

10

PROSTOWNIKI NIESTEROWANE I POWIELACZE NAPIĘCIA

10.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA UKŁADÓW PROSTOWNICZYCH

Zasilanie urządzeń elektrycznych w energię odbywa się za pośrednictwem prądu zmiennego lub prądu stałego. W tym ostatnim przypadku energia może być dostarczona z baterii zasilającej lub układu prostowniczego, przetwarzającego energię prądu zmiennego na energię prądu stałego o żądanej wartości napięcia i prądu.

Proces prostowania, jak każdy proces przetwarzania energii z przemianą częstotliwości, wymaga użycia elementów nieliniowych spełniających funkcje jednokierunkowych zaworów prądowych. Przy użyciu diod realizuje się układy prostownicze niesterowane, w których wartość stałego napięcia lub prądu wyjściowego jest ustalona i nie podlega regulacji. Za pomocą tyrystorów można zrealizować układy prostownicze sterowane, umożliwiające ciągłą regulację napięcia lub prądu wyjściowego, stosowane najczęściej w układach regulacji mocy. Układy prostownicze obejmują szeroki zakres zastosowań w zakresie mocy od kilku watów do tysięcy kW.

Układ prostowniczy składa się zazwyczaj z transformatora oraz diod prostowniczych pełniących rolę jednokierunkowych zaworów prądowych. Dzięki jednokierunkowemu przewodzeniu prądu przez elementy prostownicze, wejściowy prąd przemienny o składowej średniej równej zero jest w układzie prostowniczym przetwarzany na tętniący prąd jednokierunkowy o składowej średniej różnej od zera. Po odfiltrowaniu tętnień w układzie filtracyjnym uzyskuje się w odbiorniku energii żadaną wartość prądu i napięcia.

W zależności od liczby faz zmiennego napięcia zasilającego wyróżniamy układy prostownicze jednofazowe i wielofazowe.

W układzie jednopółówkowym napięcie jest prostowane w ciągu jednego półokresu każdej z faz, natomiast w układzie dwupółówkowym - w obu półokresach. Zatem dwupółówkowy sposób prostowania można uważać za wynik dwukrotnego zwiększenia liczby faz. Dlatego też układ jednofazowy dwupółówkowy będzie rozważany jako dwufazowy.

W zależności od rodzaju impedancji obciążenia zmienia się kąt przepływu przez element prostowniczy. W układach jedno i dwufazowych z obciążeniem rezystancyjnym kąt przepływu prądu

wynosi $2\Theta = \pi$, z obciążeniem pojemnościowym $2\Theta < \pi$,
a z obciążeniem indukcyjnym $2\Theta > \pi$.

Własności prostowników opisują następujące parametry:

- współczynnik wykorzystania napięciowego (sprawność napięciowa, skuteczność prostowania)

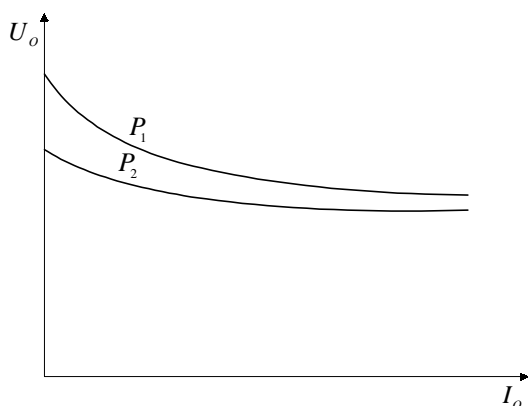
$$\eta_u = \frac{U_o}{U_{sm}} \quad (10.1)$$

gdzie:

U_o - składowa stała napięcia wyjściowego

U_{sm} - amplituda zmiennego napięcia wejściowego.

Współczynnik wykorzystania napięciowego η_u zależy od składowej stałej prądu obciążenia poprzez zależność napięcia wyjściowego U_o jak to pokazują charakterystyki obciążeniowe, przedstawione na rys.10.1.



Rys.10.1. Charakterystyki obciążeniowe prostowników:

P_1 z obciążeniem rezystancyjnym,

P_2 z obciążeniem pojemnościowym

Współczynnik wykorzystania napięciowego η_u zależy od rodzaju obciążenia, przy czym jest większy przy małych prądach obciążenia.

- różniczkowa rezystancja wyjściowa

$$r_o = - \frac{dU_o}{dI_o} \quad (10.2)$$

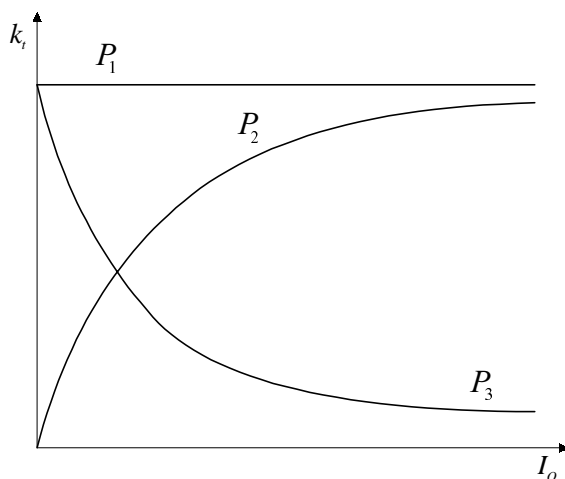
Rezystancja ta może być wyznaczona na podstawie charakterystyki obciążeniowej.

- współczynnik tętnień

$$k_t = \frac{U_{1m}}{U_o} \quad (10.3)$$

gdzie: U_{1m} - amplituda składowej podstawowej tętnień o pulsacji $m\omega$.

Zależność współczynnika tętnień od prądu obciążenia przedstawia rys.10.2.



Rys.10.2. Zależność współczynnika tętnień k_i od prądu obciążenia I_o prostownika:

P_1 - z obciążeniem rezystancyjnym,

P_2 - z obciążeniem pojemnościowym,

P_3 - z obciążeniem indukcyjnym

Prostownik z obciążeniem pojemnościowym charakteryzuje się małą wartością współczynnika tętnień w zakresie małych prądów obciążenia, natomiast z obciążeniem indukcyjnym w zakresie dużych prądów.

– współczynnik kształtu prądu

$$k_i = \frac{m I_{\max}}{I_o} \quad (10.4)$$

Jest to stosunek wartości maksymalnej I_{\max} do składowej średniej I_o / m prądu płynącego przez każdą fazę. Współczynnik ten określa wykorzystanie prądowe elementów prostowniczych i wymagania odnośnie ich maksymalnego prądu.

– współczynnik wykorzystania prądowego (sprawność prądowa)

$$\eta_i = \frac{I_o}{I_s} \quad (10.5)$$

Jest to stosunek wartości średniej I_o / m prądu fazowego do wartości skutecznej I_s tego prądu.

– sprawność energetyczna

$$\eta_p = \frac{P_o}{m P_s} = \frac{U_o I_o}{m U_s I_s} = \frac{\sqrt{2} U_o I_o}{m U_{sm} I_s} = \sqrt{2} \eta_u \eta_i \quad (10.6)$$

Jest to stosunek mocy wyjściowej $P_o = U_o I_o$ prądu stałego do mocy pozornej $m P_s = m U_s I_s$ obciążającej całe uzwojenie wtórne transformatora.

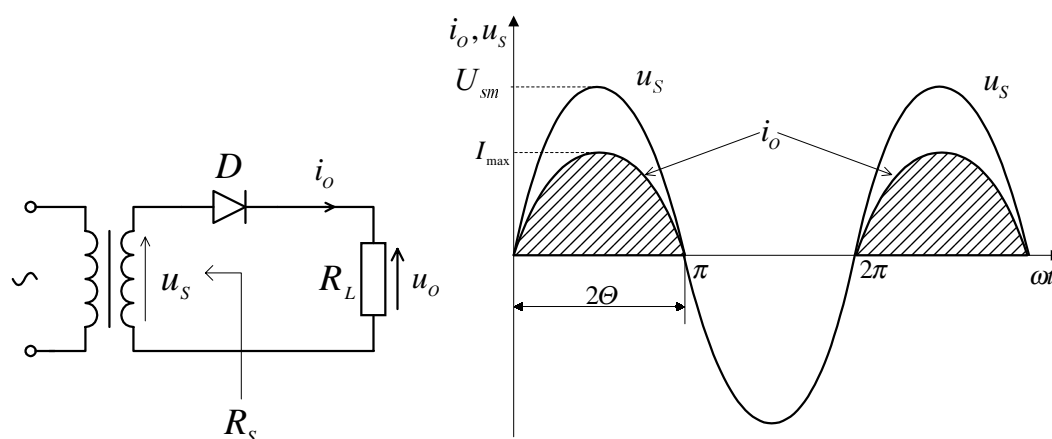
– napięcie zwrotne U_R - maksymalne napięcie na elemencie prostowniczym w stanie nieprzewodzenia,

– prąd udarowy $I_{u \max}$ - maksymalny prąd płynący przez element prostowniczy po włączeniu układu.

10.2. UKŁADY Z OBCIĄŻENIEM REZYSTANCYJNYM

10.2.1. Układ jednofazowy

Najprostszym przykładem prostownika jest układ jednofazowy ($m = 1$) z obciążeniem rezystancyjnym (rys.10.3).



Rys.10.3. Jednofazowy układ prostowniczy z obciążeniem rezystancyjnym

Zakładając, że suma rezystancji przewodzącej diody i rezystancji strat uzwojenia wtórnego wynosi R_s oraz pomijając napięcie na przewodzącym złączu, prąd obciążenia opisuje zależność

$$\left. \begin{aligned} i_o &\approx \frac{u_s}{R_s + R_L} = \frac{U_{sm} \sin \omega t}{R_s + R_L} & \text{dla } 0 \leq \omega t \leq 2\Theta = \pi \\ i_o &= 0 & \text{dla } 2\Theta = \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (10.7)$$

Rozwijając zależność (10.7) w szereg Fouriera otrzymujemy

$$i_o = \frac{u_o}{R_L} = I_{max} \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{\pi} \sum_{k=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{\cos k \omega t}{k^2 - 1} \right) \quad (10.8)$$

gdzie:

$$I_{max} = \frac{U_{sm}}{R_s + R_L} \quad (10.9)$$

Korzystając z zależności (10.8) można wyznaczyć parametry rozważanego układu:

- sprawność napięciowa

$$\eta_u = \frac{U_o}{U_{sm}} = \frac{R_L I_o}{U_{sm}} = \frac{R_L (I_{\max} / \pi)}{U_{sm}} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{1 + R_s / R_L} \approx \frac{1}{\pi} \approx 0,32 \quad \text{dla } R_s \ll R_L \quad (10.10)$$

– współczynnik tętnień

$$k_t = \frac{U_{1m}}{U_o} = \frac{I_{1m}}{I_o} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57 \quad (10.11)$$

– współczynnik kształtu prądu

$$k_i = \frac{m I_{\max}}{I_o} = \frac{I_{\max}}{I_o} = \pi \quad (10.12)$$

– sprawność prądowa

$$\eta_i = \frac{I_o}{I_s} = \frac{I_o}{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_o^2 d(\omega t)}} = \frac{2}{\pi} \approx 0,64 \quad (10.13)$$

– sprawność energetyczna

$$\eta_p = \frac{P_o}{P_s} = \sqrt{2} \eta_u \eta_i = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} \frac{1}{1 + R_s / R_L} \approx \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} \approx 0,29 \quad \text{dla } R_s \ll R_L \quad (10.14)$$

– napięcie zwrotne

$$U_R = U_{sm} \quad (10.15)$$

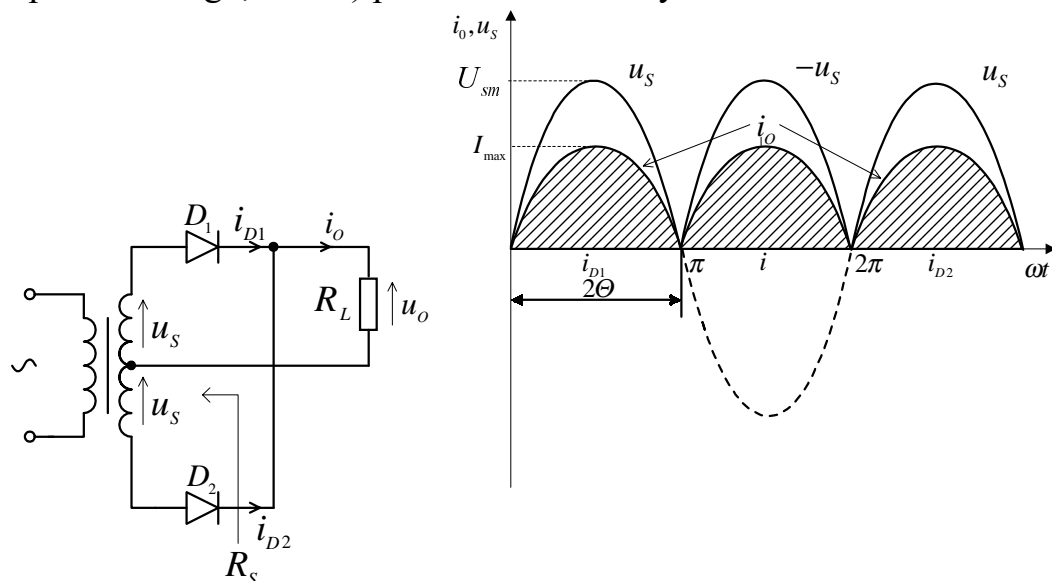
– prąd udarowy

$$I_{u\max} = I_{\max} = \frac{U_{sm}}{R_s + R_L} \quad (10.16)$$

Zatem układ jednopółówkowy z obciążeniem rezystancyjnym charakteryzuje się małą sprawnością napięciową, prądową i energetyczną oraz dużymi tętnieniami o pulsacji równej pulsacji podstawowej (ω). Niekorzystne parametry są konsekwencją jednopółówkowego sposobu prostowania oraz braku filtracji tętnień napięcia, z uwagi na rezystancyjny charakter obciążenia. Składowa stała prądu obciążenia I_o płynie przez transformator.

10.2.2. Układ dwufazowy

Schemat dwufazowego układu prostowniczego (jednofazowego dwupołówkowego, $m = 2$) przedstawiono na rys.10.4.



Rys.10.4. Dwufazowy układ prostowniczy z obciążeniem rezystancyjnym

W układzie tym diody przewodzą na przemian, każda przez połowę okresu. Dioda D_1 przewodzi gdy napięcie u_s jest dodatnie, zaś dioda D_2 , gdy jest ujemne. Zatem prąd obciążenia dany jest zależnością

$$\left. \begin{aligned} i_o = i_1 &= \frac{U_{sm} \sin \omega t}{R_S + R_L} & \text{dla } 0 \leq \omega t \leq \pi \\ i_o = i_2 &= -\frac{U_{sm} \sin \omega t}{R_S + R_L} & \text{dla } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (10.17)$$

Postępując analogicznie jak poprzednio otrzymujemy

$$i_o = \frac{u_o}{R_L} = I_{\max} \left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi} \sum_{k=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{\cos k \omega t}{k^2 - 1} \right) \quad (10.18)$$

Stąd

$$\eta_u = \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 + R_S / R_L} \approx \frac{2}{\pi} \approx 0,64, \quad \text{dla } R_S \ll R_L \quad (10.19)$$

$$k_t = \frac{U_{2m}}{U_o} = \frac{2}{3} \quad (10.20)$$

$$k_i = \frac{2 I_{\max}}{I_o} = \pi \quad (10.21)$$

$$\eta_i = \frac{I_o}{2 I_s} = \frac{2}{\pi} \approx 0,64 \quad (10.22)$$

$$\eta_p = \frac{4 \sqrt{2}}{\pi^2} \frac{1}{1 + R_s / R_L} \approx \frac{4 \sqrt{2}}{\pi^2} \approx 0,57 \quad \text{dla } R_s \ll R_L \quad (10.23)$$

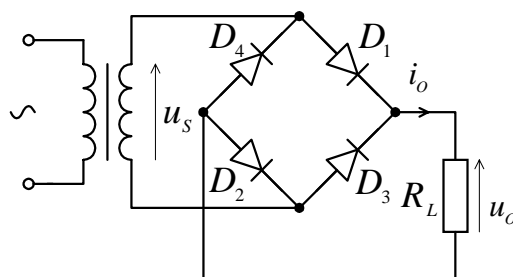
$$U_R = 2 U_{sm} \quad (10.24)$$

Jak wynika z przeprowadzonej analizy parametrów, wykorzystanie napięciowe układu dwupołkowego jest dwukrotnie większe w porównaniu z jednapołówkowym, tętnienia są nadal duże (ze względu na brak filtracji), lecz ich częstotliwość jest dwukrotnie większa. Wykorzystanie prądowe i sprawność układu są nadal małe. Wadą układu jest konieczność stosowania symetrycznego uzwojenia wtórnego.

10.2.3. Dwufazowy układ mostkowy

Układ mostkowy - Graetza, przedstawiony na rys.10.5, pozbawiony jest wad jednofazowego układu dwupołkowego.

W układzie tym dla dodatnich wartości napięcia wejściowego u_s przewodzą diody D_1 i D_2 , a dla ujemnych - diody D_3 i D_4 , zapewniając prostowanie dwupołkowe. Zatem prąd jest pobierany z uzwojenia wtórnego przez cały okres, czyli transformator w układzie Graetza jest lepiej wykorzystany niż w układzie z rys.10.4.



Rys.10.5. Dwufazowy układ Graetza

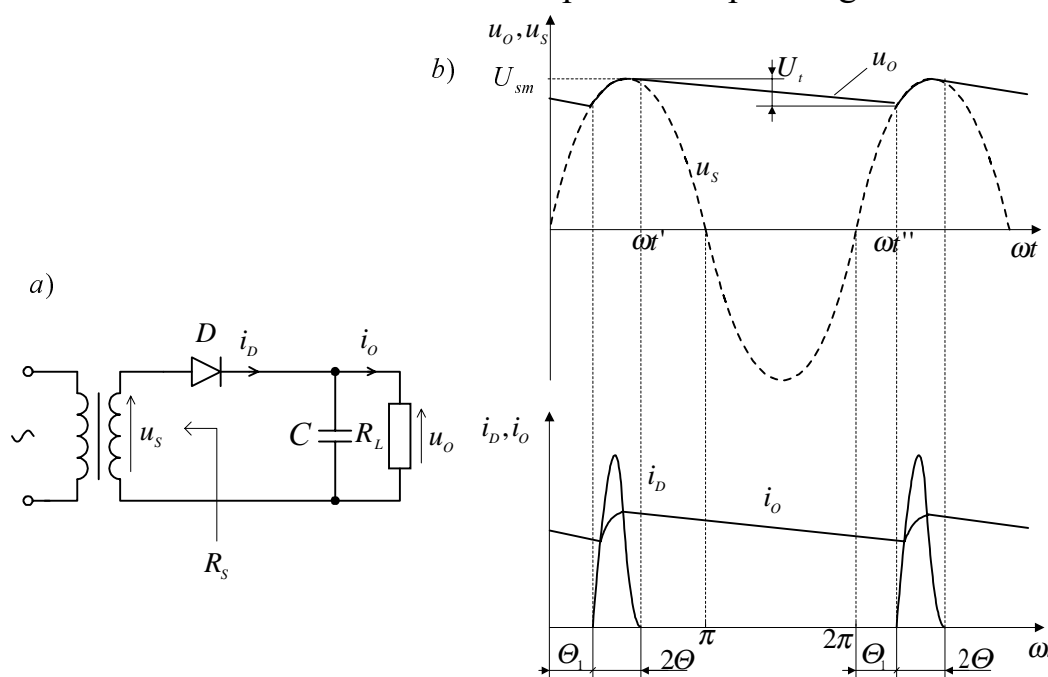
Układ Graetza opisują te same zależności (10.7 - 10.23) co układ dwufazowy, z tą różnicą, że rezystancja R_s jest równa sumie rezystancji strat uzwojenia wtórnego i rezystancji dwóch diod przewodzących, połączonych szeregowo. Napięcie zwrotne jest równe

$$U_R = U_{sm} \quad (10.25)$$

10.3. PROSTOWNIKI Z FILTRAMI O WEJŚCIU POJEMNOŚCIOWYM

Prostowniki z obciążeniem czysto rezystancyjnym nie znajdują praktycznego zastosowania w układach elektronicznych z powodu dużego poziomu tętnień napięcia, bądź prądu wyjściowego. Zmniejszenie tętnień napięcia na wyjściu układu prostowniczego można uzyskać poprzez dołączenie filtrów wygładzających. Podstawową częścią takiego filtra są elementy reaktancyjne w postaci pojemności lub indukcyjności, które kosztem wcześniej zgromadzonej energii, mogą w odpowiednich momentach podtrzymać wartość przepływającego prądu. Ze względów aplikacyjnych, przy mocy pobieranej z wyjścia prostownika nie przekraczającej ok. 100 W, popularniejsze są układy pojemnościowe. W najprostszym przypadku jest to kondensator dołączony równolegle do obciążenia prostownika.

Zasada działania prostownika z filtrem pojemnościowym zostanie przedstawiona na przykładzie układu jednopołówkowego. Na rys.10.6 zamieszczono schemat obwodu oraz odpowiednie przebiegi czasowe.



Rys.10.6. Jednofazowy układ prostowniczy z filtrem pojemnościowym: a) schemat układu, b) przebiegi napięć i prądów w układzie

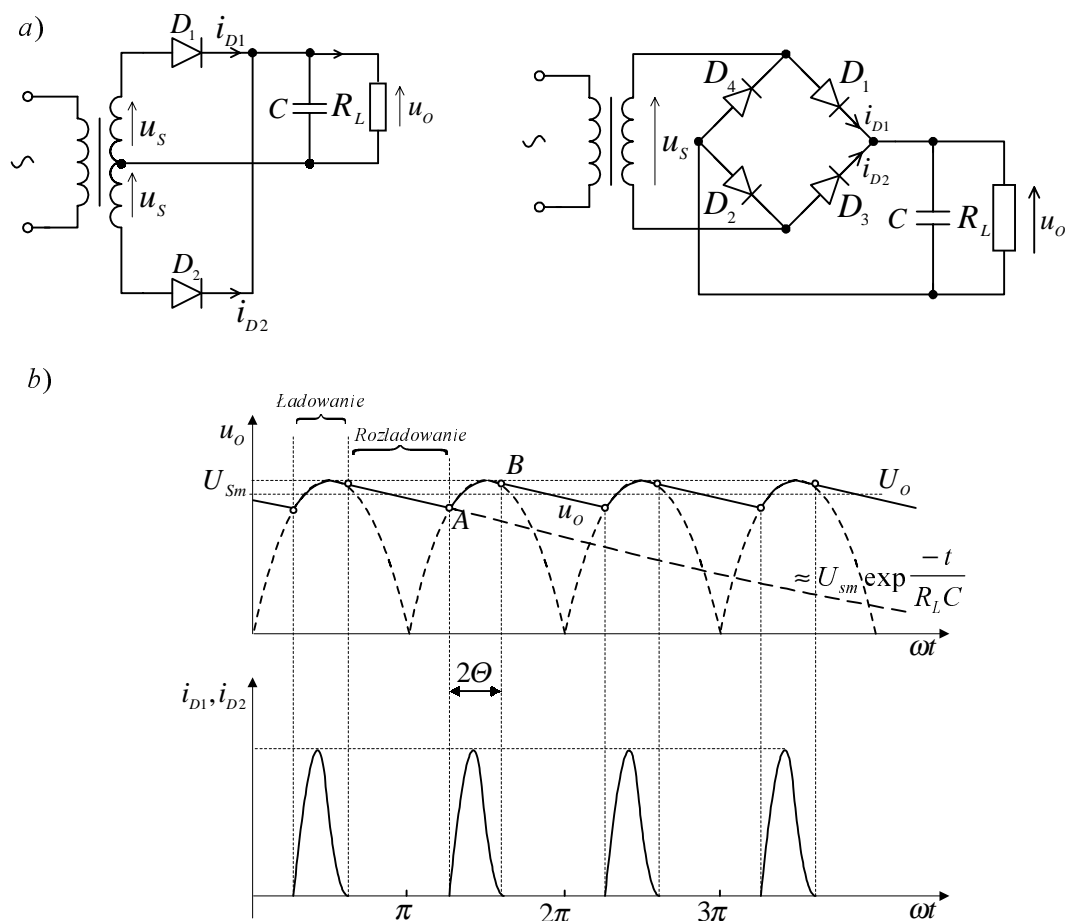
W stanie ustalonym, kiedy napięcie u_s przewyższa napięcie u_o ($u_s > u_o$), prąd diody płynący w przedziale czasu spełniającym warunek: $\Theta_1 \leq \omega t \leq \Theta_1 + 2\Theta$ kondensator C doładowuje prawie do maksymalnej wartości napięcia U_{sm} ze stałą czasową $(R_s \parallel R_L)C \approx R_s C$.

Od chwili t' spełniającej warunek: $\omega t' = \Theta_1 + 2\Theta$, w której napięcia u_s i u_o zrównają się ($u_s = u_o$), dioda nie przewodzi prądu, co powoduje, że kondensator C rozładowuje się ze stałą czasową $R_L C$.

Proces ten trwa do momentu t'' ($\omega t'' = \Theta_1 + 2\pi$) ponownego zrównania się napięć u_s i u_o , po czym kondensator jest ponownie doładowywany.

W analogiczny sposób pracują układy dwufazowe, przedstawione na rys.10.7. Ze względu na prostowanie dwupołówkowe proces ładowania i rozładowania kondensatora odbywa się z pulsacją 2ω ($m=2$), zatem koniec rozładowania kondensatora przypada dla $\omega t'' = \Theta_1 + 2\pi/m$ (kąt rozładowania $2\pi/m - 2\Theta$)

Przedstawione na rys.10.7b przebiegi czasowe napięć i prądów są reprezentatywne dla prostownika o rezystancji R_s bardzo małej w porównaniu z rezystancją obciążenia R_L .



Rys.10.7. Dwufazowe układy prostownicze z obciążeniem pojemnościowo - rezystancyjnym: a) schematy układów, b) przebiegi prądów i napięć w prostowniku dwupołówkowym

Przebieg napięcia na wyjściu prostownika można obliczyć różnymi metodami. Ponieważ zwykle celem analizy jest tylko określenie wartości średniej napięcia U_o i wartości międzyszczytowej tętnień U_t , a przy tym nie jest wymagana zbyt duża dokładność, dlatego stosuje się różnego rodzaju przybliżenia.

Najprostsze polega na zastąpieniu rzeczywistego przebiegu u_o przebiegiem piłokształtnym o wartości międzyszczytowej równej wartości międzyszczytowej tętnień U_t , nałożonym na składową stałą równą średniej wartości napięcia wyjściowego U_o , jak na rys.10.8.

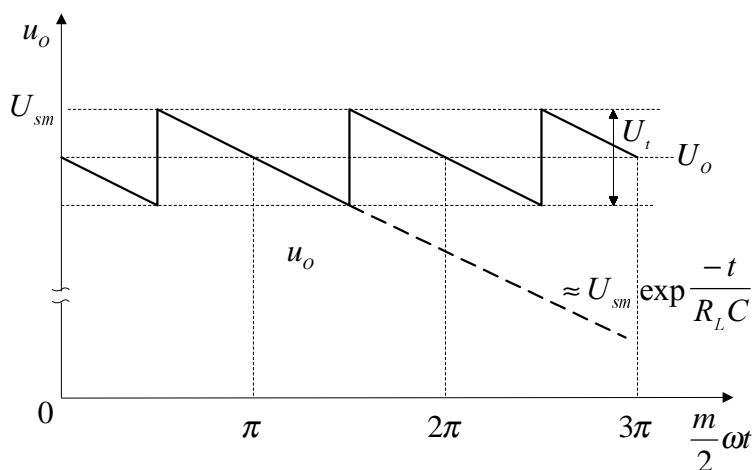
Zakładając że $R_s \ll R_L$, proces ładowania kondensatora przebiega w czasie dużo krótszym od czasu rozładowania, a kondensator C ładuje się do wartości szczytowej napięcia U_{sm} . Zakładając także, że $\omega C R_L \gg 1$, proces ładowania można uważać za liniowy, co przy przyjętych założeniach oznacza, że przebieg napięcia wyjściowego u_o jest zbliżony do piłokształtnego, przy spełnieniu zależności

$$U_o = U_{sm} - \frac{U_t}{2} \quad (10.26)$$

Traktując proces rozładowania jako liniowy, prąd rozładowujący kondensator ma w przybliżeniu wartość równą $I_{R_L} = U_o / R_L$ przy $U_t \ll U_o$.

Stąd

$$U_t = \frac{1}{C} \frac{U_o}{R_L} \left(\frac{2\pi / m}{\omega} \right) = \frac{2\pi U_o}{m \omega C R_L} \quad (10.27)$$



Rys.10.8. Przybliżony piłokształtny przebieg napięcia na wyjściu dwupołkowego układu prostowniczego z obciążeniem pojemnościowo - rezystancyjnym

Korzystając z zależności (10.26) i (10.27) otrzymujemy

$$U_o = U_{sm} - \frac{\pi U_o}{m \omega C R_L} \quad (10.28)$$

$$\eta_u = \frac{U_o}{U_{sm}} \approx \frac{1}{1 + \frac{\pi}{m \omega C R_L}} \quad (10.29)$$

Zależność (10.28) przedstawiona w nieco innej postaci

$$U_o = U_{sm} - \frac{\pi}{m \omega C} I_o \quad (10.30)$$

pokazuje wpływ prądu rezystancji obciążenia R_L na napięcie wyjściowe układu.

Rozkładając przebieg piłokształtny w szereg Fouriera, amplituda składowej podstawowej wynosi

$$U_{1m} = \frac{U_t}{2 \pi} \quad (10.31)$$

Z zależności (10.27), (10.31) można obliczyć współczynnik tętnień k_t

$$k_t = \frac{U_{1m}}{U_o} = \frac{1}{m \omega C R_L} \quad (10.32)$$

Napięcie zwrotne dla układu z rys.10.6 wynosi

$$U_R = U_{sm} + U_o \approx 2 U_{sm} \quad (10.33)$$

natomiast prąd udarowy, tj. maksymalny prąd diody tuż po włączeniu w najbardziej niekorzystnych warunkach (tzn. przy rozładowanym kondensatorze i włączeniu napięcia, gdy $u_s = U_{sm}$)

$$I_{u \max} = U_{sm} / R_S \quad (10.34)$$

Parametr ten określa wymagania dotyczące maksymalnego prądu użytych diod.

Przedstawiona analiza pokazuje, że układy prostownicze z obciążeniem pojemnościowo - rezystancyjnym charakteryzują się dobrym wykorzystaniem napięciowym (prostowanie zbliżone do szczytowego) i małymi tętnieniami dla dużych wartości stałej czasowej $C R_L$. Wykorzystanie prądowe jest znacznie gorsze niż w układach z obciążeniem rezystancyjnym.

Właściwości układów prostowniczych z obciążeniem pojemnościowym sprawiają, że są one najczęściej stosowane w zakresie niezbyt dużych mocy (> 100 W), przy stosunkowo dużych wartościach napięcia i małych wartościach prądu.

10.4. PROSTOWNIKI Z FILTREM O WEJŚCIU INDUKCYJNYM

Zastosowanie obciążenia o charakterze indukcyjnym umożliwia zwiększenie kąta przepływu prądu 2Θ i ograniczenie tętnień prądu. Praca układu prostowniczego z obciążeniem indukcyjnym zależy od ciągłości przepływu prądu obciążenia.

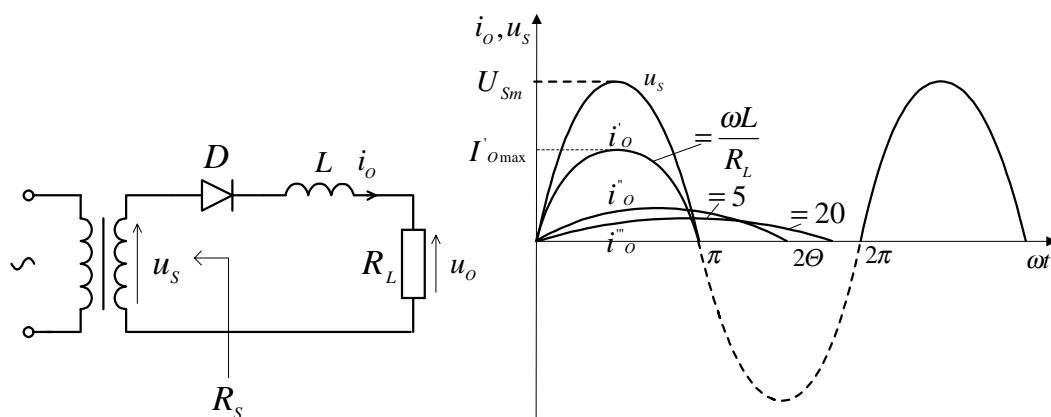
10.4.1. Układ jednofazowy

Na rys.10.9 przedstawiono schemat jednofazowego układu prostowniczego z obciążeniem indukcyjnym.

W układzie jednofazowym ciągłość prądu obciążenia nie jest zachowana. Dioda zaczyna przewodzić, gdy napięcie zasilania u_s staje się dodatnie. Prąd i_o jest opóźniony w stosunku do napięcia u_s na skutek indukcyjnej reaktancji obciążenia.

$$\left. \begin{aligned} i_o R + L \frac{di_o}{dt} &= u_s = U_{sm} \sin \omega t & \text{dla } 0 \leq \omega t \leq 2\Theta \\ i_o &= 0 & \text{dla } 2\Theta \leq \omega t \leq 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (10.35)$$

gdzie: $R = R_L + R_s$



Rys.10.9. Jednofazowy układ prostowniczego z obciążeniem rezystancyjno-indukcyjnym

Rozwiązanie równania (10.35) ma postać

$$i_o(t) = \frac{U_{sm}}{R} \cos \varphi \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi \left(\exp - \{ \omega t \operatorname{ctg} \varphi \} \right) \right] \quad (10.36)$$

$$\text{gdzie: } \operatorname{tg} \varphi = \omega L / (R_s + R_L) \quad (10.37)$$

Kąt przepływu 2Θ określa warunek

$$i(2\Theta) = 0 \quad (10.38)$$

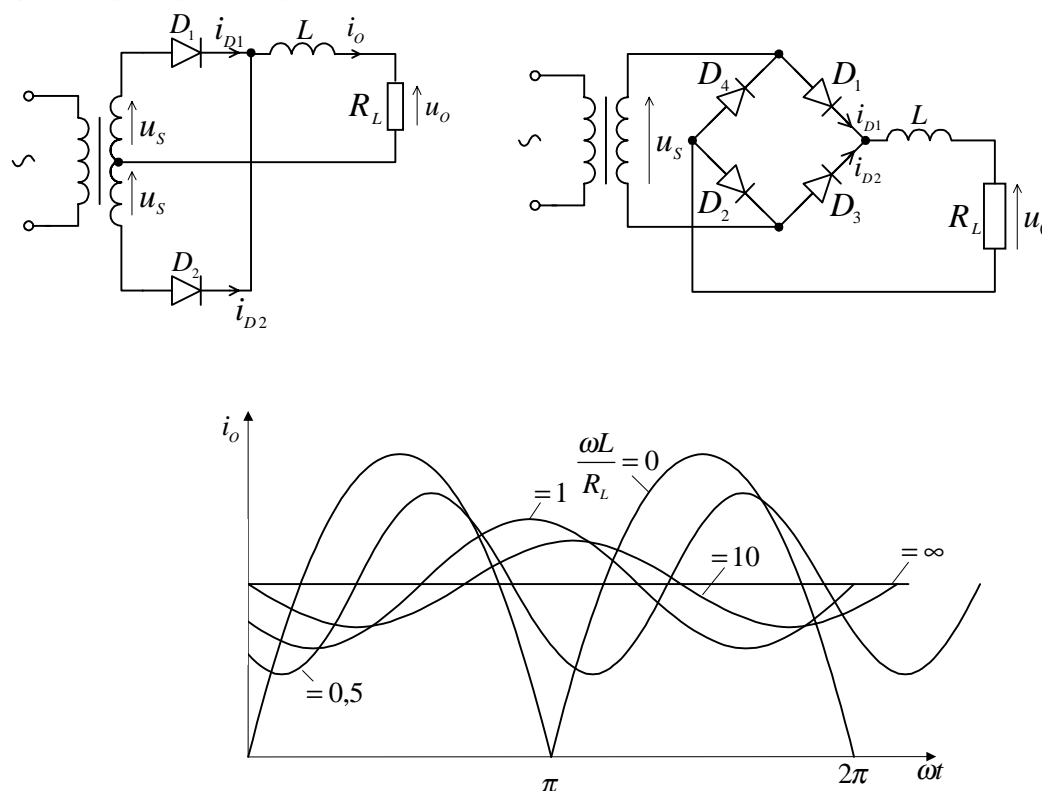
Stąd

$$\sin(2\Theta - \varphi) + \sin\varphi [\exp(2\Theta \operatorname{ctg}\varphi)] = 0 \quad (10.39)$$

Kąt przepływu 2Θ zmienia się w zależności od indukcyjności w zakresie od $2\Theta = \pi$, dla $\omega L / (R_s + R_L) = 0$, do $2\Theta = 2\pi$, dla $\omega L / (R_s + R_L) \rightarrow \infty$. Brak ciągłości prądu w obciążeniu powoduje, że ze wzrostem kąta przepływu 2Θ maleje wartość maksymalna prądu $I_{O\max}$ oraz jego składowa I_o , co powoduje, że współczynnik wykorzystania napięciowego η_u i sprawność energetyczna η_p maleją, a tętnienia rosną. Zatem stosowanie obciążenia indukcyjnego w układzie jednofazowym jest niecelowe, ponieważ prąd w obciążeniu jest nieciągły.

10.4.2. Układy dwufazowe

W układach dwufazowych (rys.10.10) zachowany jest warunek ciągłości przepływu prądu.



Rys.10.10 Dwufazowe układy prostownicze z obciążeniem rezystancyjno - indukcyjnym dla różnych wartości $\omega L / R_L$

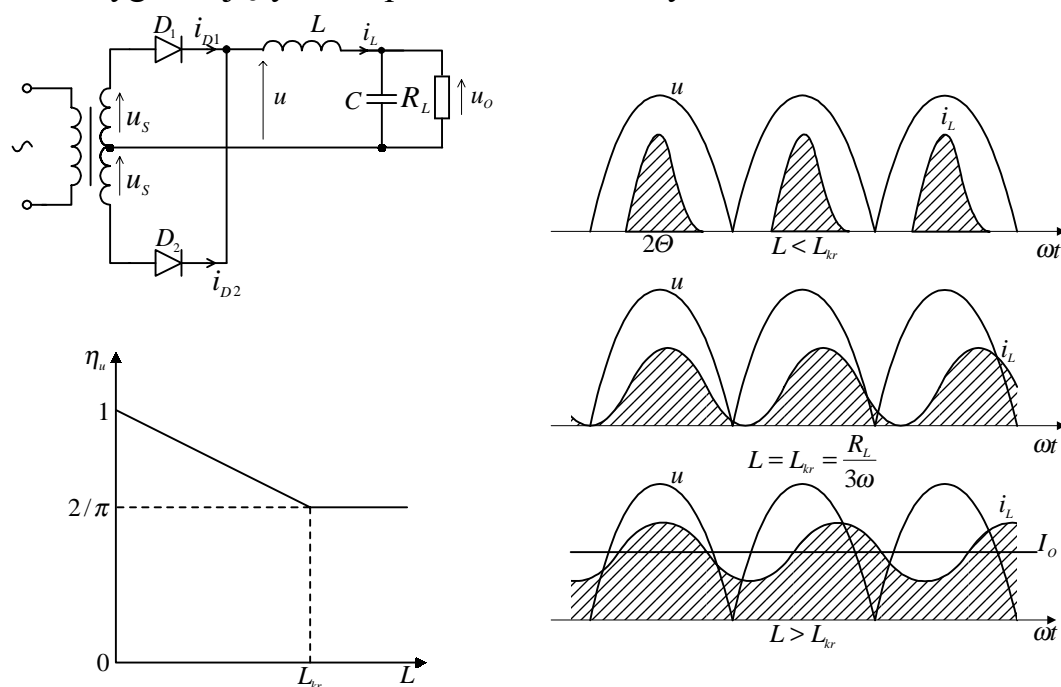
Prąd i_{D1} diody D_1 płynie w czasie ujemnego półokresu napięcia u_s . Jest on opóźniony względem napięcia u_s o kąt φ , zgodnie z zależnością (10.37). W momentach przejścia napięcia u_s przez zero, prąd obciążenia i_o jest przejmowany naprzemiennie przez diody

D_1 i D_2 , co zapewnia jego ciągłość i kąt przepływu prądu $2\Theta = 2\pi$. Ze wzrostem indukcyjności otrzymujemy stałą wartość prądu obciążenia, przy niewielkich amplitudach składowych zmiennych. W miarę wzrostu indukcyjności przebiegi prądów obu diod zbliżają się do przebiegów prostokątnych.

Układy z obciążeniem rezystancyjno - indukcyjnym wykazują małe tętnienia i bardzo dobre wykorzystanie prądowe η_i , przy nieco gorszym wykorzystaniu napięciowym. Własności filtracyjne układów polepszają się ze wzrostem prądu obciążenia i dlatego są najczęściej stosowane w zasilaczach dużej mocy.

10.5. UKŁADY PROSTOWNICZE Z FILTREM INDUKCYJNO - POJEMNOŚCIOWYM

Polepszenie filtracji układu z obciążeniem rezystancyjno - pojemnościowym uzyskuje się przy zmniejszeniu prądu obciążenia I_o , w przeciwieństwie do układu z obciążeniem rezystancyjno - indukcyjnym, w którym polepszenie filtracji uzyskuje się dla większego prądu obciążenia. Zastosowanie w układach prostowników filtrów indukcyjno - pojemnościowych (niekiedy w postaci kilku ogniw filtru LC) skutkuje znacznym polepszeniem filtracji tętnień. Przebiegi czasowe napięć i prądów w dwufazowym układzie prostowniczym z filtrem wygładzającym LC przedstawiono na rys.10.11.



Rys.10.11. Dwufazowy układ prostowniczy z filtrem LC

Dla małej indukcyjności układ pracuje jak prostownik z obciążeniem pojemnościowym, przy małym kącie przepływu 2Θ .

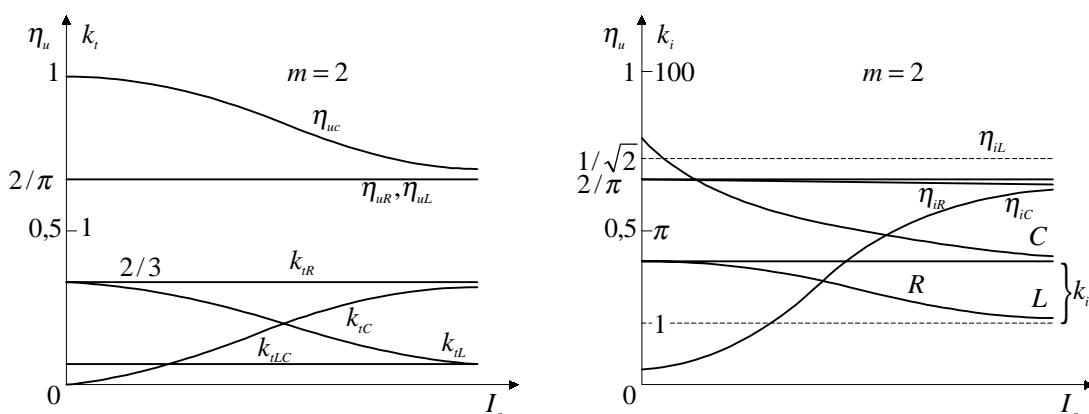
W miarę wzrostu indukcyjności kąt przepływu rośnie i dla $L = L_{kr}$ prąd obciążenia i_o staje się ciągły ($2\Theta = 2\pi$). Dalszy wzrost indukcyjności powoduje, że własności układu zbliżają się do prostownika z obciążeniem indukcyjnym o lepszej filtracji tętnień dzięki działaniu pojemności.

10.6. PORÓWNANIE WŁASNOŚCI UKŁADÓW PROSTOWNICZYCH

Na rys.10.12 dokonano graficznego porównania parametrów dwufazowych układów prostowniczych z różnymi filtrami wygładzającymi.

Układy prostownicze z filtrem o wejściu pojemnościowym wykazują dobre wykorzystanie napięciowe w zakresie małych mocy i małych prądów (prostowanie bliskie szczytowemu) oraz małe tętnienia. Ich parametry prądowe (współczynnik wykorzystania prądowego, współczynnik kształtu prądu i prąd udarowy) są niekorzystne, co powoduje słabe wykorzystanie transformatora sieciowego i diod. Praktycznie, układy te stosuje się jako układy małej mocy, o stosunkowo dużym napięciu i małym prądzie.

Układy prostownicze z filtrem o wejściu indukcyjnym mają własności przeciwne. Wykorzystanie napięciowe tych układów jest mniejsze niż w układach z obciążeniem pojemnościowym (prostowanie średnie) i nie zależy od prądu obciążenia.



Rys.10.12. Porównanie charakterystyk różnych układów prostowniczych

Układy te wykazują małe tętnienia i dobre wykorzystanie prądowe w zakresie dużych prądów obciążenia, a zatem nadają się szczególnie do

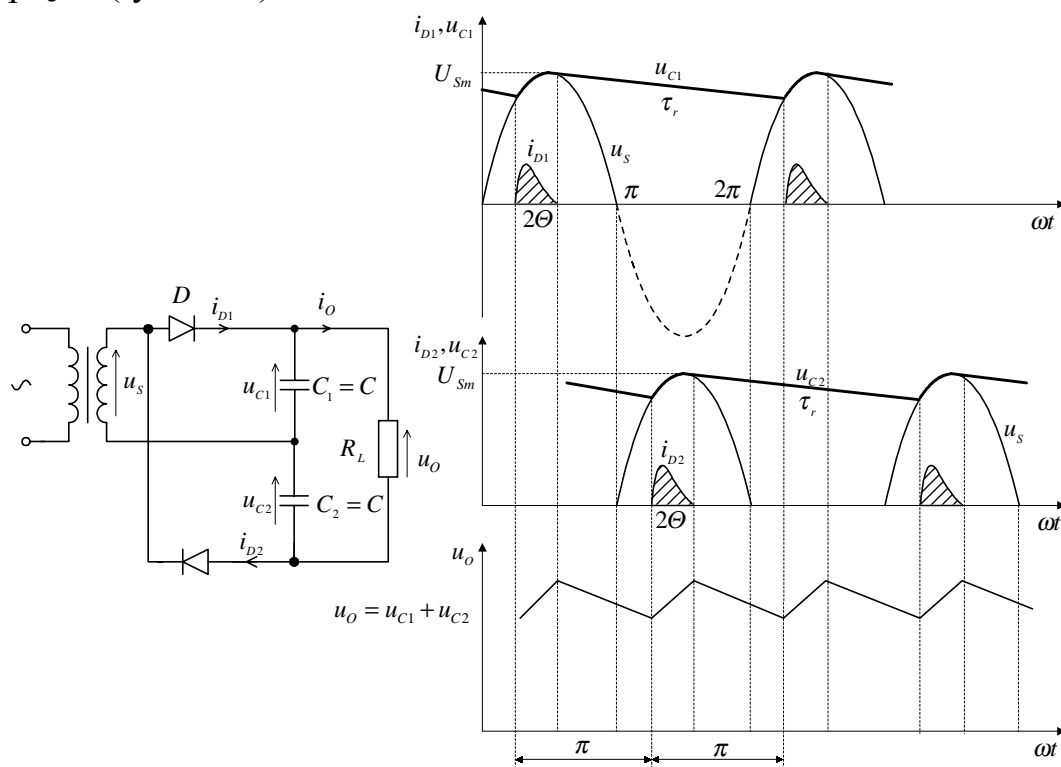
zastosowania w układach dużej mocy, przy dużych wartościach prądu obciążenia. Ich słabe własności filtracyjne w zakresie małych wartości prądu obciążenia można poprawić stosując filtry mieszane LC. Wówczas współczynnik tętnień jest mały i w zasadzie nie zależy od prądu obciążenia.

10.7. POWIELACZE NAPIĘCIA

Powielanie napięcia jest możliwe przy zastosowaniu układów prostowniczych z obciążeniem pojemnościowym. Oddzielne układy prostownicze obciążone pojemnościowo wytwarzają na kondensatorach napięcia, które sumują się w obwodzie obciążenia powodując zwielokrotnienie napięcia wyjściowego.

a) Symetryczny podwajacz napięcia

Najprostszym powielaczem napięcia jest symetryczny podwajacz napięcia (rys.10.13).



Rys.10.13. Symetryczny podwajacz napięcia

W stanie ustalonym, gdy napięcie zasilające u_s jest dodatnie, pojemność C_1 doładowuje się ze stałą czasową $\tau_s = R_s C_1$ przez diodę D_1 wskutek przepływu prądu i_{D1} . Następnie, gdy prąd i_{D1} zanika,

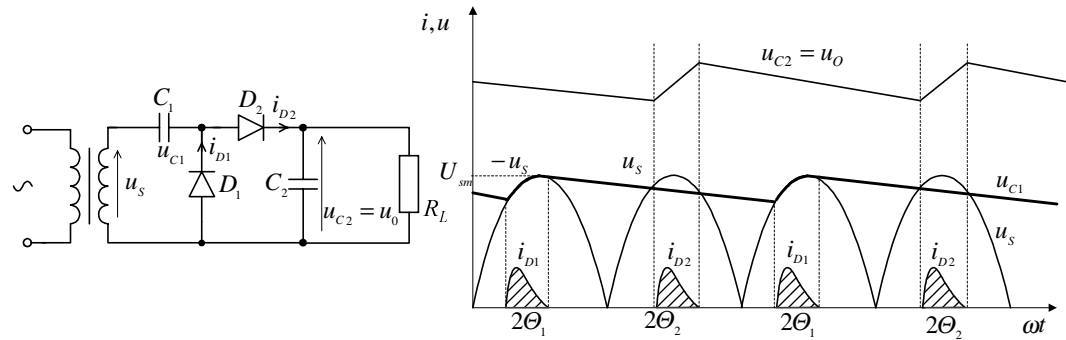
pojemność C_1 rozładowuje się przez rezystancję obciążenia R_L i pojemność drugiego układu prostowniczego C_2 ze stałą czasową

$$\tau_r = R_L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{R_L C}{2}, \quad \text{dla } C_1 = C_2 = C \quad (10.39)$$

W półokresie ujemnego napięcia zasilającego u_s , analogicznie jak poprzednio, doładowuje się pojemność C_2 wskutek przepływu prądu i_{D2} , a następnie rozładowuje się przez rezystancję obciążenia R_L i pojemność pierwszego układu prostowniczego C_1 ze stałą czasową τ_r . Napięcie wyjściowe u_o jest sumą napięć u_{C1} i u_{C2} , jest więc bliskie $2 U_{sm}$ i zawiera tętnienia o pulsacji 2ω .

b) Niesymetryczny podwajacz napięcia

Układ niesymetrycznego podwajacza napięcia przedstawiono na rys.10.14.



Rys.10.14. Niesymetryczny podwajacz napięcia

W stanie ustalonym, w półokresie ujemnego napięcia zasilającego u_s , pojemność C_1 ładuje się ze stałą czasową

$$\tau_{s1} = C_1 R_s \quad (10.40)$$

prądem i_{D1} do wartości bliskiej szczytowej U_{sm} . Gdy prąd i_{D1} zanika, po zakończeniu ładowania pojemności C_1 , dioda D_1 ulega zatkaniu i pojemność C_1 nie może się rozładować, dopóki nie zacznie przewodzić dioda D_2 , powodując doładowanie kondensatora C_2 do wartości bliskiej $U_{C1} + U_{sm} \approx 2 U_{sm}$ ze stałą czasową

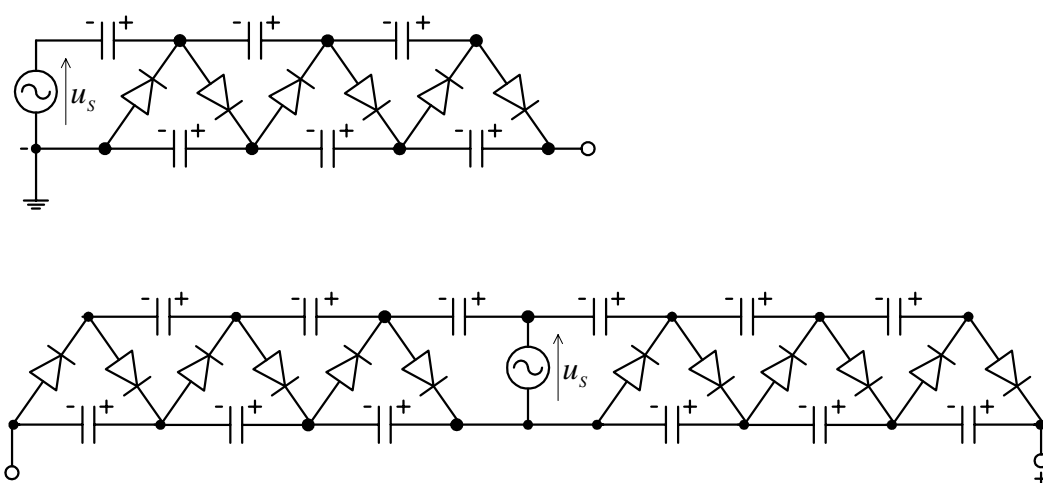
$$\tau_{s2} = (R_s \parallel R_L) \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \approx \frac{1}{2} C R_s \quad \text{dla } C_1 = C_2 = C, \quad R_s \ll R_L \quad (10.41)$$

Gdy proces ładowania pojemności C_2 (i rozładowania pojemności C_1 $\tau_{r1} = \tau_{s2}$) kończy się, dioda D_2 przestaje przewodzić i rozpoczyna się rozładowanie pojemności C_2 ze stałą czasową τ_{r2} .

$$\tau_{r2} = C_2 R_L \quad (10.42)$$

Niesymetryczny podwajacz napięcia w porównaniu z układem symetrycznym, charakteryzuje się większymi tętnieniami o dwukrotnie większej pulsacji podstawowej, większą zależnością napięcia wyjściowego od prądu obciążenia i bardziej nierównomiernym obciążeniem diod i pojemności. Natomiast jego zaletą jest istnienie wspólnego zacisku napięcia zasilania i obciążenia R_L . W obu przypadkach powielaczy napięcia, prąd obciążenia praktycznie nie przekracza dziesiątków mA.

c) Powielacze wielokrotne



Rys.10.15. Wielokrotne powielacze napięcia: a) niesymetryczne; b) symetryczne

Dodanie dalszych sekcji umożliwia zwiększenie krotności powielania, przy czym układy takie mogą mieć strukturę niesymetryczną lub symetryczną (rys.10.15).

W praktyce krotność powielacza jest ograniczona do 10, dla małych prądów, i do kilkudziesięciu, dla prądów obciążenia rzędu μA .