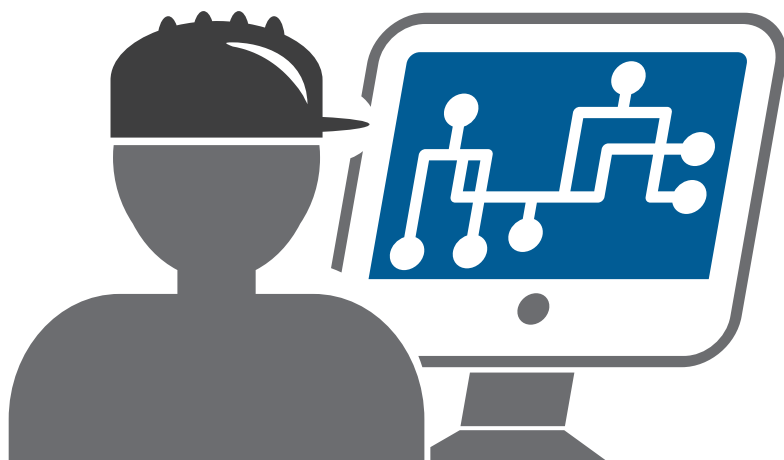


LECH GRZESIAK, BARTŁOMIEJ UFNALSKI, ARKADIUSZ KASZEWSKI

STEROWANIE NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH

ANALIZA, MODELOWANIE, PROJEKTOWANIE



STEROWANIE

NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH

ANALIZA, MODELOWANIE, PROJEKTOWANIE

LECH GRZESIAK, BARTŁOMIEJ UFNALSKI, ARKADIUSZ KASZEWSKI

STEROWANIE NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH ANALIZA, MODELOWANIE, PROJEKTOWANIE



Projekt okładki i stron tytułowych **Mariusz Onyśko**

Menedżer ds. Wydawniczych **Emilia Leśniewska**

Wydawca **Adam Filutowski**

Koordinator 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 sterowanymi 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
	V

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. Przetwarzany 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 przetwarzany 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

A	– macierz stanu
<i>abc</i>	– układ współrzędnych naturalnych
B	– macierz wymuszeń
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
D.	– etykieta diody
D.	– współczynnik wypełnienia impulsu sterującego
D_0	– względny czas trwania stanu zerowego
D_A	– względny czas trwania stanu aktywnego
D_{0A}	– względny czas trwania stanu zerowego grupy anodowej
D_{0K}	– względny czas trwania stanu zerowego grupy katodowej
dq	– wirujący układ współrzędnych prostokątnych
e	– liczba Eulera (podstawa logarytmu naturalnego)
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
$G_f(s)$	– transmitancja operatorowa filtru
$G_o(s)$	– transmitancja operatorowa obiektu sterowania
$G_{o\alpha}(s)$	– transmitancja operatorowa układu otwartego dla regulatora położenia

$G_{oi}(s)$	– transmitancja operatorowa układu otwartego dla regulatora prądu
$G_{o\omega}(s)$	– transmitancja operatorowa układu otwartego dla regulatora prędkości
$G_z(s)$	– transmitancja operatorowa układu zamkniętego
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
$I_{pp@D=\bullet}$	– międzyszczytowa wartość tętnień prądu dla współczynniki wypełnienia impulsu $D = \bullet$
\underline{i}_s	– wektor przestrzenny prądu stojana
\underline{i}_r	– wektor przestrzenny prądu wirnika
\mathcal{J}	– funkcjonał, wskaźnik jakości, funkcja celu, funkcja kosztu sterowania
j	– jednostka urojona
\mathcal{J}_{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
K	– macierz wzmocnień regulatora stanu
k_α	– wzmocnienie toru pomiarowego położenia
k_i	– wzmocnienie toru pomiarowego prądu
$k_{I\alpha}$	– wzmocnienie toru całkującego regulatora położenia
k_{Ii}	– wzmocnienie toru całkującego regulatora prądu
$k_{I\omega}$	– wzmocnienie toru całkującego regulatora prędkości
k_{I_r}	– wzmocnienie toru całkującego regulatora
k_o	– wzmocnienie obiektu
k_ω	– wzmocnienie toru pomiarowego prędkości
k_p	– wzmocnienie przekształtnika
$k_{p\alpha}$	– wzmocnienie toru proporcjonalnego regulatora położenia
k_{pi}	– wzmocnienie toru proporcjonalnego regulatora prądu
$k_{p\omega}$	– 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. <i>per unit</i>)
q_A	– chwilowa moc urojona zgodnie z definicją Akagiego
$\mathbf{q}^{\text{gbest}}$	– najlepsze rozwiązanie znalezione przez rój
\mathbf{q}_j	– j -ta cząstka w roju
\mathbf{q}_{max}	– wektor maksymalnych zakładanych położenia cząstek w poszczególnych kierunkach poszukiwań
\mathbf{q}_{min}	– wektor minimalnych zakładanych położenia cząstek w poszczególnych kierunkach poszukiwań
$\mathbf{q}_j^{\text{pbest}}$	– 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
\mathfrak{R}	– 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_{Da}, s_{Db}, s_{Dc}	– sygnały modulujące
s_{D0A}	– względny czas trwania stanu zerowego grupy anodowej
$s_{DaA}, s_{DbA}, s_{DcA}$	– sygnały modulujące grupy anodowej
s_{D0K}	– względny czas trwania stanu zerowego grupy katodowej
s_{fn}	– sygnał fali nośnej/sygnał modulowany
s_{fn}^{\max}	– wartość maksymalna sygnału modulowanego/fali nośnej
s_{fn}^{\min}	– wartość minimalna sygnału modulowanego/fali nośnej
s_{\bullet}^{ref}	– sygnał referencyjny/zadany
s_{sek}	– numer sektora
s_{SKZ}	– sygnał kolejności zerowej
$s_{T}, s_{T\bullet}$	– sygnał sterujący łącznikiem
T	– temperatura
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 przerywania eksperymentu symulacyjnego
\mathbf{u}	– wektor wymuszeń lub wektor sterowań
u	– sygnał sterujący
U_{\bullet}^{lh}	– amplituda harmonicznej podstawowej
u_{\bullet}^{lh}	– 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
$\underline{u}_{\text{emf}}$	– 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}_s	– wektor przestrzenny napięcia stojana
u_s	– sygnał sterujący
$u_{s\bullet@t=5\text{ms}}$	– chwilowa wartość napięcia sygnału sterującego dla $t = 5 \text{ ms}$
\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
$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$	– 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)
τ_Σ^{MO}	– suma małych stałych czasowych obiektu regulacji (kryterium modułowego optimum)
τ_Σ^{SO}	– suma małych stałych czasowych obiektu regulacji (kryterium symetrycznego optimum)
ψ	– strumień wzbudzenia
ψ_f	– strumień od magnesów trwałych
$\underline{\psi}_r$	– wektor przestrzenny strumienia skojarzonego wirnika
$\underline{\psi}_s$	– wektor przestrzenny strumienia skojarzonego stojana
$\omega_{3\text{dB}}$	– szerokość pasma przenoszenia
ω_c	– pulsacja odcięcia filtru
ω_{frame}	– prędkość kąтова układu współrzędnych

ω_{gco}	– pulsacja odcięcia (ang. <i>gain crossover</i>) charakterystyki amplitudowej układu otwartego
ω_{m}	– prędkość mechaniczna
ω_{n}	– pulsacja drgań własnych (naturalna)
ω_{ψ}	– pulsacja wektora przestrzennego strumienia stojana
ω_{ψ}	– 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

• _{os}	– wielkość związana z przeregulowaniem (ang. <i>overshoot</i>)
• _{rd}	– składowa d (podłużna) wektora związanego z wirnikiem
• _{rq}	– składowa d (poprzeczna) wektora związanego z wirnikiem
• _{sα}	– składowa α wektora związanego ze stojanem
• _{sβ}	– składowa β wektora związanego ze stojanem
• _{sd}	– składowa d (podłużna) wektora związanego ze stojanem
• _{sq}	– składowa d (poprzeczna) wektora związanego ze stojanem
• _{dc}	– wartość odnosząca się do obwodu pośredniczącego napięcia stałego
• $\hat{}$	– wartość estymowana
• _{max}	– wartość maksymalna
• _{min}	– wartość minimalna
• _N	– wartość znamionowa (nominalna), np. $U_{\text{N}}, I_{\text{N}}, \Omega_{\text{mN}}, M_{\text{N}}$
• _{ref}	– wartość zadana (referencyjna)
• _m	– wartość zmierzona
• _{ss}	– wektor związany ze stanem ustalonym