

TEORIA PRZEKSZTAŁTNIKÓW

Kurs elementarny

Zakres przedmiotu:

(7 dwugodzinnych wykładów :)

W1. Wiadomości wstępne

W2. Przekształtniki sieciowe 1

W3. Przekształtniki sieciowe 2

W4. Złożone i specjalne układy przekształtników sieciowych

W5. Przekształtniki impulsowe napięcia stałego 1

W6. Przekształtniki impulsowe napięcia stałego 2

W7. Falowniki

!!!Zapis wykładu ma charakter lakoniczny, skrótowy o cechach notatek zawierających m. innymi uproszczone frazy językowe nie zamknięte w regularne zdania. Prezentacje ustne w czasie wykładów będą stanowiły poszerzony komentarz do przekazanego studentom materiału podstawowego. W tekście materiału zostaną zawarte odnośniki do wskazanej literatury [L...]

UWAGA!! – Podstawa zaliczenia przedmiotu i wystawienia oceny jest umiejętność rozwiązywania zadań zamieszczonych na stronie przedmiotu.

Literatura:

[L1]. Tunia H., Barlik R. Teoria przekształtników „ PW 2003

[L2]. Barlik R, Nowak M. „ Technika tyrystorowa” WNT 1994

[L3]. Mikołajuk K. Podstawy analizy obwodów energoelektronicznych PWN 1998

[L4]. Nowak M. Barlik R. i inni Układy energoelektroniczne WNT 1982

[L5]. Nowak M. Barlik R. Poradnik Inżyniera Energoelektronika WNT 1998

[L6] Mohan N., Undeland T.M. , Robbins W.P. Power electronics JW&S NJ 1995

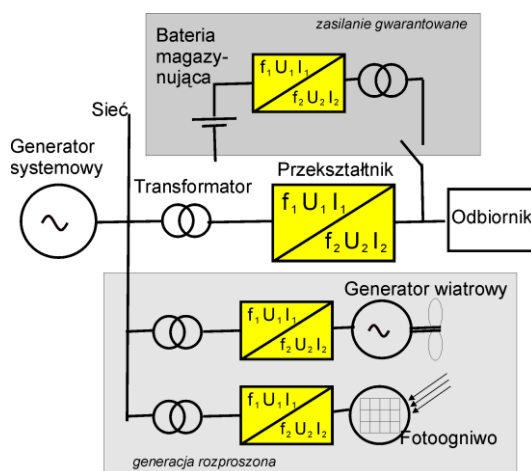
W1. WIADOMOŚCI WSTĘPNE

Teoria przekształtników to dział szerokiej dyscypliny - **energoelektroniki** (**ang. Power Electronics, niem. Leistungselektronik**). Teoria przekształtników jest przykładem zastosowania metod analizy obwodów do grupy układów zbudowanych z zastosowaniem łączników dwustanowych. Niezliczona liczba rozwiązań układowych przekształtników, stale powiększana, ma na celu zaspokojenie stale rosnących potrzeb w zakresie przetwarzania form i precyzyjnego sterowania energią różnorodnych odbiorników, generatorów i magazynów energii elektrycznej.

Energoelektronika jako dziedzina prac badawczo-rozwojowych obejmuje następujące działy:

- analiza i projektowanie obwodów przekształtnikowych (główny przedmiot wykładu „Teoria Przekształtników”)
- budowa, właściwości i sposób użytkowania elementów tworzących układy przekształtnikowe (technologie konstrukcji)
- metody i układy sterowania przekształtników.

Zajmując się analizą i opisem właściwości poszczególnych obwodów nie można abstrahować od właściwości i parametrów komponentów (łączników półprzewodnikowych, elementów magazynujących energię) a także od specyfiki sterowania przekształtników za pośrednictwem dwustanowych łączników.



Rys.1.1. Przykładowy schemat poboru i konwersji energii elektrycznej z zastosowaniem przekształtników

O wadze energoelektroniki we współczesnej cywilizacji niech świadczą następujące liczby:

- Moc stosowanych przekształtników **0,01 W - 10 GW ($10^{-2} - 10^{10}$)**
- Liczba przekształtników wytworzonych **$\sim 10^{10}$**
- W krajach wysokorozwiniętych - 2/3 energii elektrycznej jest „udoskonalane” za pomocą przekształtników. Oznacza to, że energia elektryczna rozprowadzana przez systemy energetyczne jest swojego rodzaju półproduktem.

Typowe źródła zasilające i magazynujące energię

- sieć 50 Hz 1 - 3 fazowa
- baterie akumulatorów i superkondensatorów
- lokalne generatory z silnikami spalinowymi,
- mikroturbiny parowe, wodne, wiatrowe
- ogniwa fotoelektryczne, paliwowe

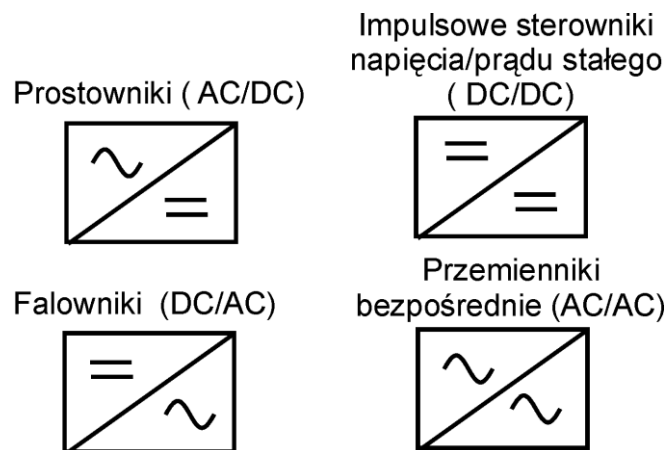
Odbiorniki (ogólny podział):

napięcia i prądu stałego

napięcia i prądu przemiennego

- o stałej lub zmiennej częstotliwości
- jedno lub wielofazowe

Podstawowe przemiany energii elektrycznej dokonywane za pomocą przekształtników



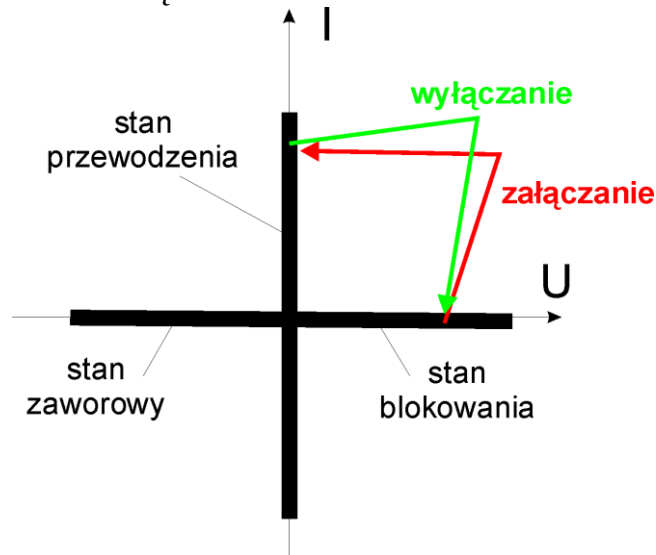
Rys.1.2. Bloki reprezentujące podstawowe przemiany w przekształtnikach

Metody opisu i analizy napięć i prądów w obwodach przekształtników:

- podejście klasyczne na podstawie wzorów analitycznych wyznaczonych jako rozwiązanie równań różniczkowych przedziałami czasowymi liniowych powiązanych warunkami brzegowymi. Uzyskuje się tą drogą zależności o charakterze ogólnym.
- analiza komputerowa - symulacja z zastosowaniem standardowych metod numerycznych bazujących na zmiennych stanu z uwzględnieniem modeli łączników (zmienna rezystancja zależnie od stany łącznika)
- analiza spektralna w funkcji częstotliwości służąca do globalnej oceny przebiegów napięcia i prądu wytwarzanych w przekształtnikach.

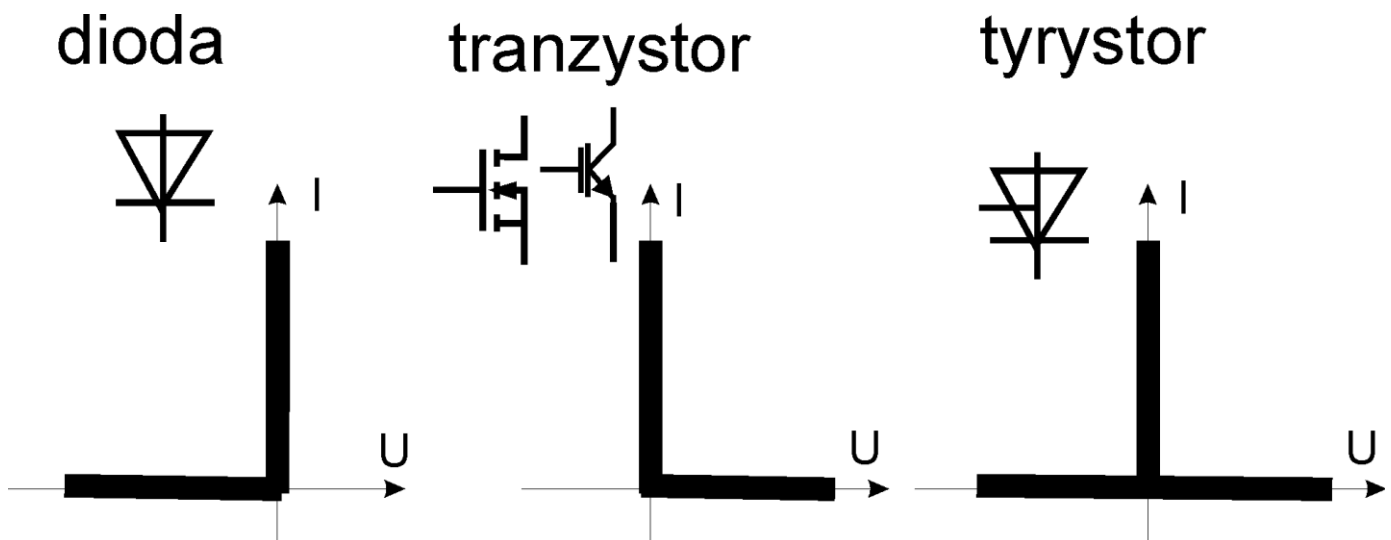
**Elementy układów energoelektronicznych [L1: str 9-35] ([L5: str275-333],
strona WWW. isep.pw.edu.pl**

Przyrządy półprzewodnikowe mocy - łączniki sterowane w pierwszym stopniu analizy traktowane są często jako idealne z punktu widzenia charakterystyk napięciowo - prądowych ($U_F = 0$ przy przewodzeniu, $I_{DR} = 0$ przy blokowaniu i w stanie zaworowym) i czasów przełączania ($t_S = 0$). Można powiedzieć, że idealne łączniki energoelektroniczne są bezstratne.

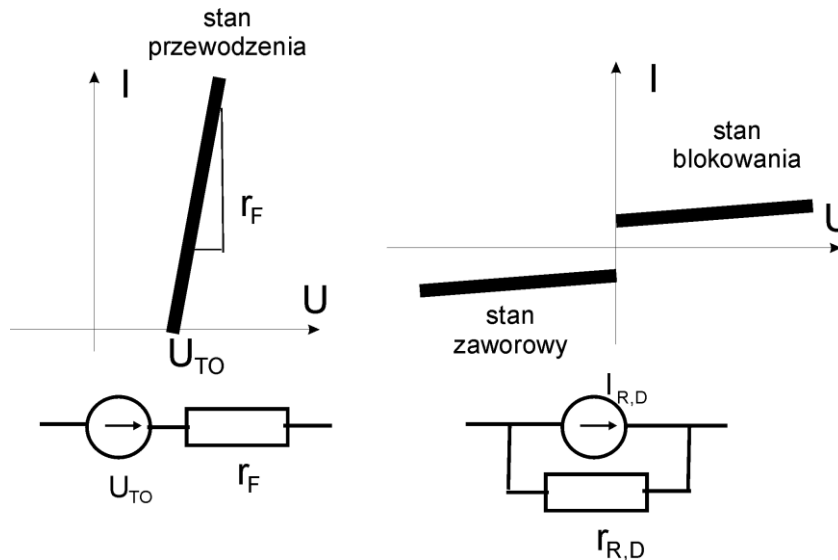


Rys.1.3. Charakterystyki napięciowo-prądowe idealnego łącznika

Charakterystyki elementów rzeczywistych są ograniczone do wybranych ćwiartek układu U-I. (Rys.1.4)



Rys.1.4. Charakterystyki idealne łączników rzeczywistych



Rys.1.5. Modele łączników energoelektronicznych w stanie przewodzenia i w stanie blokowania i zaworowym

Charakterystyki rzeczywiste przyrządów są dla poszczególnych stanów interpretowane jako połączenie rezystancji i źródeł napięcia lub prądu. Spadek napięcia na łączniku przewodzącym prąd I stanowi jeden z podstawowych parametrów;

$$U_F = U_{TO} + I r_F$$

Dla tak zdefiniowanej charakterystyki przewodzenia można wyznaczyć moc strat przewodzenia dla okresowych przebiegów prądu

$$P_{str_przew} = U_{TO} I_{(AV)} + r_F I_{(RMS)}^2$$






Charakterystyki dla stanów blokowania i zaworowego są zwykle reprezentowane przez rezystancję dążącą do nieskończoności. Podstawowym parametrem dla tych stanów jest dopuszczalna wartość napięcia wynikająca z wytrzymałości napięciowej złącza p-n w krzemie (napięcie przebicia lawinowego)



Rys.1.6. Charakterystyki w stanie blokowania i zaworowym z uwzględnieniem zjawiska przebicia.

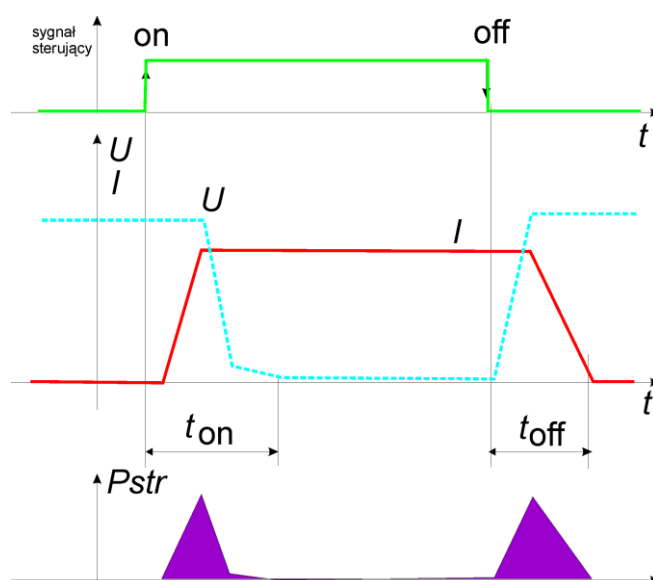
Podstawowe maksymalne parametry statyczne charakteryzujące najczęściej stosowane łączniki półprzewodnikowe zestawiono w tabeli z rys 1.7

Przeгляд łączników półprzewodnikowych powszechnie stosowanych

łącznik	Symbol	Napięcie przewożenia	Napięcie przebicia U_R	Napięcie przebicia U_D	Prąd pojedynczej struktury
Dioda		1-3V	10 kV	0 V	5 kA
Tyristor		2-5V	10 kV	10 kV	5 kA
Tyristor wyłączalny GTO		2-5V	0 V 6 kV	9 kV 6 kV	1 kA 3 kA
MOSFET		$I \times 0.003$ $I \times 0.4$	0 V 0 V	100V 1,2 kV	200A 20A
IGBT		2-5V	0 V	6 kV	50 -150A /strukturę

Rys.1.7. Tabela przedstawiająca właściwości powszechnie stosowanych łączników półprzewodnikowych.

(U_R – napięcie wsteczne, U_D – napięcie zgodne blokowane)



Rys.1.8 . Uprozczone przebiegi prądów i napięć i mocy strat łączników podczas załączania i wyłączania.

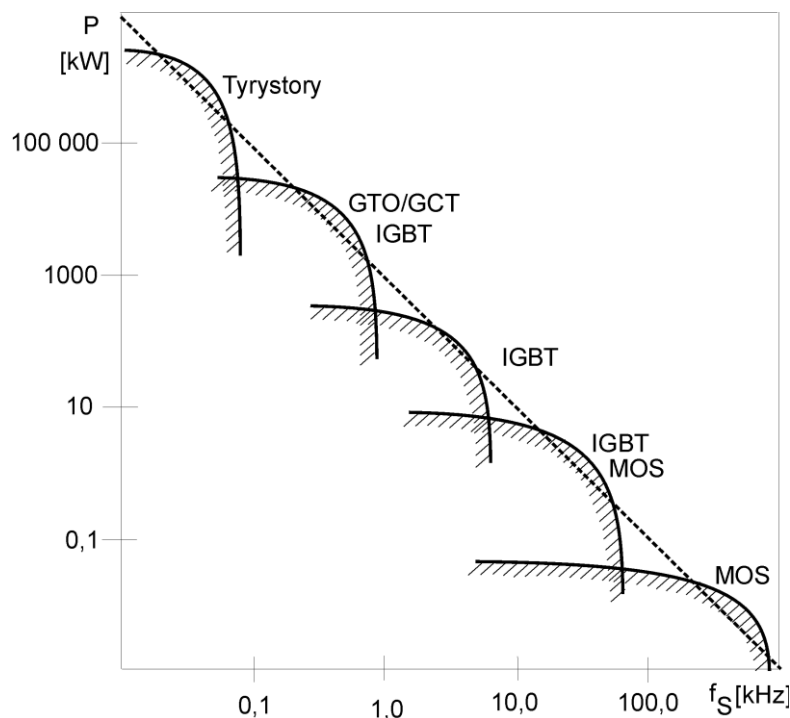
Poza charakterystykami statycznymi właściwości łączników opisują parametry dynamiczne tak jak to przedstawiono na rysunku 1.8. Poza typowymi wartościami czasów t_{on} i t_{off} , proces załączania i wyłączenia jest opisany za pomocą wartości energii traconej przy przełączaniu zdefiniowanej następująco

$$E_{on} = \int_t^{t+t_{on}} u(t)i(t)dt \quad \text{oraz} \quad E_{off} = \int_t^{t+t_{off}} u(t)i(t)dt$$

Na podstawie dostarczonych przez producenta wartości energii przełączania sprowadzonych do rzeczywistych wartości napięcia i prądu, przy których dokonywane jest przełączanie można wyliczyć moc straty łączeniowych korzystając z wzoru

$$P_{str_lacz} = f_S (E_{on} + E_{off})$$

Od parametrów dynamicznych zależy częstotliwość łączy osiągnięta przez poszczególne rodzaje i typy łączników. Na wykresie z rysunku 1.9 zaprezentowano orientacyjny podział zastosowań poszczególnych typów łączników w zależności od przełączanej mocy i częstotliwości łączy.



Rys.1.9. Wykres obrazujący typowe zakresy zastosowań łączników w dziedzinie mocy i częstotliwości łączy

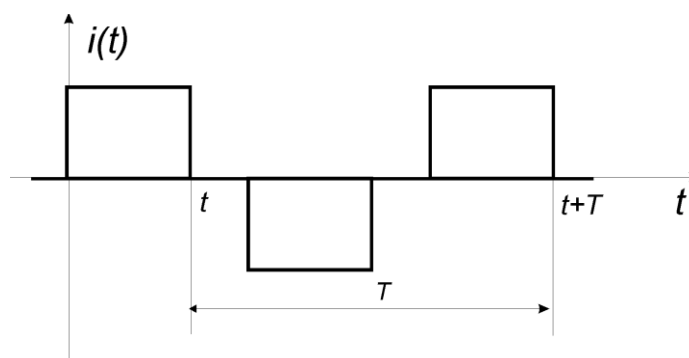
PYTANIA- PROBLEMY

- Jakie podstawowe działy prac badawczo-rozwojowych można wyróżnić w obszarze energoelektroniki?
- Jakie są podstawowe źródła energii, z których korzystają przekształtniki?
- Jakie podstawowe rodzaje przemian energoelektronicznych wyróżnia się?
- Jakie główne metody stosuje się w opisie i analizie obwodów przekształtnikowych?
- Jakie są cechy idealnego łącznika energoelektronicznego?
- Jakie parametry charakteryzują rzeczywiste łączniki?
- Jakie są typowe graniczne wartości napięć i prądów dla podstawowych typów łączników?
- Jak dzielimy straty energii występują w łącznikach półprzewodnikowych?
- Dlaczego tranzystor MOSFET jest szczególnie użyteczny w przekształtnikach na niskie napięcia?
- Jak obliczać moc strat przewodzenia dla łączników?

Podstawowe zależności stosowane przy opisie i analizie obwodów przekształtnikowych [\[L3; str 16-36\]](#)

Analiza spektralna:

Przebiegi napięć i prądów występujących w przekształtnikach mają z reguły formę okresowych i odkształconych. Metoda analizy spektralnej oparta na rozkładzie na szereg Fouriera jest niezwykle efektywnym narzędziem umożliwiającym scharakteryzowanie i porównanie właściwości określonych przebiegów.



Rys.10. Przykładowy przebieg prądu stosowny do analizy spektralnej z zastosowaniem szeregu Fourier'a

I tak dla przykładowego przebiegu prądu o okresie T jak na rys.10 można wyznaczyć szereg nieskończony o postaci:

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(\omega k t + \varphi_k)$$

gdzie:

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i(t) dt; \dots I_{km} = \sqrt{I_{ak}^2 + I_{bk}^2}; \dots \varphi_k = \arctg\left(\frac{I_{ak}}{I_{bk}}\right)$$

$$I_{ak} = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} i(t) \cos k \omega t dt \quad ; \dots \quad I_{bk} = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} i(t) \sin k \omega t dt$$

Powyższe wzory mogą być oczywiście stosowane w formie odpowiadającej prezentacji przebiegu w uogólnionej postaci jako funkcja kąta ωt (okres T odpowiada kątowi 2π).

Przy analizie spektralnej w szeregu wypadków szczególne znaczenie ma pierwsza harmoniczna zwana podstawową bądź użyteczną. Wyższe harmoniczne zwykle mają charakter pasożytniczy i podejmowane są działania dla ich usunięcia lub

minimalizacji. Dla oceny przebiegu badana jest relacja pomiędzy sumą wyższych harmonicznych harmonicznymi a harmoniczną podstawową (użyteczną) .

Wartość średnia, skuteczna, całkowity współczynnik deformacji

Wartość średnia (AV - average) odpowiada składowej zerowej w szeregu Fouriera.

Wartość średnia w obwodach napięcia i prądu stałego spełnia funkcję składowej podstawowej - użytecznej. Warunek zerowej wartości napięcia średniego na indukcyjności oraz prądu średniego w kondensatorze jest często w analizie równoznaczne ze spełnieniem warunku stanu pracy ustalonej (quasi-ustalonej).

$$I_{AV} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i(t) dt$$

Wartość skuteczna (RMS - root-mean square) definiowana jako wartość prądu stałego która płynąc przez rezystancję wywołuje takie same straty mocy jak rozpatrywany okresowy przebieg o dowolnym kształcie.

$$I_{RMS}^2 R = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) R dt \quad \text{czyli} \quad I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) dt} \quad !$$

Definicja wywodzi się z potrzeby charakterystyki fali prądu ale okazała się również użyteczna w odniesieniu do napięcia

Wartość skuteczna przebiegu odkształconego w domenie harmonicznym jest określona wzorem

$$I_{RMS}^2 = I_{1RMS}^2 + I_{2RMS}^2 + \dots + I_{kRMS}^2 = \sum_{k=1}^{\infty} I_{kRMS}^2$$

Dla oceny deformacji przebiegu w porównaniu z przebiegiem odpowiadającym pierwszej harmonicznemu (użytecznej) stosuje się powszechnie całkowity współczynnik deformacji (THD - total harmonic distortion) zdefiniowany jak następuje:

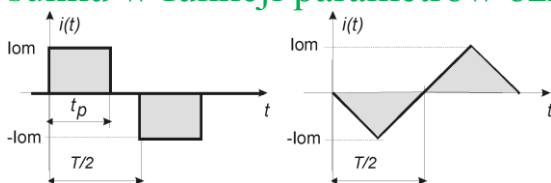
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{kRMS}^2}}{I_{1RMS}} 100\%$$

Ponieważ wyznaczenie sumy wyższych harmonicznych jest trudne wzór można przekształcić do postaci, w której korzysta się z wartości skutecznej przebiegu odkształconego i wartości skutecznej pierwszej harmonicznej:

$$THD = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_{1RMS}^2}}{I_{1RMS}} 100\%$$

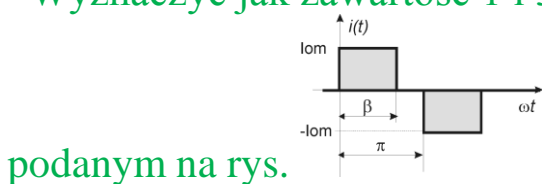
PROBLEMY - ĆWICZENIA

*Wyznaczyć wartości skuteczne prądu oraz THD dla fali o kształcie jak na rysunku w funkcji parametrów oznaczonych na wykresach.



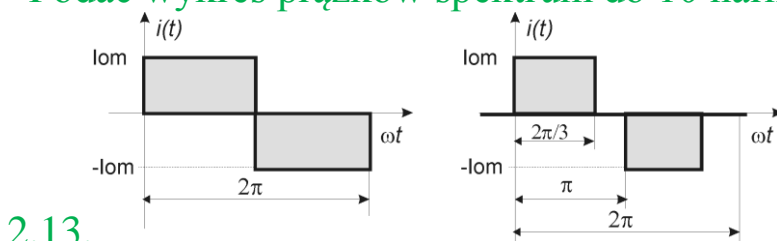
Rys.1.12

*Wyznaczyć jak zawartość 1 i 3 harmonicznej zależy od kąta β w przebiegu



Rys.2.12

*Podać wykres prążków spektrum do 10 harmonicznej dla przebiegów na rys.



2.13.

Rys.2.13.