

**W5. PRZEKSZTAŁTNIKI IMPULSOWE PRĄDU STAŁEGO -(1)****[L2 str199-216, str. L5 161-177, L6 str. 161- 190-199]**

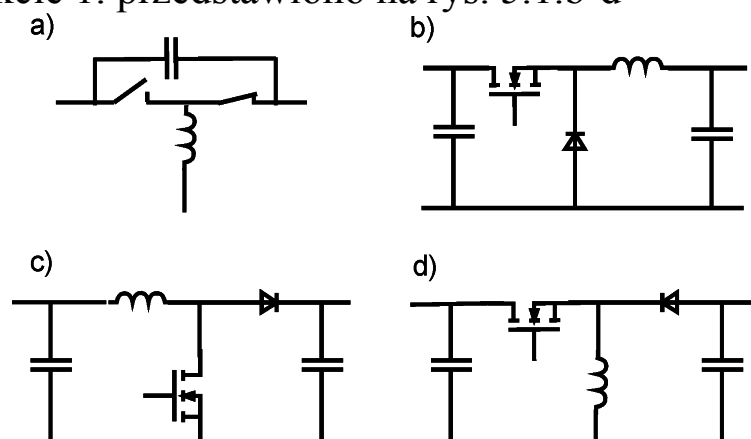
Jest to grupa przekształtników najliczniejsza bowiem znajduje zastosowanie w urządzeniach zasilających urządzeń informatycznych i multimedialnych. Często współpracują one z przekształtnikami sieciowymi - prostownikami.

Podstawą do klasyfikacji przekształtników impulsowych są :

1. Relacja napięcia wyjściowego i wejściowego,  
obniżający ,(zstępujący, step-down, buck)  
podwyższający (wstępujący, step-up. boost)  
obniżająco-podwyższający ( up-down, buck-boost)
2. Izolacja galwaniczna lub jej brak  
( transformatorowe, bezpośrednie)
3. Jeden lub dwa kierunki przepływu energii
4. Sposób przełączania: twardo lub miękko przełączające.

Przekształtniki te oznaczane są symbolem z j. angielskiego - DC/DC.

Podstawowe topologie przekształtników DC/DC są tworzone z zastosowaniem kanonicznego trójkąta jak na rys. 5.1. a. Odpowiednie układy odpowiadające podziałowi w punkcie 1. przedstawiono na rys. 5.1.b-d

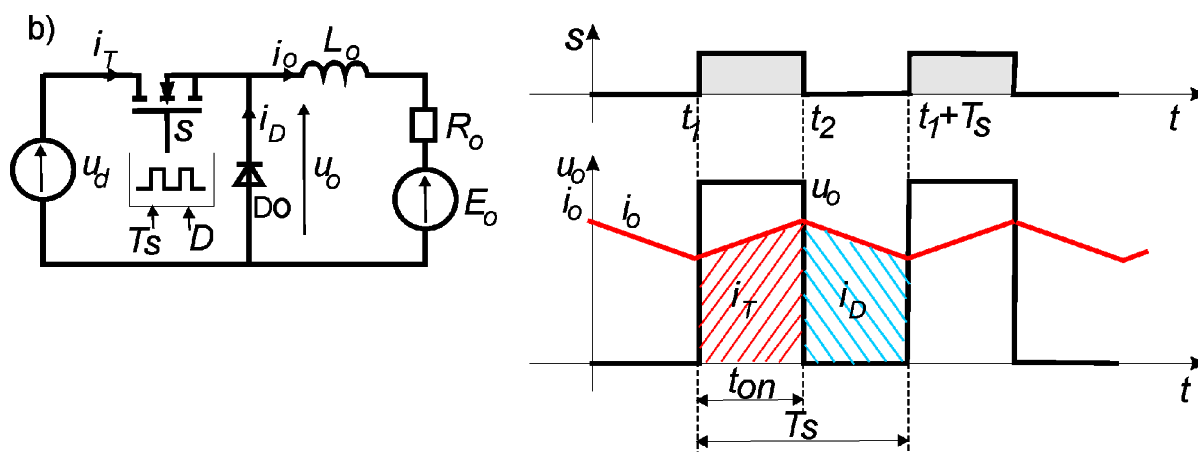


Rys. 5.1. Podstawowe układy przekształtników impulsowych: a) postać kanoniczna łącznika w przekształtniku impulsowym, b) przekształtnik zstępujący ( obniżający), c)przekształtnik wstępujący (podwyższający) , d) przekształtnik zstępująco-wstępujący (obniżająco-podwyższający) .

**Pytanie:** Dlaczego po jednej stronie zestawu łączników tworzących przekształtnik obwód ma charakter prądowy (filtr indukcyjny) to po drugiej musi mieć charakter napięciowy (filtr pojemnościowy)

**Przekształtnik zstępujący - obniżający napięcie [L.2. 199-202]**

Dla przeanalizowania podstawowych zjawisk i właściwości grupy przekształtników posłuży w pierwszym rzędzie układ służący do regulacji napięcia stałego w sytuacji gdy napięcie odbiornika jest mniejsze od napięcia źródła zasilającego.



Rys.5.2. Przekształtnik obniżający napięcie (zstępujący): schemat –a) i podstawowe przebiegi napięcia i prądu – b)

Przekształtnik pracuje przy określonej (zadanej) częstotliwości  $f_s = 1/T_s$  oraz przy nastawianym współczynniku wypełnienia  $D$  (ang. duty ratio) definiowanego jako

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

Wielkością nastawianą na wyjściu jest wartość średnia napięcia w okresie impulsowania  $T_s$

$$U_o = D U_d$$

**Problem: Jak prąd średni źródła zasilania zależy od współczynnika  $D$  i prądu odbiornika  $I_o$**

Odbiornik (wraz z filtrem) może być traktowany jako obwód LE ( $R \approx 0$ )

Prąd w odbiorniku może być prądem ciągłym (tryb pożądany) lub prądem impulsowym (przy małych obciążeniach). Przy przewodzeniu ciągłym przebieg prądu w warunkach pracy ustalonej ( $U_{o(AV)} = E_o$ ) może być wyznaczony na podstawie równań uwzględniających liniową zmianę prądu w czasie wynikającą z rozwiązania równania:

$$U_L = \frac{di_o}{dt} \quad \text{gdzie } U_L \text{ - napięcie na indukcyjności } L_o$$

Zgodnie z rysunkiem 5.2.b można napisać równania w okresie łączeń dla przedziałów przewodzenia tranzystora i przewodzenia diody rozładowczej.

$$i_o(t - t_1) = I_1 + \frac{U_d - E_o}{L} (t - t_1)$$

$$i_o(t - t_2) = I_2 + \frac{-E_o}{L} (t - t_2)$$

W stanie ustalonym:

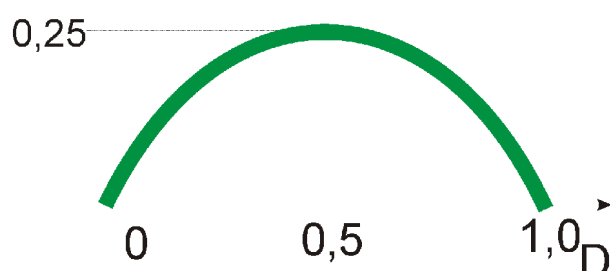
$$I_2 = I_1 + \frac{U_d - E_o}{L} t_{on} \dots I_1 = I_2 + \frac{-E_o}{L} t_{off} \dots E_o = \frac{t_{on}}{T_s} U_d = D U_d$$

Uwzględniając powyższe można wyprowadzić wzór na tętnienie prądu

$$\Delta I = \frac{U_d}{2f_s L_o} D(1-D)$$

Wartość średnia prądu odbiornika jest wielkością wynikającą z obciążenia odbiornika i rezultatem działania obwodu regulacji

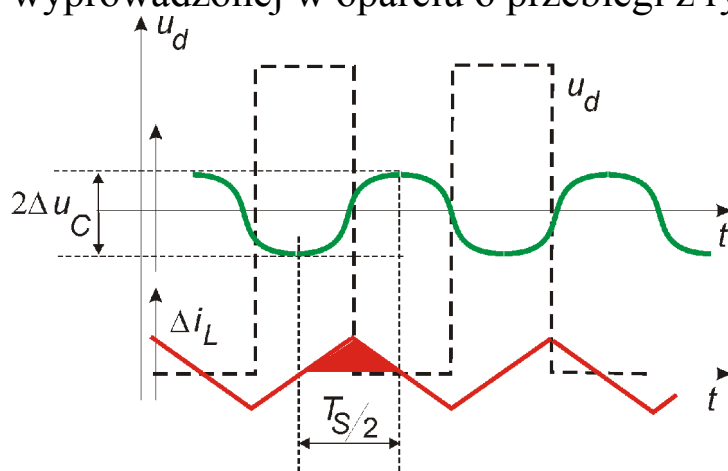
$$\frac{\Delta I_o}{\frac{U_d}{2Lf_s}}$$



Rys.5.3. Zależność względnego tętnienia od współczynnika D

Wykres odwzorowujący powyższą zależność ( Rys. 5.3) wskazuje, że przy ustalonej (!) wartości napięcia  $U_d$  największe tętnienia występują dla współczynnika  $D = 0,5$ .

W zastosowaniach impulsowego sterownika jako zasilacza napięciowego ważne jest określenie tętnienia napięcia wyjściowego na kondensatorze wyjściowym filtru. Przy przewodzeniu ciągłym i określonym tętnieniu prądu wpływającego do kondensatora można tętnienia napięcia wyznaczyć na podstawie zależności wyprowadzonej w oparciu o przebiegi z rys.5.4.



Rys.5.4. Przebiegi ilustrujące metodę wyznaczania tętnienia napięcia przy określonych parametrach LC filtru

Ładunek odpowiadający półfali tętnień prądu powoduje zmianę napięcia kondensatora o podwójną wartość tętnień. Oznacza to że:

$$\Delta U_C = \frac{Q}{C_F} = \frac{\frac{T_S}{2} \frac{\Delta I_L}{2}}{C} \quad \text{Ponieważ } \Delta I = \frac{U_o T_S}{2L_F} (1-D) \text{ to}$$

$$\Delta U_C = \frac{U_o}{16L_F C_F} (1-D) T_S^2$$

Powyższa zależność zapisana w postaci uwzględniającej względne tętnienia odniesione do wartości napięcia wyjściowego:

$$\frac{\Delta U_C}{U_o} = \frac{\pi^2}{4} (1-D) \left( \frac{f_r}{f_s} \right)^2 \quad \text{gdzie } f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_F C_F}}$$

może służyć do doboru parametrów LC filtru

**Pytanie: Jak należy dobrać częstotliwość rezonansową filtra względem częstotliwości łączeń przy zmiennym współczynniku D**

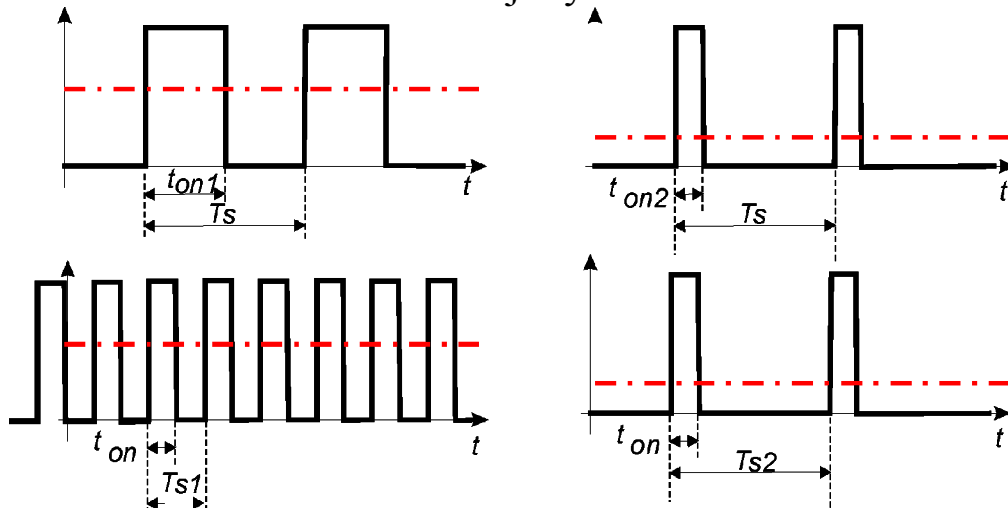
### Metody sterowania przekształtnikiem DC/DC

a) Sterowanie napięciem przez zmianę współczynnika D

przy stałej częstotliwości ( $f_s = \text{const}$ )

przy stałym czasie przewodzenia łącznika i zmiennej częstotliwości

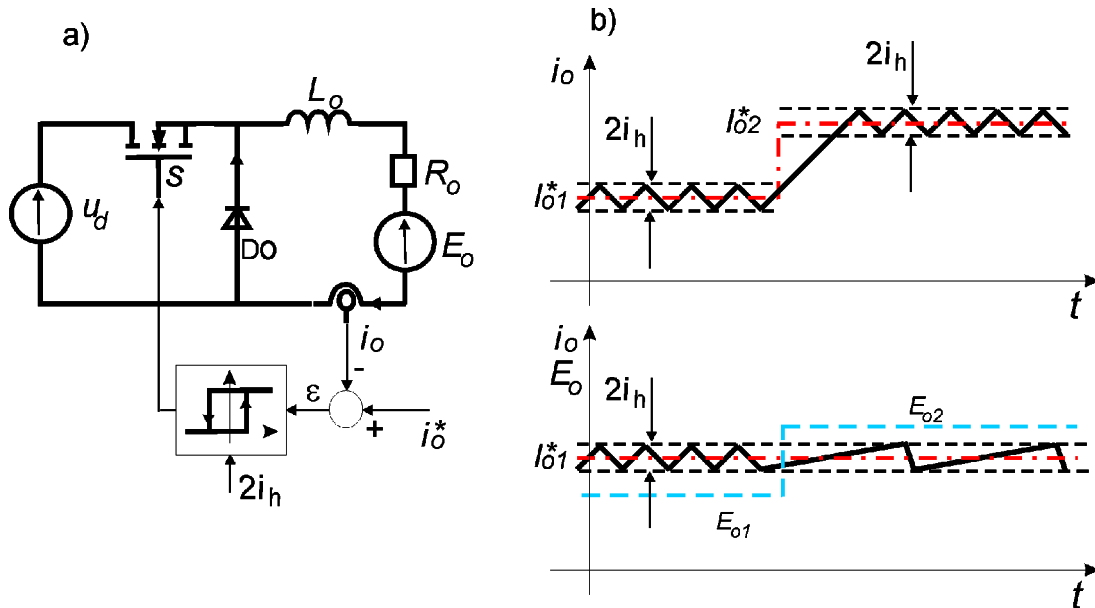
Istotę obydwu odmian sterowania ilustruje rys. 5.5.



Rys.5.5. Ilustracja metody regulacji przy stałej częstotliwości i zmiennym czasie przewodzenia (a) i przy zmiennej częstotliwości i stałym czasie przewodzenia łącznika sterowanego (b)

b) Sterowanie prądem przez zastosowanie regulacji nadążnej (regulacja histerezowa)

Istotę tego sterowania wyjaśnia rysunek 5.6.



Rys.5.6. Ilustracja metody regulacji histerezy: schemat ideowy (a) i przebiegi ilustrujące działanie układu przy zmianie zadanej wartości prądu i nie zmienionym napięciu odbiornika ( na górze) i przy niezmienionym prądzie i zmienionym napięciu odbiornika ( na dole)

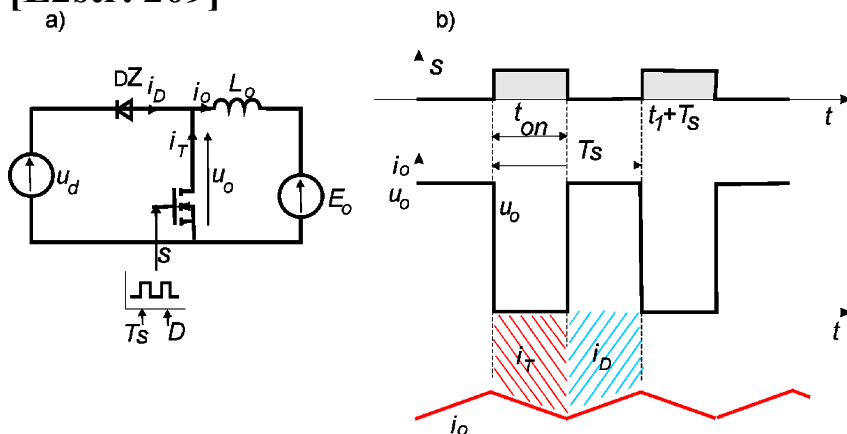
Jak widać w zależności od wartości napięcia wewnętrznego zmienia się częstotliwość łączeń . Zależność częstotliwości łączeń od parametrów obwodu i zadanej wartości histerezy prądu może być wyprowadzona z zależności na tętnienia prądu z uwzględnieniem że  $D = E_o / U_d$  oraz że  $\Delta I_o = I_h$ .

$$f_s = \frac{U_d}{2I_h L_o} \frac{E_o}{U_d} \left(1 - \frac{E_o}{U_d}\right)$$

Pytania: : (1) Jak wygląda charakterystyka zależności częstotliwości łączeń od wartości napięcia wewnętrznego  $E_o$  odbiornika przy regulacji histerezy? (2) Dlaczego regulacja histerezy jest dynamicznie najbardziej efektywna?

### Zmiana kierunku przekazywania energii ( zwrot energii z odbiornika)

[L2str. 209]



Rys.5.7. Układ umożliwiający zwrot energii z odbiornika o niższym napięciu wewnętrznym do źródła o wyższym napięciu.: schemat –a) i charakterystyczne przebiegi -b)

Niekiedy jest konieczne odzyskanie energii z odbiornika w tzw. hamowaniu regeneracyjnym. Konieczne jest wtedy zamienienie w topologii obwodu gałęzi

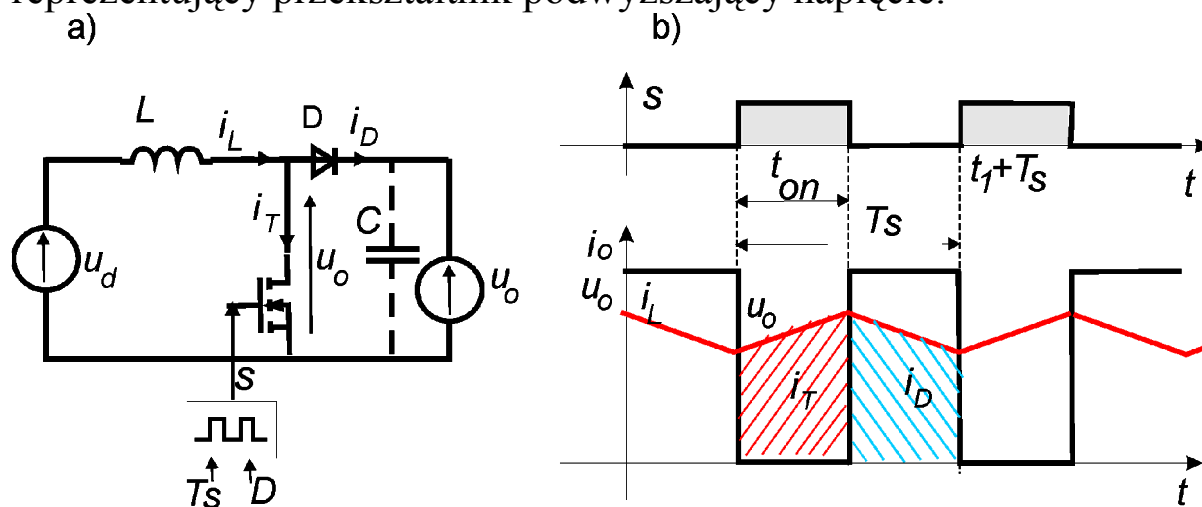
tranzystora z diodą rozładowczą która przyjmie funkcję tzw. diody zwrotnej (Rys. 5.7.a) - w praktyce jest to związane z dokonaniem przełączeń. Jeżeli uwzględnić że współczynnik załączenia diody  $D^*$  jest dopełnieniem współczynnika załączenia tranzystora  $D$  do jedności ( $D^*=1-D$ ) to wartości napięć źródła o odbiornika (wartość średnia) są związane relacją

$$U_o = (1 - D)U_d$$

Rozwiązanie przekształtnika wg. rysunku 5.7 zapewniające zmianę kierunku prądu w odbiorniku przy zachowaniu kierunku (znaku) napięcia można uznać za komplementarne w stosunku do rozwiązania z rys.5.2. w rozumieniu dostarczania i odzyskiwania energii w przypadku gdy źródło zasilania ma wyższe napięcie niż źródło wewnętrzne odbiornika.

### Przekształtnik wstępujący - podwyższający napięcie [L5: str. 169]

Praktycznie ten sam układ jak na rys. 5.7 jednak o innej przypisanej funkcji - zwiększania napięcia stałego metodą impulsową jest analizowany jako przekształtnik wstępujący (- step-up, boost converter). Wprowadzając niejako lustrzane odbicie do schematu z rys. 5.7.a uzyskuje się schemat wg rys.5.8. reprezentujący przekształtnik podwyższający napięcie.



Rys.5.8. Przekształtnik podwyższający napięcie : schemat (a) i przebiegi napięcia i prądu (b)

Dla wyznaczenia podstawowej charakterystyki sterowania takiego układu może posłużyć wzór powyższy w którym zamieniono rolę napięcia  $U_o$  i  $U_d$ . Uzyskuje się wtedy zależność

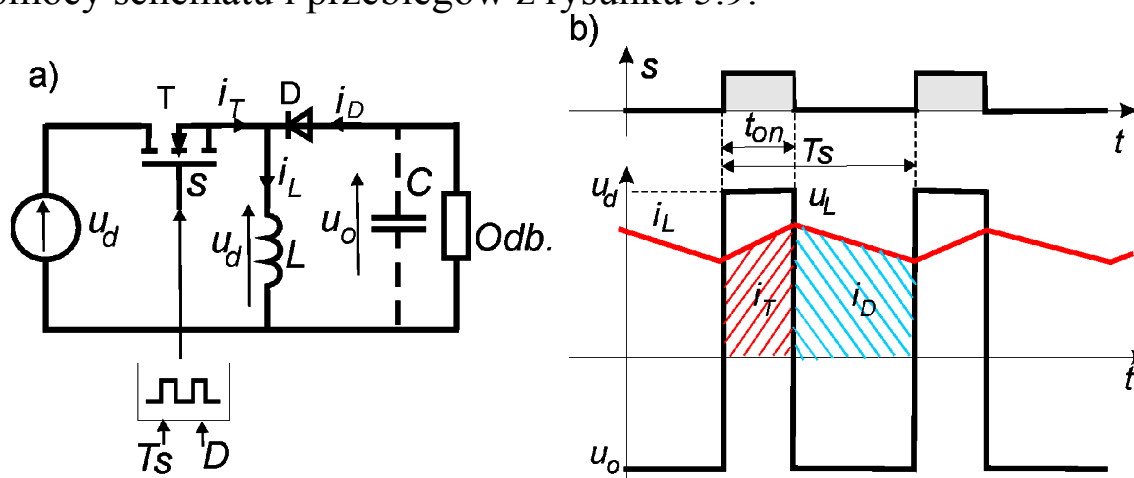
$$U_o = \frac{U_d}{(1 - D)}$$

Pytanie: Jaka zależność wiąże wartość średnią i skuteczną prądu na wejściu i wyjściu przekształtników wg. rys. 5,2, 5.7 i 5.8.

Przekształtniki wstępujące mogą służyć tylko do ograniczonego zwiększania napięcia. Praktycznie osiągnięty i sensowny zakres zwiększania napięcia tą drogą wynosi 2 do 5. Przy większych przekładniach napięciowych niezbędne jest stosowanie transformatorów dopasowujących i stosownych układów przekształtników

### Przekształtnik zstępująco-wstępujący (obniżająco-podwyższający)

Trzeci z podstawowych przekształtników wywodzących się z postaci kanonicznej charakteryzuje się możliwością nastawiania napięcia powyżej i poniżej wartości napięcia zasilania. Funkcjonowanie tego układu objaśnione zostanie skrótowo przy pomocy schematu i przebiegów z rysunku 5.9.



Rys. 5.9. Schemat układu przekształtnika zstępująco-wstępującego (a) i odpowiednie przebiegi napięcia i prądu (b)

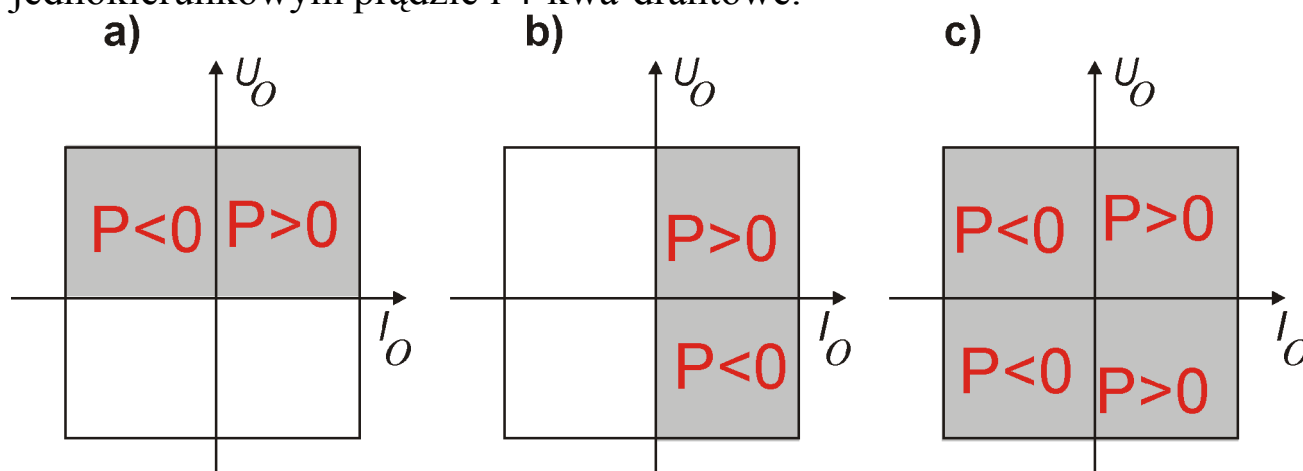
W czasie gdy przewodzi tranzystor  $T$  prąd w indukcyjności  $L$  narasta powiększając zgromadzoną w niej energię. W przedziale okresu łączeń  $T_s$  gdy tranzystor jest wyłączony prąd indukcyjności przejmuje dioda i energia z indukcyjności jest przekazywana do obwodu wyjściowego ładując kondensator do którego jest dołączony odbiornik. Analiza wskazuje, że napięcie odbiornika ma przeciwną polaryzację do oznaczonej na rysunku. Dla wyznaczenia zależności napięcia wyjściowego od współczynnika  $D$  i napięcia zasilania należy posłużyć się warunkiem równej zero wartości średniej napięcia na dławiku w cyklu pracy. Zapisując ten warunek jako  $DU_d + (1 - D)U_o = 0$  dochodzimy do wzoru na charakterystykę sterowania.

$$U_o = \frac{-D}{(1 - D)} U_d$$

Znak (-) uzyskany na drodze formalnego przekształcenia potwierdza zmianę znaku (odwrócenie fazy) napięcia wyjściowego względem przyjętych oznaczeń. Wzór jest słuszny jedynie w przypadku ciągłego prądu w indukcyjności.

## Przekształtniki dwukierunkowe (wielokwadrantowe) [L5: str. 173-177]

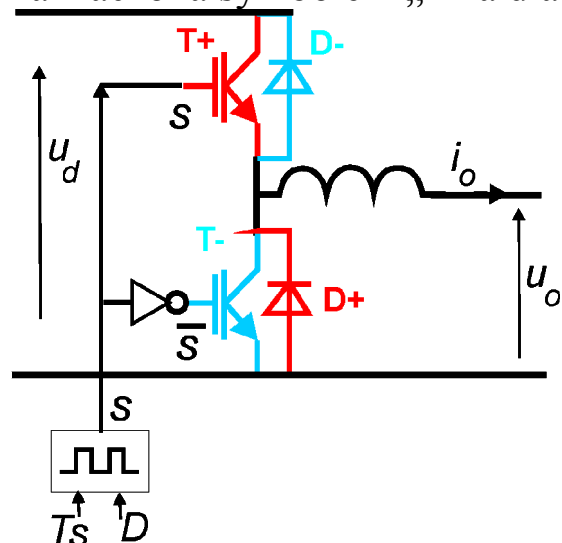
Przekształtniki tzw. wielokwadrantowe są to układy złożone z przekształtników o jednokierunkowym przepływie mocy. Dzięki zdwojeniu liczby elementów możliwe jest kontrolowane, płynne sterowane elektronicznie przestawienie kierunku przepływu energii czyli zmianę znaku mocy. Klasyfikacja układów wielokwadrantowych jest oczywiście oparta o usytuowanie obszaru mocy przekształtnika w układzie współrzędnych U-I ( prąd i napięcie wyjściowe) . Zgodnie z rysunkiem 5.10 . można wyróżnić układy 2-kwadrantowe pracujące przy jednokierunkowym napięciu , 2-kwadrantowe pracujące przy jednokierunkowym prądzie i 4-kwadrantowe.



Rys.5.10. Przyporządkowanie kwadrantów pracy w układach wielokwadrantowych na płaszczyźnie U-I

## Przekształtnik o dwukierunkowym prądzie

Schemat przekształtnika podany na rys.5.11 wskazuje ,że jest to kompozycja układów wg. rys. 5.2 i 5.7. przy czym dla jednego kierunku pracuje para zaznaczona symbolem „+” a dla drugiego oznaczona „-„.



Rys.5.11. Schemat przekształtnika o dwukierunkowym prądzie wyjściowym (T+, D+ - dodatni kierunek prądu , T-, D- ujemny kierunek prądu odbiornika)

Funkcje każdego z układów odpowiadają dokładnie tym, które opisano powyżej dla układów prostych. Sposób sterowania obydwu łączników który należy uznać za najbardziej uzasadniony to naprzemienne załączanie obydwu tranzystorów w

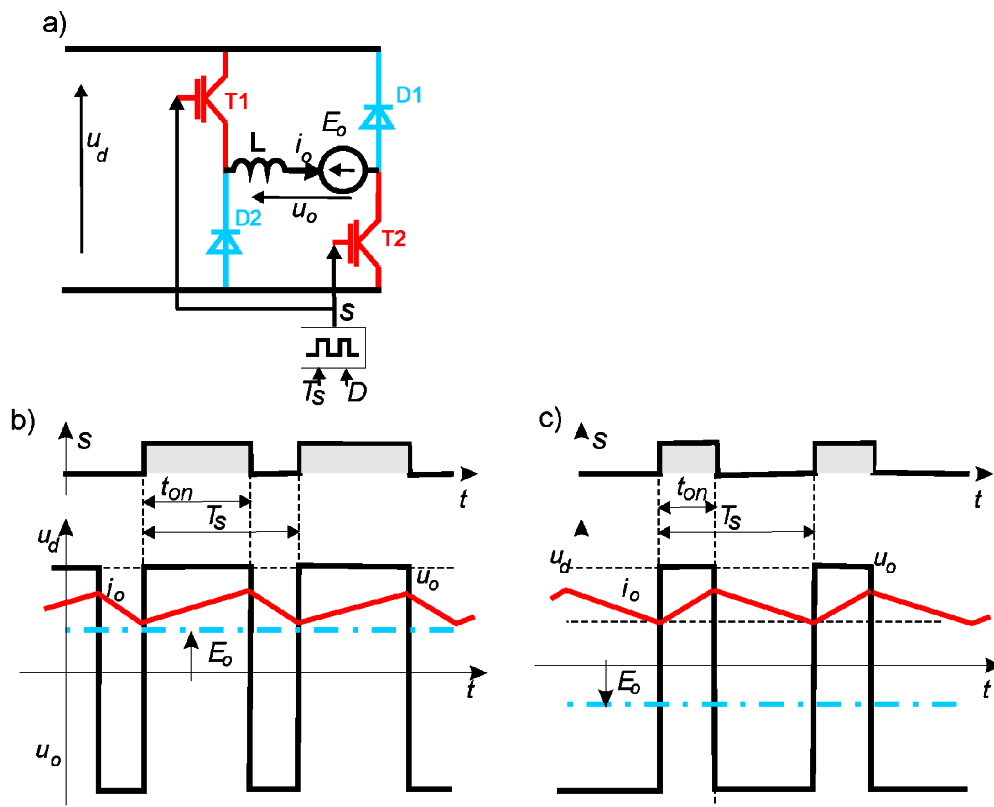


każdym cyklu niezależnie od kierunku prądu. O kierunku prądu decyduje czy wartość średnia napięcia na wyjściu przekształtnika  $U_{o(AV)} = D_1 U_d$  jest większa czy mniejsza od napięcia odbiornika ( $U_o$ ) przy czym  $D$  jest odniesione do tranzystora T1. (tranzystor T2 jest załączany z współczynnikiem  $D_2=1-D_1$ )

### Przekształtnik o dwukierunkowym napięciu.

Schemat układu który cechuje tylko jeden kierunek prądu odbiornika natomiast napięcie średnie na wyjściu może zmieniać znak przedstawia rys.5.13.

Tranzystory T1 i T2 załączane jednocześnie a w części cyklu kiedy przewodzą na odbiorniku typu LE występuje napięcie dodatnie ( $+U_d$ ) a prąd narasta (na indukcyjności występuje napięcie dodatnie  $+U_d - E_o$ ). Po wyłączeniu tranzystorów przewodzenie podejmują diody, na odbiorniku występuje ujemne napięcie ( $-U_d$ ). Prąd maleje bo napięcie na indukcyjności jest ujemne i równe  $-U_d - E_o$



Rys.5.12. Schemat przekształtnika o dwukierunkowym napięciu wyjściowym (a), przebiegi przy dodatnim napięciu wyjściowym ( $D > 0,5$ ) - (b); przebiegi przy ujemnym napięciu (c)

Przy tak określonej sekwencji w cyklu, przy założeniu, że prąd w odbiorniku jest ciągły można zapisać zależność na wartość średnią napięcia wyjściowego w funkcji  $D$  (charakterystykę sterowania)

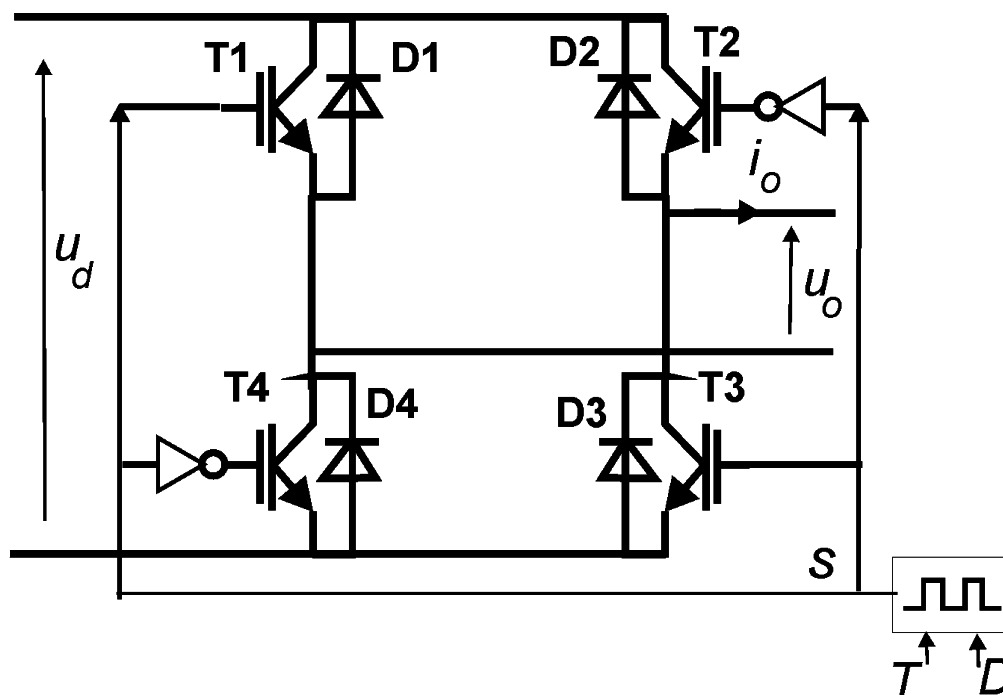
$$U_o = (2D - 1)U_d$$

Warunkiem uzyskania poprawnej pracy układu przy ciągłym prądzie przy  $U_o < 0$  jest oczywiście obecność ujemnego napięcia wewnętrznego  $E_o < 0$ .

Pytanie: Przy jakiej wartości  $D$  w układzie z rys. 5.12 wystąpi największe tętnienie prądu

### Przekształtnik o dwukierunkowym napięciu i prądzie odbiornika (czterokwadrantowy)

Złożenie dwóch układów o dwukierunkowym prądzie lub dwóch układów o dwukierunkowym napięciu prowadzi do pełnego mostka o schemacie jak na rys. 5.14. będącego układem czterokwadrantowym



Rys.5.13. Mostkowy przekształtnik czterokwadrantowy

Problem: Jakie możliwe sekwencje impulsów sterujących można przyjąć dla pracy przekształtnika mostkowego w wybranej ćwiartce układu U-I. Czy można wskazać która z nich jest korzystniejsza