

Jan Machowski, Zbigniew Lubośny

# STABILNOŚĆ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO



Wydawnictwo WNT



# **STABILNOŚĆ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO**



Jan Machowski, Zbigniew Lubośny

# **STABILNOŚĆ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO**

Autorzy:

**prof. dr hab. inż. Jan Machowski** (Politechnika Warszawska)  
rozdz. 1; 2; 3; 4; 5 bez (5.4, 5.5, 5.6.4); 6; 10; D bez D.5

**prof. dr hab. inż. Zbigniew Lubośny** (Politechnika Gdańska)  
rozdz. 5.4; 5.5; 5.6.4; 7; 8; 9; D.5

Opiniodawca: **prof. dr hab. inż. Stefan Paszek**  
Politechnika Śląska

Projekt okładki i stron tytułowych: **Piotr Fedorczyk**

Fotografia na okładce: **Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA**  
(Stacja Elektroenergetyczna Gdańsk I, moduł PASS)

Wydawca: **Adam Filutowski**

Koordynator ds. redakcji: **Adam Kowalski**

Redaktor: **Maria Kasperska**

Produkcja: **Mariola Grzywacka**

Dział reklamy: **Małgorzata Pasenik** (Małgorzata.Pasenik@pwn.pl)

Skład i łamanie: **ScanSystem.pl Ewa Szelatyńska**

Kreślenie rysunków: **Lech Brzeszczak**

Za dofinansowanie wydania książki dziękujemy firmom Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA oraz PGE Polska Grupa Elektroenergetyczna SA

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](http://www.legalnakultura.pl)  
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA

Warszawa 2018

ISBN 978-83-01-20006-0

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](mailto:pwn@pwn.com.pl); [reklama@pwn.pl](mailto:reklama@pwn.pl)

[www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)

Druk i oprawa: TOTEM.COM.PL

# Spis treści

<b>Wykaz używanych skrótów</b> .....	11
<b>1. Wiadomości ogólne</b> .....	15
1.1. Rodzaje stabilności SEE .....	15
1.2. Jednostki względne .....	21
1.3. Schematy zastępcze generatorów synchronicznych .....	25
1.3.1. Obrazy strumieni i reaktancje zastępcze .....	25
1.3.2. Wykresy fazorowe generatora synchronicznego .....	30
1.3.3. Zmiany sił elektromotorycznych po zakłóceniu .....	34
1.3.4. Równanie ruchu wirnika .....	36
1.4. Równania sieci WN .....	39
1.4.1. Schematy zastępcze linii .....	40
1.4.2. Schematy zastępcze transformatorów .....	46
1.4.3. Pojedynczy element indukcyjny .....	53
1.4.4. Równania węzłowe .....	55
1.4.5. Linearyzacja równań węzłowych .....	57
1.4.6. Zmiana układu współrzędnych .....	59
1.4.7. Wyznaczanie punktu pracy SEE .....	60
<b>2. Stabilność kątowna układu generator-sieć sztywna</b> .....	65
2.1. Charakterystyka mocy w stanie ustalonym .....	65
2.2. Stan równowagi .....	70
2.3. Stabilność kątowna lokalna .....	72
2.3.1. Metoda małych zakłóceń .....	73
2.3.2. Charakterystyka mocy w stanie przejściowym .....	75
2.3.3. Metoda równych pól .....	81
2.3.4. Kołysania po zakłóceniu mocy mechanicznej .....	89
2.3.5. Rozwiązanie równania ruchu .....	91
2.3.6. Wpływ regulacji napięcia .....	96
2.4. Stabilność kątowna przejściowa .....	111
2.4.1. Wpływ czasu trwania i rodzaju zwarcia .....	112
2.4.2. Wpływ obciążenia układu przed zwarcie .....	118

2.4.3. Wpływ odległości zwarcia	119
2.4.4. Zwarcie likwidowane w cyklu SPZ	120
2.4.5. Kołysania mocy	123
2.4.6. Wpływ regulacji napięcia	124
2.4.7. Proste kryterium do analiz przybliżonych	129
2.4.8. Bezpośrednia metoda Lapunowa	132
2.5. Praca asynchroniczna i resynchronizacja	139
2.5.1. Moc asynchroniczna	139
2.5.2. Charakterystyka turbiny	144
2.5.3. Punkt równowagi pracy asynchronicznej	144
2.5.4. Przejście do pracy asynchronicznej	145
2.5.5. Zmiany wartości elektrycznych w trakcie pracy asynchronicznej	147
2.5.6. Możliwości resynchronizacji	148
2.5.7. Wpływ regulacji napięcia generatora i mocy turbiny	150
2.5.8. Identyfikowanie pracy asynchronicznej	152
2.6. Środki poprawy stabilności kątowej	158
2.6.1. Stabilizatory systemowe	158
2.6.2. Szybka regulacja turbin parowych	171
2.6.3. Wylączenie części generatorów	177
2.6.4. Hamowanie elektryczne	180
2.6.5. Wykorzystanie bocznikowych urządzeń FACTS	182
2.6.6. Wykorzystanie kompensatorów szeregowych FACTS	194
2.6.7. Wykorzystanie UPFC	199
<b>3. Stabilność napięciowa układu źródło–odbior</b>	<b>208</b>
3.1. Odbiory kompleksowe	208
3.2. System elektroenergetyczny jako źródło	210
3.3. Warunek stabilności napięciowej $dQ/dU$	212
3.4. Czynniki istotne dla stabilności napięciowej	215
3.4.1. Wpływ wzrostu obciążenia	215
3.4.2. Wpływ zmian w sieci	221
3.4.3. Wpływ kształtu charakterystyk napięciowych	223
3.4.4. Wpływ regulacji napięcia	226
3.4.5. Zjawiska towarzyszące	228
3.5. Inne warunki stabilności napięciowej	229
3.5.1. Warunek stabilności napięciowej $dE/dU$	229
3.5.2. Warunek stabilności napięciowej $dQ_g/dQ_l$	231
3.5.3. Krzywe nosowe	234
3.5.4. Proste kryterium do przybliżonych analiz	236
3.6. Środki poprawy stabilności napięciowej	239
<b>4. Stabilność częstotliwościowa</b>	<b>241</b>
4.1. Charakterystyki częstotliwościowe	241
4.1.1. Częstotliwościowa charakterystyka poboru	241
4.1.2. Częstotliwościowa charakterystyka wytwarzania	244
4.1.3. Punkt równowagi	248

4.2. System regulacji mocy i częstotliwości	251
4.2.1. Korekta czasu synchronicznego	252
4.2.2. Regulacja pierwotna	253
4.2.3. Regulacja wtórna	257
4.2.4. Regulacja trójna	262
4.3. Uprozczone modele dynamiczne	262
4.3.1. Model regulacji pojedynczego systemu	263
4.3.2. Model regulacji dwóch połączonych systemów	265
4.3.3. Model regulacji kilku połączonych systemów	270
4.4. Przebiegi nieustalone w trakcie regulacji częstotliwości	270
4.4.1. Etap I – kołysania wirników generatorów	270
4.4.2. Etap II – spadek częstotliwości	274
4.4.3. Etap III – regulacja pierwotna	277
4.4.4. Znaczenie rezerwy wirującej	279
4.4.5. Lawina częstotliwości	282
4.4.6. Etap IV – regulacja wtórna	284
4.5. Przebiegi nieustalone w trakcie regulacji mocy wymiany	287
4.5.1. Etap I i II – kołysania mocy i spadek częstotliwości	288
4.5.2. Etap III – regulacja pierwotna	290
4.5.2. Etap IV – regulacja wtórna	291
4.6. Działania zaradcze	297
4.6.1. Plan obrony	297
4.6.2. Automatyka SCO	299
4.6.3. Urządzenia UPFC lub TCPAR	300

## **5. Modele matematyczne** . . . . . 308

5.1. Modele generatorów synchronicznych	309
5.1.1. Równania strumieniowo-prądowe	311
5.1.2. Moc w układzie zastępczym	317
5.1.3. Równania różniczkowe strumieniowe	318
5.1.4. Zastępcze źródła napięciowe	327
5.1.5. Modele do badania stabilności	345
5.1.6. Połączenie z siecią	352
5.1.7. Przykładowe parametry	354
5.1.8. Wpływ nasycenia żelaza	356
5.1.9. Zmiana układu współrzędnych	364
5.2. Modele układów wzbudzenia	365
5.2.1. Człon pomiarowo-porównawczy	366
5.2.2. Wzbudnice maszynowe prądu stałego	367
5.2.3. Wzbudnice maszynowe prądu przemiennego	369
5.2.4. Wzbudnice statyczne	373
5.2.5. Stabilizatory systemowe	374
5.3. Modele turbin i ich regulatorów	376
5.3.1. Turbiny parowe	377
5.3.2. Turbina wodna	384
5.3.3. Turbiny gazowe i układy kombinowane	389
5.4. Modele farm wiatrowych	395



5.4.1. Farmy i elektrownie wiatrowe	395
5.4.2. Model elektrowni wiatrowej z maszyną asynchroniczną	399
5.4.3. Model elektrowni wiatrowej z maszyną synchroniczną	412
5.5. Model elektrowni fotowoltaicznej	416
5.6. Modele elementów sieci	423
5.6.1. Linie przesyłowe i transformatory	423
5.6.2. Odbiory kompleksowe	425
5.6.3. Urządzenia FACTS	437
5.6.4. Modele łącza HVDC	442
<b>6. Badanie wielomaszynowych SEE</b>	<b>454</b>
6.1. Badanie stabilności kątovej lokalnej	454
6.1.1. Stabilność lokalna naturalna	455
6.1.2. Stabilność lokalna sztuczna	471
6.2. Badanie stabilności kątovej przejściowej	484
6.2.1. Metody przemienne	485
6.2.2. Metody jednoczesne	501
6.2.3. Porównanie metod	504
6.2.4. Odwzorowanie zakłóceń	505
6.2.5. Ocena tłumienia kołysań mocy	507
6.3. Bezpośrednia metoda Lapunowa	510
6.3.1. Funkcje energetyczne dla modeli SEE	510
6.3.2. Wyznaczanie krytycznego czasu trwania zwarcia	520
6.3.3. Sterowanie bocznikowych urządzeń FACTS	525
6.3.4. Sterowanie UPFC	542
6.3.5. Sterowanie generatorów synchronicznych	553
6.4. Badanie stabilności napięciowej	560
6.4.1. Krzywe nosowe	561
6.4.2. Analiza wrażliwości i analiza modalna	566
6.4.3. Inne metody	569
6.5. Stabilność w planowaniu rozwoju i pracy SEE	570
6.5.1. Zdarzenia planistyczne i ekstremalne	571
6.5.2. Standardy zachowania się SEE	581
6.5.3. Przykłady kryteriów ilościowych	584
<b>7. Optymalizacja układów regulacyjnych</b>	<b>593</b>
7.1. Wymagania formalne stawiane regulatorom	593
7.2. Metody optymalizacji regulatorów	596
7.2.1. Optymalizacja oparta na modelach liniowych	600
7.2.2. Modele klasyczne (IEEE) – regulatory napięcia generatora	612
7.2.3. Modele klasyczne (IEEE) – stabilizatory systemowe	622
7.2.4. Regulatory optymalne LQR, LQG	645
7.2.5. Regulatory krzepkie (odporne) $H_2$ , $H_\infty$	649
7.2.6. Optymalizacja oparta na modelach nieliniowych	660
7.2.7. Regulatory adaptacyjne	663
7.3. Weryfikacja nastawień na obiektach rzeczywistych	671

<b>8. Metody czasu rzeczywistego</b> .....	681
8.1. Układy WAMS .....	681
8.1.1. Fazory .....	681
8.1.2. Struktura układu WAMS .....	687
8.2. Zastosowania układów WAMS .....	695
8.2.1. Ocena stanu pracy systemu .....	695
8.2.2. Detekcja pracy wyspowej .....	702
8.2.3. Obrona stabilności systemu .....	706
8.2.4. Tłumienie kołysań elektromechanicznych .....	709
<b>9. Wpływ rozproszonych źródeł energii</b> .....	714
9.1. Rozproszone źródła energii .....	714
9.1.1. Elektrownie wiatrowe .....	715
9.1.2. Elektrownie fotowoltaiczne .....	721
9.2. Inercja w systemie elektroenergetycznym .....	722
9.2.1. Zmienność inercji w systemie .....	722
9.2.2. Wpływ inercji na stabilność systemu .....	736
9.3. Wirtualna inercja .....	744
9.3.1. Idea układu wirtualnej inercji .....	744
9.3.2. Wpływ wirtualnej inercji na stabilność systemu .....	751
9.3.3. Wirtualna inercja a stabilność połączonych systemów .....	759
<b>10. Redukcja modelu</b> .....	765
10.1. Typy ekwiwalentów dynamicznych .....	765
10.2. Przekształcenia sieci .....	767
10.2.1. Eliminacja węzłów .....	767
10.2.2. Agregacja węzłów metodą Dimo .....	771
10.2.3. Agregacja węzłów metodą Żukowa .....	773
10.2.4. Koherencja .....	776
10.2.5. Agregacja zespołów wytwórczych .....	779
10.2.6. Model zastępczy podsystemu zewnętrznego .....	779
10.3. Rozpoznawanie koherencji .....	781
10.4. Właściwości ekwiwalentów opartych na koherencji .....	788
10.4.1. Elektryczna interpretacja agregacji Żukowa .....	788
10.4.2. Model przyrostowy .....	790
10.4.3. Modalna interpretacja dokładnej koherencji .....	794
10.4.4. Wartości własne i wektory własne modelu zastępczego .....	799
10.4.5. Punkty równowagi modelu zredukowanego .....	808
<b>Literatura</b> .....	814
<b>Dodatek. Podstawy teoretyczne</b> .....	821
D.1. Definicje stabilności .....	821
D.2. Układy liniowe .....	823

D.2.1. Równania różniczkowe zwyczajne	823
D.2.2. Równanie różniczkowe z współczynnikiem zespolonym	833
D.2.3. Wartości i wektory własne macierzy	836
D.2.4. Diagonalizacja macierzy rzeczywistej	841
D.2.5. Modalna postać równania różniczkowego macierzowego	849
D.2.6. Równanie zmiennych stanu z wymuszeniami	860
D.2.7. Analiza modalna układu dynamicznego	861
D.3. Układy nieliniowe	866
D.3.1. Funkcje skalarne w przestrzeni stanów	868
D.3.2. Druga metoda Lapunowa	873
D.3.3. Pierwsza metoda Lapunowa	883
D.4. Częściowa inwersja macierzy	886
D.5. Analiza Prony'ego	887
D.6. Wybrane prawa elektrotechniki	896
D.7. Ograniczniki w członach automatyki regulacyjnej	898
D.8. Metody całkowania numerycznego	902
D.9. Systemy testowe	909
D.9.1. System testowy 3G	909
D.9.2. System testowy 7G (CIGRE)	912
D.9.3. System testowy 10G (New England)	915