

PORADNIK INŻYNIERA

ENERGETYKA TRANSPORTU ZELEKTRYFIKOWANEGO

pod redakcją: Krzysztofa Karwowskiego

Mikołaj Bartłomiejczyk
Leszek Jarzębowicz
Sławomir Judek
Natalia Karkosińska-Brzozowska
Krzysztof Karwowski
Miroslaw Mizan
Jacek Skibicki
Andrzej Wilk

Gdańsk 2018

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Janusz T. Cieśliński

RECENZENT

Adam Szeląg

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI I SKŁAD

Katarzyna Olszonowicz

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem

<http://www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog>

zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.edu.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2018

ISBN 978-83-7348-724-6

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	9
WYKAZ POJĘĆ, WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	11
1. WPROWADZENIE	15
1.1. Historia rozwoju trakcji elektrycznej	15
1.2. Zalety trakcji elektrycznej	19
1.3. Graniczne parametry trakcji prądu przemiennego	21
1.4. Graniczne parametry trakcji prądu stałego	24
1.5. Cel i zasady obliczeń trakcyjnych	26
1.5.1. Efektywność energetyczna transportu	26
1.5.2. Charakterystyczne parametry trakcji	28
1.6. Literatura	31
2. POJAZDY ELEKTRYCZNE	33
2.1. Klasyfikacja pojazdów elektrycznych	33
2.2. Układy napędowe pojazdów	38
2.2.1. Charakterystyka trakcyjna pojazdu	38
2.2.2. Układy napędowe z silnikami szeregowymi prądu stałego	39
2.2.3. Układy napędowe z silnikami indukcyjnymi	42
2.3. Przykładowe charakterystyki trakcyjne pojazdów	48
2.4. Architektura trakcyjnych układów napędowych	55
2.5. Literatura	60
3. DYNAMIKA RUCHU POJAZDÓW	63
3.1. Równanie ruchu pojazdu	63
3.2. Opory ruchu	66
3.2.1. Klasyfikacja oporów ruchu	66
3.2.2. Opory zasadnicze	68
3.2.3. Opory lokalne	78
3.2.4. Całkowite opory ruchu	86
3.2.5. Przykłady obliczeniowe	86
3.3. Ograniczenia siły pociągowej	92
3.4. Ruch pojazdu	96
3.4.1. Fazy ruchu pojazdu	96
3.4.2. Przykłady obliczeniowe	100
3.5. Literatura	116
4. PROFIL TRASY	119
4.1. Źródła i formy pozyskania informacji o profilu trasy	119
4.2. Odczytywanie danych linii kolejowej w formie graficznej	123
4.3. Tabelaryzacja profilu pionowego linii	127
4.4. Wyznaczanie zastępczego profilu pionowego	129
4.5. Określanie dopuszczalnych prędkości maksymalnych i minimalnych	131

4.6. Przykład wyznaczenia profilu wypadkowego dla wybranej linii kolejowej	135
4.7. Literatura	143
5. PRZEJAZD TEORETYCZNY	145
5.1. Cel i zasada obliczeń parametrów przejazdu teoretycznego	145
5.1.1. Obliczenia trakcyjne	145
5.1.2. Realizacja obliczeń przejazdu teoretycznego	146
5.2. Organizacja obliczeń parametrów jazdy pojazdu z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego ..	150
5.2.1. Organizacja arkusza kalkulacyjnego	150
5.2.2. Procedura wykonywania obliczeń	164
5.2.3. Funkcje specjalne arkusza kalkulacyjnego	167
5.3. Przykłady obliczeniowe przejazdów pociągów	175
5.3.1. Przejazd elektrycznego zespołu trakcyjnego dużej prędkości na torze prostym i poziomym	176
5.3.2. Wariantowe obliczenia parametrów jazdy ciężkiego pociągu towarowego	179
5.3.3. Wariantowe obliczenia parametrów jazdy elektrycznego zespołu trakcyjnego	183
5.4. Model symulacyjny pojazdu w programie Matlab/Simulink	187
5.5. Przykładowe symulacje przejazdów pociągów	195
5.5.1. Symulacja przejazdu elektrycznego zespołu trakcyjnego dla potrzeb wyznaczenia rozkładu jazdy	195
5.5.2. Symulacja przejazdu elektrycznego zespołu trakcyjnego z kształtowanym profilem prędkości zadanej według krzywej sklepanej	200
5.5.3. Symulacja przejazdu elektrycznego zespołu trakcyjnego z uwzględnieniem ograniczenia mocy związanego ze zmianami napięcia na odbieraku prądu	203
5.5.4. Symulacja przejazdu pociągu towarowego z uwzględnieniem ograniczonej przyczepności kół napędnych	208
5.6. Literatura	211
6. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA ZELEKTRYFIKOWANYCH MIEJSKICH SYSTEMÓW TRANSPORTOWYCH	213
6.1. Zasilanie miejskiej trakcji elektrycznej	213
6.1.1. Struktura układów zasilania	213
6.1.2. Ekonomiczne aspekty struktury układu zasilania trakcji elektrycznej	220
6.1.3. Wybrane obliczenia układów zasilania miejskiej sieci trakcyjnej	223
6.2. Zasobniki energii elektrycznych pojazdów kolei miejskich	234
6.2.1. Charakterystyka hipotetycznej linii kolejowej i pojazdów	234
6.2.2. Symulacja przejazdu elektrycznego zespołu trakcyjnego	236
6.2.3. Studium doboru zasobnika energii	239
6.2.4. Przykładowe obliczenia parametrów zasobników energii	241
6.3. Wybrane zagadnienia efektywności energetycznej dla metra	250
6.3.1. Rozkład jazdy a efektywność energetyczna systemu	250
6.3.2. Wybór analizowanego systemu transportowego	251
6.3.3. Analiza symulacyjna	255
6.3.4. Model systemu trakcyjnego	257
6.3.5. Wyniki symulacji	261
6.3.6. Porównanie metod sterowania ruchem pojazdów	265
6.3.7. Przykład analizy kryterialnej dla algorytmu zezwalającego na odjazd ze stacji	270
6.4. Literatura	274
7. WYBRANE ZAGADNIENIA ODBIORU PRĄDU Z SIECI JEZDNEJ	275
7.1. Odbiór prądu przez zestyk ślizgowy	275

7.1.1. Warunki pracy zestyku ślizgowego	275
7.1.2. Nagrzewanie silnie obciążonego zestyku	278
7.2. Sieć trakcyjna	281
7.2.1. Konstrukcja sieci jezdnej	281
7.2.2. Podstawowy model matematyczny sieci trakcyjnej	282
7.3. Odbieraki prądu	284
7.3.1. Konstrukcja odbieraka prądu	284
7.3.2. Podstawowe modele matematyczne odbieraka prądu	286
7.3.3. Zaawansowany model odbieraka prądu	288
7.3.4. Modelowanie 3D i analiza dynamiki odbieraka prądu	290
7.4. Badania symulacyjne współpracy odbieraków prądu z siecią trakcyjną	296
7.4.1. Istotne zjawiska falowe podczas interakcji odbieraka z siecią trakcyjną	296
7.4.2. Zaawansowane modele górnej sieci trakcyjnej	301
7.4.3. Model referencyjny sieci jezdnej	307
7.4.4. Wyniki symulacji z wykorzystaniem podstawowych modeli symulacyjnych	310
7.5. Znaczenie kontroli jakości współdziałania odbieraków prądu z siecią	313
7.5.1. Badania stanu technicznego sieci jezdnej w aspekcie norm i przepisów	313
7.5.2. System diagnostyki sieci trakcyjnej DST	316
7.5.3. Diagnostyka odbieraków prądu	319
7.5.4. System monitoringu odbieraków prądu	327
7.6. Literatura	330