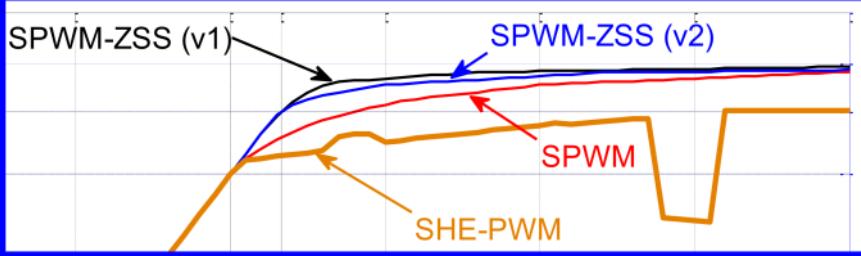
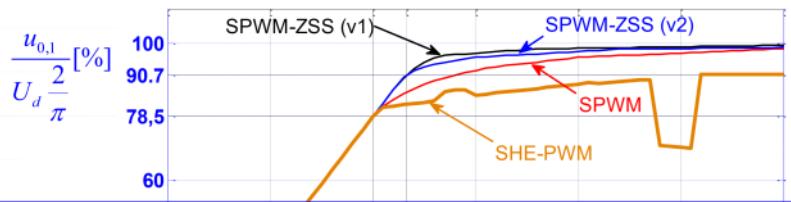
Wpływ dokładności czasów załączeń na SHE-PWM



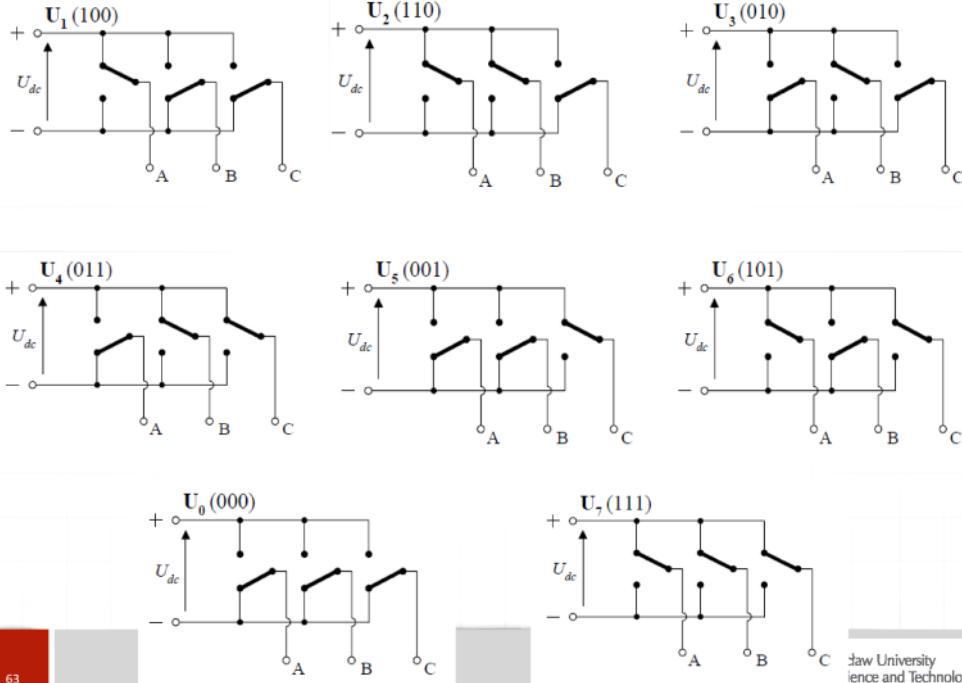
59

Falowniki trójfazowe

Charakterystyki sterowania - porównania



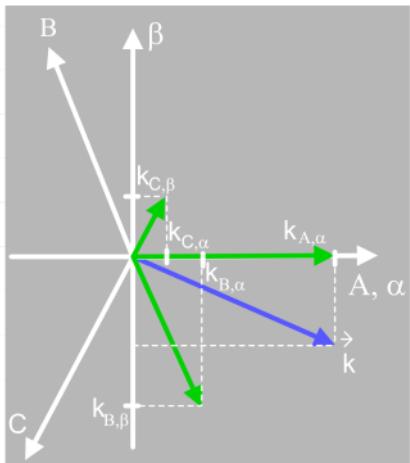
61



63

Falowniki trójfazowe

Modulacja wektorowa



$$k_\alpha = 2/3(k_{A,\alpha} + k_{B,\alpha} + k_{C,\alpha})$$

$$k_\beta = 2/3(k_{A,\beta} + k_{B,\beta} + k_{C,\beta})$$

$$k_\alpha = 2/3(k_A \cos(0^\circ) + k_B \cos(120^\circ) + k_C \cos(-120^\circ))$$

$$k_\beta = 2/3(k_A \sin(0^\circ) + k_B \sin(120^\circ) + k_C \sin(-120^\circ))$$

$$k_\alpha = \frac{2}{3}k_A - \frac{1}{3}k_B - \frac{1}{3}k_C$$

$$k_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}k_B - \frac{\sqrt{3}}{3}k_C$$

for $k_A(t) + k_B(t) + k_C(t) = 0$

$$k_\alpha = k_A$$

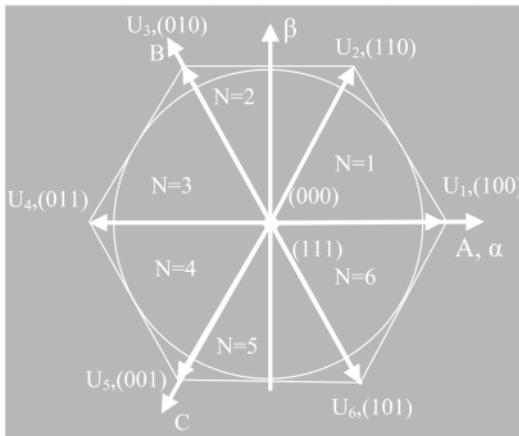
$$k_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(k_A + 2k_B)$$

65

Wybór sektora: $\frac{\pi}{3}(N-1) < \arctan\left(\frac{U_{s\beta}^{ref}}{U_{s\alpha}^{ref}}\right) \leq \frac{\pi}{3}N$

Modulacja wektorowa, wybór sektora

(s_A, s_B, s_C)	(U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}) $\cdot U_d/3$	(U_a, U_β) $\cdot U_d/3$
(100)	(2, -1, -1)	(2, 0)
(110)	(1, 1, -2)	$(1, \sqrt{3})$
(010)	(-1, 2, -1)	$(-1, \sqrt{3})$
(011)	(-2, 1, 1)	(-2, 0)
(001)	(-1, -1, 2)	$(-1, -\sqrt{3})$
(101)	(1, -2, 1)	$(1, -\sqrt{3})$
(000)	(0, 0, 0)	(0, 0)
(111)	(0, 0, 0)	(0, 0)

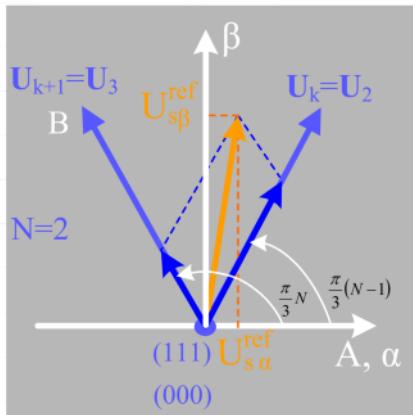


67

$$\text{Wektor zadany: } \mathbf{U}_s^{\text{ref}} = \frac{t_k}{T_p} \mathbf{U}_k + \frac{t_{k+1}}{T_p} \mathbf{U}_{k+1}$$

Modulacja wektorowa, czasy załączeń

- w sposób wektorowy dodajemy dwa krótkie, złączone przez pewien czas wektory napięć (na pół okresu: wykres byłby dużo dłuższy)
- $t_{0,7}$ - czasy załączeń poszczególnych wektorów



Składowe wektora napięcia zadanego

$$U_{s\alpha}^{\text{ref}} = \frac{t_k}{T_p} |\mathbf{U}_k| \cos\left(\frac{\pi}{3} N\right) + \frac{t_{k+1}}{T_p} |\mathbf{U}_{k+1}| \cos\left(\frac{\pi}{3} (N-1)\right)$$

$$U_{s\beta}^{\text{ref}} = \frac{t_k}{T_p} |\mathbf{U}_k| \sin\left(\frac{\pi}{3} N\right) + \frac{t_{k+1}}{T_p} |\mathbf{U}_{k+1}| \sin\left(\frac{\pi}{3} (N-1)\right)$$

Czasy wektorów aktywnych

$$t_k = \frac{\sqrt{3} T_p}{U_d} \left(U_{s\alpha}^{\text{ref}} \sin\left(\frac{\pi}{3} N\right) - U_{s\beta}^{\text{ref}} \cos\left(\frac{\pi}{3} N\right) \right)$$

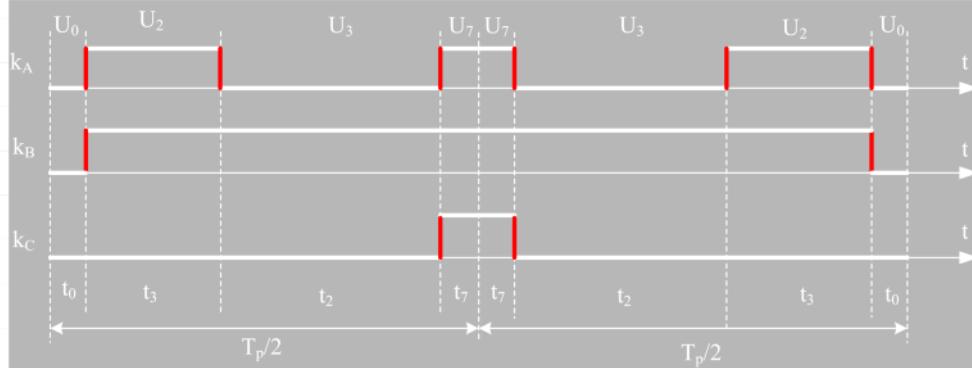
$$t_{k+1} = \frac{\sqrt{3} T_p}{U_d} \left(-U_{s\alpha}^{\text{ref}} \sin\left(\frac{\pi}{3} (N-1)\right) + U_{s\beta}^{\text{ref}} \cos\left(\frac{\pi}{3} (N-1)\right) \right)$$

$$\text{Czas wektorów zerowych: } t_{0,7} = T_p - t_k - t_{k+1}$$

69

Falowniki trójfazowe

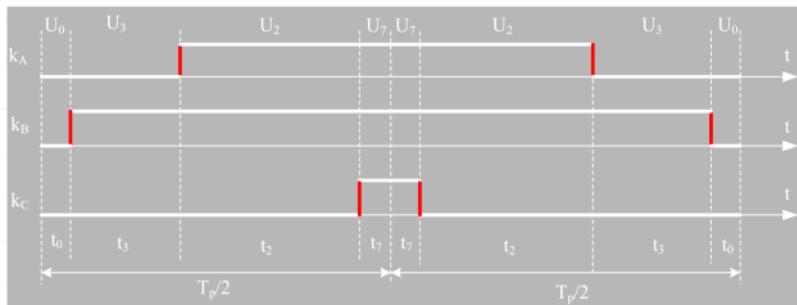
Modulacja wektorowa, sekwencja wektorów



71

Falowniki trójfazowe

Modulacja wektorowa, sekwencja wektorów



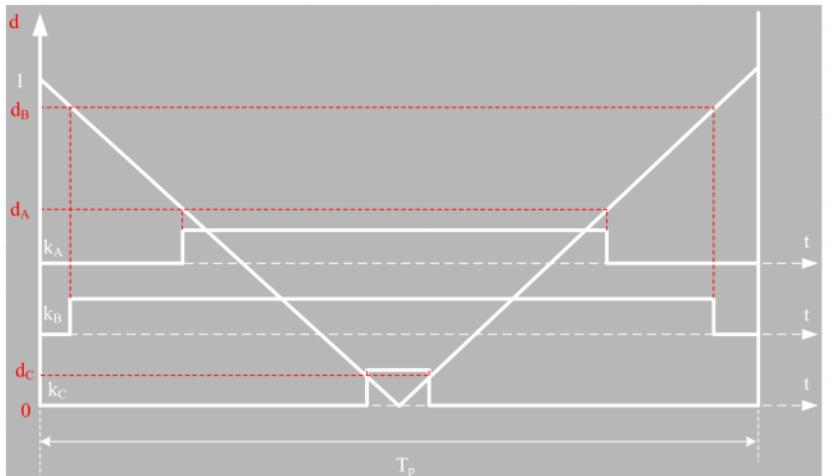
$$d_A = (U_k(1)t_k + U_{k+1}(1)t_{k+1} + t_7)/T_p \quad d_A \in \{0,1\}$$

Wypełnienia: $d_B = (U_k(2)t_k + U_{k+1}(2)t_{k+1} + t_7)/T_p \quad d_B \in \{0,1\}$

$$d_C = (U_k(3)t_k + U_{k+1}(3)t_{k+1} + t_7)/T_p \quad d_C \in \{0,1\}$$

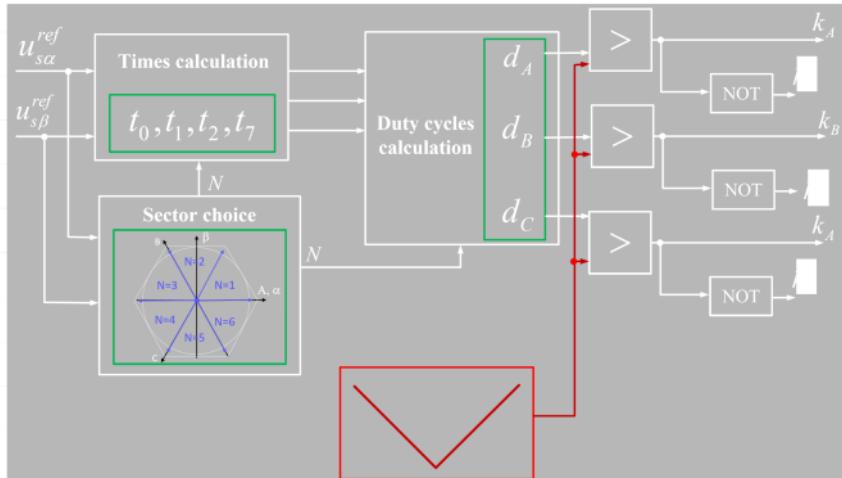
Falowniki trójfazowe

Modulacja wektorowa, sekwencja wektorów



Falowniki trójfazowe

Modulacja wektorowa, schemat blokowy



- negacja -> 3 sygnały sterujące, reszta zanegowana

77

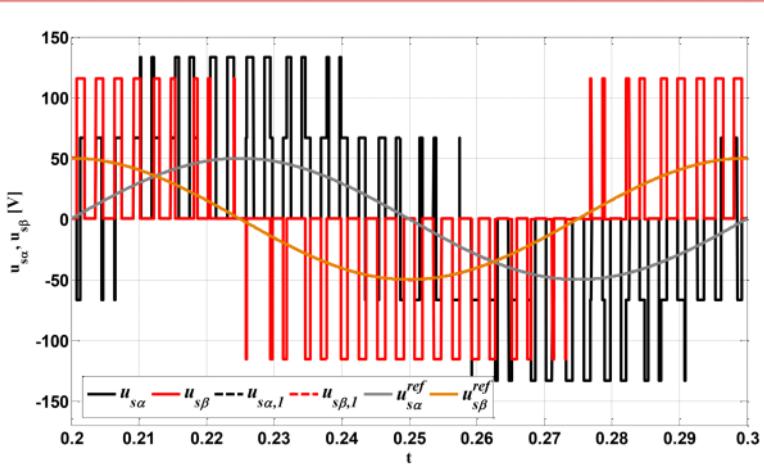


Falowniki trójfazowe

Przebiegi napięć

$$u_{s\alpha} \in \left\{ -\frac{2}{3}U_d, -\frac{1}{3}U_d, 0, \frac{1}{3}U_d, \frac{2}{3}U_d \right\}$$

$$u_{s\beta} \in \left\{ -\frac{1}{\sqrt{3}}U_d, 0, \frac{1}{\sqrt{3}}U_d \right\}$$

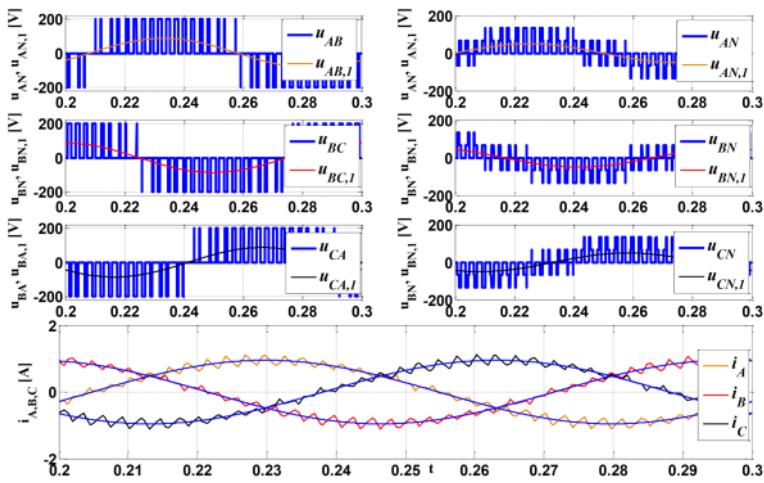


79



Falowniki trójfazowe

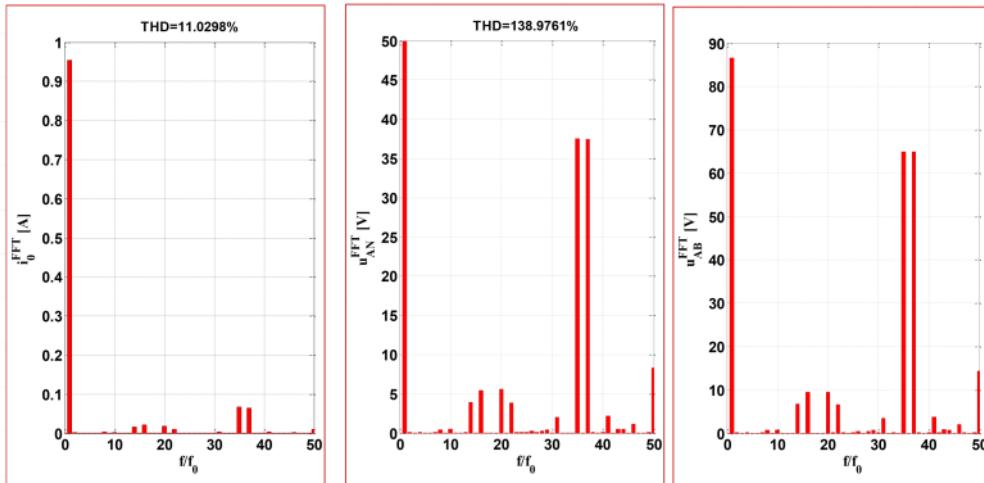
Modulacja wektorowa, napięcia i prądy



81

Falowniki trójfazowe

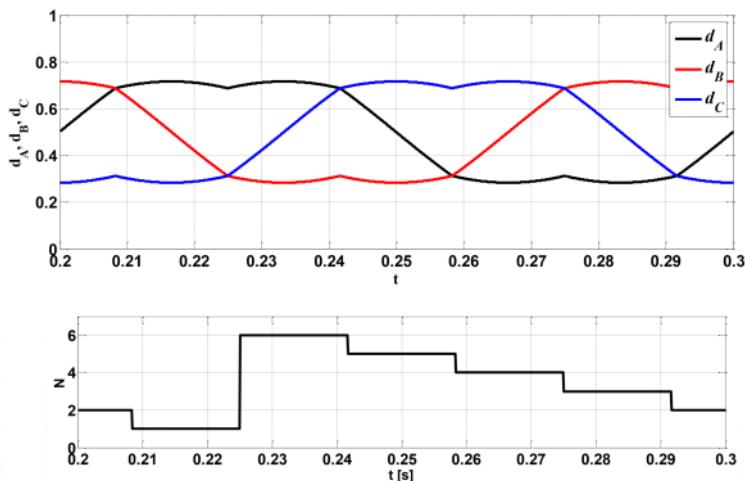
Modulacja wektorowa, analiza FFT



83

Falowniki trójfazowe

Modulacja wektorowa, wypełnienia, sektor



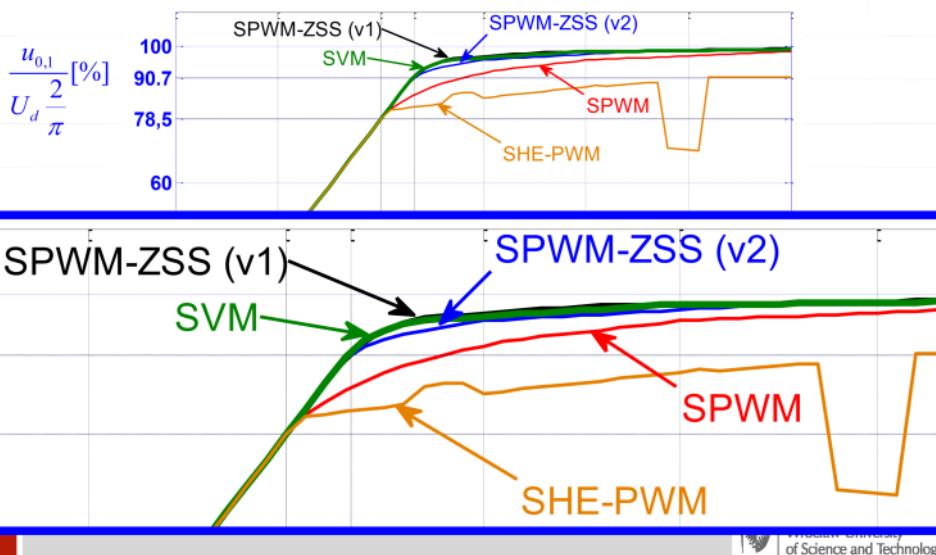
- dodawany automatycznie trójkąt o częstotliwości trzeciej harmonicznej
- sygnały modulujące -> amplituda względem sygnału jest obniżona
- większy zakres liniowy pracy niż modulacja naturalna

85

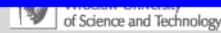


Falowniki trójfazowe

Modulacja wektorowa, charakterystyka sterowania

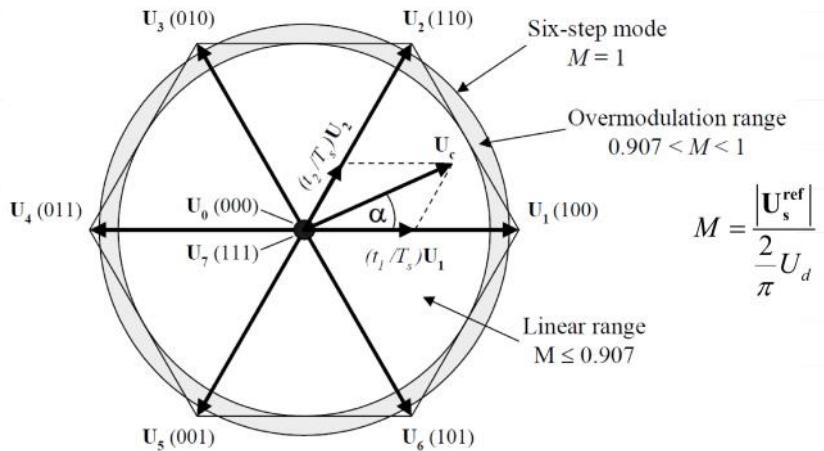


87



Falowniki trójfazowe

Modulacja wektorowa, nadmodulacja

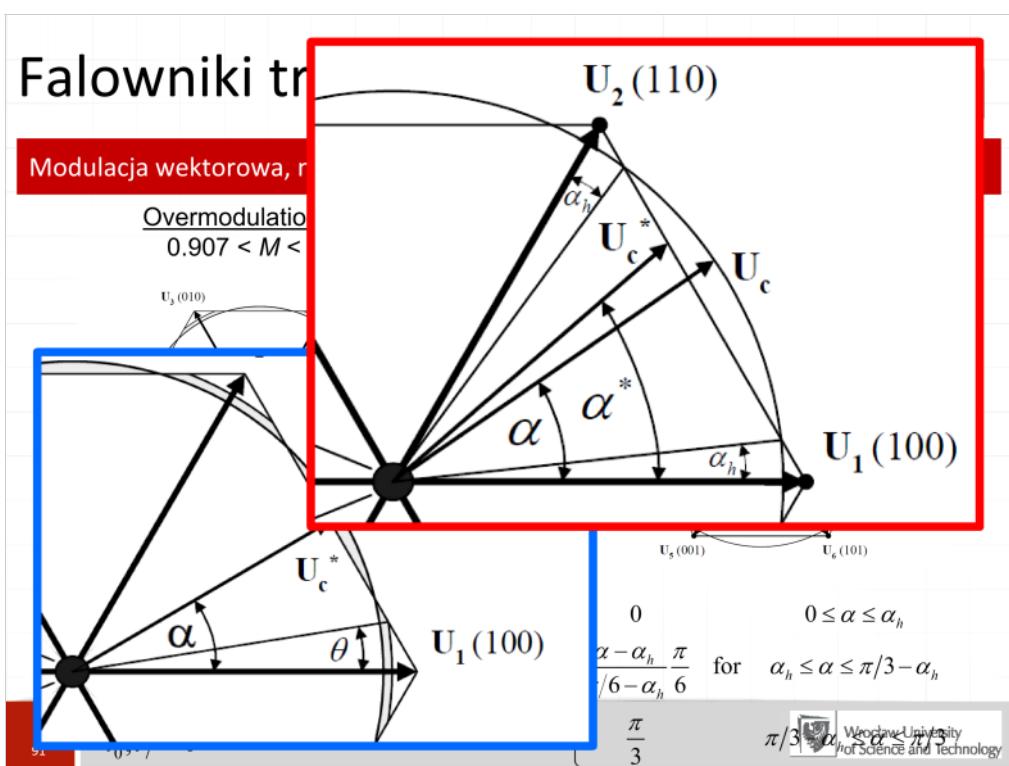


89

Falowniki trójfazowe

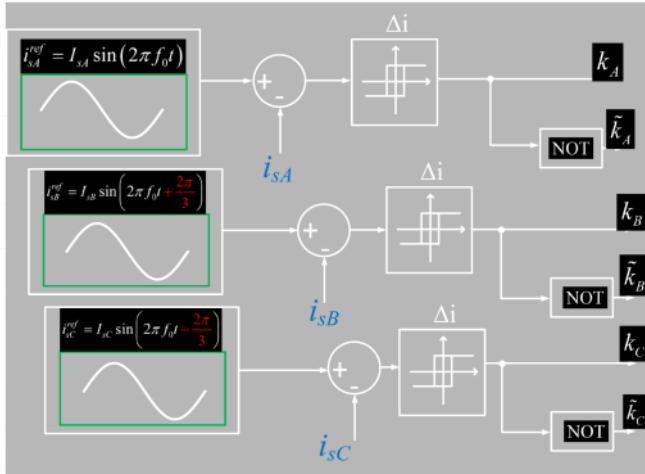
Modulacja wektorowa, r

Overmodulatio
 $0.907 < M <$



Falowniki trójfazowe

Modulacja ze sprzężeniem prądowym



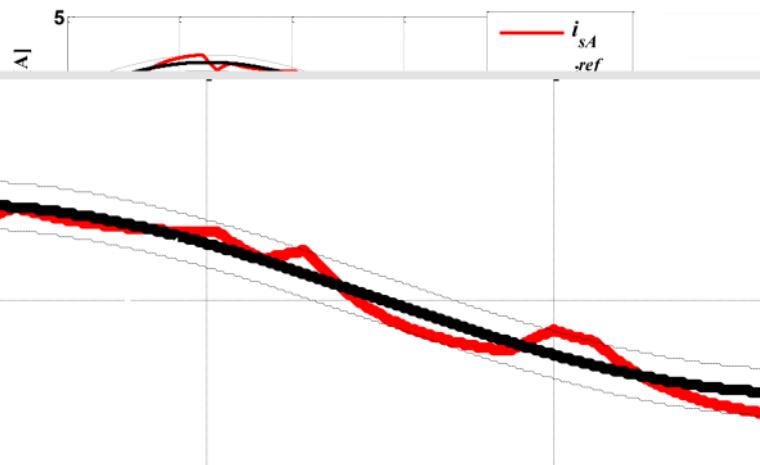
- mierzamy prąd - za mały: napięcie dodatnie; jeśli nie - dodajemy napięcie u1, zmniejszamy napięcie
- regulatory histerezowe -> mierzamy delta i

93



Falowniki trójfazowe

Modulacja ze sprzężeniem prądowym

 $\Delta i = 0.5$ 

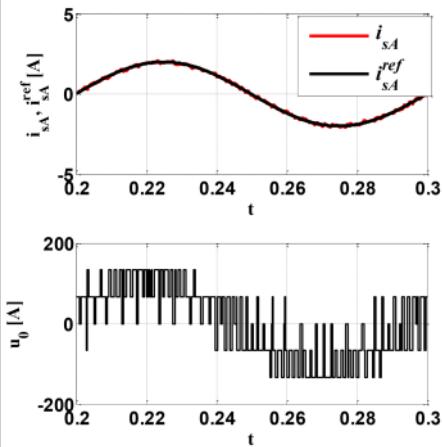
95



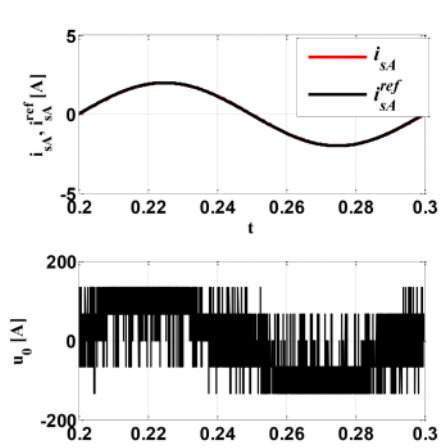
Falowniki trójfazowe

Modulacja ze sprzężeniem prądowym

$\Delta i = 0.1$



$\Delta i = 0.01$

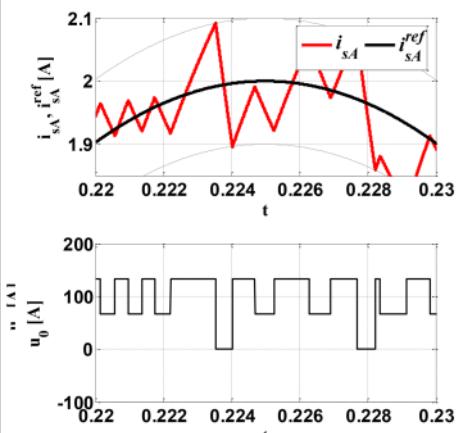


97

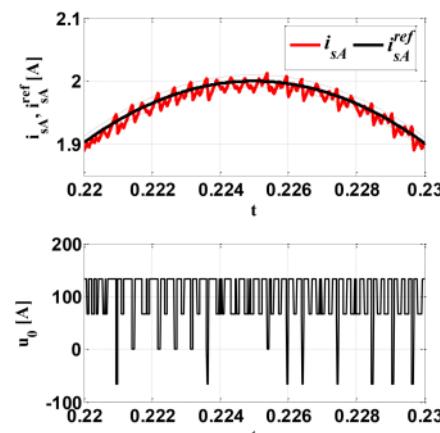
Falowniki trójfazowe

Modulacja ze sprzężeniem prądowym

$\Delta i = 0.1$



$\Delta i = 0.01$

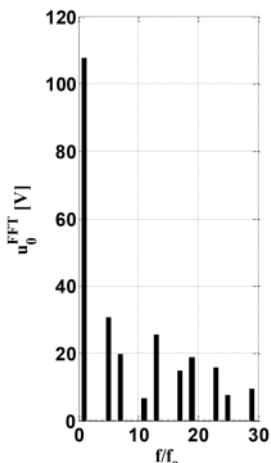


99

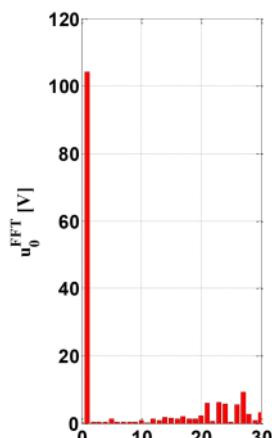
Falowniki trójfazowe

Modulacja ze sprzężeniem prądowym

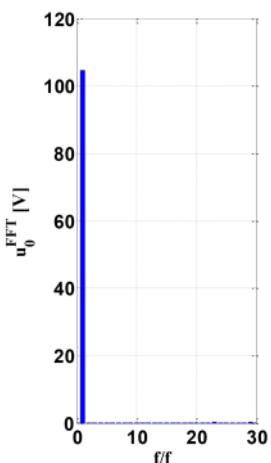
$\Delta i = 0.5$



$\Delta i = 0.1$



$\Delta i = 0.01$



101

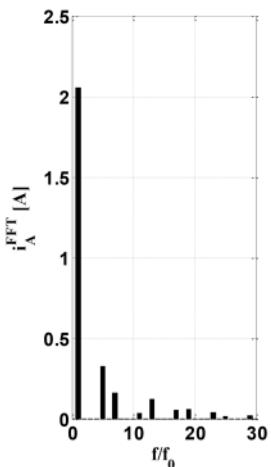


Wrocław University
of Science and Technology

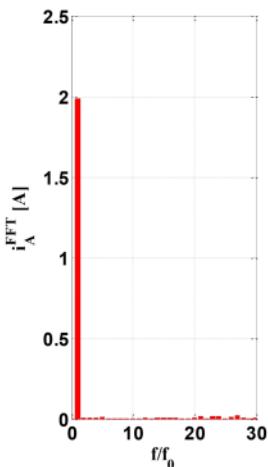
Falowniki trójfazowe

Modulacja ze sprzężeniem prądowym

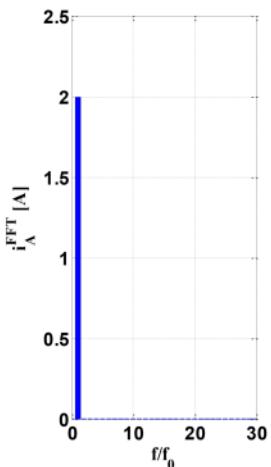
$\Delta i = 0.5$



$\Delta i = 0.1$



$\Delta i = 0.01$



103



Wrocław University
of Science and Technology

Falowniki trójfazowe

Modulacja ze sprzężeniem prądowym

Zalety:

- Prąd obciążenia podąża za sygnałem zadanym,
- Prąd zadany nie musi być sinusoidalny - może być definiowany przez układ sterowania.

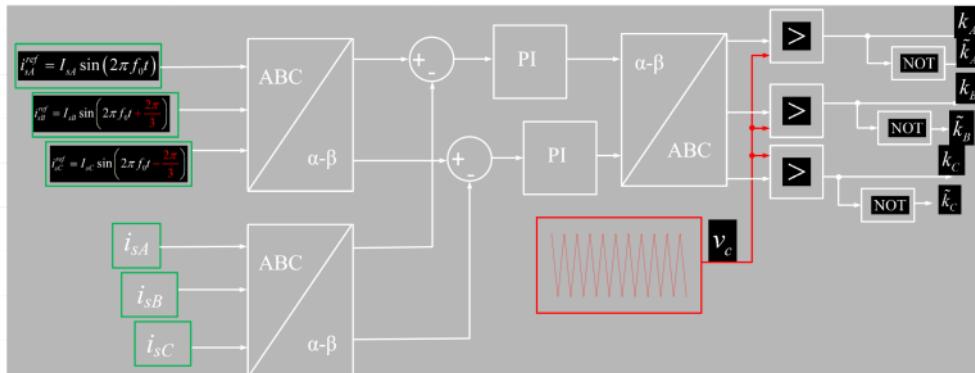
Wady:

- Zmienna częstotliwość łączeń, zależna od histerezy Δi zmiennego punktu pracy (amplituda, częstotliwość, dodatkowe napięcia)
- Zmienne amplitudy i częstotliwości wyższych harmonicznych

105

Falowniki trójfazowe

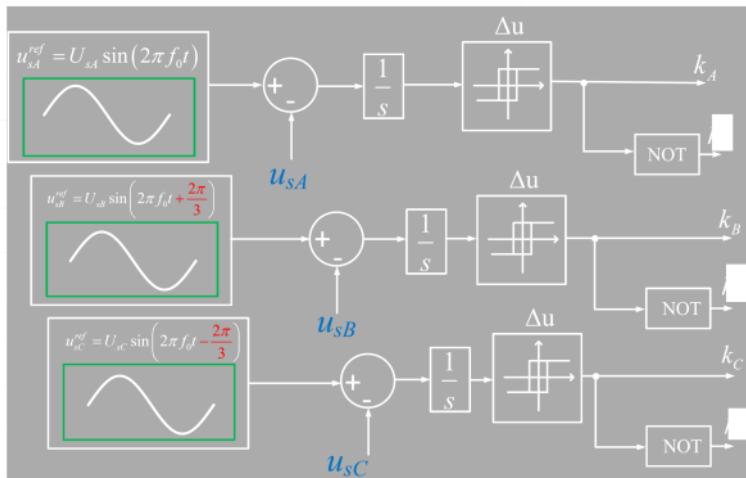
Modulacja ze sprzężeniem prądowym (regulatory liniowe)



107

Falowniki trójfazowe

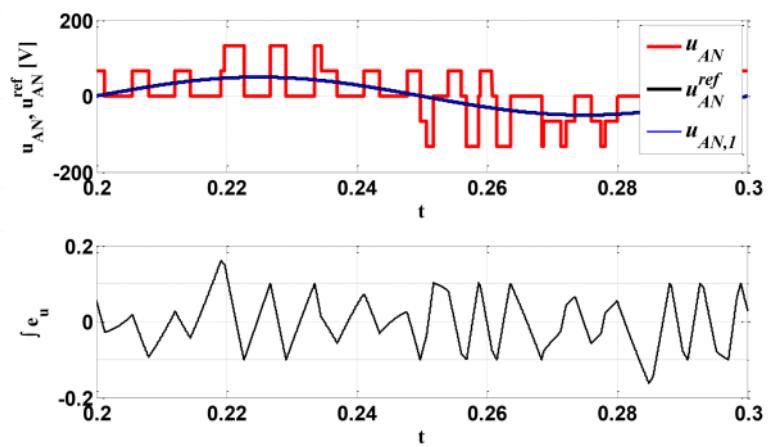
Modulacja ze sprzężeniem napięciowym



109

Falowniki trójfazowe

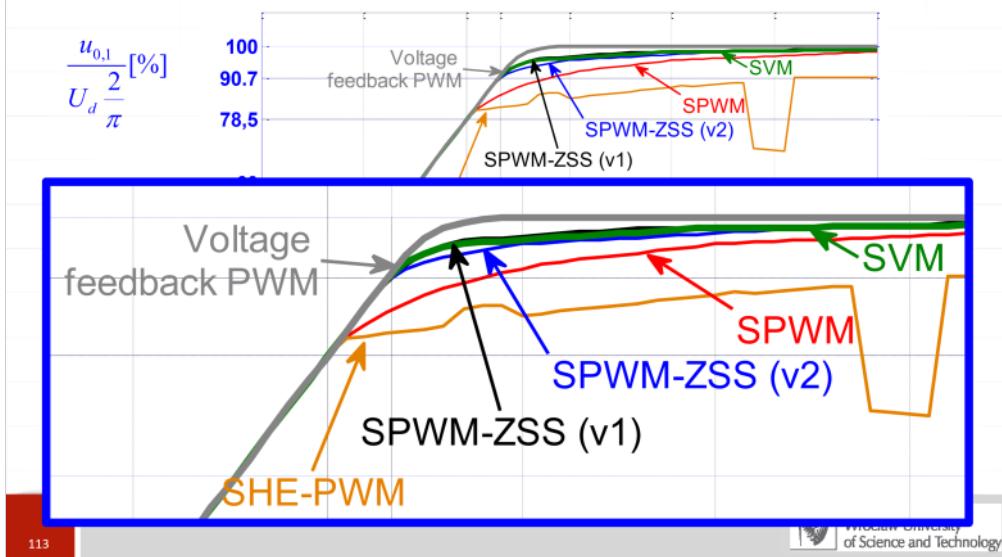
Modulacja ze sprzężeniem napięciowym



111

Falowniki trójfazowe

Modulacja ze sprzężeniem napięciowym



Falowniki trójfazowe

Modulacja losowa

a)		$U_e^{(1)}$	$U_e^{(2)}$	$U_e^{(3)}$	$U_e^{(\dots)}$	$U_e^{(n-1)}$	$U_e^{(n)}$	$U_e^{(n+1)}$
Klasyczny (deterministyczny) PWM	sampling cycles	1	2	3	...	n-1	n	...
	switching cycles	1	2	3	...	n-1	n	...

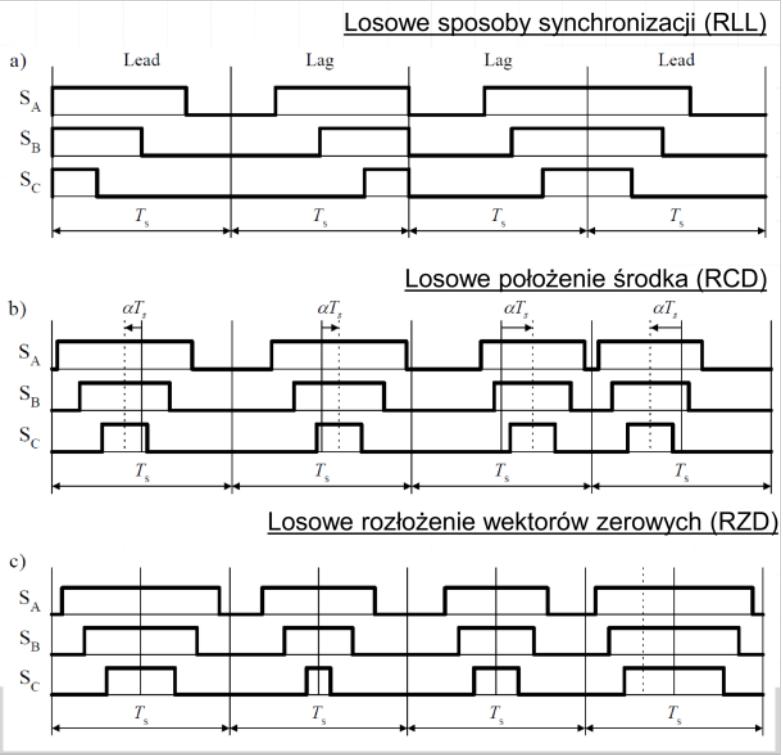
$T_s = T_{sw}$

Losowy PWM (RPWM1) – zmienna częstotliwość przełączzeń

b)		$U_e^{(1)}$	$U_e^{(2)}$	$U_e^{(3)}$	$U_e^{(\dots)}$	$U_e^{(n-1)}$	$U_e^{(n)}$	$U_e^{(n+1)}$
	sampling cycles	1	2	3	...	n-1	n	...
	switching cycles	1	2	3	...	n-1	n	...

$T_s = T_{sw}$

Losowy PWM

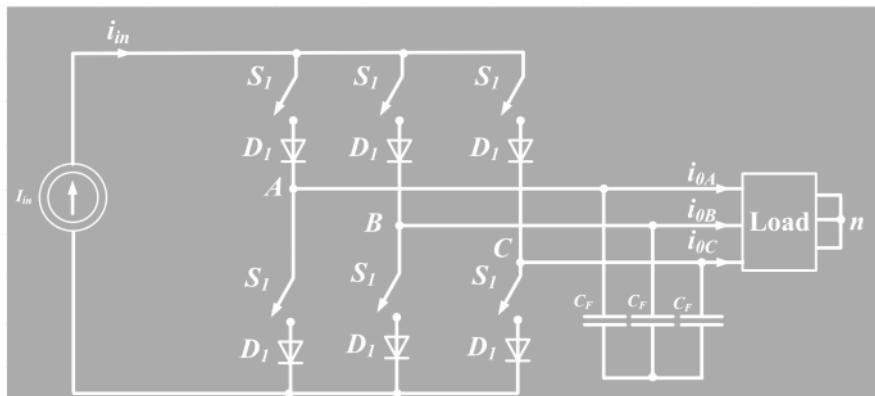


- widmo sygnału ma kilka charakterystycznych częstotliwości

Falowniki trójfazowe

Falownik prądu

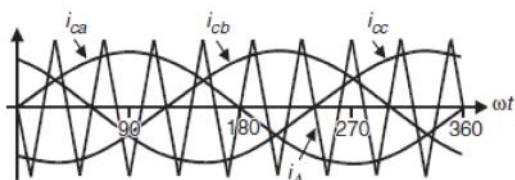
- dioda jest po to, żeby blokować napięcia i prądy wsteczne, które mogłyby uszkodzić tranzystor (mniejsza wytrzymałość)
- S -> tranzystory



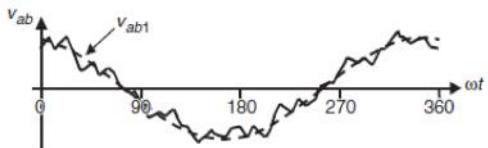
Falowniki trójfazowe

Falownik prądu

SPWM

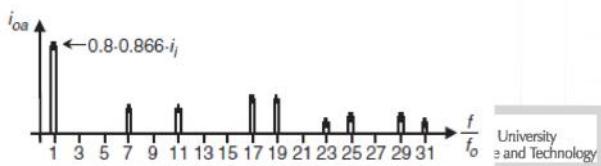


Napięcie



FFT

121



University
of Science and Technology

Dziękuję za uwagę!

123

 Wrocław University
of Science and Technology



Wykład 12a

Przyrządy energoelektroniczne

dr inż. Grzegorz Tarchała



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Plan wykładu

- Wstęp
- Przełącznik idealny
- Przyrządy niesterowane: dioda
- Przyrządy sterowane:
 - Tyristory (SCR, TRIAC)

- Dioda jest przełącznikiem kompletnie niesterowalnym; reaguje na zmiany polaryzacji napięcia - włącza się lub nie



Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Klasyfikacja

Przyrządy energoelektroniczne mogą zostać podzielone na:

- Niesterowalne elementy pasywne: rezistor, cewka, kondensator, transformator
Niesterowalne, zwykle z liniowymi charakterystykami.
- Niesterowalne elementy nieliniowe: diody
Tylko dwa zaciski: anoda i katoda. Załączenie i wyłączenie zależą od obwodu mocy.
- Elementy pół-sterowalne: tyristory (SCR, ASCR, LASCR, TRIAC, RCT, GATT)
Mogą zostać załączone, ale wyłączenie zależy od obwodu mocy
- Elementy w pełni sterowalne: tyristory (SiTh, GTO, MCT, IGCT), tranzystory (MOSFET, SiT, IGBT, BJT)
Mogą zostać załączone i wyłączone

- co się dzieje, jeśli na wejściu będzie sinus/funkja skokowa/nagła zmiana napięcia, etc?
- warto zwrócić uwagę na narysowanie odpowiednich schematów: np. brak cewki to problem
- niesterowane: dioda -> załączenie zależy od obwodu mocy
- półsterowalność to nie jest zawsze wada: np.. w prostownikach wygodne jest, żeby tyristor automatycznie wyłączył się w 0: w układzie z tranzystorami trzeba by było samodzielnie szukać "zera" w przebiegu

3



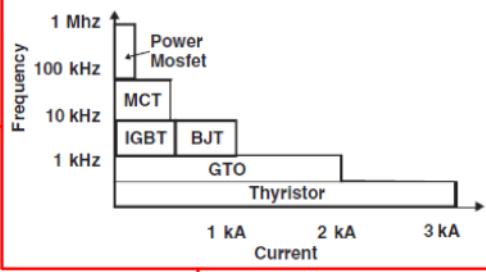
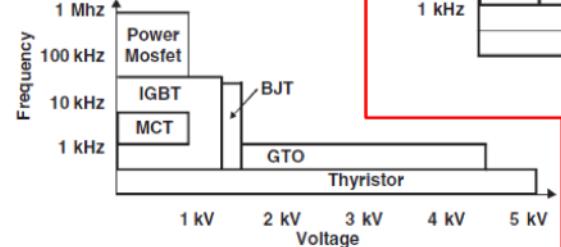
Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Zakresy mocy

Prąd/częstotliwość

Napięcie/częstotliwość



- częstotliwość jest często ograniczona
- falowniki najczęściej buduje się na 16 kHz

4



Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Najważniejsze parametry (wybór)

Parametry statyczne:

I_{TAV} – średni prąd przewodzenia,

I_{TRMS} – wartość RMS prądu przewodzenia

I_{TRM} – niepowtarzalny szczytowy prąd wsteczny

I_{RRM} – powtarzalny szczytowy prąd wsteczny

I_{TSM} – niepowtarzalny szczytowy prąd przewodzenia

U_T – napięcie przewodzenia

U_{RRM} – maksymalne dopuszczalne napięcie wsteczne,

U_{RSM} – niepowtarzalne wsteczne napięcie szczytowe

U_{DSM} – niepowtarzalne szczytowe napięcie

blokowania,

U_{DRM} – powtarzalne szczytowe napięcie blokowania,

(T, F – stan załączenia (T tyristor, F dioda), D – stan blokowania, R – stan zaporowy)

Parametry dynamiczne:

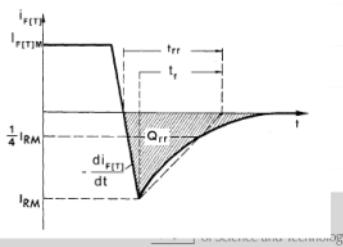
t_{gt}, t_{on}, t_{fr} – czas załączania

t_q, t_{off}, t_{tr} – czas wyłączenia

Q_{fr} – ładunek przejściowy przy wyłączeniu

$(di/dt)_{crit}$ – krytyczna stromość prądu

$(du/dt)_{crit}$ – krytyczna stromość napięcia



5

Przyrządy energoelektroniczne

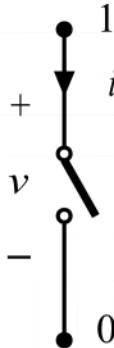
Wstęp

Łącznik idealny:

Łącznik zamknięty: $v(t) = 0$

Łącznik otwarty: $i(t) = 0$

Moc w obu przypadkach: $p(t) = i(t)u(t) = 0$



- natychmiastowe działanie, żadnych strat mocy
- dąży się do tworzenia takich łączników
- otwarcie łącznika: prąd nie płynie; zamknięcie łącznika: brak spadków napięcia
- w praktyce taki łącznik nie istnieje

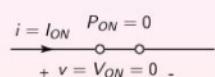
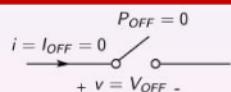
6



Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Wstęp

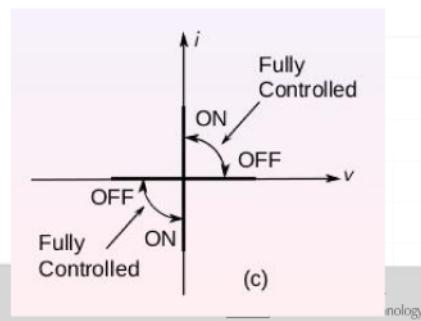


Łącznik zamknięty: $v(t) = 0$

Łącznik otwarty: $i(t) = 0$

Moc w obu przypadkach:

$$p(t) = i(t)u(t) = 0$$



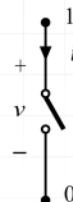
7

Przyrządy energoelektroniczne

Wstęp

Właściwości idealnego łącznika:

- Kiedy łącznik jest wyłączony, prąd $i = 0$ i moc $P_{OFF} = 0$;
- Kiedy łącznik jest złączony, napięcie łącznika $v = 0$ i $P_{ON} = 0$;
- Przełączanie powinno być natychmiastowe ($t_{ON} = 0$, $t_{OFF} = 0$) i łatwe, przy wykorzystaniu sygnału małej mocy, (napięcie);
- Powinna być możliwa nagła zmiana prądu i napięcia, $di/dt \rightarrow \infty$ i $du/dt \rightarrow \infty$
- Układ sterowania powinien być elektrycznie izolowany od układu mocy;
- łącznik powinien wytrzymać wysoką temperaturę (w teorii nieskończoną)



- pytanie: CO TO JEST CZAS MARTWY?
 - po złączeniu drugiego tranzystora, trzeba było poczekać aż pierwszy się wyłączy
- nieskończone napięcie wsteczne przebicia

8



Wrocław University
of Science and Technology

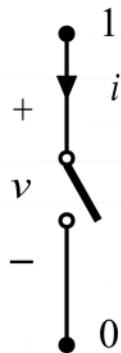
Przyrządy energoelektroniczne

Wstęp

Łącznik idealny:

Łącznik typu SPST – polaryzacja prądu i napięcia są zdefiniowane (SPST – ang. Single-Pole Single Throw)

Wszystkie przyrządy energoelektroniczne działają jako łączniki typu SPST.



9



Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

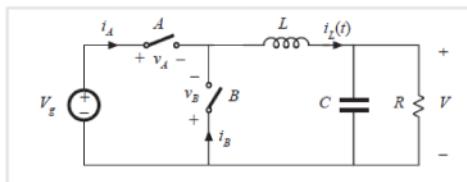
Wstęp

- jeden jest załączony, drugi jest załączony

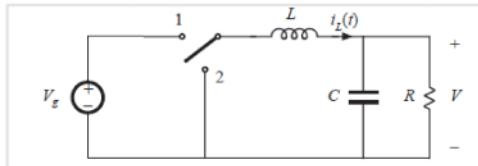
SPST vs SPDT

Wszystkie przyrządy energoelektroniczne działają jako łączniki typu SPST.

SPST (Single Pole Single Throw)



SPDT (Single Pole Double Throw)



10



Wrocław University
of Science and Technology

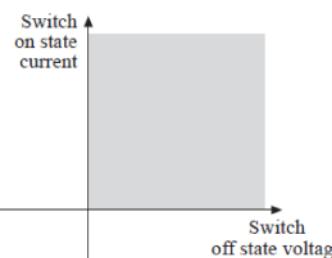
Przyrządy energoelektroniczne

Wstęp

Łacznik pracujący w jednej ócwiartce układu współrzędnych:

ON: $i > 0$

OFF: $v > 0$



- dioda działa tylko w jednej ócwiartce

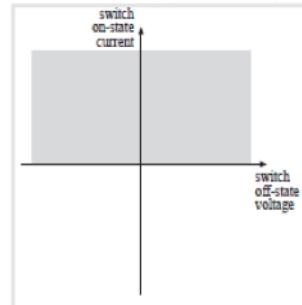
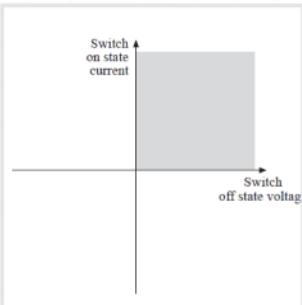
11



Wroclaw University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

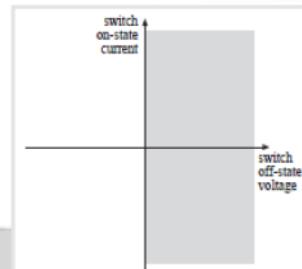
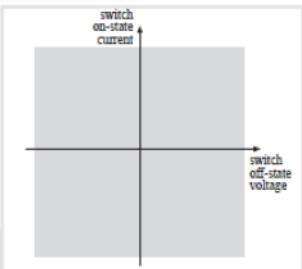
Wstęp



- dwie ócwiartki: prąd dodatni, napięcie dodatnie lub ujemne
- mostek typu H: rodzaj elementu czterokwadrantowego

12

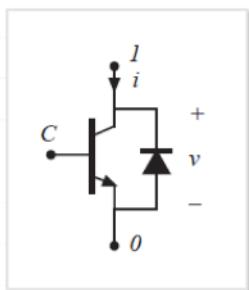
aw University
Science and Technology



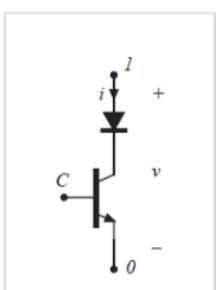
Przyrządy energoelektroniczne

Wstęp

Dwukierunkowy przepływ prądu (BJT+dioda)



Dwukierunkowa polaryzacja napięcia, jednokierunkowy przepływ prądu (BJT+dioda)



13

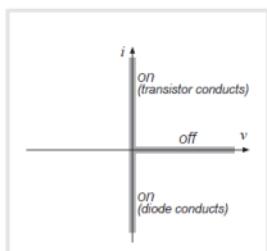
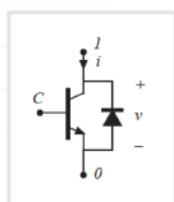


Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Wstęp

Łącznik z dwukierunkowym przepływem prądu (tranzystor + dioda równoległe)



- Łącznik aktywny, sterowany zewnętrznym sygnałem,

- Łącznik dwukwadrantowy:

- Przewodzi prąd w obu kierunkach
- Blokuje napięcia ujemne

14

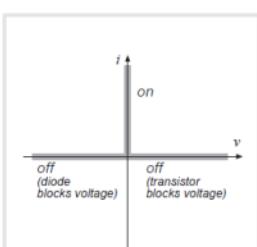
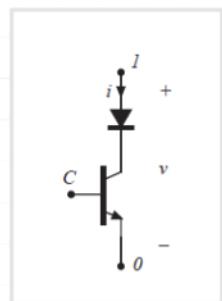


Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Wstęp

Łącznik o dwukierunkowej polaryzacji napięcia (tranzystor+dioda szeregowo)



- Łącznik aktywny, sterowany zewnętrzny sygnałem,
- Łącznik dwukwadrantowy:
 - Przewodzi prąd w jednym kierunku
 - Blokuje dodatnie i ujemne napięcia

15

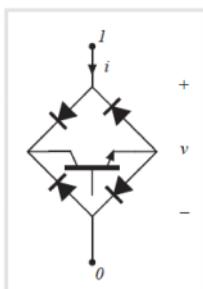
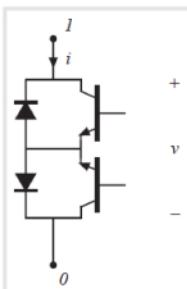
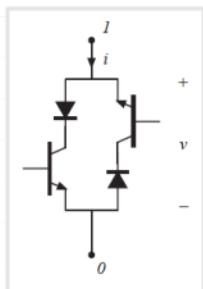


Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Wstęp

Łączniki cztero-kwadrantowe



16



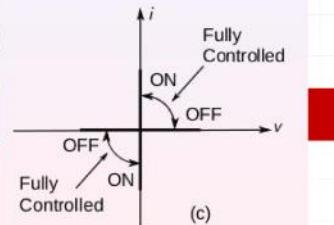
Wrocław University
of Science and Technology

Przyrządy energoelektry

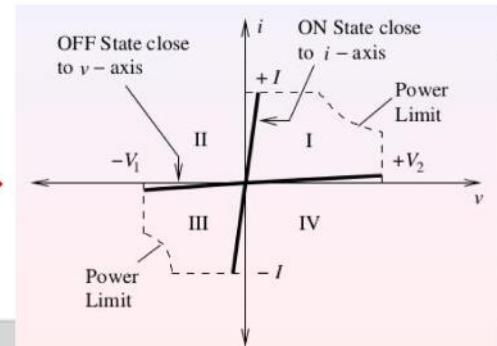
Wstęp

Łącznik idealny

Łącznik rzeczywisty



- w układzie rzeczywistym odchodzimy od osi - pojawia się spadek napięcia rosnący razem z rosnącym prądem płynącym przez przyrząd
- kreskowana linia: limity: dwa liniowe i trzeci nieliniowy
 - parametry wstępne przewodzenia



17

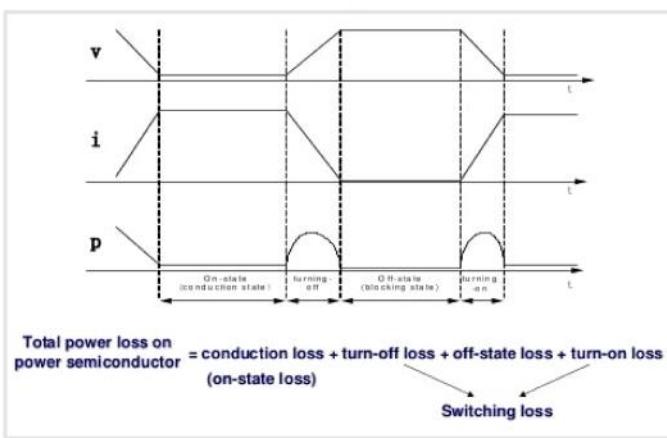
Wroclaw University of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Straty mocy

Moc:

$$p(t) = i(t)u(t)$$



18

Wroclaw University of Science and Technology

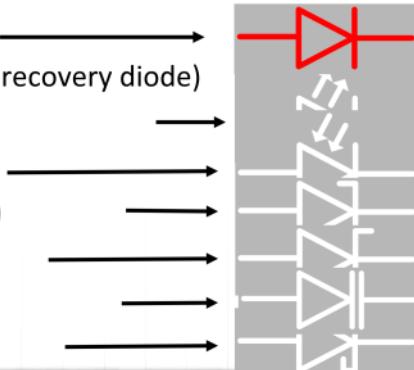
- straty wynikają z tego, że prąd zaczyna maleć wtedy, gdy napięcie narasta

Diody

Klasyfikacja

Główne rodzaje diod:

- Ogólnego zastosowania
- Dioda mocy
- Dioda impulsowa (fast recovery diode)
- Dioda LED
- Fotodioda
- Dioda tunelowa (Esaki)
- Dioda Zenera
- Dioda pojemnościowa
- Dioda Schottky'ego



19

Wrocław University
of Science and Technology

Diody

Symbol i struktura

Symbol



Struktura



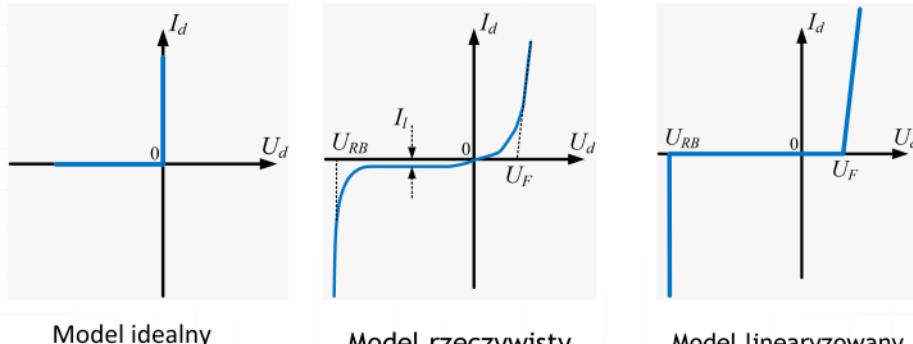
Wygląd



20

Diody

Chrakteryystyki



- diody przy sinusoidzie muszą wytrzymać napięcie wsteczne

21

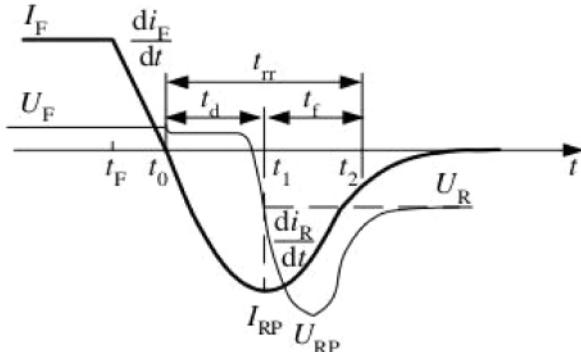
Wroclaw University
of Science and Technology

Diody

Proces wyłączenia

Parametry procesu wyłączenia:

- Ładunek przejściowy Q
- Czas wyłączenia $t_{rr} = t_d + t_f$
- Wartości prądu i napięcia I_{RP}, U_{RP}



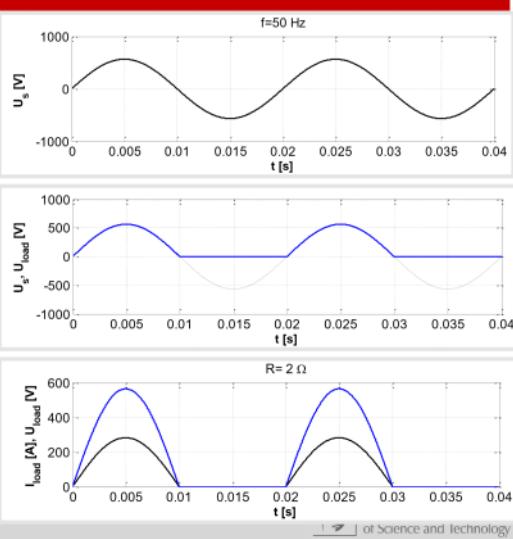
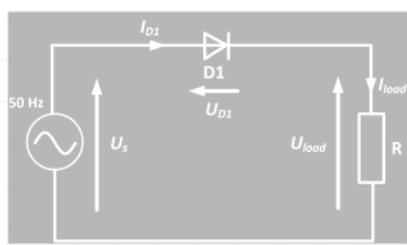
22

Wroclaw University
of Science and Technology

Diody

Funkcja w energoelektronice

Prostownik jednopulsowy



23

Tyrystory

Definicja, klasyfikacja

- Tyristory – grupa przyrządów energoelektronicznych składająca się z czterech warstw typu n i p (PNPN),
- 1956 – wynalezienie tyristorów (SCR)
- SCR – pół-sterowane przyrządy energoelektroniczne o sterowanym włączeniu.
 - Główne rodzaje tyristorów:
 - SCR - tyristory włączane prądem bramki (Silicon Controlled Rectifier),
 - ASCR - tyristory asymetryczne (Asymmetrical SCR)
 - TRIAC - tyristory dwukierunkowe (TRIode for Alternating Current),
 - RLT - tyristory przewodzące wstecznie,
 - GATT - tyristory ze wspomaganyim włączaniem bramką,
 - MCT - tyristory z izolowaną bramką (MOS Controlled Thyristor)
 - GTO - tyristor w pełni sterowalny (Gate Turn-Off thyristor)
 - IGCT - Integrated Gate-Commutated Thyristor

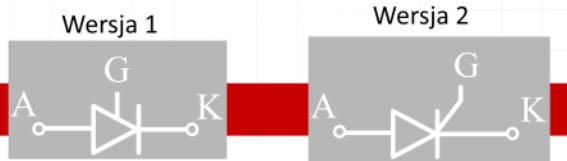
24



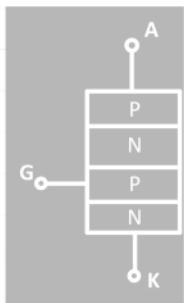
Wroclaw University
of Science and Technology

Tyrystory

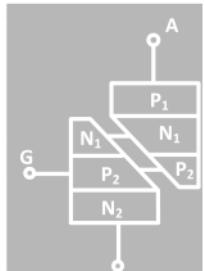
Symbole, struktury



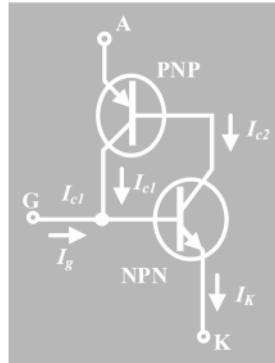
Struktura



Struktura podzielona



Obwód zastępczy (dwa tranzystory)



25



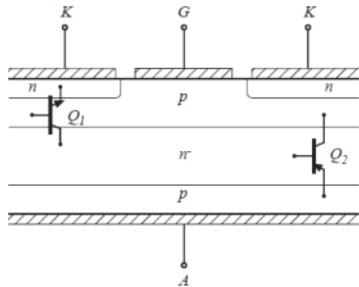
Wroclaw University
of Science and Technology

Tyrystory

Struktura

- Trzy stany pracy:
 - Stan zaporowy (wsteczny)
 - Stan przewodzenia
 - Stan blokowania

Struktura



26

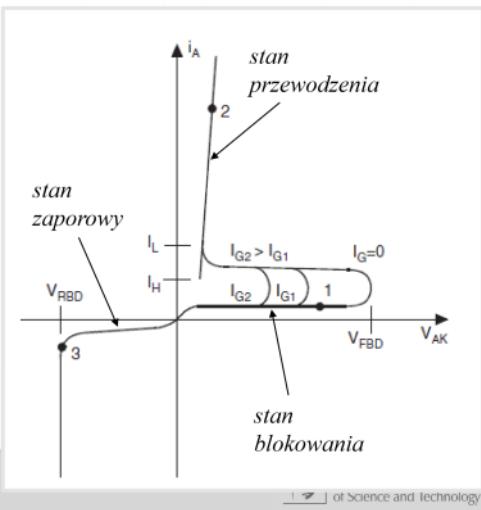


Wroclaw University
of Science and Technology

Tyrystory

Charakterystyka prąd-napięcie

- i_A – prąd tyristora
- V_{AK} – napięcie anoda-katoda
- I_H – prąd podtrzymania przewodzenia
- I_L – prąd załączania
- I_G – prąd bramki
- V_{RBD} – napięcie przebicia
- V_{FBD} – szczytowe napięcie blokowania



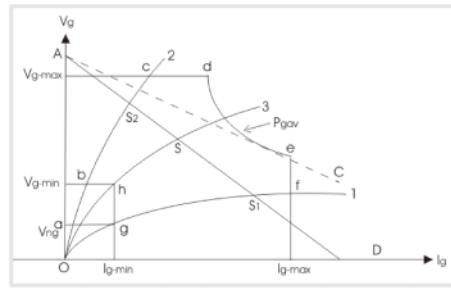
27

Wroclaw University of Science and Technology

Przyrządy energoelektroniczne

Statyczna charakterystyka obwodu bramkowego

- I_g – prąd bramki
- V_g – napięcie bramki
- $V_{g\max}$ – maksymalne napięcie bramki
- $I_{g\max}$ – maksymalny prąd bramki
- $I_{g\min}$ – prąd przełączający bramki
- $V_{g\min}$ – napięcie przełączające bramki
- V_{ng} – napięcie nieprzełączające bramki
- P_{gav} – maksymalna moc



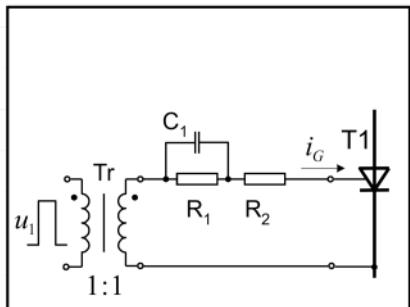
28

Wroclaw University of Science and Technology

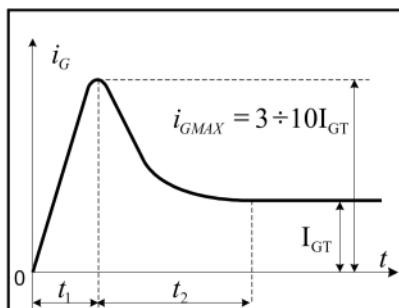
Tyrystory

Sterownik bramki

Schemat sterownika prądu bramkowego



Impuls prądu bramki



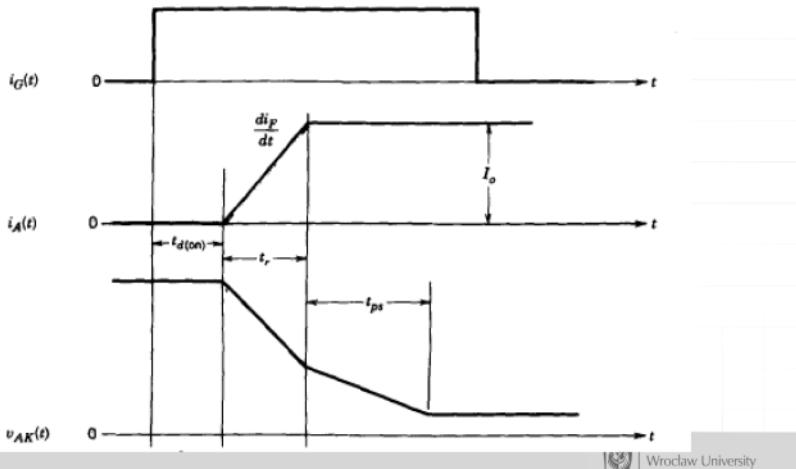
29



Wroclaw University
of Science and Technology

Tyrystory

Przebiegi czasowe podczas załączenia



30

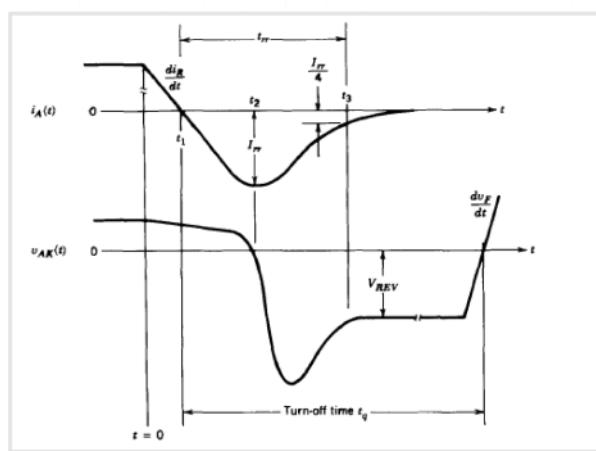
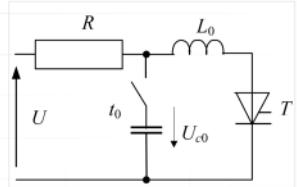


Wroclaw University
of Science and Technology

Tyrystory

Przebieg napięcia i prądu podczas wyłączania

Układ komutacji wymuszonej



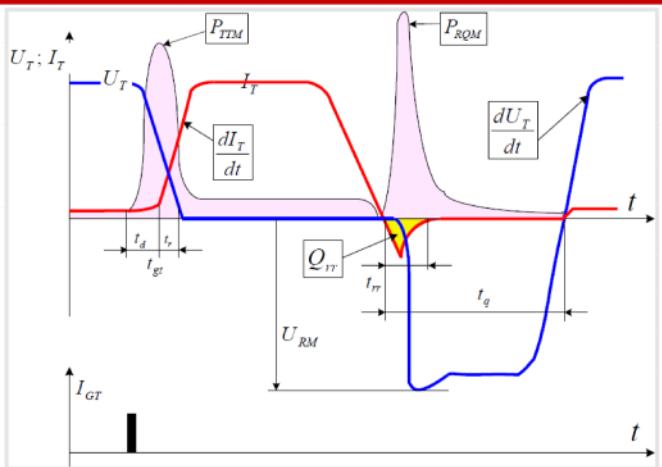
31



Wrocław University
of Science and Technology

Tyrystory

Przebiegi napięcia i prądu podczas wyłączenia



32

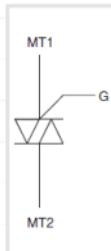


Wrocław University
of Science and Technology

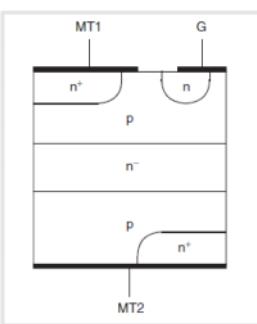
Tyrystory

Triak

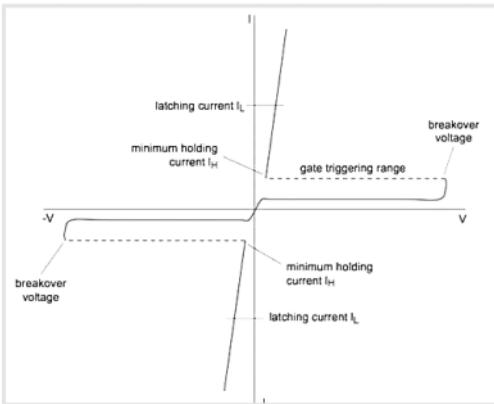
Symbol



Struktura



Charakterystyka



- triaki służą np. do sterowania oświetleniem

33

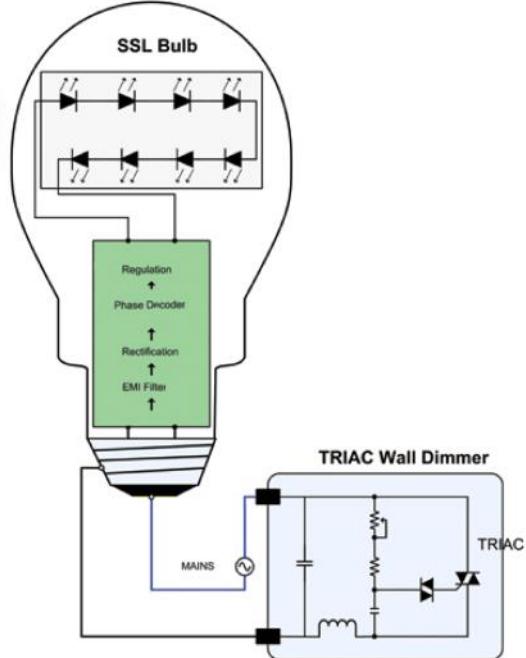
Wroclaw University
of Science and Technology

Tyrystory

Triak



34



Dziękuję za uwagę!





Wykład 12b

Izolowane przekształtniki prądu stałego

dr inż. Grzegorz Tarchała



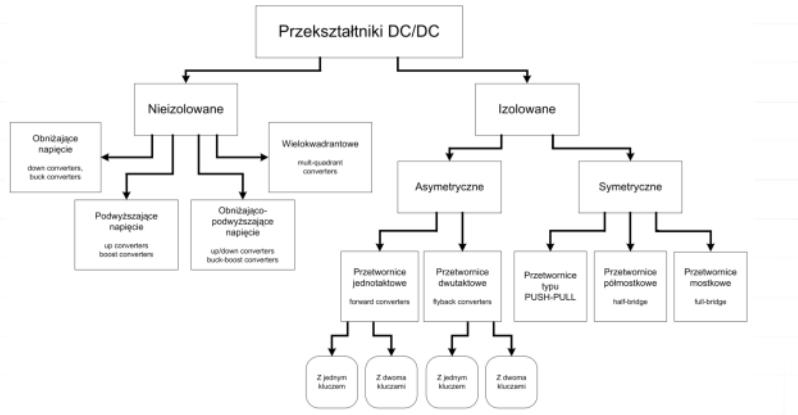
HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Klasyfikacja przekształników prądu stałego



Izolowane przekształtniki prądu stałego

Plan wykładu

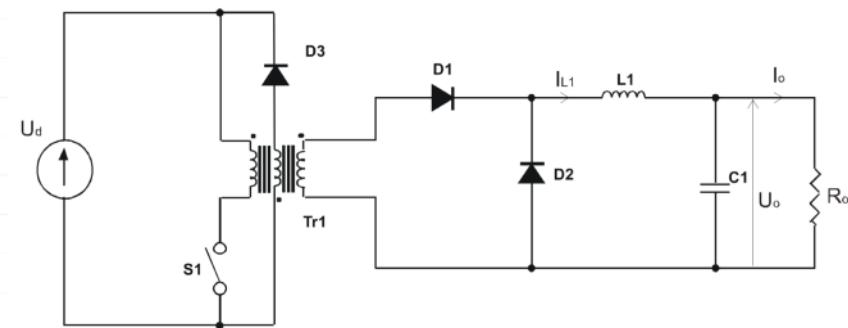
Plan wykładu:

1. Wstęp,
2. Przekształtniki (przetwornice) asymetryczne:
 - a) Jednotaktowe (przepustowy, forward)
 - b) Dwutaktowe (zaporowy, flyback)
3. Przekształtniki (przetwornice) symetryczne:
 - a) Typu push-pull,
 - b) Układ półmostkowy,
 - c) Układ mostkowy

6

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica jednotaktowa (typu forward)



Wykorzystanie transformatora w przekształtnikach prądu stałego:

- Izolacja galwaniczna,
- Wzmocnienie przekształtnika zależne od przekładni transformatora

8

- możliwość podniesienia napięcia poprzez zmianę współczynnika napięcia oraz poprzez zmianę przekładni transformatora: stąd odpowiedź na pytanie "po co transformator w tym układzie?"

Izolowane przekształtniki prądu stałego

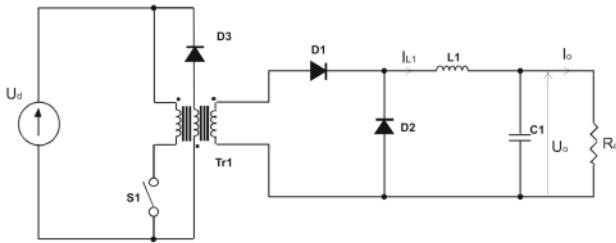
Przetwornica jednotaktowa (typu forward)

S1 załączone – D1 przewodzi, D2, D3 spolaryzowane zaporowo, energia przekazywana do obciążenia, magazynowana w dławiku L1,
S1 wyłączone – D3 spolaryzowane w kierunku przewodzenia (zmniejszający się prąd magnesujący i strumień magnetyczny indukują napięcie), energia oddawana do źródła. Prąd odbiornika zamknięty przez D2.

- jeśli załączymy S1, prąd zacznie płynąć
- układ po prawej stronie nie ma aktywnego źródła napięcia, prąd zamknięty się przez D2 i D3

$$U_o = n U_d \frac{t_p}{T_i}$$

$$n = \frac{n_1}{n_2}$$

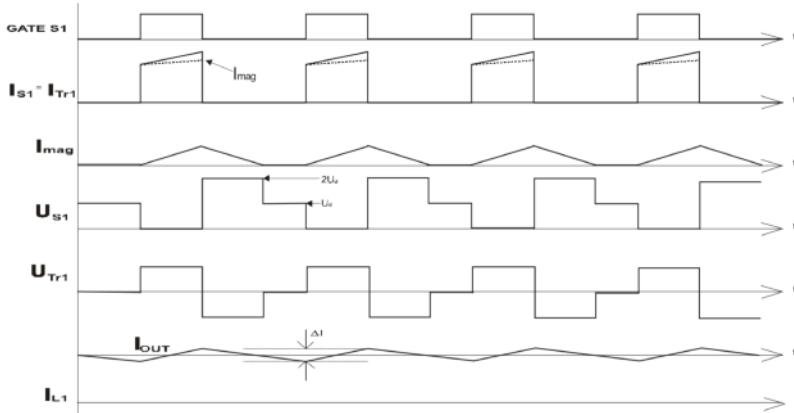


10

Wroclaw University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica jednotaktowa (typu forward)

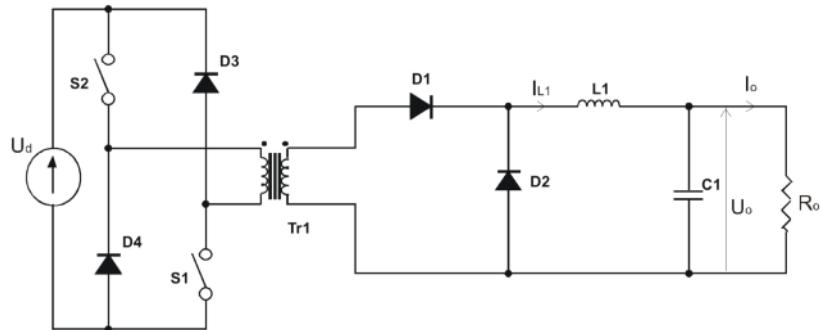


12

Wroclaw University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica jednotaktowa (typu forward) z dwomałącznikami sterującymi



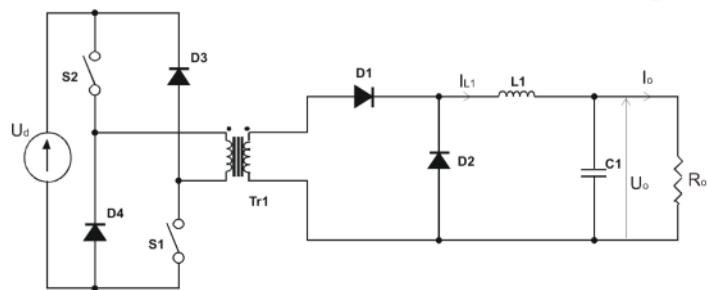
14

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica jednotaktowa (typu forward) z dwomałącznikami sterującymi

S_1, S_2 złączane równocześnie. Działanie analogiczne do poprzedniego.
Funkcja rozmagnesująca – diody D_3 i D_4 .

- funkcja rozmagnesująca jest realizowana przez diody D_3 i D_4
- prawa strona, część wtórnego, pozostaje taka sama

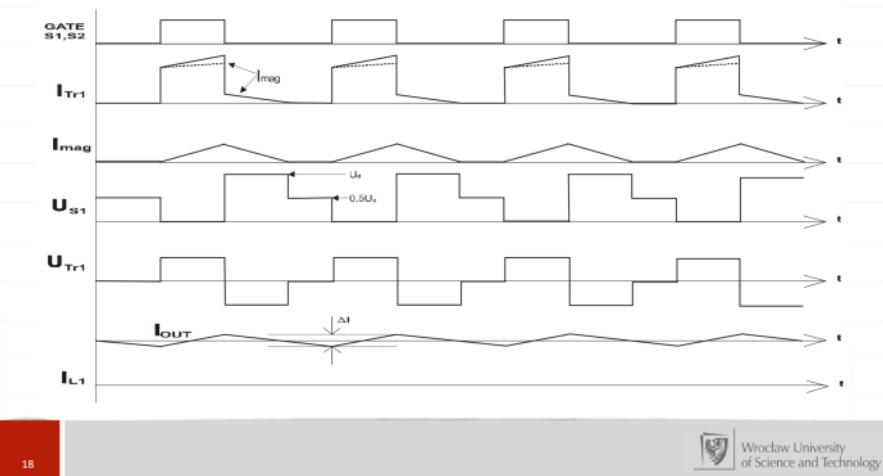


16

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica jednotaktowa (typu forward) z dwoma łącznikami sterującymi

- napięcie pojedyncze, nie podwójne, albo połowa napięcia zasilającego
- prąd magnesujący jest dodatni



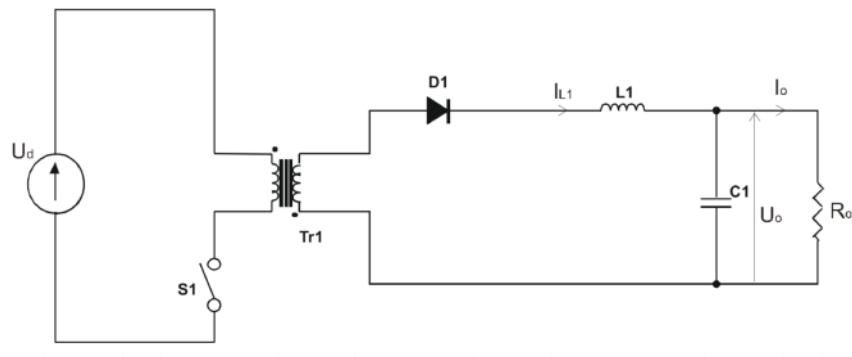
18

Wrocław University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica dwutaktowa (typu flyback) z pojedynczym łącznikiem

- uproszczona struktura w porównaniu do forward
- uzwojenie wtórne podłączone przeciwnie do pierwotnego (kropki przy transformatorze)



20

Wrocław University
of Science and Technology

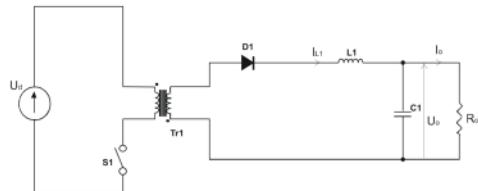
Izolowane przekształtniki prądu stałego

- dobierając n można zwiększyć napięcie
- transformator 1 magazynuje energię

Przetwornica dwutaktowa (typu flyback) z pojedynczym łącznikiem

Pojedynczy łącznik S1. Transformator magazynujący energię. Gdy S1 załączone energia magazynowana w Tr1, dioda spolaryzowana zaporowo. Energia pobierana jest z kondensatora. Wyłączenie S1 – napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym, dioda spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Energia z Tr1 przekazywana do C1 oraz odbiornika.

$$U_o = nU_d \frac{\frac{t_p}{T_i}}{1 - \frac{t_p}{T_i}}$$



Zwiększanie i obniżanie napięcia

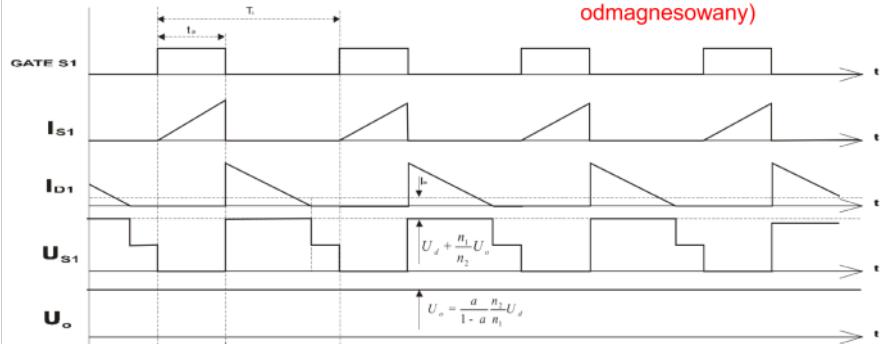
22



Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica dwutaktowa (typu flyback) z pojedynczym łącznikiem

Tryb przerywany
(transformator całkowicie odmagnesowany)



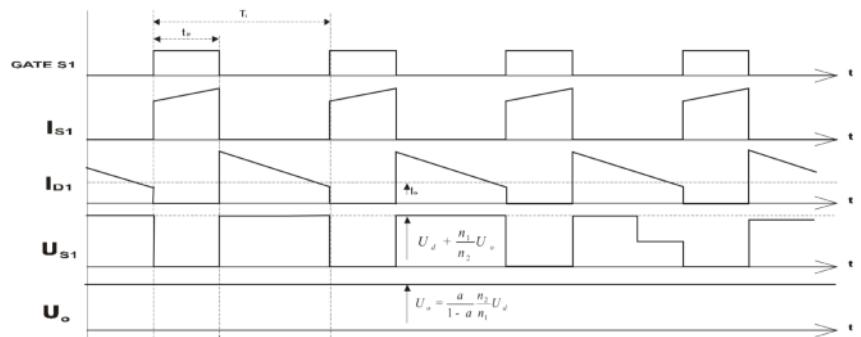
24



Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica dwutaktowa (typu flyback) z pojedynczym łącznikiem

Tryb ciągły

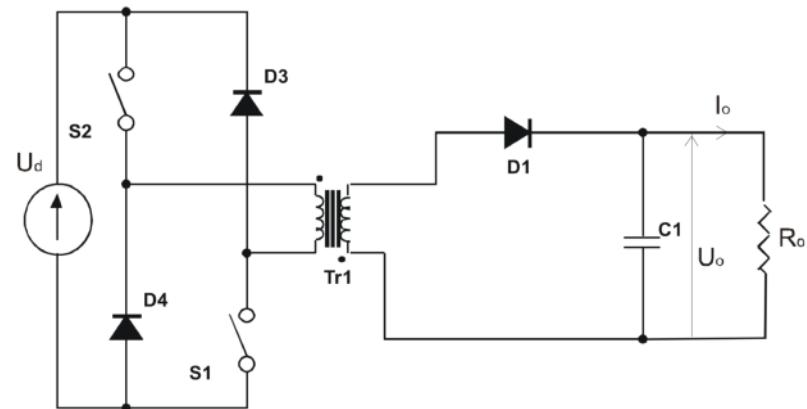


26

Wroclaw University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica dwutaktowa (typu flyback) z dwoma łącznikami



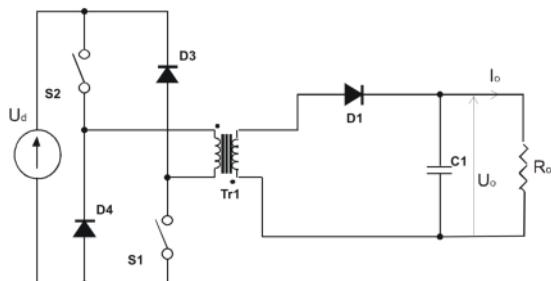
28

Wroclaw University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica dwutaktowa (typu flyback) z dwoma łącznikami

Działanie analogiczne jak poprzednio. Napięcie tranzystorów ograniczone do U_d (poprzednio $2U_d$). Łączniki załączane równocześnie.



30

Wrocław University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica dwutaktowa (typu flyback) z dwoma łącznikami

32

Wrocław University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przetwornica dwutaktowa (typu forward) z dwoma łącznikami

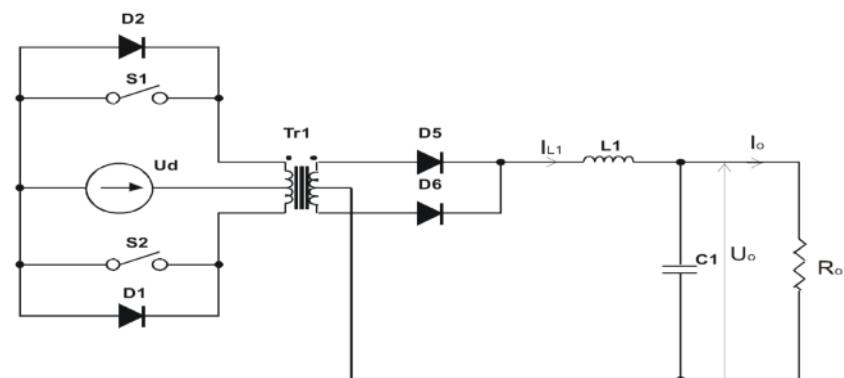
Przekształtniki powyżej -> przekształtniki asymetryczne.
Rdzeń transformatora magnesowany jednokierunkowo. Rdzeń musi mieć odpowiednio duży przekrój.

Przekształtniki w dalszej części -> przekształtniki symetryczne.
Rdzeń transformatora magnesowany dwukierunkowo.

34

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu push-pull



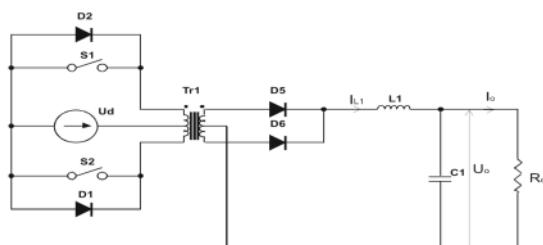
36

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu push-pull

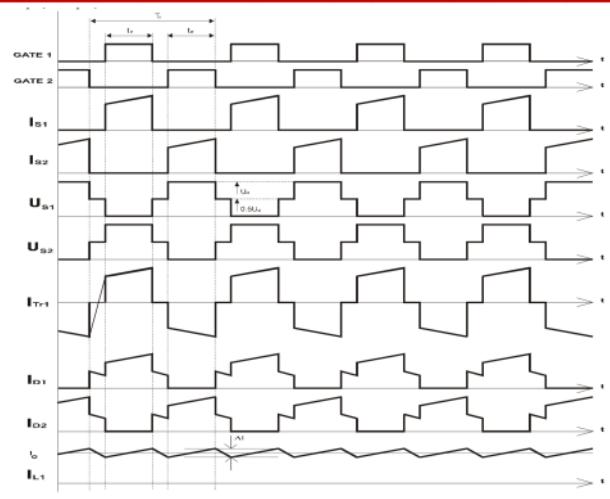
Łączniki załączane naprzemiennie. Energia magazynowana w L1, który dodatkowo filtryuje prąd obciążenia. Podczas załączenia S1 lub S2 energia przekazywana jest poprzez Tr1 i D5 lub D6 do obciążenia.
Gdy łączniki wyłączone prąd płynie przez D5 i D6 do L1 i obciążenia.

$$U_o = 2nU_d \frac{t_p}{T_i}$$



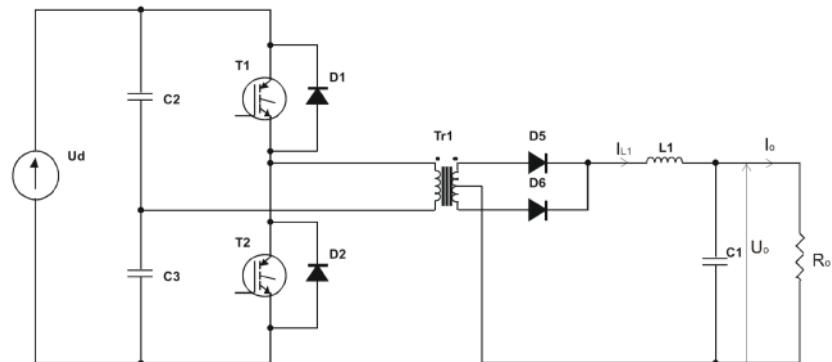
Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu push-pull



Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu półmostkowego



42

Izolowane przekształtniki prądu stałego

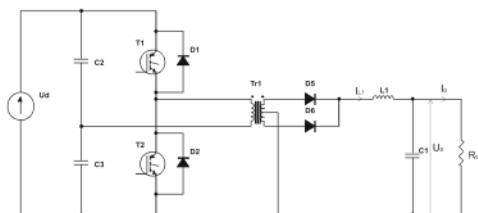
Przekształtnik typu półmostkowego

Układ jednotaktowy – energia przekazywana jest podczas przewodzenia jednego złączników: T1 lub T2.

Kondensatory dzielą napięcie U_d na pół. Napięcie kondensatorów podłączone do uzwojenia pierwotnego w efekcie zwiększa prąd (energię) dławika L1.

Podczas wyłączenia T1 i T, obwód, w którym płynie prąd: D5, D6, uzwojenia wtórne, L1, obciążenie. Powoduje to spadek prądu (brak źródła napięcia).

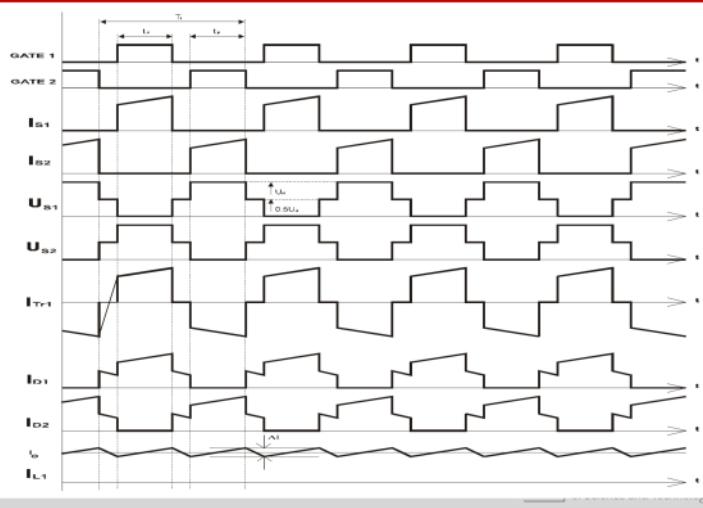
$$U_o = n U_d \frac{t_p}{T_i}$$



44

Izolowane przekształtniki prądu stałego

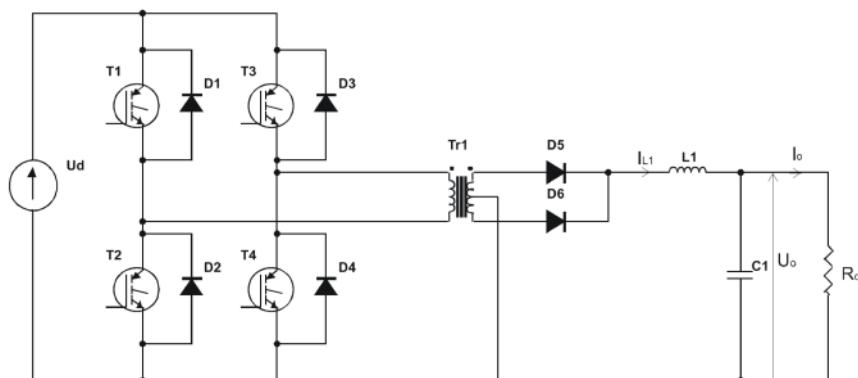
Przekształtnik typu półmostkowego



46

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu mostkowego



48



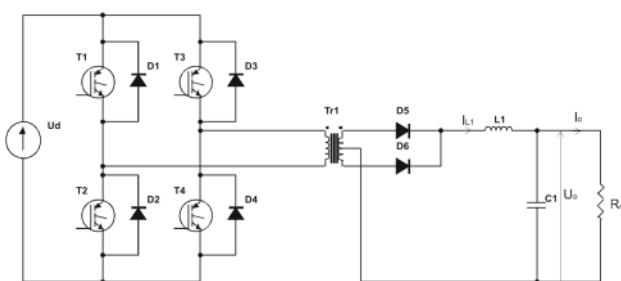
Wroclaw University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu mostkowego

Układ jednotaktowy. Łączniki T1 i T4 sterowane równocześnie. Łączniki T2 i T3 podobnie. Cztery cykle pracy: T1,T4 włączone (I), T1,T2,T3,T4 wyłączone (II), T2,T3 włączone (III), T1,T2,T3,T4 wyłączone (IV).

Diody D1 – D4, aby uniknąć przepięć na indukcyjności rozproszenia transformatora.

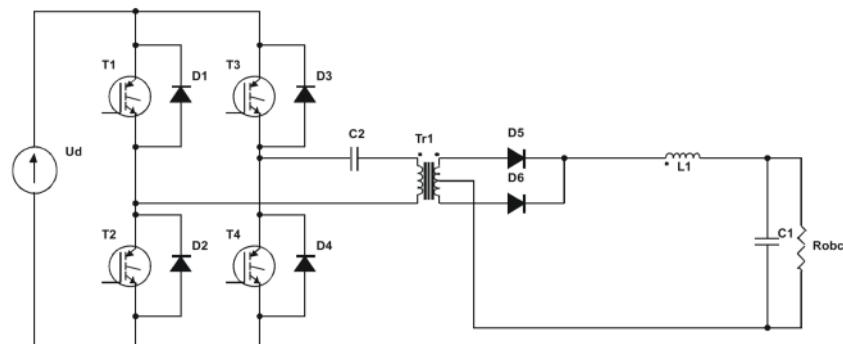


50

Wroclaw University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu mostkowego z kondensatorem symetryzującym



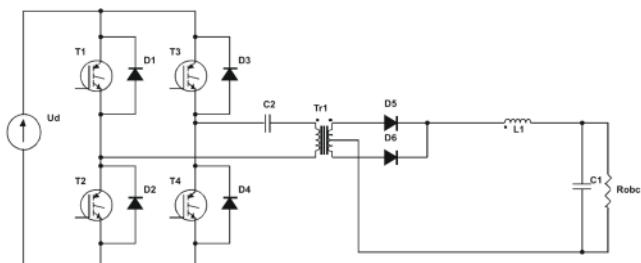
52

Wroclaw University
of Science and Technology

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu mostkowego z kondensatorem symetryzującym

Kondensator redukuje nasycanie się rdzenia magnetycznego transformatora, spowodowanego składową stałą prądu magnesującego (w wyniku braku symetrii sterowania tranzystorów, różnic w czasach przełączania tranzystorów lub różnych spadków napięcia tranzystorów).

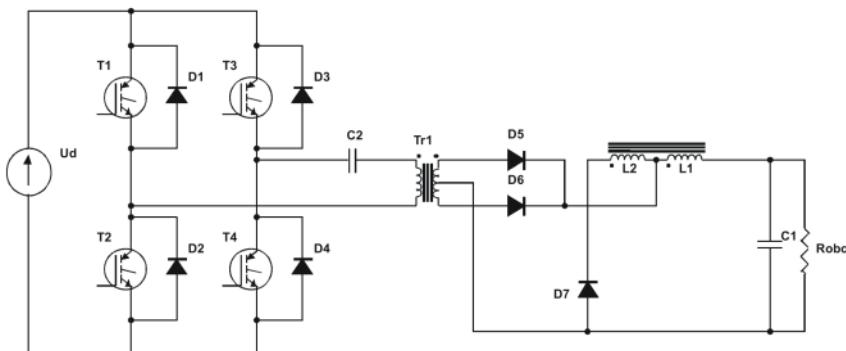


54

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu mostkowego z dławikiem dzielonym

Dławik dzielony – funkcja podobna do kondensatora symetryzującego.

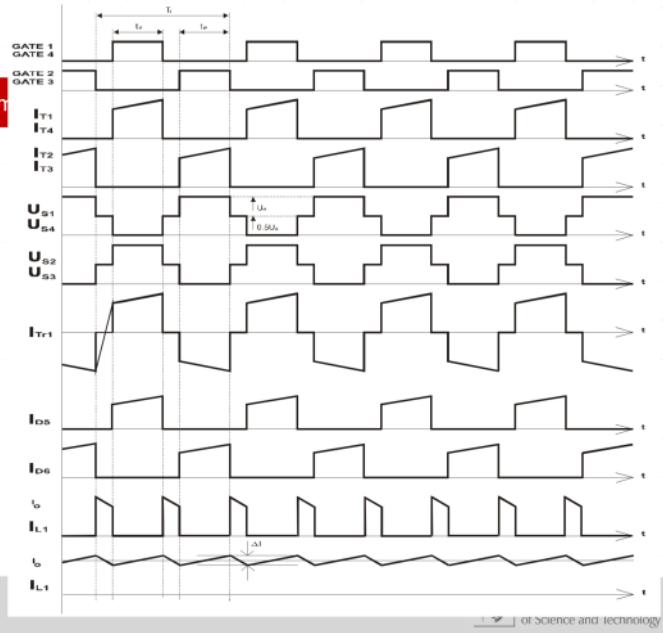


56

Izolowane

Przekształtnik typu n

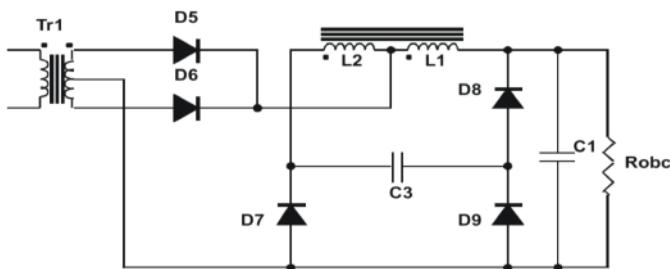
Dławik dzielony – funkcja podobna do kondensatora symetryzującego.



58

Izolowane przekształtniki prądu stałego

Przekształtnik typu mostkowego z dławikiem dzielonym i ogranicznikiem przepięć



60



Wroclaw University
of Science and Technology

Dziękuję za uwagę!

Wykład 13

poniedziałek, 13 stycznia 2020 09:21

Przekształtniki rezonansowe

- Większość układów, o których mówiliśmy wcześniej można przebudować na przekształtniki rezonansowe
- przekształtniki rezonansowe i miękko-przełączalne
 - przekształtniki DC/DC
 - przekształtniki DC/AC
 - przekształtniki AC/AC
- spotyka się różne definicje i ciężko jednoznacznie stwierdzić, czym różnią się układy rezonansowe od miękko-przełączalnych, ale można przyjąć, że miękko-przełączalne (soft-switching) są układami ponadrezonansowymi
 - nie wszystkie układy soft-switching potrzebują układów rezonansowych
 - wszystko jest kwestią nomenklatury
- Miękkie przełączanie - przełączanie z jak najmniejszymi stratami
 - straty to iloczyn prądu i napięcia - dążymy do tego, by jedna z dwóch tych wartości była zerowa
- Z wykładu:
 - Wysoka częstotliwość przełączeń: straty mocy, problemy kompatybilności elektromagnetycznej
 - rozwiązanie: wyłączenia/załączanie łączników energoelektronicznych przy zerowym prądzie i/lub zerowym napięciu
 - przekształtniki rezonansowe - przekształtniki, które projektowane są w taki sposób, aby przełączanie następowało przy zerowym prądzie i/lub napięciu
 - minimalizacja strat mocy w procesie przełączania przyrządów umożliwia podwyższenie częstotliwości przekształcania energii, co prowadzi do minimalizacji wielkości stosowanych transformatorów, dławików i filtrów
- Jeśli mamy jakiś rodzaj przekładni, można przyjąć że przekształtniki są rezonansowe

Klasyfikacja

- Klasyfikacja istnieje, ale nazw jest mnóstwo i nie ma sensu uczyć się na pamięć
- Klasyfikacja według slajdu:
 - Przekształtniki z rezonansem po stronie obciążenia (SLR)
 - napięciowe przekształtniki rezonansowe
 - prądowe przekształtniki rezonansowe z rezonansem równoległy
 - przekształtniki klasy E
 - Rezonansowe impulsowe przekształtniki napięcia DC/DC (przekształtniki quasi-rezonansowe)
 - przekształtniki przełączalne w zerze prądu (ZCS)
 - przekształtniki przełączalne w zerze napięcia (ZVS)
 - Przekształtniki ZVS z ograniczonym napięciem (ZVS-CV) (pseudorezonansowy)
 - Przekształtniki z rezonansowym obwodem pośredniczącym prądu stałego (ZVS)
 - High-frequency-link integral-half-cycle