

## Prostowniki sterowane w napędach DC

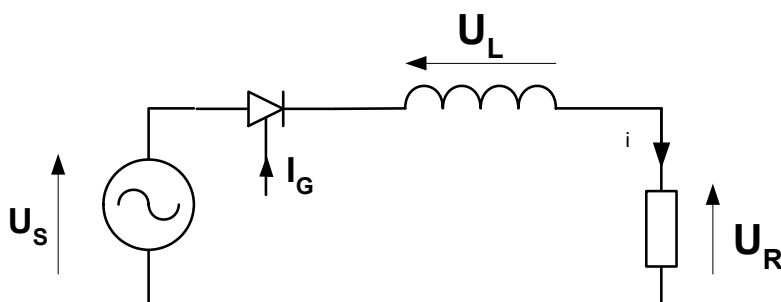
W wielu napędach z silnikami DC, o regulowanej prędkości, szczególnie przy większych mocach, stosuje się prostowniki sterowane (tyrystorowe) napięcia sieciowego. Regulacja napięcia stałego oparta jest na zmianach kąta wysterowania fazowego tyrystorów (sterowanie fazowe). Napięcie wyjściowe zawiera tętnienia będące wielokrotnością częstotliwości sieci. Ze względu na niską częstotliwość tętnień, może być wymagane dodanie dodatkowej zewnętrznej indukcyjności do indukcyjności silnika, aby uzyskać niski poziom tętnień w silniku. Składowa zmienna prądu silnika może powodować straty ciepłne w silniku, tętnienia momentu i prędkości. Wadą sterowników tyrystorowych jest długi czas odpowiedzi reakcji układu na zmiany prędkości, w porównaniu ze sterownikami impulsowymi. Nie jest to krytyczne w układach napędowych, w których czasy odpowiedzi na sygnały sterujące zmianą prędkości, czy momentu będą stosunkowo wolne. Może być to istotnym ograniczeniem w serwomechanizmach położenia.

*Wymagane przygotowanie:*

1. Zasada działania tyrystora, jego podstawowe parametry i sposoby wyzwalania.
2. Podstawowe układy prostowników jednofazowych i trójfazowych niesterowanych. Podstawowe przebiegi i zależności.

### Zasada działania prostowników tyrystorowych jednopulsowych.

Zasada działania tyrystorowego sterowania silników prądu stałego może być w uproszczeniu pokazana na układzie z Rys. 1. Włączenie tyrystora inicjujemy impulsem podanym na bramkę tyrystora. Wyłączenie następuje samoczynnie, gdy napięcie anoda-katoda osiąga wartość zerową. Silnik zasilany jest impulsami prądu w sposób nieciągły. Sterowanie polega na regulowaniu średniej wartości prądu w silniku przez zmianę kąta fazowego impulsu bramki. W tyrystorach nie ma możliwości zakończenia w prosty sposób przewodzenia tyrystora. Pokazane przebiegi na Rys. 2 są dla układu, w którym pominięto dla uproszczenia SEM silnika.



Rys. 1. Prostownik tyrystorowy z obciążeniem RL.

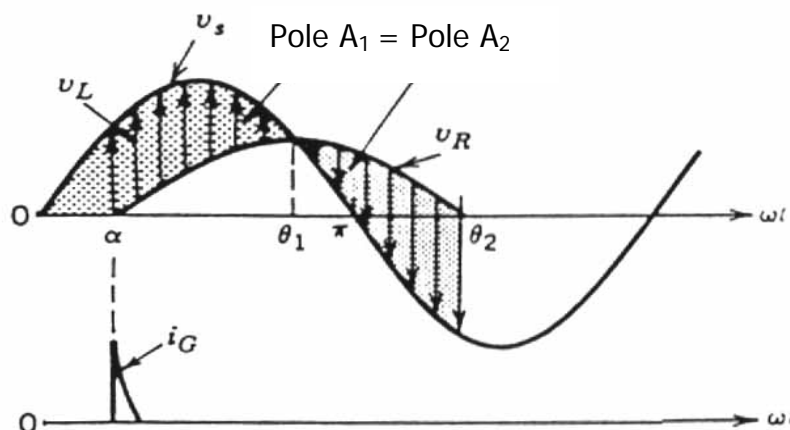
W chwili początkowej prąd w obwodzie jest zerowy. Tyrystor włączamy z opóźnieniem kątowym  $\alpha = \omega t$ . Prąd płynący w obwodzie określony jest z zależności

$$v_L(t) = L \frac{di}{dt} = v_s - v_R \quad \text{gdzie} \quad v_R = R \cdot i \quad \text{jest proporcjonalne do płynącego prądu,}$$

W czasie od  $\alpha$  do  $\Theta_1$  napięcie na indukcyjności  $v_L$  jest dodatnie i prąd rośnie

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha/\omega}^t v_L(\lambda) d\lambda \quad \text{dla} \quad t > \frac{\alpha}{\omega} \quad \text{gdzie} \quad \lambda - \text{parametr integracji.}$$

Po  $\omega t = \Theta_1$  napięcie  $v_L$  jest ujemne i prąd opada i staje się zerowy w chwili  $\omega t = \Theta_2$



Rys. 2. Przebieg napięcia na obciążeniu RL po załączeniu tyrystora.

W stanie ustalonym energia zgromadzona w indukcyjności musi być oddana do rezystora. Stąd też pole  $A_1$  musi być równe polu  $A_2$ .

*Zadanie:* Wykaż, że w przypadku odbiornika czysto rezystancyjnego wartość średnia za okres napięcia wyprostowanego  $U_d$  wynosi  $U_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2} U_s (1 + \cos \alpha)$  gdzie  $U_s$  jest wartością skuteczną napięcia zasilającego, a  $\alpha$  to kąt opóźnienia wysterowania tyrystora.

*Zadanie:* W przypadku obciążenia rezystancyjno- indukcyjnego RL przebieg prądu jest rozwiązaniem równania różniczkowego  $\sqrt{2} U_s \sin \omega t = R \cdot i + L \frac{di}{dt}$ . Oblicz zależność  $i(t)$  przy warunku początkowym  $i(\alpha) = 0$ .

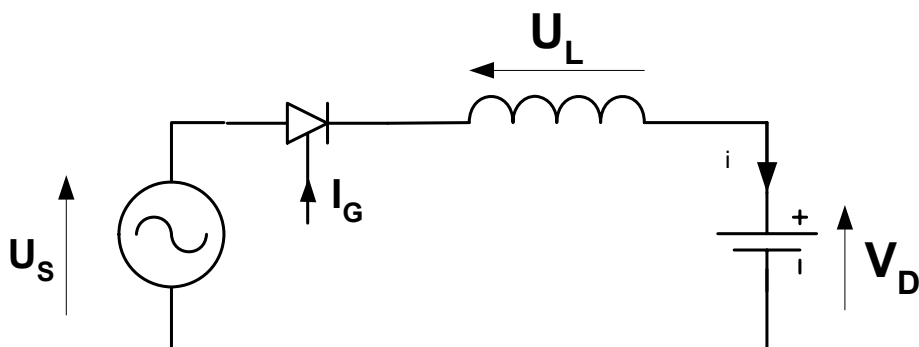
Odpowiedź: 
$$i(t) = \frac{\sqrt{2} U_s}{Z} \sin(\omega t - \varphi) - \frac{\sqrt{2} U_s}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-(\omega t - \alpha) \operatorname{ctg} \varphi}$$

przy czym  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$  i  $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$

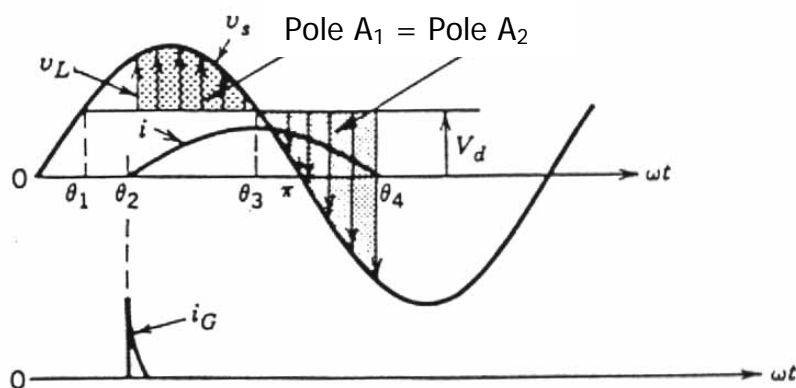
*Zadanie:* Wykaż jaka jest jaka jest wartość średnia napięcia wyprostowanego  $V_d$  w przypadku obciążenia rezystancyjno - indukcyjnego RL.

Odpowiedź:  $V_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2} (\cos \alpha - \cos \Theta_2)$  gdzie  $\Theta_2$  - kąt zaniku przepływu prądu

Bliskie silnikowi prądu stałego (DC) jest obciążenie (Rys. 3) składające się z indukcyjności  $L$  i źródła napięcia  $V_d$  (pominięto dla uproszczenia rezystancję  $R$ ).



Rys. 3. Schemat prostownika z obciążeniem  $L$  i  $SEM$ .



Rys. 4. Przebiegi prądów i napięć układu prostownika sterowanego z obciążeniem  $L$  i  $SEM$ .

Prąd w obwodzie musi być zerowy do chwili  $\omega t = \theta_1$ , gdyż tyrystor jest spolaryzowany zaporowo. W chwili  $\theta_2$  tyrystor wyzwolony bramką zaczyna przewodzić.

Napięcie na indukcyjności 
$$v_L(t) = L \frac{di}{dt} = v_s - V_d$$

i prąd odpowiednio 
$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{\theta_2/\omega}^t [v_s(\lambda) - V_d] d\lambda$$

W chwili  $\theta_3$  prąd osiąga maksimum i następnie opada do zera w chwili  $\theta_4$ .

Prąd narastający musi być równy prądowi opadającemu, gdyż jak i uprzednio rozważamy stan ustalony w układzie. Stąd też pole obszaru  $A_1$  odpowiadające całce różnicy napięć musi być równe polu  $A_2$ .

*Zadanie: Oblicz przebieg prądu  $i(t)$  płynącego w obwodzie i jego wartość średnią.*

Układ prostownika sterowanego jednopulsowego może być stosowany do silników komutatorowych małej mocy. Na schemacie zastępczym jest to szeregowe połączenie rezystancji  $R$ , indukcyjności  $L$  i źródła napięcia stałego ( $E$ )  $V_d$  skierowanego przeciwnie do przepływu prądu (praca silnikowa).

Prąd płynący przez ten obwód opisuje rozwiązanie równania różniczkowego obowiązującego w przedziale przewodzenia tyrystora :

$$\sqrt{2}U_s \sin \omega t - V_d = R \cdot i_d(t) + L \frac{di_d(t)}{dt} \text{ przy warunku początkowym } i_d(\theta_2) = 0$$

prąd ten wynosi

$$i_d = \frac{\sqrt{2}U_s}{R} \left\{ [\cos \varphi \sin(\omega t - \varphi) - \varepsilon] + [\varepsilon - \cos \varphi \sin(\Theta_2 - \varphi)] e^{-(\omega t - \Theta_2) \operatorname{ctg} \varphi} \right\}$$

gdzie:  $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$  i  $\varepsilon = \frac{V_d}{\sqrt{2}U_s}$  - stosunek napięcia wejściowego do wyjściowego

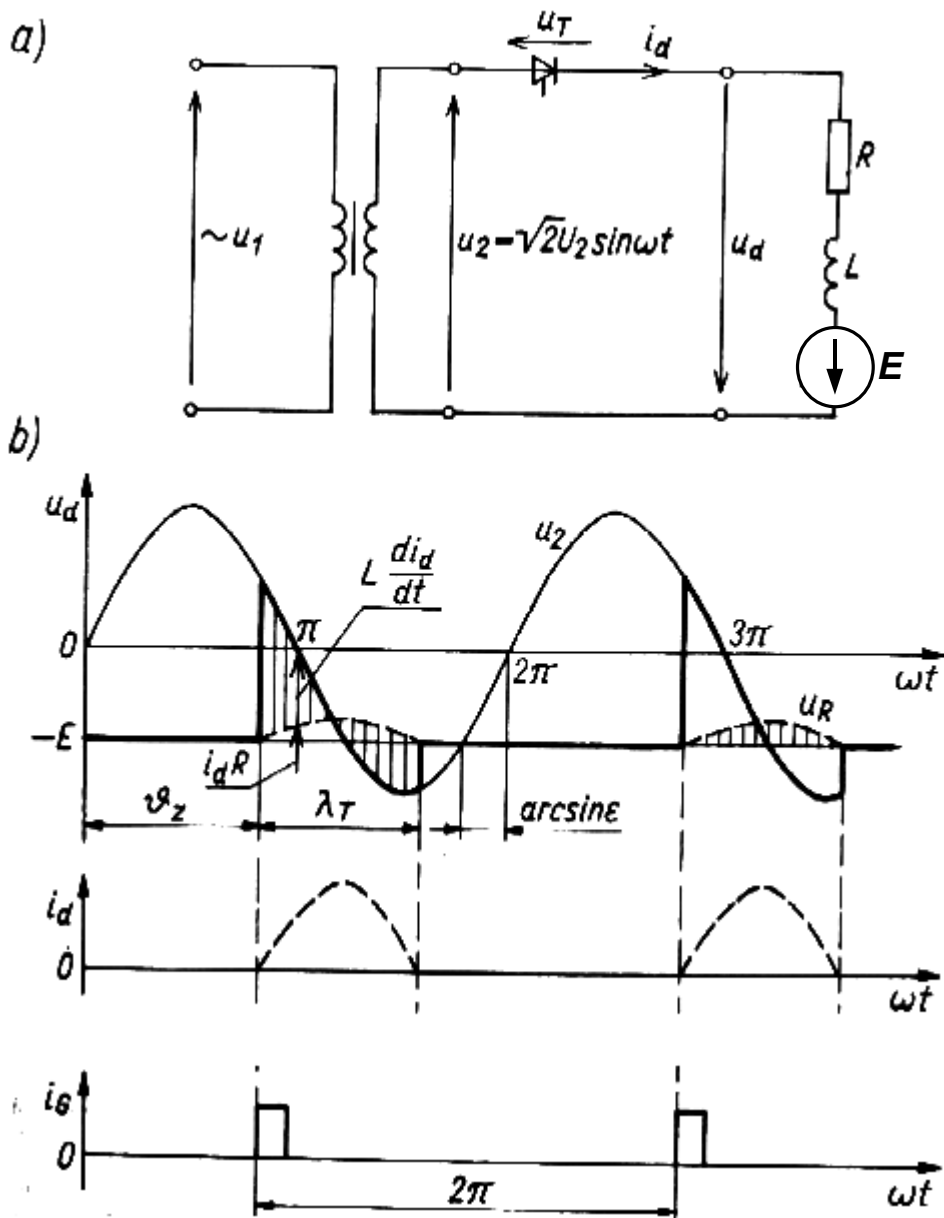
Po scałkowaniu wartość średnia tego prądu jest równa

$$I_d = \frac{\sqrt{2}U_s}{2\pi R} [\cos \Theta_2 - \cos \Theta_4 - \varepsilon(\Theta_4 - \Theta_2)]$$

*Zadanie: Czy w układzie płynie prąd gdy amplituda napięcia źródła napięcia stałego  $V_d$  jest większa od napięcia zasilającego  $U_s$  ( $\varepsilon > 1$ ).*

Energia w opisywanych prostownikach (przekształtnikach) sterowanych jednopulsowych przechodziła z sieci zasilającej do odbiornika.

Gdy SEM źródła napięcia jest skierowana zgodnie z przepływem prądu, co pokazano na Rys. 5, to układ przekazuje energię z obciążenia (np. silnik DC) do napięcia sieci. Jest to tym samym falownik o komutacji sieciowej.



Rys. 5. Praca falownikowa prostownika jednopulsowego z obciążeniem RLE: a) schemat układu, b) przebiegi czasowe prądu i napięcia w układzie.

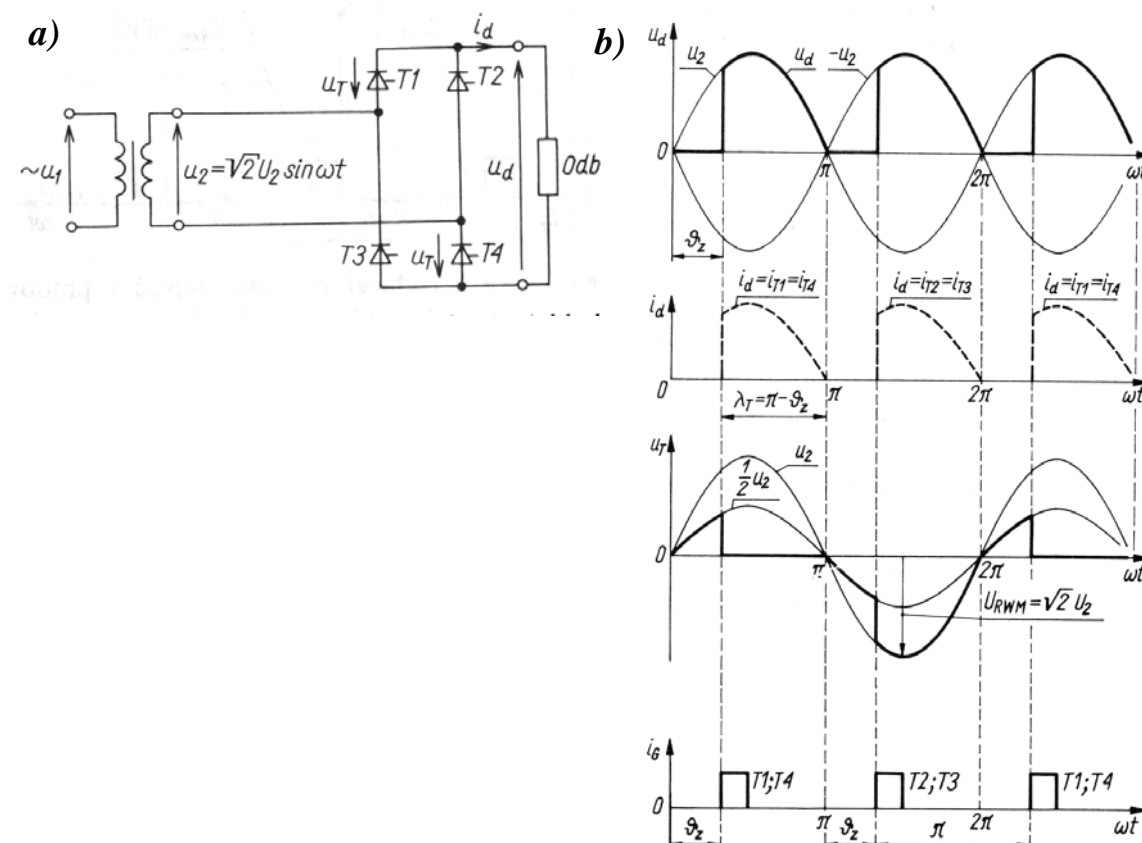
Napięcie SEM obciążenia (silnika) nie może być większe od napięcia zasilającego. Gdyby napięcie było większe, to płynący prąd ciągły o dużej wartości zniszczył by tyrystor. Kąt przewodzenia tyrystora  $\lambda_T$  wzrasta wraz ze zmniejszeniem kąta załączania  $\vartheta_z$ , a poniżej pewnej wielkości  $\vartheta_{zmin}$  następuje ciągły przepływ prądu będący zwarcie w obwodzie.

Zadanie: Wyprowadź warunek bezpiecznej pracy powyższego falownika.

(Odp:  $2\pi - \vartheta_z - \lambda_T - \delta - \arcsin \epsilon \geq 0$  gdzie  $\delta$  to czas wyłączenia tyrystora)

### Prostownik tyrystorowy dwupulsowy mostkowy.

Najczęściej stosowana konfiguracja prostownika mostkowego (układ Graetza) wykorzystywana jest także w prostownikach sterowanych.



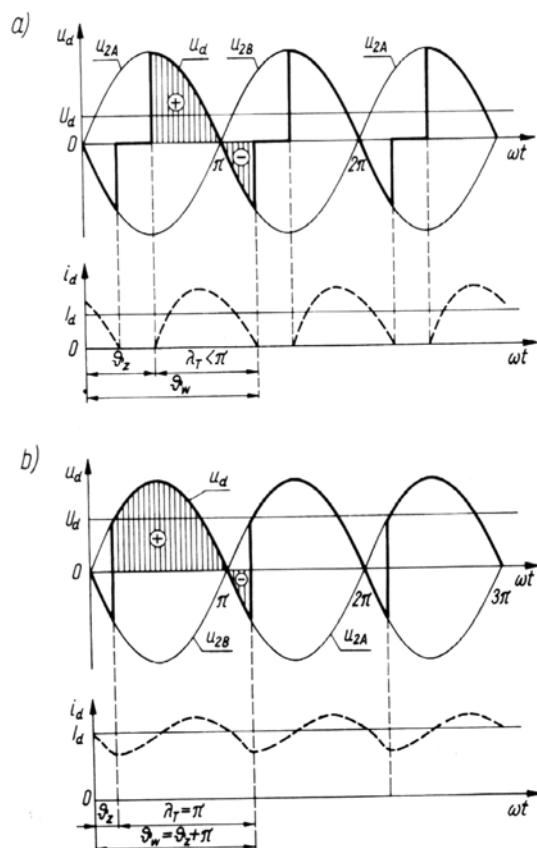
Na przemian przewodzą pary tyrystorów T1, T4 i T2, T3. Prądy przy obciążeniu rezystancyjnym mają zawsze charakter impulsowy.

Wartość średnia napięcia wyprostowanego w układzie dwupulsowym przy odbiorniku rezystancyjnym

$$U_d = \frac{1}{2\pi} 2 \int_0^\pi \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \theta_z)$$

i odpowiednio wartość prądu  $I_d = \frac{U_d}{R}$

Jeśli obciążeniem jest połączenie szeregowo rezystancji  $R$  i indukcyjności  $L$  to jak pokazano na Rys. 7 może wystąpić praca impulsowa jak i ciągła.



Rys. 7. Przebieg czasowe prądów i napięć w prostowniku sterowanym mostkowym dla odbiornika rezystancyjno indukcyjnego przy: a) przewodzeniu impulsowym, b) przewodzeniu ciągłym.

Wartość średnia napięcia wyprostowanego przy przewodzeniu impulsowym

$$U_d = \frac{1}{2\pi} 2 \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_w} \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (\cos \vartheta_z - \cos \vartheta_w)$$

Pytanie: Jak wyznaczyć wartość kąta końca przewodzenia tyrystorów  $\vartheta_w$ ?

Przy zmniejszaniu kąta włączenia czas trwania przewodzenia tyrystorów (prąd odbiornika) wzrasta i poniżej wartości zależnej od stałej czasowej odbiornika płynący prąd ma charakter ciągły (Rys. 7.b).

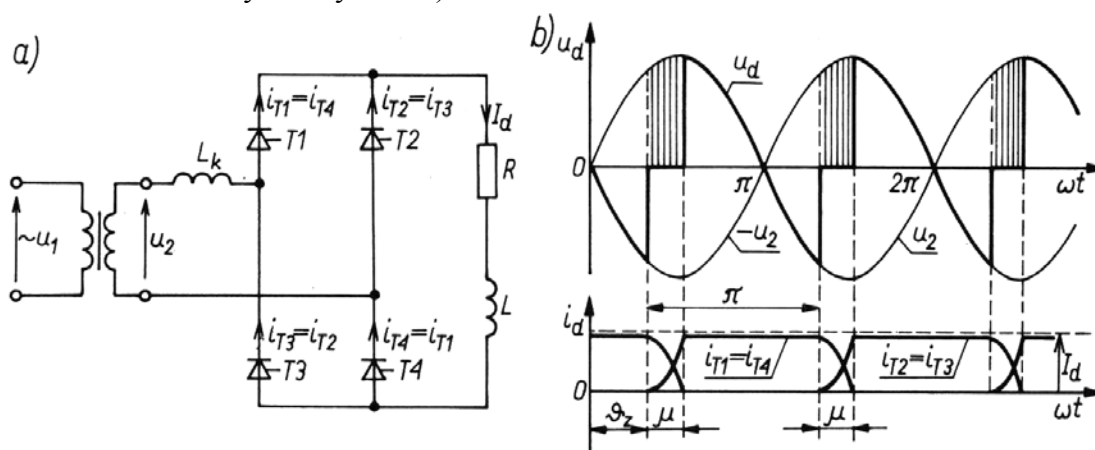
Wartość średnia napięcia wyprostowanego przy przewodzeniu ciągłym

$$U_d = \frac{1}{2\pi} 2 \int_{\vartheta_z}^{\pi+\vartheta_z} \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \vartheta_z$$

Dla przewodzenia ciągłego jak i nieciągłego średni prąd odbiornika ma wartość  $I_d = \frac{U_d}{R}$ .

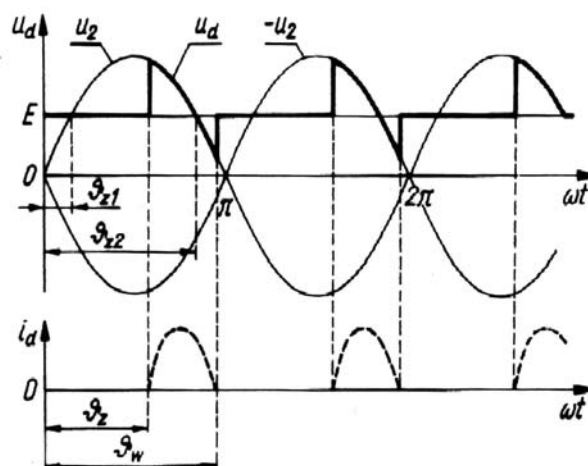
Do pełnego obrazu zjawisk należy dodać efekt komutacji pokazany na Rys. 8 występujący gdy przestaje przewodzić jedna para tyrystorów i jednocześnie zaczyna przewodzić druga. Efektowi zwarcia na zaciskach transformatora zapobiega obecność indukcyjności komutacyjnej  $L_k$ . Składają się na nią m.in. indukcyjności rozproszenia transformatora i linii zasilającej.

*Sterowanie tyrystorowe silników komutatorowych prądu stałego(DC) – układy tyrystorowe jednofazowe*  
Czas komutacji  $\mu$ , choć niezbędny, to jednak wprowadza straty w wyprostowanym napięciu (obszar zakreskowany na Rys. 8 b ).



Rys. 8. Proces komutacji w prostowniku sterowanym mostkowym: a) schemat, b) przebiegi.

Analizę zjawisk z obciążeniem będącym ekwiwalentem silnika prądu stałego czyli składającego się z rezystancji  $R$  indukcyjności  $L$  i siły elektromotorycznej  $E$  rozpoczniemy od przypadku SEM skierowanej przeciwnie do kierunku płynącego prądu ( Rys. 9 ).



Rys. 9. Przebiegi czasowe prądów i napięć w prostowniku sterowanym mostkowym dla odbiornika z połączonych szeregowo rezystancji  $R$  indukcyjności  $L$  i źródła napięcia  $E$  skierowanego przeciwnie do kierunku przepływu prądu przy przewodzeniu impulsowym.

*Pytanie: Jakiemu stanowi pracy silnika odpowiada pokazana wyżej sytuacja?*

Wartość średnia napięcia wyprostowanego przy przewodzeniu impulsowym wyraża się analogicznym wzorem jak dla obciążenia rezystancyjno indukcyjnego.

$$U_d = \frac{1}{2\pi} 2 \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_w} \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (\cos \vartheta_z - \cos \vartheta_w)$$

zaś wartość średnia prądu wynosi

$$I_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_2}{R} [\cos \vartheta_z - \cos \vartheta_w - \varepsilon(\vartheta_w - \vartheta_z)] \quad \text{gdzie } \varepsilon = \frac{E}{\sqrt{2} U_2}$$



Przy przepływie ciągłym średnie napięcie wyjściowe i średni prąd wyjściowy wynoszą

$$U_d = \frac{1}{2\pi} 2 \int_{\vartheta_z}^{\pi+\vartheta_z} \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \vartheta_z \quad \text{i} \quad I_d = \frac{U_d - E}{R}$$

Prostowniki sterowane dwupulsowe mogą także pracować jako falowniki komutowane napięciem linii zasilającej. Typowe obciążenie

