

## NIESTEROWANE UKŁADY PROSTOWNIKOWE

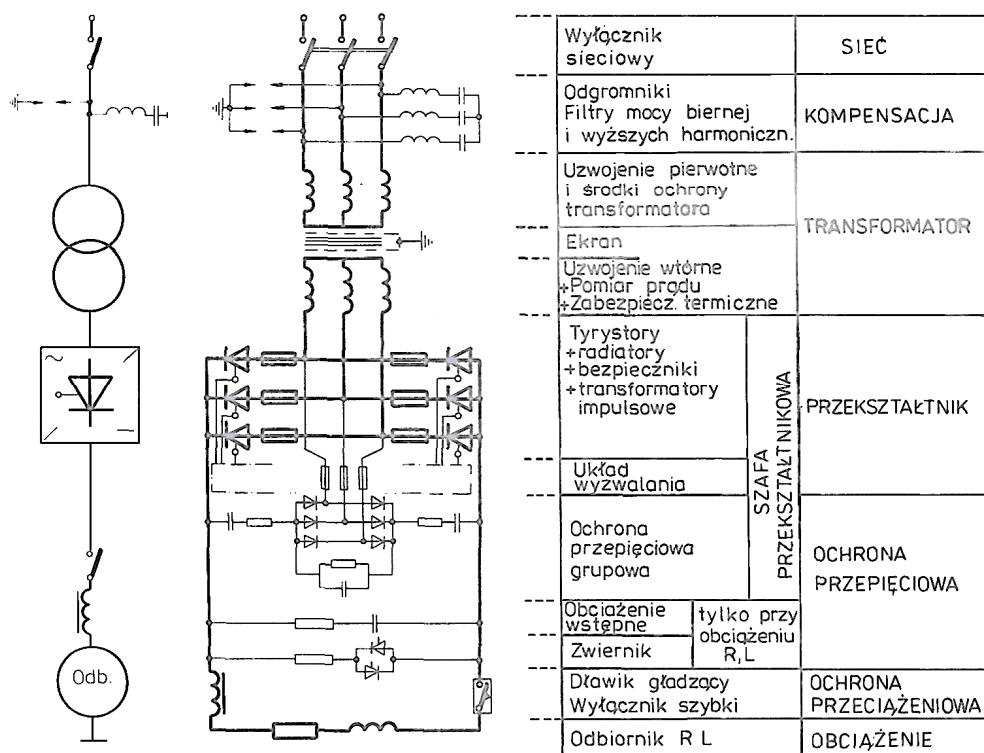
### OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PÓLPRAWODNIKOWYCH UKŁADÓW PROSTOWNIKOWYCH

Układy prostownikowe służą do przekształcania napięcia przemiennego na napięcie jednokierunkowe, nazywane zazwyczaj napięciem wyprostowanym lub stałym. Napięcie zasilające układy prostownikowe jest na ogół napięciem sinusoidalnym 3-fazowym lub 1-fazowym.

Prostowanie jest obecnie najczęściej spotykaną formą przekształcania energii elektrycznej, a półprzewodnikowe układy prostownikowe stanowią najliczniejszą grupę przekształtników. Wywodzą się z prostowników tyratronowych i ręciovych, stosowanych powszechnie jeszcze w latach sześćdziesiątych. Wspólną cechą wszystkich rodzajów półprzewodnikowych układów prostownikowych jest **komutacja zewnętrzna**, co oznacza, że energia bierna, wymagana do wyłączenia przewodzącego zaworu, jest pobierana z zewnętrznego względem przekształtnika źródła energii. Najczęściej jest nim sieć elektroenergetyczna, z którą przekształtnik współpracuje (komutacja zewnętrzna sieciowa) lub rzadziej – odbiornik, np. silnik elektryczny (komutacja zewnętrzna silnikiem).

Schemat układu prostownikowego (dużej mocy) przedstawiono na rysunku 3.1. Podstawowymi zespołami układu są:

- transformator prostownikowy,
- układ (blok) zaworów półprzewodnikowych,
- układ sterowania zaworów, gdy zawory są sterowane,
- urządzenia pomocnicze,
- układy ochronne i zabezpieczające,
- układy pomiarowe i sygnalizacyjne.



Rys. 3.1. Uproszczony schemat ideowy układu prostownikowego

**Transformator prostownikowy** (nazywany także sieciowym lub dopasowującym) speł-

nia następujące funkcje:

- dopasowuje wartość (w układach złożonych – także fazę) napięcia zasilającego układ zaworów do wymaganej wartości (i fazy) napięcia wyjściowego układu, a w układach jednokierunkowych ewentualnie także podwaja liczbę faz,
- ogranicza niekorzystne oddziaływanie przekształtnika na sieć zasilającą (zmniejsza wartość wyższych harmonicznych prądu pobieranego z sieci, a w układach jednokierunkowych także „odcina” składową stałą w prądzie sieci) oraz sieci zasilającej na przekształtnik (tłumi przepięcia atmosferyczne, łączeniowe itp., powstające w sieci, a groźne dla zaworów),
- ogranicza stromość narastania i wartość prądu w stanach przejściowych i w stanach zwarcia przekształtnika.

Układy prostownikowe niedużych mocy, głównie sterowane, mogą być zasilane z sieci bezpośrednio (bez transformatora); stosuje się wówczas **dławiki sieciowe** (bezrdzeniowe lub rdzeniowe ze szczeliną powietrzną).

**Układ zaworów** służy do przekształcania napięcia przemiennego na jednokierunkowe.

**Układ sterowania zaworów** służy do płynnej zmiany kąta załączenia tyrystorów w wymaganym zakresie regulacji napięcia wyjściowego przekształtnika.

**Urządzeniami pomocniczymi** są głównie filtry instalowane na wyjściu układu w celu ograniczenia składowej przemienną (pulsacji) prądu odbiornika, a tym samym polepszenia warunków jego pracy (odbiorniki zasilane z przekształtników są konstrukcyjnie przystosowane do zasilania napięciem wygładzonym; odkształcenie tego napięcia i w efekcie prądu odbiornika zwiększa straty mocy i uniemożliwia pełne wykorzystanie jego mocy znamionowej). W układach od średniej do najwyższej mocy rolę filtru spełnia z zasady dławik wygładzający (rdzeniowy), połączony szeregowo z odbiornikiem. W układach bardzo małej mocy stosuje się filtry *LC* o różnej konfiguracji.

**Układy ochronne i zabezpieczające** służą do:

- ochrony zaworów przekształtnika przed zniszczeniem lub uszkodzeniem (zabezpieczenia: przepięciowe, zwarciove, przeciążeniowe prądowe, przeciążeniowe temperaturowe, stromościowe narastania prądu),
- zabezpieczenia przed zakłóceniami pracy przekształtnika (stromościowe narastania napięcia) i przed oddziaływaniem wzajemnym (interakcją) obwodów przekształtnika,
- zabezpieczenia przed zakłóceniami pracy innych urządzeń (zabezpieczenia przed oddziaływaniem na sieć zasilającą tzw. układy kompensująco-filtrujące oraz przed zakłóceniami elektromagnetycznymi).

**Układy pomiarowe i sygnalizacyjne** służą do kontroli prawidłowej pracy układu prostownikowego przez pomiar jego podstawowych wielkości elektrycznych oraz sygnalizację występujących zakłóceń i uszkodzeń. Znaczenie tych układów wzrasta ze wzrostem mocy przekształtnika; na schemacie z rysunku 3.1 nie zostały one uwzględnione.

### 3.2. KLASYFIKACJA UKŁADÓW PROSTOWNIKOWYCH

Podziału układów prostownikowych dokonuje się wg różnych kryteriów, z których najczęściej stosowanymi są:

1. Podział ze względu na sterowanie:

- niesterowane (diodowe),
- sterowane, nazywane także w pełni sterowane (tyrystorowe),
- półsterowane (tyrystorowo-diodowe).

2. Podział ze względu na liczbę grup komutacyjnych (grupa komutacyjna jest to grupa ramion obwodu przekształtnikowego, w których komutacja zachodzi niezależnie od innych ramion" (PN-75/E-06073. Przekształtniki półprzewodnikowe z komutacją zewnętrzną. Ogólne wymagania i badania.), nazywanych także jednostkami komutacyjnymi lub samodzielnymi zespołami zaworo-

wymi:

- **proste** – zawierające tylko jedną grupę komutacyjną,
- **złożone** – zestawione z dwóch lub kilku grup komutacyjnych.

3. Podział ze względu na charakter pracy odbiornika zasilanego z układu prostownikowego:

- **nienawrotne** (zarówno proste, jak i złożone),
- **nawrotne**, czyli rewersyjne (tylko złożone).

4. Podział ze względu na liczbę faz  $m_1$  uzwojenia pierwotnego transformatora sieciowego:

- **1-fazowe** ( $m_1 = 1$ ),
- **3-fazowe** ( $m_1 = 3$ ).

5. Podział ze względu na liczbę faz  $m_2$  uzwojenia wtórnego transformatora sieciowego:

- **1-fazowe** ( $m_2 = 1$ ),
- **2-fazowe** ( $m_2 = 2$ ),
- **3-fazowe** ( $m_2 = 3$ ),
- **6-fazowe** ( $m_2 = 6$ ).

6. Podział ze względu na wskaźnik tętnienia (wskaźnik tętnienia  $p$  jest to charakterystyczna dla danego połączenia przekształtnikowego liczba komutacji zachodzących niejednocześnie w ciągu jednego okresu przemiennego napięcia zasilania (PN-75/E-06073. Przekształtniki półprzewodnikowe z komutacją zewnętrzną)), nazywany zazwyczaj liczbą pulsów, definiowany jako liczba półokresów napięcia wyprostowanego przypadających na jeden okres napięcia zasilającego:

- **jednopulsowe** ( $p = 1$ ),
- **dwupulsowe** ( $p = 2$ ),
- **trójpulsowe** ( $p = 3$ ),
- **sześciopulsowe** ( $p = 6$ ),
- **dwunastopulsowe** ( $p = 12$ ),
- rzadziej: **dwudziestoczeropulsowe** ( $p = 24$ ) i **trzydziestoszesciopulsowe** ( $p = 36$ ).

7. Podział ze względu na sposób połączenia uzwojenia wtórnego transformatora z układem zaworów:

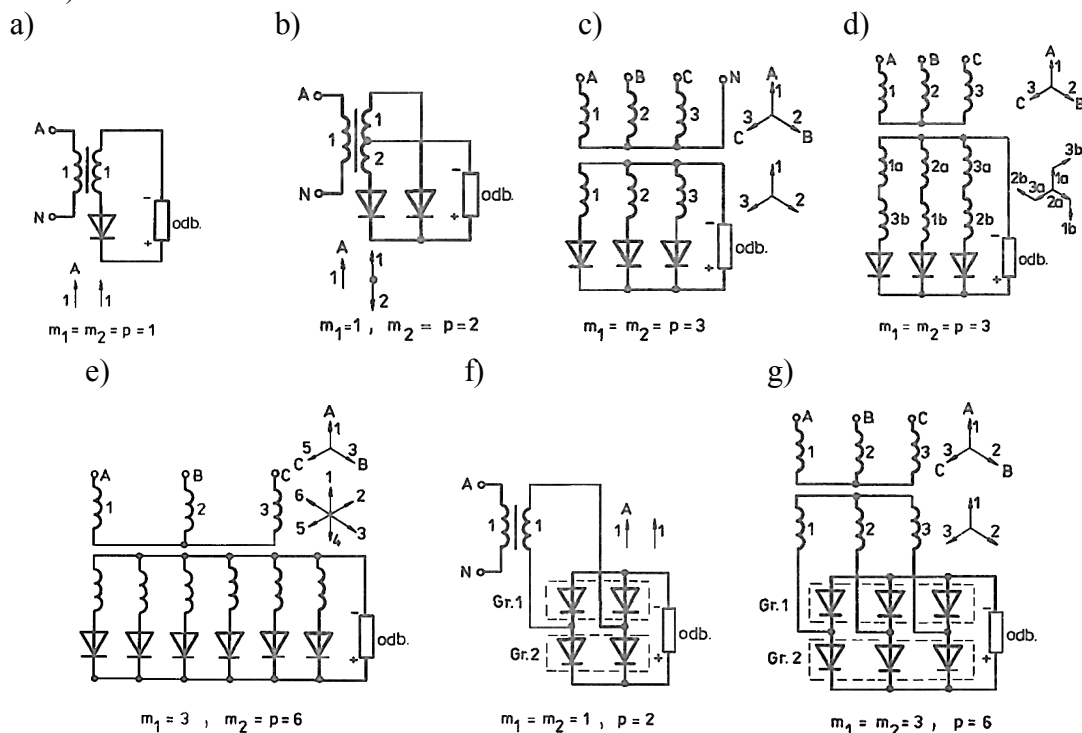
- **jednokierunkowe**, nazywane układami z punktem zerowym (przewodem neutralnym) lub – dla  $p \geq 3$  – układami gwiazdowymi,
- **dwukierunkowe (mostkowe)**.

W układach **jednokierunkowych** (rys. 3.2a,b,c,d,e) uzwojenie wtórne jest połączone w gwiazdę z wyprowadzonym punktem zerowym, będącym jednym z biegunów układu. Wolne końce uzwojenia łączy się bądź z anodami zaworów – wówczas zwarte katody stanowią biegun dodatni układu (odpowiednik konstrukcyjny stosowanych dawniej wieloanodowych zaworów rtęciowych), bądź z katodami – zwarte anody stanowią biegun ujemny (połączenie rzadko stosowane). Liczba pulsów układu jest równa liczbie faz uzwojenia wtórnego  $p = m_2$ . W czasie jednego okresu napięcia zasilającego w każdej fazie uzwojenia wtórnego przepływa tylko jeden impuls prądu (występuje stała prądu).

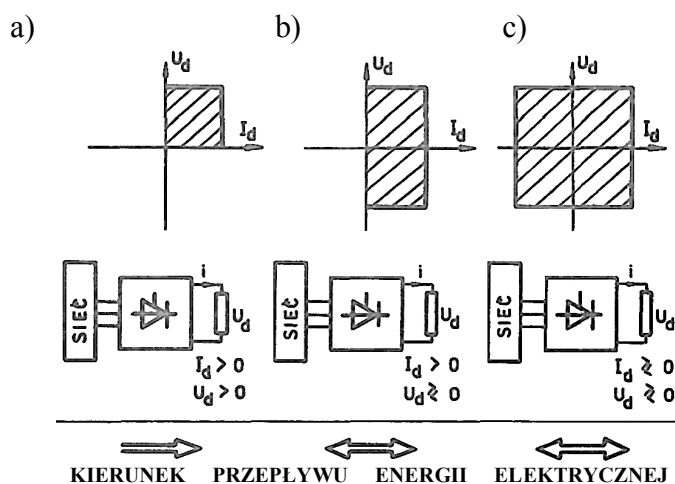
Aby w układzie trójpulsowym (rys. 3.2c) wyeliminować niepożądane podmagnesowanie rdzenia składową stałą strumienia, uzwojenia wtórne transformatora łączy się w zygzak (rys. 3.2d).

W układach **mostkowych** (rys. 3.2f,g) uzwojenie wtórne może być otwarte lub zamknięte (łączone w gwiazdę, trójkąt, zygzak, wielobok). Zawory łączone są po dwa szeregowo, a każda z faz uzwojenia wtórnego dołączona jest do katody jednego i anody drugiego z połączonych zaworów. Katody i anody poszczególnych par zaworów są zwarte i tworzą bieguny, odpowiednio, dodatni i ujemny układu. Zawory o zwartych katodach tworzą katodową grupę komutacyjną (GK), a o zwartych anodach – anodową

grupę komutacyjną (GA) przekształtnika. W pracy układów mostkowych przewodzi jednocześnie dwa zawory – jeden z GK i jeden z GA. Liczba pulsów układu  $p = 2m_2$ . W jednym okresie napięcia zasilającego przez każdą fazę uzwojenia wtórnego przepływają dwa impulsy prądu w przeciwnych kierunkach (składowa stała za okres jest równa zero).



Rys. 3.2. Uprozczone schematy oraz wykresy wskazowe napięć transformatora niesterowanych układów prostowniczych: a, b, c, d, e) układy jednokierunkowe, f, g) układy mostkowe



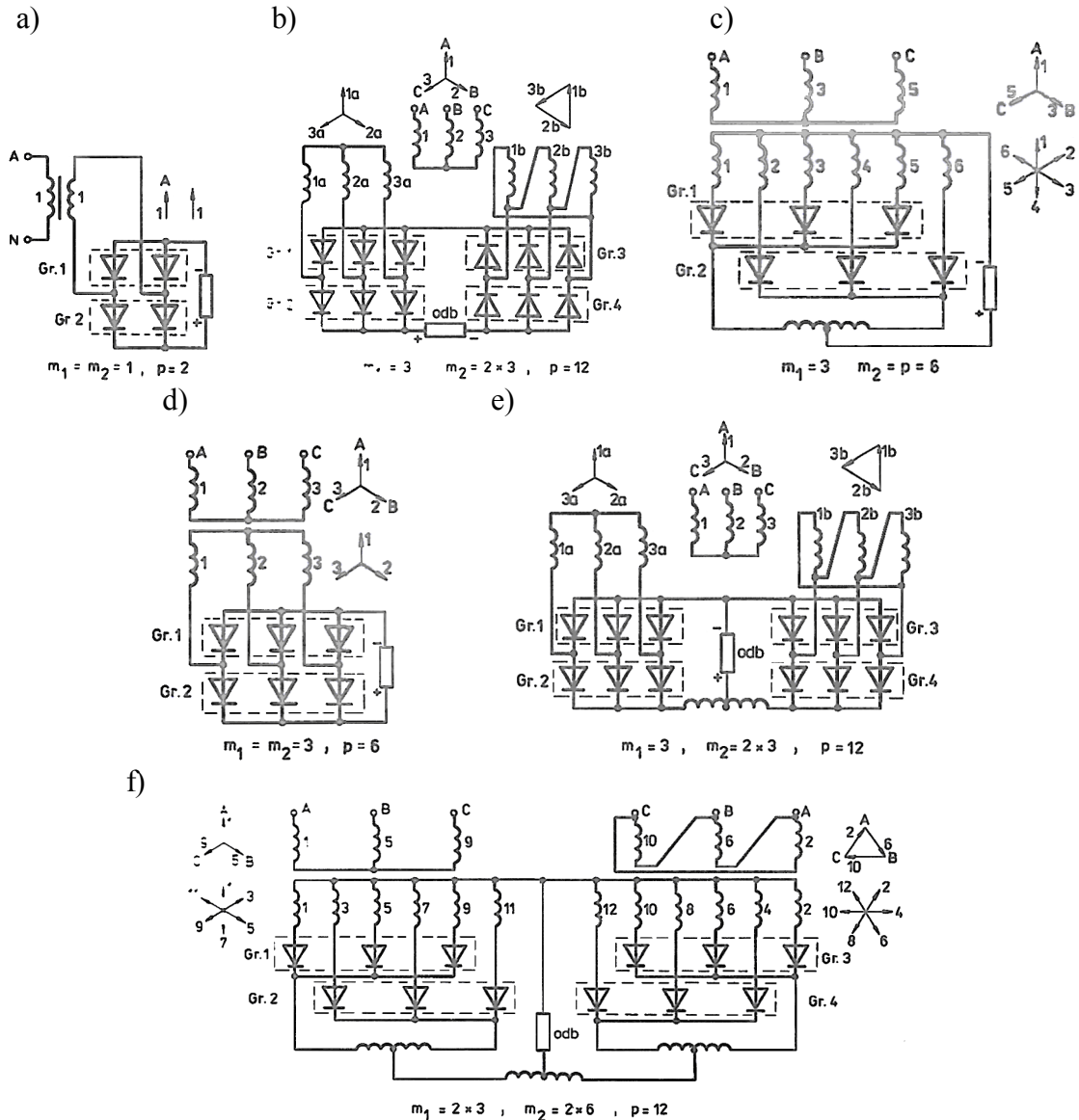
Rys. 3.3. Obszary charakterystyk zewnętrznych układów prostowniczych: a) jednokwadrantowego, b) dwukwadrantowego, c) czterkwadrantowego

8. Podział ze względu na liczbę kwadrantów (ćwiartek układu współrzędnych) charakterystyk zewnętrznych ( $U_d = f(I_d)$ ) układu:

- **jednokwadrantowe** (rys. 3.3a), które mogą pracować tylko jako prostownik, tj. z  $I_d > 0, U_d > 0$ ; przepływ energii odbywa się tylko w jednym kierunku – z sieci zasilającej napięcia przemiennego do obciążenia; należą do nich układy: o odcieciu

zerowym, mostki półsterowane i te z układów sterowanych, których zakres sterowania ograniczono tylko do pracy prostownikowej (zakres pracy falownikowej jest nie wykorzystany);

- **dwukwadrantowe** (rys. 3.3b), które mogą pracować zarówno jako prostownik, jak i falownik (przekształcanie napięcia jednokierunkowego na przemienne), tj. z  $I_d > 0$ ,  $U_d > 0$  lub  $U_d < 0$ ; przepływ energii jest możliwy w obu kierunkach przy nie zmienionym, dodatnim kierunku prądu obciążenia; zmiana kierunku przepływu energii następuje wskutek zmiany znaku napięcia wyprostowanego; układami dwukwadrantowymi mogą być wszystkie układy w pełni sterowane;
- **czterokwadrantowe** (rys. 3.3c), mogące pracować zarówno jako prostownik, jak i falownik przy obu kierunkach prądu obciążenia (np. przy obciążeniu silnikiem odpowiada to obu kierunkom jego wirowania), tj. z  $I_d > 0$  lub  $I_d < 0$ ,  $U_d > 0$  lub  $U_d < 0$ ; przepływ energii jest możliwy w obu kierunkach przy obu kierunkach prądu obciążenia; rolę układu czterokwadrantowego może spełniać układ dwukwadrantowy, wyposażony w przełącznik po stronie stałoprądowej (rozwiązania wcześniejsze, rzadko obecnie stosowane), lub układ podwójny, złożony z dwóch układów dwukwadrantowych połączonych wg odpowiedniego schematu (zob. rozdz. 6).



Rys. 3.4. Uproszczone schematy oraz wykresy wskazowe napięć transformatora niesterowanych złożonych układów prostownikowych

Ze względu na liczbę grup komutacyjnych układy prostownikowe dzielą się na proste i złożone.

**Układy proste** mają tylko jedną grupę komutacyjną, która może mieć liczbę pulsów  $p = 1, 2, 3, 6$  są więc jednocześnie układami jednokierunkowymi (rys. 3.2a,b,c,d,e). Wykonywanie układów prostych o liczbie pulsów  $p > 6$  jest nieracjonalne. Już bowiem przy  $p = 6$  każda faza uzwojenia wtórnego przewodzi prąd zaledwie przez  $1/6$  okresu napięcia zasilającego. Wskutek tego wtórne prądy fazowe (będące jednocześnie prądami zaworów) cechuje duża wartość skuteczna odniesiona do wartości średniej, czyli słabe wykorzystanie uzwojenia wtórnego i zaworów. Konieczne staje się zwiększenie mocy pozornej transformatora znacznie powyżej mocy czynnej odbiornika (zob. tabl. 3.1).

Optymalna – pod względem wykorzystania uzwojenia wtórnego – jest grupa komutacyjna o  $p = 3$ . Z takich grup jest wykonywana większość złożonych układów prostownikowych (zarówno nienawrotnych, jak i nawrotnych). Rzadko wykorzystywane są do tego celu grupy komutacyjne o  $p = 2$ .

**Układy złożone** buduje się w celu zwiększenia mocy wyjściowej przekształtnika i jednocześnie zmniejszenia pulsacji napięcia wyprostowanego (polepszenie warunków pracy odbiornika) i zmniejszenia odkształcenia prądu pobieranego z sieci (zmniejszenie niekorzystnego oddziaływania przekształtnika na sieć). Zestawia się je z dwóch lub kilku grup komutacyjnych o jednakowej liczbie pulsów (zazwyczaj trójpulsowych), zasilanych napięciami odpowiednio przesuniętymi w fazie i połączonych szeregowo lub równolegle po stronie stałoprądowej. Każda z grup układu złożonego pracuje „niezależnie” od pozostałych grup. Tę „niezależność” przy połączeniach równoległych grup zapewniają dławiki wyrównawcze, które w połączeniach szeregowych są zbędne. Najczęściej buduje się układy złożone o  $p = 6$  i  $p = 12$  – do najwyższych mocy.

Schematy częściej stosowanych niesterowanych złożonych układów prostownikowych przedstawia rysunek 3.4; są to: a) dwupulsowy układ mostkowy 1-fazowy (popularny mostek 1-fazowy, nazywany mostkiem Graetza), b) sześciopulsowy układ mostkowy 3-fazowy (mostek 3-fazowy), c) sześciopulsowy układ dwóch gwiazd trójpulsowych połączonych równolegle przez dławik wyrównawczy, d) dwunastopulsowy układ dwóch mostków 3-fazowych połączonych szeregowo, e) dwunastopulsowy układ dwóch mostków 3-fazowych połączonych równolegle przez dławik wyrównawczy, f) dwunastopulsowy układ czterech gwiazd trójpulsowych połączonych równolegle przez trzy dławiki wyrównawcze.

## METODY ANALIZY UKŁADÓW PROSTOWNIKOWYCH

### Założenia upraszczające

Celem analizy ustalonych stanów pracy układów prostownikowych jest wyznaczenie przebiegów podstawowych napięć i prądów wewnątrz układu, po stronie wyjściowej (odbiornika) oraz po stronie zasilania. Z przebiegów oblicza się wartości średnie, skuteczne i maksymalne tych wielkości i na tej podstawie dobiera się parametry elementów układu. Analizę prowadzi się na podstawie schematu zastępczego, który – odpowiednio opisany – jest słuszny dla dowolnego,  $p$ -pulsowego układu zarówno jednokierunkowego, jak i mostkowego, prostego i złożonego.

Metody analizy układów prostownikowych różnią się dokładnością odwzorowania najważniejszych – ze względu na pracę przekształtnika – parametrów układu; są nimi: indukcyjność komutacyjna  $L_k$  (zależna głównie od reaktancji rozproszenia transformatora  $L_k \approx L_{Tr}$ ) oraz indukcyjność  $L$  obwodu obciążenia. Zależnie od charakteru rozwiązywanego zagadnienia i wymaganej dokładności wyników przyjmuje się jeden z trzech następujących zestawów założeń upraszczających:

1. Zakłada się idealnie bezindukcyjny układ zasilania i bardzo dużą indukcyjność obwodu obciążenia, tj.  $L_k = 0$ ,  $L \rightarrow \infty$ . Prąd obciążenia jest wówczas idealnie wygładzony, komutacja (przejmowanie prądu obciążenia od zaworu kończącego przewodzenie przez zawór rozpoczynający przewodzenie) przebiega natychmiast (skokowo), prądy zaworów mają przebieg prostokątny (rys. 3.19a), a charakterystyki zewnętrzne są idealnie sztywne. Taka metoda analizy, nazwana idealizowaną, bardzo prosta i wygodna w stosowaniu, jest wykorzystywana w obliczeniach szacunkowych stanów ustalonych, głównie do doboru prądowego transformatora i zaworów.

2. Przyjmuje się także bardzo dużą indukcyjność obciążenia, lecz indukcyjność komutacyjna ma wartość rzeczywistą, czyli  $L_k > 0$ ,  $L \rightarrow \infty$  ( $L/L_k \rightarrow \infty$ ). Komutacja zachodzi wówczas w czasie skończonym, prądy zaworów mają przebieg jak na rysunku 3.19b, a charakterystyki zewnętrzne (w pracy prostownikowej) są opadające. Metoda oparta na takich założeniach, nazywana konwencjonalną, jest dokładniejsza od poprzedniej, dostatecznie prostawet do obliczeń „ręcznych” i stosowana w analizie stanów ustalonych. W szczególności służy do doboru napięciowego transformatora i zaworów oraz do obliczeń oddziaływania przekształtnika na sieć zasilającą.

3. Przyjmuje się rzeczywiste wartości obu indukcyjności układu, tj.  $L_k > 0$ ,  $L \geq 0$  ( $0 \leq L/L_k < \infty$ ). Obliczanie stanów ustalonych, aczkolwiek dokładniejsze, jest teraz bardziej czasochłonne. Możliwe jest natomiast obliczanie stanów dynamicznych, procesów przejściowych, stanów zakłóceń oraz napięć i prądów w zakresie przewodzenia przerywanego prądu obciążenia. Metoda, nazywana dokładną, jest preferowana szczególnie do obliczeń komputerowych.

W każdej z metod przyjmuje się ponadto kilka wspólnych założeń upraszczających, których wpływ na dokładność wyników jest zazwyczaj mało znaczący; pomija się:

- rezystancję  $R_L$  linii zasilającej układ,
- rezystancję  $R_{Tr}$  uzwojeń i prąd  $I_\mu$  biegu jałowego transformatora ( $R_{Tr}$  uwzględnia się ewentualnie tylko w układach małej mocy),
- napięcie przewodzenia  $u_T$  i prąd wsteczny  $i_R$  zaworu (zawór idealny).

## ZALEŻNOŚCI OPISUJĄCE NIESTEROWANE JEDNOKIERUNKOWE UKŁADY PROSTOWNIKOWE

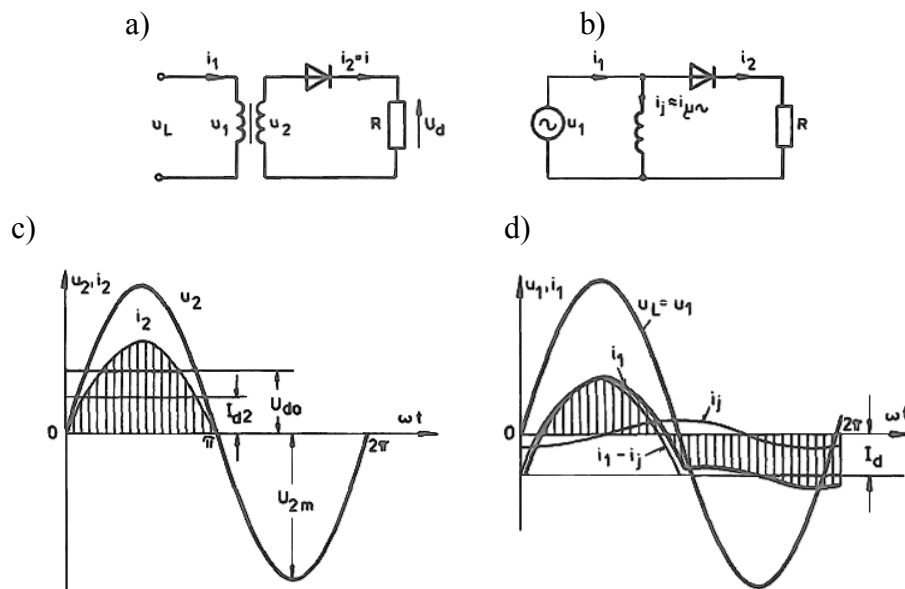
### UKŁAD JEDNOSPULSOWY

Analizę wszystkich rodzajów niesterowanych układów prostownikowych można wykonać na podstawie wspólnego schematu zastępczego. Ze względów dydaktycznych przedstawiono ją jednak oddzielnie dla układów jednokierunkowych i układów mostkowych.

Najprostszym układem jednokierunkowym jest układ jednopulsowy. Ma on liczne wady, stąd rzadko bywa stosowany, do zasilania odbiorników o mocy tylko do ok. 1 kW. Ze względu na nieciągłość przebiegu napięcia wzory ogólne na wartości średnie i skuteczne napięć i prądów tego układu mają postać różną od wzorów dla układów o  $p = 2,3,6$ . Dla wprowadzenia podstawowych pojęć z zakresu układów prostownikowych przedstawiono analizę pracy układu jednopulsowego tylko przy obciążeniu rezystancyjnym.

Schemat oraz przebiegi napięć i prądów w układzie przedstawiono na rysunku 3.5. Przyjęto następujące założenia upraszczające:

- linia zasilająca jest idealna ( $R_L = 0$ ,  $X_L = 0$ ),
- rezystancje i reaktancje rozproszenia uzwojeń transformatora są równe zero ( $R_1 = R_2 = 0$ ,  $X_1 = X_2 = 0$ ), a jego przekładnia wynosi jeden,
- dioda jest elementem idealnym ( $u_F = 0$ ,  $i_R = 0$ ).



Rys. 3.5. Niesterowany prostownik jednopulsowy obciążony R: a) uproszczony schemat układu, b) schemat zastępczy, c, d) przebiegi napięcia i prądów uzwojeń pierwotnego i wtórnego

W ustalonym stanie pracy układu prąd (impulsowy) uzwojenia wtórnego (jednocześnie prąd obciążenia  $i_2 = i$ ) zawiera składową stałą  $I_d$  i składową przemienną  $i_{2\sim}$  (rys. 3.5d):

$$i_2 = I_d + i_{2\sim} \quad (3.1)$$

Zatem prąd magnesujący obciążonego transformatora zawiera także składową stałą  $I_{d\mu}$  i składową przemienną  $i_{\mu\sim}$ :

$$i_{\mu} = I_{d\mu} + i_{\mu\sim} \quad (3.2)$$

Prąd pierwotny jest sumą prądu wtórnego (przeliczonego na stronę pierwotną  $i_2 = i'_2$ ) i prądu magnesującego, czyli:

$$i_1 = I_d + i_{2\sim} + I_{d\mu} + i_{\mu\sim} \quad (3.3)$$

Ponieważ w stanie ustalonym  $I_{d\mu} = -I_d$ , to:

$$i_1 = i_{2\sim} + i_{\mu\sim} \quad (3.4)$$

Po podstawieniu (3.1) do (3.4) otrzymuje się:

$$i_1 = i_2 + i_{\mu\sim} - I_d \quad (3.5)$$

a po pominięciu strat w stali transformatora, czyli przyjęciu, że  $i_j \approx i_{\mu\sim}$ , prąd pierwotny wyraża zależność:

$$i_1 = i_j + i_2 - I_d \quad (3.6)$$

której odpowiada schemat zastępczy na rysunku 3.5b.

Prąd  $i_1$  w uzwojeniu pierwotnym zasilany napięciem przemiennym (sinusoidalnym)  $u_1$  jest także prądem przemiennym (o wartości średniej w okresie równej zero), ale odkształconym (niesinusoidalnym). Zawiera dwie składowe – składową obciążenia i składową biegu jałowego  $i_j$ , co pokazuje rysunek 3.5c. Składowa obciążenia jest równa różnicy prądu wtórnego i składowej stałej (wartości średniej) tego prądu ( $i_2 - I_d$ ).

Silne odkształcenie prądu pierwotnego i obecność składowej stałej w prądzie wtórnym są głównymi wadami układu jednopulsowego. Należy zauważyć, że składowa stała w prądzie wtórnym jest wspólną wadą wszystkich układów jednokierunkowych; jej kompensację w układach o  $m_2 = 3$  osiąga się przez łączenie tego uzwojenia w zygzak (rys. 3.2.c).



Dioda jest spolaryzowana przepustowo i przewodzi w czasie dodatniej półfali napięcia wtórnego, tj. w czasie  $0 < \omega t < \pi$ . Przebieg napięcia wyprostowanego, będący przy obciążeniu  $R$  także przebiegiem prądu obciążenia, ilustruje rysunek 3.5d. Przy sinusoidalnym napięciu zasilania  $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$  wartość średnia (składowa stała) napięcia wyprostowanego liczona w okresie wynosi:

$$U_{d0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\pi} U_{2m} \approx 0,45U_2 \quad (3.7)$$

a jego wartość skuteczna:

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m}^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{1}{2} U_{2m} \approx 0,707U_2 \quad (3.8)$$

Wyrażenia na wartość średnią i skuteczną prądu wyprostowanego przy obciążeniu  $R$  mają, odpowiednio, postać:

$$I_{d0} = \frac{U_{d0}}{R} = \frac{1}{\pi} I_{2m} \approx 0,45I_2 \quad (3.9)$$

oraz:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1}{2} I_{2m} \approx 0,707I_2 \quad (3.10)$$

gdzie:

$$I_{2m} = \frac{U_{2m}}{R}$$

Odształcenie napięć i prądów wyprostowanych opisuje się m.in. współczynnikami:

– **kształtu**, definiowanym jako stosunek wartości skutecznej do wartości średniej napięcia lub prądu wyprostowanego:

$$k_{ku} = \frac{U}{U_{d0}}, \quad k_{ki} = \frac{I}{I_{d0}} \quad (3.11)$$

– **pulsacji**, określanym jako stosunek wartości skutecznej składowejprzemiennej do wartości średniej napięcia lub prądu wyprostowanego:

$$k_{pu} = \frac{U_p}{U_{d0}} = \sqrt{\frac{U^2 - U_{d0}^2}{U_{d0}^2}} = \sqrt{k_{ku}^2 - 1} \quad (3.12a)$$

oraz:

$$k_{pi} = \frac{I_p}{I_{d0}} = \sqrt{\frac{I^2 - I_{d0}^2}{I_{d0}^2}} = \sqrt{k_{ki}^2 - 1} \quad (3.12b)$$

Moc średnia, ściśle: moc czynna składowej stałej (zob. rozdz. 7.4), przekazywana przez układ prostownikowy do odbiornika wynosi:

$$P_{d0} = U_{d0} I_{d0} \quad (3.13)$$

Prądy w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym transformatora są niesinusoidalne, a prąd wtórny zawiera ponadto składową stałą (rys. 3.5d) o wartości:

$$I_{d2} = I_{d0} \quad (3.14)$$

przy wartości skutecznej:

$$I_2 = I = \frac{1}{2} I_{2m} \quad (3.15)$$

Zależność między prądami  $I_2$  oraz  $I_{d0}$  ma postać:

$$I_2 = \frac{\pi}{2} I_{d0} \quad (3.16)$$

Wartość skuteczną prądu uzwojenia pierwotnego wyznacza się z zależności (3.6); po pominięciu prądu biegu jałowego transformatora wzór definicyjny ma postać:

$$I_1 = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_2 - I_d)^2 d(\omega t)} \quad (3.17)$$

Ponieważ  $i_2 = I_{2m} \sin \omega t$ , to:

$$I_1 = \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} I_{d0} \approx 1,21 I_{d0} \quad (3.18)$$

Moc pozorna (obliczeniowa) uzwojenia wtórnego:

$$S_2 = U_2 I_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} U_{d0} \frac{\pi}{2} I_{d0} = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} P_{d0} \approx 3,49 P_{d0} \quad (3.19)$$

a uzwojenia pierwotnego:

$$S_1 = U_1 I_1 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} U_{d0} \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} I_{d0} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} P_{d0} \approx 2,69 P_{d0} \quad (3.20)$$

Transformator prostownikowy charakteryzują współczynniki wykorzystania uzwojeń: wtórnego i pierwotnego:

$$k_{w2} = \frac{P_{d0}}{S_2} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{2\sqrt{2}}} \approx 0,29 \quad (3.21)$$

$$k_{w1} = \frac{P_{d0}}{S_1} = \frac{1}{\frac{\pi}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1}} \approx 0,37 \quad (3.22)$$

Różnica wartości obu współczynników wynika z różnych przebiegów prądów obu uzwojeń.

Moc pozorną (obliczeniową, typową, wagową) transformatora przyjęto określać jako średnią arytmetyczną mocy pozornej obu uzwojeń:

$$S_{Tr} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \left( \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} + \frac{\pi}{2} \right) P_{d0} \approx 3,09 P_{d0} \quad (3.23)$$

Nie ma ona sensu fizycznego i służy jedynie do wyznaczenia wymiarów geometrycznych rdzenia. Współczynnik wykorzystania transformatora:

$$k_{wTr} = \frac{P_{d0}}{S_{Tr}} = \frac{1}{\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \left( \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} + \frac{\pi}{2} \right)} \approx 0,32 \quad (3.24)$$

i świadczy o bardzo słabym jego wykorzystaniu w układzie jednopulsowym.

Wartości średnia i skuteczna prądu diody są równe odnośnym wartościom prądu wtórnego, a tym samym także prądu obciążenia:

$$I_{F(AV)} = I_{d2} = I_{d0} \quad (3.25)$$

oraz:

$$I_{F(RMS)} = I_2 = I \quad (3.26)$$

a wartość maksymalna tego prądu jest równa wartości maksymalnej prądu wyprostowanego:

$$I_{FM} = I_{2m} = \frac{U_{2m}}{R} \quad (3.27)$$

Szczytowe napięcie wsteczne diody w układzie jednokierunkowym:

$$U_{RWM} = U_{2m} = \pi U_{d0} \quad (3.28)$$

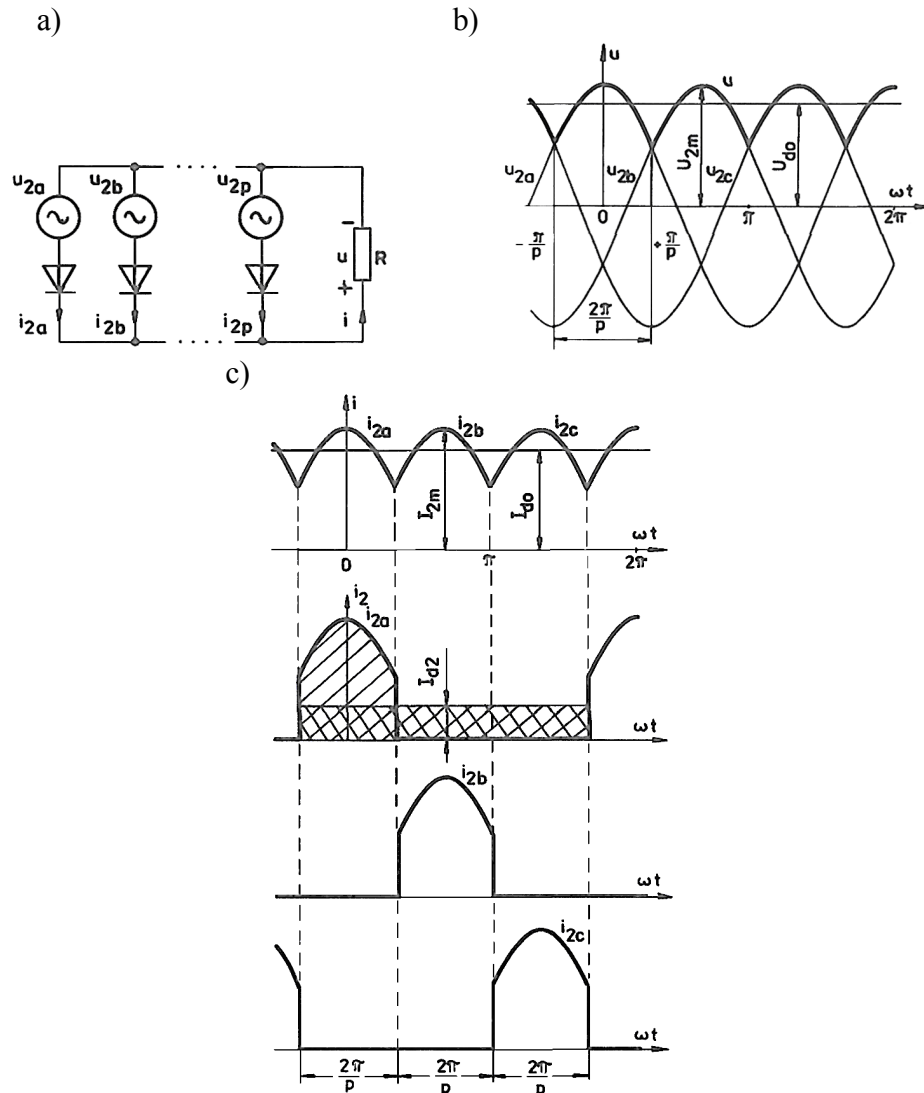
## UKŁADY $p$ -PULSOWE

### Obciążenie R

W układach jednokierunkowych liczba pulsów jest równa liczbie faz uzwojenia wtórnego  $p = m2$ . Dla założeń upraszczających przyjmowanych w metodzie idealizowanej (zob. rozdz. 3.3), tj. gdy:

- rezystancja i reaktancja linii zasilającej są równe zero:  $R_L = 0$ ,  $X_L = 0$  (linia idealna),
- rezystancja uzwojeń, reaktancja rozproszenia i prąd biegu jałowego transformatora są równe zero:  $R_{Tr} = 0$ ,  $X_{Tr} = 0$  i  $I_j = 0$  (transformator idealny),
- napięcie przewodzenia i prąd wsteczny diod są równe zero:  $u_F = 0$ ,  $i_R = 0$  (diody idealne),

układ prostownikowy jest bezstratny. Założono także, że parametry obciążenia są stałe w czasie. Schemat oraz przebiegi napięć i prądów w takim układzie  $p$ -pulsowym obciążonym rezystancją pokazuje rysunek 3.6 (przebiegi odpowiadają układowi trójpulsowemu).



Rys. 3.6. Jednokierunkowy idealizowany niesterowany układ prostownikowy obciążony R:

- a) schemat zastępczy układu, b) przebiegi napięć,  
c) przebieg prądu obciążenia, d) przebiegi prądów zaworów

Każda z faz uzwojenia wtórnego o napięciu  $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$  pracuje samodzielnie

w czasie  $2\pi/p$ . Napięcie wyprostowane  $u_d$  jest pulsujące i składa się z wierzchołkowych części sinusoid napięć fazowych wtórnych.

W ustalonym stanie pracy wartość średnią (składową stałą) napięcia wyprostowanego (dla punktu zerowego czasu przyjętego jak na rysunku) wyznacza się z zależności:

$$U_{d0} = \frac{p}{2\pi} \int_{-\pi/p}^{\pi/p} U_{2m} \cos \omega t d(\omega t) = U_{2m} \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \quad (3.29)$$

a jego wartość skuteczną wyraża wzór:

$$U = \sqrt{\frac{p}{2\pi} \int_{-\pi/p}^{\pi/p} U_{2m}^2 \cos^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{1}{2} U_{2m} \sqrt{2 + \frac{p}{\pi} \sin \frac{2\pi}{p}} \quad (3.30)$$

Prąd obciążenia ma przebieg identyczny z przebiegiem napięcia wyprostowanego, stąd jego wartość średnia:

$$I_{d0} = I_{2m} \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \quad (3.31)$$

a wartość skuteczną:

$$I = \frac{1}{2} I_{2m} \sqrt{2 + \frac{p}{\pi} \sin \frac{2\pi}{p}} \quad (3.32)$$

gdzie:

$$I_{2m} = \frac{U_{2m}}{R}$$

Współczynniki kształtu i pulsacji napięcia wyprostowanego i prądu obciążenia wyznacza się z wzorów definicyjnych (3.11) i (3.12). Także moc średnią (moc czynną składowej stałej) przekazywaną do odbiornika wyraża wzór ogólny (3.13).

Prądy w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym są niesinusoidalne, a prąd wtórny zawiera także składową stałą o wartości:

$$I_{d2} = \frac{1}{p} I_{d0} \quad (3.33)$$

Wartość skuteczną wtórnego prądu fazowego wyznacza się z zależności:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/p}^{\pi/p} I_{2m}^2 \cos^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{1}{2} I_{2m} \sqrt{\frac{2}{p} + \frac{1}{\pi} \sin \frac{2\pi}{p}} \quad (3.34)$$

Zależność między prądami  $I_2$  oraz  $I_{d0}$  wyraża związek:

$$I_2 = I_{d0} \frac{\pi}{\sqrt{2}p} \sqrt{\frac{1}{p \sin^2 \frac{\pi}{p}} + \frac{1}{\pi \operatorname{tg} \frac{\pi}{p}}} \quad (3.35)$$

W obliczeniach przybliżonych układów o  $p \geq 3$  można często pomijać pulsację prądu obciążenia (nie wnosi to znaczącego błędu). Wówczas prąd wtórny ma przebieg prostokątny o wartości maksymalnej  $I_{d0}$ , a jego wartość skuteczną:

$$I_2 \approx \frac{1}{\sqrt{p}} I_{d0} \quad (3.36)$$

Wartość skuteczną prądu fazy uzwojenia pierwotnego po pominięciu prądu biegu jałowego transformatora w układach o  $m_1 = m_2$  oblicza się z wzoru definicyjnego (3.17). W układach o  $m_1 \neq m_2$  postać wzoru zależy od sposobu połączeń transformatora [6,21,31,32].

Moc pozorna (obliczeniowa) uzwojenia wtórnego i pierwotnego:

$$S_2 = m_2 U_2 I_2 \quad (3.37)$$

oraz:

$$S_1 = m_1 U_1 I_1 \quad (3.38)$$

Wzory na współczynniki wykorzystania obu uzwojeń mają następującą postać ogólną:

$$k_{w2} = \frac{P_{d0}}{S_2} = \frac{U_{d0} I_{d0}}{m_2 U_2 I_2} < 1 \quad (3.39)$$

oraz:

$$k_{w1} = \frac{P_{d0}}{S_1} = \frac{U_{d0} I_{d0}}{m_1 U_1 I_1} < 1 \quad (3.40)$$

W układach jednokierunkowych oba współczynniki mają różne wartości z powodu różnego przebiegu prądu w obu uzwojeniach; zawsze jest  $k_{w1} > k_{w2}$ . Moc pozorną transformatora wyznacza się z wzoru:

$$S_{Tr} = \frac{S_1 + S_2}{2} \quad (3.41)$$

a współczynnik jego wykorzystania określa zależność:

$$k_{wTr} = \frac{P_{d0}}{S_{Tr}} = \frac{2k_{w1}k_{w2}}{k_{w1} + k_{w2}} \quad (3.42)$$

Wartości średnia i skuteczna prądu diod są równe odnośnym wartościom prądu wtórnego i wynoszą:

$$I_{F(AV)} = I_{d2} = \frac{1}{p} I_{d0} \quad (3.43)$$

oraz:

$$I_{F(RMS)} = I_2 \approx \frac{1}{\sqrt{p}} I_{d0} \quad (3.44)$$

Wartość maksymalną prądu diody określa zależność (3.27). Szczytowe napięcie wsteczne diody wynosi:

– dla  $p = 2$  i  $p = 3$ :

$$U_{RWM} = 2 \sin \frac{\pi}{p} U_{2m} = \frac{2\pi}{p} U_{d0} \quad (3.45a)$$

– dla  $p = 6$ :

$$U_{RWM} = 2U_{2m} = \frac{2\pi}{p \sin \frac{\pi}{p}} U_{d0} = \frac{2\pi}{3} U_{d0} \quad (3.45b)$$

### Obciążenie RL

Indukcyjność w obwodzie obciążenia może być zawarta w odbiorniku (np. cewka elektromagnesu, uzwojenie twornika lub wzbudzenia maszyny prądu stałego) lub stanowi niezależny element układu (np. dławik wygładzający).

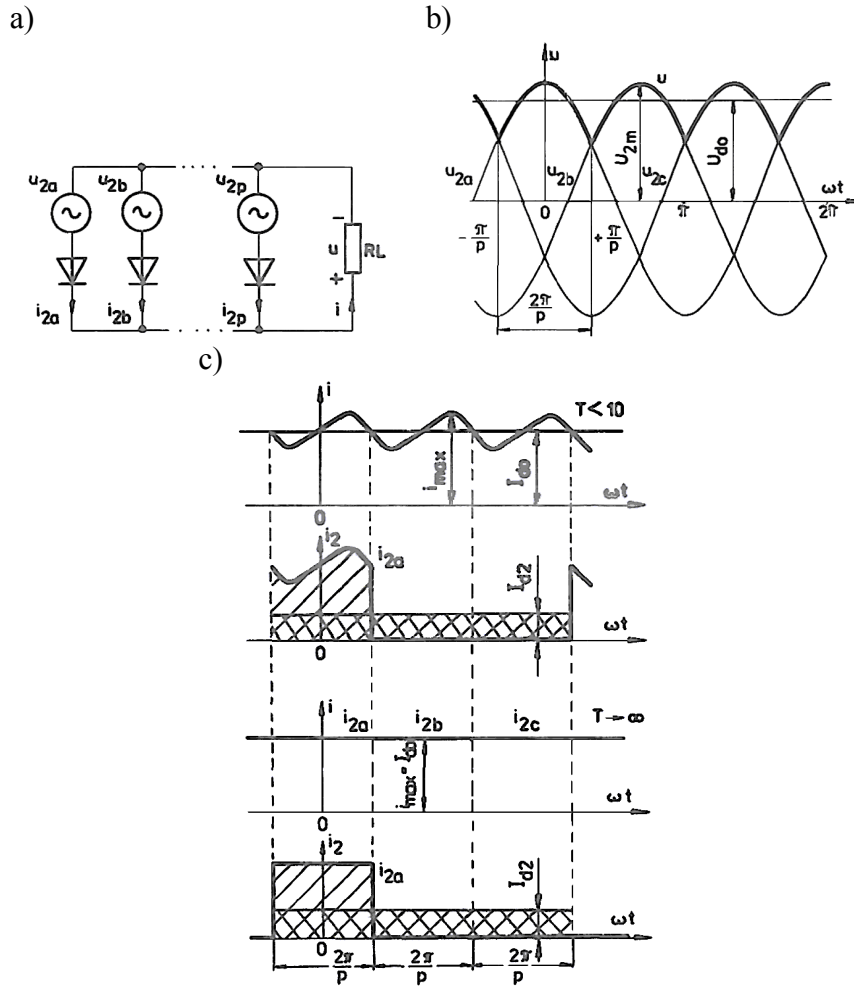
Dla przyjętych założeń upraszczających napięcie wyprostowane przy obciążeniu  $RL$  ma (dla układów o  $p \geq 2$ ) przebieg identyczny z przebiegiem przy obciążeniu  $R$ , zatem wartości średnią i skuteczną tego napięcia oblicza się z wzorów (3.29) i (3.30).

Przebieg prądu wyprostowanego zależy natomiast od wartości zastępczej stałej czasowej elektromagnetycznej  $T = L/R$  obwodu obciążenia (rys. 3.7). Gdy  $T \rightarrow \infty$  (wystarczy, że  $T > 10$ ), prąd obciążenia jest praktycznie wygładzony dla mniejszych wartości  $T$  – prąd ma przebieg pulsujący, przy czym kształt i wartość pulsacji zależą od wartości  $T$ .

Analizę pracy układu prowadzi się zazwyczaj metodą idealizowaną (zob. rozdz. 3.3), przyjmując założenie  $T \rightarrow \infty$ , a następnie porównuje się wyniki z drugim skrajnym przypadkiem obciążenia, tj.  $T = 0$  (obciążenie  $R$ ).

Przy założeniu  $T \rightarrow \infty$  wartość średnia prądu wyprostowanego jest równa jego wartości skutecznej  $I_{d0} = I$ . Zatem współczynnik kształtu prądu jest równy jeden, a współczynniki

kształtu i pulsacji napięcia wyrażają się wzorami odpowiednio (3.11) i (3.12).



Rys. 3.7. Jednokierunkowy idealizowany niesterowany układ prostownikowy obciążony  $RL$  :  
 a) schemat zastępczy układu, b) przebiegi napięć, c) przebiegi prądów obciążenia i zaworu dla  $T < 10$ , d) przebiegi prądów obciążenia i zaworu dla  $T \rightarrow \infty$

Czas pracy każdej fazy uzwojenia wtórnego (identycznie jak przy obciążeniu  $R$ ) wynosi  $2\pi/p$ , czyli prąd uzwojenia wtórnego, równy prądowi zaworu, jest prostokątem o wysokości  $i_{\max} = I_{d0} = I = I_{FM}$  i podstawie  $2\pi/p$ . Jego wartość średnia  $I_{d2} = I_{F(AV)}$  wyraża się wzorem (3.43), a wartość skuteczna:

$$I_{F(RMS)} = I_2 = \frac{1}{\sqrt{p}} I_{d0} \quad (3.46)$$

W obliczeniach prądu pierwotnego, mocy pozornej strony pierwotnej i wtórnej, mocy typowej transformatora oraz współczynników wykorzystania transformatora i jego uzwojeń obowiązują zależności ogólne podane dla obciążenia  $R$ . Po podstawieniu do wzoru (3.46) dla  $m_1 = m_2$  otrzymuje się postać szczegółową wzorów na:

– prąd uzwojenia pierwotnego:

$$I_1 = \frac{1}{w} \sqrt{I_2^2 - I_{d2}^2} = \frac{1}{w} \frac{\sqrt{p-1}}{p} I_{d0} \quad (3.47)$$

– moc pozorną strony wtórnej:

$$S_2 = m_2 U_2 I_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2p} \sin \frac{\pi}{p}} P_{d0} \quad (3.48)$$

- współczynnik wykorzystania uzwojenia wtórnego:

$$k_{w2} = \frac{P_{d0}}{S_2} = \frac{\sqrt{2p}}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \quad (3.49)$$

- moc pozorną strony pierwotnej:

$$S_1 = m_1 U_1 I_1 = \frac{\sqrt{p-1}}{2} \frac{\pi}{p \sin \frac{\pi}{p}} P_{d0} \quad (3.50)$$

- współczynnik wykorzystania uzwojenia pierwotnego:

$$k_{w1} = \frac{P_{d0}}{S_1} = \sqrt{\frac{2}{p-1}} \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \quad (3.51)$$

- moc obliczeniową transformatora:

$$S_{Tr} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{\sqrt{p} + \sqrt{p-1}}{2\sqrt{2}} \frac{\pi}{p \sin \frac{\pi}{p}} P_{d0} \quad (3.52)$$

- współczynnik wykorzystania transformatora:

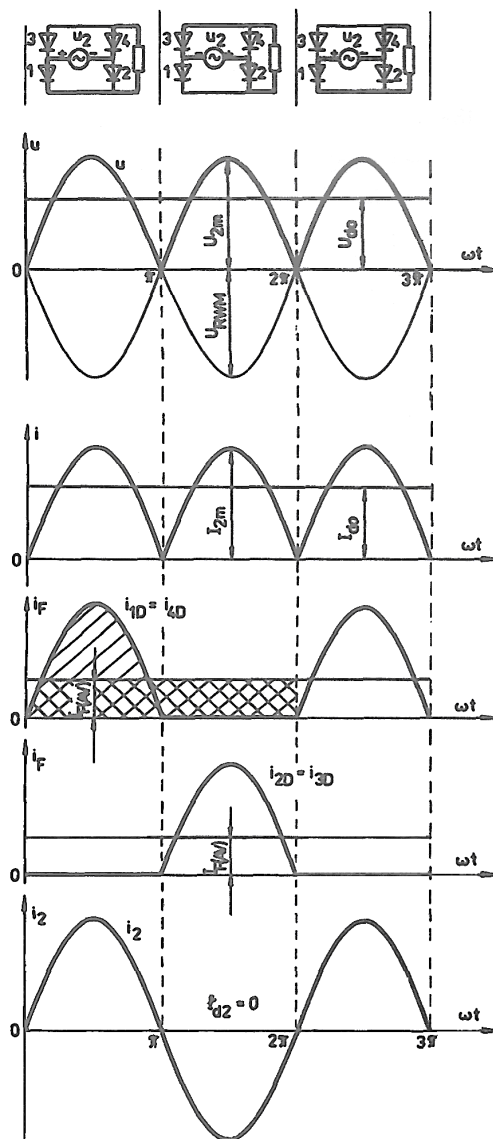
$$k_{wTr} = \frac{P_{d0}}{S_{Tr}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{p} + \sqrt{p-1}} \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \quad (3.53)$$

Maksymalne napięcie wsteczne diody oblicza się odpowiednio ze wzorów (3.45).

## ZALEŻNOŚCI OPISUJĄCE NIESTEROWNE MOSTKOWE UKŁADY PROSTOWNIKOWE

Układy mostkowe składają się z szeregowo połączonych dwóch grup komutacyjnych o jednakowej liczbie pulsów; w mostku 1-fazowym są to grupy dwuzaworowe (rys. 3.2f), a w mostku 3-fazowym – grupy trójzaworowe (rys. 3.2g). Napięcie zasilające jest doprowadzone do połączeń anod zaworów grupy katodowej z katodami zaworów grupy anodowej, jest więc dla obu grup przesunięte w czasie. Kąt przesunięcia w mostku 1-fazowym wynosi  $\pi$ , a w mostku 3-fazowym  $\pi/3$ . Układy mostkowe mogą być zasilane z sieci bezpośrednio lub przez transformator sieciowy.

Napięcie wyjściowe układu mostkowego jest sumą napięć wyjściowych obu grup komutacyjnych, a liczba pulsów napięcia jest równa podwojonej liczbie faz uzwojenia wtórnego:  $p = m_2$ .



Rys. 3.8. Ilustracja działania 1-fazowego niesterowanego mostka prostownikowego, obciążonego  $R$  :  
 a) przebieg napięcia wyprostowanego, b) przebieg prądu wyprostowanego,  
 c, d) przebiegi prądów zaworów, e) przebieg prądu uzwojenia wtórnego transformatora

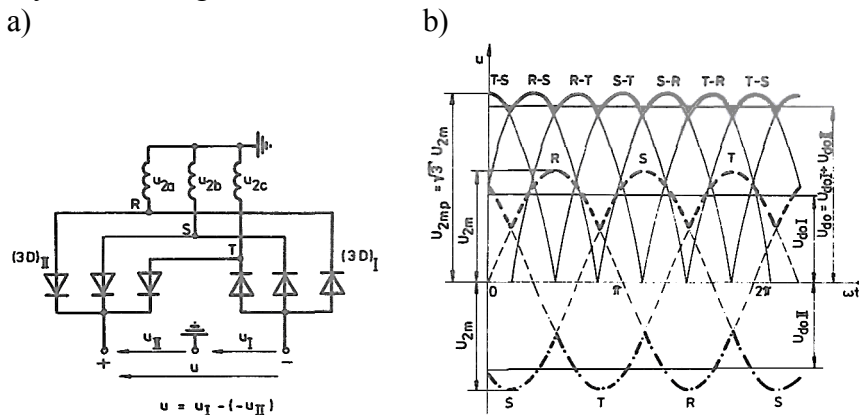
Działanie idealizowanego mostka 1-fazowego, obciążonego rezystancją, ilustruje rysu-



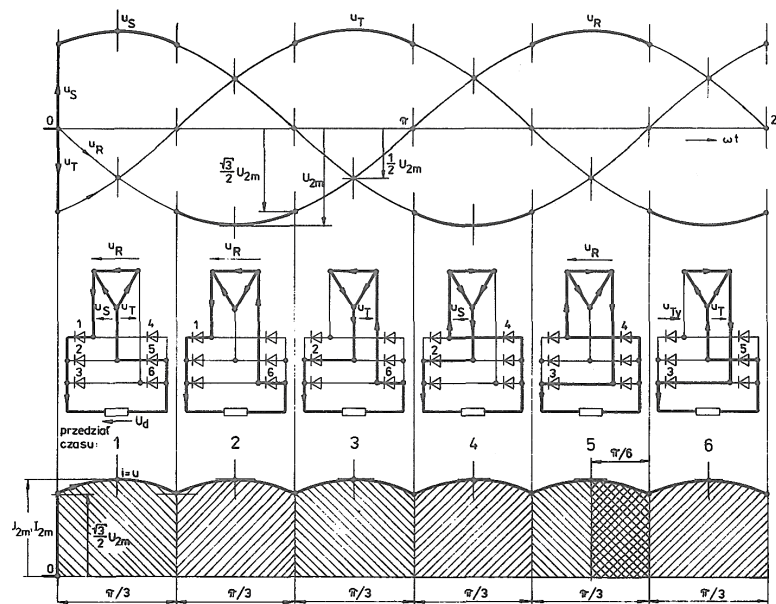
nek 3.8. Diody przewodzą na przemian parami – jedna z grupy katodowej i jedna z anodowej. W okresie napięcia zasilającego każda dioda przewodzi przez pół okresu.

Najczęściej wykorzystywaną topologią niesterowanego układu prostownikowego jest **mostek 3-fazowy**. Racjonalne jest jego stosowanie do zasilania odbiorników od małej poprzez średnią do dużej mocy. Jest zbudowany z dwóch jednokierunkowych trójpulsowych układów (gwiazd 3-fazowych) – rysunek 3.9. Sposób połączenia uzwojeń transformatora sieciowego może być dowolny i nie wpływa na pracę układu. Działanie mostka 3-fazowego obciążonego rezystancją ilustruje rysunek 3.10. Każda dioda przewodzi nieprzerwanie przez  $1/3$  okresu napięcia zasilającego, tj. przez  $2\pi/3$  (przez pozostałe  $2/3$  okresu jest polaryzowana wstecznie), przy czym co  $\pi/3$  zmienia się współpracująca z nią dioda z grupy przeciwnej. Konfiguracja połączeń zaworów zmienia się zatem w okresie sześciokrotnie; układ jest **układem sześciopulsowym**.

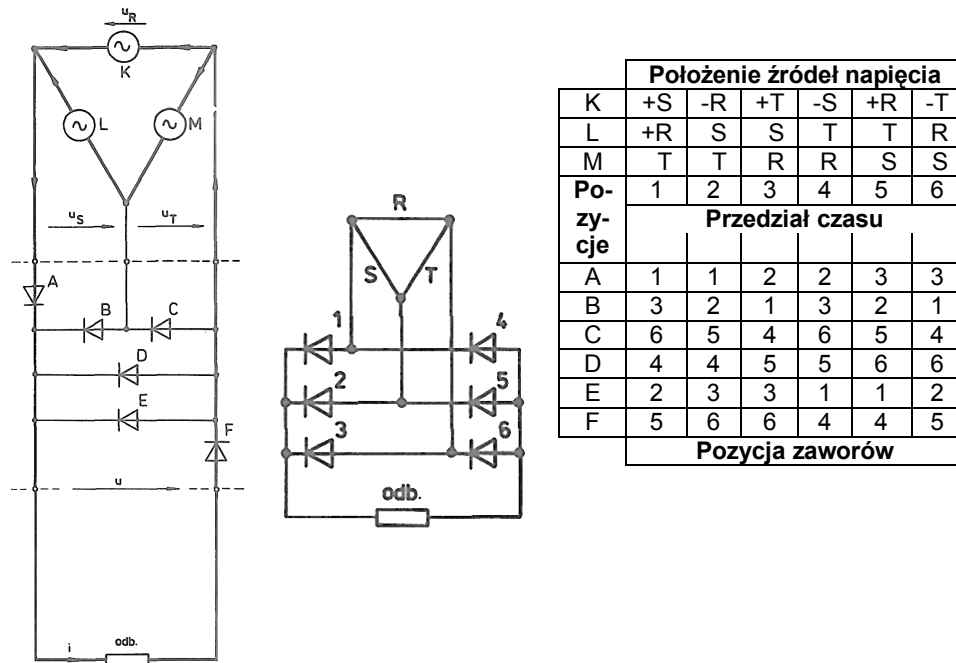
Każdą z sześciu następujących po sobie konfiguracji schematu mostka można sprowadzić do wspólnego schematu uogólnionego, jak na rysunku 3.11. Zawiera on: dwa zawory przewodzące prąd obciążenia, dwa spolaryzowane wstecznie pełnym napięciem zasilającym i dwa, także nieprzewodzące, połączone szeregowo. Schemat taki pozostaje stały w pełnym cyklu pracy (okresie napięcia zasilania), natomiast zmieniają się pozycje elementów schematów (źródeł napięcia i zaworów) – zgodnie z tablicą obok schematu. Takie ujęcie jest przydatne szczególnie w modelowaniu układów.



Rys. 3.9. Interpretacja 3-fazowego niesterowanego mostka prostownikowego: a) schemat; b) przebiegi napięcia wyprostowanego



Rys. 3.10. Ilustracja działania 3-fazowego niesterowanego mostka prostownikowego



Rys. 3.11. Schemat uogólniony 3-fazowego niesterowanego mostka prostownikowego

Jak wynika z rysunków 3.8-3.10, przebieg napięcia wyprostowanego w układach mostkowych jest taki sam jak w odnośnych układach jednokierunkowych o podwójnej liczbie faz uzwojenia wtórnego i wynika z przebiegu napięć zasilających przewodowych (a nie fazowych). Tak więc wartości średnie i skuteczne napięć i prądów można obliczać z zależności obowiązujących dla układów jednokierunkowych, podstawiając:

$$2m_2 \text{ zamiast } p \text{ oraz } U_{2mp} \text{ zamiast } U_{2m} \quad (3.54)$$

Prąd uzwojenia wtórnego transformatora (zob. rys. 3.8e) jest symetryczny (nie zawiera składowej stałej), stąd przebiegi prądów obu uzwojeń są identyczne, niezależnie od charakteru obciążenia układu. Wartość skuteczną prądu pierwotnego wyraża teraz wzór:

$$I_1 = \frac{1}{w} I_2 \quad (3.55)$$

Identyczność przebiegów obu prądów sprawia, że moc obliczeniowa obu uzwojeń oraz moc typowa transformatora są zawsze sobie równe (dla dowolnego sposobu połączeń uzwojeń transformatorów 3-fazowych):

$$S_1 = S_2 = S_{Tr} \quad (3.56)$$

a współczynniki wykorzystania uzwojeń i transformatora są wyższe niż w układach jednokierunkowych.

Wartości średnia i skuteczna prądu zaworu są równe połowie odnośnych wartości prądu uzwojenia wtórnego, czyli:

$$I_{F(AV)} = \frac{1}{2} I_{d2} \Big|_{(0-2\pi/p)} \quad (3.57)$$

oraz:

$$I_{F(RMS)} = \frac{1}{2} I_2 \quad (3.58)$$

Układy mostkowe w porównaniu z jednokierunkowymi cechuje ponadto dwukrotnie mniejsze napięcie wsteczne zaworów przy tej samej wartości napięcia wyprostowanego  $U_{d0}$ .