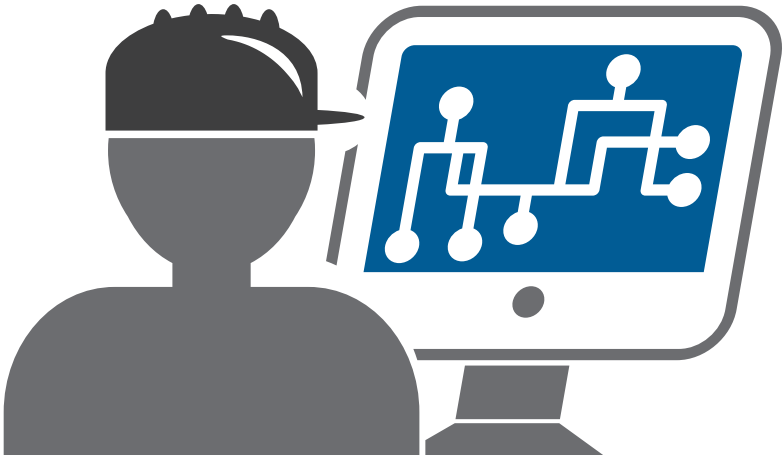
LECH GRZESIAK, BARTŁOMIEJ UFNALSKI, ARKADIUSZ KASZEWSKI

STEROWANIE NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH

ANALIZA, MODELOWANIE, PROJEKTOWANIE



PWN

STEROWANIE
NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH
ANALIZA, MODELOWANIE, PROJEKTOWANIE

LECH GRZESIAK, BARTŁOMIEJ UFNALSKI, ARKADIUSZ KASZEWSKI

STEROWANIE
NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH
ANALIZA, MODELOWANIE, PROJEKTOWANIE

PWN

Projekt okładki i stron tytułowych **Mariusz Onyśko**

Menedżer ds. Wydawniczych **Emilia Leśniewska**

Wydawca **Adam Filutowski**

Koordynator ds. redakcji **Renata Ziółkowska**

Redaktor **Maria Kasperska**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Łamanie **Ewa Szelatyńska, ScanSystem.pl**

Współpraca reklamowa: reklama@pwn.pl
Specjalista ds. Kluczowych Klientów **Justyna Szopa** (Justyna.Szopa@pwn.pl)

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2016

ISBN 978-83-01-18318-9

Wydanie I

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; www.pwn.pl
Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

Spis treści

Wykaz oznaczeń VIII
Wykaz używanych skrótów XIV

1. Wstęp 1

2. Maszyny elektryczne stosowane układach napędowych 5
2.1. Podstawowe konstrukcje i właściwości maszyn elektrycznych prądu stałego 5
2.2. Podstawowe konstrukcje i właściwości maszyn elektrycznych prądu przemiennego 6

3. Przekształtniki energoelektroniczne z łącznikami w pełni sterowalnymi dla napędów elektrycznych 8
3.1. Wprowadzenie 8
3.2. Podstawowe topologie przekształtników silnikowych i metody modulacji szerokości impulsów 14
3.2.1. Przekształtniki DC/DC dla napędów z silnikami komutatorowymi prądu stałego 16
3.2.2. Trójfazowy dwupoziomowy przekształtnik napięcia DC/AC dla silników prądu przemiennego 28
3.2.3. Trójfazowy trójpoziomowy przekształtnik napięcia DC/AC dla silników prądu przemiennego 41

4. Modele matematyczne przekształtnikowych napędów prądu stałego 52
4.1. Model matematyczny bezszczotkowego silnika prądu stałego (BLDC) 52
4.2. Modele matematyczne maszyn prądu stałego w przestrzeni stanu 53
4.3. Model silnika prądu stałego w dziedzinie operatorowej 56
4.4. Model matematyczny przekształtnika energoelektronicznego 57
4.5. Model matematyczny napędu z silnikiem prądu stałego i przekształtnikiem energoelektronicznym – opis w dziedzinie czasu 57
4.6. Model matematyczny silnika prądu stałego z przekształtnikiem energoelektronicznym – opis dziedzinie operatorowej 59

5. Sterowanie napędów prądu stałego z kaskadowo połączonymi regulatorami położenia, prędkości i prądu ... 61

5.1. Wprowadzenie ... 61
5.2. Projektowanie regulatora prądu ... 65
5.3. Projektowanie regulatora prędkości ... 69
5.4. Projektowanie regulatora położenia ... 75

6. Dobór nastaw regulatorów metodą roju cząstek na przykładzie regulatorów prędkości i położenia ... 80

6.1. Optymalizacja a metoda prób i błędów ... 81
6.2. Wskaźniki jakości ... 82
6.3. Optymalizacja metodą roju cząstek ... 86
6.4. Optymalizacja nastaw regulatorów prędkości i położenia w układzie napędowym 88
6.5. Optymalizatory stochastyczne w praktyce inżynierskiej ... 95

7. Strojenie regulatorów przy użyciu SYSTUNE w napędzie prądu stałego ... 96

7.1. Normy *p*-te wektora ... 97
7.2. Tłumienie, pulsacja graniczna, pulsacja naturalna, pulsacja odcięcia, czas narastania, pasmo przenoszenia ... 98
7.3. Określanie celów sterowania dla SYSTUNE ... 102
7.4. SYSTUNE a kryteria Kesslera lub metoda Zieglera–Nicholsa ... 111

8. Napędy prądu stałego z regulatorem stanu ... 112

8.1. Sterowanie prędkością ze sprzężeniem od wektora stanu ... 112
8.1.1. Opis obiektu sterowania ... 112
8.1.2. Struktura sterowania z wykorzystaniem sprzężenia od wektora stanu i model wejścia ... 114
8.1.3. Wyznaczenie modelu wejścia dla pobudzenia sygnałem skokowym ... 116
8.1.4. Struktura sterowania z wykorzystaniem sprzężenia od wektora stanu oraz wewnętrznego modelu wejścia zapewniającego równość sygnału zadanego i rzeczywistego w przypadku wystąpienia zakłóceń ... 120
8.1.5. Struktura sterowania z wykorzystaniem sprzężenia od wektora stanu oraz wewnętrznego modelu wejścia zapewniającego likwidację uchybu ustalonego dla liniowo zmieniającego się sygnału prędkości zadanej ... 123
8.2. Sterowanie położeniem ze sprzężeniem od wektora stanu ... 126
8.2.1. Opis obiektu sterowania dla układu pozycyjnego ... 126
8.2.2. Struktura sterowania serwonapędu z wykorzystaniem sprzężenia od wektora stanu oraz wewnętrznego modelu wejścia zapewniającego niewrażliwość na zmiany momentu obciążenia ... 132

9. Model matematyczny maszyny asynchronicznej ... 136

9.1. Model wykorzystujący wektory przestrzenne ... 137
9.2. Model w układzie wirującym ... 142

10. Sterowanie polowo zorientowane silnikiem indukcyjnym ... 146

10.1. Sterowanie z bezpośrednią orientacją wektora pola stojana ... 147
10.2. Strojenie regulatorów w układzie DSFOC przy wykorzystaniu kryteriów Kesslera 150
10.3. Sterowanie z bezpośrednią orientacją wektora pola wirnika ... 156
10.4. Porównanie napędu z orientacją stojanową i wirnikową ... 161

11. Napęd DTC z silnikiem indukcyjnym klatkowym 163

11.1. Wprowadzenie 163
11.2. Model symulacyjny napędu DTC z silnikiem indukcyjnym klatkowym 166

12. Estymatory składowych wektora strumienia stojana maszyny indukcyjnej 176

12.1. Wybrane struktury estymatorów bazujących na modelu maszyny 177
12.2. Neuroestymator strumieni magnetycznych silnika asynchronicznego 185

13. Przestrajany siecią neuronową regulator stanu maszyny indukcyjnej 192

13.1. Linearyzacja modelu silnika indukcyjnego 193
13.2. Rozszerzony model obiektu regulacji z silnikiem indukcyjnym 196
13.3. LQR przestarajany siecią neuronową 199
13.4. LQR a praktyka inżynierska 204

14. Odtwarzanie prędkości kątowej silnika indukcyjnego przy użyciu sztucznych sieci neuronowych 206

14.1. Wstępne przetwarzanie sygnałów 207
14.2. Wybór typu sieci neuronowej estymującej prędkość kątową wirnika 211
14.3. Uczenie jednokierunkowej sieci neuronowej realizującej zadanie odtwarzania prędkości kątowej wirnika 214
14.4. Napęd bezczujnikowy z neuroestymatorem prędkości kątowej wirnika 217
14.5. Neuroestymacja a praktyka inżynierska 223

15. Napędy z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych 225

15.1. Modele matematyczne obiektów regulacji 226
15.1.1. Opis matematyczny maszyny PMSM 226
15.1.2. Opis matematyczny zespołu napędowego z silnikiem PMSM zasilanym poprzez przekształtnik energoelektroniczny 233
15.1.3. Linearyzacja modelu zespołu napędowego z silnikiem PMSM 234
15.2. Sterowanie metodą orientacji wektora pola (RFOC) 236
15.2.1. Sterowanie prędkością kątową z kaskadową strukturą regulatorów 236
15.2.2. Sterowanie położeniem kątowym z kaskadową strukturą regulatorów ... 244
15.3. Sterowanie silnikiem PMSM z wykorzystaniem regulatora stanu 247
15.3.1. Sterowanie prędkością kątową z regulatorem stanu 247
15.3.2. Sterowanie położeniem kątowym z regulatorem stanu 254

Bibliografia 259

Wykaz oznaczeń

$\mathbf{A}$	– macierz stanu
abc	– układ współrzędnych naturalnych
$\mathbf{B}$	– macierz wymuszeń
$\mathbf{C}$	– macierz wyjść
c_1	– współczynnik bezwładności roju
c_2	– współczynnik zachowań kognitywnych (poznawczych) roju
c_3	– współczynnik zachowań społecznych (socjalnych) roju
c_t	– współczynnik tarcia wiskotycznego
$\mathrm{D}_\bullet$	– etykieta diody
$D_\bullet$	– współczynnik wypełnienia impulsu sterującego
D_0	– względny czas trwania stanu zerowego
D_A	– względny czas trwania stanu aktywnego
$D_{0\mathrm{A}}$	– względny czas trwania stanu zerowego grupy anodowej
$D_{0\mathrm{K}}$	– względny czas trwania stanu zerowego grupy katodowej
dq	– wirujący układ współrzędnych prostokątnych
e	– liczba Eulera (podstawa logarytmu naturalnego)
$\mathbf{E}$	– macierz zakłóceń
e	– uchyb regulacji
e_a	– napięcie indukowane w uzwojeniu twornika
E_a	– wartość średnia napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika
e_a, e_b, e_c	– napięcia indukowane w uzwojeniu odpowiednio fazy a, b oraz c
f_p	– częstotliwość próbkowania
F_sw	– częstotliwość łączeń
$G_\mathrm{f}(s)$	– transmitancja operatorowa filtru
$G_\mathrm{o}(s)$	– transmitancja operatorowa obiektu sterowania
$G_{\mathrm{o}\alpha}(s)$	– transmitancja operatorowa układu otwartego dla regulatora położenia

$G_{\mathrm{o}i}(s)$ – transmitancja operatorowa układu otwartego dla regulatora prądu
$G_{\mathrm{o}\omega}(s)$ – transmitancja operatorowa układu otwartego dla regulatora prędkości
$G_{\mathrm{z}}(s)$ – transmitancja operatorowa układu zamkniętego
$\mathbf{I}$ – macierz jednostkowa (identycznościowa)
i_{a} – prąd twornika
I_{a} – średnia wartość prądu twornika
i_{dq} – sygnał odsprzęgający tor d od toru q
i_a, i_b, i_c – prądy odpowiednio fazy a, b oraz c
i, j, k, n, p – zmienne naturalne, np. numer próbki, indeks czasu (numer chwili), numer cząstki w roju
$\Im$ – część urojona liczby zespolonej
I_{pp} – międzyszczytowa wartość tętnień prądu
$I_{\mathrm{pp}@D=\bullet}$ – międzyszczytowa wartość tętnień prądu dla współczynniki wypełnienia impulsu $D = \bullet$
$\underline{i}_{\mathrm{s}}$ – wektor przestrzenny prądu stojana
$\underline{i}_{\mathrm{r}}$ – wektor przestrzenny prądu wirnika
$\mathcal{J}$ – funkcjonał, wskaźnik jakości, funkcja celu, funkcja kosztu sterowania
j – jednostka urojona
$\mathcal{J}_{\mathrm{LQR}}$ – wskaźnik jakości w metodzie LQR
J_{mr} – moment bezwładności maszyny roboczej
J_{s} – moment bezwładności silnika
J_{z} – zastępczy moment bezwładności silnika i maszyny roboczej
$\mathbf{K}$ – macierz wzmocnień regulatora stanu
k_{α} – wzmocnienie toru pomiarowego położenia
k_i – wzmocnienie toru pomiarowego prądu
$k_{\mathrm{I}\alpha}$ – wzmocnienie toru całkującego regulatora położenia
$k_{\mathrm{I}i}$ – wzmocnienie toru całkującego regulatora prądu
$k_{\mathrm{I}\omega}$ – wzmocnienie toru całkującego regulatora prędkości
k_{Ir} – wzmocnienie toru całkującego regulatora
k_{o} – wzmocnienie obiektu
k_{ω} – wzmocnienie toru pomiarowego prędkości
k_{p} – wzmocnienie przekształtnika
$k_{\mathrm{P}\alpha}$ – wzmocnienie toru proporcjonalnego regulatora położenia
$k_{\mathrm{P}i}$ – wzmocnienie toru proporcjonalnego regulatora prądu
$k_{\mathrm{P}\omega}$ – wzmocnienie toru proporcjonalnego regulatora prędkości
k_{Pr} – wzmocnienie toru proporcjonalnego regulatora

k_R – wzmocnienie regulatora
L_a – indukcyjność obwodu twornika
L_m – indukcyjność główna
L_r – indukcyjność wirnika
L_s – indukcyjność stojana
M – współczynnik głębokości modulacji
m_e – moment elektromagnetyczny
m_o – moment obciążenia
m_t – moment tarcia
$\mathbf{p}$ – wektor dodatkowych zmiennych stanu – zmiennych stanu niebędących naturalnymi zmiennymi stanu obiektu
p_A – chwilowa moc rzeczywista zgodnie z definicją Akagiego
p_b – liczba par biegunów
p.u. – jednostka względna (ang. *per unit*)
q_A – chwilowa moc urojona zgodnie z definicją Akagiego
$\mathbf{q}^{gbest}$ – najlepsze rozwiązanie znalezione przez rój
$\mathbf{q}_j$ – j-ta cząstka w roju
$\mathbf{q}_{max}$ – wektor maksymalnych zakładanych położeń cząstek w poszczególnych kierunkach poszukiwań
$\mathbf{q}_{min}$ – wektor minimalnych zakładanych położeń cząstek w poszczególnych kierunkach poszukiwań
$\mathbf{q}_j^{pbest}$ – najlepsze rozwiązanie znalezione przez j-tą cząstkę
$\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ – macierze współczynników wagowych w metodzie LQR
$\mathbf{r}$ – wektor sygnałów referencyjnych
r – sygnał referencyjny
$\mathbb{R}$ – zbiór liczb rzeczywistych
R – rezystancja
R_a – rezystancja obwodu twornika
$\Re$ – część rzeczywista liczby zespolonej
r^{gbest} – zmienna losowa zachowań socjalnych cząstki
r^{pbest} – zmienna losowa zachowań kognitywnych cząstki
R_r – rezystancja wirnika
R_s – rezystancja uzwojeń stojana
$r\theta$ – układ współrzędnych biegunowych
s_α – sygnał z czujnika położenia wału
s_D – sygnał modulujący
s_{D0} – względny czas trwania stanu zerowego
s_{DA} – względny czas trwania stanu aktywnego

$s_{\mathrm{D}a}$, $s_{\mathrm{D}b}$, $s_{\mathrm{D}c}$ – sygnały modulujące
s_{D0A} – względny czas trwania stanu zerowego grupy anodowej
$s_{\mathrm{D}a\mathrm{A}}$, $s_{\mathrm{D}b\mathrm{A}}$, $s_{\mathrm{D}c\mathrm{A}}$ – sygnały modulujące grupy anodowej
s_{D0K} – względny czas trwania stanu zerowego grupy katodowej
s_{fn} – sygnał fali nośnej/sygnał modulowany
$s_{\mathrm{fn}}^{\max}$ – wartość maksymalna sygnału modulowanego/fali nośnej
$s_{\mathrm{fn}}^{\min}$ – wartość minimalna sygnału modulowanego/fali nośnej
$s_{\bullet}^{\mathrm{ref}}$ – sygnał referencyjny/zadany
s_{sek} – numer sektora
s_{SKZ} – sygnał kolejności zerowej
s_{T}, $s_{\mathrm{T}\bullet}$ – sygnał sterujący łącznikiem
T – temperatura
$\mathrm{T}_{\bullet}$ – etykieta łącznika
T_{p} – okres próbkowania
t_{r} – czas narastania odpowiedzi układu
t_{STOP} – chwila planowego zakończenia eksperymentu symulacyjnego
T_{sw} – okres przełączania
t_{SYM} – chwila przerwania eksperymentu symulacyjnego
$\mathbf{u}$ – wektor wymuszeń lub wektor sterowań
u – sygnał sterujący
$U_{\bullet}^{1\mathrm{h}}$ – amplituda harmonicznej podstawowej
$u_{\bullet}^{1\mathrm{h}}$ – wartość chwilowa napięcia harmonicznej podstawowej
u_{a} – napięcie obwodu twornika
U_{a} – wartość średnia napięcia twornika
U_{BLDC} – średnia wartość napięcia zasilającego dane uzwojenie maszyny BLDC
U_{dc} – wartość źródła napięcia stałego
$\underline{u}_{\mathrm{emf}}$ – wektor przestrzenny napięcia indukowanego
U_{f} – napięcie fazowe
u_a, u_b, u_c – napięcia odpowiednio fazy a, b oraz c
u_{out} – wartość chwilowa napięcia wyjściowego przekształtnika/falownika
U_{p} – napięcie przewodowe
$\underline{u}_{\mathrm{s}}$ – wektor przestrzenny napięcia stojana
u_{s} – sygnał sterujący
$u_{\mathrm{s}\bullet@t=5\mathrm{ms}}$ – chwilowa wartość napięcia sygnału sterującego dla t = 5 ms
$\mathbf{v}_j$ – prędkość j-tej cząstki w roju
$\mathbf{v}_{\max}$ – wektor maksymalnych szybkości cząstek roju w poszczególnych kierunkach przestrzeni poszukiwań

$\mathbf{x}$	– wektor stanu
$\mathbf{y}$	– wektor wyjść
y	– wyjście
$\mathbf{z}$	– wektor zakłóceń
α_T	– temperaturowy współczynnik rezystywności
$\alpha\beta$	– stacjonarny układ współrzędnych prostokątnych
α_{m}	– położenie kątowe wirnika
β	– współczynnik wagowy w funkcji celu
γ	– położenie kątowe układu współrzędnych
$\Delta\bullet$	– przyrost (zmiana) wartości
ε_{m}	– przyspieszenie kątowe wirnika
ε	– miara nieortogonalności wektora strumienia i napięcia indukowanego
ζ	– współczynnik tłumienia
σ	– całkowity współczynnik rozproszenia
$\tau_1, \tau_2, \ldots \tau_n$	– stałe czasowe
τ_{e}	– stała czasowa obwodu twornika
τ_{f}	– stała czasowa filtru
τ_{p}	– stała czasowa przekształtnika
τ_{R}	– stała czasowa regulatora
τ_{r}	– stała czasowa wirnika
τ_{Σ}	– suma małych stałych czasowych
τ_{t}	– stała czasowa mechaniczna
τ_1^{MO}	– dominująca stała czasowa obiektu regulacji (kryterium modułowego optimum)
τ_1^{SO}	– dominująca stała czasowa obiektu regulacji (kryterium symetrycznego optimum)
$\tau_{\Sigma}^{\mathrm{MO}}$	– suma małych stałych czasowych obiektu regulacji (kryterium modułowego optimum)
$\tau_{\Sigma}^{\mathrm{SO}}$	– suma małych stałych czasowych obiektu regulacji (kryterium symetrycznego optimum)
ψ	– strumień wzbudzenia
ψ_{f}	– strumień od magnesów trwałych
$\underline{\psi}_{\mathrm{r}}$	– wektor przestrzenny strumienia skojarzonego wirnika
$\underline{\psi}_{\mathrm{s}}$	– wektor przestrzenny strumienia skojarzonego stojana
$\omega_{3\mathrm{dB}}$	– szerokość pasma przenoszenia
ω_{c}	– pulsacja odcięcia filtru
ω_{frame}	– prędkość kątowa układu współrzędnych

ω_{gco} – pulsacja odcięcia (ang. *gain crossover*) charakterystyki amplitudowej układu otwartego
ω_{m} – prędkość mechaniczna
ω_{n} – pulsacja drgań własnych (naturalna)
$\omega_{\underline{\psi}_{\mathrm{s}}}$ – pulsacja wektora przestrzennego strumienia stojana
$\omega_{\underline{\psi}_{\mathrm{r}}}$ – pulsacja wektora przestrzennego strumienia wirnika
ω_{slip} – pulsacja poślizgu
ω_{rslip} – pulsacja poślizgu strumienia wirnika
[–] – wielkość bezwymiarowa inna niż w jednostkach względnych (p.u.)

Indeksy dolne

$\bullet_{\mathrm{os}}$ – wielkość związana z przeregulowaniem (ang. *overshoot*)
$\bullet_{\mathrm{r}d}$ – składowa d (podłużna) wektora związanego z wirnikiem
$\bullet_{\mathrm{r}q}$ – składowa d (poprzeczna) wektora związanego z wirnikiem
$\bullet_{\mathrm{s}\alpha}$ – składowa α wektora związanego ze stojanem
$\bullet_{\mathrm{s}\beta}$ – składowa β wektora związanego ze stojanem
$\bullet_{\mathrm{s}d}$ – składowa d (podłużna) wektora związanego ze stojanem
$\bullet_{\mathrm{s}q}$ – składowa d (poprzeczna) wektora związanego ze stojanem
$\bullet_{\mathrm{dc}}$ – wartość odnosząca się do obwodu pośredniczącego napięcia stałego
$\hat{\bullet}$ – wartość estymowana
$\bullet_{\mathrm{max}}$ – wartość maksymalna
$\bullet_{\mathrm{min}}$ – wartość minimalna
$\bullet_{\mathrm{N}}$ – wartość znamionowa (nominalna), np. U_{N}, I_{N}, Ω_{mN}, M_{N}
$\bullet^{\mathrm{ref}}$ – wartość zadana (referencyjna)
$\bullet^{\mathrm{m}}$ – wartość zmierzona
$\bullet_{\mathrm{ss}}$ – wektor związany ze stanem ustalonym

Wykaz używanych skrótów

BLDC – silnik bezszczotkowy prądu stałego (ang. *brushless direct-current motor*)
CPW – czujnik położenia wału
DFOC – bezpośrednie sterowanie polowo zorientowane (ang. *direct field oriented control*)
DPWM – nieciągła modulacja szerokości impulsów (ang. *discontinous pulse-width modulation*)
DRFOC – metoda bezpośredniej orientacji wektora strumienia wirnika (ang. *direct rotor FOC*)
DSFOC – metoda bezpośredniej orientacji wektora strumienia stojana (ang. *direct stator FOC*)
DTC – bezpośrednia regulacja momentu (ang. *direct torque control*)
FFNN – jednokierunkowa sieć neuronowa (ang. *feedforward neural network*)
FN – blok generatora fali nośnej
FOC – sterowanie polowo zorientowane (ang. *field oriented control*)
IFOC – pośrednie sterowanie polowo zorientowane (ang. *indirect field oriented control*)
IM – silnik indukcyjny (ang. *induction motor*)
IMP – zasada modelu wewnętrznego (ang. *internal model principle*)
LQR – regulator liniowo-kwadratowy (ang. *linear-quadratic regulator*)
LTI – liniowy i niezmienniczy w czasie (ang. *linear time-invariant*)
MIMO – układ wielowejściowy i wielowyjściowy (ang. *multiple-input multiple-output*)
MO – kryterium modułowego optimum
NPC VSC – przekształtnik napięcia z diodami poziomującymu (ang. *neutral point clamped voltage source converter*)
PMDC – silnik szczotkowy prądu stałego o magnesach trwałych (ang. *permanent-magnet direct-current*)

PMSM – silnik synchroniczny o magnesach trwałych (ang. *permanent magnet synchronous motor*)
PSD – gęstość widmowa mocy (ang. *power spectral density*)
PWM – modulacja szerokości impulsów (ang. *pulse-width modulation*)
RNN – rekurencyjna sieć neuronowa (ang. *recurrent neural network*)
SISO – układ o jednym wejściu i jednym wyjściu (ang. *single-input single-output*)
SKZ – blok obliczający sygnał kolejności zerowej
SO – kryterium symetrycznego optimum
SSN – sztuczna sieć neuronowa
SVM – modulacja wektora przestrzennego (ang. *space vector modulation*)
WPS – blok wstępnego przetwarzania sygnału(-ów)

ROZDZIAŁ 1

Wstęp

> Don't think about why you question, simply don't stop questioning. Don't worry about what you can't answer, and don't try to explain what you can't know. Curiosity is its own reason.
>
> Albert Einstein
> *Laureate of the Nobel Prize in Physics (1921)*

Książka jest podręcznikiem akademickim adresowanym do studentów uczelni technicznych. Napędy elektryczne są przedmiotem, który znajduje się w programach studiów na kierunkach: elektrotechnika, automatyka i robotyka oraz mechatronika. Podręcznik ten może być także przydatny inżynierom zajmującym się projektowaniem napędów i serwonapędów elektrycznych lub ich eksploatacją. Przedstawiono w nim opisy matematyczne podstawowych, najczęściej stosowanych w przemyśle, silników prądu stałego i przemiennego. Skoncentrowano się na projektowaniu i analizowaniu struktur sterowania dla napędów z silnikami: komutatorowym prądu stałego, bezszczotkowym prądu stałego (BLDC), indukcyjnym klatkowym oraz synchronicznym o magnesach trwałych (PMSM). Modele matematyczne przedstawiono w sposób pozwalający na bezpośrednie ich wykorzystanie przy projektowaniu napędów przekształtnikowych. Przy opisach w dziedzinie czasu założono, że maszyny elektryczne są opisane z wykorzystaniem równań różniczkowych zwyczajnych, co jest równoznaczne z przyjęciem modeli obwodowych maszyn elektrycznych.

Współczesne napędy przemysłowe są budowane z wykorzystaniem przekształtników energoelektronicznych. Omówiono podstawowe topologie przekształtników zbudowanych z łączników w pełni sterowalnych, takich jak np. tranzystory IGBT lub MOSFET. Prezentowane topologie dotyczą przekształtników umożliwiających pracę

4-kwadrantową. Opisano przekształtniki napięciowe i prądowe DC/AC i AC/DC, 2- i 3-poziomowe, stosowane w napędach prądu przemiennego oraz podstawowe topologie przekształtników DC/DC stosowanych w napędach prądu stałego. Podano zasady sterowania wykorzystujące metodę modulacji szerokości impulsów. Przedstawione wzory i algorytmy pozwolą czytelnikowi zbudować sterowanie dla wybranych przykładowych topologii przekształtników. Szczególną uwagę zwrócono także na struktury sterowania przekształtników sieciowych umożliwiające kształtowanie prądu pobieranego z 3-fazowej sieci zasilającej napięcia przemiennego. Zastosowanie przekształtników złożonych we współczesnych systemach napędowych umożliwia precyzyjne sterowanie przepływem energii między źródłem a odbiornikiem, jakim jest w tym przypadku silnik elektryczny.

Najwięcej uwagi poświęcono analizowaniu różnorodnych struktur sterowania stosowanych w układach napędowych prądu stałego i przemiennego. W pierwszej kolejności opisane są metody projektowania i analizowania struktur sterowania w napędach z silnikiem prądu stałego. Opis matematyczny jest stosunkowo prosty, ponieważ układ jest liniowy i łatwo można analizować oraz interpretować właściwości układu napędowego zarówno w stanach dynamicznych, jak i ustalonych. Dlatego na przykładzie napędów prądu stałego opisane są klasyczne struktury sterowania z kaskadowo połączonymi regulatorami prądu i prędkości lub też, dla sterowania pozycyjnego, z dodatkowym regulatorem położenia. Przedstawione zostały sposoby opisu (definiowania) obiektu regulacji i zasady wyznaczania nastaw regulatorów. Projektowanie regulatorów wykonywane jest po przejściu z opisu w dziedzinie czasu do opisu w dziedzinie operatorowej. Kolejno, krok po kroku, przedstawiono procedury postępowania przy wyznaczaniu nastaw regulatorów prądu, prędkości i położenia. Każdorazowo definiowany jest nowy obiekt regulacji pozwalający na analityczne projektowanie regulatorów przy wykorzystaniu kryteriów Kesslera. Przedstawiono alternatywne metody projektowania bazujące na dokładnym opisie matematycznym lub też inżynierskie podejście z uproszczeniami polegającymi na aproksymowaniu dynamiki obiektu sterowania, przy projektowaniu kolejnych regulatorów, członami inercyjnymi pierwszego rzędu. Takie podejście umożliwia szybkie i skuteczne określanie parametrów (nastaw) poszczególnych regulatorów.

Alternatywną strukturą sterowania jest rozwiązanie wykorzystujące regulator ze sprzężeniem od wektora stanu. Analiza i synteza układu regulacji jest dokonywana w przestrzeni stanu. Przedstawiony jest sposób formułowania równań stanu dla obiektu sterowania, jakim jest silnik z dołączoną maszyną roboczą, przekształtnik i zastosowane układy pomiarowe dla wielkości fizykalnych (prąd i napięcie twornika, prędkość kątowa wirnika oraz droga kątowa dla układu pozycyjnego) będących zmiennymi stanu. Opisano sposoby projektowania regulatora wykorzystujące metodę lokowania biegunów oraz realizację sterowania optymalnego LQR. Wyprowadzono zależności na wyznaczanie modelu wewnętrznego wejścia dla różnych sygnałów referencyjnych. Tak zaprojektowany regulator zapewnia uzyskanie zerowego uchybu ustalonego. Metodyka pro-

jektowania regulatora ze sprzężeniem od wektora stanu została przedstawiona przy wykorzystaniu skrzynki narzędziowej (control toolbox) w środowisku MATLAB/SIMULINK.

W podobny sposób przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem i analizowaniem napędów prądu przemiennego. Rozważania dotyczą powszechnie stosowanych w przemyśle układów napędowych z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych (PMSM) i silnikiem indukcyjnym klatkowym. Przedstawione zostały modele matematyczne silników z zastosowaniem opisu w dziedzinie czasu i wykorzystaniem definicji wektora przestrzennego. Podano sposób transformacji równań do stacjonarnego lub wirującego ortogonalnego układu odniesienia.

Dla napędu z silnikiem PMSM, w pierwszej kolejności, przedstawione zostały klasyczne struktury sterowania z orientacją wektora pola (FOC) oraz bezpośrednim sterowaniem momentem (DTC). Charakterystyczną cechą tych struktur sterowania jest występowanie dwóch torów regulacji, tzn. toru regulacji momentu i toru regulacji strumienia magnetycznego. W przypadku napędu FOC, z liniowymi regulatorami składowych wektora przestrzennego prądu stojana, rozważania ograniczono do sterowania z zerową składową prądu w osi d. System regulacji realizowany jest w wirującym (zgodnie z wirnikiem) prostokątnym układzie odniesienia dq. Metody wyznaczania nastaw regulatorów są analogiczne do tych, które zostały opisane w rozdziałach dotyczących napędów prądu stałego. Stosowne przekształcenia odnoszące się do opisów kolejno definiowanych obiektów regulacji są zapisane w dziedzinie czasu i dziedzinie operatorowej.

Kolejnym sposobem sterowania jest sterowanie z wykorzystaniem metody bezpośredniej regulacji momentu. W tej strukturze regulacji stosowane są histerezowe regulatory strumienia i momentu oraz liniowy regulator prędkości kątowej wirnika. Realizacja takiego sterowania wymaga zdefiniowania tzw. tablicy łączeń adresowanej stanami wyjść z regulatorów oraz wyznaczanym na bieżąco położeniem wektora przestrzennego strumienia stojana. Konieczne jest także wyznaczanie (estymowanie) momentu elektromagnetycznego silnika. Wybrana szerokość stref histerezy decyduje o częstotliwości łączeń (maksymalnej i minimalnej) oraz tętnieniach momentu i strumienia stojana.

Odmiennym sposobem sterowania jest struktura z regulatorem stanu. W przypadku silnika PMSM mamy do czynienia z obiektem nieliniowym. Macierze stanu i wymuszeń są zależne od aktualnej prędkości wirowania. Projektowanie regulatora stanu staje się możliwe po zastosowaniu przekształceń linearyzujących i odsprzęgających. W wyniku takich przekształceń możliwe jest skorzystanie ze standardowych metod projektowania regulatora stanu. Podobnie jak dla napędów prądu stałego wprowadza się modele wewnętrzne wejścia zapewniające nadążanie bez uchybu za sygnałem referencyjnym.

Sterowanie silnikiem PMSM z wykorzystaniem sprzężenia od wektora stanu jest także możliwe bez wprowadzenia bloku linearyzacji i odsprzęgania. Można projektować regulator stanu optymalny dla określonej prędkości. Oczywiście należy w tym przypadku wyznaczyć regulatory dla szeregu prędkości i następnie zmieniać wzmocnienia tak zaprojektowanego regulatora wraz ze zmianą prędkości kątowej wirnika. Taki

regulator stanu wymaga większych nakładów obliczeniowych podczas projektowania, ale jego implementacja jest prosta.

Dominującą rolę na rynku napędów prądu przemiennego odgrywają przekształtnikowe napędy z silnikiem indukcyjnym klatkowym. Mając do dyspozycji model matematyczny silnika klatkowego zbudowany z wykorzystaniem definicji wektora przestrzennego, można projektować i analizować różnorodne struktury sterowania. W niniejszej pracy podano zasady projektowania regulatorów dla powszechnie wykorzystywanych w praktyce metod regulacji, takich jak FOC i DTC. Wspomniane metody regulacji wymagają informacji o wykorzystywanych sygnałach, takich jak prędkość kątowa wirnika, napięcie i prąd stojana oraz strumień stojana lub wirnika. Sygnałami niedostępnymi pomiarowo są strumienie stojana i wirnika. Ich znajomość jest niezbędna do realizacji sterowania. Konieczne jest wyznaczanie tych wielkości na podstawie pomiarów prądu i napięcia stojana. Istnieje wiele metod estymowania tych sygnałów. Wykorzystywane są często obserwatory lub też sposoby bazujące na sztucznej inteligencji. Podane zostały opisy wybranych sposobów algorytmicznego wyznaczania strumieni, jak również realizacje wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe. W niektórych aplikacjach przemysłowych chętnie stosowane są struktury sterowania, w których nie korzysta się z bezpośredniego pomiaru prędkości kątowej wirnika. Prędkość kątowa jest wyznaczana na podstawie łatwo mierzalnych wartości prądów i napięć stojana. Rozwiązania takie są znane w literaturze jako napędy bezczujnikowe, ale ten termin nie określa istoty zagadnienia, ponieważ nie jest używany czujnik (układ pomiarowy) prędkości kątowej, ale niezbędne są nadal czujniki (układy pomiarowe) prądu i napięcia.

ROZDZIAŁ 2

Maszyny elektryczne stosowane w układach napędowych

Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.

Marie Skłodowska–Curie
Laureate of two Nobel Prizes: in Physics (1903)
and in Chemistry (1911)

2.1. Podstawowe konstrukcje i właściwości maszyn elektrycznych prądu stałego

W napędach przemysłowych stosowane są zarówno maszyny prądu stałego, jak i przemiennego. Maszyny prądu stałego są budowane ze wzbudzeniem od magnesów trwałych lub wzbudzeniem elektromagnetycznym. Opis maszyn elektrycznych w zakresie właściwości, analizy i konstrukcji można znaleźć w podręczniku akademickim [88]. Podstawowa klasyfikacja maszyn prądu stałego jest przedstawiona na rys. 2.1

Maszyny komutatorowe (z komutatorem mechanicznym) są nadal stosowane, ale odgrywają coraz mniejszą rolę z powodu skomplikowanej konstrukcji i konieczności okresowej konserwacji komutatora. Podstawowa zaleta napędów z silnikami komutatorowymi DC to łatwość regulacji prędkości poprzez kontrolowanie wartości średniej napięcia dołączonego do obwodu twornika. Maszyny komutatorowe mogą być przy tym wykonywane ze wzbudzeniem obcym lub wzbudzeniem o magnesach trwałych. Silniki o magnesach trwałych (PMDC – ang. *permanent magnets direct-current*) nie

Rys. 2.1. Klasyfikacja maszyn prądu stałego

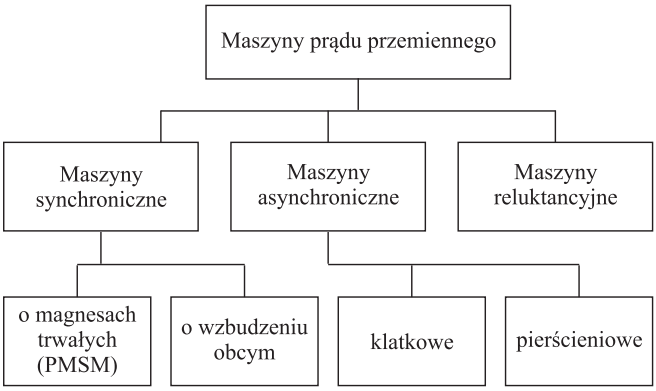
wymagają stosowania oddzielnego zasilania do wytworzenia strumienia magnetycznego. Pod względem możliwości sterowania prędkością silniki te charakteryzują się podobnymi właściwościami. Pozostałe dwa rodzaje silników komutatorowych DC, tzn. silnik bocznikowy i silnik szeregowy nie są praktycznie wykorzystywane w nowoczesnych napędach.

Aktualnie, coraz częściej, zamiast silników komutatorowych stosowane są silniki BLDC (ang. *brushless direct-current motor*) – bezszczotkowe silniki prądu stałego o magnesach trwałych, które wymagają stosowania komutatora elektronicznego zbudowanego z w pełni sterowalnych łączników energoelektronicznych i czujników określających położenie wirnika. Właściwości regulacyjne napędów z silnikami BLDC są praktycznie identyczne z właściwościami napędów z silnikami komutatorowymi DC, ale ich konstrukcja jest mniej skomplikowana. W literaturze silniki BLDC są niekiedy klasyfikowane jako silniki prądu przemiennego i określane mianem silnika synchronicznego o magnesach trwałych o trapezoidalnym kształcie indukowanego napięcia.

2.2. Podstawowe konstrukcje i właściwości maszyn elektrycznych prądu przemiennego

Klasyfikacja maszyn prądu przemiennego jest przedstawiona na rys. 2.2.

Największe znaczenie w aplikacjach przemysłowych mają maszyny synchroniczne i asynchroniczne, przy czym najczęściej, w obrabiarkach sterowanych numerycznie, robotach, pojazdach z napędem elektrycznym stosowane są maszyny synchroniczne o magnesach trwałych. Charakteryzują się one najmniejszymi gabarytami dla danej mocy i prędkości znamionowej oraz małym momentem bezwładności. W napędach przemysłowych powszechnie wykorzystywane są silniki indukcyjne klatkowe. Należy przy tym



Rys. 2.2. Klasyfikacja maszyn prądu przemiennego

zaznaczyć, że przekształtniki energoelektroniczne stosowane w układach napędowych prądu przemiennego z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych oraz silnikami indukcyjnymi klatkowymi są identyczne. Struktury i metody sterowania są także podobne, co powoduje, że znaczna część algorytmów sterownia może być wykorzystywana w obu rodzajach napędów.

Innym rodzajem maszyny elektrycznej jest silnik reluktancyjny. Zasada działania i sposób zasilania są tutaj odmienne od obowiązujących w maszynach synchronicznych oraz asynchronicznych i napędy z silnikami reluktancyjnymi nie są opisywane w tym podręczniku.

ROZDZIAŁ 3

Przekształtniki energoelektroniczne z łącznikami w pełni sterowalnymi dla napędów elektrycznych

An expert is a person who has found out by his own painful experience all the mistakes that one can make in a very narrow field.

Niels Bohr
Laureate of the Nobel Prize in Physics (1922)

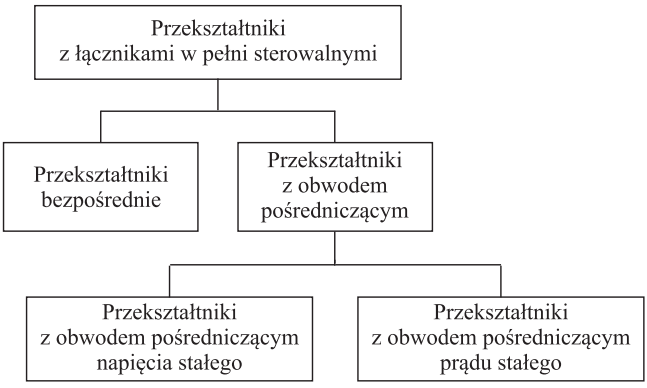
3.1. Wprowadzenie

Przekształtniki energoelektroniczne są urządzeniami wykorzystywanymi w układach przekształcania energii elektrycznej. Opisy przyrządów półprzewodnikowych, topologii układów oraz metod sterowania można znaleźć np. w [7], [81], [82]. Powszechnie wykorzystywane są topologie przekształtników z w pełni sterowalnymi łącznikami energoelektronicznymi w konfiguracji mostka typu H lub mostka trójfazowego. Przekształtnik może być dołączony do źródła napięcia stałego lub źródła prądu stałego. Źródło zasilania determinuje rodzaj wykorzystywanych łączników. W przekształtnikach napięciowych wykorzystywane są najczęściej moduły wstecznie przewodzące, składające się z tranzystora IGBT lub MOSFET i dołączonej odwrotnie równolegle diody. Dla wielkich mocy stosowane są tyrystory wstecznie przewodzące IGCT. W przekształtnikach prądowych stosowane są łączniki wstecznie blokujące, które składają się z tranzystora IGBT lub MOSFET i dołączonej szeregowo diody, lub też wstecznie blokujące tyrystory IGCT. Przekształtniki napięciowe są zasilane ze źródła napięciowego, a przekształtniki prądowe ze źródła prądowego. W praktyce w przekształtnikach napięciowych do zasi-

lania wykorzystywane są baterie elektrochemiczne (np. w pojazdach elektrycznych czy elektronarzędziach) lub zespoły przekształtnikowe z wyjściem napięciowym (kondensator w obwodzie DC) dołączone do sieci napięcia przemiennego. Źródła prądowe mogą być budowane z wykorzystaniem źródła napięciowego i dławika o odpowiednio dużej indukcyjności. W wielu typowych aplikacjach przemysłowych korzysta się z powszechnie dostępnej sieci napięcia przemiennego i wykorzystuje topologie przekształtnika złożonego z pośredniczącym obwodem napięcia lub prądu stałego. *Przekształtnik złożony* to układ energoelektroniczny zawierający prostownik sterowany i falownik połączone po stronie napięcia lub prądu stałego. W ten sposób powstaje wspólny pośredniczący obwód napięcia lub prądu stałego.

Innym przekształtnikiem wykorzystywanym w układach napędowych jest *przekształtnik bezpośredni*. Ten typ przekształtnika nie ma obwodu pośredniczącego i zbudowany jest z dwukierunkowych łączników energoelektronicznych łączących bezpośrednio zaciski źródła zasilania z zaciskami odbiornika. W napędach z silnikami prądu przemiennego źródłem zasilania może być np. sieć napięcia przemiennego, a odbiornikiem silnik indukcyjny lub synchroniczny.

Biorąc pod uwagę podane powyżej definicje, przekształtniki energoelektroniczne można podzielić na dwie kategorie, a mianowicie przekształtniki bezpośrednie i przekształtniki złożone z obwodem pośredniczącym napięcia lub prądu stałego. Na rysunku 3.1 jest przedstawiona klasyfikacja przekształtników z łącznikami w pełni sterowalnymi, czyli takimi łącznikami, w których stan załączenia lub wyłączenia zależy jedynie od sygnału sterującego. Każdy z wymienionych rodzajów przekształtników może być wykorzystany do budowy napędów z silnikami zarówno prądu stałego, jak i przemiennego.



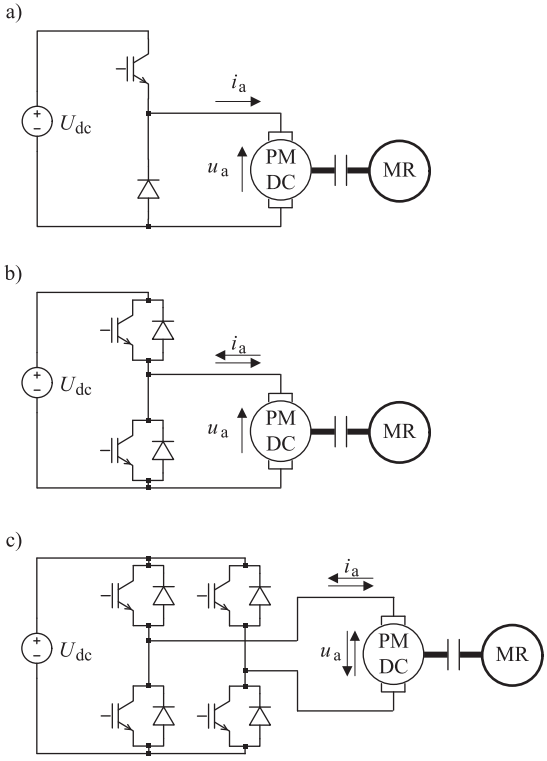
Rys. 3.1. Klasyfikacja przekształtników stosowanych w napędach elektrycznych

Do napędów z silnikiem komutatorowym DC najczęściej są stosowane topologie określane jako beztransformatorowe przekształtniki DC/DC 1-, 2- lub 4-kwadrantowe.

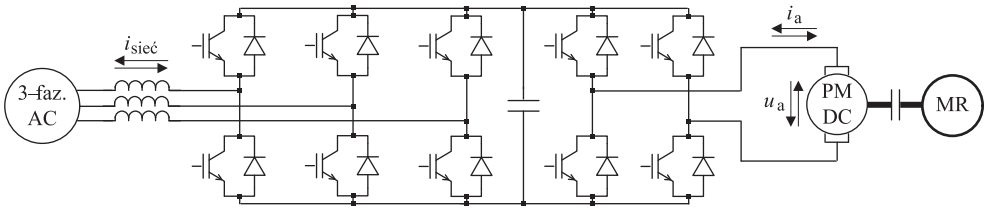
Podstawowe topologie takich przekształtników są przedstawione na rys. 3.2. Przekształtnik 1-kwadrantowy (rys. 3.2a) umożliwia kontrolę wartości średniej napięcia na zaciskach twornika silnika DC przy ustalonej polaryzacji oraz pozwala na jednokierunkowy przepływ prądu twornika. Taka struktura układu napędowego daje możliwość regulacji prędkości wirowania wału tylko w jednym kierunku i nie umożliwia hamowania elektrycznego. Napęd z przekształtnikiem 2-kwadrantowym (rys. 3.2b) umożliwia dwukierunkowy przepływ prądu przy jednej ustalonej polaryzacji napięcia twornika. W układzie tym możliwe jest więc dwukierunkowe przekazywanie energii elektrycznej, a tym samym układ może pracować w trybie silnikowym i trybie generatorowym (hamowanie elektryczne). Najbardziej uniwersalny jest napęd z przekształtnikiem 4-kwadrantowym (rys. 3.2c), który zapewnia dwukierunkowy przepływ energii, czyli pracę w trybie silnikowym i trybie generatorowym, a także zmianę kierunku wirowania wału poprzez zmianę polaryzacji napięcia dołączonego do obwodu twornika. Przedstawione schematy układów napędowych z silnikiem komutatorowym prądu stałego dotyczą przypadku zasilania ze źródła napięcia stałego (bateria elektrochemiczna).

W wielu aplikacjach przemysłowych dostępne jest napięcie przemienne, a nie stałe. W takim przypadku stosowane są dodatkowe przekształtniki napięcia przemiennego na stałe (przekształtniki AC/DC). Topologia przekształtnika AC/DC powinna umożliwiać dwukierunkowe przekazywanie energii, jeśli napęd ma pracować w trybie silnikowym i generatorowym. Napęd z silnikiem prądu stałego zasilany z sieci napięcia przemiennego, poprzez złożony przekształtnik AC/DC/DC, jest przedstawiony na rys. 3.3. Projektowanie struktur układów sterowania, zawarte w kolejnych rozdziałach, dotyczy napędów umożliwiających pracę 4-kwadrantową, a tym samym jest dedykowane dla struktur przedstawionych na rys. 3.2c lub rys. 3.3.

W przypadku napędów z silnikiem prądu przemiennego w kolejnych rozdziałach są analizowane i projektowane struktury regulacji dla silnika synchronicznego o magnesach trwałych oraz silnika asynchronicznego klatkowego. Podstawowe topologie przekształtników wykorzystywanych do budowy napędów z takimi silnikami są przedstawione na rys. 3.4 i rys. 3.5. W celu zmiany częstotliwości i amplitudy podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego stosuje się sterowanie oparte na metodzie modulacji szerokości impulsu (PWM). Dopuszczalne stany jednoczesnego załączenia określonych łączników są ograniczone do kombinacji, w których nie ma jednoczesnego wysterowania dolnego i górnego łącznika tej samej gałęzi przekształnika. Jednoczesne podanie impulsu sterującego do górnego i dolnego łącznika powodowałoby niedopuszczalne zwarcie źródła napięcia. Dla sześciu łączników falownika liczba dopuszczalnych stanów jest ograniczona do 8, przy czym odróżnia się 6 stanów aktywnych (źródło napięcia jest dołączone do silnika) i dwa stany zerowe, w których następuje zwieranie obwodu stojana, a źródło napięcia jest odłączone od silnika. Zmiana kierunku wirowania wału silnika prądu przemiennego jest możliwa poprzez zmianę kolejności faz dołączonych do zacisków stojana. Zmiana taka jest realizowana poprzez modyfikację sekwencji impulsów sterujących doprowadzonych do łączników przekształtnika.



Rys. 3.2. Przykładowe topologie przekształtników energoelektronicznych dla napędów z silnikiem komutatorowym prądu stałego: a) topologia 1-kwadrantowa, b) topologia 2-kwadrantowa, c) topologia 4-kwadrantowa



Rys. 3.3. Napęd z silnikiem komutatorowym prądu stałego zasilany z sieci napięcia przemiennego

Alternatywnymi topologiami przekształtników dla napędów z silnikami prądu przemiennego są falowniki z pośredniczącym obwodem prądu stałego. Falownik z pośredniczącym obwodem prądu stałego jest dołączony do źródła o charakterze prądowym, zrealizowanym w rozważanym przypadku poprzez szeregowe połączenie dławika o dużej wartości indukcyjności ze źródłem napięcia. Schemat układu napędowego z silnikiem asynchronicznym klatkowym zasilanym poprzez falownik prądu jest przedstawiony na