

Skróty i pojęcia	7
1. Wprowadzenie	15
1.1. Cyfrowe odwzorowanie aplikacji ETCS. Dorobek badawczy	15
1.2. Plan monografii	17
1.3. Aktualny stan wiedzy	19
1.3.1. Cyfrowy bliźniak	19
1.3.2. Modelowanie i formalny opis systemu srk	23
1.3.3. Weryfikacja poprawności modelu infrastruktury	26
1.3.4. Metody formalne w zastosowaniu do weryfikacji systemu ETCS	27
2. System ERTMS/ETCS i jego aplikacja	29
2.1. System ERTMS	29
2.1.1. Kluczowe funkcje	29
2.1.2. Składniki i struktura	30
2.1.3. Poziomy zastosowania	32
2.1.4. Tryby pracy	33
2.1.5. Procedury	42
2.1.6. Język ETCS	43
2.2. Aplikacja ETCS	46
2.3. Formalne podstawy stosowania scenariuszy operacyjnych w procesie weryfikacji poprawności aplikacji ETCS	48
3. Cyfrowy bliźniak	51
3.1. Koncepcja	51
3.2. Właściwości	53
3.3. Zastosowania	55
4. Cyfrowy bliźniak aplikacji ETCS	57
4.1. Koncepcja	57
4.1.1. Cyfrowy bliźniak	59
4.1.2. Interfejs fizycznego bliźniaka	60
4.1.3. Monitor AE	60
4.1.4. Archiwum	61
4.1.5. Interfejs operatora/ konsola operatora	61
4.1.6. Wirtualne laboratorium	61
4.2. Taksonomia	63
4.3. Zastosowanie	65
4.4. Identyfikacja modeli składowych CBAE	67
4.4.1. Ogólny zarys modelu	67
4.4.2. Pozycjonowanie	68

4.4.3.	Model topologii układu torowego	71
4.4.4.	Modele składników aplikacji ETCS	74
4.4.5.	Modelowanie aplikacji ETCS	85
4.4.6.	Modele elementów otoczenia aplikacji ETCS	90
4.4.7.	Modelowanie otoczenia	98
4.4.8.	Model CBAE	104
4.5.	Wirtualne laboratorium aplikacji ETCS	105
4.5.1.	Założenia	105
4.5.2.	Wirtualne prototypowanie	106
4.5.3.	Koncepcja wirtualnego prototypu aplikacji ETCS	113
4.5.4.	Symulacja scenariuszy operacyjnych	115
4.6.	Dynamiczny model pociągu	118
4.6.1.	Fazy jazdy pociągu	118
4.6.2.	Strategia jazdy pociągu	121
4.6.3.	Równanie ruchu	122
4.6.4.	Interpolacja siły trakcyjnej i hamowania	125
4.6.5.	Dokładność modelu jazdy	127
4.7.	Symulacja jazdy pociągu	128
4.7.1.	Zarys algorytmu	128
4.7.2.	Algorytm symulacji jazdy pociągu	128
4.7.3.	Algorytm symulacji ruchu kolejowego	130
5.	Modele matematyczne i algorytmy	132
5.1.	Podstawy teoretyczne	132
5.2.	Matematyczny model infrastruktury torowej obejmującej aplikację ETCS i jej otoczenie ...	133
5.2.1.	Ogólne założenia	133
5.2.2.	Multigraf infrastruktury kolejowej	134
5.2.3.	Katalog wierzchołków i krawędzi Multigrafu <i>IS</i>	156
5.2.4.	Model przykładowego obszaru sieci kolejowej	159
5.3.	Algorytmy weryfikacji poprawności modelu struktury	161
5.3.1.	Ogólne założenia	161
5.3.2.	Obszary weryfikacji	161
5.3.3.	Spójność modelu matematycznego	163
5.3.4.	Właściwości warstwy podstawowej <i>srk</i>	164
5.3.5.	Budowa aplikacji ETCS	167
5.4.	Scenariusze operacyjne	177
5.4.1.	Formalna specyfikacja	177
5.4.2.	Specyfikacja SSO środowiska symulacji	181
5.4.3.	Wykonanie badania symulacyjnego	183
5.4.4.	Weryfikacja działania aplikacji ETCS	184
5.4.5.	Graficzna reprezentacja scenariusza operacyjnego	186
5.5.	Formalna weryfikacja cyfrowego bliźniaka aplikacji ETCS z wykorzystaniem modelu czasowego i współbieżnego	187
5.5.1.	Rozproszony charakter aplikacji ETCS	187
5.5.2.	Dobór narzędzia	189
5.5.3.	IMDS	190
5.5.4.	Weryfikacja dostępność komunikatów tekstowych na DMI	197
6.	Podsumowanie	205
	Bibliografia	208