

PODRĘCZNIKI AKADEMICKIE • ELEKTROTECHNIKA





KOMITET REDAKCYJNY

SEKRETARZ

Stanisław Bolkowski

Anna Ciszek-Wejroch

Tadeusz Kaczorek

PRZEWODNICZĄCY

Władysław Latek

Ryszard Matla

Władysław Pełczewski

Mieczysław Pluciński

Krzysztof Radziwiłł

Konstanty Wołkowiński

Zbigniew Woynarowski

Władysław Latek

TEORIA MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Wydanie drugie



Opiniodawcy wydania pierwszego prof. *Tadeusz Koter*
doc. dr inż. *Ryszard Sochocki*
Redaktor wydania pierwszego mgr inż. *Maria Storożyńska*
Redaktor techniczny *Krystyna Orłoś*
Okładkę i strony tytułowe projektował *Andrzej Kowalewski*

621.313/314

W podręczniku podano zasady elektromechanicznego przetwarzania energii, podstawy fizyczne działania największej grupy elektromechanicznych przetworników energii, jaką stanowią maszyny elektryczne, oraz ogólną teorię maszyn elektrycznych opartą na opisie matematycznym ogólnego modelu maszyny w układzie osi prostopadłych. Rozwiązania matematyczne uzupełniono omówieniem wpływu rzeczywistych warunków fizycznych (np. nasycenia obwodu magnetycznego) na otrzymane wyniki.

Podręcznik jest przeznaczony dla studentów wydziałów elektrycznych wyższych szkół technicznych. Może być również przydatny dla inżynierów zajmujących się budową i eksploatacją maszyn elektrycznych oraz zainteresowanych tą tematyką.



Tytuł dotowany przez
Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego

© Copyright by Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
Warszawa 1982, 1987
All rights reserved
Printed in Poland

ISBN 83-204-0887-3

WNT Warszawa 1987. Wydanie II. Nakład 1800 + 200 egz.
Ark. wyd. 40,2. Ark. druk. 37,0
Format B5. Papier offset. kl. V, 80 g.
Podpisano do druku w listopadzie 1987. Druk ukończono w listopadzie 1987.
Symbol En/20474/MNiSzW.
Drukarnia im. Rewolucji Październikowej. Zam. 2948/11/86. K-13.

20/88/6
26.10

Niniejsza książka zawiera nieco rozszerzony materiał wykładany na Politechnice Warszawskiej dla wszystkich studentów Wydziału Elektrycznego. Wiadomości są więc przedstawione w taki sposób, aby były przydatne dla wszystkich inżynierów elektryków, a nie tylko dla specjalistów w dziedzinie maszyn elektrycznych. Dlatego też pominięto rozważania dotyczące obliczania i konstruowania maszyn, a opis konstrukcji ograniczono tylko do tych elementów, które są konieczne do zrozumienia zasady działania maszyn i do zrozumienia zjawisk fizycznych zachodzących w maszynach.

Przedstawiony krótki zarys teorii elektromechanicznego przetwarzania energii ma na celu wykazanie analogii między mechanicznymi i elektromagnetycznymi przemianami energetycznymi i identyczności równań bilansu sił dla ruchu mechanicznego i „ruchu elektrycznego”. Pozwala to na analityczne rozpatrywanie przemian elektromechanicznego przetwarzania energii we wszystkich rodzajach maszyn elektrycznych (wirujących i liniowych) oraz na traktowanie maszyny elektrycznej jako szczególnego przypadku elektromechanicznego przetwornika energii.

W syntetycznej formie przytoczono ważniejsze transformacje liniowe, mające zastosowanie w obwodach maszyn elektrycznych.

Przed analitycznym opisem maszyn elektrycznych podano fizyczny opis ich działania.

W celu umożliwienia swobodnego posługiwania się wielkościami charakteryzującymi pole magnetyczne, jak np. indukcja, strumień, napięcie magnetyczne, natężenie pola magnetycznego, podano krótką, typową analizę tych wielkości dostosowaną do konkretnych rodzajów konstrukcji maszyn elektrycznych i opartą na wykorzystaniu konkretnych źródeł napięcia magnetycznego, jakimi są uzwojenia. Narzuciło to konieczność krótkiego omówienia uzwojeń. W wyniku tych rozważań podano rozkłady napięć magnetycznych i indukcji w poszczególnych rodzajach maszyn.

Dla dużej części elektryków często konieczna jest nie tylko ogólna znajomość charakterystyk, parametrów i właściwości ruchowych maszyn elektrycznych, lecz także umiejętność prostego matematycznego zapisu poszczególnych wielkości charakterystycznych, np. w formie wyrażenia na transmitację. Do tego celu wykorzystano model ogólny, którego równania równowagi wyprowadzono opierając się na równaniach równowagi wynikających z teorii elektromechanicznego przetwarzania energii. Podano niektóre proste metody rozwiązywania tych równań z omówieniem

najczęściej stosowanych uproszczeń, niezbędnych do linearyzacji układów równań różniczkowych nieliniowych, a jednocześnie dopuszczalnych przy analizie poszczególnych stanów pracy maszyn elektrycznych z zachowaniem dokładności dostatecznej do tej analizy.

Na tej podstawie dokonano analizy zachowania się najważniejszych rodzajów maszyn w stanach dynamicznych i statycznych, przy czym stan statyczny jest traktowany jako szczególny przypadek stanu dynamicznego.

Do analizy stanów pracy maszyn zastosowano teorię obwodową z wykorzystaniem zasady superpozycji. Z konieczności przyjęto niezależność indukcji od nasycenia magnetycznego. W dyskusji dotyczącej uzyskanych charakterystyk i parametrów omówiono wpływ nieliniowości obwodów magnetycznych na wyniki uzyskane z analizy matematycznej oraz podano skorygowane przebiegi charakterystyk i wartości parametrów.

Rozwiązania stanów dynamicznych potraktowano jako przykłady możliwości zastosowania przyjętej metody. W związku z tym ograniczono się do rozważenia stanów dynamicznych najbardziej charakterystycznych i ważnych dla poszczególnych rodzajów maszyn, takich jak np. regulacja prędkości obrotowej silników prądu stałego i silników indukcyjnych oraz stan zwarcia udarowego prądnic synchronicznych.

Terminologię dostosowano do używanej powszechnie przez polskich elektryków. Dlatego też pozostawiono terminy prądnica, silnik, stojan i wirnik zamiast generator, motor, stator i rotor, co byłoby słuszniejsze ze względu na międzynarodowe ujednolicenie terminów.

Władysław Latek

Warszawa, w sierpniu 1980 r.

WYKAZ OZNACZEŃ

- A — okład prądu
 a — liczba par gałęzi równoległych
 a — przyspieszenie
 a — wartość chwilowa okładu prądu
 B — indukcja magnetyczna
 B_r — remanencja (indukcja magnetyczna szczątkowa)
 b_i — idealny łuk bieguna
 C — pojemność
 D — średnica
 D_l — współczynnik tłumienia (tarcia) w ruchu postępowym
 D_r — współczynnik tłumienia (tarcia) w ruchu obrotowym
 E — energia
 E_1 — energia doprowadzona do układu
 E_2 — energia odprowadzona od układu
 E_d, E_{do} — energia i koenergia dyssypacji
 E_{du} — energia dyssypacji elementu dyssypatywnego układu
 E_{dz} — energia dyssypacji elementu dyssypatywnego zewnętrznego
 E_e — energia pola magnetycznego, energia elektromagnetyczna
 E_v, E_{vo} — energia i koenergia elektryczna elementu pojemnościowego
 E_k, E_{ko} — energia i koenergia kinetyczna
 E_{ku} — energia kinetyczna magazynu konserwatywnego układu
 E_{kz} — energia kinetyczna magazynu konserwatywnego zewnętrznego
 E_{lk}, E_{lko} — energia i koenergia kinetyczna elementu masy w ruchu postępowym
 E_{lp}, E_{lpo} — energia i koenergia potencjalna elementu masy w ruchu postępowym
 E_m, E_{mo} — energia i koenergia magnetyczna elementu indukcyjnego
 E_p, E_{po} — energia i koenergia potencjalna
 E_{pu} — energia potencjalna magazynu konserwatywnego układu
 E_{pz} — energia potencjalna magazynu konserwatywnego zewnętrznego
 E_{rk}, E_{rko} — energia i koenergia kinetyczna elementu bezwładności w ruchu obrotowym
 E_{rp} — energia potencjalna elementu w ruchu obrotowym

- E_z — energia zewnętrzna
 F — siła
 F_a — napięcie magnetyczne twornika
 F_d — siła dyssypacji
 F_e — siła elektromagnetyczna
 F_f — napięcie magnetyczne uzwojenia wzbudzającego
 F_z — siła zewnętrzna
 f — częstotliwość
 f — napięcie magnetyczne
 f_d — siła tarcia
 f_e — siła elektromagnetyczna
 f_m — siła dynamiczna
 G — konduktancja
 G — indukcyjność rotacji
 $G(s)$ — transmitancja operatorowa
 H — natężenie pola magnetycznego
 H_c — natężenie koercji
 H_J — stała inercyjna
 \mathcal{H} — funkcja Hamiltona (hamiltonian)
 I — wartość skuteczna prądu
 I_0 — prąd jałowy
 I_a — prąd twornika
 I_d — prąd wyprostowany
 I_f — prąd magnesujący (wzbudzenia)
 I_{fN} — prąd wzbudzenia znamionowy
 I_{f0N} — prąd wzbudzenia znamionowy przy biegu jałowym
 I_g — prąd w gałęzi
 I_z — prąd zwarciaowy
 I_{z0} — prąd zwarciaowy przy wzbudzeniu znamionowym biegu jałowego
 i — prąd
 J — moment inercji
 K — podatność (odwrotność sprężystości)
 K — liczba wycinków komutatora
 K_z — stosunek zwarcia
 K_g — podatność skrętna
 L — indukcyjność
 \mathcal{L} — potencjał kinetyczny (funkcja Lagrange'a, lagrangian)
 L_0 — indukcyjność zerowa
 L_{ad} — indukcyjność podłużna reakcji twornika
 L_{au} — indukcyjność poprzeczna reakcji twornika
 L_a — indukcyjność synchroniczna podłużna
 L_f — indukcyjność obwodu wzbudzenia

L_l	— indukcyjność rozproszenia
L_a	— indukcyjność synchroniczna poprzeczna
L_s	— indukcyjność synchroniczna
L_z	— indukcyjność zwarciowa
l	— kręt
M	— indukcyjność wzajemna
M	— moment obrotowy
M_d	— moment tłumiący (tarcia)
M_e	— moment elektromagnetyczny
M_h	— moment hamujący
M_J	— moment dynamiczny
M_p	— moment początkowy
M_s	— moment synchronizujący właściwy
M_g	— moment sprężystości
m	— liczba faz
m	— masa
n	— prędkość obrotowa
n_0	— prędkość obrotowa przy biegu jałowym
n_{0i}	— prędkość obrotowa idealna przy biegu jałowym
n_1	— prędkość obrotowa synchroniczna
n_v	— prędkość obrotowa v -tej harmonicznej
P	— moc
P	— moc odprowadzona od układu
P_0	— straty jałowe
P_{0d}	— straty dodatkowe przy biegu jałowym
P_1	— moc doprowadzona do układu
P_{10}	— straty w stanie jałowym
P_{Cu}	— straty w uzwojeniu
P_{Cup}	— straty podstawowe w uzwojeniu
P_e	— moc elektromagnetyczna
P_{Fe}	— straty w rdzeniu
P_f	— straty w uzwojeniu wzbudzającym
P_h	— straty od histerezy
P_m	— straty mechaniczne
P_{mt}	— moc mechaniczna całkowita
P_{obc}	— straty obciążeniowe
P_{obcd}	— straty obciążeniowe dodatkowe
P_p	— straty przejścia
P_s	— moc synchronizująca właściwa
P_t	— straty całkowite
P_w	— straty od prądów wirowych
p	— liczba par biegunów
p	— pęd

- p_d — pęd dyssypacji
 p_k — pęd energii kinetycznej
 Q — liczba żłobków na biegun
 Q — moc bierna
 q — liczba żłobków na biegun i fazę
 q — ładunek elektryczny
 q — liczba pulsów
 R — rezystancja
 R_{at} — rezystancja całkowita w obwodzie twornika
 R_f — rezystancja uzwojenia wzbudzającego
 R_z — rezystancja zwarciova
 r — promień
 S — działanie, funkcjonal lagrangiana
 S — moc pozorna
 s — operator
 s — poślizg
 s_{ph} — strefa fazowa
 T — stała czasowa
 T_0 — stała czasowa transformatora w stanie jałowym
 T_d' — stała czasowa elektromagnetyczna obwodu podłużnego stojana (obwodu wzbudzenia) maszyny prądu stałego
 T_{df}'' — stała czasowa obwodu podłużnego wzbudzającego (stojana)
 T_m — stała czasowa elektromechaniczna
 T_n — okres drgań własnych nietłumionych
 T_q^r — stała czasowa elektromagnetyczna obwodu poprzecznego twornika maszyny prądu stałego
 T_s — stała czasowa uzwojeń fazowych maszyny synchronicznej przy zamkniętym obwodzie wzbudzenia i zamkniętych obwodach tłumienia
 T_z — stała czasowa transformatora przy zwarcu
 T_d' — stała czasowa podłużna przejściowa
 T_d'' — stała czasowa podłużna podprzejściowa
 T_q'' — stała czasowa poprzeczna podprzejściowa
 U — wartość skuteczna napięcia
 U_0 — napięcie w stanie jałowym
 U_f — napięcie na uzwojeniu wzbudzającym (napięcie wzbudzenia)
 U_{ia} — napięcie indukowane reakcji twornika
 U_{id} — napięcie synchroniczne podłużne
 U_{if} — napięcie indukowane od prądu wzbudzenia
 U_{is} — napięcie indukowane synchroniczne
 U_{iq} — napięcie synchroniczne poprzeczne
 U_Q — napięcie za reaktancją synchroniczną poprzeczną
 U_s — napięcie sterujące

- U_{μ} — spadek napięcia magnetycznego
- U_{δ} — napięcie szczelinowe
- u — napięcie
- u — przeciążalność statyczna (momentem)
- u_d — napięcie na elemencie dyssypatywnym
- u_i — napięcie indukowane
- u_{it} — napięcie indukowane transformacji
- u_{ir} — napięcie indukowane rotacji
- u_z — napięcie zewnętrzne
- v — prędkość
- X_0 — reaktancja dla składowych zerowych
- X_1 — reaktancja dla składowych zgodnych
- X_2 — reaktancja dla składowych przeciwnych
- X_a — reaktancja reakcji twornika
- X_{ad} — reaktancja reakcji twornika podłużna
- X_{al} — reaktancja rozproszenia twornika
- X_{aq} — reaktancja reakcji twornika poprzeczna
- X_d — reaktancja synchroniczna podłużna
- X_f — reaktancja obwodu wzbudzenia (obwodu magnesującego)
- X_l — reaktancja rozproszenia
- X_P — reaktancja Potiera
- X_q — reaktancja synchroniczna poprzeczna
- X_s — reaktancja sieci
- X_z — reaktancja zwarciova
- $X_{\mu D}$ — reaktancja magnesowania obwodu podłużnego tłumienia
- $X_{\mu f}$ — reaktancja magnesowania obwodu wzbudzenia
- $X_{\mu Q}$ — reaktancja magnesowania obwodu poprzecznego tłumienia
- X'_{ad} — reaktancja oddziaływania twornika podłużna przejściowa
- X'_d — reaktancja przejściowa podłużna
- X''_{ad} — reaktancja oddziaływania twornika podłużna podprzejściowa
- X''_d — reaktancja podprzejściowa podłużna
- X''_q — reaktancja podprzejściowa poprzeczna
- y — rozpiętość zezwoju
- y_k — poskok komutatorowy
- Z — impedancja
- Z_1 — impedancja dla składowych zgodnych
- Z_2 — impedancja dla składowych przeciwnych
- Z_0 — impedancja dla składowych zerowych
- z — liczba zwojów
- \hat{z} — liczba żłobków
- α_i — współczynnik wypełnienia podziałki biegunowej
- γ — położenie katowe
- δ — szczelina powietrzna



ε	$= \frac{2\pi}{3}$
η	– sprawność
Θ	– przepływ
Θ_f	– przepływ magnesujący (przepływ wzbudzenia)
ϑ	– kąt obciążenia maszyny synchronicznej
ϑ	– przekładnia
ϑ	– temperatura
ϑ_i	– przekładnia prądowa
ϑ_u	– przekładnia napięciowa
Λ	– permeancja
Λ_l	– permeancja na drodze strumienia rozproszonego
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	– przenikalność magnetyczna próżni
μ	– rząd harmonicznej
μ	– współczynnik sprzężenia
ν	– rząd harmonicznej
ζ	– współrzędna uogólniona (położenie)
ζ_{gv}	– współczynnik grupy dla ν -tej harmonicznej
ζ_{yv}	– współczynnik skrótu dla ν -tej harmonicznej
ϱ	– dekrement tłumienia
σ	– współczynnik rozproszenia
τ	– podziałka biegunowa
τ	– czas synchroniczny
Φ	– strumień magnetyczny
Φ_a	– strumień twornika
Φ_f	– strumień magnesów (strumień wzbudzenia)
Φ_l	– strumień rozproszony
φ	– kąt fazowy
Ψ	– strumień skojarzony
Ψ_l	– skojarzenie magnetyczne od strumienia rozproszonego
Ψ_{sr}	– strumień skojarzony z uzwojeniem stojana od prądu wirnika
ψ	– kąt między napięciem indukowanym i prądem
Ω	– prędkość kątowna
ω	– prędkość kątowna
ω	– pulsacja
ω_n	– pulsacja drgań własnych nietłumionych
ω_s	– prędkość synchroniczna
ω_s	– pulsacja synchroniczna

Indeksy

0	– stan początkowy
0	– stan ustalony
1, 2	– uzwojenie pierwotne, wtórne

WYKAZ OZNACZEŃ

- 1, 2, 0 — składowe kolejności zgodnej, przeciwnej, zerowej
- 1, 2, 3 — częstotliwość podstawowa, sumaryczna, różnicowa
- 2, 3 — uzwojenie dwufazowe, trójfazowe
- a — twornik
- B — układ osi prostopadłych
- D — obwód tłumienia w osi podłużnej
- $d, q, g, h,$
- $\alpha, \beta, 0$ — osie $d, q, g, h, \alpha, \beta, 0$
- f — uzwojenie wzbudzające (magnesujące)
- g, d — uzwojenie górne, dolne
- k — uzwojenie kompensacyjne
- l — odpowiednio u, v, w
- l — rozproszenie
- N — układ osi naturalnych
- N — wartość znamionowa
- p, a — składowa okresowa, nieokresowa
- ph — wielkość fazowa
- Q — obwód tłumienia w osi poprzecznej
- rel — wartość względna
- s, r — stojan, wirnik (w dolnym lub górnym indeksie)
- u, v, w — wielkości w osiach u, v, w
- z — stan zwarcia