

SYMULACJE PROCESÓW RUCHOWYCH NA LINII WYPOSAŻONEJ W SYSTEM ERTMS/ETCS W ŚRODOWISKU ERSA¹

Emilia Koper

mgr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Trans-
portu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel.:
+48 22 234 7882, e-mail: emilia.koper@pw.edu.pl

Andrzej Kochan

dr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Trans-
portu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel.:
+48 22 234 7882, e-mail: andrzej.kochan@pw.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości wynikające z przygotowywania modeli linii kolejowych wyposażonych w urządzenia systemu ERTMS/ETCS oraz symulacji ruchu pojazdów ETCS w dedykowanych narzędziach symulacyjnych. W artykule skupiono się na cechach oprogramowania ERSA. Przytoczono zasadnicze komponenty narzędzia, modelowane, aspekty oraz potencjalne zastosowanie tego rodzaju środowisk. Zwrócono uwagę na dane wyjściowe oraz możliwości ich dalszego zastosowania, m.in. do badania parametrów ruchowych. W artykule skupiono się na zastosowaniu narzędzia do modelowania konfiguracji systemu ERTMS/ETCS 1.

Słowa kluczowe: modelowanie, ERTMS/ETCS, ERSA

1. Wprowadzenie

System ERTMS/ETCS jest aktualnie powszechnie eksploatowany oraz implementowany w krajach Unii Europejskiej i na świecie. Specyfikacja systemu definiuje trzy główne poziomy: 1, 2 oraz 3. Poziomy te różnią się wyposażeniem (przede wszystkim) przytorowym. Wszystkie poziomy wykorzystują komunikację tor-pojazd, zaś maszynista otrzymuje zezwolenie na jazdę bezpośrednio do kabiny.

Zgodnie z Dyrektywą o Interoperacyjności system kolei [3], każda linia kolejowa wyposażona w system ERTMS/ETCS musi otrzymać Certyfikat WE. Proces certyfikacji jest zazwyczaj wieloetapowy, a w rezultacie należy wykazać, że dany podsystem spełnia wymagania Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności. Jednym z elementów procesu są tzw. testy dynamiczne, mające na celu weryfikację prawidłowości współpracy pomiędzy urządzeniami pokładowymi ERTMS/ETCS zainstalowanymi na rzeczywistym pojeździe (pojazd ETCS) a elementami systemu ERTMS/ETCS w części przytorowej. Przedmiotowy etap jest niezbędny, ale i kosztowny. Wynika to m.in. z potrzeby wynajęcia taboru oraz ewentualnych zamknięć torowych. Z tego względu interesującym uzupełnieniem mogą być symulacje, przeprowadzone w wyspecjalizowanym narzędziu, pozwalające na wyeliminowanie potencjalnych błędów na wcześniejszym etapie. Tendencję do przeprowadzania wybranych sprawdzeń w la-

¹ Wkład procentowy poszczególnych autorów: Koper E.: 50%, Kochan A.: 50%

boratorium widać również w Europie. Przykładem mogą być działania laboratorium CEDEX [14]. Proces weryfikacji WE opisano szerzej w [1].

2. ERTMS/ETCS 1

Poziom pierwszy stanowi uzupełnienie istniejących urządzeń stacyjnych i liniowych. Jest on oparty na transmisji informacji pochodzących z rozproszonych przytorowych urządzeń systemu sterowania ruchem kolejowym. Nadajnikami tych informacji są najczęściej eurobalisy (zwane dalej balisami) jednakże wykorzystane mogą zostać również europętle czy urządzenia systemu łączności bezprzewodowej działające w oparciu o Euroradio.

Działanie systemu ERTMS/ETCS 1 polega na transmisji przez balisy przełączalne zezwoleń na jazdę (ang. Movement Authority – MA), generowanych na podstawie aktualnie wyświetlanego sygnału na sygnalizatorach świetlnych oraz informacji statycznych przesyłanych przez balisy nieprzełączalne. Elementem pośredniczącym, pozwalającym na odczyt wskazań sygnalizatora, a następnie przesłanie tych danych do balisy przełączalnej jest koder LEU (ang. Lineside Electronic Unit). Zazwyczaj jest on włączany w obwody świateł sygnalizatorów kolejowych. Takie podejście wiąże się z występowaniem pewnych ograniczeń, które związane są z niejednoznacznością pewnych wskazań względem realizowanego przebiegu. Koder LEU łączony jest za pośrednictwem kabla (interfejs C) z przełączalną balisą, która przekazuje do pokładowych urządzeń ERTMS/ETCS zezwolenie na jazdę, zależne od wskazania sygnalizatora [2]. Urządzenia pokładowe systemu ERTMS/ETCS, na podstawie otrzymanych informacji kontrolują, czy maszynista prowadzi pojazd ETCS zgodnie z profilem prędkości odpowiadającym aktualnym wskazaniom sygnalizatora i drodze przebiegu.

3. ERSA

Modelowanie i symulowanie ruchu pociągu na infrastrukturze cieszy się coraz większą popularnością [10,11]. Aktualnie na rynku funkcjonuje kilka narzędzi umożliwiających symulację operowania w systemie ERTMS/ETCS. Są to np.: ERSA ERTMS/ETCS Operational Simulator, ERSA ERTMS/ETCS Traffic Simulator, Open Track [12], RailSys. Symulacje w tych środowiskach odzwierciedlają współpracę pomiędzy urządzeniami przytorowymi i pokładowymi systemu ERTMS/ETCS. Na potrzeby niniejszego artykułu skupiono się na narzędziu ERSA, umożliwiającym budowanie modeli mikro i makro symulacyjnych.

Narzędzie umożliwia szczegółowe modelowanie rzeczywistej konfiguracji dla ERTMS/ETCS oraz testowanie różnych konfiguracji. Na potrzeby niniejszego opracowania skupiono się na zastosowaniu narzędzia do modelowania konfiguracji ERTMS/ETCS 1.

Głównymi etapami pracy z narzędziem są:

- przygotowanie do modelowania,
- tworzenie modeli,
- symulacja,
- pozyskanie i analiza wyników.

Pakiet oprogramowania składa się z kilku oddzielnych programów obejmujących poszczególne obszary wspomagające prace w dziedzinie rozwiązań dla kolejnictwa. Do podstawowych narzędzi oferowanych przez firmę ERSA należą:

- ERTMS/ETCS Operational Simulator [6],
- ERTMS/ETCS OBU Test Bench [5],
- ERTMS RBC/IXL Test Bench [4],
- ERTMS/ETCS Traffic Simulator [7],
- ETCS Driver Machine Interface,
- ETCS Track Editor [8],
- Evaluation and analysis tools [9],

i najważniejsze z nich opisano pokrótce poniżej.

3.1. ERTMS/ETCS Operational Simulator {6}

ERTMS/ETCS Operational Simulator umożliwia symulacje w czasie rzeczywistym ruchu pociągów na liniach kolejowych wyposażonych w urządzenia ERTMS/ETCS. Podczas użytkowania programu na ekranie wyświetlany jest pulpit maszynisty, a symulacja odbywa się dla wcześniej zdefiniowanego scenariusza i trasy. Moduł dynamiczny pociągu na bieżąco oblicza sytuację ruchową na podstawie danych o pociągu i trasie, z uwzględnieniem komend wprowadzanych za pomocą pulpitu.

3.2. ERTMS/ETCS Traffic Simulator {7}

ERTMS/ETCS Traffic Simulator jest narzędziem, które umożliwia przeprowadzanie symulacji w czasie rzeczywistym. Działanie programu wykorzystuje dane z podsystemów takich jak: odwzorowanie sieci na mapie trasy, symulatora RBC, menedżera funkcji ruchu, symulacji zajętości odcinków i odstępów blokowych oraz ruchu pociągów w tym samym czasie. ERTMS/ETCS Traffic Simulator może być wykorzystany jako: narzędzie wykrywania problemów w implementacji ERTMS/ETCS z propozycją ich rozwiązania, badania przepustowości w systemie ETCS, a także w poprawie zarządzania tym systemem.

3.3. ETCS Track Editor {8}

ETCS Track Editor służy do tworzenia i edycji modelu infrastruktury niezbędnego do przeprowadzania symulacji. Model ma postać dwuwymiarowego grafu, a poszczególne elementy wprowadzane są do systemu poprzez edytor graficzny.

3.4. Evaluation and analysis tools {9}

Evaluation and Analysis Tools jest zestawem narzędzi, który umożliwia analizę danych wygenerowanych przez pozostałe produkty z pakietu ERSA. Program ten umożliwia podgląd działania urządzeń pokładowych systemu, krzywych hamowania, zachowania modułów przytorowych, zestawienia telegramów wymienionych podczas symulacji oraz weryfikację zdefiniowanych scenariuszy

4. Modelowanie

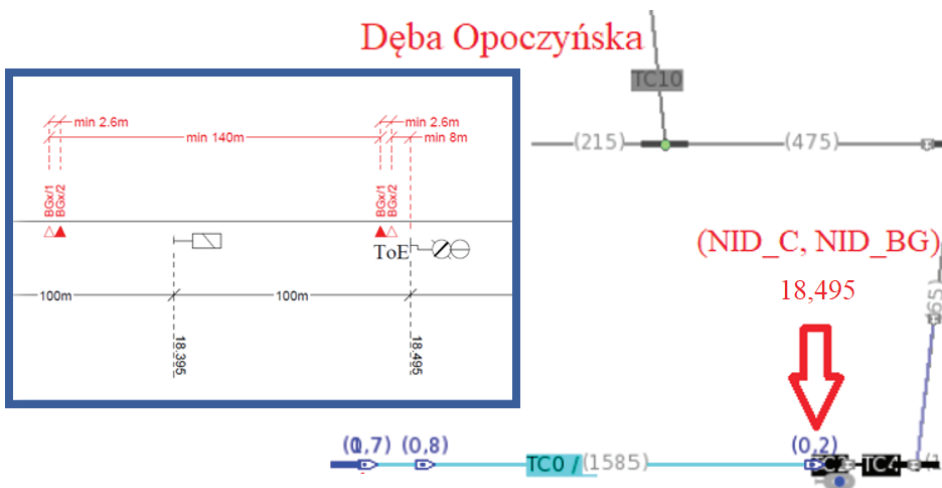
Symulacja procesów ruchowych wymaga przygotowania odpowiednich modeli. Modelowane aspekty obejmują:

- model układu torowego (np. odcinki torów, rozjazdy, gradient),
- model systemu sterowania ruchem kolejowym (np. sygnalizatory, zwrotnice),
- model ERTMS/ETCS (balisy i wiadomości wysyłane przez balisy czy Radiowe Centrum Sterowania (RBC)),
- model pojazdu,
- model rozkładu jazdy.

Przygotowanie odpowiedniego modelu dla certyfikowanej linii pozwala na symulację wszystkich możliwych jazd (przebiegów) oraz na weryfikację poprawności współpracy pomiędzy rzeczywistymi elementami systemu.

4.1. Model układu torowego

Układ torowy tworzony jest na podstawie planów schematycznych oraz sytuacyjnych modelowanego odcinka linii kolejowej w module Track Editor.



Rys. 1. Odzwierciedlenie planu schematycznego w modelu

Źródło: Opracowanie własne

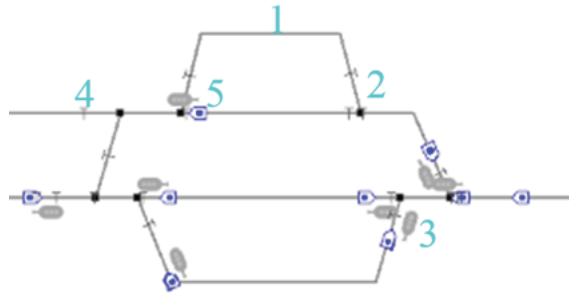
Zasadniczymi elementami modelu są elementy układu torowego, takie jak:

- (1) odcinki (sections) oraz
- (2) rozjazdy i skrzyżowania (junctions).

Na szkielet układu torowego nanoszone są również urządzenia sterowania ruchem kolejowym istotne z punktu widzenia symulacji, tj.:

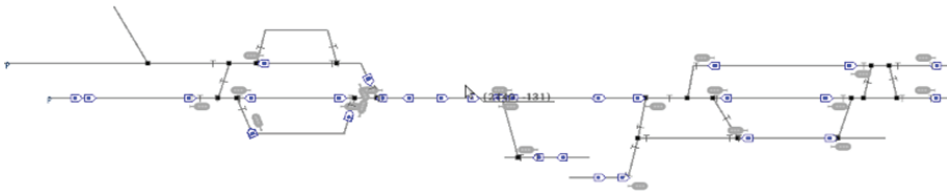
- (3) sygnalizatory (signals),
- (4) urządzenia kontroli niezajętości np. liczniki osi (axle counters),
- (5) balisy (balises) oraz
- inne (np. wykolejnice).

Fragment układu torowego wraz z powyższymi elementami przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Fragment układu torowego wraz z istotnymi urządzeniami srk
Źródło: Opracowanie własne

Każdemu z modelowanych elementów przypisuje się atrybuty. Minimalny zbiór cech opisany jest poniżej. Wszystkim elementom przypisywane są nazwy (oznaczenia). Odcinkom (1) nadawany jest kilometraż początkowy i końcowy, jak również jego długość. Rozjazdom (2) określa się kierunek normalny i zwrotny. Sygnalizatorom (3) przypisuje się typ (rozumiany jako sygnalizator wjazdowy/wyjazdowy itp.), kilometraż, położenie na określonym odcinku oraz odpowiadające mu urządzenie kontroli niezajętości. Urządzeniom kontroli niezajętości (4) definiuje się rodzaj (obwód torowy/licznik osi), kilometraż oraz położenie na określonym odcinku. Balisom (5) przypisuje się kilometraż oraz rodzaj (przełączalna/nieprzełączalna).



Rys. 3. Model układu torowego linii kolejowej nr 22
Źródło: Opracowanie własne

4.2. Pojazd

Do przeprowadzenia symulacji na utworzonym układzie torowym niezbędny jest model pojazdu ETCS, rozumianego jako pojazd, w skład którego wchodzi pojazd trakcyjny z urządzeniami pokładowymi systemu ETCS. W tym celu istnieją dwie możliwe ścieżki postępowania:

- skorzystanie z przygotowanych i dostępnych w bibliotece modeli pojazdów,
- zbudowanie autorskiego modelu pojazdu ETCS.

W przypadku korzystania z gotowego modelu pojazdu nie jest wymagane wprowadzanie dodatkowych danych. Natomiast w przypadku budowania własnego modelu pojazdu należy wprowadzić w dedykowanym oknie (train data input window) atrybuty pociągu. Do najważniejszych parametrów należą:

- rodzaj pociągu,
- długość,
- maksymalna dopuszczalna prędkość,
- masa,
- siła trakcyjna i opory ruchu,
- maksymalne przyspieszenie,
- lokalizacja anteny odbiorczej,
- opóźnienia reakcji,
- inne.

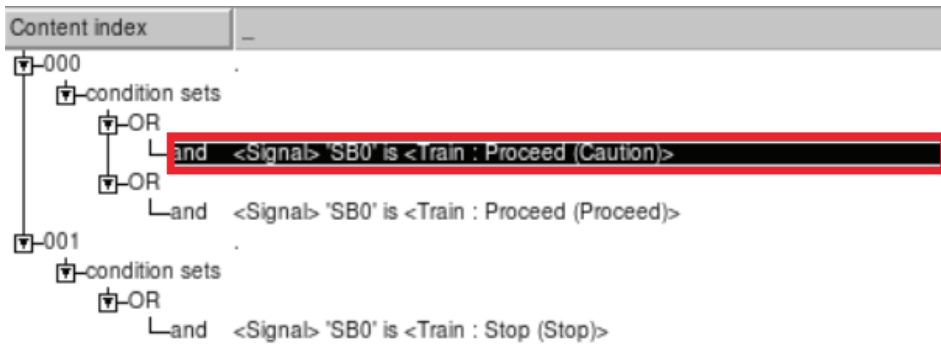
4.3. Pakiety i wiadomości

Omawiane narzędzie umożliwia tworzenie pakietów i wiadomości zgodnych z tzw. językiem ETCS opisanym w Specyfikacji Wymagań Systemowych (SRS) [15]. Funkcjonalność ta umożliwia testowanie poprawności przygotowywanych pakietów i wiadomości już na etapie projektowania podsystemu.

Narzędzie ERSA oprócz tworzenia i weryfikacji poprawności pakietów umożliwia definiowanie odmiennych pakietów i wiadomości, które są uzależnione od spełnienia zaprojektowanych warunków. Możliwość definiowania wspomnianych warunków umożliwia przekazywanie i czerpanie z bogatszych zasobów informacji niż wyłącznie wskazanie sygnalizatora. Jednocześnie warunki pozwalają na pozbycie się ograniczenia związanego z niejednoznacznością wskazania sygnalizatora i realizowanego aktualnie przebiegu, a w konsekwencji daje możliwość przesyłania zezwolenia na jazdę adekwatnego do realizowanego przebiegu. Narzędzie umożliwia opracowanie odmiennych pakietów w zależności od:

- wskazania sygnalizatora (przy czym wyróżnia się sygnał zabraniający jazdy, sygnał zezwalający na jazdę oraz sygnał zezwalający na jazdę, lecz z ostrzeżeniem (ograniczeniem prędkości),
- położenia zwrotnic(-y),
- stanu urządzeń przejazdowych.

Okno definiowania warunków przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Okno edycji warunków
Źródło: materiały własne

Poniżej przedstawiono okno definiowania pakietów przekazywanych przez balisę na przykładzie pakietu 12 (zezwolenie na jazdę dla poziomu 1).

Header		Variable	Value
Balise		1 NID_PACKET	12
P# Description		2 Q_DIR	1
41	Level transition order	3 L_PACKET	73
12	Level 1 movement authority	4 Q_SCALE	1
21	Gradient profile	5 V_MAIN	20
27	International static speed pro...	6 V_LOA	0
255	End of information	7 T_LOA	0
		8 N_ITER	0
		9 L_ENDSECTION	1200
		10 Q_SECTIONTIMER	0
		11 Q_ENDTIMER	0
		12 Q_DANGERPOINT	0
		13 Q_OVERLAP	0

Rys. 5. Okno edycji pakietu 12 (zezwolenie na jazdę) dla danego warunku
Źródło: materiały własne

4.4. Inne

Środowisko ERSA umożliwia realizację ruchu pociągu z uwzględnieniem założonego rozkładu jazdy. Daje również możliwość symulacji prowadzenia ruchu z zastosowaniem automatycznego nastawiania przebiegów. ERSA umożliwia pracę w module Traffic Simulator oraz Operational Simulator. W zależności od wybranego modułu możliwa jest symulacja ruchu pojedynczego pociągu lub ruchu wielu pociągów na fragmencie sieci kolejowej.

5. Symulacja

5.1. Przebieg symulacji

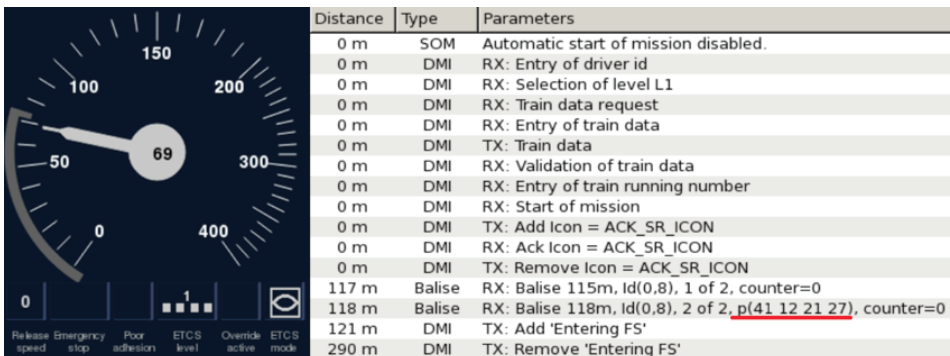
Po utworzeniu modelu układu torowego, zaprogramowaniu balis i przygotowaniu modelu/modeli pociągu/pociągów w module Scenario Editor tworzony jest scenariusz jazdy. Scenario Editor umożliwia dodanie do układu torowego pociągu/pociągów, których jazdy mają być symulowane. Scenario Controller jest modulem, w którym realizowana jest symulacja jazdy. W ramach Scenario Controller dostępny jest symulator nastawiania przebiegów (interlocking symulator) – w którym wybierany jest przebieg do zrealizowania oraz Route Map Controller, odzwierciedlający jazdę/ruch pociągu/pociągów na modelowanym fragmencie sieci kolejowej.

Po uruchomieniu symulacji dostępny jest interfejs maszynisty DMI (ang. Driver Machine Interface), oraz manipulatory obsługujące wybór:

- trybu jazdy (manualny/automatyczny),
- kabiny (A/B),
- kierunku.

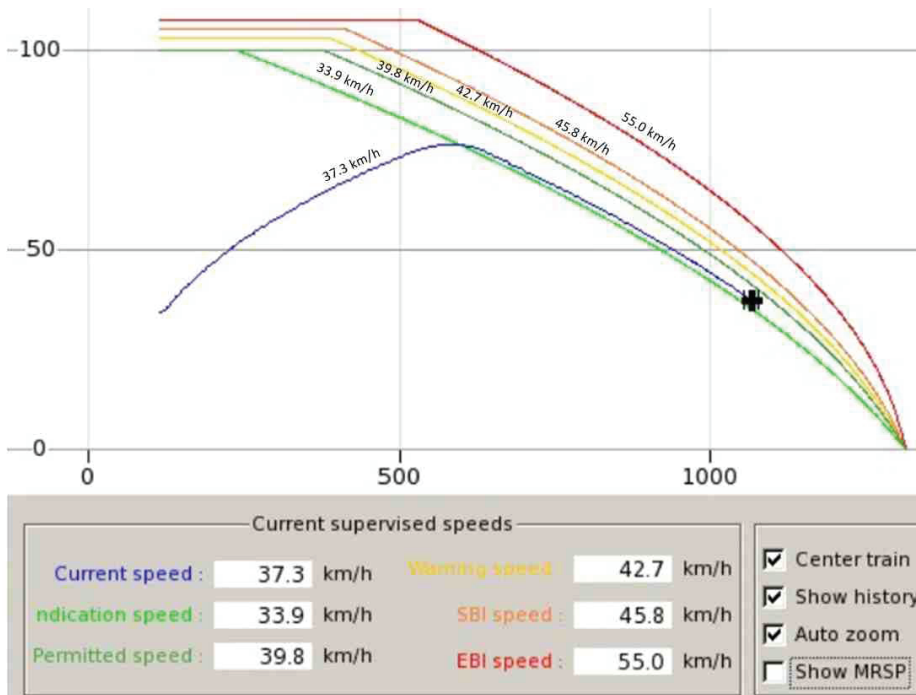
W czasie symulacji dostępne są następujące widoki:

- DMI wraz z wyświetlanymi komunikatami (rys. 6),
- krzywe hamowania (rys. 7),
- położenie pociągu na układzie torowym (rys. 8).



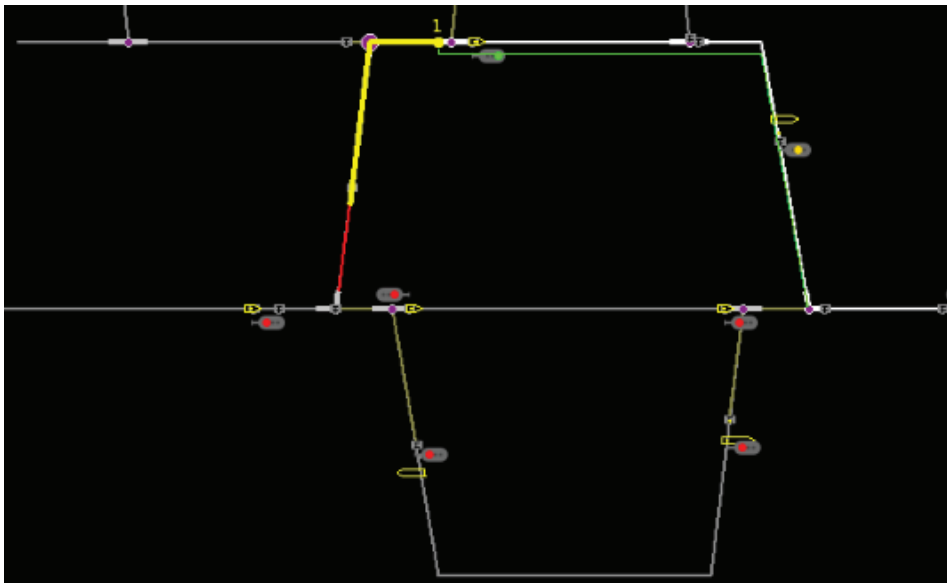
Rys. 6. Przykładowy wygląd DMI w czasie symulacji

Źródło: materiały własne



Rys. 7. Przykładowe krzywe hamowania uzyskane w trakcie symulacji

Źródło: materiały własne



Rys. 8. Odzwierciedlenie położenia pociągu na trasie

Źródło: materiały własne

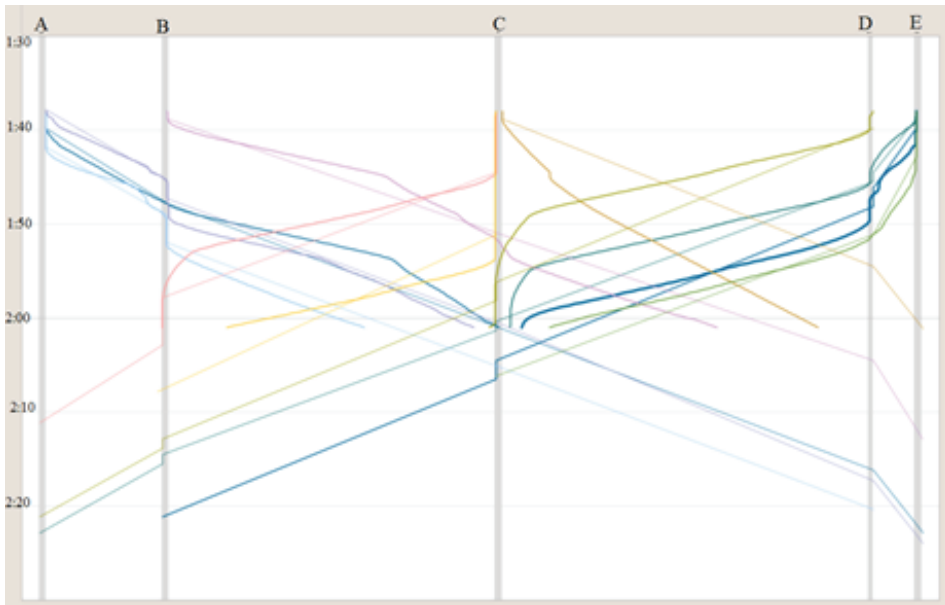
5.2. Wyniki symulacji

Poprawny przejazd pojazdu po modelowanym fragmencie linii kolejowej potwierdza prawidłowość modelu w zakresie poprawności formalnej projektowanych pakietów. Wynika to z faktu, że w przypadku wprowadzenia w pakietach niepoprawnych wartości poszczególnych zmiennych lub w przypadku nie wprowadzenia wszystkich niezbędnych pakietów do baliś pociąg w trakcie symulacji zostanie zatrzymany, co świadczy o występowaniu błędów lub braków w zaprojektowanych pakietach.

Symulacja umożliwia również weryfikację poprawności (osiągalności) założonego rozkładu jazdy oraz jego modyfikacji.

Ponadto w wyniku symulacji otrzymuje się także wykres jazdy pociągu oraz wykres ruchu pociągów umożliwiające badanie pewnych parametrów ruchowych [13], takich jak:

- przepustowość (teoretyczna i rzeczywista) linii kolejowej,
- czas blokowania, bufor czasowy,
- płynność ruchu czy jazdy,
- i inne.



Rys. 9. Przykładowy wykres ruchu uzyskany w narzędziu

Źródło: materiały własne

Przeprowadzone symulacje dają możliwość testowania różnych konfiguracji urządzeń i badanie ich wpływu na parametry ruchowe. Otrzymane wyniki pozwalają na optymalizację rozwiązań już na etapie koncepcji wyposażania linii.

Narzędzie umożliwia przegląd i analizę uzyskanych wyników, podgląd działania urządzeń pokładowych, wykreślone krzywe jazdy, zachowanie (pakiety i wiadomości) modułów przytorowych, zestawienia wymienianych pakietów, wiadomości i komunikatów.

6. Podsumowanie

Nowoczesne narzędzia symulacyjne cieszą się coraz większą popularnością. Wynika to z ich zalet, umożliwiających szczegółowe modelowanie rzeczywistych konfiguracji systemu ERTMS/ETCS. Modelowanie to może odbywać się na wczesnym etapie – takim jak koncepcja czy studium wykonalności, a wyniki symulacji pozwalają na badanie parametrów ruchowych osiąganych dla różnych konfiguracji urządzeń. Ponadto narzędzia symulacyjne pozwalają na weryfikację poprawności projektowanej konfiguracji w zakresie zgodności z językiem ETCS, a tym samym identyfikację potencjalnych błędów na wcześniejszych etapach niż testy dynamiczne. Modelowanie w narzędziu takim jak ERSA pozwala na prowadzenie prac o charakterze zarówno dydaktycznym, naukowym jak i utylitarnym.

Bibliografia

- [1] A. Kochan, E. Koper, Proces certyfikacji podsystemów strukturalnych w świetle regulacji prawnych, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, no. 118, pp. 119–129, 2017..
- [2] Kochan A., Koper E., P. Ilczuk P., Gruba Ł., *Tranzycje w systemie ERTMS/ETCS*, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, vol. 121, pp. 147–159, 2018.
- [3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/57/WE z dnia 17 czerwca 2008 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie.
- [4] ERSA ERTMS RBC/IXL Test Bench. URL: <https://ersa.clearsy.com/products/ertmsrbc>.
- [5] ERSA ERTMS/ETCS OBU Test Bench. URL: [ertms-etcs-obu-test-bench/?lang=en](https://ersa.clearsy.com/products/ertms-etcs-obu-test-bench/?lang=en) (dostęp na dzień: 16 września 2019).
- [6] ERSA ERTMS/ETCS Operational Simulator. URL: <https://ersa.clearsy.com/products/ertms-etcs-operational-simulator/?lang=en> (dostęp na dzień: 16 września 2019).
- [7] ERSA ERTMS/ETCS Traffic Simulator. URL: <https://ersa.clearsy.com/products/>.
- [8] ERSA ETCS Track Editor. URL: <https://ersa.clearsy.com/products/etcs-trackeditor/>.

-
- [9] ERSAs Evaluation and Analysis Tools. URL: <https://ersa.clearsy.com/products/>.
- [10] Harrod, Steven & Cerreto, Fabrizio & Nielsen, Otto. (2019). OpenTrack Simulation Model Files and Output Dataset for a Copenhagen Suburban Railway. Data in Brief. 25. 103952. 10.1016/j.dib.2019.103952.
- [11] Ho T.K. & Mao, Baohua & Yuan, Z.Z. & Liu, H.D. & Fung, Yu-Fai. (2002). Computer simulation and modeling in railway applications. Computer Physics Communications. 143(1). 1-10. 10.1016/S0010-4655(01)00410-6.
- [12] http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html.
- [13] UIC 406 Leaflet – Capacity, 2014.
- [14] Virtualisation of the test environment. Evaluation on the use of lab test in the EC verification of subsystems, verification/Certification of National rules and APPI involving ERTMS track-side and on-boards subsystems, luty 2019.
- [15] SUBSET-026 System Requirements Specification – wydanie 2.3.0.