

|                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Wykaz oznaczeń . . . . .                                                                                   | 9          |
| <b>1. Turbogenerator jako źródło energii elektrycznej . . . . .</b>                                        | <b>25</b>  |
| 1.1. Wzrost produkcji energii elektrycznej i wzrost mocy zainstalowanej w systemie energetycznym . . . . . | 25         |
| 1.2. Wzrost mocy znamionowej . . . . .                                                                     | 27         |
| 1.3. Celowość wzrostu mocy granicznej. . . . .                                                             | 30         |
| 1.4. Możliwości wzrostu mocy granicznych . . . . .                                                         | 38         |
| 1.4.1. Wiadomości ogólne . . . . .                                                                         | 38         |
| 1.4.2. Zwiększenie średnicy . . . . .                                                                      | 38         |
| 1.4.3. Zwiększenie długości . . . . .                                                                      | 43         |
| 1.4.4. Zastosowanie lepszych materiałów czynnych. . . . .                                                  | 45         |
| 1.4.5. Uintensywnienie chłodzenia . . . . .                                                                | 46         |
| 1.4.6. Zmiana parametrów . . . . .                                                                         | 53         |
| 1.4.7. Zmiana układu wzbudzenia . . . . .                                                                  | 60         |
| 1.4.8. Perspektywy dalszego wzrostu mocy granicznej . . . . .                                              | 65         |
| <b>2. Konstrukcje turbogeneratorów . . . . .</b>                                                           | <b>67</b>  |
| 2.1. Uwagi ogólne . . . . .                                                                                | 67         |
| 2.2. Konstrukcje turbogeneratorów czterobiegunowych . . . . .                                              | 67         |
| 2.2.1. Parametry charakterystyczne . . . . .                                                               | 67         |
| 2.2.2. Opis konstrukcji podzespołów podstawowych . . . . .                                                 | 70         |
| 2.3. Konstrukcje turbogeneratorów dwubiegunowych . . . . .                                                 | 77         |
| 2.3.1. Kryteria podziału . . . . .                                                                         | 77         |
| 2.3.2. Turbogeneratory z chłodzeniem powietrznym . . . . .                                                 | 78         |
| 2.3.3. Turbogeneratory z chłodzeniem wodorowym i wodnym . . . . .                                          | 101        |
| 2.3.4. Izolacja uzwojeń . . . . .                                                                          | 144        |
| 2.3.5. Elementy skrajne statora . . . . .                                                                  | 148        |
| 2.3.6. Wyprowadzenia uzwojeń . . . . .                                                                     | 150        |
| <b>3. Równania turbogeneratorsa . . . . .</b>                                                              | <b>153</b> |
| 3.1. Opis wstępny . . . . .                                                                                | 153        |
| 3.2. Układy osi turbogeneratorsa . . . . .                                                                 | 159        |
| 3.2.1. Układ osi naturalnych . . . . .                                                                     | 159        |
| 3.2.2. Układ osi prostokątnych nieruchomych . . . . .                                                      | 160        |
| 3.2.3. Układ osi prostokątnych wirujących . . . . .                                                        | 162        |
| 3.3. Indukcyjności elementarne turbogeneratorsa . . . . .                                                  | 165        |
| 3.4. Skojarzenia magnetyczne obwodów turbogeneratorsa . . . . .                                            | 169        |
| 3.5. Współczynniki sprzężeń i rozproszeń obwodów turbogeneratorsa . . . . .                                | 174        |
| 3.6. Równania strumieniowo-prądowo-napięciowe . . . . .                                                    | 177        |
| 3.7. Równanie momentów . . . . .                                                                           | 181        |
| 3.8. Komplet równań . . . . .                                                                              | 186        |

|           |                                                                                                                                        |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.9.      | Komplet równań w układzie wartości względnych . . . . .                                                                                | 188        |
| 3.10.     | Wyrażenie prądów przez skojarzenia magnetyczne . . . . .                                                                               | 199        |
| 3.11.     | Równania wartości względnych skojarzeń magnetycznych . . . . .                                                                         | 200        |
| 3.12.     | Równania operatorowe turbogenerators . . . . .                                                                                         | 200        |
| <b>4.</b> | <b>Obciążenie symetryczne ustalone turbogenerators w stanie pracy synchronicznej . . . . .</b>                                         | <b>207</b> |
| 4.1.      | Ogólna charakterystyka ustalonego stanu pracy synchronicznej . . . . .                                                                 | 207        |
| 4.2.      | Stan ustalonego biegu jałowego . . . . .                                                                                               | 209        |
| 4.2.1.    | Napięcie przy biegu jałowym . . . . .                                                                                                  | 209        |
| 4.2.2.    | Charakterystyka biegu jałowego . . . . .                                                                                               | 212        |
| 4.2.3.    | Indukcyjności i reaktancje przy biegu jałowym . . . . .                                                                                | 215        |
| 4.2.4.    | Napięcia magnetyczne na odcinkach drogi strumienia wzbudzenia . . . . .                                                                | 222        |
| 4.2.5.    | Obliczanie charakterystyki magnesowania . . . . .                                                                                      | 226        |
| 4.3.      | Obciążenie ustalone turbogenerators niewzbudzonego układem symetrycznym zgodnym prądów . . . . .                                       | 233        |
| 4.3.1.    | Równania dla obciążenia ustalonego turbogenerators niewzbudzonego . . . . .                                                            | 233        |
| 4.3.2.    | Indukcja od układu symetrycznego zgodnego prądów twornika . . . . .                                                                    | 234        |
| 4.3.3.    | Reaktancje twornika . . . . .                                                                                                          | 240        |
| 4.4.      | Obciążenie ustalone wzbudzonego turbogenerators układem symetrycznym zgodnym prądów . . . . .                                          | 260        |
| 4.4.1.    | Podstawowe równania i wykresy wektorowe dla nienasyconego wzbudzonego turbogenerators przy obciążeniu symetrycznym ustalonym . . . . . | 260        |
| 4.4.2.    | Przeniesienie wielkości obwodu twornika do obwodu wzbudzenia i na odwrót . . . . .                                                     | 268        |
| 4.4.3.    | Charakterystyki turbogenerators . . . . .                                                                                              | 270        |
| 4.4.4.    | Wyznaczanie znamionowego prądu wzbudzenia . . . . .                                                                                    | 279        |
| 4.4.5.    | Wykresy wektorowe napięć z uwzględnieniem nasycenia . . . . .                                                                          | 288        |
| 4.4.6.    | Moc i moment wzbudzonego turbogenerators obciążonego układem symetrycznym zgodnym prądów . . . . .                                     | 293        |
| 4.4.7.    | Praca równoległa turbogeneratorsów . . . . .                                                                                           | 298        |
| <b>5.</b> | <b>Straty w turbogeneratorsze w stanie ustalonym . . . . .</b>                                                                         | <b>315</b> |
| 5.1.      | Opis ogólny i klasyfikacja strat . . . . .                                                                                             | 315        |
| 5.2.      | Podstawy obliczania strat poszczególnych . . . . .                                                                                     | 318        |
| 5.2.1.    | Podstawy obliczania strat podstawowych w rdzeniu . . . . .                                                                             | 318        |
| 5.2.2.    | Podstawy obliczania strat dodatkowych w rdzeniu . . . . .                                                                              | 325        |
| 5.2.3.    | Podstawy obliczania strat podstawowych w uzwojeniu . . . . .                                                                           | 343        |
| 5.2.4.    | Podstawy obliczania strat dodatkowych w uzwojeniu . . . . .                                                                            | 345        |
| 5.2.5.    | Uwagi dotyczące obliczania strat w skrajnych elementach i w elementach konstrukcyjnych . . . . .                                       | 359        |
| 5.3.      | Straty w turbogeneratorsze cylindrycznym . . . . .                                                                                     | 360        |
| 5.3.1.    | Straty mechaniczne poszczególnie . . . . .                                                                                             | 360        |
| 5.3.2.    | Straty mechaniczne łączne . . . . .                                                                                                    | 362        |
| 5.3.3.    | Straty w układzie wzbudzenia . . . . .                                                                                                 | 362        |
| 5.3.4.    | Straty jałowe . . . . .                                                                                                                | 363        |
| 5.3.5.    | Straty zwarcia . . . . .                                                                                                               | 370        |
| 5.4.      | Straty w turbogeneratorsze jawnobiegunowym . . . . .                                                                                   | 378        |
| 5.4.1.    | Straty mechaniczne poszczególnie . . . . .                                                                                             | 378        |
| 5.4.2.    | Straty mechaniczne łączne . . . . .                                                                                                    | 379        |
| 5.4.3.    | Straty w układzie wzbudzenia . . . . .                                                                                                 | 379        |
| 5.4.4.    | Straty jałowe . . . . .                                                                                                                | 379        |
| 5.4.5.    | Straty zwarcia . . . . .                                                                                                               | 380        |
| <b>6.</b> | <b>Stany nieustalone i niesymetryczne . . . . .</b>                                                                                    | <b>387</b> |
| 6.1.      | Uwagi ogólne o metodach rozwiązywania równań turbogenerators . . . . .                                                                 | 387        |
| 6.2.      | Zastosowania metody operatorowej do obliczania stanów nieustalonych symetrycznych . . . . .                                            | 388        |
| 6.3.      | Zastosowanie wzoru Sylwestera do obliczania stanów nieustalonych symetrycznych . . . . .                                               | 394        |
| 6.4.      | Reaktancje turbogenerators dla obciążenia symetrycznego . . . . .                                                                      | 398        |
| 6.4.1.    | Zależności ogólne . . . . .                                                                                                            | 298        |
| 6.4.2.    | Reaktancja w osi zerowej . . . . .                                                                                                     | 400        |
| 6.4.3.    | Reaktancje w osi podłużnej . . . . .                                                                                                   | 400        |
| 6.4.4.    | Reaktancje w osi poprzecznej . . . . .                                                                                                 | 404        |



|           |                                                                                                             |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4.5.    | Schematy zastępcze dla odwzorowania reaktancji i reaktancje rozproszenia . . .                              | 406        |
| 6.4.6.    | Wzory na obliczanie reaktancji dla stanów nieustalonych niesymetrycznych . .                                | 410        |
| 6.5.      | Przebiegi prądowe przy zwarciu symetrycznym udarowym . . .                                                  | 414        |
| 6.5.1.    | Układ równań . . .                                                                                          | 414        |
| 6.5.2.    | Prądy zwarcia w osiach prostokątnych . . .                                                                  | 414        |
| 6.5.3.    | Skojarzenia magnetyczne . . .                                                                               | 418        |
| 6.5.4.    | Prądy zwarcia w osiach naturalnych . . .                                                                    | 421        |
| 6.5.5.    | Wzory praktyczne na prądy zwarcia . . .                                                                     | 426        |
| 6.5.6.    | Stałe czasowe . . .                                                                                         | 434        |
| 6.5.7.    | Próba zwarcia symetrycznego udarowego . . .                                                                 | 439        |
| 6.6.      | Obciążenie niesymetryczne turbogenerators . . .                                                             | 442        |
| 6.6.1.    | Wiadomości ogólne . . .                                                                                     | 442        |
| 6.6.2.    | Impedancje dla składowych symetrycznych . . .                                                               | 446        |
| 6.6.3.    | Wykres wektorowy turbogenerators obciążonego niesymetrycznie . . .                                          | 452        |
| 6.6.4.    | Zwarcie niesymetryczne ustalone . . .                                                                       | 453        |
| 6.6.5.    | Niesymetryczne zwarcie udarowe . . .                                                                        | 461        |
| 6.6.6.    | Dopuszczalne wartości składowej przeciwnej prądu . . .                                                      | 476        |
| 6.7.      | Prądy przy zwarcich udarowych rozwijających się . . .                                                       | 484        |
| 6.8.      | Momenty przy zwarcich udarowych . . .                                                                       | 486        |
| 6.8.1.    | Zależności ogólne . . .                                                                                     | 486        |
| 6.8.2.    | Wyrażenia na poszczególne składowe momentów dla różnych przypadków<br>zwarcia . . .                         | 490        |
| 6.9.      | Odlączenie zwarcia . . .                                                                                    | 496        |
| 6.10.     | Regulacja wzbudzenia w stanach udarowych . . .                                                              | 497        |
| 6.10.1.   | Wiadomości ogólne . . .                                                                                     | 497        |
| 6.10.2.   | Forsowanie wzbudzenia . . .                                                                                 | 497        |
| 6.10.3.   | Odwzbudzenie . . .                                                                                          | 499        |
| <b>7.</b> | <b>Kołysania i stabilność pracy równoległej turbogenerators . . .</b>                                       | <b>505</b> |
| 7.1.      | Wiadomości ogólne . . .                                                                                     | 505        |
| 7.2.      | Badanie stabilności statycznej . . .                                                                        | 506        |
| 7.2.1.    | Metoda małych wychyleń . . .                                                                                | 506        |
| 7.2.2.    | Inne metody badania stabilności statycznej . . .                                                            | 531        |
| 7.3.      | Badanie stabilności dynamicznej . . .                                                                       | 532        |
| 7.3.1.    | Ogólne wiadomości o metodzie równych pól w zastosowaniu do badania sta-<br>bilności dynamicznej . . .       | 532        |
| 7.3.2.    | Graficzna ilustracja różnych charakteryst kątowych . . .                                                    | 532        |
| 7.3.3.    | Warunki stabilności dynamicznej wynikające z zastosowania metody równych<br>pól . . .                       | 540        |
| 7.3.4.    | Metoda analitycznego wyznaczania czasu w funkcji kąta obciążenia na pod-<br>stawie metody równych pól . . . | 545        |
| 7.3.5.    | Metoda wykreślna kolejnych przyrostów kąta . . .                                                            | 545        |
| 7.3.6.    | Metoda analityczna kolejnych przyrostów czasu . . .                                                         | 548        |
| 7.4.      | Wpływ nasycenia na stabilność . . .                                                                         | 552        |
| <b>8.</b> | <b>Stan pracy asynchronicznej turbogenerators . . .</b>                                                     | <b>553</b> |
| 8.1.      | Wiadomości ogólne . . .                                                                                     | 553        |
| 8.1.1.    | Opis stanu pracy asynchronicznej . . .                                                                      | 553        |
| 8.1.2.    | Transmitancja operatorowa, transmitancja widmowa i charakterystyki często-<br>tliwościowe . . .             | 555        |
| 8.1.3.    | Charakterystyka impulsowa i charakterystyka skokowa . . .                                                   | 560        |
| 8.2.      | Charakterystyki częstotliwościowe turbogenerators . . .                                                     | 564        |
| 8.2.1.    | Określenie charakterystyk częstotliwościowych i reaktancji operatorowych<br>(widmowych) . . .               | 564        |
| 8.2.2.    | Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych . . .                                                        | 565        |
| 8.2.3.    | Metoda bezpośrednia . . .                                                                                   | 577        |
| 8.3.      | Moment i moc w stanie pracy asynchronicznej turbogenerators . . .                                           | 584        |
| <b>9.</b> | <b>Parametry charakterystyczne turbogenerators . . .</b>                                                    | <b>589</b> |
| 9.1.      | Synchroniczna reaktancja podłużna . . .                                                                     | 589        |
| 9.2.      | Synchroniczna reaktancja poprzeczna . . .                                                                   | 592        |
| 9.3.      | Podprzejściowa reaktancja podłużna . . .                                                                    | 597        |
| 9.4.      | Podprzejściowa reaktancja poprzeczna . . .                                                                  | 600        |
| 9.5.      | Przejściowa reaktancja podłużna . . .                                                                       | 603        |
| 9.6.      | Przejściowa reaktancja poprzeczna . . .                                                                     | 604        |

|            |                                                                                                           |            |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.7.       | Reaktancja dla składowej przeciwnej . . . . .                                                             | 604        |
| 9.8.       | Rezystancja dla składowej przeciwnej . . . . .                                                            | 606        |
| 9.9.       | Reaktancja dla składowej zerowej . . . . .                                                                | 607        |
| 9.10.      | Rezystancja dla składowej zerowej . . . . .                                                               | 608        |
| 9.11.      | Reaktancja dla składowej zgodnej . . . . .                                                                | 609        |
| 9.12.      | Rezystancja dla składowej zgodnej . . . . .                                                               | 609        |
| 9.13.      | Rezystancja fazy uzwojenia statora . . . . .                                                              | 609        |
| 9.14.      | Rezystancja fazy uzwojenia wzbudzenia . . . . .                                                           | 610        |
| 9.15.      | Reaktancja Potiera . . . . .                                                                              | 610        |
| 9.16.      | Reaktancja rozproszenia statora . . . . .                                                                 | 610        |
| 9.17.      | Stosunek zwarcia . . . . .                                                                                | 611        |
| 9.18.      | Przejściowa stała czasowa podłużna przy otwartych obwodach twornika . . . . .                             | 611        |
| 9.19.      | Podprzejściowa stała czasowa podłużna przy otwartych obwodach twornika . . . . .                          | 613        |
| 9.20.      | Przejściowa stała czasowa poprzeczna przy otwartych obwodach twornika . . . . .                           | 613        |
| 9.21.      | Podprzejściowa stała czasowa poprzeczna przy otwartych obwodach twornika . . . . .                        | 614        |
| 9.22.      | Podprzejściowa stała czasowa podłużna . . . . .                                                           | 614        |
| 9.23.      | Podprzejściowa stała czasowa poprzeczna . . . . .                                                         | 615        |
| 9.24.      | Przejściowa stała czasowa podłużna . . . . .                                                              | 615        |
| 9.25.      | Przejściowa stała czasowa poprzeczna . . . . .                                                            | 616        |
| 9.26.      | Stała czasowa aperiodyczna . . . . .                                                                      | 616        |
| 9.27.      | Stała czasowa przyspieszenia . . . . .                                                                    | 617        |
| 9.28.      | Stała zmagazynowanej energii . . . . .                                                                    | 618        |
| <b>10.</b> | <b>Obliczenia termiczne i wentylacyjne turbogenerators . . . . .</b>                                      | <b>619</b> |
| 10.1.      | Wiadomości ogólne . . . . .                                                                               | 619        |
| 10.2.      | Parametry medium chłodzącego oraz materiałów czynnych, konstrukcyjnych i izolacyjnych . . . . .           | 619        |
| 10.2.1.    | Gęstość medium chłodzącego . . . . .                                                                      | 619        |
| 10.2.2.    | Lepkość . . . . .                                                                                         | 620        |
| 10.2.3.    | Ciepło właściwe . . . . .                                                                                 | 622        |
| 10.2.4.    | Współczynnik przewodności cieplnej . . . . .                                                              | 625        |
| 10.2.5.    | Współczynnik oddawania ciepła przez promieniowanie . . . . .                                              | 629        |
| 10.2.6.    | Współczynnik oddawania ciepła przez konwekcję . . . . .                                                   | 630        |
| 10.2.7.    | Współczynnik wnikania ciepła . . . . .                                                                    | 631        |
| 10.2.8.    | Współczynnik oporu aerodynamicznego . . . . .                                                             | 645        |
| 10.3.      | Parametry wentylatorów . . . . .                                                                          | 655        |
| 10.4.      | Opory cieplne . . . . .                                                                                   | 663        |
| 10.5.      | Opory aerodynamiczne . . . . .                                                                            | 666        |
| 10.6.      | Podstawowe prawa wymiany ciepła . . . . .                                                                 | 668        |
| 10.7.      | Wyznaczanie rozkładu temperatury metodą bezpośrednią . . . . .                                            | 671        |
| 10.7.1.    | Uwagi ogólne . . . . .                                                                                    | 671        |
| 10.7.2.    | Podstawowe równanie rozplywu strumienia cieplnego . . . . .                                               | 671        |
| 10.7.3.    | Wyznaczanie rozkładu temperatury statora turbogenerators z chłodzeniem pośrednim . . . . .                | 673        |
| 10.7.4.    | Wyznaczanie rozkładu temperatury rotora turbogenerators z chłodzeniem pośrednim uintensywnionym . . . . . | 699        |
| 10.7.5.    | Wyznaczanie rozkładu temperatury rotora turbogenerators z chłodzeniem pośrednim powierzchniowym . . . . . | 713        |
| 10.7.6.    | Wyznaczanie rozkładu temperatury statora turbogenerators z chłodzeniem bezpośrednim . . . . .             | 717        |
| 10.7.7.    | Wyznaczanie rozkładu temperatury rotora turbogenerators z chłodzeniem bezpośrednim . . . . .              | 727        |
| 10.8.      | Wyznaczanie rozkładu temperatury metodą schematów cieplnych . . . . .                                     | 732        |
| 10.8.1.    | Uwagi ogólne . . . . .                                                                                    | 732        |
| 10.8.2.    | Schemat cieplny maszyny elektrycznej i podstawowe równania sieci cieplnej . . . . .                       | 732        |
| 10.8.3.    | Odwzorowanie sieci cieplnej . . . . .                                                                     | 746        |
| 10.8.4.    | Zastosowanie metody schematów cieplnych do wyznaczania rozkładu temperatury . . . . .                     | 750        |
| 10.9.      | Sieć wentylacyjna . . . . .                                                                               | 753        |
| 10.9.1.    | Elementy sieci wentylacyjnej . . . . .                                                                    | 753        |
| 10.9.2.    | Podstawowe równania sieci wentylacyjnej . . . . .                                                         | 757        |
| 10.9.3.    | Metoda numeryczna rozwiązań sieci wentylacyjnej . . . . .                                                 | 761        |
| 10.9.4.    | Tok obliczeń sieci wentylacyjnej . . . . .                                                                | 778        |
|            | Literatura . . . . .                                                                                      | 790        |
|            | Skorowidz rzeczowy . . . . .                                                                              | 801        |