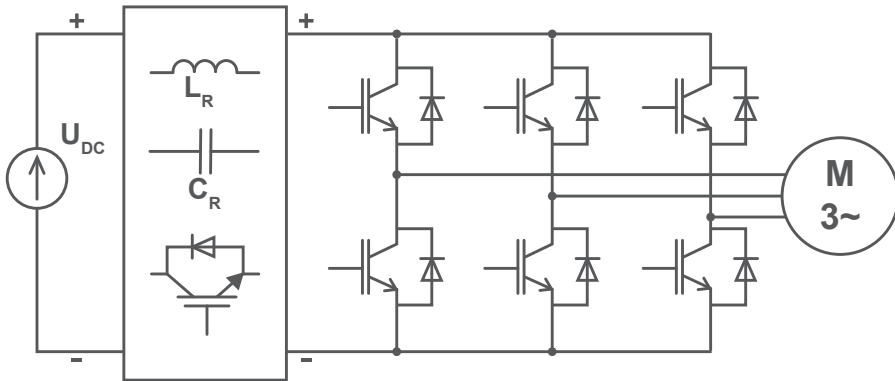


Marek Turzyński

# FALOWNIKI NAPIĘCIA

## Z QUASI-REZONANSOWYM OBWODEM POŚREDNICZĄCYM W UKŁADACH NAPĘDOWYCH



Gdańsk 2021

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Dariusz Mikielawicz*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Michał Szydłowski*

RECENZENCI

*Piotr Chrzan*

*Jacek Rąbkowski*

REDAKCJA JĘZYKOWA

*Agnieszka Frankiewicz*

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI

*Wioleta Lipska-Kamińska*

Wydanie I – 2020

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem  
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej,  
Gdańsk 2021

ISBN 978-83-7348-822-9

# SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	5
1. WSTĘP .....	7
1.1. Rys historyczny rozwoju napędu elektrycznego .....	7
1.2. Koncepcja napędu elektrycznego .....	8
1.3. Przedmiot oraz struktura monografii .....	13
2. KOMUTACJA TWARDA W DWUPOZIOMOWYM FALOWNIKU NAPIĘCIA .....	14
2.1. Wprowadzenie .....	14
2.2. Proces włączania i wyłączania tranzystora w dwupoziomowym falowniku mostkowym .....	16
2.3. Straty przełączenia w układach o komutacji twardej .....	19
2.4. Sprawność trójfazowego mostkowego falownika napięcia .....	22
2.5. Inne negatywne efekty wynikające z twardej komutacji tranzystorów falownika i metody ich redukcji .....	28
3. FALOWNIKI MIĘKKO PRZEŁĄCZALNE .....	34
3.1. Wstęp .....	34
3.2. Klasyfikacja falowników miękko przełączalnych .....	36
3.3. Przegląd wybranych struktur falowników napięcia z rezonansowym i quasi-rezonansowym równoległym obwodem pośredniczącym napięcia stałego .....	49
3.3.1. Struktura bazowa BRDCLI .....	49
3.3.2. Układy rezonansowe z aktywnym ograniczaniem napięcia $u_F$ .....	51
3.3.3. Układy quasi-rezonansowe z aktywnym ograniczaniem napięcia $u_F$ .....	55
3.3.4. Układy z pasywnym ograniczaniem napięcia $u_F$ .....	58
3.3.5. Układy quasi-rezonansowe z równoległym obwodem rezonansowym ....	60
3.3.6. Badania symulacyjne wybranych topologii układów PRDCLI .....	67
4. NAPIĘCIE WSPÓLNE I PRĄDY ŁOŻYSKOWE W UKŁADACH NAPĘDOWYCH Z FALOWNIKAMI NAPIĘCIA Z KOMUTACJĄ TWARDAŁ .....	71
4.1. Obwody przepływu prądów zaburzeń wspólnych .....	71

4.2. Mechanizm powstawania napięcia wspólnego w układzie napędowym z mostkowym falownikiem napięcia .....	72
4.3. Model impedancji silnika dla składowej wspólnej .....	76
4.4. Prądy łożyskowe .....	85
4.5. Metody ograniczenia napięcia wspólnego i efektów związanych z jego oddziaływaniem .....	88
5. PRZEMIENNIK CZĘSTOTLIWOŚCI Z QUASI-REZONANSOWYM OBWODEM POŚREDNICZĄCYM .....	104
5.1. Napięcie wspólne w układach typu PQRDCLI .....	104
5.2. Falownik napięcia z quasi-rezonansowym obwodem pośredniczącym z dwoma łącznikami izolacyjnymi .....	109
5.2.1. Opis matematyczny układu dla silnikowego trybu pracy .....	110
5.2.2. Podokresy pracy układu w trybie generatorowym .....	117
5.2.3. Strategia sterowania .....	120
5.2.4. Dobór podstawowych parametrów układu .....	124
5.3. Układ eksperymentalny .....	126
5.3.1. Układ sterowania z modulatorem VSDM .....	126
5.3.2. Stanowisko laboratoryjne .....	128
5.3.3. Przebiegi operacyjne układu .....	130
5.3.4. Napięcia i prądy falownika oraz właściwości EMC .....	132
5.3.5. Przebiegi wysokoczęstotliwościowych prądów i napięć .....	135
5.3.6. Analiza sprawności układu .....	140
5.4. Porównanie proponowanej topologii z innymi rozwiązaniami przekształtników PQRDCLI .....	142
6. PODSUMOWANIE .....	146
6.1. Wnioski oraz dalsze perspektywy rozwoju układów PQRDCLI do zastosowań w układach napędowych .....	146
7. DODATEK .....	148
7.1. Wartość średnia i skuteczna prądu wejściowego falownika $i_O$ .....	148
7.2. Analiza wartości napięcia wspólnego $u_{N\_PE}$ w stanie przerwy beznapięciowej w układzie przekształtnika PQRDCLI z dwoma tranzystorami separującymi $T_1, T_4$ .....	150
7.3. Analiza teoretyczna sprawności przekształtnika PQRDCLI .....	152
BIBLIOGRAFIA .....	156
STRESZCZENIE W JĘZ. POLSKIM .....	167
STRESZCZENIE W JĘZ. ANGIELSKIM .....	167

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

## Oznaczenia ogólne

- $x, x(t)$  – wartość chwilowa
- $X$  – składowe stałe
- $\hat{I}$  – wielkość estymowana

## Napięcia

- $u_{A\_PE}$  – napięcie wyjściowe falownika w fazie A mierzone względem uziemienia
- $u_{AB}$  – przewodowe napięcie wyjściowe mierzone pomiędzy fazami A i B falownika
- $U_{C1}$  – napięcie pojemności pomocniczej  $C_1$
- $U_{DC}$  – źródło napięcia stałego
- $u_F$  – napięcie wejściowe falownika
- $u_{N\_PE}$  – napięcie wspólne
- $u_{SH}$  – napięcie wałowe

## Prądy

- $i_A$  – prąd wyjściowy falownika w fazie A
- $i_{CR}$  – prąd kondensatora rezonansowego
- $i_{LR}$  – prąd cewki rezonansowej
- $I_{LR(max)}$  – wartość maksymalna prądu cewki rezonansowej
- $I_{LR(min)}$  – wartość minimalna prądu cewki rezonansowej
- $i_O$  – prąd obciążenia
- $i_{PE}$  – prąd w przewodzie PE
- $I_{PE(max)}$  – wartość maksymalna prądu w przewodzie PE
- $i_{SH}$  – prąd wałowy maszyny elektrycznej
- $I_{SH(max)}$  – wartość maksymalna prądu wałowego

## Inne wielkości

- $C_1$  – pojemność pomocnicza
- $C_{BRG}$  – pojemność łożyska
- $C_F$  – pojemność kondensatora w obwodzie pośredniczącym

---

$C_{p1}, C_{p2}$	– pojemności doziemne
$C_{PE}$	– pojemność pomiędzy uziemionym korpusem a punktem neutralnym uzwojeń stojana połączonych w gwiazdę
$C_R$	– pojemność kondensatora rezonansowego
$C_{RK}$	– pojemność pomiędzy wałem a uziemionym korpusem maszyny elektrycznej
$C_{SK}$	– pojemność pomiędzy zaciskami stojana a uziemionym korpusem maszyny elektrycznej
$C_{SR}$	– pojemność pomiędzy zaciskami uzwojeń stojana a wałem maszyny elektrycznej
$f_s$	– częstotliwość przełączeń tranzystorów falownika
$L_R$	– indukcyjność cewki rezonansowej
$P_C$	– straty przewodzenia
$P_{DYN}$	– straty przełączania
$P_{TF}$	– straty przewodzenia tranzystorów falownika
$T_S$	– okres przełączeń tranzystorów falownika
$T_Z$	– czas opadania napięcia
$Z_C$	– impedancja składowej wspólnej

### Skróty

A, B, C	– oznaczenia faz napięcia wyjściowego falownika
CM	– składowa wspólna (ang. <i>common mode</i> )
$D_F$	– diody w mostku falownika
F	– falownik
IGBT	– tranzystor bipolarny z izolowaną bramką (ang. <i>insulated gate bipolar transistor</i> )
K	– korpus maszyny elektrycznej
M	– maszyna elektryczna
MOSFET	– tranzystor polowy z izolowaną bramką (ang. <i>metal oxide semiconductor field effect transistor</i> )
P	– prostownik
PDM	– modulacja gęstości impulsów (ang. <i>pulse-density modulation</i> )
PE	– uziemienie ochronne (ang. <i>protective earthing</i> )
PQRDCLI	– falownik napięcia z quasi-rezonansowym obwodem pośredniczącym (ang. <i>parallel quasi-resonant DC-link inverter</i> )
PWM	– modulacja szerokości impulsów (ang. <i>pulse-width modulation</i> )
R	– wał maszyny elektrycznej
S	– początek połączonych w gwiazdę uzwojeń stojana maszyny elektrycznej
$T_F$	– tranzystory falownika
V	– obwód pośredniczący
ZCS	– przełączanie w stanach bezprądowych (ang. <i>zero-current switching</i> )
ZVS	– przełączanie w stanach beznapięciowych (ang. <i>zero-voltage switching</i> )

## 1.1. Rys historyczny rozwoju napędu elektrycznego

Początki rozwoju napędu elektrycznego datowane są pierwszą połowę XIX wieku i wiążą się z opracowaniem pierwszych silników prądu stałego przez Moritza Hermanna Jacobiego (1834 r. – komutatorowy silnik prądu stałego zasilany z baterii elektrycznej), a także Thomasa Davenporta (1834 r. – silnik prądu stałego), który opracowany silnik wykorzystał m.in. do napędu zabawki – kolejki elektrycznej, wiertarki, tokarki i prasy drukarskiej [45]. Znaczący wkład w rozwój napędu elektrycznego wniósł Ernst Werner von Siemens, który w 1879 r. zbudował pierwszy model lokomotywy elektrycznej, następnie w 1880 r. windę o napędzie elektrycznym, w 1881 r. tramwaj elektryczny zaprezentowany na ulicach Berlina, a w 1882 r. pierwszy na świecie trolejbus o nazwie Elektromote. Kolejny znaczący krok w rozwoju napędu elektrycznego wiąże się z wynalezieniem w 1888 r. przez Nikołę Teslę trójfazowego silnika indukcyjnego z wirnikiem klatkowym [1]. Ze względu na brak komutatora maszyny indukcyjne cechują się większą niezawodnością niż maszyny prądu stałego, jednak ich powszechne wykorzystanie ograniczył ówczesnie brak efektywnych metod regulacji prędkości obrotowej, która w silniku indukcyjnym (oraz synchronicznym) wynika bezpośrednio z częstotliwości napięcia zasilającego [45]. W rezultacie pojawiają się rozwiązania takie, jak np. zaprezentowany w 1891 r. przez Harry'ego Warda Leonarda układ wykorzystujący silnik prądu zmiennego do napędu prądnicy prądu stałego, która z kolei została wykorzystana do zasilania wykonawczego silnika prądu stałego. Silnik indukcyjny stał się jednak podstawowym rodzajem maszyny elektrycznej znajdującej zastosowanie w aplikacjach przemysłowych pracujących ze stałą prędkością obrotową. Pod koniec XIX wieku, ze względu na swobodną możliwość regulacji prędkości obrotowej, jako dominujący typ silnika stosowanego do napędu pojazdów wykorzystywano silnik prądu stałego. Obserwuje się dynamiczny rozwój motoryzacji opartej na napędzie elektrycznym: w 1899 r. samochód elektryczny La Jamais Contente jako pierwszy na świecie pojazd przekracza barierę 100 km/h, a w 1900 r. zostaje zaprezentowany pierwszy na świecie samochód z hybrydowym napędem spalinowo-elektrycznym projektu Ferdynanda Porsche'a. Dynamiczny rozwój samochodów z silnikiem benzynowym oraz wprowadzenie do masowej produkcji samochodu Ford Model T w 1908 r. zahamowały rozwój samochodów

elektrycznych. W efekcie napęd elektryczny znajduje zastosowanie głównie w aplikacjach przemysłowych, sprzęcie AGD oraz szeroko rozumianym transporcie (kolej, komunikacja miejska, statki i okręty).

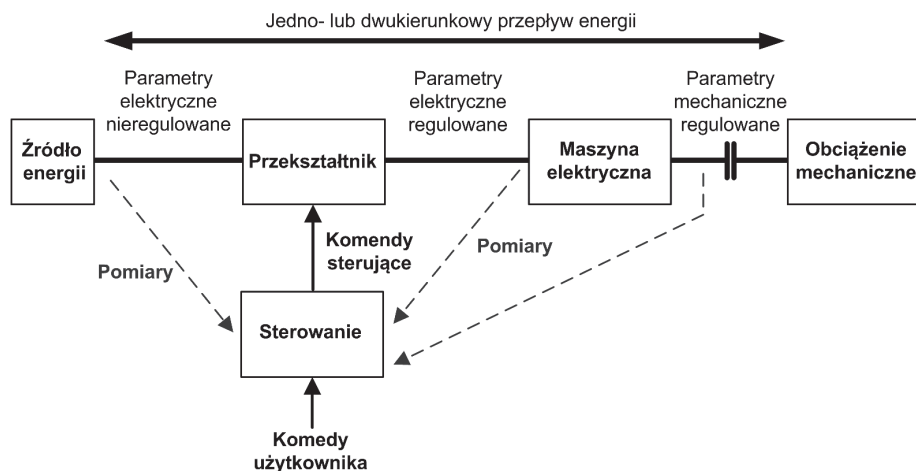
Zaistniałe w latach 70. XX wieku kryzysy energetyczne, jak również dynamiczny rozwój od drugiej połowy XX wieku metod przetwarzania energii z wykorzystaniem układów energoelektrycznych doprowadziły do zintensyfikowania prac nad nową generacją napędów elektrycznych [115]. W rezultacie napędy elektryczne oparte na silnikach prądu stałego zostają stopniowo wypierane przez rozwiązania wykorzystujące silniki prądu przemiennego (indukcyjne i synchroniczne), współpracujące z przekształtnikami energoelektrycznymi. Równoległe następuje dynamiczny rozwój zaawansowanych metod sterowania umożliwiających pełną kontrolę układu napędowego. Ocenia się, że obecnie ponad 70% produkowanych przekształtników energoelektrycznych wykorzystywanych jest w napędach elektrycznych [28, 115]. Dalszemu upowszechnieniu zastosowań napędów elektrycznych, szczególnie w dziedzinie motoryzacji i transportu (w tym lotniczego), sprzyjają przesłanki ekonomiczne oraz rozwój technologiczny ukierunkowany na ochronę klimatu i redukcję emisji CO<sub>2</sub> [85].

## 1.2. Koncepcja napędu elektrycznego

Tematyka elektrycznych układów napędowych z przekształtnikami energoelektrycznymi obejmuje szereg zagadnień z zakresu maszyn elektrycznych, metod sterowania, energoelektroniki i cyfrowego przetwarzania sygnałów [1, 85]. Na rys. 1.1 przedstawiono schemat blokowy elektrycznego układu napędowego z przekształtnikiem energoelektrycznym. Dostarczana ze źródła zasilania energia elektryczna o nieregulowanych parametrach przekształcana jest za pomocą przekształtnika energoelektrycznego w energię o regulowanych parametrach odpowiadających wymaganiom maszyny elektrycznej. Następnie energia elektryczna przekształcana jest za pomocą maszyny elektrycznej w energię mechaniczną o kontrolowanych parametrach, zgodnie z wymaganiami obciążenia o charakterze mechanicznym. Jednocześnie parametry mechaniczne, tj. moment i prędkość obrotowa, mogą być swobodnie zadawane i kontrolowane zgodnie z oczekiwaniami użytkownika.

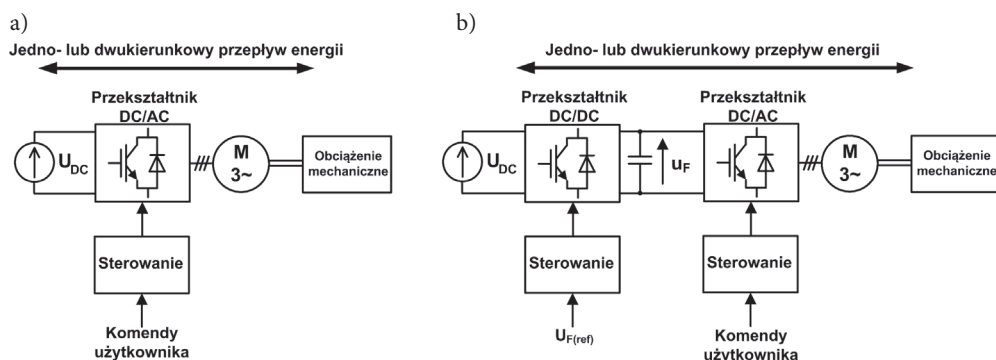
Struktura układu napędowego determinowana jest przez rodzaj zasilanej maszyny elektrycznej oraz właściwości i parametry zastosowanego źródła zasilania. Czynniki te decydują również o liczbie i rodzaju stosowanych przekształtników energoelektrycznych, co przekłada się także na możliwość dwukierunkowego przepływu energii, tj. od źródła zasilania do obciążenia lub od obciążenia do źródła zasilania.





Rys. 1.1. Schemat blokowy elektrycznego układu napędowego z przekształtnikiem energoelektronicznym

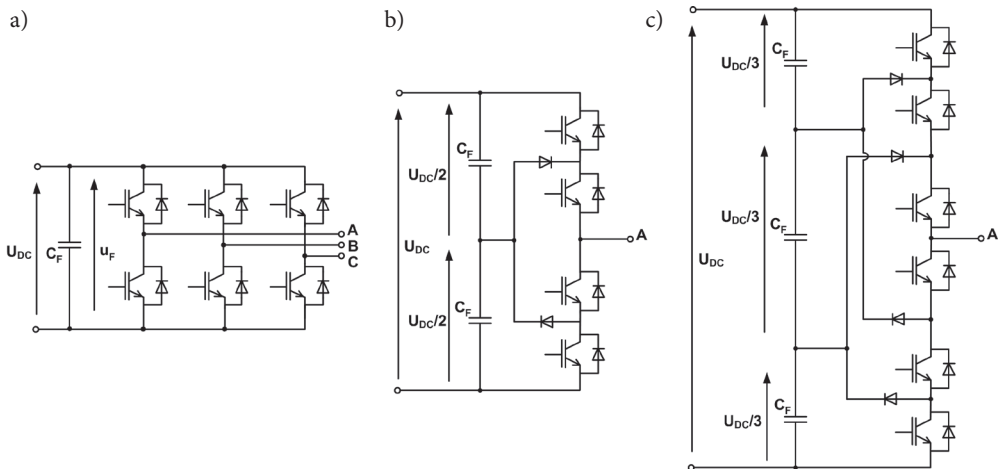
Najpowszechniej obecnie stosowane układy napędowe z trójfazowymi maszynami prądu przemiennego najczęściej zasilane są ze źródeł napięcia stałego w postaci baterii ogniwo elektrochemicznych (np. w samochodach elektrycznych) lub też z sieci zasilających napięcia stałego lub przemiennego (np. trakcja kolejowa, aplikacje przemysłowe). Bezpośrednie połączenie przekształtnika DC/AC ze źródłem napięcia stałego  $U_{DC}$  (rys. 1.2a) jest możliwe, o ile parametry źródła zasilania  $U_{DC}$  są wystarczające do zapewnienia poprawnej pracy przekształtnika DC/AC oraz gwarantują zasilanie silnika M energią elektryczną o wymaganych parametrach. Najczęściej jednak konieczna jest wstępna konwersja napięcia  $U_{DC}$  do wymaganego poziomu  $U_{F(ref)}$ , co realizuje się za pomocą dodatkowego przekształtnika DC/DC (rys. 1.2b). W takim przypadku dwukierunkowy przepływ energii wymaga zastosowania dwukierunkowego przekształtnika DC/DC.



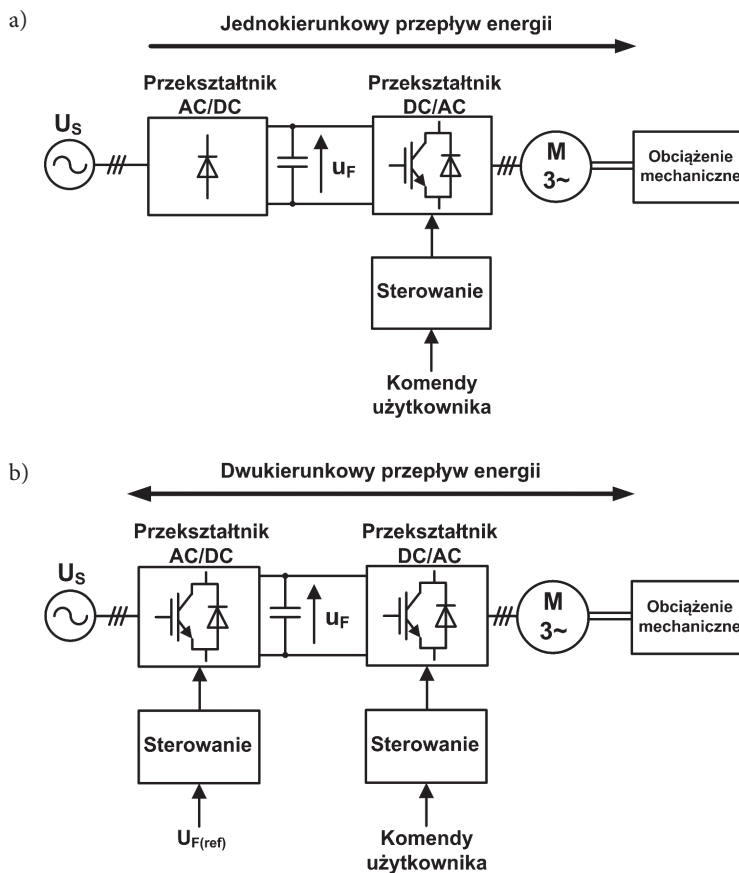
Rys. 1.2. Schematy blokowe elektrycznego układu napędowego z trójfazowym silnikiem prądu przemiennego zasilanym ze źródła napięcia stałego  $U_{DC}$ : a) bez przekształtnika DC/DC; b) z przekształtnikiem DC/DC

Podstawowym zadaniem przekształtnika DC/AC jest konwersja napięcia stałego na napięcie przemiennie o regulowanych parametrach. W typowych układach napędowych jako przekształtniki DC/AC najczęściej stosuje się trójfazowe dwupoziomowe mostkowe falowniki napięcia (rys. 1.3a), jednak w aplikacjach średniej i dużej mocy spotykane są również falowniki wielopoziomowe (rys. 1.3b, c). W porównaniu z falownikami dwupoziomowymi falowniki wielopoziomowe umożliwiają m.in. pracę z wyższymi napięciami zasilania, co przekłada się na większą dostępną moc wyjściową, oraz zapewniają korzystniejszy kształt napięcia wyjściowego [64, 133]. Do wad falowników wielopoziomowych należy zaliczyć przede wszystkim złożoną strukturę, co może skutkować podwyższoną awaryjnością. Stosowane obecnie układy falowników DC/AC są urządzeniami zapewniającymi dwukierunkowy przepływ energii.

Zastosowanie źródła napięcia przemiennego  $U_S$  w układach napędowych z pośrednimi przemiennikami częstotliwości wymaga użycia przekształtnika AC/DC, umożliwiającego konwersję napięcia przemiennego na napięcie stałe (rys. 1.4). Jako przekształtnik AC/DC najczęściej wykorzystuje się diodowy mostek prostowniczy z niesterowanym napięciem wyjściowym i o jednokierunkowym przepływie energii (rys. 1.4a). Alternatywą dla prostownika diodowego jest sterowany przekształtnik impulsowy AC/DC (np. prostownik PWM), zapewniający kontrolę wartości napięcia wejściowego falownika  $u_F$  z możliwością dwukierunkowego przepływu energii i o korzystniejszym kształcie prądu pobieranego ze źródła  $U_S$  niż w przypadku prostowników diodowych (rys. 1.4b). Prostowniki takie cechują się jednak wyższym stopniem skomplikowania i ich użycie wymaga zastosowania odpowiednich układów sterowania [1].

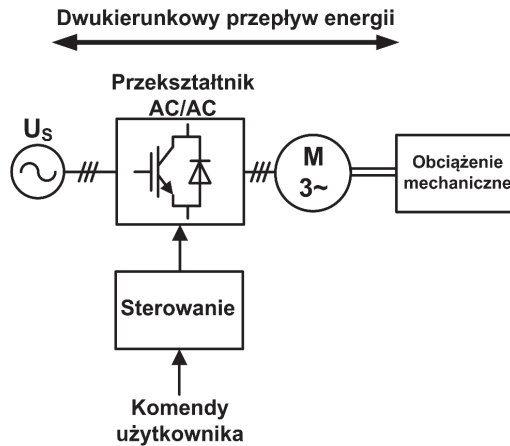


Rys. 1.3. Wybrane topologie przekształtników DC/AC: a) dwupoziomowy mostkowy falownik napięcia; b) pojedyncza gałąź przekształtnika trójpoziomowego [1]; c) pojedyncza gałąź przekształtnika czteropoziomowego [133]

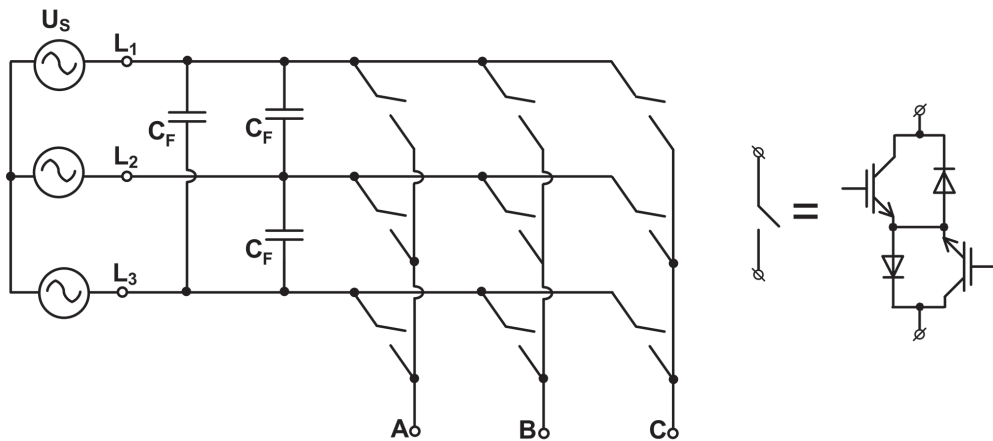


Rys. 1.4. Schematy blokowe elektrycznego układu napędowego z trójfazowym silnikiem prądu zmiennego zasilanym ze źródła napięcia przemiennego  $U_S$ :  
 a) z niesterowanym prostownikiem diodowym; b) z prostownikiem impulsowym

Alternatywę dla pośrednich przemienników częstotliwości stanowią układy bezpośrednie, które umożliwiają konwersję napięcia przemiennego na napięcie przemiennie o regulowanych parametrach z pominięciem pośredniego stopnia napięcia stałego (rys. 1.5). Jako przykład takich rozwiązań mogą posłużyć przemienniki matrycowe (rys. 1.6), które jednak ze względu na skomplikowaną strukturę (topologia układu bazuje na w pełni sterowalnych łącznikach czterokwadrantowych) oraz złożone metody sterowania nie znalazły szerszego zastosowania.



Rys. 1.5. Schemat blokowy elektrycznego układu napędowego z bezpośrednim przemiennikiem częstotliwości



Rys. 1.6. Topologia przemiennika matrycowego

Należy podkreślić, że zasilanie przekształtnikowe maszyn elektrycznych oprócz posiadania niewątpliwych zalet wiąże się również z negatywnym oddziaływaniem przekształtnika na maszynę elektryczną, co skutkuje m.in. zwiększonym narażeniem napięciowym izolacji uzwojeń maszyny lub wystąpieniem prądów łożyskowych [51, 89]. W efekcie awaryjność układu napędowego wzrasta, stąd badania w kierunku podniesienia stopnia niezawodności i efektywności energetycznej stanowią wciąż aktualny kierunek rozwoju przekształtnikowych układów napędowych. Za istotne należy uznać badania związane z opracowaniem nowych topologii przekształtników energoelektronicznych oraz prace w kierunku rozwoju technik miękkiego przełączania tranzystorów mocy [40].

## 1.3. Przedmiot oraz struktura monografii

W monografii przedstawiono zagadnienia związane z wykorzystaniem pośrednich przebiegów częstotliwości z rezonansowymi oraz quasi-rezonansowymi obwodami pośredniczącymi w układach napędowych. W rozdziale 2 omówiono wpływ przełączania „twardego” przy niezerowych prądach i napięciach łączników na właściwości eksploatacyjne układu napędowego. Przedstawiono również metody stosowane w celu ograniczenia negatywnych efektów towarzyszących komutacji twardej i ich oddziaływania na zasilany za pośrednictwem przekształtnika silnik elektryczny. W rozdziale 3 opisano rozwiązania przekształtników DC/AC wykorzystujące techniki „miękkiego” przełączania łączników w stanach bezprądowych lub beznapięciowych oraz szczegółowo przedstawiono i porównano na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych wybrane topologie układów z równoległym rezonansowym oraz quasi-rezonansowym obwodem pośredniczącym. W rozdziale 4 dokonano analizy mechanizmu powstawania składowych napięć wspólnych oddziałujących na silnik elektryczny i omówiono związane z nimi zjawisko prądów łożyskowych. Ponadto zaprezentowano wyniki weryfikacji eksperymentalnej skuteczności powszechnie stosowanych metod tłumienia składowych napięć wspólnych w układach falowników napięcia z komutacją twardą. W rozdziale 5 zaproponowano autorską topologię falownika napięcia z quasi-rezonansowym obwodem pośredniczącym, umożliwiającą redukcję poziomów napięć wspólnych, ograniczenie wielkości prądów doziemnych oraz poprawę warunków zasilania maszyny elektrycznej. Zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych proponowanej topologii oraz skonfrontowano je z wynikami uzyskanymi dla analogicznego falownika z przełączaniem twardym. Dodatkowo przeprowadzono porównanie układu autorskiego z wybranymi układami falowników z przełączaniem miękkim. Pracę kończy podsumowanie zawarte w rozdziale 6, w którym przedstawiono dalsze perspektywy rozwoju układów falowników z przełączaniem miękkim. Monografię uzupełnia dodatek, w którym przedstawiono analizę teoretyczną sprawności autorskiego układu falownika z przełączaniem miękkim oraz wyjaśniono mechanizm powstawania przesunięcia poziomu napięcia wspólnego w stanie przerwy beznapięciowej w układzie falownika z równoległym rezonansowym obwodem pośredniczącym z dwoma tranzystorami separującymi w obwodzie DC.