

PORADNIK INŻYNIERA

ENERGETYKA TRANSPORTU ZELEKTRYFIKOWANEGO

pod redakcją: **Krzysztofa Karwowskiego**

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

Gdańsk 2020

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

RECENZENT

Adam Szeląg

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI

Katarzyna Olszonowicz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Na s. 135, 138, 142, 176, 204 i 208 znajdują się odwołania do schematu (rys. 4.6),
który można pobrać ze strony <https://eia.pg.edu.pl/kiet/etz>

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

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

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2020

ISBN 978-83-7348-800-7

Książkę tę dedykujemy Profesorowi Przemysławowi Pazdro, który jest jednym z prekursorów wprowadzania nowoczesnych technologii – przekształtników energoelektronicznych i mikroprocesorowych układów sterowania i diagnostyki – do taboru trakcyjnego i urządzeń infrastruktury trakcyjnej w Polsce, począwszy od lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia. Jest on autorem wielu prac badawczych i nowatorskich rozwiązań technicznych z dziedziny trakcji elektrycznej, z których część znalazła odzwierciedlenie w treści tego podręcznika. Jego zasługą jest także wykształcenie licznego, kilkupokoleniowego grona inżynierów zajmujących się teorią i praktyką zelektryfikowanego transportu szynowego; do tej grupy zaliczają się także autorzy.

Współpracownicy i Przyjaciele

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

PRZEDMOWA

W dzisiejszym świecie zglobalizowanej gospodarki, przy ogromnej i stale rosnącej wymianie towarowej oraz coraz większej mobilności społeczeństw, poziom rozwoju transportu stał się jednym z najbardziej istotnych czynników decydujących o możliwościach dalszego wzrostu gospodarczego. Narastające ograniczenia transportowe, spowodowane ekstensywną rozbudową środków transportu, która nie nadąza za zwiększającymi się potrzebami, odczuwamy wszyscy – także w życiu codziennym. Stawia to przed inżynierami konieczność wprowadzania nowych technik w celu ułatwienia przemieszczania pasażerów i towarów. Postęp nauki w dziedzinie inżynierii transportu ukierunkowuje się na nowoczesną trakcję elektryczną, szeroko rozumianą elektromobilność oraz wzrost efektywności energetycznej transportu zelektryfikowanego. Szczególne znaczenie zagadnienia maksymalizacji efektywności energetycznej transportu stanie się oczywiste, gdy spojrzymy na wyniki badań Eurostatu z 2014 roku, dotyczących struktury końcowego wykorzystania energii – wynika z nich, że w Unii Europejskiej dominują trzy kategorie konsumentów energii: na pierwszym miejscu transport – zużywający aż ok. 33% energii, przemysł – 26% oraz gospodarstwa domowe – 25%. Z uwagi na wyższą sprawność energetyczną pojazdów o napędzie elektrycznym w stosunku do środków transportu opartych na silnikach spalinowych, biorąc ponadto pod uwagę aspekty ekologiczne, wiele europejskich krajów przyjmuje – jako kamienie milowe – cele takie jak: szerokie rozpowszechnienie miejskich pojazdów elektrycznych, niezbędne do osiągnięcia tego celu zwiększenie gęstości energii ogniwo elektrochemicznych do minimum 300 Wh/dm^3 oraz – w efekcie m.in. tych działań – redukcja emisji CO_2 o kilkadziesiąt milionów ton, a wszystko to w horyzoncie czasowym nie dłuższym niż do 2025 roku. W odniesieniu do efektywności energetycznej indywidualnych pojazdów elektrycznych o mocy rzędu kilkudziesięciu kilowatów postuluje się, aby osiągnęły one poziom sprawności przetwarzania energii elektrycznej typowy dla pojazdu szynowego dużej prędkości o mocy rzędu dziesięciu megawatów. Osiągnięcie tych zamierzeń wymaga kompleksowego i nowoczesnego podejścia do zagadnień energetyki transportu zelektryfikowanego. Problematyce tej poświęcona jest niniejsza książka.

Podręcznik ten zawiera zagadnienia związane z treścią przedmiotów prowadzonych w Katedrze Inżynierii Elektrycznej Transportu Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej dla kierunków studiów: *automatyka i robotyka*, *elektrotechnika* oraz *transport*. Wymienić tu można przedmioty ogólne, prowadzone na studiach I stopnia: *inżynieria elektryczna w transporcie*, *energetyka transportu* oraz przedmioty specjalnościowe na studiach II stopnia: *energetyka i telematyka transportu*, *mechatronika pojazdów*, *pojazdy elektryczne*.

Podręcznik jest przeznaczony dla studentów zarówno I, jak i II stopnia kształcenia wyższych uczelni technicznych, a także wszystkich zainteresowanych nowoczesną trakcją elektryczną i zelektryfikowanymi systemami transportowymi.

Krzysztof Karwowski

WYKAZ POJĘĆ, WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

a	– przyspieszenie
a_{\max}	– maksymalna wartość przyspieszenia
a_n	– przyspieszenie nierównoważenia
c	– stała konstrukcyjna, stała materiałowa, stała Cartera, współczynnik tłumienia wiskotycznego
c_p	– współczynnik kształtu pojazdu
c_x	– współczynnik oporu aerodynamicznego pojazdu
e	– wskaźnik jednostkowego zużycia energii na cele trakcyjne
E	– energia, energia zużyta przez pojazd, moduł sprężystości podłużnej
E_c	– całkowite zużycie energii
E_k	– energia kinetyczna
E_p	– energia pobrana przez pociąg podczas rozruchu i jazdy
E_r	– energia rozproszona w rezystorach hamowania
E_s	– energia pobrana z podstacji trakcyjnej
E_z	– energia zwrócona do sieci trakcyjnej podczas hamowania odzyskowego
f_t	– współczynnik oporu toczenia
F	– siła, siła pociągowa
F_b	– wartość siły pociągowej dla prędkości bazowej
F_h	– siła hamująca
F_m, F_{\max}	– siła maksymalna
F_p	– siła przyspieszająca, wartość siły pociągowej dla prędkości przejścia, siła oddziaływania odbieraka
F_0	– siła pociągowa dla prędkości zerowej, statyczna siła nacisku odbieraka prądu
F_n	– siła działająca na nakładkę stykową odbieraka prądu
g	– przyspieszenie ziemskie
h	– wysokość, przechyłka, rzędna odcinka zastępczego
i	– pochylenie wzdłużne drogi/toru
i_d	– pochylenie drogi
i_R	– ekwiwalentne pochylenie toru
i_z	– pochylenie zastępcze
I, i	– prąd, prąd silnika, prąd pobierany przez pojazd
I_{sr}	– średni prąd obciążenia odcinka zasilania
I_w	– prąd potrzeb własnych pojazdu
I_t	– prąd na cele trakcyjne pojazdu
j	– zryw
j_{ze}	– jednostkowe zużycie energii na cele trakcyjne i nietrakcyjne
J	– moment bezwładności
J_k	– moment bezwładności kół

J_w	– moment bezwładności wirników silników
J_z	– zastępczy moment bezwładności układu mechanicznego odbieraka
k	– współczynnik mas wirujących
k_n	– sztywność nakładki stykowej
k_L	– kilometrąz linii
k_s	– sztywność sieci jezdnej (odwrotność elastyczności)
K_d, K_w	– podatność elementu sprężystego
l	– liczba, długość odcinka, długość pojazdu
L	– długość drogi, długość przęsła podwieszenia sieci, odległość
m	– masa, masa brutto pociągu
m_n	– masa części napędnej pojazdu
m_c	– masa części ciągnionej pojazdu
m_z	– masa zastępcza pojazdu
m_s	– masa zastępcza sieci jezdnej
m_o	– masa zastępcza odbieraka
M	– moment napędowy
n	– liczba, nr kroku obliczeniowego
N	– siła nacisku
p	– moc chwilowa
P	– moc, łączna moc silników trakcyjnych
P_h	– moc godzinna pojazdu
P_n	– moc znamionowa
r	– rezystancja jednostkowa, promień koła
r_{sj}	– jednostkowa rezystancja sieci jezdnej
r_{sp}	– jednostkowa rezystancja sieci powrotnej
r_{pj}	– jednostkowa rezystancja przewodu jezdnego
R	– promień łuku, rezystancja
R_k	– promień koła
R_p	– rezystancja wewnętrzna podstacji
R_s	– rezystancja sieci trakcyjnej
R_w	– promień wirnika silnika
R_z	– rezystancja zasilaczy
R_{zp}	– rezystancja sumaryczna zasilaczy i podstacji
R_{zw}	– rezystancja zwarcia
s	– droga, poślizg, położenie pojazdu
S	– odcinek drogi, pole powierzchni czołowej pojazdu
t	– czas
T	– czas przejazdu, okres
U, u	– napięcie
U_n	– znamionowe napięcie zasilania
U_0	– napięcie stanu jałowego podstacji trakcyjnej
v	– prędkość
v_b	– prędkość bazowa na charakterystyce trakcyjnej
v_{max}	– prędkość maksymalna
v_p	– prędkość przewozowa, prędkość przejścia na charakterystyce trakcyjnej

v_t	– prędkość średnia jazdy, prędkość techniczna, prędkość najwolniejszych regularnie kursujących pojazdów
v_u	– prędkość ustalona ruchu pojazdu
v_w	– prędkość wiatru
v_z	– prędkość zasadnicza
v_0	– prędkość liniowa osi koła przy jego ruchu bez poślizgu
w	– jednostkowy opór ruchu pojazdu
w_c	– współczynnik oporów ruchu części ciągniętej pojazdu
w_n	– współczynnik oporów ruchu części napędnej pojazdu
W	– opory ruchu
W_b	– siła bezwładności, zwana także oporem bezwładności
W_i	– opór wzniesienia
W_d	– opór drogi
W_{mp}	– opory przy małej prędkości jazdy
W_z	– zasadnicze opory ruchu
y_o	– uniesienie odbieraka prądu
y_s	– uniesienie sieci jezdnej
z	– stosunek przełożenia przekładni, liczba wagonów w zespole trakcyjnym
δ	– funkcja delta Diraca
ρ	– gęstość powietrza, gęstość liniowa materiału struny, rezystywność materiału
η	– sprawność
η_h	– efektywność wykorzystania energii hamowania
η_s	– sprawność silnika trakcyjnego, wskaźnik zużycia energii
μ	– współczynnik przyczepności
ω	– prędkość kątowna
φ	– współczynnik oporu drogi
Φ	– strumień wzbudzenia silnika

skróty

AC	– prąd przemienny (ang. <i>Alternating Current</i>)
AC/DC	– przekształtnik energii prądu przemiennego na energię prądu stałego
AI	– Autodesk Inventor (oprogramowanie CAD)
Bo	– oznacza 2 osie napędzane indywidualnie w tym samym wózku, np. lokomotywy
CAD	– projektowanie wspomagane komputerowo (ang. <i>Computer Aided Design</i>)
CAE	– komputerowo wspomagane konstruowanie (ang. <i>Computer Aided Engineering</i>)
CAM	– komputerowe wspomagane wytwarzania (ang. <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CAN	– magistrala CAN (ang. <i>Controller Area Network</i>)
CNTK	– Centrum Naukowe Techniki Kolejnictwa
COBiRTK	– Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa
CMK	– Centralna Magistrala Kolejowa
Co	– oznacza 3 osie napędzane indywidualnie w tym samym wózku, np. lokomotywy
DC	– prąd stały (ang. <i>Direct Current</i>)
DB	– Kolej Niemiecka (niem. <i>Deutsche Bahn AG</i>)
DC/AC	– przekształtnik energii prądu stałego na energię prądu przemiennego
DC/DC	– przekształtnik energii prądu stałego na energię prądu stałego

Djp	– drut jezdny profilowany
DST	– diagnostyka sieci trakcyjnej
DTC	– metoda bezpośredniego sterowania momentem silnika (ang. <i>Direct Torque Control</i>)
EMC	– kompatybilność elektromagnetyczna (ang. <i>ElectroMagnetic Compatibility</i>)
EZT	– elektryczny zespół trakcyjny
FDM	– metoda elementów różnicowych (ang. <i>Finite Difference Method</i>)
FEM	– metoda elementów skończonych (ang. <i>Finite Element Method</i>)
FOC	– metoda sterowania połowo zorientowana silnikiem (ang. <i>Field Oriented Control</i>)
GPS	– system nawigacji satelitarnej (ang. <i>Global Positioning System</i>)
GSM–R	– kolejowa sieć GSM (ang. <i>GSM for Railways</i>)
IGBT	– tranzystor bipolarny z izolowaną bramką (ang. <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
ICE	– Intercity–Express (ICE) – kategoria pociągów dużej prędkości
IK	– Instytut Kolejnictwa
JR	– Koleje Japońskie (ang. <i>Japan Railways</i>)
FS Trenitalia	– Koleje Włoskie (wł. <i>Ferrovie dello Stato S.p.A.</i>)
KDP	– Kolej Dużej Prędkości (ang. <i>High Speed Railway</i> , w skrócie HSR)
MES	– metoda elementów skończonych (ang. <i>finite element method</i> , w skrócie FEM)
MOP	– monitoring odbieraków prądu
MSD	– moduł symulacji dynamicznej
MVB	– wielofunkcyjna magistrala pojazdu (ang. <i>Multifunction Vehicle Bus</i>)
MW	– Metro Warszawskie
PI	– regulator proporcjonalno-całkujący
PKP	– Polskie Koleje Państwowe SA
PWM	– metoda modulacji szerokości impulsów PWM (ang. <i>Pulse Width Modulation</i>)
RFF	– zarządca francuskiej infrastruktury kolejowej (fr. <i>Réseau Ferré de France</i>)
RŽD	– Koleje Rosyjskie (ros. <i>Российские Железные Дороги</i>)
SKM	– Szybka Kolej Miejska
SNCF	– Narodowe Towarzystwo Kolei Francuskich (fr. <i>Société nationale des chemins de fer français</i>)
TGV	– pociąg o dużej prędkości (fr. <i>Train à Grande Vitesse</i>)
TSI	– techniczne specyfikacje interoperacyjności (ang. <i>Technical Specifications for Interoperability</i>)
UIC	– Międzynarodowy Związek Kolei (fr. <i>Union Internationale des Chemins de fer</i>)
WLAN	– bezprzewodowa sieć lokalna (ang. <i>Wireless Local Area Network</i>)
4QS	– przekształtnik czterokwadrantowy (ang. <i>4 Quadrant Solutions</i>)