

Wykaz symboli i skrótów.....	7
Przedmowa.....	9
1. Superkondensator jako magazyn energii elektrycznej	12
1.1. Budowa i zasada działania.....	12
1.2. Związek przenikalności elektrycznej ze zjawiskiem relaksacji dielektrycznej	15
2. Dynamika obiektów.....	17
2.1. Opis dynamiki równaniami różniczkowymi całkowitego rzędu	17
2.2. Wybrane problemy modelowania obiektów fizycznych.....	22
2.3. Opis dynamiki równaniami różniczkowymi ułamkowego rzędu	26
2.4. Pakiet FOTF oprogramowania Matlab	32
3. Właściwości i modele superkondensatorów.....	34
3.1. Ogólne właściwości superkondensatorów	35
3.2. Równania relaksacji dielektrycznej	37
3.3. Modele superkondensatora na bazie równań relaksacji dielektrycznej.....	38
3.4. Charakterystyki częstotliwościowe modeli superkondensatorów	41
4. Identyfikacja parametrów modeli superkondensatorów	50
4.1. Wybór metody identyfikacji.....	50
4.2. Identyfikacja metodą częstotliwościową	51
4.3. Identyfikacja metodą czasową	62
4.3.1. Założenia metody czasowej	62
4.3.2. Widmo impulsu trapezowego w procesie identyfikacji	67
4.3.3. Wyniki identyfikacji metodą czasową.....	73
5. Sprawność energetyczna superkondensatorów.....	81
5.1. Obciążenie mocą superkondensatorów w magazynach energii.....	81
5.2. Badania sprawności energetycznej superkondensatorów na podstawie modelu	82
5.3. Wnioski.....	87
6. Wybrane problemy zastosowań superkondensatorów w magazynach energii pojazdów elektrycznych.....	89
6.1. Struktury hybrydowych magazynów energii.....	91
6.2. Problemy eksploatacyjne akumulatorów i superkondensatorów w hybrydowych magazynach energii	92
6.3. Efekty zastosowania hybrydowych magazynów energii	97
6.4. Wybrane strategie sterowania mocą w hybrydowych magazynach energii.....	101

6.4.1. Strategia oparta na regułach	102
6.4.2. Badania symulacyjne strategii opartej na regułach.....	105
6.4.3. Strategie wykorzystujące logikę rozmytą	113
6.4.4. Inne strategie	117
6.5. Weryfikacja modelowania hybrydowych magazynów energii z zastosowaniem mode- lu fizycznego	118
6.6. Zastosowanie superkondensatorów w systemie zasilania pociągów metra.....	122
6.7. Zastosowanie superkondensatorów w mikrosieciach energetycznych	124
Podsumowanie	126
Literatura.....	127
Spis ilustracji.....	133
Streszczenie, Summary	136

Superkondensatory są rodzajem kondensatorów elektrochemicznych, które mają pojemność elektryczną znacznie większą od pojemności klasycznych kondensatorów elektrolitycznych. Są one stosowane głównie jako elementy magazynujące energię. Ogólnie charakteryzują się cechami energetycznymi, pośrednimi pomiędzy akumulatorami a kondensatorami elektrolitycznymi. Mają gęstość energii mniejszą niż akumulatory, jednak ich gęstość mocy jest dużo większa niż w akumulatorach oraz ogniwach paliwowych, wykorzystywanych do napędu pojazdów elektrycznych. Superkondensatory ze względu na swoje cechy nadają się bardzo dobrze do krótkotrwałego dostarczania lub przejmowania mocy szczytowej. W konsekwencji tego stanowią one ważne elementy, które wspomagają zasilanie akumulatorowe pojazdów, z sieci trakcyjnej lub ogniw paliwowych. Typowym przykładem wykorzystania superkondensatorów jest dostarczanie lub przejmowanie energii w fazach przyspieszania i hamowania pojazdów.

W pierwszej części książki omówiono modele impedancji superkondensatorów, koncentrując się na modelach ułamkowego rzędu. Przedstawione są metody identyfikacji parametrów tych modeli oraz zagadnienie sprawności energetycznej superkondensatorów. Druga część dotyczy zastosowań superkondensatorów w magazynach energii pojazdów elektrycznych. Zawarte w książce informacje mają charakter bardziej aplikacyjny niż teoretyczny. Celem książki jest przedstawienie metod i narzędzi analizy układów, zawierających superkondensatory. Metody te i narzędzia umożliwiają optymalizację konstrukcji, zawierających te elementy, pod względem oszczędności kosztów i strat energii. Książka przeznaczona jest dla studentów i inżynierów elektryków, elektroników i automatyków. W związku z tym założono, że czytelnicy znają podstawowe zagadnienia z tych dyscyplin na poziomie wyższej uczelni technicznej. Do podstaw tych należą między innymi:

- znajomość podstaw rachunku różniczkowego i całkowego, w tym równań różniczkowych,
- znajomość całkowych przekształceń Fouriera i Laplace'a i rachunku operatorowego,
- znajomość operacji na liczbach zespolonych,
- ogólna wiedza z podstaw logiki rozmytej.

W niektórych przypadkach w niniejszej publikacji jest przedstawione przypomnienie pewnych elementów tej wiedzy, istotnych dla jasności opisu, np. analizy właściwości dynamicznych obiektów z zastosowaniem wykresów Bodego. Dotyczy to jednak jedynie wybranych elementów wiedzy, koniecznej przy omawianiu prezentowanych zagadnień. W odwołaniach literaturowych, oprócz materiałów źródłowych na tematy poruszane w książce, podano też pozycje na tematy podstawowe, zwłaszcza dostępne w języku polskim. Nieco szerzej jest potraktowane zagadnienie modeli dynamiki ułamkowego rzędu, gdyż programy nauczania wyższych uczelni technicznych raczej pomijają to zagadnienie.

Rozdział 1 jest poświęcony budowie i zasadzie działania superkondensatorów. Ponieważ bazują one na wykorzystaniu właściwości elektrycznej warstwy podwójnej, przedstawiony jest związek pomiędzy ich przenikalnością elektryczną a zjawiskiem relaksacji dielektrycznej.

Rozdział 2 prezentuje wybrane zagadnienia, dotyczące dynamiki obiektów. Przypomina opis dynamiki obiektów za pomocą równań różniczkowych zwyczajnych całkowitego rzędu oraz transmitancji operatorowych. W skrócie omawia także wykresy Bodego, służące jako narzędzie do analizy dynamiki obiektów. Następnie przedstawia wybrane problemy modelowania dynamiki obiektów ze szczególnym uwzględnieniem właściwości superkondensatorów. Modele obiektów o tego rodzaju cechach można przedstawić w prostszej postaci na bazie równań różniczkowych ułamkowego rzędu. Dotyczy to zwłaszcza liczby parametrów modelu. Zaprezentowane są definicje ułamkowych pochodnych oraz ich powiązanie z pochodnymi całkowitego rzędu. Na zakończenie rozdziału krótko przedstawiony jest programistyczny pakiet narzędziowy FOTF, działający w środowisku Matlab, przeznaczony do prac związanych z wykorzystywaniem ułamkowych modeli dynamiki obiektów.

Właściwościom superkondensatorów oraz modelom ich impedancji poświęcony jest rozdział 3. Na bazie równań relaksacji dielektrycznej są sformułowane modele impedancji ułamkowego rzędu. Opis dynamiki w tej postaci jest bezpośrednio powiązany z takimi danymi, jak nominalna pojemność i zastępcza rezystancja szeregową, podawanymi przez wytwórców w skróconych danych technicznych jako podstawowe parametry superkondensatorów. W sformułowanym modelu impedancji superkondensatora można wyróżnić człony, związane z zakresami częstotliwości o charakterystycznych cechach modelu. Określony charakter mają też odpowiedzi napięciowe tych członów na pobudzenie sygnałami prądowymi. Omawiane modele ułamkowe są porównane z analogicznymi modelami superkondensatorów całkowitego rzędu, wykorzystywanymi w części prac o tematyce poruszanej w książce.

Rozdział 4 dotyczy wybranych metod identyfikacji modeli parametrycznych, użytecznych przy określaniu parametrów modeli superkondensatorów, szczególnie ich modeli ułamkowego rzędu. Opisany jest przebieg klasycznej identyfikacji

częstotliwościowej modeli parametrycznych superkondensatorów. W dalszej części autorzy prezentują własną, oryginalną metodę identyfikacji parametrów modelu całego modułu superkondensatorów na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych bez jego odłączania od obwodów magazynu energii pojazdu oraz bez stosowania oddzielnych źródeł energii dużej mocy. Opis metod identyfikacji jest połączony z szeregiem uwag technicznych, związanych z prawidłowym wykonaniem tych zadań.

Rozdział 5 jest poświęcony sprawności energetycznej superkondensatorów, wpływającej na część kosztów eksploatacji magazynów energii. W warunkach dynamicznego obciążenia superkondensatorów podczas pracy w magazynach energii określenie strat energetycznych w superkondensatorach tylko na podstawie strat w zastępczej rezystancji szeregowej (ESR) jest wielkim uproszczeniem. Na podstawie zaprezentowanego wcześniej modelu impedancji superkondensatora ułamkowego rzędu, który uwzględnia zjawisko relaksacji dielektrycznej, przedstawione są obliczenia rzeczywistych wartości tych strat. Są one w warunkach pracy magazynu energii często nawet dwukrotnie większe, niż przy obliczeniach na podstawie jedynie wartości zastępczej rezystancji szeregowej superkondensatorów.

Rozdział 6 prezentuje wybrane problemy zastosowań superkondensatorów w hybrydowych magazynach energii pojazdów elektrycznych. Omówione są problemy eksploatacyjne i korzyści, uzyskiwane z zastosowania superkondensatorów w tego rodzaju magazynach. Przykłady dotyczą napędów samochodów osobowych, autobusów, tramwajów itp. Sterowanie rozdziałem mocy magazynu energii pomiędzy główne źródła energii a superkondensatory jest zaprezentowane na podstawie strategii opartej na regułach oraz strategii wykorzystującej logikę rozmytą. Poruszone są zagadnienia weryfikacji doświadczalnej modelowania i symulacji pracy magazynu energii z zastosowaniem modelu fizycznego. Opisany jest też przykład magazynu energii, złożonego tylko z superkondensatorów, eksploatowanego w warszawskim metrze. Przedstawione są problemy mikrosieci elektroenergetycznych, zwłaszcza bazujących na odnawialnych źródłach energii.