

3 Regulacja impulsowa w sterowaniu silnikiem DC.

Układy sterowania impulsowego wykorzystywane do sterowania silnikami prądu stałego mają za zadanie:

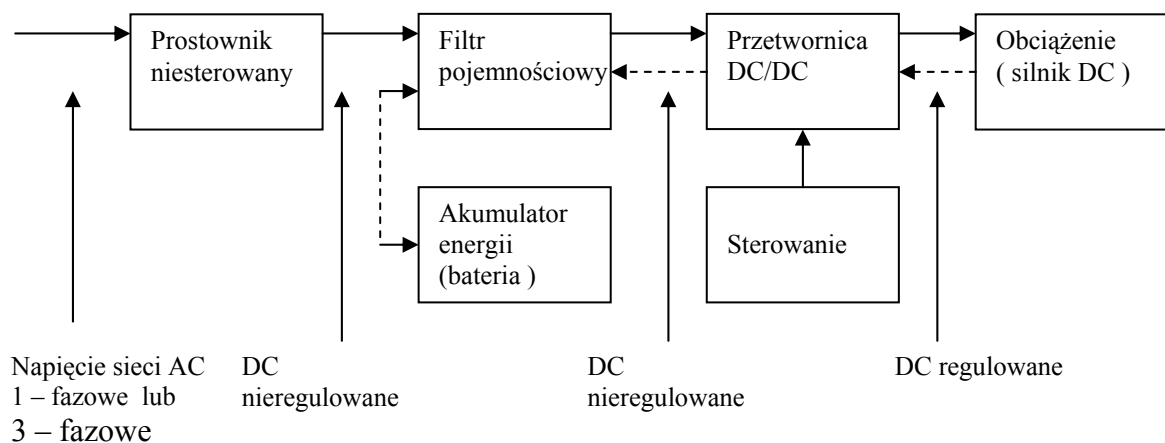
- utrzymanie poziomu napięcia źródła zasilania dostosowanego do silnika,
- dostosowanie typu źródła do odbiornika (napięciowe , prądowe),
- umożliwić zmianę biegunowości,
- umożliwić zmianę kierunku przepływu energii (hamowanie, praca prądnicowa),
- umożliwić regulację obrotów, momentu w szerokich granicach, z odpowiednią dynamiką regulacji.

Ponadto układy impulsowe powinny cechować się:

- niskim poziomem zakłóceń radioelektrycznych (kompatybilność elektromagnetyczna),
- dużą sprawnością energetyczną.

Układami elektronicznymi realizującymi te zadania przy zasilaniu ze źródła napięcia stałego są przetwornice DC/DC, nazywane też w energoelektronice przekształtnikami DC/DC.

Przetwornice DC/DC są to coraz częściej prostowniki sterowane lub układy z korektą współczynnika mocy. Układy tego typu można pokazać blokowo :



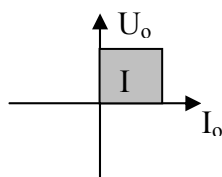
Rys 3.1 Układ impulsowy do sterowania silników prądu stałego.

Na schemacie blokowym zaznaczono linią przerywaną przepływ energii do akumulatora przy pracy prądnicowej, hamowaniu. Brak elementu magazynującego energię

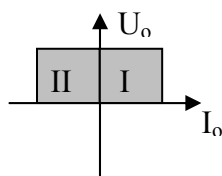
zastępuje się: rozproszeniem na ciepło w rezystorach przy hamowaniu lub wprowadzeniem prostownika sterowanego. Powinien on posiadać możliwość pracy prostownikowo/falownikowej.

Ze względu na współpracę układu sterującego z silnikiem (nazywanym dalej obciążeniem) wyróżniamy cztery podstawowe typy przekształtników DC/DC :

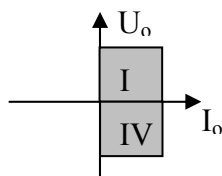
- jednokwadrantowy,



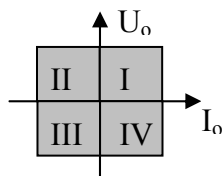
- dwukwadrantowy 1,



- dwukwadrantowy 2,



- czterokwadrantowy.



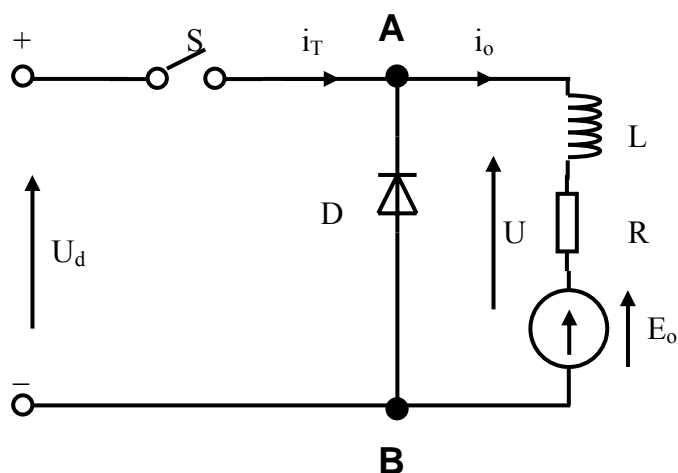
Do realizacji wymienionych przekształtników energii stosuje się wiele układów przetwornic DC/DC. Omówione będą podstawowe typy wykorzystujące modulację szerokości impulsów (MSI):

-
- przetwornice obniżające napięcie,
 - przetwornice podwyższające napięcie,
 - przetwornice obniżająco/podwyższające napięcie,
 - przetwornice dwukwadrantowe,
 - przetwornice czterokwadrantowe (mostkowe).

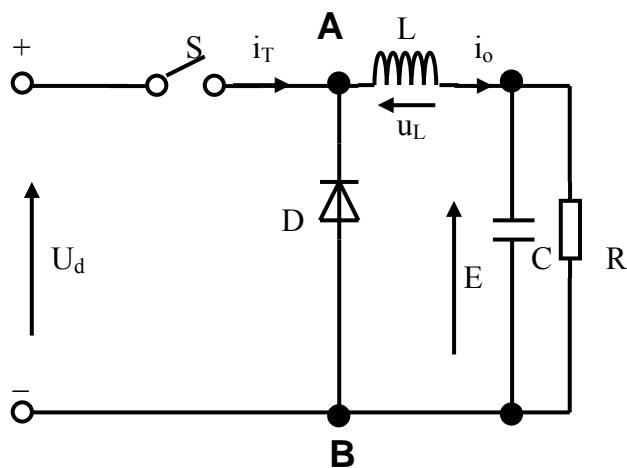
3.1 Przetwornica obniżająca napięcie (ang. step – down, buck converter).

Przetwornica pokazana na rys 3.2 daje na wyjściu napięcie jednokierunkowe o regulowanej wartości średniej, mniejszej lub równej napięciu wejściowemu.

a)



b)



Rys 3.2. Przetwornica obniżająca napięcie:

- a) Schemat układu przy obciążeniu R, L, E ,
- b) Schemat układu przy obciążeniu filtrem L, R, C .

Napięcie jest przyłączane do układu za pomocą cyklicznie włączanego i wyłączanego klucza np. tranzystora. Regulacja polega na zmianie stosunku czasu włączenia t_{on} i wyłączenia. t_{off} .
Zatem możliwe są trzy sposoby regulacji napięcia (prądu) za pomocą metody modulacji szerokości impulsów (pol. MSI, ang. PWM – pulse width modulation):

- utrzymanie stałego czasu t_{on} i zmiana t_{off} , daje to zmiany częstotliwości przełączania $f_s(T_s)$,
- utrzymanie stałego czasu t_{off} i zmiana t_{on} , daje to również zmiany częstotliwości przełączania $f_s(T_s)$,
- stała częstotliwość przełączania $f_s(T_s)$, a zmiana współczynnika wypełnienia impulsów

$$D = \frac{t_{on}}{T_s}.$$

W opisywanych układach stosowana będzie modulacja szerokości impulsów przy stałej częstotliwości przełączania f_s . Do działania układu zarówno przy obciążeniu silnikiem prądu stałego rys 3.2a), jak i filtrem indukcyjno - pojemnościowym rys 3.2b) potrzebna jest dioda D ze względu na indukcyjność L, dla utrzymania ciągłości prądu.

Analiza dla układu z rys 3.2b) - przebiegi przedstawione zostały na rys 3.3. Zakładamy, że pojemność jest na tyle duża, że do pominięcia są tętnienia prądu wywołane zmianami wartości prądu i_o . Przyjmujemy, że klucz i dioda są elementami idealnymi.

Załączenie klucza S powoduje pojawienie się między punktami AB napięcia zasilania U_d . Dioda D jest spolaryzowana zaporowo. Na indukcyjności pojawia się napięcie $U_L = U_d - E_o$ i prąd na niej liniowo narasta. Kiedy klucz S wyłączymy, prąd i_o płynie nadal podtrzymywany energią zgromadzoną w indukcyjności L, przez diodę D. Zakładamy brak spadku napięcia na diodzie. Napięcie na indukcyjności $u_L = -E_o$.

W stanie ustalonym przebiegi są takie same co okres – prąd po okresie powraca do tej samej wartości. Tak więc całka napięcia na indukcyjności w okresie musi być zerem:

$$\int_0^{T_s} u_L dt = \int_0^{t_{on}} u_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} u_L dt = 0 \quad \text{w 3-1}$$

Czyli pola A(+) i B(-) muszą być równe co prowadzi do :

$$(U_d - E_o)t_{on} - E_o(T_s - t_{on}) = 0 \quad \text{w 3-2}$$

po przekształceniu,

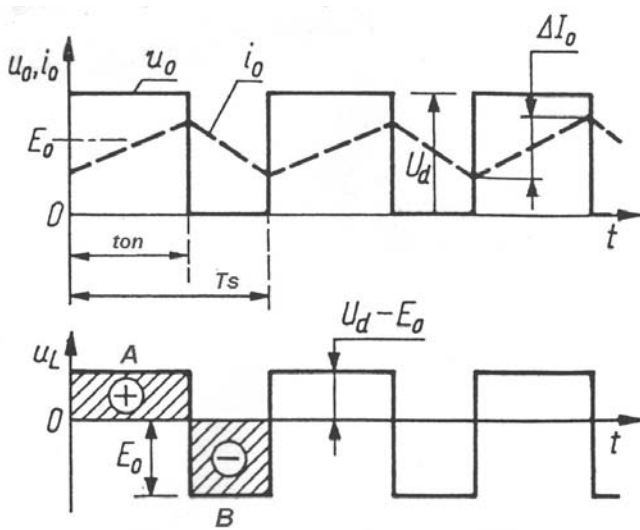
$$\frac{E_o}{U_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D - \text{współczynnik wypełnienia} \quad \text{w 3-3}$$

Zakładając brak strat, moc na wyjściu P_o jest identyczna jak na wejściu P_d , czyli

$$U_d I_d = E_o I_o \quad \text{w3-4}$$

gdzie:

- I_o, I_d wartości średnie prądów i_o, i_d .



Rys 3.3 Uproszczone przebiegi czasowe napięć i prądów przekształtnika przy pominięciu rezystancji odbiornika.

Dla obciążenia typu R,L,E (np. silnik DC) z rys 3.2a) przebiegi pokazano na rys 3.4 przy założeniu ciągłości prądu. Przyjmując upraszczające założenia, że wartość średnia I_o jest o wiele większa od tętnień i_o to wyrażenie na równość pól A(+) i B(-) (z zera całki w okresie) przyjmuje postać:

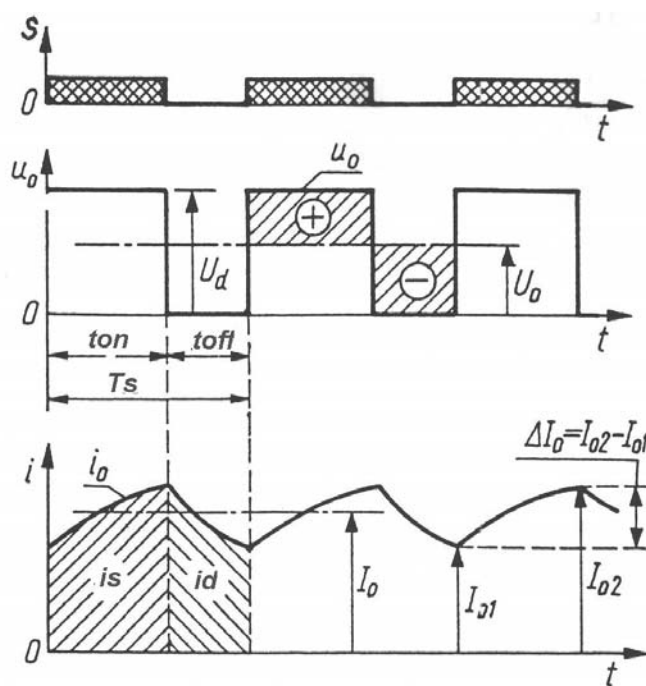
$$(U_d - E_o - RI_o)t_{on} = (E_o + RI_o)(T_S - t_{on})$$

w 3-5

po przekształceniach:

$$U_d \frac{t_{on}}{T_S} = E_o + I_o R$$

w 3-6



Rys 3.4. Przebiegi czasowe sygnału sterującego S oraz napięć i prądów przekształtnika.

Wartości maksymalne i minimalne prądu można określić z wzorów:

$$I_{o1} = \frac{U_d}{R} \cdot \frac{e^{\frac{t_{on}}{\tau}} - 1}{e^{\frac{T}{\tau}} - 1} - \frac{E_o}{R}$$

w 3-7

$$I_{o2} = \frac{U_d}{R} \cdot \frac{1 - e^{\frac{-t_{on}}{\tau}}}{1 - e^{\frac{-T}{\tau}}} - \frac{E_o}{R} \quad \text{w 3-8}$$

gdzie :

- $\tau = \frac{L}{R}$ - stała czasowa odbiornika.

Przyjmując założenie, że $\tau > T$ i w związku z tym liniowy kształt prądów w dławiku, obliczamy tętnienia prądu w obciążeniu :

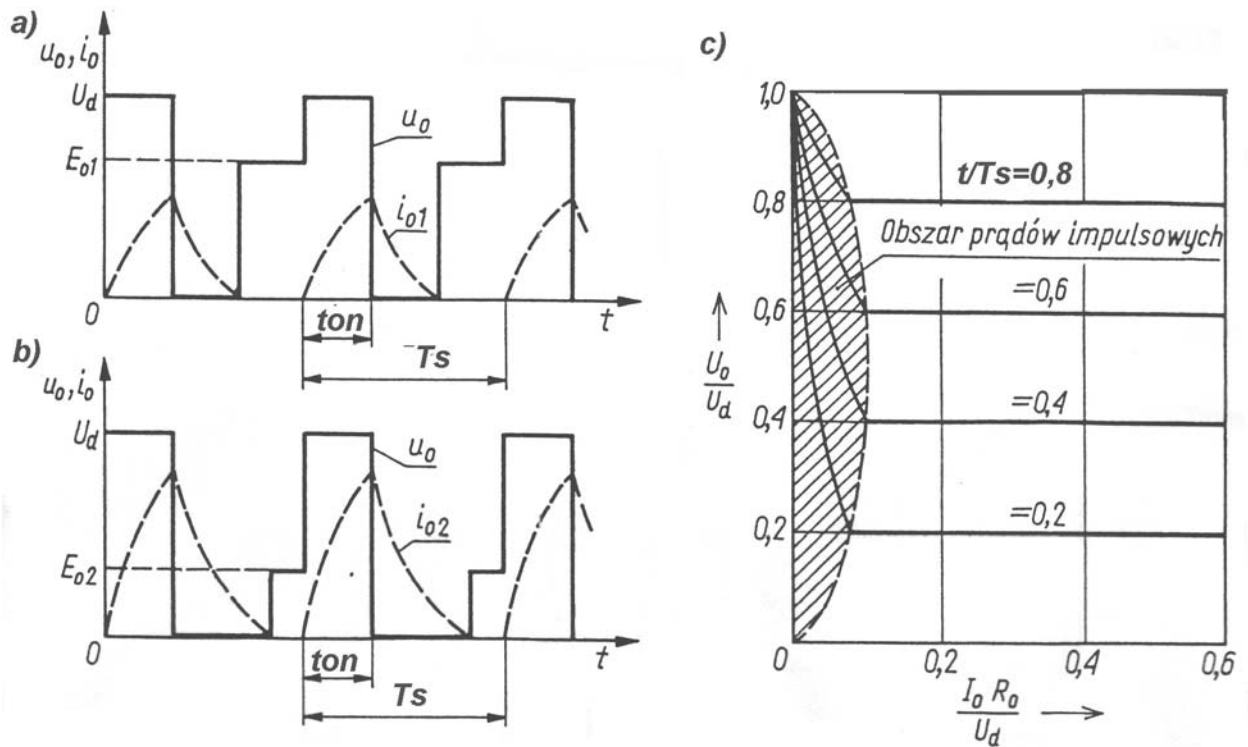
$$\Delta i_o = \frac{u_l \cdot t_{on}}{L} = \frac{(U_d - E_o - I_o R)t_{on}}{L} \quad \text{w 3-9}$$

po podstawieniu: $E_o = U_d \frac{t_{on}}{T_s} - I_o R$

$$\Delta i_o = \frac{U_d \cdot t_{on} \cdot t_{off}}{L T_s} = \frac{U_d \cdot T_s}{L} D(1 - D) \quad \text{w 3-10}$$

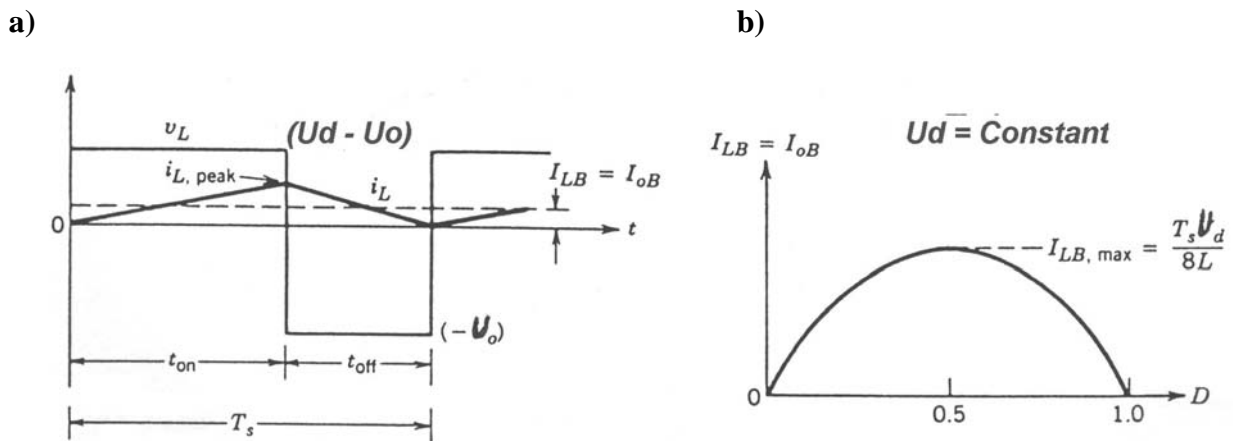
Tętnienie prądu osiąga maksimum przy $D=0,5$. Zmniejszenie tętnień wymaga, jak wynika z powyższego wzoru zwiększenia częstotliwości f_s lub indukcyjności L .

Przy obniżaniu prądu obciążenia, prąd ten może mieć charakter nieciągły, jak pokazano na rys 3.5. Dla obciążenia typu R,L,E napięcie wyjściowe jest większe od wyliczonych z powyższych wzorów.



Rys 3.5 Przebiegi czasowe napięć i prądów przy impulsowym prądzie odbiornika (a i b), c) charakterystyka obciążenia przekształtnika obniżającego napięcie.

Określmy granicę prądu impulsowego i ciągłego. Przyjmijmy założenie $\tau \gg T$. Przebiegi w układzie z rys 3.2b) przy prądzie granicznym pokazano na rys 3.6a). Na rys 3.6b) ukazano zależność prądu granicznego od wsp. wypełnienia D .



Rys 3.6 Prąd na granicy ciągłości: a) Przebieg prądu, b) Zależność prądu granicznego I_{LB} od wypełnienia D .

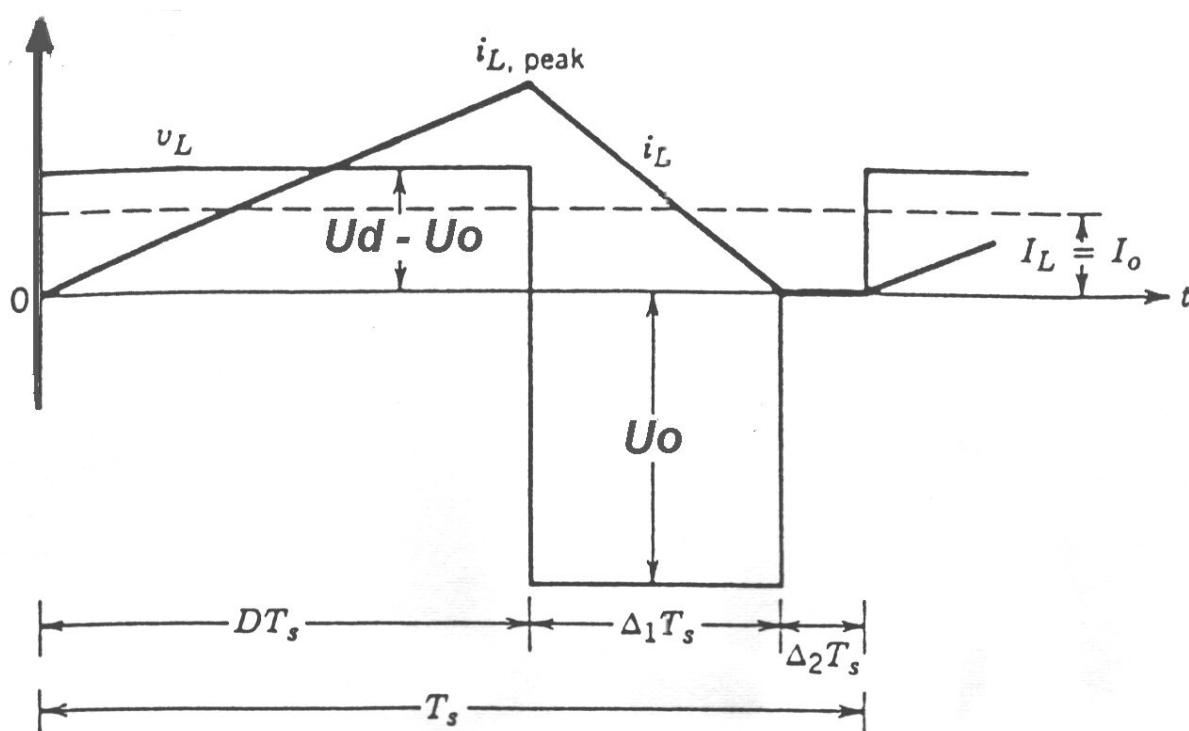
Przy prądzie granicznym I_{LB} wartość średnia wynosi:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,peak} \quad \text{w 3-11}$$

wyprowadzając analogicznie jak pokazano wyżej, otrzymujemy:

$$I_{LB} = \frac{U_d T_s}{2L} D(1-D) \quad \text{w 3-12}$$

Interesuje nas określenie charakterystyki napięcia wyjściowego U_o przy nieciągłym przepływie prądu pokazanym na rys 3.7.



Rys.3.7. Przebiegi napięcia i prądu dławika przy nieciągłym przepływie prądu.

Pokazano, że prąd graniczny obciążenia średni wynosi:

$$I_{LB} = \frac{U_d \cdot T_s}{2L} D(1-D) \quad \text{w 3-13}$$

i osiąga maksimum dla $D=0,5$

Oznaczając:

$$I_{LB,max} = \frac{U_d \cdot T_s}{8L} \quad \text{w 3-14}$$

można zapisać:

$$I_{LB} = 4I_{LB,max}D(1-D) \quad \text{w 3-15}$$

W czasie $\Delta_2 T_s$ prąd w indukcyjności i_o nie płynie. Napięcie na indukcyjności L jest równe zeru. Z całkowania napięcia w okresie (stan ustalony w układzie) wynika:

$$(U_d - U_o)DT_s + (-U_o)\Delta_1 T_s = 0 \quad \text{w 3-16}$$

$$\frac{U_o}{U_d} = \frac{D}{D + \Delta_1} \quad \text{w 3-17}$$

$$i_{L,peak} = \frac{U_o}{L} \Delta_1 T_s \quad \text{w 3-18}$$

Prąd obciążenia średni $I_o = i_{L,peak} \frac{D + \Delta_1}{2}$ (pole trójkąta prądu uśrednione w okresie)

po podstawieniu:

$$I_o = \frac{U_o \cdot T_s}{2L} (D + \Delta_1) \Delta_1 \quad \text{w 3-19}$$

podstawiamy U_o z w 3-17

$$I_o = \frac{U_d \cdot T_s}{2 * L} D \Delta_1 \quad \text{w 3-20}$$

podstawiamy U_d z w 3-14:

$$I_o = 4I_{LB,max} D \Delta_1 \quad \text{w 3-21}$$

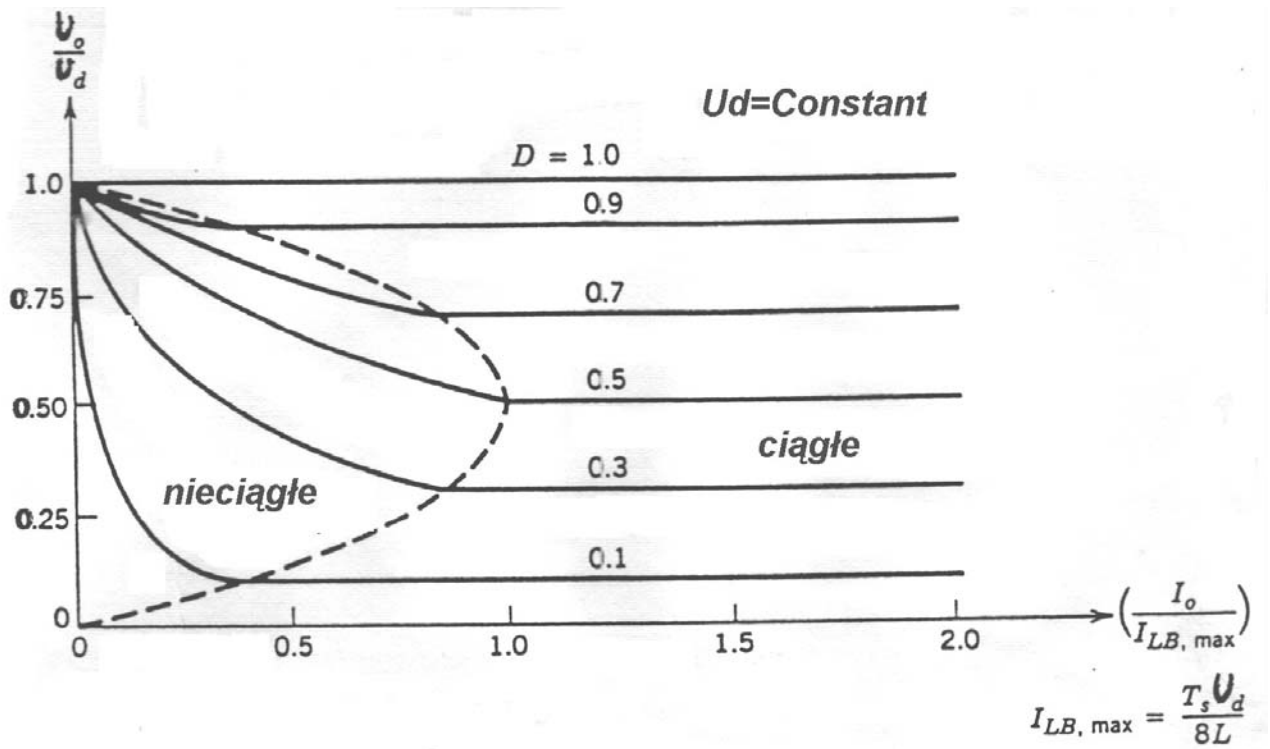
czyli

$$\Delta_1 = \frac{I_o}{4I_{LB,max}D} \quad \text{w 3-22}$$

podstawiając to do w 3-17 otrzymujemy

$$\frac{U_o}{U_d} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{I_o}{I_{LB,max}} \right)} \quad \text{w 3-23}$$

i przykładowe bezwymiarowe charakterystyki zamieszczono na rys.3.8.



Rys 3.8. Charakterystyki wyjściowe $U_o = f(I_o)$ przy $D = \text{param.}$ przetwornicy obniżającej napięcie

Określmy charakterystykę sterowania przetwornicą, aby otrzymać stałe napięcie wyjściowe ($D = f(I_o), U_o = \text{const}$),

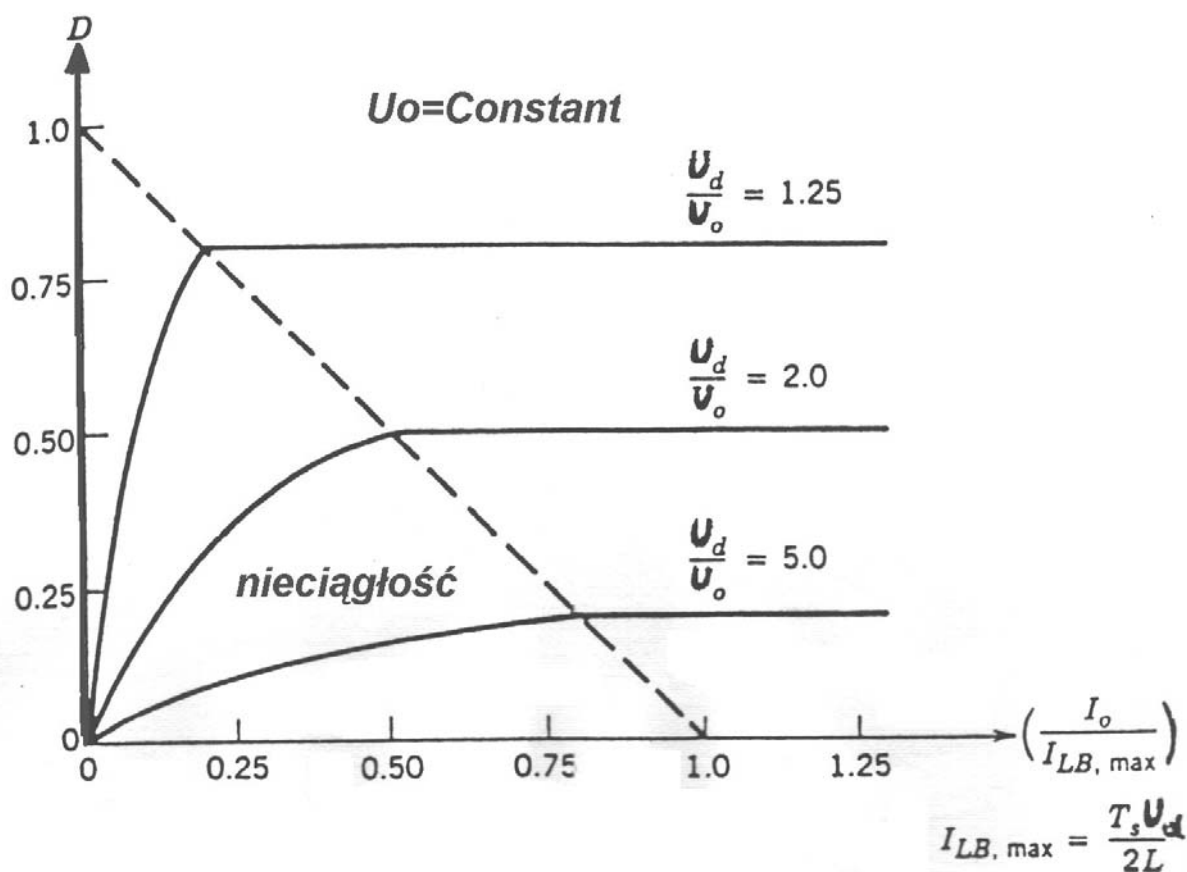
Wiemy, że wartość średnia prądu na granicy przewodzenia ciągłego i nieciągłego

$$I_{LB} = \frac{T_s \cdot U_d}{2L} D(1-D) \text{ po podstawieniu } I_{LB} = \frac{T_s \cdot U_o}{2L} (1-D) \text{ a } I_{LB,max} = \frac{T_s \cdot U_d}{8L} \text{ (dla } D=0,5).$$

Inaczej $I_{LB} = 4D(1-D)I_{LB,max}$ (w 3-15) (przerywana linia na wykresie) z przekształcenia wzoru w 3-23 wynika:

$$D = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\frac{U_o}{U_d} \cdot \frac{I_o}{I_{LB,max}}}{1 - \frac{U_o}{U_d}}} \quad \text{w 3-24}$$

granica stosowania wzoru wynika z wzoru 3-15.



Rys 3.9. Charakterystyka sterowania przetwornicy obniżającej napięcie $D = f(I_o)$, $U_o = const$.

3.1.1 Dwustanowa regulacja napięcia.

Przetwornicę obniżającą napięcie można też zrealizować w układzie przekształtnika z dwustanową regulacją prądu. Dwustanową regulację prądu, realizuje się za pomocą układu automatycznej regulacji, którego podstawowym członem jest komparator z histerezą rys.3.10. W układzie tym stany przewodzenia i blokowania zaworu sterowanego zależą od chwilowej wartości prądu odbiornika i_o mierzonej za pomocą czujnika prądu PP.

Wielkością zadaną jest wartość średnia prądu odbiornika I_{oz} . Różnica między wartością zadaną I_{oz} a wartością chwilową prądu i_o decyduje o stanie pracy zaworu sterowanego. Strefie histerezy komparatora odpowiada wartość tętnienia prądu $\Delta I_o = I_{o2} - I_{o1}$. Przy małych stałych czasowych $\frac{L}{R}$ odbiornika oraz przy niewielkich wartościach ΔI_o można przyjąć, że przebieg czasowy prądu i_o w poszczególnych przedziałach czasu zmienia się liniowo. Przy takim uproszczeniu czasy: przewodzenia t_{on} i wyłączenia t_{off} są określone zależnościami :

$$t_{on} = \frac{\Delta I_o \cdot L_o}{U_d - E_o - \left(I_{oz} - \frac{\Delta I_o}{2} \right) R_o} \quad \text{w 3-25}$$

$$t_{off} = \frac{\Delta I_o \cdot L_o}{E_o + \left(I_{oz} + \frac{\Delta I_o}{2} \right) R_o} \quad \text{w 3-26}$$

Korzystając z zależności na czasy: przewodzenia t_{on} i wyłączenia t_{off} można wyznaczyć maksymalną częstotliwość zaworu sterowanego.

$$f = \frac{\left(1 - \frac{U_o}{U_d} \right) \left(\frac{U_o}{U_d} \right)}{\Delta I_o \frac{L_o}{U_d}} \quad \text{w 3-27}$$

3.2 Przetwornica podwyższająca napięcie (ang. step – up (boot) converter).

Przetwornica podwyższająca napięcie stosowana jest w przypadku przekazywania energii elektrycznej ze źródła o niskim napięciu stałym do odbiornika wymagającego wyższego napięcia (rysunek 3.11).

W sterowaniu silników DC wykorzystujemy przetwornicę podwyższającą napięcie do hamowania z odzyskiwaniem energii (rys.3.12). Analizą działania pokażemy na przykładzie z rysunku 3.11.

Po włączeniu klucza S, prąd dławika i_L zwiększa się pod wpływem napięcia zasilania U_d . Dioda D jest spolaryzowana zaporowo. Po wyłączeniu klucza S prąd w dławiku i_L płynie nadal przekazując nagromadzoną energię przez diodę D do odbiornika C,R. W czasie przewodzenia diody D prąd dławika i_L zmniejsza się pod wpływem napięcia $U_o - U_d$. Zakładając stan ustalony i ciągły przepływ prądu w dławiku całka napięcia na dławiku w okresie musi być równa zero. Wynika z tego:

$$U_d t_{on} + (U_d - U_o) t_{off} = 0 \quad \text{w 3-28}$$

po przekształceniu:

$$\frac{U_o}{U_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D} \quad \text{w 3-29}$$

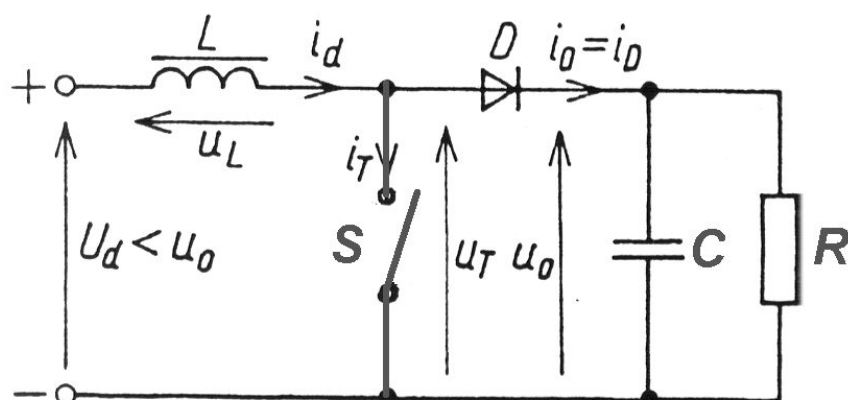
Zakładając, że układ nie wprowadza strat :

$$P_d = P_o \text{ czyli } U_d I_d = U_o I_o \quad \text{w 3-30}$$

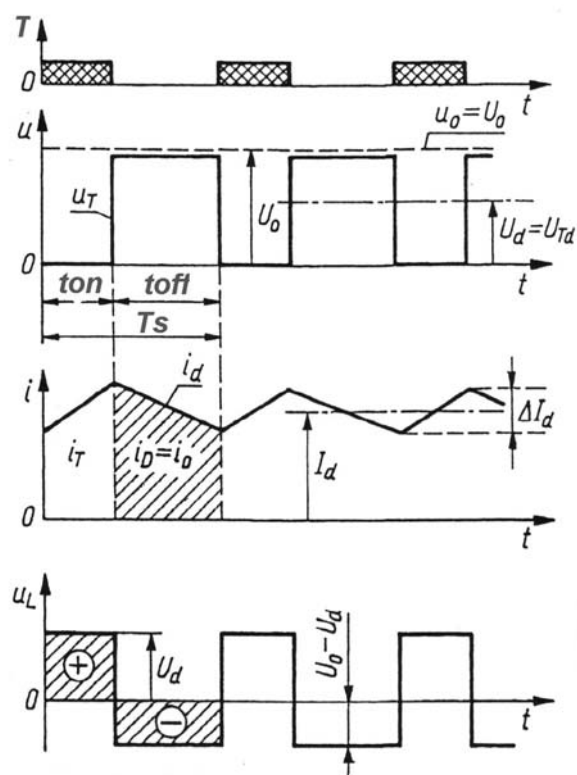
otrzymujemy:

$$\frac{I_o}{I_d} = (1 - D) \quad \text{w 3-31}$$

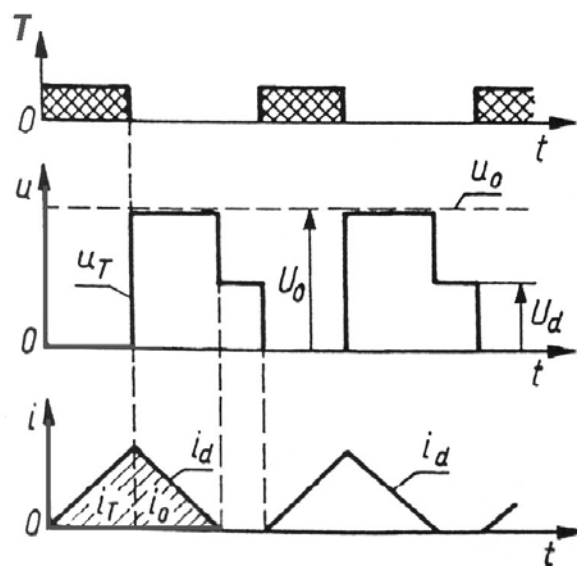
a)



b)



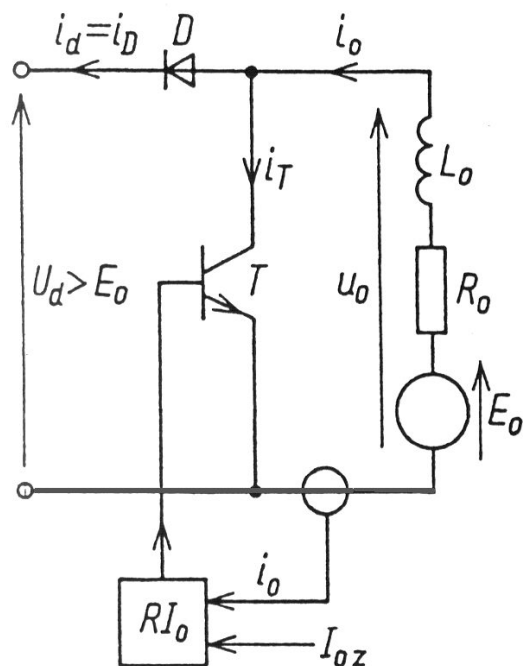
c)



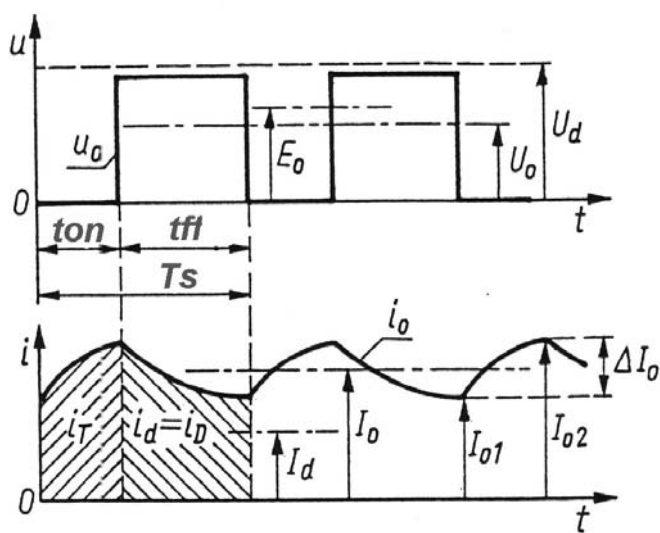
Rys.3.11. Przekształtnik prądu stałego podwyższający napięcie:

a) schemat układu; b) stany przewodzenia zaworu sterowanego oraz przebiegi czasowe napięć i prądów przy ciągłym prądzie i_d ; c) stany przewodzenia zaworu sterowanego oraz przebiegi czasowe napięć i prądów przy impulsowym prądzie i_d

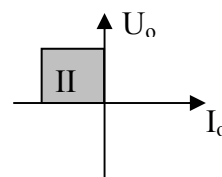
a)



b)

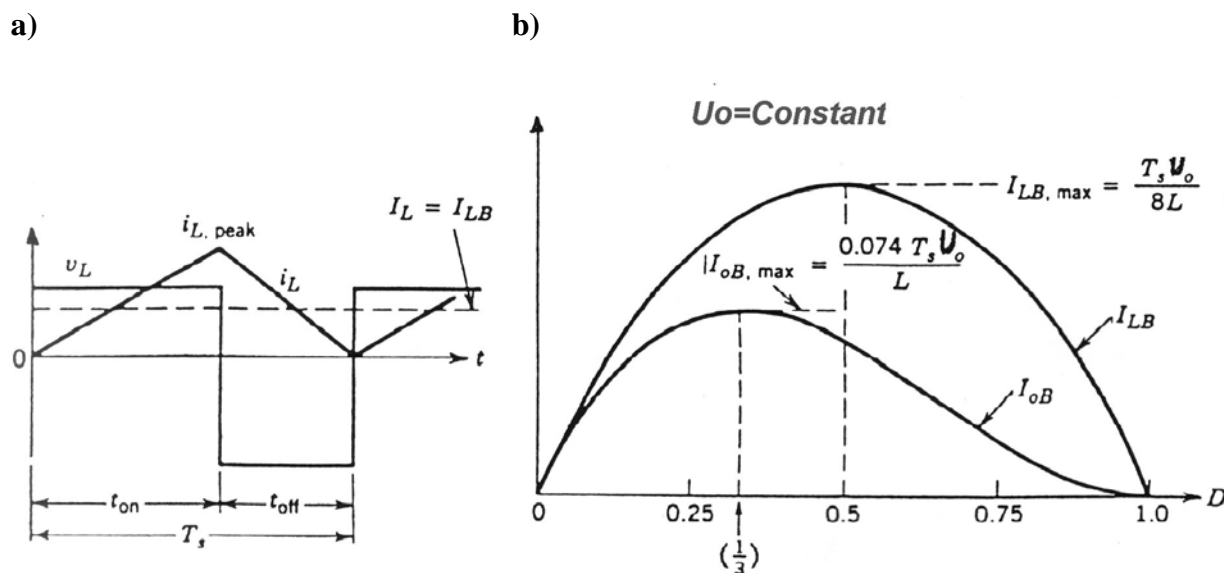


c)



Rys.3.12. Przetwornica podwyższająca napięcie:
 a) schemat układu; b) przebiegi czasowe napięcia i prądów ; c) obszar charakterystyk napięciowo prądowych

Na rys 3.11c) pokazano przebiegi prądu i napięcia w układzie przy nieciągłym prądzie w dławiku. Określmy wartość graniczną prądu obciążenia pomiędzy ciągłym a nieciągłym prądzie w dławiku. Przebiegi elektryczne w takiej sytuacji pokazano na rys 3.13.



Rys 3.13. Przekształtnik prądu stałego podwyższający napięcie – granica między ciągłością /nieciągłością prądu.

Wartość średnia prądu w dławiku :

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L, peak} = \frac{1}{2} \frac{U_d}{L} t_{on} = \frac{T_s \cdot U_o}{2L} D(1-D) \quad \text{w 3-32}$$

Skorygowana do wartości średniej prądu wyjściowego:

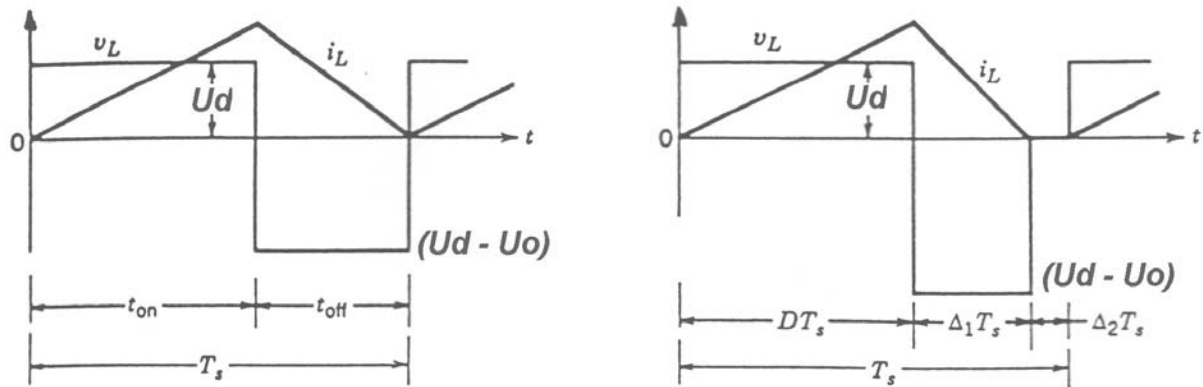
$$I_{oB} = \frac{T_s \cdot U_o}{2L} D(1-D)^2 \quad \text{w 3-33}$$

Zależność obu prądów granicznych od D pokazano na rys 3.13.

$$I_{LB} = 4D(1-D)I_{LB, max} \quad \text{w 3-34}$$

$$I_{oB} = \frac{27}{4} D(1-D^2)I_{oB, max} \quad \text{w 3-35}$$

Interesuje nas zachowanie układu, przy nieciągłym przepływie prądu w dławiku, a zwłaszcza zależność napięcia wyjściowego U_o od zmian obciążenia przy D , jako stałym parametrze. Odpowiada to np. sytuacji przetwornicy bez sprzężenia zwrotnego (o ustalonej wartości D). Na rys 3.14 przedstawiono przebiegi napięć prądu dławika przy prądzie granicznym i niższym od granicznego. Zakładamy układ bez strat $P_d = P_o$. Przy nieciągłym prądzie i_L w chwili włączenia do napięcia U_d przez czas DT_s , prąd na indukcyjności L narosnie do wartości $i_{L,peak}$ niezależnie od obciążenia (oczywiście poniżej obciążenia granicznego).



a)

b)

Rys.3.14. Przebiegi napięcia i prądu w indukcyjności:

- a) na granicy nieciągłego prądu w indukcyjności,
- b) dla nieciągłego przepływu prądu w dławiku.

Z całki napięcia indukcyjności w okresie :

$$U_d T_s D + (U_d - U_o) \Delta_1 T_s = 0 \quad \text{w 3-36}$$

z tego:

$$\frac{U_o}{U_d} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1} \quad \text{w 3-37}$$

lub inaczej:

$$U_o = U_d + \frac{D * U_d}{\Delta_1} \quad \text{w 3-38}$$

ponieważ $P_d = P_o$

tak więc:

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \quad \text{w 3-39}$$

Obliczamy wartość średnią prądu w indukcyjności (suma pól trójkątów).

$$I_d = \frac{1}{2} i_{L,peak} (D + \Delta_1) = \frac{U_d}{2L} DT_s (D + \Delta_1) \quad \text{w 3-40}$$

ale

$$I_d = I_o \frac{D + \Delta_1}{\Delta_1} \quad \text{w 3-41}$$

z przyrównania obu równań otrzymujemy czas rozładowania energii:

$$\frac{1}{\Delta_i} = \frac{U_d DT_s}{2LI_o} \quad \text{w 3-42}$$

podstawiając do w 3-38

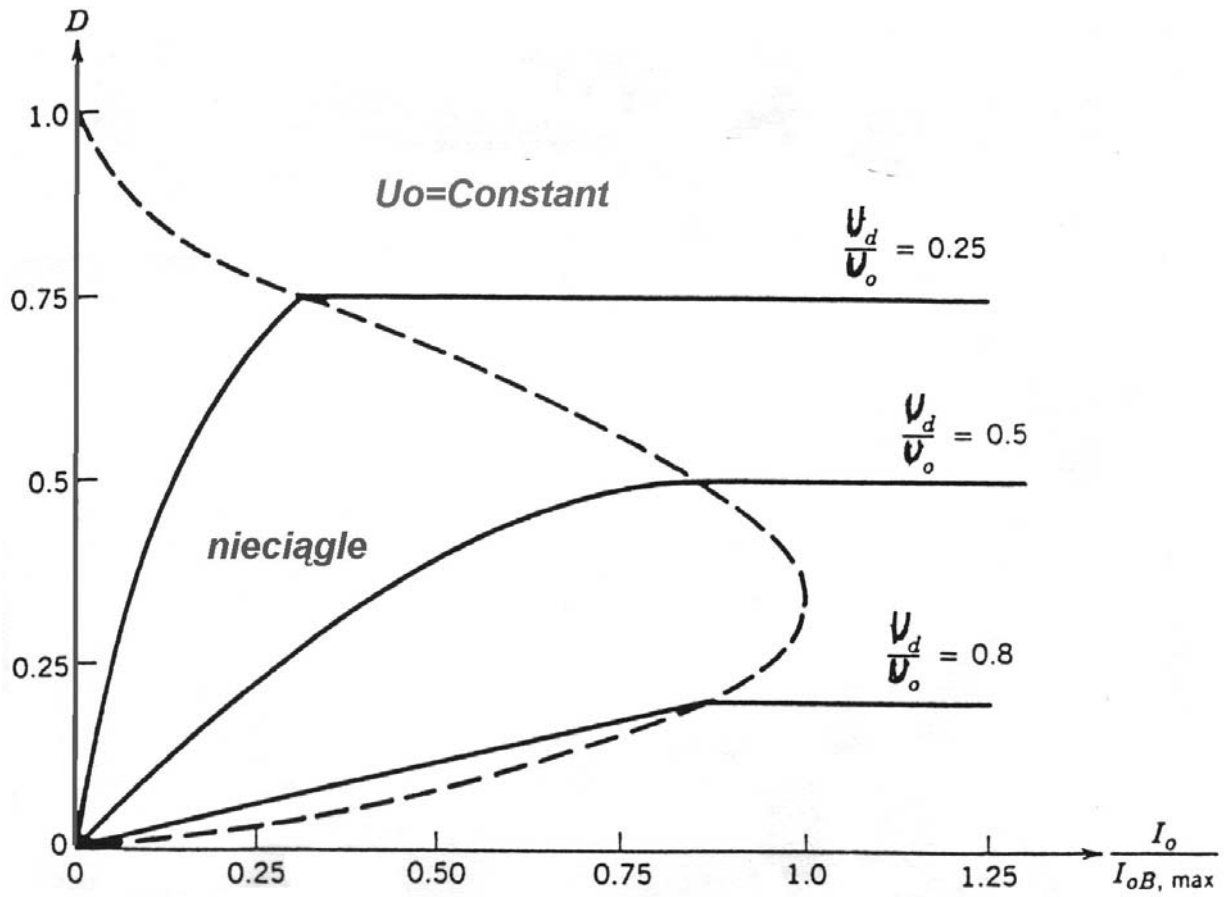
$$U_o = U_d + \frac{U_d^2 D^2 T_s}{2LI_o} \quad \text{w 3-43}$$

Niebezpieczny wzrost napięcia wyjściowego przy obniżaniu obciążenia może prowadzić do uszkodzenia elementów.

Przetwornice posiadające układ sprzężenia zwrotnego, regulują wartość D przy obniżaniu się prądu wyjściowego I_o poniżej prądu granicznego I_{oB} . Określmy charakterystykę regulacyjną $D = f(I_o)$ dla uzyskania stałego napięcia wyjściowego z przekształcenia wzoru w 3-38 mamy:

$$D = \sqrt{\frac{2LI_o}{T_s U_d^2} (U_o - U_d)} \quad \text{w 3-44}$$

Na rys 3.15 pokazano charakterystykę regulacyjną dla przetwornicy dla $U_o = const$.



Rys 3.15 Charakterystyka przetwornicy podwyższającej napięcie w zależności od obciążenia przy $U_o = const$.

3.3 Przetwornica dwukwadrantowa i czterokwadrantowa (mostkowe).

Silniki prądu stałego są przykładem odbiornika aktywnego, czyli zawierającego źródło zdolne do oddawania energii. Układy przekształtników powinny umożliwić sterowanie przekazywaniem energii w obu kierunkach pomiędzy źródłem zasilania i odbiornikiem. Praca w tym trybie powinna się odbywać bez dokonywania jakichkolwiek zmian połączeń w obwodzie głównym przekształtnika energii (przetwornicy prądu stałego). Źródło zasilania musi być zdolne do przejmowania energii.

Uwzględniając biegunowość i kierunek przekazywania energii możemy wyróżnić przetwornice:

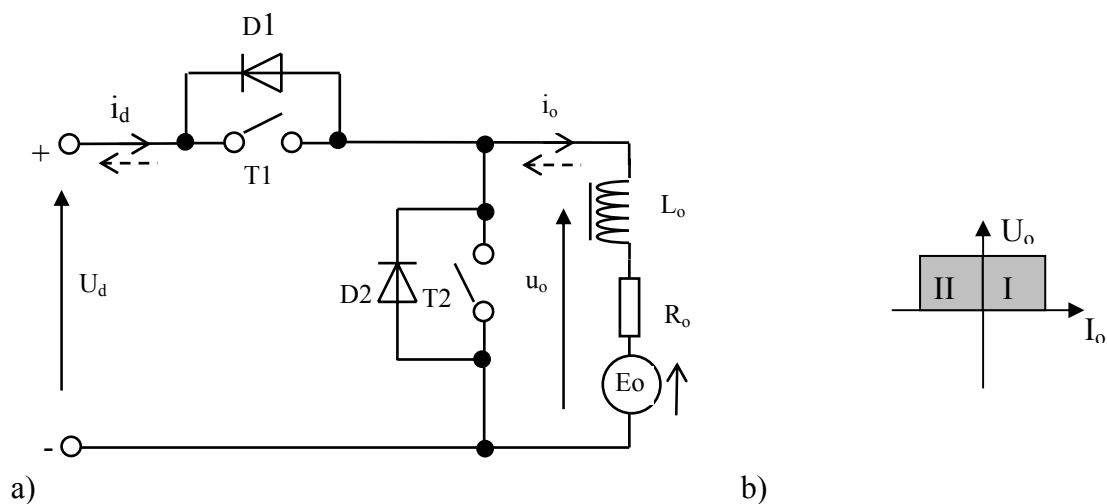
- umożliwiające zmianę kierunku prądu odbiornika przy zachowaniu stałej polaryzacji napięcia, co odpowiada pracy w pierwszym i drugim kwadrancie płaszczyzny (I_o, U_o) - (rys. 3.20),
- umożliwiające zmianę znaku napięcia przy nie zmieniającym się kierunku prądu odbiornika. Odpowiada to pracy w pierwszym i czwartym kwadrancie półpłaszczyzny (I_o, U_o) - (rys. 3.21),
- umożliwiające zmianę kierunku zarówno prądu jak i napięcia, czyli układy pracujące w czterech kwadrantach półpłaszczyzny (I_o, U_o) - (rys. 3.22.)

Układ pokazany na rysunku 3.20, konstrukcyjnie zbliżony jest do przetwornicy obniżająco – podwyższającej napięcie.

Gdy pracuje w trybie PWM klucz T1 to wraz z diodą D2 i indukcyjnością uzwojenia L_o stanowią przetwornicą obniżającą napięcie. Odpowiada to pracy w pierwszym kwadrancie. Operując współczynnikiem wypełnienia (PWM) możemy regulować prąd silnika. Klucz T2 jest rozwarty.

Kiedy pracuje w trybie PWM klucz T2 to wraz z diodą D1 i indukcyjnością silnika L_o tworzą przetwornicę podwyższającą napięcie. Energia pobierana jest z rozrządzonego silnika i oddawana do źródła zasilania. Tranzystor T1 jest w tym czasie rozwarty.

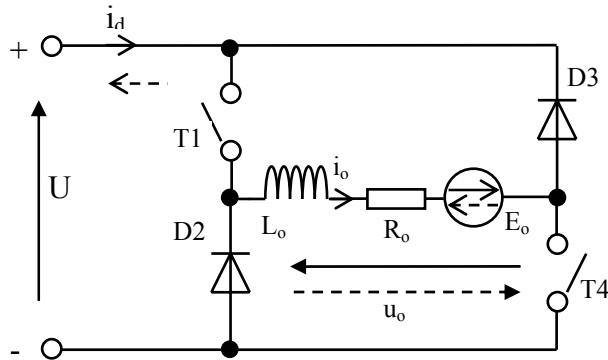
Gdy indukcyjność silnika jest zbyt mała, aby zapewnić wymagany poziom tętnień dodaje się indukcyjność zewnętrzną.



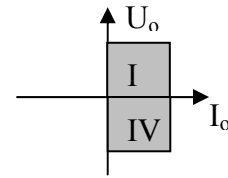
Rys.3.20. Przekształtnik dwukwadrantowy umożliwiający zmianę kierunku prądu odbiornika ($U_d > U_o; U_o = 0 \div U_d$): a) schemat układu; b) obszar charakterystyk zewnętrznych.

Układ przetwornicy dwukwadrantowej pokazany na rys.3.21 umożliwia zmianę znaku napięcia odbiornika przy stałym kierunku przepływającego prądu. W układzie możliwe są dwa tryby pracy zależne od sposobów sterowania kluczy T.

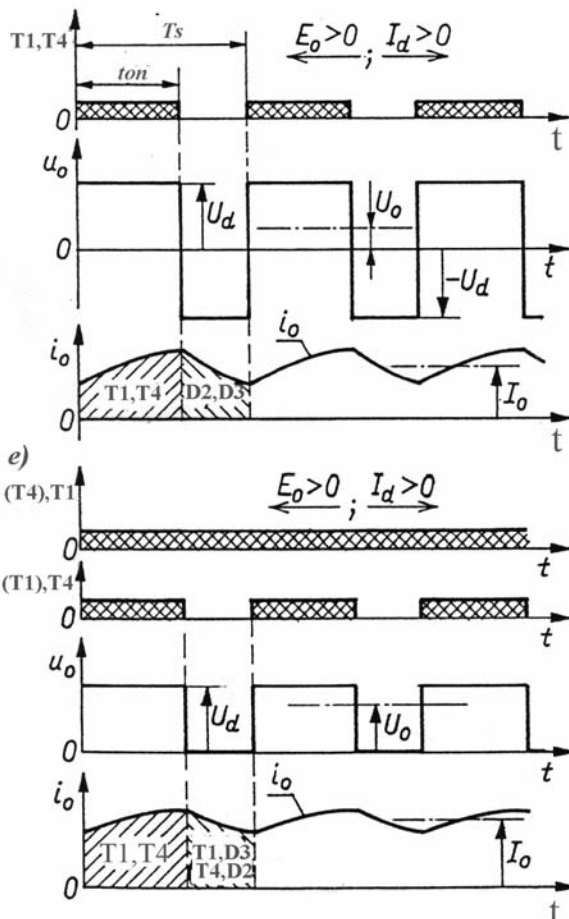
a)



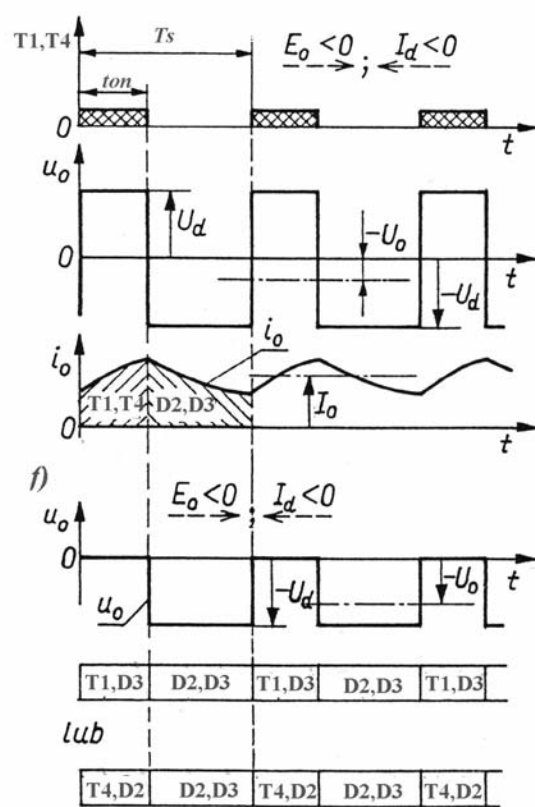
b)



c)



d)



Rys.3.21. Przekształtnik dwukwadrantowy umożliwiający zmianą znaku napięcia odbiornika

($U_o = -U_d \div 0 \div +U_d$; $U_d > U_o$; $I_o > 0$):

a) schemat układu ; b) obszar charakterystyk zewnętrznych; c) przebiegi czasowe napięcia i prądu ilustrujące sterowanie symetryczne przekształtnika przy pracy silnikowej i prądnicowej (d) maszyny prądu stałego; e) przebiegi czasowe napięcia i prądu ilustrujące sterowanie niesymetryczne przekształtnika przy pracy silnikowej i prądnicowej (f) maszyny prądu stałego.

Sterowanie symetryczne polega na równoczesnym wyłączaniu kluczy T1 i T4 (rys.3.21c)). Gdy oba klucze są włączone na obciążeniu U_o jest napięcie U_d . Prąd odbiornika i_o rośnie w czasie t_{on} z szybkością zależną od różnicy napięć $U_d - E_o$ (dla uproszczenia pominiemy wpływ R_o). Po wyłączeniu kluczy T1 i T4 prąd odbiornika i_o dzięki działaniu indukccyjności L_o płynie w tym samym kierunku przez diody D3 i D2, malejąc z szybkością zależną od sumy napięć $U_d + E_o$. Z uproszczonych zależności całkowych przy zachowanych warunkach ciągłości prądu w obciążeniu i w stanie ustalonym układamy równanie :

$$(U_d - E_o)D = (U_d + E_o)(1 - D) \quad \text{w 3-45}$$

po przekształceniach:

$$U_o = U_d(2D - 1) \quad \text{w 3-46}$$

Gdy czas włączenia jest większy od połowy okresu to wartość napięcia E_o jest dodatnia (rys.3.21c).

Przy współczynniku wypełnienia D mniejszym od 0,5, napięcie E_o jest ujemne (rys.3.21d). Jako, że napięcie zasilania jest większe od napięcia obciążenia nie można wykorzystać układu do hamowania z odzyskiwaniem energii, a może być interpretowany jako hamowanie przeciwpądem. Przy pasywnym charakterze odbiornika stan taki może mieć tylko charakter przejściowy.

Sterowanie niesymetryczne pokazano na rysunku 3.21e) i f) . W tym typie sterowania jeden klucz jest stale włączony, a drugi zwiera z współczynnikiem wypełnienia D (rys.3.21e)). Załóżmy, że stale wyłączony jest klucz T1, a impulsuje klucz T4. Po włączeniu T4, prąd obciążenia i_o płynie przez T1 i T4 i narasta z szybkością zależną od różnicy napięć $U_d - E_o$. Po wyłączeniu T4, prąd i_o płynie przez T1 i diodę D3 i maleje z szybkością zależną od E_o .

Otrzymujemy odmianę układu obniżającego napięcie, różniące się jedynie miejscem klucza w układzie.

W układzie tym możemy też otrzymać pracę prądnicową układu (w czwartym kwadrancie układu (I_o, U_o)) rys.3.21f), gdy jeden z kluczy jest stale otwarty, a impulsuje drugi. Napięcie źródłowe odbiornika musi być ujemne. W istocie jest to układ podwyższający napięcie.

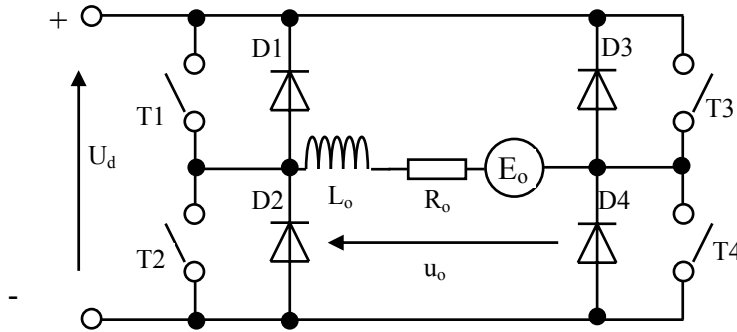
W wielu sytuacjach w sterowaniu silników prądu stałego konieczne jest zastosowanie układu umożliwiającego zmianę kierunku napięcia i prądu silnika. Na rysunku 3.22 pokazano przykład czterokwadrantowego przekształtnika energii, umożliwiającego regulację obrotów silnika DC dla dwóch kierunków wirowania. Umożliwia on również pracę prądnicową.

Układ pokazany na rys. 3.22 jest połączeniem w jednym układzie przetwornicy podwyższającej napięcie i przetwornicy obniżającej napięcie.

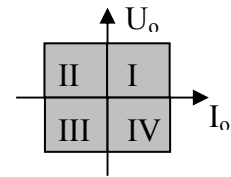
Załączony jest cały czas klucz T4. Przy pracy w pierwszym obszarze charakterystyki (kwadrant I) klucz T2 i T3 nie przewodzi, natomiast przewodzi impulsowo z wypełnieniem D klucz T1, a kiedy jest rozwarty prąd płynie przez diodę D2 i T4. Jest to przetwornica obniżająca napięcie. Prąd i_o płynie z napięcia zasilania U_d do obciążenia U_o (silnik). W pracy w drugim obszarze charakterystyki (kwadrant II) klucz T1 nie przewodzi, przewodzi z wypełnieniem D klucz T2, a kiedy jest rozwarty prąd i_o płynie przez diodę D1 do źródła zasilania. Jest to przetwornica podwyższająca napięcie, dzięki której energia z silnika U_o o sile elektromotorycznej E_o niższej od U_d , może przepływać do źródła napięcia zasilania. Umożliwia to hamowanie z odzyskiwaniem energii. W trakcie hamowania maleją obroty, a tym samym E_o i należy zwiększać stopień podwyższania napięcia.

Sytuacja jest analogiczna dla obrotów silnika w drugim kierunku. Teraz załączony jest ciągle klucz T2. Impulsują klucze T3 lub T4. Odpowiada to pracy odpowiednio w trzecim i czwartym (kwadrant III i kwadrant IV) obszarze charakterystyki.

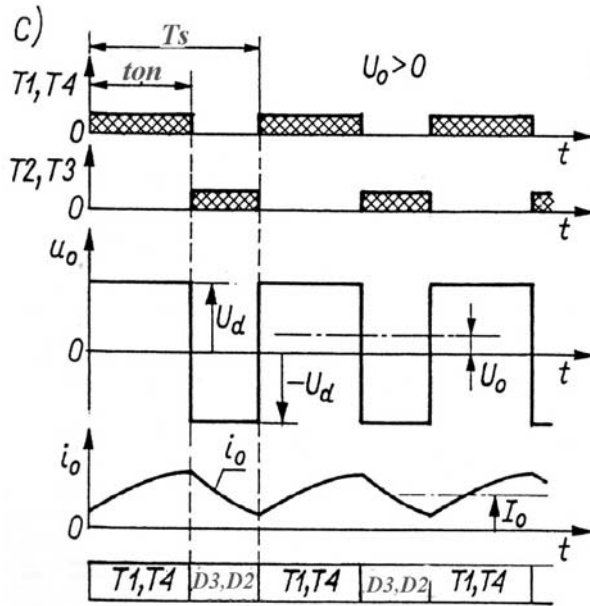
a)



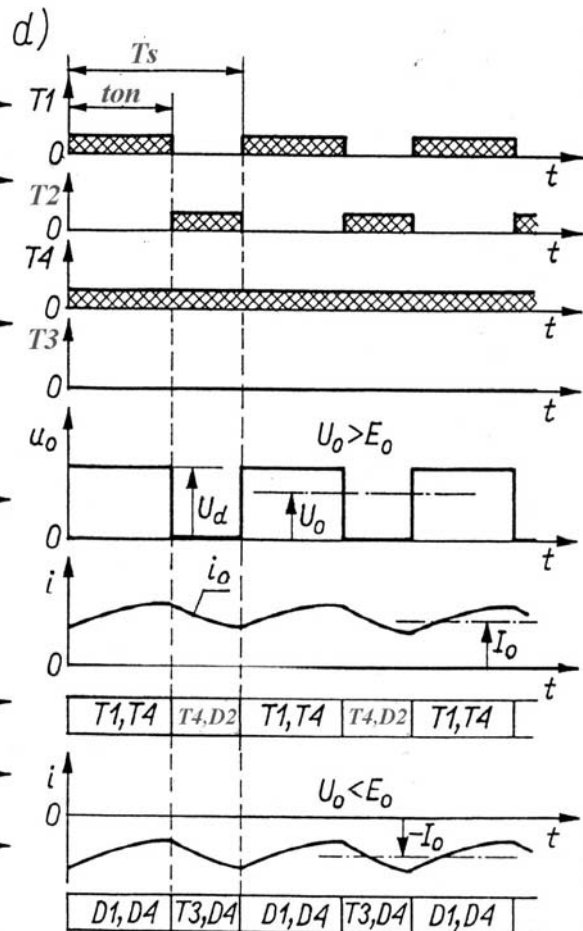
b)



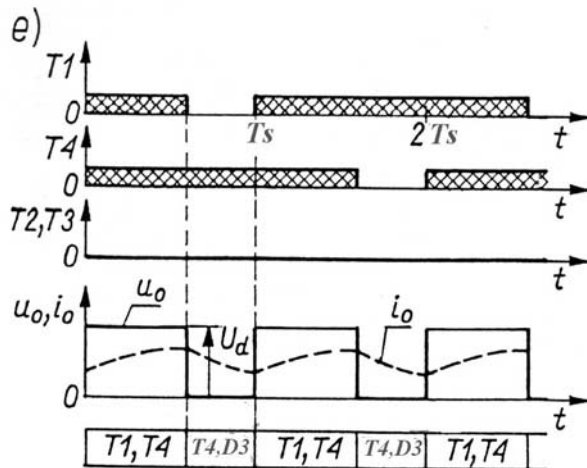
c)



d)



e)



Rys.3.22. Przekształtnik czterokwadrantowy umożliwiający zmianę kierunku napięcia i prądu odbiornika:
a) schemat układu; b) obszar charakterystyk zewnętrznych; c) przebiegi czasowe ilustrujące sterowanie symetryczne przekształtnika; d) przebiegi czasowe ilustrujące sterowanie niesymetryczne przekształtnika; e) przebiegi czasowe ilustrujące sterowanie nieregularne przekształtnika.

Na rysunku 3.22 przedstawiono trzy rodzaje sterowania:

- symetryczne rys 3.22c),
- niesymetryczne rys 3.22d),
- nieregularne rys 3.22e).

Sterowanie symetryczne o przebiegach pokazanych na rysunku 3.22c) zapewnia pracę z dodatnim i ujemnym kierunkiem napięć i prądów na obciążeniu. Na rysunku pokazano stan ciągłego przewodzenia prądu w dławiku w jednym kierunku w stanie ustalonym, przewodzą klucze T1 i T4 na przemian z diodami D3 i D2 dla napięć $D > 0,5$, dla $D < 0,5$ przewodzą prąd klucze T2 i T3 na przemian z diodami D1 i D4.

Sterowanie niesymetryczne układu mostkowego pokazano na rysunku 3.22d). Napięcie na obciążeniu ma kształt impulsów prostokątnych o jednakowej biegunowości, dlatego tętnienia prądu są dwukrotnie mniejsze niż dla sterowania symetrycznego $(-U_d, +U_d)$. Jest to w istocie układ analogiczny do przetwornicy dwukwadrantowej z rys.3.20 i umożliwia zmianę kierunku prądu odbiornika, czyli pracę prądnicową (odzyskiwanie energii przy hamowaniu).

Duże tętnienia w silniku nie są wskazane, gdyż wywołują drgania momentu napędowego, a także nagrzewanie się silnika. Sposobem na zmniejszenie tętnień prądu jest dodanie indukcyjności w szereg z silnikiem.

Sterowanie nieregularne jest odmianą sterowania impulsami jednobiegunowymi obciążenia, w którym klucze T1 i T4 wyłączają się na przemian rys.3.22e). Mniejszy poziom tętnień prądu i mniejsza częstotliwość pracy kluczy są zaletą tego układu.