



Politechnika
Śląska

DYSCYPLINA NAUKOWA
INŻYNIERIA LĄDOWA,
GEODEZJA I TRANSPORT

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Maciej Irlik

Wpływ raportowania pozycji pociągu na przepustowość linii kolejowej

Impact of the train position reporting
on railway line capacity

Promotor
dr hab. inż. Piotr Fołęga, prof. Politechniki Śląskiej

Promotor pomocniczy
dr inż. Szymon Surma

Gliwice 2023

Streszczenie

Cyfryzacja, wodór, ATO (Automatic Train Operation) i ETCS (Europejski System Sterowania Pociągiem) to główne kierunki rozwoju transportu kolejowego w najbliższych latach. Zwiększenie udziału transportu kolejowego w systemie transportowym to nie tylko wymóg związany z transformacją gospodarki w kierunku rozwiązań ekologicznych, ale również widoczny trend zapotrzebowania na transport kolejowy w Europie i na świecie. Koszty i czas wdrażania nowoczesnych systemów sterowania i kierowania ruchem kolejowym powodują potrzebę weryfikacji założeń projektowych i ich wpływu na sprawność działania procesu eksploatacyjnego, w tym na zdolność przepustową. Ponadto, wraz ze zwiększającym się zapotrzebowaniem na usługi przewozowe z wykorzystaniem transportu kolejowego, istotnym staje się zagadnienie zapewnienia niezawodności prowadzenia ruchu i możliwości zwiększania zdolności przepustowej poprzez proces sterowania i kierowania ruchem kolejowym. Zagadnienie to stało się możliwe do realizacji w momencie wprowadzenia w systemach sterowania ruchem kolejowym rozwiązań opartych na bezprzewodowej wymianie danych między pokładowymi i przytorowymi urządzeniami sterowania ruchem kolejowym. Rozwiązania umożliwiające osiąganie zdolności przepustowej adekwatnych do systemów metra na liniach głównych kolei szybkiej są już stosowane na niektórych fragmentach sieci kolejowej na świecie.

W Europie, w tym Polsce, systemy i zasady sterowania ruchem kolejowym z powodów historycznych są specyficzne dla danego Zarządcy Infrastruktury. Dodatkowo istnieje silnie mieszany ruch pojazdów kolejowych - różnego typu, o różnych charakterystykach jazdy i wyposażenia pokładowego w zakresie sterowania. Z tego też względu, wprowadzanie rozwiązań w systemach sterowania ruchem kolejowym w Polsce i w Europie, które mają zwiększać zdolność przepustową wymaga szczegółowych analiz.

W rozprawie zaproponowano wykorzystanie autorskiego oprogramowania symulacyjnego zbudowanego w środowisku MATLAB&Simulink, bazującego na dwóch opracowanych modelach jazdy pociągu. Pierwszy model jazdy pociągu bazuje na procesie sterowania pociągiem przez maszynistę na podstawie wskazań sygnalizacji przytorowej. Drugi model bazuje na procesie sterowania pociągiem z wykorzystaniem sygnalizacji kabinowej i nadzór nad jazdą pociągu przez system ETCS. Oprogramowanie symulacyjne umożliwia parametryzację zarówno parametrów pociągów użytych w symulacji, jak i parametrów układu torowego i rozmieszczenia przytorowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Istotną funkcjonalnością odróżniającą zaproponowane modele jazdy pociągów od innych rozwiązań komercyjnych jest możliwość uwzględnienia rzeczywistych charakterystyk jazdy pociągów (charakterystyki przyspieszania i hamowania) uzyskanych z pomiarów oraz charakterystyki hamowania ETCS.

W pracy zaproponowano sposób oszacowania maksymalnej zdolności przepustowej szlaku w oparciu o kontrolowane wyprawianie kolejnych pociągów na szlak. Przy rzeczywistych

charakterystykach jazdy pociągów, kolejne pociągi są wyprawiane z predykcyjnie określonym opóźnieniem, w celu wyeliminowania konieczności hamowania i ponownego przyspieszania pociągu w wyniku interakcji z pociągiem poprzedzającym.

W zakresie rozwiązań w systemach sterowania ruchem kolejowym związanych ze zwiększeniem zdolności przepustowej, zaproponowano koncepcję dodatkowego podziału klasycznych odstępów na szlaku z wykorzystaniem wirtualnych odstępów. Wirtualne odstępy przyjmują stany niezajętości na podstawie raportowanej pozycji przez pociąg w systemie ETCS, bez potrzeby stosowania dodatkowych fizycznych systemów stwierdzania nie zajętości, np. liczników osi.

Opracowane oprogramowanie symulacyjne, zaproponowana metodyka badania zdolności przepustowej oraz koncepcja dodatkowego podziału odstępów z wykorzystaniem wirtualnych odstępów zostały zastosowane oraz zweryfikowane na przykładowym szlaku Psary-Góra Włodowska linii kolejowej nr 4 (CMK – Centralna Magistrala Kolejowa). Wykonano badania symulacyjne na trzech konfiguracjach szlaku, z wykorzystaniem dodatkowego podziału każdego z odstępów na trzy i dwa odstępy wirtualne. W ramach badań symulacyjnych wykorzystano dane rzeczywiste, uzyskane z wykonanych pomiarów w zakresie charakterystyk hamowania i przyspieszania rzeczywistych pociągów.

Otrzymane wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych, dotyczące wyznaczenia maksymalnej zdolności przepustowej dla wybranego szlaku, potwierdziły jej zwiększenie w przypadku wykorzystania dodatkowego podziału w oparciu o wirtualne odstępy. Potwierdzono także możliwość zastosowania oprogramowania symulacyjnego i zaproponowanego sposobu oceny zdolności przepustowej w zakresie prowadzenia prac projektowych systemów sterowania i kierowania ruchem kolejowym.

Abstract

Digitalization, hydrogen traction, ATO (Automatic Train Operation) and ETCS (European Train Control System) are the main directions of rail transport development in the coming years. The transformation of the economy towards eco-friendly solutions, as well as the growing demand for rail transport both in Europe and worldwide increase the overall share of railway transport in the transportation system. The costs and time of implementing modern train control and management systems necessitate the verification of design assumptions for the operational performance and capacity. Moreover, due to the growing demand for transport services provided by rail operators, the possibility of increasing the capacity through an appropriate process of controlling and managing rail traffic has gained in significance. This possibility opened up when solutions based on wireless data exchange between the on-board and the trackside train control devices were introduced in train control systems. Solutions that enable the capacity of metro systems to be achieved in mainline high-speed lines have already been in use in some parts of the worldwide railway network.

In Europe, including Poland, mainly for historical reasons train control systems and signalling principles are specific for a given country unlike the construction of a closed line or a railway network, with dedicated rolling stock. Additionally, there is a highly mixed traffic movement of rail vehicles – of various types, with different characteristics of acceleration and braking and on-board control equipment. For these reasons, the implementation of solutions in train control systems in Poland and in Europe, which are to increase the capacity, requires detailed analysis.

The paper proposes to use a proprietary simulation software built in the MATLAB&Simulink environment. The simulation software is based on two developed models of train controlling. The first model is based on the train control process performed by the driver based on the trackside signalling signal aspects. The second model is based on the process of train control with the use of cab signalling and safety supervision of the train running by the ETCS system. The simulation software enables a wide range of parameterization, both in terms of the parameters of trains used in the simulation, as well as the parameters of the trackside control system and the layout of trackside train control equipment. An important functionality that distinguishes the proposed train run models from other commercial solutions is the ability to include the real train running characteristics (acceleration and braking characteristics) acquired through measurements, as well as the ETCS braking characteristics.

The paper proposes a way of estimating the maximum capacity of the railway line segment based on the controlled departures of subsequent trains from the station. Consecutive trains depart from the station with a predicted delay based on the known train running characteristics. This is to eliminate an unintentional braking and re-accelerating the train due to interaction with the preceding train.

In terms of train control systems solutions related to increasing the traffic capacity, the concept of additional division of classic blocks on a segment of a railway line using of virtual blocks has been proposed. Virtual blocks assume the non-occupied status based on the position reported by the ETCS onboard system installed on the train. This solution allows not to use additional conventional trackside train detection devices (i.e., wheel detectors of the axle counter system).

The developed simulation software, the proposed methodology of capacity assessment and the concept of using virtual blocks were applied and verified on Psary-Góra Włodowska railway line segment of the railway line no. 4 (Central Rail Line, pl. Centralna Magistrala Kolejowa CMK). As a part of the simulation research, the actual data acquired through executed measurements of the braking performance and acceleration of real trains was used.

The results of the simulation research carried out concerning the capacity determination for the selected line segment confirmed the increase in capacity in the case of using an additional division of classic blocks based on virtual blocks when running trains under the supervision of the ETCS system. Furthermore, the possibility of using simulation software and the proposed way of capacity assessment for the purpose of research and development design solutions in the railway train control and management systems was confirmed.

Spis treści

1. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU	13
1.1. CELE I TEZA PRACY	18
2. UKŁAD ROZPRAWY	19
3. ZDOLNOŚĆ PRZEPUSTOWA LINII KOLEJOWEJ	20
3.1. PODSTAWOWE DEFINICJE ZWIĄZANE ZE ZDOLNOŚCIĄ PRZEPUSTOWĄ LINII KOLEJOWEJ	20
3.2. BADANIA ZDOLNOŚCI PRZEPUSTOWEJ LINII KOLEJOWEJ	30
4. SYSTEMY STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM (SRK)	37
4.1. PODSTAWOWA KLASYFIKACJA I OPIS DZIAŁANIA SYSTEMÓW SRK	37
4.2. RAPORTOWANIE POZYCJI POCIĄGU W PROCESIE STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM	43
5. MODELE JAZDY POCIĄGÓW	52
5.1. MODEL JAZDY POCIĄGÓW W OPARCIU O SYGNALIZACJĘ PRZYTOROWĄ	52
5.2. MODEL JAZDY W OPARCIU O RAPORTOWANĄ POZYCJĘ POCIĄGU	67
6. SPRAWDZENIE OPRACOWANEGO MODELU JAZDY W OPARCIU O SYGNALIZACJĘ PRZYTOROWĄ	71
6.1. SPRAWDZENIE PRACY DETEKTORÓW I SYGNAŁÓW WYŚWIETLANYCH NA SEMAFORACH	71
6.2. PODSUMOWANIE	75
7. BADANIA SYMULACYJNE Z UŻYCIEM MODELU JAZDY POCIĄGÓW W OPARCIU O SYGNALIZACJĘ PRZYTOROWĄ	76
7.1. WPŁYW OPÓŹNIENIA STARTU POCIĄGU NA CZAS JAZDY POCIĄGÓW	76
7.2. WPŁYW DŁUGOŚCI POCIĄGU NA CZAS JAZDY POCIĄGÓW	85
7.3. WPŁYW ZMIAN CHARAKTERYSTYKI JAZDY POCIĄGU NA CZAS JAZDY POCIĄGÓW	87
7.4. PODSUMOWANIE	94
8. SPRAWDZENIE OPRACOWANEGO MODELU JAZDY POCIĄGU W OPARCIU O RAPORTOWANĄ POZYCJĘ POCIĄGU	96
8.1. SPRAWDZENIE WYGENEROWANIA WSPÓLRZĘDNYCH SEMAFORÓW I DETEKTORÓW WIRTUALNYCH	96
8.2. SPRAWDZENIE PRACY WIRTUALNYCH DETEKTORÓW I WIRTUALNYCH SEMAFORÓW I ICH ODDZIAŁYWANIA NA ZEZWOLENIE NA JAZDĘ	99
8.3. PODSUMOWANIE	104
9. BADANIA ZDOLNOŚCI PRZEPUSTOWEJ	105
9.1. RZECZYWISTE CHARAKTERYSTYKI JAZD POCIĄGÓW	105
9.1.1. Analiza procesów hamowania i przyspieszania pociągu w oparciu o dane z pomiarów	105
9.1.2. Charakterystyki hamowania ETCS	120
9.1.3. Podsumowanie	129
9.2. PARAMETRY INFRASTRUKTURY	130
9.3. SYMULACYJNE BADANIA ZDOLNOŚCI PRZEPUSTOWEJ	132
9.3.1. Dodatkowy podział odstępu przy zastosowaniu dwóch semaforów wirtualnych	133
9.3.2. Dodatkowy podział odstępu przy zastosowaniu jednego semafora wirtualnego	144
9.3.3. Brak dodatkowego podziału odstępu z wykorzystaniem wirtualnych semaforów	152
9.3.4. Sprawdzenie czasów przejazdu pociągu	160
9.3.5. Podsumowanie	162
10. PODSUMOWANIE I PERSPEKTYWY DALSZYCH BADAŃ	164
BIBLIOGRAFIA	167
SPIS TABEL	176
SPIS ILUSTRACJI	177
ZAŁĄCZNIK NR 7.1.1	186
ZAŁĄCZNIK NR 7.1.2	190

ZAŁĄCZNIK NR 7.1.3.....	195
ZAŁĄCZNIK NR 7.1.4.....	200
ZAŁĄCZNIK NR 7.1.5.....	205
ZAŁĄCZNIK NR 7.3.1.....	210
ZAŁĄCZNIK NR 7.3.2.....	215
ZAŁĄCZNIK NR 7.3.3.....	220
ZAŁĄCZNIK NR 7.3.4.....	225
ZAŁĄCZNIK NR 7.3.5.....	230
ZAŁĄCZNIK NR 8.1.1.....	235
ZAŁĄCZNIK NR 9.1.1.....	240
ZAŁĄCZNIK NR 9.1.2.....	243

Wykaz oznaczeń

Oznaczenie	Objaśnienie
α	współczynnik zapasu technicznego
D	detektor koła
Dyż.	detektor odpowiadający działaniu dyżurnego ruchu na stacji
Ham.	sygnał „hamuj”
$h_{t,i}^-$	najkrótszy czas pomiędzy dwoma kolejnymi pociągami
$h_{t,i}^A$	czas pomiędzy kolejnymi pociągami, obserwowany na końcu analizowanego odcinka linii
k	liczba pociągów objęta czasem t_n . Dla ruchu jednokierunkowego $k=1$, dla ruchu zmiennokierunkowego, zwykle przyjmuje się $k=2$
L_E	minimalna odległość między dwoma kolejnymi pociągami (okres wykresu ruchu)
L_{E_3}	minimalna odległość między dwoma kolejnymi pociągami przy sygnalizacji 3-stawnej
L_{E_4}	minimalna odległość między dwoma kolejnymi pociągami przy sygnalizacji 4-stawnej
L_w	długość drogi widoczności semafora uwzględniająca czas reakcji maszynisty na zauważony sygnał lub zmianę sygnału
L_h	długość drogi hamowania, odpowiadająca długości odstępów blokadowego
L_o	długość drogi ochronnej
L_t	długość pociągu
L_{srk}	długość drogi jazdy wynikająca z czasu działania urządzeń srk od chwili zwolnienia danego odstępów do zmiany sygnału na semaforze dla kolejnego pociągu
N	zdolność przepustowa
N_d	dobowa praktyczna zdolność przepustowa
N_t	teoretyczna zdolność przepustowa
N_p	praktyczna liczba pociągów w obserwowanym czasie
n_g	liczba godzin kursowania pociągów np. pasażerskich w ciągu doby
r	intensywność zgłoszeń pociągów w ustalonym czasie
P	pociąg
$p(r)$	prawdopodobieństwo zdarzenia, że trasa przeprowadzana przez układ o ustalonej strukturze torowej i intensywności zgłoszeń r wymagać będzie regulacji
s	droga
S1	sygnał „Stój” (czerwony) [137]
S2	sygnał „Jazda z największą dozwoloną prędkością” (zielony) [137]
S3	Sygnał „Jazda z największą dozwoloną prędkością – w przodzie są dwa odstępów blokowe wolne – albo przy następnym semaforze z prędkością nie większą niż 100 [km/h]” (zielony migający) [137]
S5	sygnał „Następny semafor (wskazuje) nadaje sygnał „Stój” (pomarańczowy) [137]
S_{ham}	rzeczywista długość drogi hamowania danego pociągu
Sem.	semafor
SxR	semafor rzeczywisty, gdzie „x” to kolejny numer semafora
SyVR	semafor wirtualny, gdzie „y” to kolejny numer semafora wirtualnego
T	analizowany czas w [min.]. Zwykle przyjmuje się okres godziny (60 [min.]) lub okres doby (1440 [min.])
t	chwila czasowa
t_n	czas następstwa (okres wykresu ruchu) dwóch kolejnych pociągów poruszających się w jednym kierunku

Oznaczenie	Objaśnienie
t_{sygsx_semy}	chwila czasowa odpowiadająca wyświetleniu sygnału „x” na semaforze „y”
v_{ham}	chwilowa prędkość pociągu w czasie hamowania
V_P, V_{POC}, V	prędkość jazdy pociągu P
wsp_{det}	współrzędna detektora D
x	współrzędna szlaku

Wykaz skrótów

Skrót	Znaczenie
ATC	ang. Automatic Train Control, system automatycznego sterowania [88]
ATO	ang. Automatic Train Operation, system automatycznego prowadzenia pociągu [88]
ATP	ang. Automatic Train Protection, system automatycznej kontroli [88]
AWS	ang. Automatic Warning System, system automatycznego ostrzegania [88]
BTE	ang. Base Train Equivalent, ekwiwalentny typ pociągu podstawowego [43]
BTU	ang. Base Train Unit, standardowy typ pociągu [43]
BKJP	Bezpieczna kontrola jazdy pociągu
CMK	Centralna Magistrala Kolejowa
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki
DMI	Pulpit maszynisty stanowiący interfejs ETCS pomiędzy maszynistą i systemem ETCS
ERTMS	ang. European Rail Traffic Management System – Europejski System Zarządzania Ruchem Kolejowym
ETCS	ang. European Train Control System – Europejski System Sterowania Pociągami
EVC	ang. European Vital Computer bezpieczny komputer nadzoru, stanowiący element części pokładowej
GSM-R	Global System for Mobile Communications, system łączności cyfrowej oparty na standardzie GSM, zaprojektowany dla potrzeb zapewnienia komunikacji kolejowej
L2	ERTMS\ETCS poziom 2
LZB	niem. Linienzugbeeinflussung, linienförmige Zugbeeinflussung
MA	ang. Movement Authority (Zezwolenie na Jazdę)
PZB	niem. Punktförmige Zugbeeinflussung
TPWS	ang. Train Protection & Warning System
RAMS	ang. Reliability, Availability, Maintainability and Safety; Niezawodność, Dostępność, Podatność utrzymaniowa, Bezpieczeństwo
SHP	Samoczynne hamowanie pociągu
srk	Sterowanie ruchem kolejowym
UIC	fr. Union Internationale des Chemins de fer, Międzynarodowy Związek Kolei

Wykaz pojęć

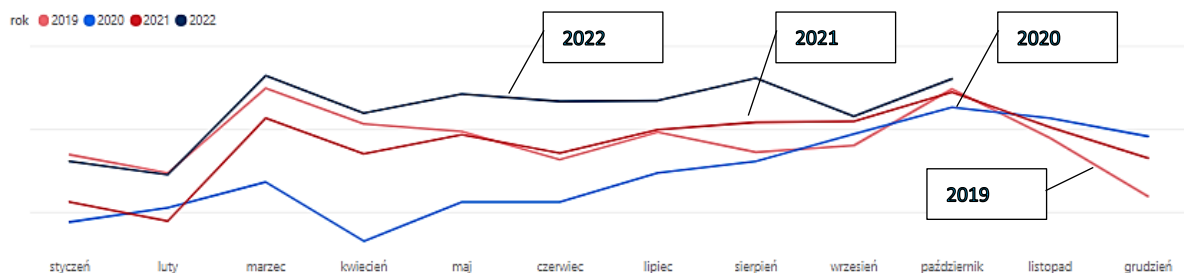
Pojęcie	Definicja
Detektor	Punkt oddziaływania, czujnik koła systemu licznika osi. Urządzenie przytorowe, którego zadaniem jest detekcja pociągu poprzez fizyczne zliczanie osi pojazdu kolejowego. Lokalizacja czujników koła (detektorów) określa granicę odcinka kontroli niezajętości (<i>opracowano na podstawie [53]</i>)
Detektor wirtualny	Obiekt w modelu jazdy pociągu pod nadzorem systemu ETCS, odpowiedzialny za wykrycie czoła i końca pociągu na podstawie raportów pozycji w systemie ETCS (<i>definicja przyjęta dla potrzeb niniejszej pracy, opracowanie własne</i>)
Droga jazdy	Fragment układu torowego, określony dla zapewnienia właściwej organizacji i bezpieczeństwa jazdy pojazdów kolejowych oraz dla uzyskania właściwej sprawności ruchu. Początek i koniec każdej drogi jazdy jest określany przez usytuowanie odpowiedniego oznakowania w terenie (zazwyczaj semafora) lub w przypadku zastosowania systemu bezpiecznej kontroli jazdy pociągu BKJP wyznaczany w inny sposób, zależny od działania tego systemu (<i>opracowano na podstawie [41]</i>)
Droga ochronna	Fragment układu torowego o określonej długości, który może być przejechany bez kolizji z innym pojazdem w razie niezatrzymania się pojazdu na drodze jazdy przed semaforem przytorowym zabraniającym dalszej jazdy lub innym ustalonym miejscem zatrzymania czoła pojazdu (<i>opracowano na podstawie [41]</i>)
Droga przebiegu (przebieg)	Droga jazdy wraz z drogą ochronną, drogą zbliżania i urządzeniami ochronnymi stanowiący zdefiniowany zbiór zdefiniowanych stanów, w jakim powinny znajdować się poszczególne elementy (urządzenia sterowania ruchem kolejowym) wchodzące w skład danej drogi przebiegu, które ją nastawiają, zabezpieczają i kontrolują. Każdy przebieg jest jednoznacznie określony (<i>opracowano na podstawie [41]</i>)
Droga zbliżania	Fragment układu torowego o długości do dwóch odstępów, znajdujący się przed drogą jazdy, kończący się przy semaforze będącym początkiem danej drogi jazdy. Za drogę zbliżania uznaje się odcinek, na którym może znajdować się pociąg w trakcie przygotowania drogi jazdy i drogi ochronnej (<i>opracowano na podstawie [41]</i>)
Interfejs	Układ pośredniczący (mechaniczny, elektroniczny lub optyczny), opcjonalnie z odpowiednim oprogramowaniem umożliwiającym wymianę danych lub sygnałów pomiędzy powiązаныmi urządzeniami lub systemami (<i>opracowano na podstawie [139]</i>)
Odstęp	Odcinek toru kolejowego (wraz z przynależnymi do niego rozjazdami, odcinkami kontroli niezajętości) wyznaczony przez dwa kolejne semafony przytorowe lub wskaźniki zatrzymania ETCS zlokalizowane na jego początku i końcu. Odstępy mogą być zlokalizowane na szlaku – odstępy blokowe lub w stacji – odstępy stacyjne, które obejmują zwykle kilka odcinków kontroli niezajętości oraz rozjazdy (<i>opracowano na podstawie [53]</i>)
Pociąg	Pojazd kolejowy albo skład pojazdów kolejowych, który spełnia wymagania określone dla pociągu (tj. między innymi osygnalizowany zgodnie z przepisami i odpowiednio wyposażony) i któremu zarządca infrastruktury nadał status pociągu. Pociąg posiada swoją własną długość oraz charakterystyki hamowania i przyspieszania wynikającą z charakterystyk pojazdów kolejowych, które znajdują się w jego składzie (<i>opracowano na podstawie [135], [136]</i>)
Pociąg ETCS	Pociąg wyposażony w system ERTMS/ETCS (<i>opracowano na podstawie [94], [95]</i>)
Pociąg konwencjonalny	Pociąg niewyposażony w system ERTMS/ETCS lub wyposażony ale wykonujący jazdę pociągową bez nadzoru systemu ERTMS/ETCS (<i>opracowano na podstawie [94], [95]</i>)

Pojęcie	Definicja
Poziom ETCS	Poziom zastosowania (aplikacji) systemu ETMS\ETCS (<i>opracowano na podstawie [94], [95]</i>)
Semafor	Podgrupa sygnalizatorów przytorowych nadających określone w instrukcji sygnalizacji le-1 sygnały pociągowe. Semafor działa się na wjazdowe, wyjazdowe, drogowskazowe i odstępowe (<i>opracowano na podstawie [53], [137]</i>)
Sygnalizator przytorowy	Element wykonawczy sygnalizacji przytorowej, w skład której wchodzi element wykonawczy przekazujący do personelu informacje . Informacje te są przekazywane w sposób optyczny lub (coraz rzadziej) poprzez odpowiednie ułożenie elementu kształtowego. Sygnalizatory klasyfikuje się ze względu na rodzaj podawanych sygnałów na sygnalizatory pociągowe (semafor, tarcze ostrzegawcze, sygnalizatory powtarzające, sygnalizatory sygnału zastępczego i tarcze ostrzegawcze przejazdowe) oraz manewrowe (tarcze manewrowe i tarcze rozrządowe) (<i>opracowano na podstawie [41] oraz [53]</i>)
Semafor wirtualny	Obiekt w modelu jazdy pociągu pod nadzorem systemu ETCS odpowiedzialny za wydłużenie lub skrócenie zezwolenia na jazdę (poprzez sygnał „hamuj”) w wyniku zajętości kolejnego odstępu przez poprzedzający pociąg (<i>definicja przyjęta dla potrzeb niniejszej pracy, opracowanie własne</i>)
Szlak krytyczny	Szlak, który ma największy okres ruchu (tj. czas zajęcia szlaku przez dany pociąg lub grupę pociągów) (<i>opracowano na podstawie [42]</i>)
Tryb ETCS	Tryb jazdy systemu ETMS\ETCS (<i>opracowanie na podstawie [94]</i>)
Zdolność przepustowa	Największa liczba pociągów (danego typu) mogąca pokonać dany szlak (<i>opracowano na podstawie [42]</i>)
Zezwolenie na jazdę	Sygnał zezwalający na semaforze lub zezwolenie na jazdę w systemie ETCS (zezwolenie elektroniczne) pozwalające na jazdę pociągu po określonych odstępach (<i>opracowano na podstawie [94], [95]</i>)

1. Uzasadnienie podjęcia tematu

Napęd wodorowy pojazdów trakcyjnych, automatyczne prowadzenie pociągu (ATO), dalszy rozwój Europejskiego Systemu Sterowania Pociągami ETCS oraz szeroko pojęta cyfryzacja systemów kierowania i sterowania ruchem kolejowym to główne kierunki rozwoju transportu kolejowego [1]. Proces ten wspomagany jest przez ustawodawstwo europejskie w postaci technicznych specyfikacji interoperacyjności, które w nowej rewizji ukierunkowują dalszy rozwój transportu kolejowego, w celu stworzenia jednolitego rynku kolejowego w ramach państw członkowskich Unii Europejskiej [2]. Polityka transportowa Unii Europejskiej jest ukierunkowana na tzw. zielony ład. Polityka ta promuje transport kolejowy jako transport niskoemisyjny, wpływający najmniej negatywnie na środowisko w porównaniu z transportem drogowym i lotniczym [3] - [6]. Jednym z działań jest promowanie realizacji podróży na krótkich i średnich trasach transportem kolejowym (w tym, w zakresie transportu podmiejskiego i aglomeracyjnego [7]). Przykładem działań prorozwojowych w zakresie większego wykorzystania transportu kolejowego są m.in. systemy kolei aglomeracyjnych w Polsce, które pozwalają na istotne wzmocnienie oferty przewozowej w ramach komunikacji publicznej [8], [9]. W zakresie przewozu towarów również można zaobserwować zwiększenie znaczenia transportu kolejowego [10]. Wydajny system transportu kolejowego pełni ważną rolę w całym systemie transportowym, co ma istotny wpływ na ekonomię i gospodarkę [11].

Rysunek 1-1 pokazuje pracę przewozową w ruchu pasażerskim wykonaną na kolei w Polsce w latach 2019-2022 (do lipca). W kwietniu 2020 r. w rezultacie pandemii wirusa SARS-CoV-2 praca przewozowa na kolei uległa spadkowi, podobnie jak w pozostałych gałęziach transportu, jednak w roku 2022 w zakresie transportu pasażerskiego powróciła ona do trendu rosnącego. W roku 2022 zanotowano rekordową pracę przewozową w zakresie liczby przewiezionych pasażerów – powyżej 30 mln osób każdego miesiąca.



Rysunek 1-1. Dane eksploatacyjne przewozów pasażerskich w latach 2010-2020 [źródło: dane.utk.gov.pl]

Zwiększające się zapotrzebowanie na transport kolejowy powoduje konieczność zapewnienia konkurencyjnej oferty przewozowej względem transportu drogowego na krótkich i średnich dystansach oraz względem transportu lotniczego na średnich dystansach. Jednym z czynników warunkujących budowę konkurencyjnej oferty przewozowej jest zdolność przepustowa implikująca zapewnienie dostępności i jakości usług przewozowych.

Zdolność przepustowa linii kolejowej jest istotnym parametrem decydującym o sprawności systemu transportowego i jego konkurencyjności. Parametr ten warunkuje budowę rozkładu jazdy, a więc przygotowanie oferty przewozowej. Mniejsza zdolność przepustowa niż poziom zapotrzebowania na usługi przewozowe może powodować konieczność ograniczania oferty przewozowej, wydłużenie czasu i kosztów jazdy w wyniku ułożenia trasy dla danego pociągu trasami alternatywnymi względem trasy najkrótszej. Koszty prowadzenia pociągu trasami

alternatywnymi, z powodu niewystarczającej zdolności przepustowej trasy najkrótszej, mogą być większe nawet do ok. 50% [12].

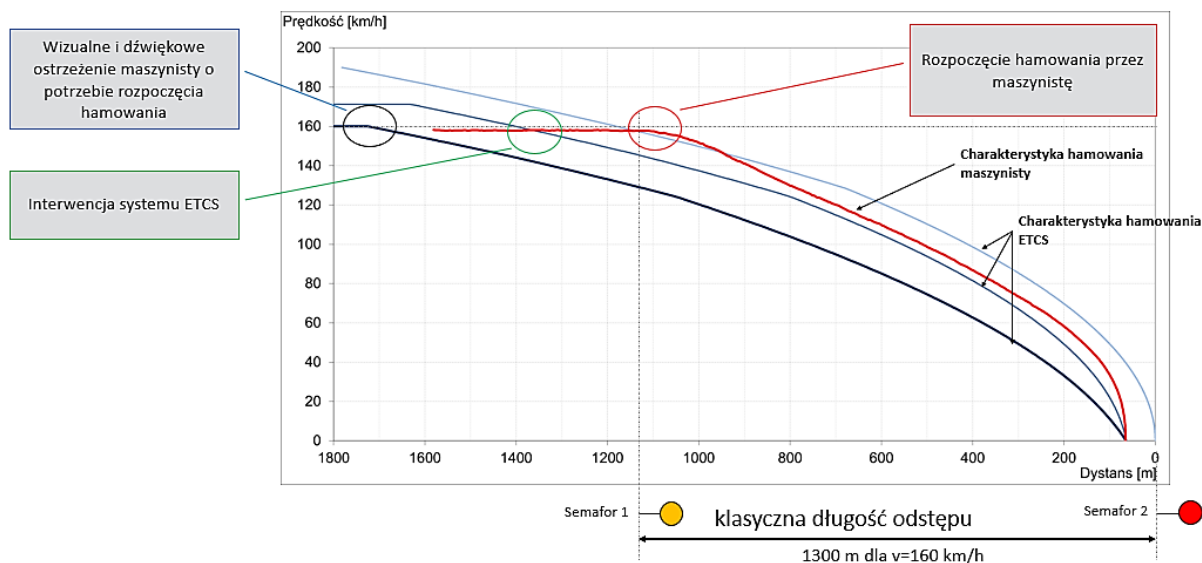
Zwiększenie zdolności przepustowej linii kolejowej może odbyć się przez rozbudowę infrastruktury. Nie zawsze jest to jednak możliwe z uwagi na ograniczenia terenowe i bardzo wysoki koszt inwestycji. Inną możliwością zwiększenia zdolności przepustowej może być odpowiednio zaprojektowany system sterowania ruchem kolejowym (srk). System sterowania ruchem kolejowym w takim przypadku może wykorzystywać między innymi cyfrową łączność między elementami infrastruktury stałej systemu srk, a obiektami mobilnymi, jak pociągi, przetwarzanie danych o aktualnej sytuacji ruchowej i stanu urządzeń srk lub zapewnienie automatyzacji prowadzenia pociągu [13] - [15].

Systemy i zasady sterowania ruchem kolejowym zasadniczo różnią się w poszczególnych krajach, głównie z powodów historycznych. Dodatkowo, szczególnie w krajach europejskich istnieje silnie mieszany ruch pojazdów kolejowych - różnego typu, o różnych charakterystykach jazdy i wyposażenia pokładowego w zakresie sterowania. Z tego też względu wprowadzanie rozwiązań w systemach sterowania ruchem kolejowym, które mają zwiększać zdolność przepustową, wymaga szczegółowych analiz [16] - [17]. Szczególnie istotne może się to okazać dla planowanych nowych linii kolejowych związanych z Centralnym Portem Komunikacyjnym (CPK) [18].

W ramach procesu cyfryzacji systemów sterowania ruchem kolejowym na sieci kolejowej w Polsce oraz w wielu innych krajach na świecie wprowadza się zunifikowany Europejski System Sterowania Ruchem Pociągów ERTMS/ETCS [19]. System ten zapewnia funkcję bezpiecznej kontroli jazdy pociągu oraz pozwala zapewnić interoperacyjność kolei, czyli zdolność do operacyjnej unifikacji procesu sterowania w ramach przejazdu pociągu przez granice państw. System ten wprowadza również ciągłą transmisję tor-pojazd oraz raportowanie pozycji pociągu względem układu odniesienia w postaci transponderów zlokalizowanych w torze (tzw. balis).

Konstrukcja rozkładu jazdy bazuje na nominalnych warunkach prowadzenia ruchu kolejowego, podczas gdy system ERTMS/ETCS, działając jako system krytyczny dla bezpieczeństwa, musi brać pod uwagę najbardziej niekorzystne sytuacje związane z długością drogi hamowania pociągu [20]. System ten musi w procesie wyliczania maksymalnej prędkości w danym punkcie jazdy uwzględniać dostępność siły hamującej na pociągu (np. działanie niektórych dodatkowych hamulców nie może być gwarantowane), współczynnik adhezji pomiędzy kołem a szyną, niedokładność pomiaru odometrycznego [21]. Kalkulacja dozwolonej prędkości jazdy w funkcji drogi jazdy przez system ETCS może nakazać maszyniście rozpoczęcie hamowania znacznie wcześniej, niż wynika to z charakterystyki hamowania pociągu w sytuacji normalnej. W pracy własnej [22] przedstawiono wpływ zastosowania systemu ETCS poziomu 2 na drogę hamowania względem podejścia klasycznego, w oparciu o znormalizowane długości dróg hamowania, które determinują rozmieszczenie semaforów, a także zaprezentowano metodę dodatkowego podziału odstępu blokowego w oparciu o wirtualne odstępy blokowe.

Rysunek 1-2 pokazuje przykładowe charakterystyki hamowania, obliczane przez system ERTMS/ETCS oraz charakterystykę hamowania przez maszynistę jadącego w oparciu o sygnalizację przytorową.



Rysunek 1-2 Charakterystyka hamowania maszynisty na podstawie wskazań sygnalizacji oraz charakterystyki hamowania obliczone przez system ETCS dla tego samego typu pojazdu trakcyjnego [źródło: opracowanie własne na podstawie charakterystyk hamowania ETCS obliczone za pomocą oprogramowania *ERA Braking curve simulation tool* wersja 4.1 oraz pomiarów własnych]

Założenia projektowe dla zaawansowanych systemów sterowania ruchem kolejowym, w tym tych wykorzystujących raportowanie pozycji przez pociąg jak system ETCS, wymagają odpowiedniej metodologii i narzędzi do oceny wpływu rozwiązania na zdolność przepustową. Wpływ konfiguracji systemu sterowania ruchem kolejowym na zdolność przepustową linii kolejowej powinien być przeanalizowany na etapie projektowania rozwiązania w celu sprawdzenia, czy zakładane założenia projektowe pozwolą spełnić wymaganą zdolność przepustową. Takie analizy pozwalają również na oszacowanie maksymalnej liczby pociągów zdolnych pokonać analizowany szlak w zdefiniowanym czasie, co pozwala na odpowiednią budowę rozkładu jazdy. Rozkład jazdy powinien nie tylko odpowiadać na potrzeby przewozowe, ale również uwzględniać wpływ maksymalnej liczby pociągów na danym fragmencie linii na inne aspekty – przykładowo na wydajność podstacji zasilania trakcyjnego, pojemność systemu sterowania ruchem kolejowym itp.

Literatura definiuje metody analityczne, optymalizacyjne i symulacyjne oceny zdolności przepustowej [23] - [26]. Metody analityczne bazują na modelowaniu środowiska kolejowego za pomocą aparatu matematycznego. Za pomocą metod analitycznych przeprowadza się zwykle wstępną ocenę zdolności przepustowej, wyliczając wartości minimalnego czasu następstwa pociągów bazując na modelu czasu blokowania odstępu. Metody optymalizacyjne opierają się na uzyskaniu optymalnie nasyconych rozkładów jazdy. Szczególną metodą optymalizacji jest metoda nasycania. Ta metoda umożliwia uzyskanie zdolności przepustowej linii przez zaplanowanie maksymalnej liczby dodatkowych jazd pociagowych w rozkładzie jazdy [28]. Metody te pozwalają na uzyskanie bardziej dokładnych rezultatów w porównaniu z metodami analitycznymi, jednak zwykle jako dane wejściowe przyjmuje się pewne uśrednione parametry charakteryzujące zarówno samą infrastrukturę, jak i dynamikę ruchu pociągów.

Modelowanie systemów i symulowanie ich działania (tzw. Model Base System Engineering) to obecnie najbardziej dokładne metody pozwalające na ocenę działania systemów przy różnych scenariuszach użycia. Metody symulacyjne pozwalają na

zamodelowanie różnorodności symulowanych obiektów, tj. pociągów, różnych długości odstępów, układu torowego, złożoność warunków prowadzenia ruchu pod danym systemem sterowania, czynnika ludzkiego związanego ze sterowaniem pociągiem [27] - [36]. W zależności od potrzeb, takie środowisko symulacyjne pozwala na testowanie poszczególnych interfejsów, zachowania systemu na podstawie sygnałów wejściowych, wyzwalających oczekiwane reakcje badanego systemu oraz umożliwia symulowanie scenariuszy i rozwiązania, które w rzeczywistym środowisku byłyby trudne do odtworzenia (scenariusze awaryjne lub rozwiązania koncepcyjne) [37].

Metody symulacyjne oceny zdolności przepustowej linii kolejowej opierają się na dedykowanych rozwiązaniach lub bazują na komercyjnym oprogramowaniu do modelowania i symulacji środowiska kolejowego [26]. Przykładami komercyjnych programów symulacyjnych są OpenTrack, ERSa oraz RailSys [29], [38] – [39]. Programy te mają jednak swoje ograniczenia, głównie w zakresie możliwości parametryzacji modelu pociągu oraz modelu infrastruktury. Nie zawsze dokumentacja oprogramowania zawiera informację na temat stosowanych algorytmów przy wyliczaniu charakterystyk jazdy na podstawie wprowadzanych parametrów użytych pojazdów kolejowych w składzie pociągu. Przykładowo, oprogramowanie RailSys umożliwia przeprowadzenie oceny zdolności przepustowej wybranej linii kolejowej metodą kompresji rozkładu jazdy zgodnie z kartą UIC-406 [28]. Modelowanie pociągów opiera się na wprowadzeniu danych dotyczących pojazdu trakcyjnego w tym charakterystyki trakcyjnej (to jest charakterystyki zależności siły trakcyjnej wyrażonej w [kN] od prędkości [km/h]) oraz siły opory jazdy. Dane te mogą nie zawsze będąc pozwalać na dokładne odwzorowanie charakterystyki jazdy pociągu z uwagi na możliwość dynamicznego kształtowania charakterystyki trakcyjnej pojazdu trakcyjnego przez nowoczesne układy sterowania napędem [40]. W zakresie modelowania infrastruktury i systemu sterowania ruchem kolejowym RailSys umożliwia zamodelowanie jazdy pod nadzorem systemu ETCS poziom 1, 2, 3 oraz na podstawie klasycznej sygnalizacji przytorowej z wymaganą stawnością. Nie ma natomiast możliwości zamodelowania dowolnej konfiguracji systemu srk, w tym przykładowo ruchu mieszanych pociągów jadących pod nadzorem ETCS oraz sygnalizacji przytorowej, a także dodatkowego podziału klasycznych odstępów z wykorzystaniem wirtualnych odstępów.

Biorąc pod uwagę brak uniwersalnego narzędzia o dużym stopniu szczegółowości i parametryzacji, które umożliwiłoby odwzorowanie zasad sygnalizacji stosowanej w Polsce oraz uwzględnienia dodatkowego podziału odstępów, w ramach niniejszej pracy opracowano autorskie modele jazdy pociągów oraz oprogramowanie symulacyjne w środowisku MATLAB&Simulink. Opracowane modele oraz oprogramowanie symulacyjne posłużą do oceny rozwiązań projektowych w systemach sterowania pod kątem wpływu na zdolność przepustową linii kolejowej. Autorskie modele jazdy pociągu uwzględniają wykorzystanie sposobu jazdy pociągów w oparciu o sygnalizację przytorową oraz pod nadzorem systemu ETCS. Przewidziano szeroką możliwość parametryzacji zarówno samych pociągów użytych w symulacjach jak i infrastruktury, w tym systemu sterowania ruchem kolejowym. Dla potrzeb modelowania ruchu pociągów zaproponowano wykorzystanie rzeczywistych charakterystyk przyspieszania i hamowania w oparciu o dane uzyskane z pomiarów z rzeczywistych jazd pociągowych, co pozwala na uniezależnienie badań od danych dotyczących konkretnych pojazdów trakcyjnych. Uwzględnienie rzeczywistych charakterystyk jazd pociągów wymagało przeprowadzenia analizy procesów hamowania i przyspieszania pociągów oraz zaproponowania algorytmu służącego do przeliczeń i wizualizacji wyników przetwarzania sygnałów uzyskanych z pomiarów. Uwzględnienie w modelu charakterystyk jazd pociągów uzyskanych z pomiarów, pozwoli również w przyszłości na uwzględnienie danych o jeździe pociągów uzyskiwanych w czasie rzeczywistym z rejestratorów pokładowych co nie jest

możliwe w oprogramowaniu komercyjnym. W autorskim modelu jazdy pociągu w oparciu o nadzór systemu ETCS uwzględniono również model charakterystyki hamowania zdefiniowany przez standard ETCS. Dla potrzeb oceny zdolności przepustowej zastosowano autorski sposób oceny przepustowości w oparciu o opóźnienie wyprawiania pociągów o znanych charakterystykach jazdy na szlak, celem możliwości identyfikacji punktów krytycznych na infrastrukturze powodujących konieczność niezasadnego hamowania pociągu w wyniku konfliktu ruchowego z poprzedzającym pociągiem.

Opracowane w pracy oprogramowanie symulacyjne oraz sposób oceny zdolności przepustowej posłużyły do zbadania różnych konfiguracji systemu sterowania ruchem kolejowym pod kątem wpływu na zdolność przepustową. W pracy przeprowadzono ponadto badanie konfiguracji systemu sterowania ruchem kolejowym z dodatkowym podziałem klasycznych odstępów w oparciu o wirtualne odstępów, przyjmujące określone stany logiczne w zależności od raportowanej pozycji przez pociąg.

1.1. Cele i teza pracy

W pracy przyjęto następujący cel główny:

Opracowanie modeli jazdy pociągów i oprogramowania symulacyjnego w celu oceny wpływu nowoczesnych systemów sterowania ruchem kolejowym na zdolność przepustową linii kolejowej.

W pracy zdefiniowano również dodatkowe cele szczegółowe:

Cel 1: Opracowanie założeń do modelu jazdy pociągu sterowanego przez maszynistę w oparciu o sygnalizację przytorową stosowaną na sieci kolejowej w Polsce.

Cel 2: Opracowanie założeń do modelu jazdy pociągu sterowanego przez sygnalizację kabinową z wykorzystaniem systemu bezpiecznej kontroli jazdy pociągu ETCS oraz przy zastosowaniu dodatkowego podziału odstępu blokowego w oparciu o wirtualne odstępy.

Cel 3: Wykorzystanie w modelach jazdy pociągu rzeczywistych charakterystyk przyspieszania i hamowania pociągu, uzyskanych z pomiaru, oraz charakterystyk hamowania zgodnych z modelem hamowania zdefiniowanym w standardzie ETCS.

Cel 4: Wykonanie sprawdzenia poprawności działania oprogramowania symulacyjnego na bazie opracowanych modeli jazdy pociągu.

Cel 5: Przeprowadzenie badań symulacyjnych związanych z kontrolowanym wyprawianiem pociągów na szlak w celu wyeliminowania strat czasu wynikających z hamowania i przyspieszania pociągu w wyniku zaistnienia konfliktu ruchowego z poprzedzającym pociągiem.

Cel 6: Przeprowadzenie badań symulacyjnych zdolności przepustowej przy wykorzystaniu opracowanych modeli jazdy pociągów przy różnych konfiguracjach podziału odstępu:

- klasyczny podział zgodny z rzeczywistym rozmieszczeniem semaforów odstępowych;
- zastosowanie dodatkowego podziału odstępu z wykorzystaniem wirtualnych odstępow.

Przyjęte cele, główny i szczegółowe, pozwoliły na sformułowanie następującej tezy badawczej:

Wykorzystanie modeli jazd pociągów, z uwzględnieniem rzeczywistych charakterystyk przyspieszania i hamowania w badaniach symulacyjnych, umożliwia ocenę zdolności przepustowej linii kolejowej przy wykorzystaniu różnych systemów sterowania ruchem kolejowym.

2. Układ rozprawy

Rozdział 1 zawiera uzasadnienie wyboru tematu rozprawy doktorskiej wraz z ogólnym wprowadzeniem oraz opisem problematyki badawczej, a także przyjęte cele oraz tezę pracy.

W rozdziale 2 przedstawiono układ rozprawy oraz treść poszczególnych rozdziałów pracy.

Rozdziały 3 i 4 zawierają opis obszaru badań, w tym przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat systemów sterowania ruchem kolejowym oraz badań zdolności przepustowej linii kolejowej. W rozdziałach tych zawarto przegląd aktualnej literatury, omówiono podstawowe pojęcia i definicje, przeprowadzono klasyfikację systemów sterowania pociągami oraz omówiono parametry związane ze zdolnością przepustową. Omówiono kwestię wpływu systemu sterowania ruchem pociągów oraz aspekt wyliczania charakterystyk hamowania przez system bezpiecznej kontroli jazdy pociągu wyposażonego w system ETCS na zdolność przepustową linii kolejowej. Przedstawiono badania własne dotyczące zastosowania wirtualnych odstępów jako metody dodatkowego podziału klasycznych odstępów dla pociągów raportujących swoją pozycję.

Rozdział 5 opisuje przyjęte założenia dla opracowanych autorskich modeli jazdy pociągu. Pierwszy model opiera się na sterowaniu pociągami przez maszynistę na podstawie wskazań sygnalizacji przytorowej. Dla tego modelu opracowano 24 założenia dotyczące między innymi możliwości parametryzacji pociągu, infrastruktury oraz konfiguracji systemu sterowania ruchem kolejowym. Drugi model jazdy pociągu opiera się na procesie sterowania z wykorzystaniem sygnalizacji kabinowej z zastosowaniem systemu bezpiecznej kontroli jazdy pociągu ETCS. Model ten uwzględnia również wykorzystanie dodatkowego podziału odstępów z wykorzystaniem wirtualnych odstępów. Dla drugiego modelu opracowano dodatkowe 14 założeń jego działania względem modelu pierwszego.

Rozdział 6 zawiera sprawdzenie poprawności działania oprogramowania symulacyjnego na bazie opracowanego modelu jazdy pociągu w oparciu o sygnalizację przytorową. Sprawdzono poprawność pracy detektorów i sygnałów wyświetlanych na semaforach na sterowanie jazdą pociągu na podstawie danych z symulacji przejazdu pociągu.

Rozdział 7 zawiera badania symulacyjne z wykorzystaniem pierwszego modelu jazdy pociągu (w oparciu o sygnalizację przytorową). Przedstawiono między innymi wykonane badania symulacyjne dotyczące wpływu kontrolowanego opóźnienia wyprawienia pociągu na czas jazdy pociągów na szlaku.

Rozdział 8 przedstawia sprawdzenie poprawności działania oprogramowania symulacyjnego na bazie drugiego opracowanego modelu jazdy pociągu (w oparciu o sygnalizację kabinową z wykorzystaniem systemu ETCS). Sprawdzono poprawność pracy wirtualnych detektorów i wirtualnych semaforów na proces jazdy pociągu w oparciu o dane z symulacji przejazdu pociągu jadącego pod nadzorem systemu ETCS.

Rozdział 9 zawiera badania symulacyjne zdolności przepustowej szlaku z wykorzystaniem drugiego modelu jazdy pociągu. Zaprezentowano sposób wyboru i wykorzystania danych wejściowych na potrzeby symulacji, w tym rzeczywistych charakterystyk jazdy pociągów uzyskanych z pomiarów w czasie jazd handlowych. Opisano sposób uzyskania charakterystyk hamowania w oparciu o model hamowania opisany przez standard ETCS. Zaprezentowano badania symulacyjne zdolności przepustowej szlaku z wykorzystaniem dodatkowego podziału odstępów z wykorzystaniem wirtualnych odstępów. W badaniach wzięto pod uwagę trzy konfiguracje szlaku.

W rozdziale 10 sformułowano wnioski oraz podano perspektywy dalszych badań w podjętej w pracy tematyce badawczej.

3. Zdolność przepustowa linii kolejowej

3.1. Podstawowe definicje związane ze zdolnością przepustową linii kolejowej

W porównaniu z ruchem drogowym, w którym przepustowość definiuje się jako liczbę pojazdów drogowych zdolnych pokonać dany przekrój poprzeczny drogi, zdolność przepustowa linii kolejowej jest znacznie trudniejsza do oszacowania z uwagi na sposób sterowania i kierowania ruchem kolejowym.

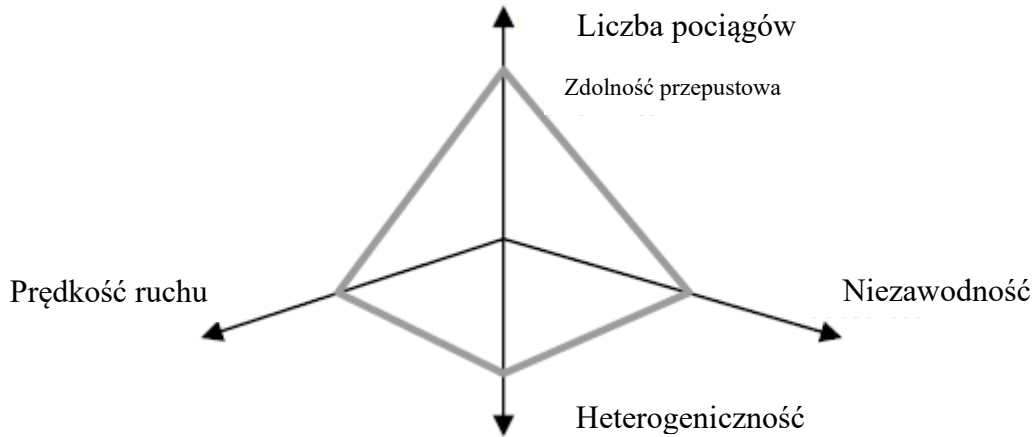
Zdolność przepustową lub inaczej przepustowość, przelotowość, przelotność linii kolejowej można zdefiniować jako zdolność do obsługi szlaku kolejowego, stacji lub linii kolejowej określonej liczby pociągów w określonym przedziale czasu [41] - [42]. Zdolność przepustowa wyrażona jest zwykle w jednostce liczby pociągów na godzinę lub liczby pociągów na dobę. Są również stosowane pochodne miary dotyczące tonażu brutto pociągów operujących na fragmencie linii kolejowej, przewiezionych pasażerów lub ładunków przez dany fragment linii kolejowej. Zdolność przepustowa linii kolejowej zależy od wielu czynników, jak np. układ torowy, system sterowania ruchem kolejowym, system transmisji, rozkład jazdy, struktura rodzajowa pociągów i ich charakterystyki jazdy, czynnik ludzki mający wpływ na sposób sterowania pociągiem. Parametrem wpływającym na zdolność przepustową jest heterogeniczność struktury rodzajowej pociągów, tj. mieszania się pociągów o różnych prędkościach jazdy, typie (np. towarowych, pasażerskich dalekobieżnych, pasażerskich podmiejskich), a co za tym idzie o różnych charakterystykach jazdy na tych samych odcinkach linii kolejowych [43]. W takim przypadku niezbędne jest „krzyżowanie” pociągów na posterunkach celem wyprzedzenia pociągu wolniejszego przez szybszy. Powoduje to np. dłuższe niż niezbędne postoje pociągów wolniejszych na posterunkach, celem oczekiwania na ich wyprzedzenie.

Największa zdolność przepustowa linii kolejowej jest ograniczona przez najmniejszą zdolność przepustową jej elementu składowego – stacji, szlaku lub nawet pojedynczego odstępu [42]. W literaturze można spotkać pojęcie *szlaku krytycznego*, czyli szlaku, na którym czas mierzony, od momentu wyprawienia ze stacji pociągu P, do chwili wyprawienia na ten szlak kolejnego pociągu (tj., gdy okres wykresu ruchu jest największy) [42].

Zgodnie z kartą UIC [28] o zdolności przepustowej linii kolejowej stanowią relacje następujących parametrów:

- natężenie ruchu – im więcej pociągów, tym mniej rezerw czasowych – pozostaje dla zapewnienia wymaganej jakości ruchu;
- średnia prędkość jazdy pociągów – długość drogi hamowania wzrasta proporcjonalnie szybciej niż wzrost średniej prędkości, co oznacza, że zdolność przepustowa jest odwrotnie proporcjonalna do średniej prędkości ruchu;
- niezawodność ruchu – w celu uniknięcia propagacji niewielkich opóźnień dodaje się dodatkowe bufory do czasu jazdy pomiędzy poszczególnymi punktami oraz dodatkowe bufory pomiędzy kolejnymi pociągami;
- punktualność pociągów – zależy wprost od niezawodności i stabilności działania systemu kolejowego;
- heterogeniczność ruchu. Im większa różnica między czasem jazdy poszczególnych pociągów, tym więcej zdolności przepustowej będzie wykorzystywanej.

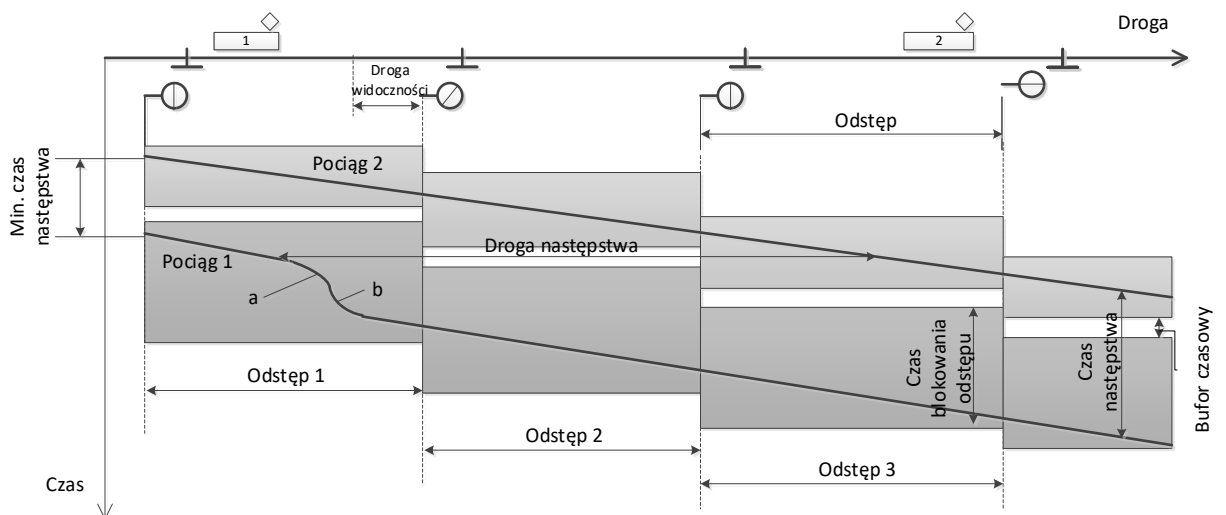
Zależność między parametrami natężenia ruchu, średniej prędkości jazdy pociągów, niezawodności ruchu, heterogeniczności obrazuje tzw. wykres balansu zdolności przepustowej, który przedstawia Rysunek 3-1. Praktyczna zdolność przepustowa jest wyznaczona za pomocą cięciwy łączącej osie opisujące wartości poszczególnych parametrów [44].



Rysunek 3-1 Wykres balansu zdolności przepustowej [źródło: opracowano na podstawie [28]].

Literatura definiuje również model blokowania odstępu i związane z tym następujące pojęcia:

Minimalny(a) czas (droga) następstwa – minimalny(a) czas (droga) między dwoma kolejnymi pociągami, jadącymi w tym samym kierunku, zdeterminowany przez system sterowania ruchem kolejowym w taki sposób, że pociąg 2 nie oddziałuje na jazdę pociągu 1 jadącego za nim (Rysunek 3-2) [23].

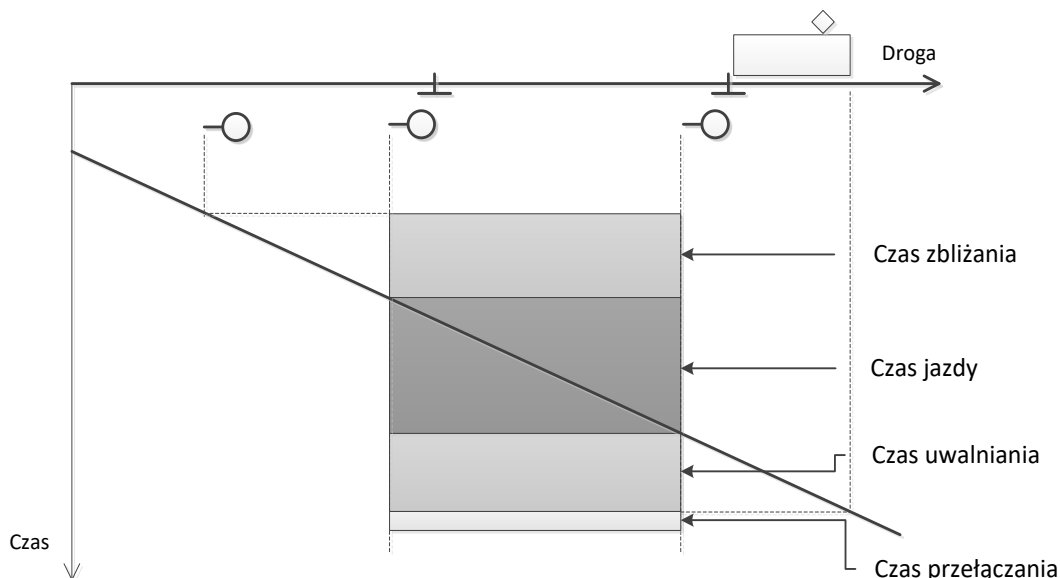


Rysunek 3-2. Model blokowania odstępu. Dla a pociągu „1” pokazano wpływ hamowania (ab) i ponownego rozpędzania pociągu (b) na czas blokowania danego odstępu; [opracowanie własne na podstawie [45] - [49]]

Czas blokowania odstępu – jest to czas, w którym dany odstęp blokowy pozostaje zablokowany dla danego pociągu, co pokazuje Rysunek 3-3 w postaci modelu blokowania odstępu. W ramach czasu blokowania można wyróżnić:

- czas zbliżania – czas obejmujący jazdę pociągu od tarczy ostrzegawczej do semafora początkowego danego odstępu (przebiegu) lub w przypadku jazdy pod nadzorem systemu bezpiecznej kontroli jazdy pociągu, czas jazdy od początku hipotetycznej charakterystyki hamowania wyznaczonej przez tenże system do początku danego odstępu (przebiegu);
- czas jazdy – fizyczna zajętość danego odstępu (przebiegu);
- czas uwalniania – czas zjazdu z danego odstępu (przebiegu), obejmujący czas zjazdu całej długości pociągu z drogi ochronnej, za czujnik koła wyznaczający koniec danego odstępu (przebiegu);
- czas przełączenia – inaczej nazywany czasem reakcji urządzeń srk, obejmujący czas od fizycznego zjechania całej długości pociągu z czujnika koła, rozwiązania przebiegu oraz ustawienia nowego, dla kolejnego pociągu. W przypadku systemu BKJP czas ten obejmuje dodatkowo wysłanie nowego, wydłużonego, zezwolenia na jazdę na dany odstęp (przebieg) dla kolejnego pociągu [23].

Czas blokowania danego odstępu przy tej samej prędkości jazdy jest odwrotnie proporcjonalna do jego długości. Oznacza to, że im odstęp blokowy jest krótszy, tym czas blokowania krótszy, a co za tym idzie zmniejsza się minimalny czas (droga) następstwa pociągów.



Rysunek 3-3. Model blokowania odstępu [opracowanie własne na podstawie [103]]

Teoretyczna zdolność przepustowa – to maksymalna liczba pociągów, które są zdolne pokonać dany odcinek sieci kolejowej w ciągu ustalonej jednostki czasu [50]. W takim podejściu struktura rodzajowa ruchu jest całkowicie homogeniczna z wykorzystaniem pojedynczego, idealnego typu pociągu, a pociągi poruszają się w odstępach określonych przez minimalny czas następstwa [24]. Teoretyczna zdolność przepustowa jest trudna do osiągnięcia przy normalnym ruchu.

Maksymalna zdolność przepustowa – maksymalna liczba pociągów, które są zdolne pokonać dany odcinek sieci kolejowej, biorąc pod uwagę rzeczywistą, heterogeniczną strukturę rodzajową ruchu, gdzie poruszające się pociągi mogą być różnego typu, z różnymi charakterystykami hamowania oraz charakteryzować się różnymi prędkościami maksymalnymi. Dodatkowe bufory czasowe między pociągami nie są uwzględnione [24].

Praktyczna zdolność przepustowa – maksymalna zdolność przepustowa, która może być wykorzystana w danym okresie i która umożliwia uzyskanie wymaganej jakości prowadzenia ruchu, biorąc pod uwagę jego stabilność i niezawodność. Bufory czasowe dodane między pociągami zapewniają stabilność i niezawodność realizacji rozkładu jazdy poprzez zapobieganie propagacji odchyłek od realizacji rozkładu jazdy przez dany pociąg (głównie opóźnień) [24]. Praktyczna zdolność przepustowa to maksymalna zdolność przepustowa z uwzględnieniem współczynnika zapasu technicznego α w celu zapewnienia wymaganej stabilności rozkładu jazdy [48]. Współczynnik ten zawiera w sobie rekomendowane przez kartę UIC [28] bufory czasowe między pociągami. Tabela 3-1 przedstawia rekomendowane wartości współczynnika α według [48].

Tabela 3-1: Rekomendowane wartości współczynnika α celem ujęcia zapasu technicznego zajętości infrastruktury kolejowej

L.p.	Rodzaj linii kolejowej	Współczynnik α	
		Godziny szczytu	Pozostałe godziny
1.	Linie dedykowane do ruchu podmiejskiego	0,15	0,3
2.	Linie dużych prędkości	0,25	0,4
3.	Linie o ruchu mieszanym	0,25	0,4

Zródło: [48]

Na zdolność przepustową mają wpływ aspekty związane z właściwościami systemu kolejowego, takie jak infrastruktura wraz z procesem sterowania ruchem, zasady ruchowe oraz parametry ruchowe [24].

Wpływ infrastruktury oraz procesu sterowania można zdefiniować m.in. przez parametry związane z długością odstępów, sposobem sterowania ruchem kolejowym, liczbą użytecznych torów, na których można prowadzić ruch pociągowy, profile prędkości oraz topologię torową samych stacji i węzłów [45]. Wpływ zasad ruchowych można zdefiniować m.in. przez parametry związane z czasem dostępności danej linii do prowadzenia ruchu pociągów oraz niezawodność samego ruchu. Dostępność infrastruktury zwykle jest pomniejszana o prace utrzymaniowe i naprawy usterek. Zwiększenie dostępności infrastruktury jest możliwe np. przez proces utrzymaniowy urządzeń, w tym diagnostykę prewencyjną i predykcyjną, co opisano w autorskich pracach [46], [47]. Jednakże, należy zauważyć, że zgodnie z badaniami, koszt utrzymania infrastruktury kolejowej jest tym większy, im większy jest stopień wykorzystania zdolności przepustowej [51]. Parametrami ruchu mogą być: liczba pociągów, prędkość jazdy danego pociągu, czasy postoju na stacjach i przystankach oraz struktura rodzajowa ruchu (heterogeniczność).

Rozkład jazdy – stanowi usystematyzowany opis czasu odjazdu i przyjazdu każdego z pociągów, które mają być obsługiwane na danej stacji lub posterunku ruchu, z uwzględnieniem ograniczeń związanych z bezpieczeństwem prowadzenia ruchu kolejowego, zasadami ruchowymi, infrastrukturą, systemami sterowania ruchem kolejowym oraz w celu zagwarantowania określonej liczby wymaganych połączeń. Do projektowania rozkładu jazdy używa się praktycznej zdolności przepustowej, przyjmując pewne uśrednione typy pojazdów

trakcyjnych obsługujących pociągi. W praktyce oznacza to, że zastosowanie pociągu, którego dynamika jazdy będzie się znacznie różnić od przyjętej dla konstruowania jazdy, może powodować odchylenia od realizacji rozkładu jazdy.

Wskaźniki do oceny i kontrolowana jakości tworzonego rozkładu jazdy dla danej sieci kolejowej to czas podróży oraz czas zajęcia poszczególnych odcinków linii [49], [52]. Te wskaźniki pozwalają znaleźć balans między efektywnym wykorzystaniem zdolności przepustowej sieci a atrakcyjnym czasem jazdy i spodziewanymi ewentualnymi opóźnieniami.

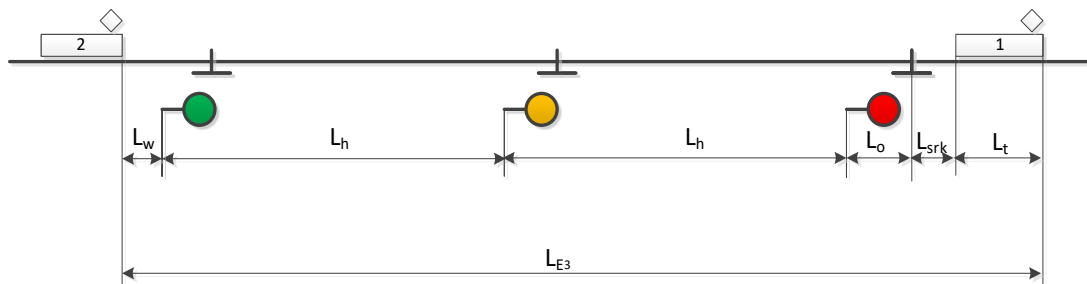
Następstwo pociągów

W ruchu kolejowym długość drogi hamowania w sposób znaczny przekracza zakres widoczności przez maszynistę. Dlatego też ruch kolejowy nie może bazować na jeździe na widoczność, ale musi być sterowany i kontrolowany przez urządzenia wyznaczające limit zezwolenia na jazdę.

W klasycznym ujęciu ruch pociągów sterowany jest za pomocą stałych odstępów blokowych przez sygnalizację przytorową. Dany odstęp blokowy może być zajęty tylko przez jeden pociąg w danej chwili. Widoczne jest to na modelu blokowania odstępów, który pokazuje Rysunek 3-2.

Na podstawie informacji pochodzących z systemów stwierdzania niezajętości oraz na podstawie utwierdzonych dróg przebiegu dla danego pociągu, system srk przekazuje poprzez sygnalizację informację do maszynisty o zgodzie na jazdę poprzez wskazanie informacji o dozwolonej prędkości oraz/lub informację o liczbie wolnych odstępów przed pociągiem. Na szlakach wyposażonych w wieloodstępową (samoczynną) blokadę liniową stosuje się sygnalizację trzy- lub czterostawną informującą o stanie niezajętości $m-1$ (gdzie m to stopień stawności sygnalizacji) odstępów blokowych za danym semaforem [41]. Długość stałego odstępów, a więc rozmieszczenie semaforów determinuje długość drogi hamowania. W ujęciu klasycznym stosuje się znormalizowane długości dróg w zależności od prędkości (1300 [m], 1000 [m], 700 [m], 400 [m]) [53]. Przy sygnalizacji trzystawnej długość odstępów nie może być mniejsza niż długość drogi hamowania, natomiast przypadku sygnalizacji czterostawnej długość ta może być zmniejszona do połowy długości drogi hamowania, obowiązującej na danym odcinku linii kolejowej, z wyjątkiem ostatniego odstępów blokady liniowej (który musi mieć długość równą lub większą od drogi hamowania przyjętej dla danej prędkości maksymalnej) [53]. Z tego wynika, że im większa stawność sygnalizacji, a co za tym idzie krótsza długość odstępów, tym zdolność przepustowa może być większa. W praktyce długości odstępów blokowych zwykle przyjmują większe długości, niż wynika to z przyjętych dróg hamowania dla obowiązującej prędkości maksymalnej na linii. Wynika to z warunków lokalnych i potrzeby zapewnienia wymaganej widoczności semaforów (np. na łukach) lub możliwości ich posadowienia (np. na wiaduktach lub mostach). Również w obszarach stacji, np. przebieg wyjazdowy składający się z zasadniczego przebiegu wyjazdowego oraz pierwszego odstępów blokadowego, jest zwykle znacznie dłuższy niż wymagana długość drogi hamowania.

Rysunek 3-4 przedstawia sytuację jazdy dwóch pociągów po szlaku wyposażonym w sygnalizację trzystawną. Odstęp blokowy za sygnałem S5 (informujący, że na kolejnym semaforze wyświetlany jest sygnał „Stój” z powodu zajętości spowodowanej przez pociąg „1” o długości L_1) zapewnia wymaganą drogę hamowania L_h dla maksymalnej prędkości na linii. Jeśli maszynista widzi na semaforze sygnał S2, oznacza to, że co najmniej dwa kolejne odstępów są wolne i pociąg może kontynuować jazdę z maksymalną prędkością, dopóki nie znajdzie się w drodze widoczności L_w do semafora wskazującego sygnał S5.



Rysunek 3-4 Jazda pociągów po szlaku wyposażonym w trzystawną blokadę liniową [źródło: opracowanie na podstawie [41]]

Minimalna odległość między dwoma kolejnymi pociągami L_E (zwana drogą następstwa) w takim przypadku może być wyliczona według wzoru (3-1).

$$L_{E_3} = L_w + 2L_h + L_o + L_t + L_{srk} \text{ [m]} \quad (3-1)$$

gdzie:

L_w – długość drogi zbliżania, czyli długość drogi jazdy odpowiadającej drodze widoczności semafora i drodze odpowiadającej czasowi reakcji maszynisty na zauważony sygnał na semaforze;

L_h – długość drogi hamowania, odpowiadająca minimalnej długości odstępu blokadowego;

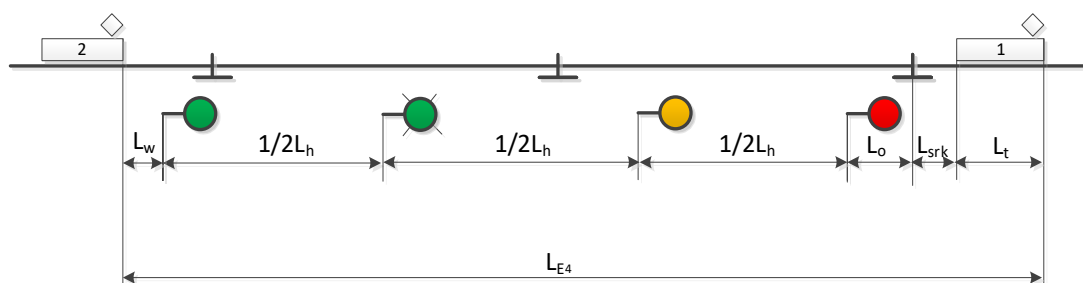
L_o – długość drogi ochronnej, tj. odległości między semaforem a punktem oddziaływania (złączem izolowanym);

L_t – długość pociągu;

L_{srk} – długość drogi jazdy, wynikająca z czasu działania urządzeń srk od chwili zwolnienia danego odstępu do zmiany sygnału na semaforze dla kolejnego pociągu.

W przypadku blokady czterostawnej, gdzie dopuszcza się, aby odstęp był krótszy niż długość drogi hamowania, ale nie krótszy niż połowa tej długości (Rysunek 3-5), minimalna odległość między dwoma kolejnymi pociągami może być wyliczona według równania (3-2).

$$L_{E_4} = L_w + \frac{3}{2}L_h + L_o + L_t + L_{srk} \text{ [m]} \quad (3-2)$$



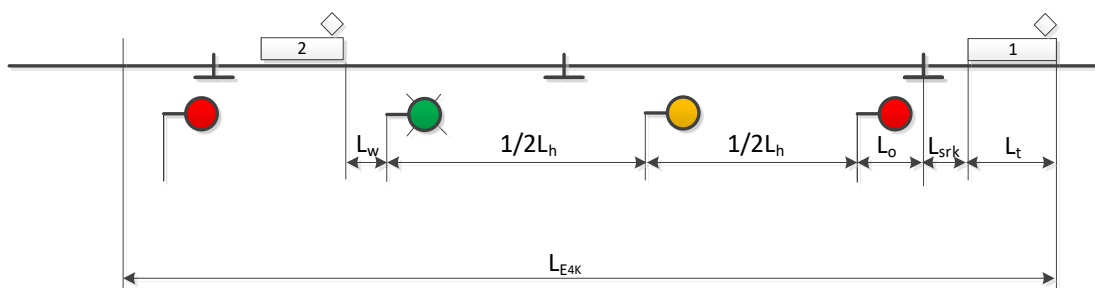
Rysunek 3-5 Jazda pociągów po szlaku wyposażonym w czterostawną blokadę liniową [źródło: opracowanie na podstawie [41]]

We wzorach (3-3, 3-4) uwzględniono czas działania urządzeń srk na potrzeby przygotowania przebiegu i zmiany sygnału na semaforze L_{srk} . Jeśli pociąg „1” zwolni fizycznie

odstęp2 całą swoją długością, wyświetlenie sygnału zezwalającego osłaniającego *odstęp1* musi się odbyć przed osiągnięciem przez pociąg „2” drogi widoczności do semafora osłaniającego *odstęp1*. Jest to konieczne do zapewnienia braku reakcji maszynisty, który widząc sygnał S5, mógłby rozpocząć hamowanie pociągu. Czas wynikający z długości L_{srk} jest sumą czasów cząstkowych, wymaganych do zwolnienia przebiegu po fizycznym zjeździe pociągu „1” i czasu niezbędnego dla systemu nadrzędnego do wydania polecenia ustawienia przebiegu oraz czasu ustawienia i utwierdzenia przebiegu przez nastawnicę w przypadku stacji. W przypadku jazdy po szlaku działanie wieloodstępowej blokady liniowej jest automatyczne, tak więc po zwolnieniu odstępu przez poprzedzający pociąg „1”, system blokady sam dokona zmiany wskazań semaforów dla kolejnego pociągu „2” w ramach czasu odpowiadającemu przejazdowi przez pociąg drogi L_{srk} .

Zgodnie z [41] przy zastosowaniu blokady czterostawnej możliwe jest również uwzględnienie możliwości dalszego zwiększenia zdolności przepustowej, przy założeniu, że rzeczywiste drogi hamowania pociągów są krótsze od przyjętych dróg hamowania dla danej prędkości maksymalnej. Oznacza to, że pociąg „2” mógłby zacząć hamować dopiero przy semaforze wyświetlającym sygnał zielony migający „S3”, który powinien znajdować się w drodze hamowania do semafora wyświetlającego sygnał „Stój” (Rysunek 3-6). w takim przypadku można zastosować równanie (3-3).

$$L_{E_{4K}} = L_w + L_h + L_o + L_t + L_{srk} \text{ [m]} \quad (3-3)$$



Rysunek 3-6 Jazda pociągów po szlaku wyposażonym w czterostawną blokadę liniową [źródło: opracowanie na podstawie [41]]

Na podstawie drogi następstwa można obliczyć teoretyczną zdolność przepustową N_t według równania (3-4), przedstawionego w pracy [41].

$$N_t = \frac{T}{t_n} \cdot k = \frac{v}{L_E} \cdot k \text{ [poc/T]} \quad (3-4)$$

gdzie:

N_t – teoretyczna zdolność przepustowa określana jako liczba pociągów mogących przejeżdżać odcinek linii, przy założeniu minimalnych dróg następstwa L_E w analizowanym czasie T ,

T – analizowany czas w [min.]. Zwykle przyjmuje się okres godziny (60 [min]) lub okres doby (1440 [min]),

t_n – czas następstwa (okres wykresu ruchu) dwóch kolejnych pociągów poruszających się w jednym kierunku,

v – prędkość jazdy pociągów,

k – liczba pociągów objęta czasem t_n . Dla ruchu jednokierunkowego $k=1$, dla ruchu zmiennokierunkowego zwykle przyjmuje się $k=2$.

Chcąc wyznaczyć praktyczną zdolność przepustową, należy w równaniu (3-4) uwzględnić współczynnik zapasu technicznego α , co prezentuje wzór (3-5).

$$N = (1 - \alpha) \cdot \frac{v}{L_E} \cdot k [poc/T] \quad (3-5)$$

W pracy [54] przedstawiono podejście przedstawione we wzorze (3-6), stosowane dla potrzeb określania dobowej praktycznej zdolności przepustowej N_d jako zależność między maksymalnym czasem zajęcia odcinka krytycznego t_z w ciągu czasu trwania doby pomniejszonej o czas przeznaczony na czynności utrzymaniowe linii T_0 , który można traktować jako ekwiwalent współczynnika zapasu technicznego α .

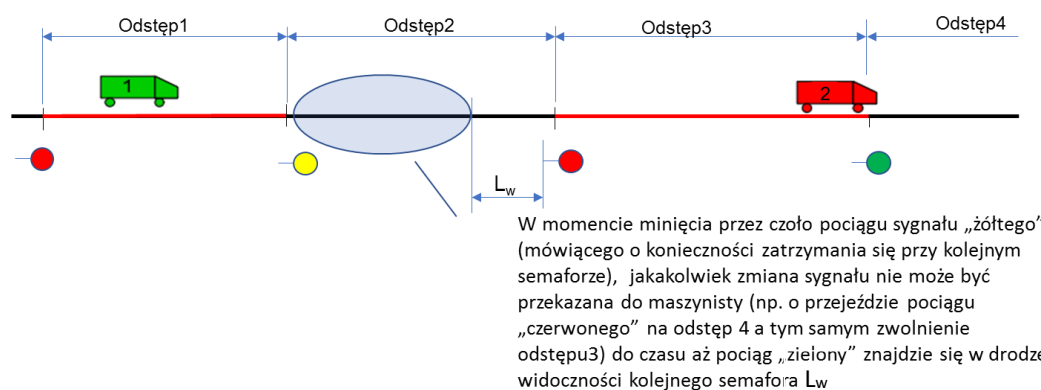
$$N_d = \frac{1440 - T_0}{t_z} \quad (3-6)$$

W przypadku linii dużych prędkości, gdzie zwykle występuje ruch pasażerski z przerwą nocną (kiedy można przeprowadzać czynności utrzymaniowe linii) w pracy [54] zaproponowano zastosowanie wzoru (3-7).

$$N_d = n_g \cdot \frac{60}{t_z} \quad (3-7)$$

gdzie m określa liczbę godzin kursowania pociągów, np. pasażerskich, w ciągu doby.

Rysunek 3-7 pokazuje, jak potencjalnie klasyczny system sygnalizacji i detekcji pociągu może ograniczać zdolność przepustową. Pociąg „1” w momencie mijania sygnału „S5”, informującego, że na kolejnym semaforze wyświetlany jest sygnał „Stój”, powinien rozpocząć hamowanie. W przypadku zmiany sytuacji (zwolnienia *odstępu3*) maszynista dowie się o tym dopiero w drodze widoczności kolejnego semafora L_w (czyli ok. 400 [m] przed nim przy prędkości 160 [km/h]), gdy prędkość pociągu będzie już mocno zredukowana.



Rysunek 3-7 Wpływ sygnalizacji optycznej na zdolność przepustową [źródło: opracowanie własne na podstawie [20], [53]]

W przypadku systemu ETCS poziomu 2, przy obliczaniu minimalnej odległości między dwoma kolejnymi pociągami, stawność blokady i długość odstępu przestają mieć decydujące znaczenie dla czasu następstwa pociągów. Istotne natomiast stają się zależności związane z samym działaniem systemu:

- charakterystyka hamowania obliczana przez urządzenia pokładowe systemu ERTMS/ETCS, wynikająca z charakterystyki samego pociągu oraz z uzyskanej od urządzeń przytorowych systemu ERTMS/ETCS zezwolenia na jazdę;

- czas uzyskania wydłużonego zezwolenia na jazdę, obejmujący czas działania urządzeń srk po zwolnieniu następnego odstępu, czas transmisji telegramu i czas jego dekodowania przez urządzenia pokładowe.

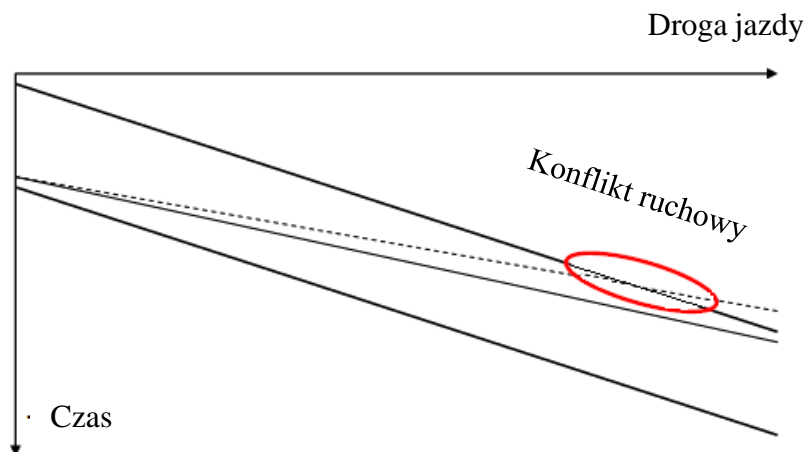
Czas transmisji telegramu od RBC do urządzeń pokładowych poprzez sieć transmisyjną jest pomijalnie mały i może wynosić $\leq 0,5$ [s] dla transmisji w oparciu o komutację kanałów (ang. Circuit Switched) [55].

Dla obliczeń minimalnej odległości pomiędzy dwoma kolejnymi pociągami jadącymi pod kontrolą systemu ETCS istotne jest więc uwzględnienie wyliczonej długości charakterystyki hamowania, wyliczanej przez system ERTMS/ETCS i pokazywanej poprzez funkcję sygnalizacji kabinowej do maszynisty. Długość tej charakterystyki stanowi ekwiwalent długości drogi zbliżania L_w .

Heterogeniczność struktury ruchu

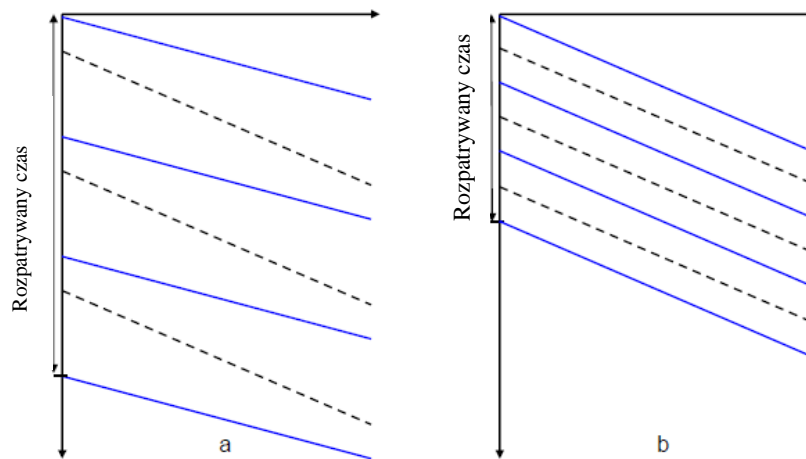
Zdolność przepustowa konkretnego odcinka linii kolejowej może być różnie użytkowana, w zależności od struktury rodzajowej ruchu (np. na prowadzenie ruchu dużej liczby pociągów dalekobieżnych z dużymi prędkościami lub na prowadzenie mieszanego ruchu pasażerskiego i towarowego z mniejszymi prędkościami). W obydwu tych przypadkach zdolność przepustowa danego odcinka linii kolejowej wyrażona liczbą pociągów w czasie będzie inna [44].

Ruch całkowicie homogeniczny to taki, w którym kolejne jadące po sobie pociągi generują taki sam czas blokowania odstępu. Im mniejsza homogeniczność, a więc im większa heterogeniczność ruchu, tym większa szansa na pojawienie się konfliktów ruchowych polegających na tym, że szybszy pociąg dogoni wolniejszy, konieczność zwiększania buforów czasowych, a czasem konieczność zmiany kierunku ruchu jazdy kolejnych pociągów po tym samym torze (szczególnie jest to odczuwalne przy liniach jednotorowych) – Rysunek 3-8.



Rysunek 3-8 Przykład konfliktu przy heterogeniczności ruchu [źródło: [56]]

Rezultatem dużej heterogeniczności jest obniżenie praktycznej zdolności przepustowej przy tych samych parametrach ruchu, względem homogenicznego rozkładu ruchu, co pokazuje Rysunek 3-9.



Rysunek 3-9 Przykład rozkładu jazdy z rozkładem ruchu (a) heterogenicznym oraz (b) homogenicznym. [źródło: [56]]

Do oceny homogeniczności ruchu można posłużyć się wzorem (3-8).

$$\text{Homogeniczność} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{t,i}^-}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{t,i}^A}} \quad (3.8)$$

gdzie:

$h_{t,i}^-$ – najkrótszy czas pomiędzy dwoma kolejnymi pociągami

$h_{t,i}^A$ – czas pomiędzy kolejnymi pociągami, obserwowany na końcu analizowanego odcinka linii

N – liczba pociągów w obserwowanym czasie

Jeśli struktura rodzajowa ruchu jest bardziej homogeniczna, to wartość wyrażenia zbliża się do 1, przeciwnie niż w przypadku struktury heterogenicznej, gdy wartość wyrażenia będzie zbliżać się do 0.

Jak wskazano w pracy [43], heterogeniczność jest określana przez wskaźnik homogeniczności czasu blokowania, homogeniczność buforów czasowych między kolejnymi pociągami oraz homogeniczność kierunku ruchu poszczególnych pociągów. Dodatkowo przedstawione w pracy [43] badania pokazują wykładniczą zależność pomiędzy zmniejszaniem homogeniczności ruchu, a pojawianiem się losowych opóźnień.

Przykładowo, zmniejszenie współczynnika homogeniczności buforów czasowych pomiędzy kolejnymi pociągami poniżej 0,5 [-] powoduje zwiększenie współczynnika opóźnień z ok. 0,1 [-] do zależności wykładniczej, z wartościami mieszczącymi się w granicach od 0,2 [-] do 1,8 [-].

Praca [43] przedstawia opracowane modele pozwalające wyznaczyć zdolność przepustową wyrażaną przez minimalny czas następstwa pociągów, w oparciu o koncepcję ekwiwalentnego typu pociągu podstawowego (ang. Base Train Equivalent, BTE). Koncepcja ta odzwierciedla różnice wpływu na praktyczną zdolność przepustową pomiędzy standardowymi i niestandardowymi typami pociągów, co można zdefiniować jako stosunek wpływu na zdolność przepustową niestandardowych do standardowych typów pociągów. W koncepcji tej różne typy pociągów są przekształcane do tzw. standardowej jednostki (ang. Base Train Unit, BTU).

Nieco inne podejście opisano w pracy [57], gdzie zaproponowano współczynnik redukcji tras pociągów zasadniczych (odpowiednik BTE) przez trasy pociągów niezasadniczych ε_{szl}^{nz} wyznaczany jako stosunek całkowitego czasu straconego wskutek przejazdu jednego pociągu niezasadniczego po szlaku krytycznym do analogicznej jazdy pociągu zasadniczego.

3.2. Badania zdolności przepustowej linii kolejowej

Dla celów badania zdolności przepustowej linii kolejowej opracowano szereg metod i narzędzi. Klasyfikacja metod oceny i badań zdolności przepustowej przedstawia się następująco:

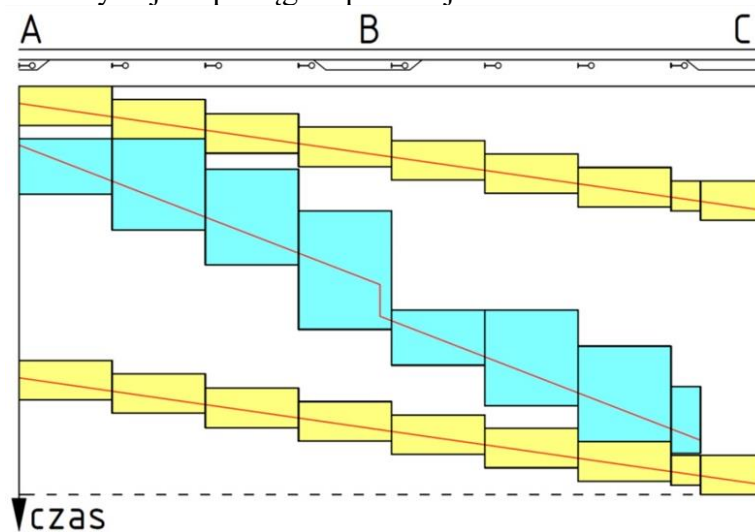
1. Metody analityczne – służą do modelowania środowiska kolejowego za pomocą aparatu matematycznego. Na podstawie modelu blokowania (Rysunek 3-2 i Rysunek 3-3) można określić teoretyczną i praktyczną zdolność przepustową danego odcinka linii kolejowej. Zdolność praktyczną określa się jako procentową część zdolności teoretycznej, stanowiącą pewną maksymalną wartość, która nie może być nigdy osiągnięta, biorąc pod uwagę technikę prowadzenia ruchu kolejowego. Klasyczne wzory opisane w pracy [41] (3-1, 3-2, 3-3) służą do wyliczenia minimalnej drogi następstwa pociągów, w zależności od stawności sygnalizacji na sieci kolejowej w Polsce, co pokazano w rozdziale 3.1 oraz na rysunkach 3-7, 3-8 oraz 3-9. Na tej podstawie oblicza się zdolność przepustową w danym przedziale czasu, posługując się wzorem (3-4).

Podobne podejście dotyczące użycia metody polegającej na obliczaniu zdolności przepustowej na wcześniej zidentyfikowanym szlaku krytycznym stanowi aparat matematyczny opisany w pracy [57], który opisuje również sposób obliczeń przy heterogenicznej strukturze ruchu. Opisany aparat matematyczny w pracy [57] uwzględnia również sposób obliczeń przy heterogenicznej strukturze ruchu. Kolejną metodą analityczną jest przykład wyliczenia zdolności przepustowej dla linii szybkiego ruchu, jak Centralna Magistralna Kolejowa, zaprezentowaną w pracy [54], gdzie zakłada się dużą homogeniczność ruchu oraz małą liczbę postojów handlowych. W takim przypadku wpływ na zdolność przepustową może mieć jedynie sytuacja awaryjna, prowadząca do nagłego hamowania składu pociągu. Dla potrzeb obliczania minimalnego czasu następstwa przyjęto, że w takiej sytuacji kolejny pociąg powinien zachować odległość od poprzedzającego pociągu, zapewniającą możliwość zatrzymania się z użyciem hamowania służbowego. Praca opisuje zastosowanie metody analitycznej stosowanej w Indonezji oraz według UIC 405.

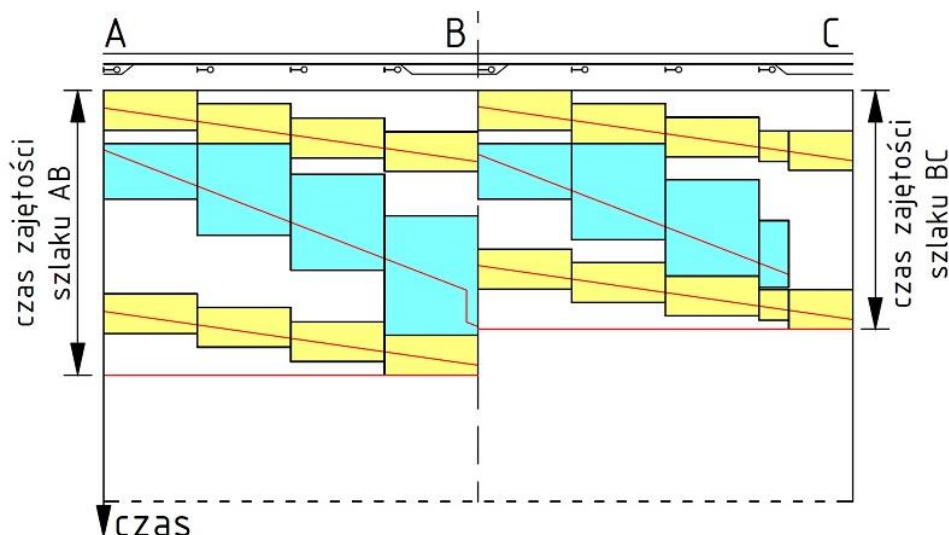
Inne zastosowanie metod analitycznych przy badaniu systemów sterowania ruchem kolejowym zawarto w pracy [58]. Prezentuje ona wykorzystanie algebry procesów dla potrzeb zamodelowania wymiany informacji, awarii komunikacji i przywracanie normalnego funkcjonowania systemu po usunięciu awarii dla systemu sterowania ruchem pociągów z ruchomym odstępem blokowym. Praca [59] opisuje badania wpływu niezawodności i dostępności systemu transmisji danych dla potrzeb systemu ETCS poziom 3 poprzez połączenie analitycznej oceny uszkodzeń spowodowanych szumem i stratami połączeń z numerycznym rozwiązaniem niemarkowskiego modelu reprezentującego również uszkodzenia spowodowane przełączeniami między stacjami radiowymi.

W pracy [60] opisano zastosowanie modelowania równań strukturalnych (ang. Structural equation modeling – SEM) do budowy modelu pozwalającego na ocenę wpływu budowy systemu kolei dużych prędkości na zdolność przepustową istniejącego systemu kolei konwencjonalnych. Jako przykład podano Chiny, gdzie w ciągu ostatniej dekady nastąpił nieporównywalny z innymi krajami rozwój szybkiej kolei.

2. Metody optymalizacyjne – zapewniają znacznie lepsze rozwiązania niż formuły czysto analityczne. Metody optymalizacji dla oceny zdolności przepustowej opierają się na kompresji rozkładów jazdy celem osiągnięcia ich nasycenia. W pracy [50] przedstawiono procedurę sprawdzenia wykorzystania zdolności przepustowej według karty UIC-406 [28], która polega na przeprowadzeniu iteracyjnego procesu kompresji obecnego rozkładu jazdy i uzupełnianiu go w dodatkowe pociągi, tak jakby pociągi miały kursować w minimalnych odstępach czasu. Analizę rozpoczyna się od istniejącego rozkładu jazdy (Rysunek 3-10), a następnie przeprowadza się kompresję poprzez zbliżenie wykresów ruchu poszczególnych pociągów wraz z czasem zajęcia poszczególnych odcinków. W tym przypadku można zastosować podział danego odcinka linii kolejowej na mniejsze, jak to zrobiono w tym przypadku poprzez podział analizowanego odcinka na dwa szlaki (Rysunek 3-11). Dla potrzeb kompresji rozkładu jazdy metodą UIC-406 można wykorzystywać statyczny wykres pociągu dla danego fragmentu linii kolejowej lub wykorzystując metody symulacyjne, tworzyć dynamicznie wykres ruchu na podstawie zasymulowanych jazd pociągów po danej infrastrukturze.



Rysunek 3-10 Wykres ruchu pociągów wraz z pokazaniem zajętości poszczególnych odcinków. [Źródło: [50]]



Rysunek 3-11 Wykres ruchu pociągów wraz z pokazaniem zajętości poszczególnych odcinków po przeprowadzeniu kompresji dla odcinków AB i BC. [Źródło: [50]]

W drugim kroku porównuje się procentowy udział czasu zajętości badanego szlaku po przeprowadzonej kompresji z zalecanymi wartościami granicznymi czasu zajęcia

infrastruktury w zależności (Tabela 3-1). Jeżeli osiąga on lub przekracza wartość graniczną, to uznaje się, że szlak jest przeciążony i nie ma możliwości wytrasowania dodatkowych pociągów (a w przypadku przekroczenia wartości granicznej oznacza to nawet, że już przy założonym obciążeniu ruchowym nie jest zapewniony wymagany poziom niezawodności rozkładu jazdy) – w tej sytuacji obliczenia kończą się na drugim kroku. Jeżeli jednak czas zajęcia badanego odcinka nie przekracza wartości granicznej, to szlak posiada niewykorzystane rezerwy zdolności przepustowej – ustalenie, czy są one wystarczające do wytrasowania dodatkowych pociągów wymaga dalszej analizy. W trzecim kroku powraca się do oryginalnego rozkładu jazdy (sprzed procedury kompresji) i podejmuje próbę wytrasowania dodatkowych pociągów. Następnie na uzupełnionym wykresie ruchu ponownie przeprowadza się procedurę kompresji, czyli krok pierwszy. Czynności te powtarza się, aż do momentu, gdy czas zajętości szlaku osiągnie wartość graniczną lub nie będzie już możliwości wytrasowania dodatkowych pociągów.

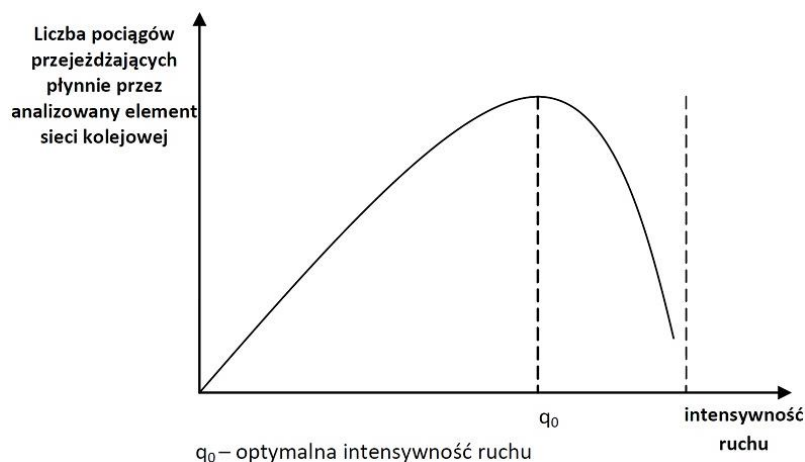
Inne podejście w ramach metod optymalizacyjnych było prezentowane przez prof. J. Wocha, którego metoda kolejek była używana do oceny zdolności przepustowej na sieci PKP PLK S.A. przed wprowadzeniem karty UIC406 [28]. J. Woch [61] - [65] opisuje sieć kolejową lub jej wycinek jako system obsługi kolejek, gdzie optymalna zdolność przepustowa (czyli miara optymalnego wykorzystania infrastruktury) to taka, kiedy największa liczba pociągów (maksimum) jest zdolna do płynnego przejechania danego odcinka sieci (przy uwzględnieniu losowych zdarzeń związanych z obsługą pociągu). Rysunek 3-12 przedstawia funkcję opisującą oczekiwaną liczbę tras nieregulowanych w ustalonym okresie (nieregulowanych w znaczeniu przejazdów bez zakłóceń polegających na wydłużeniu postoju lub czasu jazdy między kolejnymi węzłami). Według pracy [61], można zdefiniować „względna płynność ruchu jako funkcję prawdopodobieństwa przejazdu pociągu bez zakłóceń, a maksimum tej funkcji jako optymalną intensywność ruchu”, co przedstawia równanie (3-10).

$$F(r) = [1 - p(r)]r \quad (3-10)$$

gdzie:

r – intensywność zgłoszeń pociągów w ustalonym czasie

$p(r)$ – prawdopodobieństwo zdarzenia, że trasa przeprowadzana przez układ o ustalonej strukturze torowej i intensywności zgłoszeń r wymagać będzie regulacji.



Rysunek 3-12 Zależność płynności od intensywności ruchu [źródło: [61]]

Metody optymalizacyjne są również stosowane w przypadku rozwiązywania zadań optymalizacyjnych związanych z pracą operacyjną w dużych węzłach transportowych

z obsługą ruchu towarowego. Przykładem może być model zaprezentowany w pracy [66], pozwalający na optymalizację rozkładu pracy rozrządowej w ramach powiązania sieci kolejowej z bocznicą kolejową obsługującą kilka obszarów zakładu przemysłowego.

W pracy [67] zaproponowano wykorzystanie programowania matematycznego do rozwiązania problemu wspólnego rozkładu jazdy i planowania postojów pociągów na linii kolejowej z odcinkami dwutorowymi. Badania miały na celu zaprojektowanie zoptymalizowanego rozkładu jazdy pociągów z uwzględnieniem ograniczeń związanych z pojemnością stacji i długości czasu postoju pociągów. Funkcją docelową jest maksymalizacja zdolności przepustowej infrastruktury kolejowej przez minimalizację czasu realizacji rozkładu jazdy.

Bardzo często metody optymalizacyjne dotyczą problematyki rozkładu ruchu i rozwiązywania konfliktów na sieci lub jej fragmencie. Zaproponowany w pracy [68] model obejmuje dwa obszary: związany z dynamicznym rozwiązywaniem konfliktów ruchowych na sieci i usprawnienie przepływu ruchu przez zapobieganie nieplanowanych zatrzymań oraz związany z usprawnieniem zachowania maszynisty poprzez dostarczenie mu wskazówek dotyczących prowadzenia pociągu lub nawet automatyzacja sterowania pociągiem. Autorzy pracy [69] proponują metodologię analizy najbardziej krytycznych połączeń sieci kolejowej w oparciu o zablokowanie przepływu. Strategia przechwytywania sieci polega na maksymalizacji zakłóceń sieci przez usuwanie odcinków o największym wpływie na sieć. Po zablokowaniu krytycznych połączeń w sieci kolejowej, pociągi są planowane w sieci rezydualnej z uwzględnieniem różnych czynników, w tym zapotrzebowania klientów, zdolności przepustowej torów i stacji oraz horyzontu czasowego planowania.

Praca [70] przedstawia przykład zastosowania modelu optymalizacyjnego, opracowanego w celu oceny wpływu poprawy infrastruktury, w tym projektu systemu sterowania celem poprawy zdolności przepustowej. Problematyka zwiększenia zdolności przepustowej została opisana jako wielokryterialny problem optymalizacyjny, gdzie kryteriami są: a) koszt związany z inwestycjami i utrzymaniem infrastruktury, b) koszty operacyjne. Przybliżoną analizę wydajności Pareto zastosowano w celu określenia kompromisu między kosztami infrastruktury a kosztami operacyjnymi. W pracy [70] zaprezentowano zastosowanie jednej z metod optymalizacyjnych, polegającej na dynamicznej kompresji rozkładu jazdy. Technika ta umożliwia ocenę zdolności przepustowej pod kątem zastosowania różnych systemów sterowania ruchem kolejowym. W pracy [48] uwzględniono dwa typy pociągów z różną dynamiką jazdy pociągu pod kontrolą systemu bezpiecznej kontroli jazdy pociągu (ATB) używanego na sieci kolejowej w Danii oraz z systemem interoperacyjnym ERTMS/ETCS poziomu 2. Dodatkowo uwzględniono dynamiczne rozwiązywanie konfliktów ruchowych na poziomie systemu dyspozytorskiego. Jak pokazały rezultaty badań, zastosowanie systemu ERTMS/ETCS poziomu 2 wpływa na redukcję zdolności przepustowej, biorąc pod uwagę rozkładową jazdę pociągów. Wraz z coraz większym wpływem opóźnień, można zauważyć wzrost zdolności przepustowej przy sterowaniu przez system ERTMS/ETCS poziomu 2. Wynika to z innego sposobu działania obu systemów – system ATB nie zapewnia dynamicznego uaktualnienia zezwolenia na jazdę, gdy pociąg znajduje się już na określonym odstępie blokowym. Wpływa to oczywiście niekorzystanie na czas jego zajęcia.

W pracy [71] zaprezentowano zastosowanie metody UIC-406 adaptowanej dla indonezyjskiej kolei dla potrzeb badania zdolności przepustowej, natomiast praca [72] prezentuje przykład metody optymalizacyjnej obliczania zdolności przepustowej bez potrzeby zastosowania stałego rozkładu jazdy.

3. Metody symulacyjne – symulacja jest imitacją rzeczywistych operacji, procesów zachodzących w systemie, w określonym przedziale czasu. Literatura opisuje szereg przykładów zastosowania metod symulacyjnych do oceny zdolności przepustowej linii kolejowej przy różnych systemach sterowania. Metody symulacyjne służą do badania zachowania modelowanych systemów dla przyjętych warunków funkcjonowania w określonych przedziałach czasu. W kolejnictwie metody symulacyjne są szeroko stosowane dla potrzeb m.in. projektowania konstrukcji pojazdów kolejowych, projektowania systemów sterowania ruchem kolejowym oraz ich testowania na etapie walidacji. W zależności od danego zastosowania symulacji, środowisko symulacyjne pozwala na testowanie poszczególnych interfejsów, zachowania systemu na podstawie sygnałów wejściowych wyzwalających oczekiwane reakcje badanego systemu oraz symulowanie zdarzenia, które w normalnym środowisku byłoby trudne lub niemożliwe do przetestowania (np. sytuacje awaryjne). Przykładowo symulacje są wykorzystywane do testów certyfikacyjnych wykonywanych na rzeczywistych urządzeniach lub z wykorzystaniem referencyjnego stanowiska testowego [37]. Modelowanie i symulowanie ruchu pociągów po linii pozwala na oszacowanie zdolności przepustowej linii kolejowej, biorąc pod uwagę różnorodność symulowanych obiektów, tj. pociągów, różnych długości odstępów blokowych, schematu stacji, złożoności warunków prowadzenia ruchu pod danym systemem sterowania czynnika ludzkiego związanego ze sterowaniem pociągiem.

Przykład zastosowania metody symulacyjnej do badania wpływu systemu sterowania ruchem kolejowym na zdolność przepustową pokazuje praca [27]. Autor dokonał analizy wpływu na zdolność przepustową linii kolejowych i liczbę urządzeń przytorowych (w tym przypadku semaforów) na kilometr linii kolejowej dla różnych stawności sygnalizacji oraz ruchomego odstępu blokowego. Tabela 3-2 przedstawia wyniki dotyczące obliczeń symulacyjnych dla systemów srk stosowanych w Wielkiej Brytanii [27].

Tabela 3-2 Minimalny czas następstwa oraz liczba semaforów przy zastosowaniu różnych systemów sterowania ruchem kolejowym

	3-stawna	4-stawna	5-stawna	6-stawna	Ruchomy blok
Min. czas następstwa pociągów t_H [s]	295	272	265	261	252
Liczba semaforów na km linii	0,40	0,65	1,08	1,40	N/A

Źródło: opracowanie własne na podstawie [27]

Jak wskazano w pracy [27], dodatkowe rozwinięcie podziału odstępu i zwiększenie stawności sygnalizacji poprawia wprawdzie zdolność przepustową, ale zwiększa liczbę urządzeń przytorowych (w tym przypadku semaforów i związanych z nimi urządzeń stwierdzania niezajętości). Zastosowanie ruchomego odstępu blokowego pozwala na osiągnięcie najmniejszego czasu następstwa pomiędzy pociągami przy braku urządzeń przytorowych. Należy jednak zaznaczyć, że przy ruchomym odstępie blokowym nie można prowadzić ruchu mieszanego pociągów (pociągów wyposażonych i niewyposażonych w system ERTMS/ETCS, a także pociągów pasażerskich i towarowych na tych samych liniach), co jest istotne w warunkach polskich.

Literatura opisuje szereg przykładów zastosowania metod symulacyjnych do oceny zdolności przepustowej linii kolejowej przy różnych systemach sterowania [26], [29] - [36].

Przykładem użycia metod symulacyjnych do badania wpływu systemu sterowania ruchem pociągów w oparciu o ang. Communications Based Train Control (CBTC) lub ruchomy odstęp blokowy jest praca [35], gdzie zaprezentowano użycie teorii negatywnych systemów urojonych (ang. negative imaginary IN) do badań wzajemnego wpływu rozkazów pochodzących z systemów sterowania na dynamikę całego składu pociągu, jak również na oddziaływanie między poszczególnymi wagonami.

W pracy [32] zastosowano wielostopniowe modele masowo-sprężynowo-tłumiące o wielu stopniach swobody. Następnie do takiego układu przykładana jest siła pociągowa i siła hamowania, jako dane wejściowe i lokalizacja pociągu uzyskiwana jako dana wyjściowa. Dodatkowo dla algorytmu sterowania zdefiniowano limit zezwolenia na jazdę. Dla bezpiecznego zatrzymania pociągów obliczana jest wartość drogi hamowania.

Praca [73] proponuje zastosowanie teorii wieloagentowej do rozwiązania wielokryterialnego zadania, jakim jest obliczanie zdolności przepustowej dla kolei wysokich prędkości. Zastosowanie trzech poziomów niezależnych od siebie, ale komunikujących się i współpracujących ze sobą agentów pozwala na dekompozycję dużego i skomplikowanego systemu, jakim jest system kolejowy, na mniejsze. Sterowanie pociągiem można opisać jako proces rezerwacji, a następnie zajęcia poszczególnych odcinków, szlaków oraz stacji (agenci zasobów) przez pociąg (agent użytkownik).

Autorzy pracy [74] zaproponowali mezoskopowy model predykcji stanu pociągu jadącego za poprzedzającym pociągiem, który może być wykorzystywany do przewidywania zachowania układu w odniesieniu do zmian warunków początkowych (np. związane ze zmianą czasu postoju poprzedzającego).

W pracy [75] zaprezentowano koncepcję modelu uwzględniającego system sterowania bazującego na komunikacji radiowej CBTC, używanego w systemach metra i kolei aglomeracyjnej, jak również uwzględniającego system automatycznego prowadzenia ruchu pociągów ATC. Model ten pozwala na określanie parametrów zdolności przepustowej związanych z jazdą w punktach zatrzymania na stacji. Model ten bazuje na trzech różnych trybach jazdy pociągów: hamowanie do przeszkody, konflikt ruchowy z poprzedzającym pociągiem i hamowanie do peronu stacyjnego, przyspieszanie do momentu opuszczenia stacji. Rezultatem symulacji w środowisku MATLAB jest zależność czasu następstwa pociągów od ich prędkości jazdy, a także pozwala na znalezienie optymalnego czasu następstwa pociągów, jeśli prędkości jazdy dwóch kolejnych pociągów są różne.

Symulator oparty na języku Python, służący do analiz ruchu pociągów w obszarach węzłów kolejowych (ang. junction), opisuje praca [76]. Zastosowana w symulatorze teoria grafów pozwala na symulowanie rozkładu jazdy przez przypisanie pociągu o danej kategorii do danego łuku łączącego poszczególne węzły, a następnie wybór optymalnej kombinacji jazd przez węzeł. Narzędzie do planowania rozkładu ruchu na fragmencie sieci w oparciu o symulacje przedstawiono w pracy [77].

Praca [78] proponuje zastosowanie algorytmu siłowego (ang. Brute Force) dla potrzeb środowiska symulacyjnego, potrafiącego prowadzić obsługę wielu pociągów w czasie rzeczywistym, używanego do oceny zdolności przepustowej linii oraz konsumpcji energii przy ruchu pod nadzorem różnych zasad implementacji systemu ERTMS/ETCS.

Metody symulacyjne są również stosowane do oceny algorytmów oraz do rozwiązywania w czasie rzeczywistym konfliktów ruchowych występujących na sieci. W ramach ustalonego rozkładu jazdy, gdzie wykorzystanie zdolności przepustowej dąży do maksimum, zjawiska stochastyczne związane z opóźnieniami lub sytuacjami awaryjnymi mogą powodować propagację opóźnień na coraz większą liczbę pociągów. Dlatego w procesie sterowania ruchem

pociągów wykorzystuje się dynamiczne rozwiązywanie konfliktów ruchowych oraz wyprawiania pociągów w celu zminimalizowania łącznego czasu opóźnienia na sieci [79] - [81].

Oprócz badania zdolności przepustowej linii kolejowej, środowiska symulacyjne są również stosowane dla potrzeb testowania systemów sterowania ruchem kolejowym.

Praca [82] opisuje referencyjne stanowisko testowe, umożliwiające symulowanie scenariuszy testowych związanych z ruchem pociągów pod nadzorem systemu ERTMS/ETCS. Środowisko symulacyjne pozwala na potwierdzenie, że urządzenia pokładowe ETCS zapewniają wymaganą funkcjonalność zarówno programowaną, jak i sprzętową.

Nieco inne zastosowanie metod symulacyjnych zaprezentowano w pracy [83], gdzie opisano zastosowanie środowiska MATLAB&Simulink do symulowania działania komponentów sprzętowych rosyjskiego systemu bezpiecznej kontroli jazdy pociągu ALSC. Model matematyczny obwodów kodowanych systemu ALSC umożliwia sprawdzenie zachowania systemu w warunkach normalnej pracy, jak również symulowanie interferencji oraz prawdopodobieństwa ich wystąpienia w celu usprawnienia odporności systemu na zakłócenia. Metody symulacyjne są również stosowane do definiowania, a następnie testowania algorytmów stosowanych przy predykcyjnym utrzymaniu systemów kolejowych. Praca [84] opisuje zastosowanie symulacji zdarzeń dyskretnych (ang. Discrete Event Simulation) dla celów projektowania i weryfikacji algorytmów, dla potrzeb predykcyjnego i prewencyjnego utrzymania.

W pracy [85] zaprezentowano sposób na zredukowanie czasu symulacji metodą Monte Carlo przez zredukowanie wariancji i zastosowanie paradygmatu dotyczącego obliczeń równoległych z wykorzystaniem środowiska MATLAB.

Praca [39] opisuje zastosowanie oprogramowania komercyjnego OpenTrack. Oprogramowanie OpenTrack w oparciu o szereg parametrów wejściowych dotyczących infrastruktury oblicza minimalny czas następstwa między dwoma pociągami i jest w stanie zidentyfikować szlak krytyczny. W oprogramowaniu OpenTrack można definiować różne rodzaje pociągów (np. międzymiastowe, podmiejskie, towarowe itp.), definiować ich dokładną trasę na układzie torowym oraz miejsca ich zatrzymywania. OpenTrack oblicza charakterystyki jazd pociągów na podstawie danych dotyczących charakterystyki trakcyjnej [39], [61]. Charakterystykę trakcyjną wyznacza się dla danego pojazdu trakcyjnego z daną konfiguracją napędu [86]. Obliczenia zdolności przepustowej są możliwe zarówno dla odstępu stałego (dyskretny podział odstępu), jak i ruchomego. Model zastosowany w oprogramowaniu OpenTrack bazuje na metodzie kompresji rozkładu jazdy wg karty UIC-406 [28].

Praca [38] przedstawia oprogramowanie ERSA do modelowania procesów ruchowych pociągów w oparciu o system ERTMS/ETCS. Oprogramowanie ERSA umożliwia zamodelowanie infrastruktury przytorowej w zakresie systemu ERTMS/ETCS (definicja wiadomości w języku ETCS wysyłana z urządzeń przytorowych). Model ten umożliwia symulację zachowania pociągu wyposażonego w urządzenia pokładowe ERTMS/ETCS na podstawie danych pochodzących z urządzeń przytorowych systemu. Danymi wyjściowymi z symulacji jest poprawny przejazd pociągu, co pozwala zweryfikować poprawność przygotowania danych w wiadomościach ETCS oraz przygotować wykres jazdy pociągu, co umożliwia dalsze obliczanie parametrów zdolności przepustowej linii kolejowej w oparciu o metody analityczne.

4. Systemy sterowania ruchem kolejowym (srk)

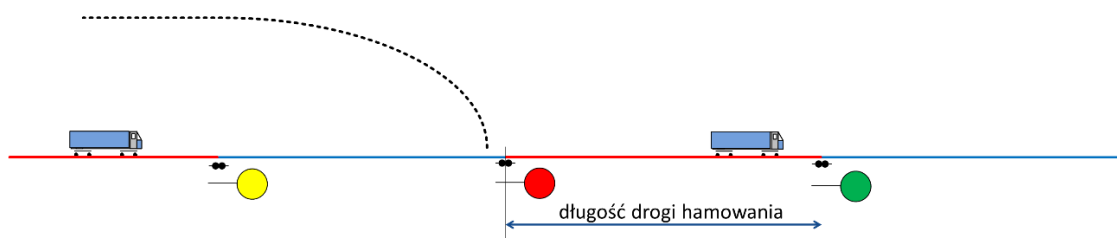
4.1. Podstawowa klasyfikacja i opis działania systemów srk

Systemy sterowania ruchem kolejowym (srk) służą do bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego. Systemy srk obejmują:

- urządzenia przytorowe (sygnalizatory, napędy zwrotnicowe, urządzenia kontroli niezajętości);
- systemy zależnościowe, których zadaniem jest ustawianie i kontrola elementów drogi przebiegu oraz kontrola ustalonych dla danego układu zależności związanych ze stanem poszczególnych urządzeń przytorowych;
- systemy nadrzędne, stanowiące interfejs użytkownika systemu zależnościowego, umożliwiające ustawianie dróg przebiegu. Systemy te mogą również zawierać funkcje wyższego rzędu, wspomagające pracę dyżurnego ruchu lub dyspozytora w zakresie kierowania i nadzoru nad ruchem kolejowym, odbywającym się według ustalonego rozkładu jazdy.

Systemy srk wykorzystują detekcję niezajętości poszczególnych odcinków torowych w procesie sterowania jazdą pociągów. Detekcja ta odbywa się za pomocą detektorów kół, które fizycznie wykrywają przejazd pojazdu. Klasyczne i częstotliwościowe układy wykrywają fizyczną zajętość odcinka. Informacja o niezajętości poszczególnych odcinków (odstępów) jest wykorzystywana do sterowania pociągiem, czyli wypracowania zezwolenia na jazdę dla danego pociągu. Zezwolenie na jazdę wynika z ustawionej drogi lub dróg przebiegu dla pociągu i może być przekazywana w sposób klasyczny przez sygnalizację przytorową lub przez sygnalizację kabinową.

W ujęciu klasycznym ruch pociągów prowadzony jest w ramach odstępów (lub przebiegów stacyjnych Rysunek 4-1). W niniejszej pracy przyjęto definicję odstepu obejmującej zarówno odstęp blokowy na szlaku, jak i przebieg stacyjny (tj. odcinek/odcinki toru z przynależnymi do niego rozjazdami i odcinkami kontroli niezajętości między dwoma kolejnymi semaforami zgodnie z [53] §6, ust. 6 i 8). Na początku i końcu odstepu ulokowany jest semafor przekazujący maszyniście sygnał zależny od stanu niezajętości danego odstepu lub kilku odstępów (w zależności od stawności sygnalizacji) za tym semaforem. Odstęp może być wyznaczony przez jeden lub kilka odcinków niezajętości, tj. odcinków toru wydzielonych poprzez lokalizacje odcinków niezajętości. Odcinki te są wyznaczone przez urządzenia systemu detekcji pociągu (np. czujnik koła systemu licznika osi).



Rysunek 4-1 Proces sterowania ruchem pociągów w oparciu o sygnalizację przytorową i podział na odstepy [źródło: opracowanie własne na podstawie [53]]

Przy podejściu sterowania pociągiem w oparciu o sygnalizację przytorową istotne jest zagadnienie stawności sygnalizacji przytorowej, która ma wpływ na długość odstępów. Nieco

inne podejście należy zastosować przy prowadzeniu ruchu pociągów w oparciu o wskazania sygnalizacji kabinowej i przy nadzorze nad jazdą pociągu w oparciu o systemy bezpiecznej kontroli jazdy pociągu BKJP.

Systemy BKJP dzielą się na systemy ATP, ATC, ATO oraz AWS [86], [88]. Zadaniem systemów BKJP klasy ATC i ATP jest nadzór nad aktualną jazdą pociągu względem aktualnego zezwolenia na jazdę. W systemach ATP, nadzór sprawowany jest punktowo, poprzez porównanie aktualnego sposobu prowadzenia pociągu z sygnalizacją przytorową. W systemach ATC, oprócz sprawdzenia zgodności prowadzenia pociągu przez maszynistę z zezwoleniem na jazdę (sygnalizacja przytorowa nie jest warunkowa przy niektórych systemach ATC), kontroli podlega aktualna prędkość pociągu względem wyliczonej, bezpiecznej, charakterystyki prędkości jazdy pociągu w funkcji drogi. Zezwolenie na jazdę uzyskiwane jest od urządzeń przytorowych. Zezwolenie na jazdę może być uzyskiwane punktowo lub przez transmisję radiową pomiędzy urządzeniami przytorowymi i pokładowymi. Przy wykorzystaniu radiowej transmisji danych system przytorowy wypracowuje zezwolenie na jazdę dla danego pociągu na podstawie informacji uzyskanej z systemu zależnościowego. Zezwolenie na jazdę jest zależne od raportowanej, aktualnej pozycji przez pociąg. Raport o pozycji zawiera informację o pozycji pociągu względem układu odniesienia, który jest znany przez urządzenia przytorowe. Takim układem odniesienia może być pozycja pociągu względem znaczników stałych zlokalizowanych w torze i odczytywanych przez pociąg (np. transpondery zwane balisami) [86].

Sposobem reakcji systemu BKJP klasy ATC na przekroczenie dozwolonej prędkości lub zezwolenia na jazdę, w zależności od sposobu komunikacji z urządzeniami przytorowymi może być zarówno reakcja punktowa polegająca na wdrożeniu przez system BKJP hamowania pociągu w przypadku przejazdu sygnału Stój lub dynamiczny nadzór nad prędkością jazdy pociągu w danym przekroju drogi jazdy pociągu. Dynamiczny nadzór i wyliczenie charakterystyki hamowania do końca zezwolenia na jazdę na podstawie parametrów danego pociągu i infrastruktury umożliwia zapobieżeniu sytuacji, w której pociąg mógłby przekroczyć koniec zezwolenia na jazdę (np. na semaforze wyświetlającym sygnał Stój). Systemy BKJP nie są systemami służącymi do automatycznego prowadzenia pociągu. Za etap przyspieszania oraz jazdy i hamowania dalej odpowiada maszynista, który jest tylko nadzorowany i w razie jego błędu system BKJP ma za zadanie w pierwszej kolejności go ostrzec. Jeśli system BKJP stwierdzi brak reakcji (redukcja prędkości jazdy), system ten wdraża interwencję w postaci wydania komendy poprzez interfejs do układu hamulcowego pojazdu trakcyjnego o wdrożeniu pełnego hamowania służbowego lub nagłego automatycznego wdrożenia hamowania [86].

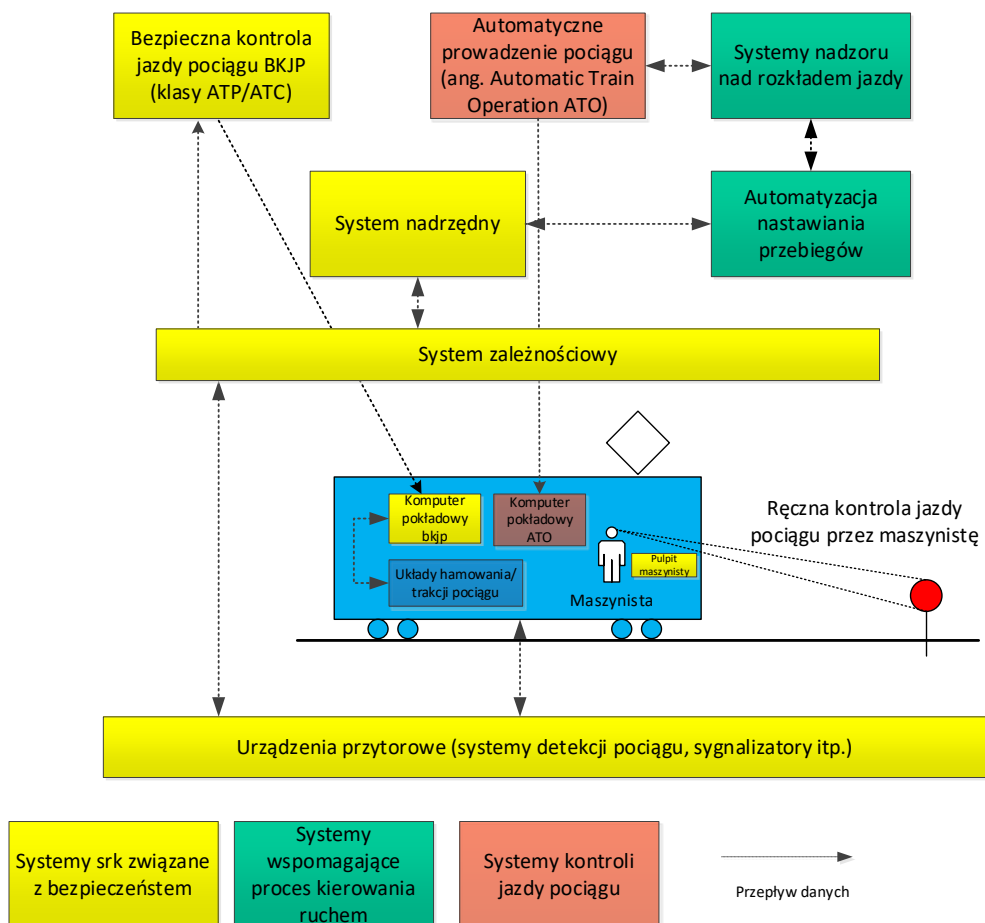
Systemy BKJP klasy AWS to systemy ostrzegające maszynistę np. o zbliżaniu się do semafora. Systemem BKJP klasy AWS jest stosowany w Polsce system SHP (Samoczynne Hamowanie Pociągu) [86].

System SHP nie jest uzależniony w żaden sposób od sygnału wyświetlonego na semaforze. Stanowi więc swego rodzaju przypomnienie dla maszynisty o zbliżaniu się do semafora i konieczności jego obserwacji. W żaden sposób system ten nie chroni przed możliwością przekroczenia semafora wyświetlającego sygnał Stój z pełną prędkością lub przekroczenia dozwolonej prędkości jazdy [89]. Z tego też względu pociąg wyposażony w system SHP jest sterowany tylko przez człowieka (maszynistę), bazuje na sygnałach wyświetlanych przez sygnalizację przytorową. Można więc przyjąć, że w warunkach sieci kolejowej w Polsce w przypadku jazdy w oparciu o system SHP realizowana jest ręczna kontrola jazdy pociągu przez maszynistę.

Systemy automatycznego prowadzenia pociągu (ATO) posiadają informację o rozkładzie jazdy (aktualizowaną drogą radiową z przytorowych systemów nadzoru nad rozkładem jazdy

lub predefiniowaną w pamięci urządzeń pokładowych) dotyczące profilu podróży (ang. journey profile) oraz profilu segmentu (ang. segment profile), są używane do automatycznego prowadzenia pociągu (rozpędzanie, jazda do celu, zatrzymanie przy peronie, nadzór nad minimalnym czasem postoju, ponowne rozpędzanie). Systemy te mają za zadanie prowadzić automatycznie pociąg według przyjętego algorytmu uwzględniającego realizację rozkładu jazdy (eliminacja opóźnień) lub obniżenia zużycia energii. Informacja z pokładowego systemu automatycznego prowadzenia ruchu pociągów może służyć jako informacja o aktualnej realizacji rozkładu jazdy i współpracować m.in. z systemami automatyzacji nastawiania przebiegów, a sam system może być na zasadzie inercji zwrotnej informowany o aktualizacji rozkładu jazdy w sposób ciągły, celem uzyskania optymalnego ruchu na wybranym odcinku sieci kolejowej.

W pracy [90] zostały zaprezentowane poziomy aplikacji (stopnie *GoA*) systemów ATO. W pracy [91] przedstawiono również obszary, które są niezbędne do opracowania, celem wdrożenia, systemów automatycznego prowadzenia pociągu ATO w Polsce (m.in. dostosowanie prawodawstwa, działania edukacyjne dla maszynistów, przypisanie zdefiniowanym funkcjom związanym z bezpieczeństwem ilościowych wskaźników). W ramach automatyzacji prowadzenia pociągu większe znaczenie nabiera aspekt ekonomicznej jazdy pociągu, na co zwrócono uwagę w pracy [92], proponując zastosowanie algorytmu ewolucji różnicowej do znajdowania optymalnych profili prędkości zależnych od czasów docelowych (np. czasów dojazdu do pośrednich stacji lub przystanków). Rysunek 4-2 przedstawia pogładową architekturę systemów srk i współpracy między nimi.



Rysunek 4-2 Architektura systemów srk [źródło: opracowanie własne na podstawie [27]]

System ERTMS/ETCS

W systemach BKJP klasy ATP/ATC typu ERTMS/ETCS pokładowy komputer w sposób ciągły sprawuje nadzór nad dopuszczalną prędkością jazdy pociągu w zależności od jego lokalizacji [93], [94].

Na podstawie danych o pociągu oraz zezwolenia na jazdę system wylicza maksymalną, bezpieczną prędkość jazdy oraz krzywą hamowania. Jeśli aktualna prędkość pociągu może przekroczyć wyliczoną aktualną w danym przekroju drogi jazdy maksymalną, bezpieczną prędkość, system zareaguje w następujący sposób:

- zostanie wysłane wizualne i dźwiękowe ostrzeżenie dla maszynisty;
- jeśli aktualna prędkość pociągu w dalszym ciągu się zwiększa, system wdroży hamowanie służbowe;
- jeśli hamowanie służbowe nie jest w stanie obniżyć prędkości pociągu poniżej dopuszczalnej prędkości wyliczonej przez system, system wdroży hamowanie nagłe [93], [94].

Dla systemu ERTMS/ETCS opracowano specyfikacje wymagań [95] i upubliczniono w ramach Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności dla podsystemu „Sterowanie” [96]. Komunikacja tor-pojazd może odbywać się punktowo poprzez balisy (poziom 1) transmitujące w odpowiednich lokalizacjach informacje o zezwoleniu na jazdę na podstawie informacji pochodzących od urządzeń srk warstwy podstawowej (nastawnica stacyjna, blokada liniowa), jak również bezprzewodowo i w sposób ciągły dzięki radiowej łączności tor-pojazd w oparciu o cyfrową sieć GSM-R, która jest nośnikiem danych między urządzeniami przytorowymi a pojazdem. Po stronie urządzeń przytorowych, elementem systemu, który posiada informacje o geografii linii kolejowej z lokalizacją poszczególnych elementów (balisy, początku i końca przebiegów wraz ze względnymi odległościami między tymi obiektami) oraz pobiera informacje z urządzeń srk warstwy podstawowej i koduje je w postać zezwolenia na jazdę dla pociągów nosi nazwę Centrum Sterowania Radiowego (ang. RBC, Radio Block Center).

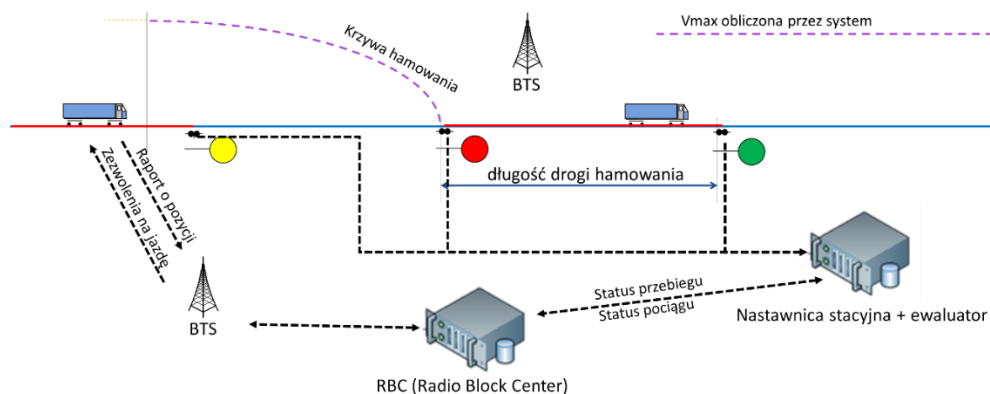
W systemie ERTMS/ETCS informacja o dozwolonej jeździe jest przekazywana do urządzeń pokładowych w formie Zezwoleń Na Jazdę (ang. Movement Authority, MA), a pociągi raportują cyklicznie swoją pozycję do urządzeń przytorowych. Możliwe jest przesyłanie do pociągu innych informacji, zgodnie ze standardem ETCS (np. polecenia zarówno bezwarunkowego, jak i warunkowego hamowania nagłego, informacji o ograniczeniach prędkości, profile jazdy wymagające obserwacji drogi jazdy przez maszynistę, informacji o sekcjach bezprądowych, peronach, zmianie systemu zasilania itp.). Oprócz poprawy poziomu bezpieczeństwa, wykorzystanie sygnalizacji kabinowej wraz z funkcjami BKJP umożliwiła zwiększenie prędkości jazdy pociągów powyżej 160[km/h] (na sieci PKP PLK S.A.) [94].

System ERTMS/ETCS można stosować w trzech poziomach aplikacji [94]:

1. Poziom 1, gdzie komunikacja tor-pojazd opiera się na punktowym przekazywaniu informacji przez balisy. Telegramy związane z zezwoleniem na jazdę generowane są przez odczyt stanu urządzeń srk przez kodery LEU (np. przez pomiar mocy czynnej w żarówkach semaforów lub poprzez odczyt stanu przekaźników). W tym poziomie wymagane jest pozostawienie przytorowej sygnalizacji optycznej oraz konwencjonalnych systemów detekcji. Istotną niedogodnością z punktu widzenia płynności ruchu jest punktowe przekazywanie informacji o zezwoleniu na jazdę. Przykładowo, w sytuacji, gdy pociąg minął semafor wskazujący sygnał *Na następnym semaforze Stój* to pociąg będzie w dalszym ciągu utrzymywał koniec zezwolenia na jazdę na kolejnym semaforze, nawet gdy w tym czasie sygnał ten uległ zmianie na

zezwalający. Uaktualnienie informacji o nowym, wydłużonym zezwoleniu na jazdę nastąpi dopiero w momencie przejazdu nad balisami znajdującymi się przed następnym semaforem. Rozwiązaniem tego jest stosowanie tzw. balis uaktualniających (ang. in-fill), zainstalowanych w pewnej odległości od potencjalnego końca zezwolenia na jazdę lub pętli wzdłuż peronu, gdzie może być realizowany postój pociągu w oczekiwaniu na sygnał zezwalający.

2. Poziom 2 – komunikacja tor-pojazd opiera się na ciągłej transmisji z wykorzystaniem cyfrowej radiołączności GSM-R. Rysunek 4-3 przedstawia poglądowo schemat działania i architekturę systemu ERTMS/ETCS poziomu 2. Zezwolenie na jazdę generowane jest przez centralny komputer RBC (ang. Radio Block Center, Centrum Sterowania Radiowego) na podstawie informacji z systemów sterowania ruchem kolejowym, tzw. warstwy podstawowej (lub według innej definicji systemów konwencjonalnych) – systemu zależnościowego oraz systemów detekcji niezajętości. Innymi słowy – utwierdzenie drogi przebiegu powodujące w systemie konwencjonalnym podanie sygnału na semaforze w systemie ETCS powoduje wysłanie zezwolenia na jazdę do pociągu z informacją na temat m.in. długości dozwolonej drogi jazdy, profili prędkości, profili podłużnych, mijanych balis w drodze jazdy itp. Na tej podstawie część pokładowa systemu ETCS, która posiada interfejsy do systemów pociągu (m.in. hamulcowego) oraz dane o charakterystyce hamowania pociągu, wylicza tzw. krzywą hamowania. Pociągi cyklicznie raportują do RBC swoją pozycję. Balisy w poziomie 2 wykorzystywane są głównie jako znaczniki stałe służące do względnej lokalizacji pociągu (rozkład balis na układzie torowym jest znany przez RBC, dlatego balisy, stanowiąc układ odniesienia zarówno dla RBC, jak i pociągu do określania pozycji oraz rozpoczynaniu/kończeniu przez urządzenia pokładowe określonych czynności zależnych od lokalizacji – np. miejsce rozpoczęcia nadzorowania zmiany profilu prędkości, określonego profilu jazdy itp.). Istotne w tym przypadku jest stosowanie rzeczywistych względnych odległości między obiektami infrastruktury. Problematyka dotycząca różnic między tzw. kilometrażem rzeczywistym obiektów infrastruktury kolejowej (wynikającym z rzeczywistych odległości między sąsiadującymi obiektami) a kilometrażem liniowym (używanym jako umowne oznaczenie lokalizacji obiektów) jest rozważana w badaniach własnych, dotyczącym pozycji liniowej obiektów infrastruktury kolejowej [97], [98].



Rysunek 4-3 Schemat działania systemu ERTMS/ETCS poziomu 2. [źródło: opracowanie własne na podstawie [95]]

3. Poziom 3 charakteryzuje się – tak samo jak poziom 2 – ciągłą transmisją tor-pojazd. w porównaniu z poziomem 2, poziom ten wprowadza raportowanie przez pociąg informacji o pozycji końca pociągu i potwierdzeniu integralności jego składu.

Informacja o integralności składu pociągu pochodzi z systemu monitorowania integralności TIM (ang. Train Integrity Monitoring), współpracującego z urządzeniami pokładowymi systemu ETCS. System ten ma za zadanie informować system ETCS o integralności składu, biorąc pod uwagę długość pociągu i podawać zaufaną informację o lokalizacji końca składu pociągu. Jeśli chodzi o pociągi pasażerskie operujące na składach zespolonych, to zapewnienie systemu do monitorowania ciągłości składu pociągu jest możliwe już teraz. Jako punkt otwarty jest jednak zastosowanie takiego systemu dla pociągów wagonowych, które mogą być różnie zestawiane (głównie towarowe, ale również pasażerskie składy wagonowe). Nie ma obecnie niezawodnych w działaniu i dostępnych do użytku z punktu widzenia również zasad operacyjnych systemu nadzoru nad ciągłością składu dla tego typu pociągów. Brak informacji o integralności tylko jednego pociągu może wpłynąć na możliwość prowadzenia ruchu pociągów na bardzo dużym obszarze ETCS poziomu 3.

ETCS poziom 3 był przedmiotem prac [99] - [102], związanych z opisem modelowania tego systemu. Przykładowo w pracy [99] opisano zastosowanie metody formalnej B do zamodelowania koncepcji ERTMS/ETCS Hybrid dla potrzeb walidacji prawidłowego działania urządzeń przytorowych i pokładowych według opisanej specyfikacji wymagań. W pracy [100] zastosowano metodą abstrakcyjnej maszyny stanów (ASM) dla celów modelowania systemu i jego symulowania w środowisku ASMETA.

Poziom aplikacji systemu ETCS ma również wpływ na zdolność przepustową linii kolejowej. Wyniki względnego wzrostu zdolności przepustowej w zależności od poziomu aplikacji systemu ETCS dla linii dużych prędkości przedstawia Tabela 4-1. Wynika z niej, że w porównaniu z poziomem 1 (który niewątpliwie pogarsza znacznie zdolność przepustową względem jazdy w oparciu o sygnały z uwagi na punktowe przekazywanie informacji o zezwoleniu na jazdę) poziom 2, poziom 2 z optymalizacją odstępów blokowych oraz z poziomem 3 daje odpowiednio o 16, 52, 63% wzrost zdolności przepustowej.

Tabela 4-1 Zależność między poziomem aplikacji ETCS a zdolnością przepustową linii kolejowej

	ETCS poziom 1	ETCS p. 1 z uaktualnieniem (dodatkowa balisa 400 [m] przed semaforem)	ETCS poziom 2	ETCS poziom 2 z optymalizacją długości stałych odstępów	ETCS poziom 3 z ruchomym odstępem blokowym
Względny wzrost zdolności przepustowej	100,0	103,3	116,1	151,7	162,5

Źródło: opracowanie na podstawie [103],[104]

System ETCS można również podzielić w zależności od poziomu zaawansowania i wpływu na możliwość obsługi pociągów niewyposażonych:

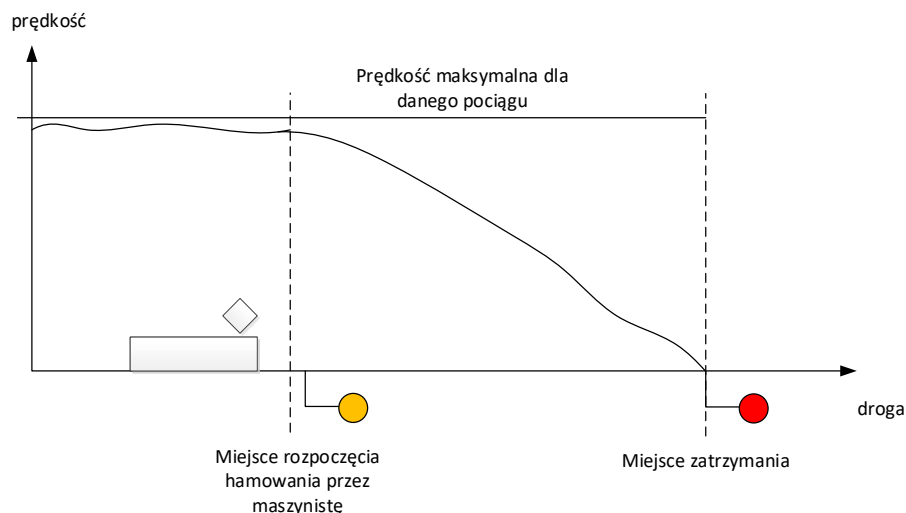
1. „Ruch mieszany” (ang. Overlay) – ETCS jest nakładany jako kolejna warstwa systemu srk względem obecnych na linii semaforów optycznych i systemu narodowego (klasy B). Umożliwia to prowadzenie ruchu pociągów wyposażonych zarówno w urządzenia pokładowe ETCS, jak i pociągów niewyposażonych w ETCS, a wyposażonych w system narodowy klasy B;
2. „Tylko ETCS” – brak na linii semaforów optycznych, ruch pociągów prowadzony jest tylko w oparciu o system ETCS. Na takiej linii dopuszczalny jest ruch tylko pociągów wyposażonych w urządzenia pokładowe ETCS;
3. „Ruchomy odstęp blokowy” – brak na linii semaforów optycznych oraz konwencjonalnych urządzeń detekcji pociągu. Na takiej linii dopuszczalny jest ruch

tylko pociągów wyposażonych w urządzenia pokładowe ETCS oraz wyposażonych w system kontroli składu pociągu. Ruch pociągów odbywa się w wirtualnych blokach, których początkiem jest koniec poprzedzającego pociągu (wraz z marginesem bezpieczeństwa). Praca [105] opisuje dwie metody regulacji następstw oparte o zasadę ruchomego bloku:

- a. bezwzględny ruchomy odstęp blokowy, gdzie drugi pociąg otrzymuje zezwolenie na jazdę do miejsca bliższego, niż wynika to z ostatniego raportu o pozycji pociągu poprzedzającego, z uwzględnieniem pełnej drogi hamowania pojazdu drugiego oraz dodatkowej drogi ochronnej.
- b. względny ruchomy odstęp blokowy, gdzie drugi pociąg otrzymuje zezwolenie na jazdę do miejsca bliższego niż położenie, jakie zdąży osiągnąć koniec pociągu poprzedzającego po wysłaniu ostatniego raportu o położeniu końca pociągu w przypadku wdrożenia przez ten pojazd pełnego hamowania nagłego (niezerowy czas zatrzymania).

4.2. Raportowanie pozycji pociągu w procesie sterowania ruchem kolejowym

W trakcie jazdy, w oparciu o stałe odstępy i sygnalizację przytorową, prowadzenie pociągu odbywa się na podstawie sygnałów na semaforach informujących o drodze jazdy za tym semaforem oraz – w zależności od stawności – informację o stanie kolejnego lub kolejnych odstępów. Długość drogi hamowania konkretnego pojazdu lub składu zależy od wielu współczynników, związanych rezystancją taboru w czasie jazdy, siły hamowania oraz adhezji między kołem i szyną podczas procesu hamowania [106]. Przykładowy sposób hamowania przez maszynistę został przedstawiony na charakterystyce prędkości w funkcji drogi (Rysunek 4-4).

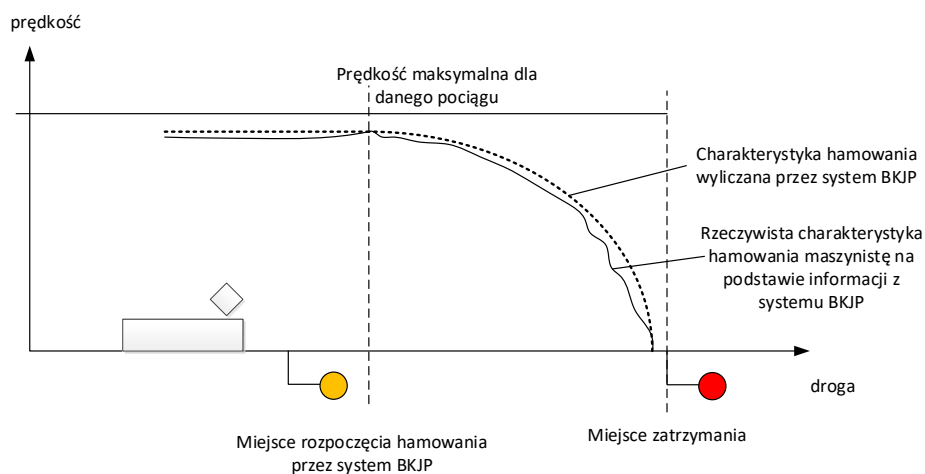


Rysunek 4-4 Charakterystyka hamowania pociągu przez maszynistę. [Źródło: opracowanie własne na podstawie [107]]

W przypadku, gdy jazda pociągu nadzorowana jest przez system bezpiecznej kontroli jazdy pociągu typu ETCS z ciągłą transmisją danych tor pojazd (poziom 2 lub poziom 3 aplikacji systemu ETCS), optyczna sygnalizacja przytorowa może zostać pominięta. System ten wysyła do pociągu zezwolenie na jazdę (i uaktualnia ją w razie konieczności) w oparciu o aktualną pozycję pociągu raportowaną przez pociąg do urządzeń przytorowych oraz informacje pochodzące z warstwy podstawowej urządzeń srk. Raport o pozycji niesie ze sobą m.in. informację o szacowanej pozycji czoła pociągu, wraz z jej niedokładnością [21].

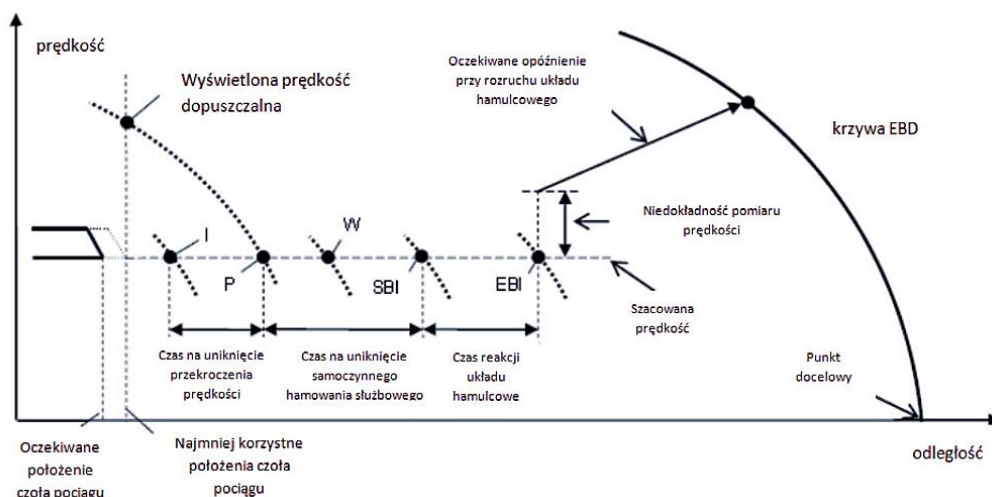
Modele charakterystyk („krzywych”) hamowania w systemie ETCS opierają się na matematyczno-fizycznym opisie zachowania pojazdu w czasie jego hamowania [107], [108]. Modele te opierają się m.in. na danych dotyczących pojazdów kolejowych tworzących pociąg, przykładowo inercja układu hamulcowego, parametry trakcyjne, długość pociągu. Ponadto bierze się pod uwagę dane dotyczące dróg przebiegu wchodzących w skład zezwolenia na jazdę, tj. długość zezwolenia, jej charakterystyki dot. profilu pochylenia podłużnego, profili maksymalnej prędkości). Predykcja sposobu hamowania przez pociąg oparta na charakterystyce $f(s) = v$ nazywana jest krzywą hamowania [107], [108], gdzie s oznacza drogę a v prędkość. W zależności od typu pojazdów kolejowych wchodzących w skład pociągu, dla potrzeb wyliczenia krzywych hamowania w systemie ETCS, używa się modelu γ , który bazuje na nominalnych wartościach opóźnienia dla różnych interwałów prędkości $A_{brake}(v) [m/s^2]$, znanych dla konkretnego składu pociągu (zwykle jest używany w zespołach trakcyjnych) oraz na współczynnikach korekcyjnych determinujących różnicę między nominalną wartością opóźnienia, a gwarantowaną przy hamowaniu na szynach suchych oraz mokrych. W przypadku składów pociągu, które mogą być dowolnie zestawiane z różnych pojazdów kolejowych (zwykle dotyczy to składów wagonowych), stosowany jest model λ , który, bazując na określonym dla danego składu pociągu procencie rzeczywistej masy hamującej P_r , długości pociągu oraz typie hamulca (np. hamulec szybko- lub wolnodziałający), jest w stanie określić charakterystyki $A_{brake}(v) [m/s^2]$ w oparciu o model konwersji [107].

W procesie sterowania pociągiem przez system BKJP urządzenia pokładowe informują maszynistę poprzez wskazania pulpitu pokładowego o potrzebie rozpoczęcia hamowania, a maszynista powinien tak prowadzić skład pociągu, aby nie przekroczyć wyliczonej przez system ETCS maksymalnej prędkości w danej współrzędnej drogi – Rysunek 4-5. Proces wyliczenia charakterystyk hamowania przez urządzenia pokładowe systemu BKJP jest procesem złożonym, biorącym pod uwagę wiele aspektów związanych z samym taborem, jak i oddziaływaniem szynakoło. Nakazane maszyniście przez system BKJP miejsce rozpoczęcia hamowania nie zawsze odpowiada miejscu fizycznej lokalizacji semaforów lub podziału na klasyczne odstępy [109].



Rysunek 4-5 Charakterystyka hamowania pociągu przez system bezpiecznej kontroli jazdy pociągu [Źródło: opracowanie własne na podstawie [107]]

W sytuacji, gdy system wykryje przekroczenie prędkości w danej współrzędnej drogi, zostanie wdrożona reakcja systemu, polegająca na załączeniu hamowania pociągu przez system ETCS.

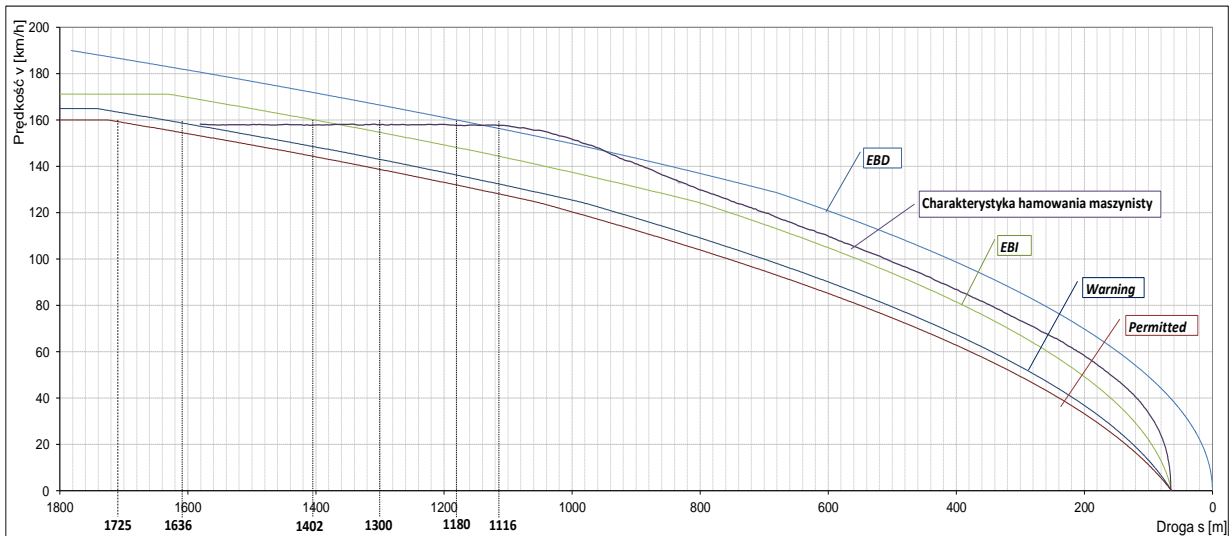


Rysunek 4-6 Charakterystyki hamowania wyliczane przez system BKJP (ETCS). Źródło: [108]

Rysunek 4-6 przedstawia zestaw charakterystyk hamowania obliczane przez urządzenia pokładowe systemu ETCS oraz zależności między nimi. Zgodnie z pracą [108], krzywa *Permitted* wyznacza prędkość, przy której maszynista zobowiązany jest do samodzielnego wdrożenia hamowania. Wdrożenie hamowania przez system nastąpi z chwilą przecięcia aktualnej prędkości jazdy pociągu z wyliczoną krzywą o nazwie *SBI*, powodującą wdrożenie hamowania służbowego, a w razie dalszego nieskutecznego zmniejszania prędkości wdrożenie hamowania nagłego z chwilą przecięcia aktualnej prędkości pociągu z krzywą *EBI*. Dodatkowo system wylicza charakterystyki związane z informowaniem maszynisty o nakazie hamowania zarówno poprzez ostrzeżenia wizualne, jak i dźwiękowe. Charakterystyki związane z nakazywaniem reakcji maszyniście na pokładowym pulpicie to *Permitted* „P” i *Warning* „W”.

Oprócz informacji o zezwoleniu na jazdę z urządzeń przytorowych oraz o charakterystyce hamowania danego składu pociągu, system w procesie wyliczania charakterystyk hamowania bierze również pod uwagę współczynniki korekcyjne, zależne od danej infrastruktury. Współczynniki te dodatkowo mogą kształtować krzywe wyznaczające charakterystyki hamowania przez system. W pracy [110] metodami symulacyjnymi porównano wyliczane krzywe hamowania *SBD* oraz *EBD* przy różnych wartościach parametrów zmiennych narodowych.

Wstępne badania własne [22], [111] pokazują różnice pomiędzy sposobem hamowania przez maszynistę, a wyliczeniami bezpiecznych krzywych hamowania przez system ETCS, prezentują charakterystyki, które przedstawia Rysunek 4-7, a także wyznaczone drogi hamowania, przedstawia Tabela 4-2. Wyniki, które prezentuje Rysunek 4-7 oraz Tabela 4-2 dotyczą pojazdu trakcyjnego będącego lokomotywą elektryczną przeznaczoną do ruchu pasażerskiego. Charakterystyki *EBD*, *EBI*, *Warning* i *Permitted* dotyczą nadzoru hamowania przez system ETCS i zostały wyliczone metodą symulacyjną za pomocą narzędzia *ERA Braking curve simulation tool* wersja 4.1, który oblicza krzywe hamowania zgodnie z modelem ETCS, opisanym w [95]. Do narzędzia zostały wprowadzone parametry pojazdu trakcyjnego, adekwatne do rzeczywistych (wraz z wartością rzeczywistego procentu masy hamującej $P_r=115\%$). Charakterystyka *EB 160 Driver* została odczytana z rejestratora pokładowego „Hassler”, po przeprowadzeniu testów terenowych, polegających na hamowaniu nagłym z prędkości 160 [km/h] do zatrzymania bez systemu ETCS. Przeprowadzono 3 próby hamowania, na których podstawie uśredniono wyniki zaprezentowane jako charakterystyka hamowania maszynisty (Rysunek 4-7 oraz Tabela 4-2).



Rysunek 4-7. Charakterystyki hamowania pojazdu trakcyjnego będącego lokomotywą elektryczną przeznaczoną do ruchu pasażerskiego (charakterystyki EBD, EBI, Warning, Permitted obliczone metodami symulacyjnymi, charakterystyka hamowania maszynisty wyznaczona metodą testów terenowych) [źródło: opracowanie własne na podstawie charakterystyk hamowania ETCS obliczone za pomocą oprogramowania *ERA Braking curve simulation tool* wersja 4.1 oraz pomiarów własnych.]

Tabela 4-2 Drogi hamowania dla prędkości 160 [km/h] wyznaczone metodami symulacyjnymi dla systemu ETCS oraz wyznaczone w testach terenowych

	Permitted	Warning	EBI	EBD	Zmierzona śr. długość drogi hamowania maszynisty	Wymagana dl. drogi hamowania według [53]
Droga hamowania [m]	1724,68	1635,79	1401,51	1179,99	1115,08	1300

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie otrzymanych wstępnych wyników badań (które przedstawia Rysunek 4-7 oraz Tabela 4-2) stwierdzono, że przy prędkości 160 [km/h] system nakazuje maszyniście rozpoczęcie hamowania pociągu przed końcem zezwolenia na jazdę w odległości 1725 [m], co oznacza, że jest to o 424,68 [m] wcześniej niż wynika z przyjętej w Polsce długość drogi hamowania, tj. 1300 [m] dla prędkości 160 [km/h]. Należy zauważyć, że miejsce zatrzymania pociągu wyliczane przez system znajduje się w pewnej odległości przed faktyczną lokalizacją końca zezwolenia na jazdę. Wynika to z uwzględnienia przez system ETCS niedokładności pomiaru odometrycznego lokalizacji pociągu [22]. W pewnych lokalizacjach system ETCS umożliwia natomiast lepsze dopasowanie profili prędkości – nadzorowanie ograniczenia prędkości, w rzeczywistych miejscach lokalizacji danego profilu prędkości na przykład dla zwrotnic ustawionych w kierunku zwrotnym [112]. Dłuższy czas hamowania przekłada się na czas zajęcia danego odcinka infrastruktury (odstępu blokowego), a co za tym idzie wydłuża czas następstwa, po którym kolejny pociąg może zostać obsłużony przez ten sam odstęp blokowy. Jako że rozkład jazdy pociągów, określający wykorzystanie zdolności przepustowej jest budowany w oparciu o klasyczne drogi hamowania (tzw. scenariusz normalny), zastosowanie ETCS może powodować w niektórych przypadkach odchyłki od rozkładu jazdy. Zagadnienie to istotne jest również przy projektowaniu przytorowego systemu ETCS, z uwagi na potrzebę uwzględnienia różnych typów pociągów z różnymi parametrami hamowania, których charakterystyki hamowania według systemu ETCS mogą się od siebie różnić [81]. Dodatkowym aspektem, który należy wziąć pod uwagę, jest również granica prędkości maksymalnej, do której możliwy jest ruch pociągów bez nadzoru systemu ETCS. W Polsce, granica ta wynosi 160 [km/h] [113].

Systemy srk a zdolność przepustowa linii kolejowej

W kontekście rozpatrywania zagadnienia na poziomie sieci kolejowej lub jej wycinka można wyróżnić zastosowanie procesów optymalizacji obsługi pociągów w konkretnych węzłach sieci poprzez systemy kierowania ruchem kolejowym wspomagające pracę dyspozytora ruchu. W szczególności są to procesy związane z dynamicznym rozwiązywaniem konfliktów ruchowych na podstawie zdefiniowanych algorytmów i dynamiczną adaptacją rozkładu jazdy do aktualnej sytuacji ruchowej [114]. Taka adaptacja powinna brać pod uwagę przede wszystkim minimalizowanie opóźnień, ale może również brać pod uwagę inne aspekty, jak np. efektywność energetyczną [115]. Praca [48] opisuje zastosowania oprogramowania *AGLIBRARY*, wykorzystującego metodę Monte Carlo dla potrzeb predykcyjnego określania konfliktów ruchowych i ich rozwiązywania przez zmianę rozkładu jazdy danych pociągów. W pracy [48] zastosowano systemu kierowania ruchem kolejowym na poziomie dyspozytora ruchu *ROMA*. System ten zawiera mechanizm kompresji rozkładu jazdy (opisanego w rozdziale 3.2) oraz model blokowania odstępów (opisany w rozdziale 3.1) dla pociągów jadących pod różnymi systemami sterowania. W pracy [116] zaproponowano algorytm dynamicznej regulacji czasu następstwa pociągów w czasie rzeczywistym. Wykorzystując funkcję sztucznego potencjału między pociągami, pociągi o różnej pozycji względem siebie mogą uzyskiwać różne pola potencjału, a tym samym każdy pociąg może być „przyciągany” do drugiego lub „odpychany” od niego. W pracy [31] zastosowano arkusze kalkulacyjne do obliczeń wpływu pakietowego wypuszczania pociągów na szlak jednotorowy na sumaryczny czas opóźnień i możliwości rozwiązywania konfliktów ruchowych.

Z punktu widzenia systemów sterowania ruchem kolejowym definiujące sposób prowadzenia ruchu na poziomie danej linii kolejowej lub jego odcinka istotny jest dobór odpowiedniego systemu sterowania ruchem kolejowym i jego odpowiednie dopasowanie [17]. Dopasowanie to powinno brać pod uwagę obecny oraz prognozowany ruch i jego strukturę. W literaturze można znaleźć wiele przykładów porównania wpływu zastosowanego systemu srk na zdolność przepustową. Praca [48] przedstawia porównanie zastosowania systemu ETCS poziomu 2 z systemem narodowym NS'54/ATB, stosowanym w Holandii. System ten jest kombinacją sygnalizacji przytorowej NS'54 oraz systemu dynamicznego nadzoru nad prędkością jazdy o nazwie ATB, opartym o kodowane obwody torowe. Jak pokazały badania przedstawione w pracy [48] zastosowanie ETCS poziomu 2 zmniejsza czas blokowania odstępów zlokalizowanych w pobliżu posterunków. Wynika to z działania systemu NS'54/ATB, który wymusza zmniejszenie prędkości do 40 [km/h] w przypadku wjazdu na odstęp osłonięty sygnałem pomarańczowym ostrzegającym o zbliżaniu się do semafora wskazującego sygnał Stój. System ETCS poziomu 2 wylicza charakterystykę hamowania pociągu do punktu zatrzymania, nie stosując pośredniego stopniowania prędkości jazdy. Dodatkowy uzysk otrzymano poprzez dynamiczne rozwiązywanie konfliktów i celowe obniżanie prędkości jazdy pociągu na niektórych odcinkach, celem uniknięcia konfliktu ruchowego i stabilizacji czasu następstwa pociągów. Porównanie zdolności przepustowej przy różnych systemach sygnalizacji na sieci kolejowej w Danii przedstawiono natomiast w pracach [117], [118]. Porównanie wpływu na zdolność przepustową przy zastosowaniu różnych systemów BKJP można znaleźć w badaniach opublikowanych w [117], [119], [120]. Badania te odnosiły się do systemu ETCS poziom 2 w porównaniu z narodowymi systemami BKJP, jak np. system ATB stosowany w Holandii lub system JKV stosowany w Finlandii. Analizy zakładały zachowanie istniejącego podziału odstępów blokowych, wynikających z wymagań dla ruchu konwencjonalnego. Możliwe jest jednak dostosowanie długości odstępu, z uwzględnieniem charakterystyki hamowania przez system ETCS, przy założeniu stałego czasu blokowania poszczególnych odstępów. [121], [122], [123], [124].

Praca [125] proponuje dostosowanie długości klasycznych odstępów dla potrzeb ruchu pod nadzorem systemu ETCS poziomu 2. Dostosowanie to, powinno zapewniać stały czas blokowania poszczególnych odstępów, co oznacza różną ich długość w zależności od projektowanej prędkości. Przykładowo, przy dojeździe do stacji, gdzie następuje zatrzymanie pociągów, a następnie ich ponowne rozpędzanie, długości odstępów powinny być coraz krótsze, aby zapewnić stały czas ich zajęcia podczas hamowania i przyspieszania pociągu.

Ruchomy odstęp blokowy realizuje bezpieczną separację pociągów jadących za sobą, przy jednoczesnej eliminacji urządzeń przytorowych poprzez bazowanie na raportowanej przez pociąg pozycji i potwierdzaniu ciągłości składu pociągu. Rozwiązania z ruchomym blokiem przy zastosowaniu ETCS poziomu 3 jest szeroko opisywane w literaturze [70], [126], [127]. Praca [31] opisuje przypadek zastosowania sterowania pociągiem w oparciu o ruchomy odstęp na liniach jednotorowych z mijankami. Praca [30] opisuje zastosowanie wielostopniowego hamowania pociągów poruszających się w ramach ruchomych odstępów przy wjeździe na stację. Analizy zdolności przepustowej opisane w publikacji [128], gdzie zaproponowano, aby rozwiązanie z ruchomym odstępem blokowym brało pod uwagę względną długość drogi hamowania (ang. Relative Distance Braking Mode RDBM). To rozwiązanie zakłada, że poprzedzający pociąg – nawet w przypadku sytuacji wymagającej załączenia hamowania nagłego – wymaga pewnego minimalnego dystansu do zatrzymania się. Z tego też względu, zezwolenie na jazdę dla następnego pociągu można wysyłać nie do lokalizacji końca pociągu poprzedzającego, lecz dla pewnej dalszej lokalizacji, biorąc pod uwagę margines bezpieczeństwa [128]. Takie rozwiązanie, nazwane jako OHDMB (ang. Optimised Headway Distance Mowing Block), zostało porównane z ruchomym odstępem blokowym oraz sygnalizacją tradycyjną. Rozwiązanie z OHDMB w porównaniu ze zwykłym ruchomym odstępem blokowym pozwala na zwiększenie teoretycznej zdolności przepustowej o prawie 60% (z 44 do 77 [poc./godz.] przy prędkości 200 [km/h]) [128]. Pewnym rozwinięciem tej koncepcji jest zastosowanie wirtualnego sprzęgu opierającego się na bezpośredniej komunikacji pomiędzy dwoma poruszającymi się pociągami w tym samym kierunku [129]. Koncepcja ta zakłada zastosowanie algorytmu związanego z synchronicznym hamowaniem obydwu pociągów z uwzględnieniem opóźnień czasowych związanych z transmisją [130] - [131].

Wprowadzenie rozwiązań z ruchomym odstępem blokowym do powszechnego stosowania wymaga natomiast wzięcia pod uwagę aspektów związanych z prowadzeniem ruchu kolejowego, takich jak:

- możliwość prowadzenia ruchu pociągów w sytuacjach niedostępności elementów systemu (np. sieć transmisyjna, usterka urządzeń przytorowych itp.);
- prowadzenie ruchu pociągów niewyposażonych w urządzenia pokładowe ETCS, w tym np. technicznych, utrzymaniowych;
- prowadzenie jazd manewrowych w obszarach stacji;
- zakończenie sesji komunikacyjnej i jednocześnie przemieszczanie pociągu poza nadzorem systemu ETCS;
- zwolnienia częściowe przebiegu po zaraportowaniu, że pociąg całym swoim składem przejechał za dany element infrastruktury oraz wynikających z tego potencjalnych opóźnień związanych z transmisją radiową [132].

Szczególnie jest to istotne w okresach migracji, gdy nie wszystkie pociągi poruszające się na danej sieci są wyposażone w urządzenia pokładowe ETCS i jest konieczność uwzględnienia ruchu mieszanego.

Z opisanych wyżej powodów we wstępnych badaniach własnych [22], [132] analizowano możliwość zastosowania wirtualnych odstępów jako metody dodatkowej podziału stałego

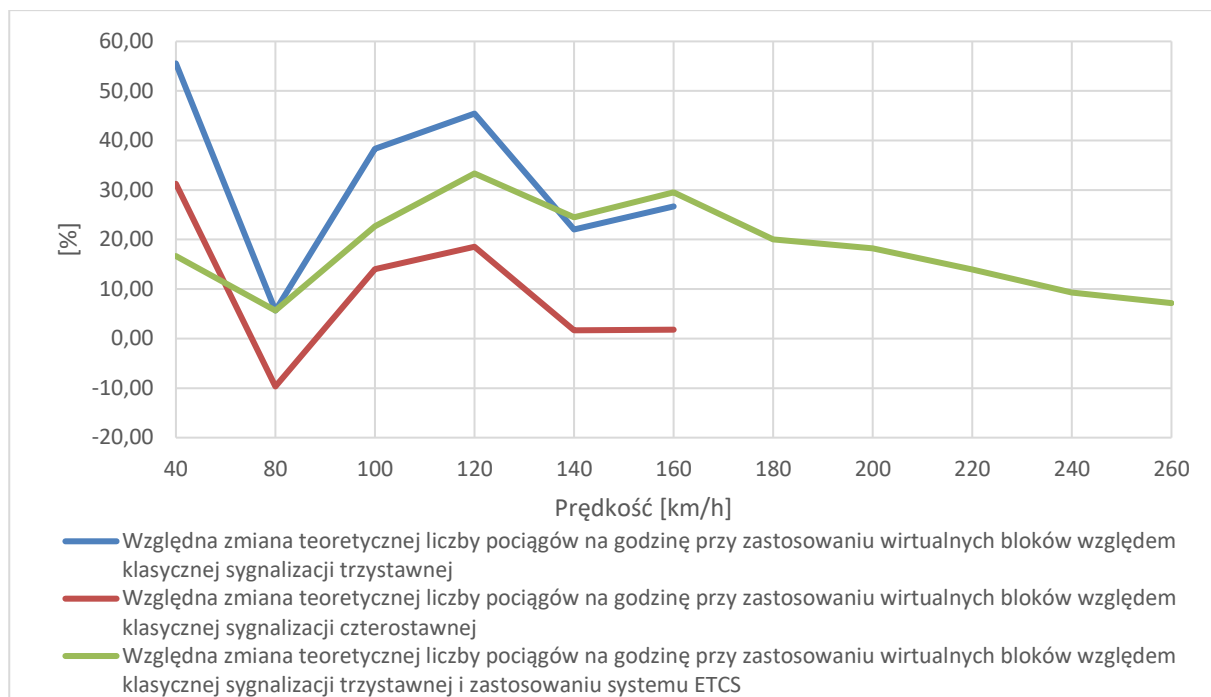
odstępu. Podział na odstępy może być dodatkowo rozwinięty, szczególnie z punktu widzenia sterowania poprzez system ETCS. Przy dodatkowym rozwinięciu odstępu w oparciu o rzeczywiste odstępy należałoby uwzględnić dodatkowe urządzenia systemu stwierdzania niezajętości, co przełożyłoby się na wzrost kosztów inwestycji (wynikających z dodatkowych urządzeń, kabli transmisyjnych oraz zasilających) oraz parametry RAM systemu, które uległyby pogorszeniu, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Wirtualne odstępy nie wymagają dodatkowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym, ponieważ stanowią tylko reprezentację logiczną odcinka toru w systemie sterowania ruchem kolejowym. Stan takiego odstępu jest zależny od stanu niezajętości klasycznego stałego odstępu, którego wirtualny odstęp stanowi część, jak również stanu logicznego wirtualnego odstępu w zależności od raportowania pozycji przez pociąg. Wstępne analityczne badania zdolności przepustowej przedmiotowego rozwiązania z wirtualnymi odstępami w obszarze szlaku na podstawie badań własnych [22] przedstawiają Tabela 4-3 oraz Rysunek 4-8, gdzie zaprezentowano względną zmianę teoretycznej liczby pociągów przy sterowaniu z zastosowaniem wirtualnych odstępow w porównaniu z innymi, obecnie wykorzystywanymi, modelami sterowania ruchem kolejowym [22], [132].

Jak pokazują wyniki wstępnych badań [22], które przedstawiają Tabela 4-3 oraz Rysunek 4-8, prawie zawsze występuje zwiększenie teoretycznej liczby pociągów na godzinę obsługiwanych przez szlak wyposażony w wirtualne odstępy, co jest zjawiskiem pożądanym. Najmniejsze zwiększenie teoretycznej liczby pociągów przy zastosowaniu wirtualnych odstępow, a nawet jej zmniejszenie, występuje względem zastosowania sygnalizacji czterostawnej. Należy tu jednak zaznaczyć, że w badaniach tych zakładano długości odstępow dla sygnalizacji czterostawnej równe połowie długości hamowania. W praktyce rzadko kiedy stosuje się takie rozwiązania na sieci kolejowej w Polsce, gdzie długości odstępow na blokadach czterostawnych są zwykle równe drodze hamowania. Jazda pociągów z prędkością powyżej 160 [km/h] możliwa jest tylko w oparciu o systemy bezpiecznej kontroli jazdy pociągu z sygnalizacją kabinową. W tym przypadku porównanie ze sterowaniem w oparciu o system ETCS zaimplementowanym na stałych odstępach równych długości drogi hamowania (jak dla sygnalizacji trzystawnej) daje względne zwiększenie teoretycznej liczby pociągów od 20,00% dla prędkości 160 [km/h] do 7,14% dla prędkości 260 [km/h], co również jest zjawiskiem pozytywnym.

Tabela 4-3 Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę na szlaku przy zastosowaniu wirtualnych odstępow względem innych metod sterowania pociągiem

Prędkość	Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę przy zastosowaniu wirtualnych bloków względem sterowania pociągiem w oparciu o sygnalizację trzystawną	Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę przy zastosowaniu wirtualnych bloków względem sterowania pociągiem w oparciu o sygnalizację czterostawną	Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę przy zastosowaniu wirtualnych bloków względem sterowania pociągiem przez system ETCS zaimplementowany na stałych odstępach dla sygnalizacji trzystawnej
[km·h ⁻¹]	[%]	[%]	[%]
40	55,56	31,25	16,67
80	5,66	-9,68	5,66
100	38,30	14,04	22,64
120	45,45	18,52	33,33
140	22,00	1,67	24,49
160	26,67	1,79	29,55
180	-	-	20,00
200	-	-	18,18
220	-	-	13,95
240	-	-	9,30
260	-	-	7,14

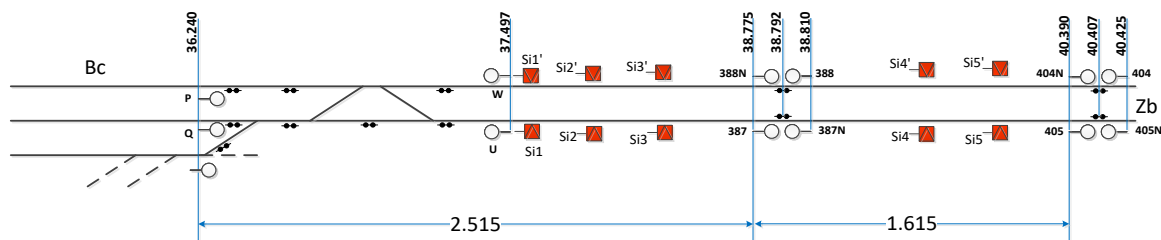
Źródło: opracowanie własne na podstawie badań własnych [22]



Rysunek 4-8 Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę na szlaku przy zastosowaniu wirtualnych odstępów względem innych metod sterowania pociągiem [źródło: opracowanie własne na podstawie badań własnych [22]]

W badaniach własnych opisanych w pracy [111] przeanalizowano przypadek wpływu zastosowania wirtualnych odstępów na przebiegi wyjazdowe ze stacji. Jako studium przypadku posłużono się odcinkiem linii E30 Bolesławiec–Zebrzydowa, gdzie długości odstępów blokowych są znacznie dłuższe niż przyjęta długość drogi hamowania równa 1300 [m] dla prędkości 160 [km/h].

Rysunek 4-9 przedstawia analizowany fragment wyjazdu ze stacji Bolesławiec w kierunku stacji Zebrzydowa, gdzie stacyjny przebieg wyjazdowy oraz pierwszy odstęp blokowy podzielono dodatkowo na wirtualne odstęp. Jako odstęp krytyczne przeanalizowano odstęp P- 388N, Q->387 oraz wirtualne odstęp P->Si1' oraz Q->Si1. Wyniki przedstawiające względną zmianę teoretycznej liczby pociągów na godzinę przy zastosowaniu wirtualnych bloków, a sterowanie pociągiem w oparciu o sygnalizację przytorową trzystawną oraz z nałożonym na niego systemem ETCS przedstawiają Tabela 4-4 oraz Rysunek 4-10. Dla przebiegu wyjazdowego uzysk z zastosowania wirtualnych odstępów może być nawet kilkukrotnie większy niż przy jeździe w oparciu o tradycyjną sygnalizację. Wynika to z długości odstepu tworzącego przebieg wyjazdowy, który oprócz pierwszego odstepu obejmuje również odcinek od semafora wyjazdowego ze stacji do semafora wjazdowego na tę stację dla kierunku przeciwnego. Dodatkowo, według istniejących przepisów wyprawienie pociągu może się odbyć, gdy poprzedzający pociąg minie co najmniej pierwszy odstęp. Przy dodatkowym podziale tego odstepu i uwzględnieniu jazdy w oparciu o sterowanie poprzez system ETCS teoretyczna liczba pociągów na godzinę może ulec zwiększeniu przynajmniej o 39% dla prędkości 160 [km/h].

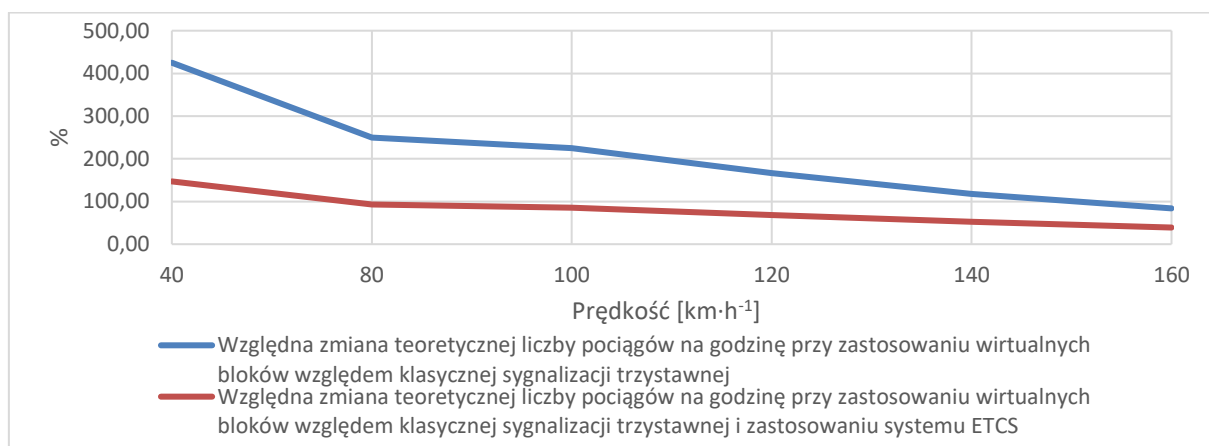


Rysunek 4-9 Fragment stacji Bolesławiec (Bc) i szlaku w kierunku Zebrzydowej (Zb) z rzeczywistą lokalizacją semaforów wyjazdowych, wjazdowych oraz blokadowych wraz z propozycją dodatkowego podziału klasycznych odstępów przy wykorzystaniu wirtualnych odstępów. Granice wirtualnych odstępów zaznaczono poprzez symbole wskaźników miejsca zatrzymania „Si” dlajazd w kierunku Zebrzydowej [źródło: opracowanie na podstawie badań własnych [111]]

Tabela 4-4 Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę na wyjeździe ze stacji na szlak przy zastosowaniu wirtualnych odstępów względem innych metod sterowania pociągiem

Prędkość [km·h ⁻¹]	Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę przy zastosowaniu wirtualnych bloków względem klasycznej sygnalizacji trzystawnej	Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę przy zastosowaniu wirtualnych bloków względem klasycznej sygnalizacji trzystawnej i zastosowaniu systemu ETCS
	[%]	[%]
40	425	147
80	250	93
100	225	85
120	166	68
140	117	52
160	83	39

Źródło: opracowanie własne na podstawie badań własnych [111]



Rysunek 4-10 Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę na wyjeździe ze stacji na szlak przy zastosowaniu wirtualnych odstępów względem innych metod sterowania pociągiem [źródło: opracowanie własne na podstawie badań własnych [111]]

Na podstawie omawianych w rozdziale przykładów i oraz badań własnych [132] - [134] można stwierdzić, że zasadne jest rozwijanie metod badań zdolności przepustowej linii kolejowej i wpływu projektowanego rozwiązania w zakresie sterowania ruchem kolejowym na ten aspekt. Rozwój ten powinien uwzględniać jak najdokładniejsze odwzorowanie działania rzeczywistego systemu w jego cyfrowym odzwierciedleniu oraz umożliwiać szeroki zakres parametryzacji dla celów badań nowych rozwiązań w systemach sterowania ruchem kolejowym.

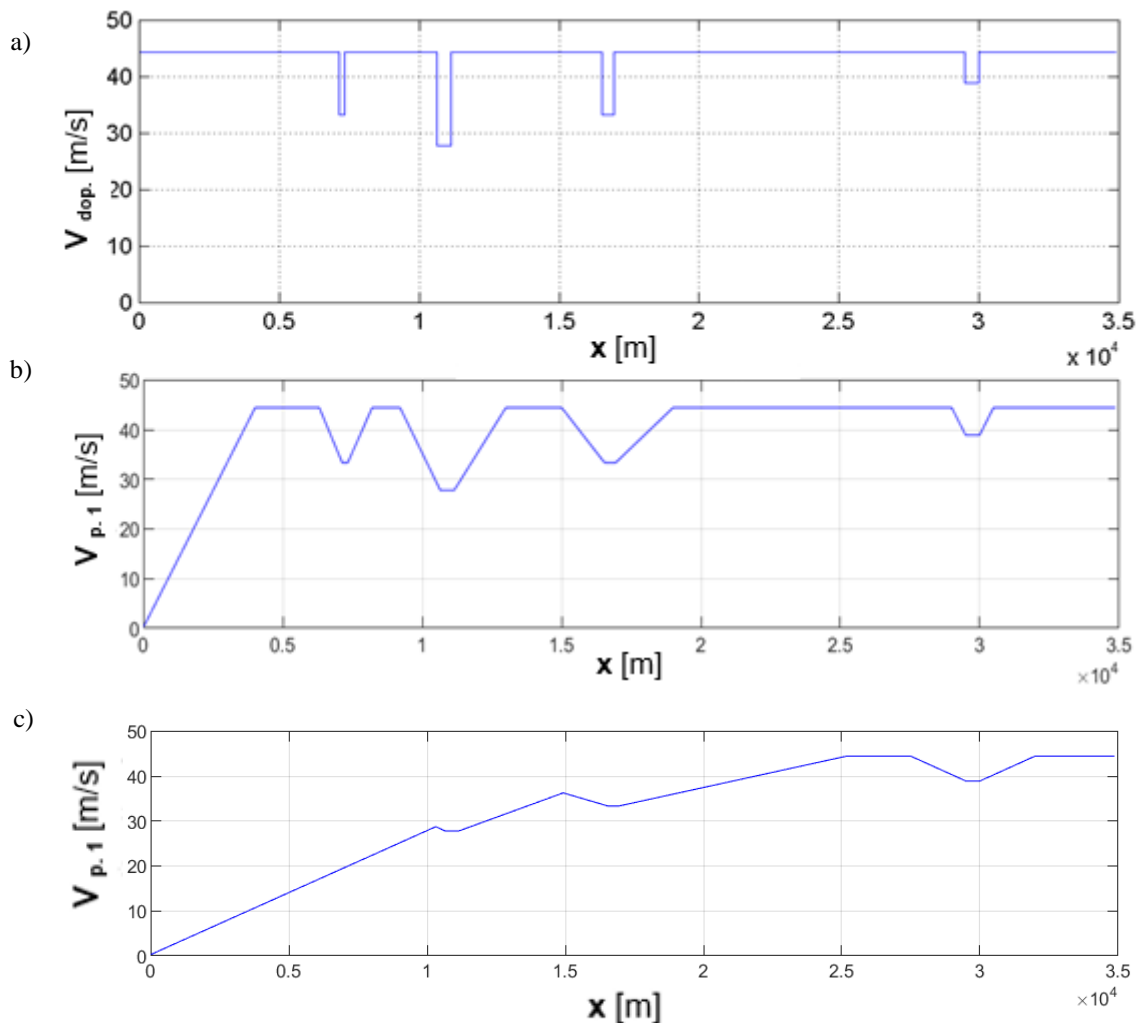
5. Modele jazdy pociągów

5.1. Model jazdy pociągów w oparciu o sygnalizację przytorową

Opracowany model powstał w celu odwzorowania w oprogramowaniu symulacyjnym jazdy pociągów w oparciu o sterowanie z wykorzystaniem sygnalizacji przytorowej w warunkach polskich. Zakłada się brak systemu bezpiecznej kontroli jazdy pociągu, który oddziaływałby na jazdę pociągu w zależności od wypracowanego zezwolenia na jazdę (analogicznie jak to jest obecnie realizowane na liniach kolejowych w Polsce, wyposażonych tylko w system Samoczynnego Hamowania Pociągu SHP). Model jazdy pociągu w oparciu o sygnalizację przytorową uwzględnia jazdę z wykorzystaniem sygnalizacji trzystawnej.

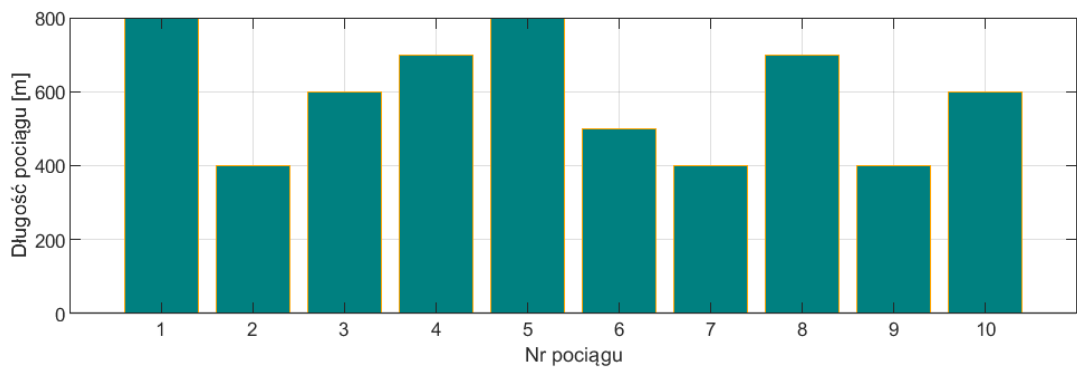
Model został opracowany z uwzględnieniem przyjętych następujących założeń:

- I. Wprowadzany jest profil dopuszczalnej prędkości na szlaku (Rysunek 5-1a).
- II. Możliwe jest wprowadzenie dowolnego profilu prędkości jazdy danego pociągu na szlaku w funkcji współrzędnej pociągu na szlaku (Rysunek 5-1b). Profil prędkości może być również zadany jako nieliniowy i będzie odpowiadał rzeczywistemu profilowi jazdy (Rysunek 5-1c).



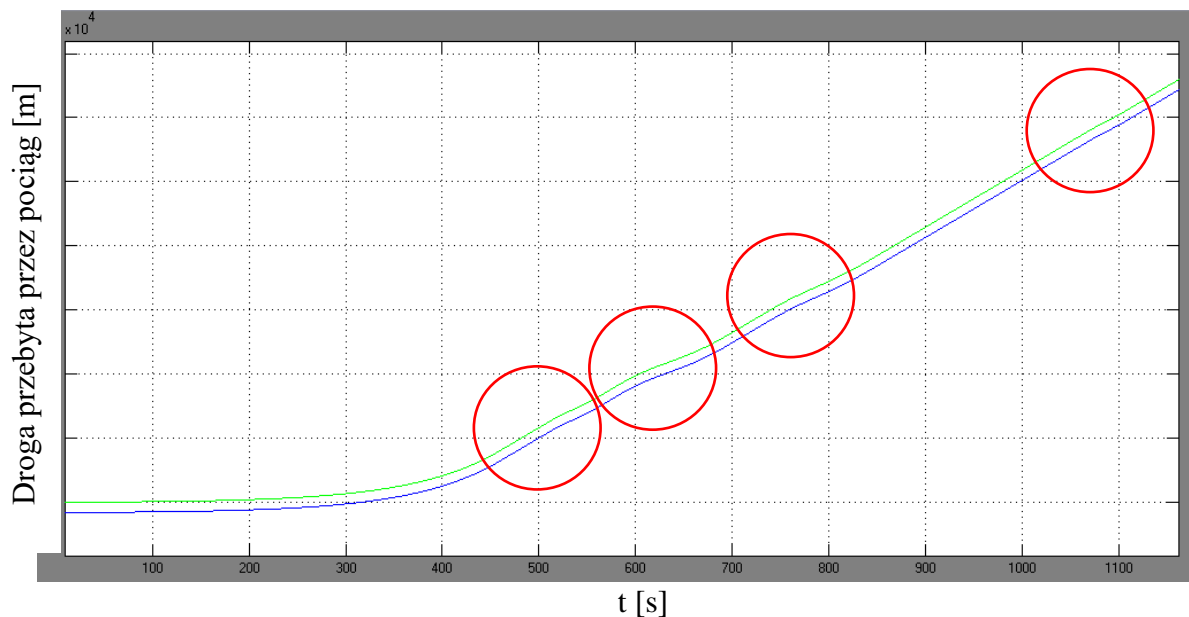
Rysunek 5-1. Profil dopuszczalnej prędkości na szlaku (a), profil maksymalnej prędkości pociągu nr 1 na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku (b), (c) [źródło: opracowanie własne]

- III. Pomimo zadanego profilu prędkości (podanego w punkcie II niniejszych założeń) możliwa jest zmiana przez program symulacyjny indywidualnej chwilowej prędkości dla każdego pociągu znajdującego się na szlaku np. w razie konieczności zatrzymania go na sygnale „S1 Stój”. Prędkość pociągu nie powinna być większa niż prędkość dopuszczalna na szlaku, choć w razie potrzeby możliwe jest wprowadzenie prędkości jazdy wyższej niż dopuszczalna.
- IV. Możliwe jest wprowadzenie indywidualnych długości pociągów znajdujących się na szlaku (Rysunek 5-2).



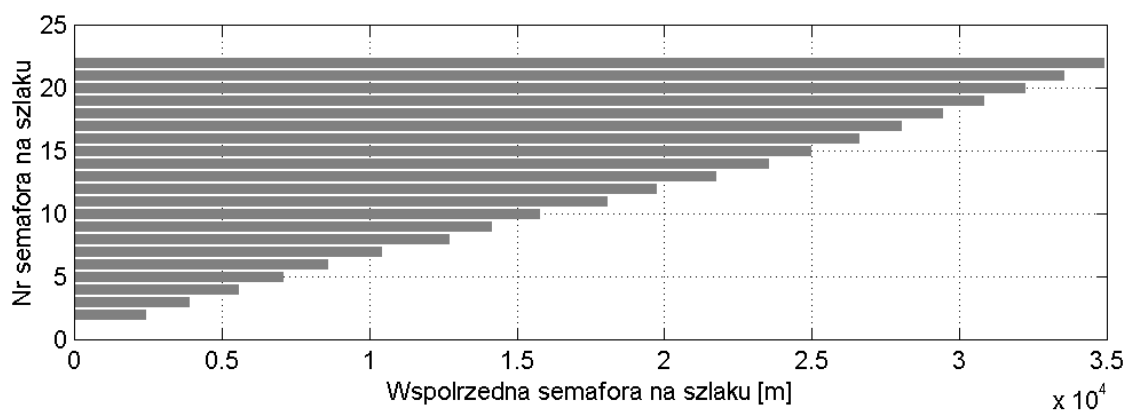
Rysunek 5-2. Indywidualne długości pociągów znajdujących się na szlaku [źródło: opracowanie własne]

- V. Podczas symulacji są uwzględniane współrzędne początku (czoła) i końca każdego z pociągów jadących po szlaku (Rysunek 5-3).



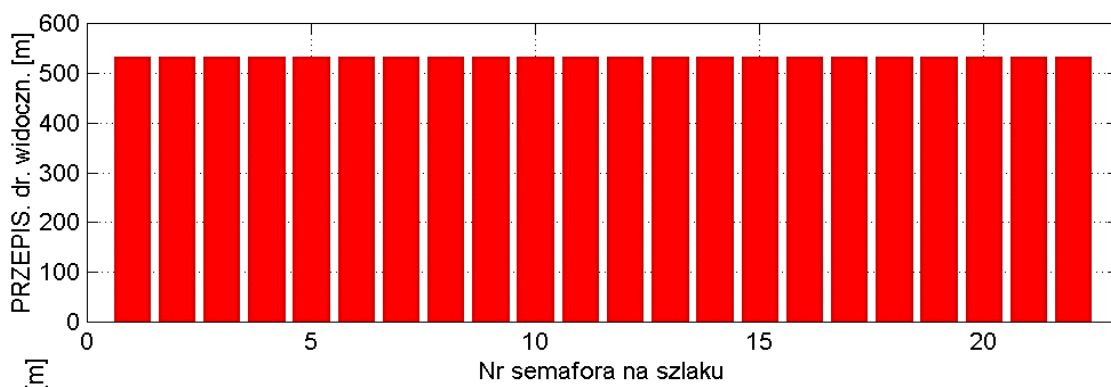
Rysunek 5-3. Przykład uwzględniania w programie symulacyjnym współrzędnych początku i końca pociągu na szlaku – linia zielona oznacza czoło pociągu, a linia niebieska oznacza koniec pociągu. Przypadek, gdyby pociąg mógł przemieszczać się z maksymalnymi dopuszczalnymi prędkościami na szlaku (Rysunek 5-1c) – okręgami zaznaczono chwile, w których pociąg musi zmniejszyć prędkość [źródło: opracowanie własne]

- VI. Możliwe jest wprowadzenie indywidualnie dla danego szlaku współrzędnych semaforów odstępowych, rozpoczynających dany odstęp (Rysunek 5-4).



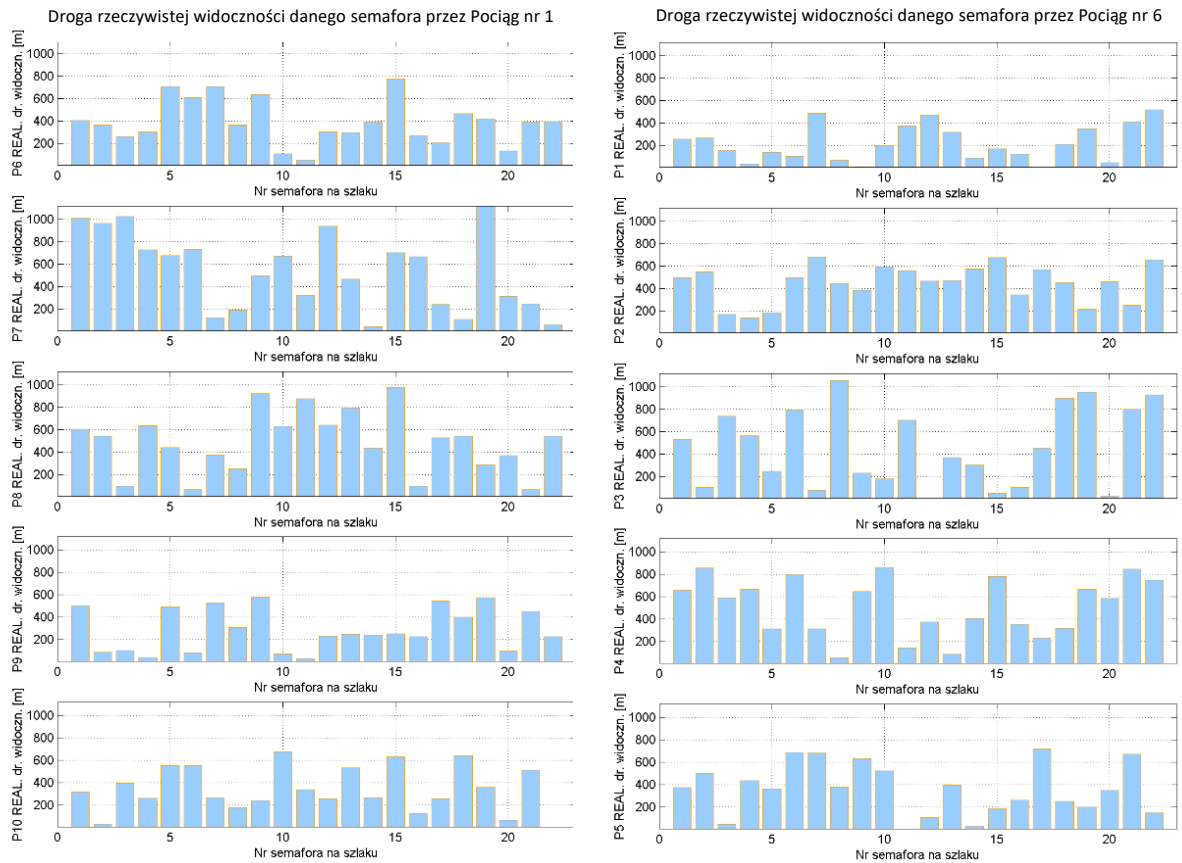
Rysunek 5-4. Indywidualne dla danego szlaku współrzędne semaforów rozpoczynających dany odstęp [źródło: opracowanie własne]

VII. Możliwe jest wprowadzenie indywidualnie dla wszystkich semaforów przepisowych dróg widoczności jako odległości od odpowiednich semaforów (Rysunek 5-5). Droga widoczności jest zależna od maksymalnej prędkości na szlaku i typu semafora, i przykładowo dla prędkości max. 160 [km/h] wynosi 533 [m] dla semaforów wjazdowych oraz 400 [m] dla semaforów odstępowych.

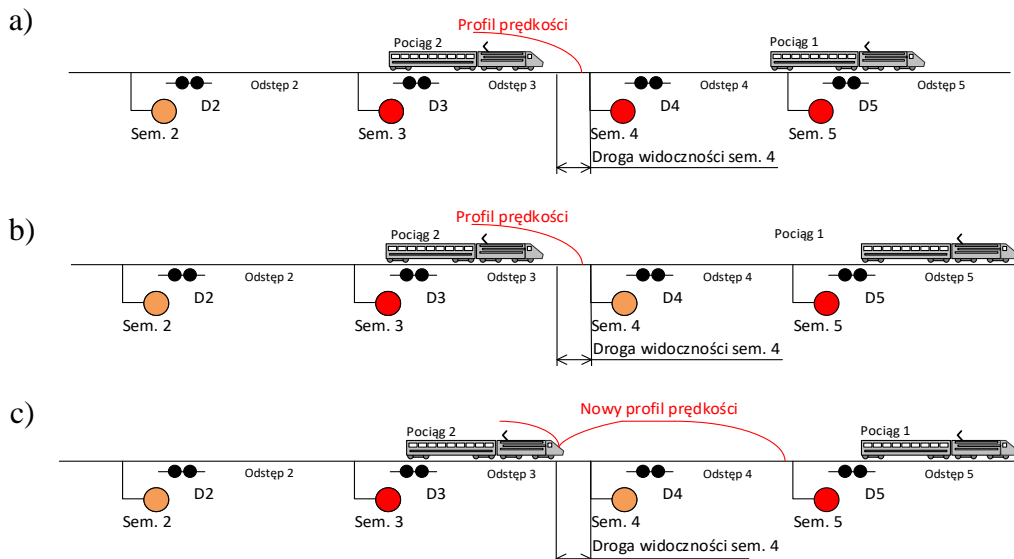


Rysunek 5-5. Indywidualne dla wszystkich semaforów drogi widoczności jako odległości od odpowiednich semaforów [źródło: opracowanie własne]

VIII. Możliwe jest wprowadzenie indywidualnie dla danego semafora i pociągu rzeczywistych dróg widoczności jako odległości od odpowiednich semaforów (Rysunek 5-6). Lokalizacja czoła pociągu w rzeczywistej drodze widoczności semafora pozwala na uwzględnienie w symulacji reakcji maszynisty na zmianę sygnału wyświetlanego na danym semaforze w wyniku zwolnienia kolejnego odstępu przez poprzedzający pociąg (Rysunek 5-7). Rzeczywiste drogi widoczności semaforów mogą być większe lub mniejsze od przepisowej drogi widoczności. Pozwala to na symulowanie wpływu warunków lokalnych, (np. łuki) i atmosferycznych np. mgły lub intensywnych opadów śniegu, na zdolność przepustową szlaku.

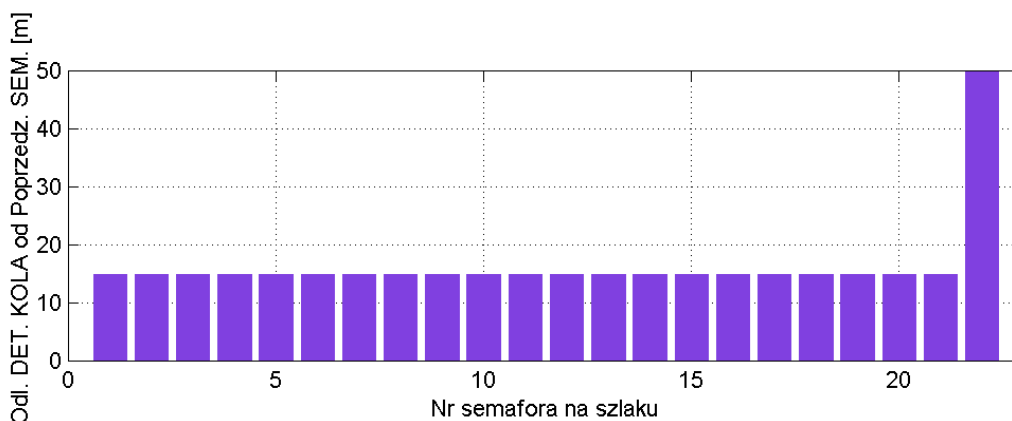


Rysunek 5-6. Przykładowy rozkład rzeczywistej widoczności semaforów dla poszczególnych pociągów [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 5-7. Przykład uwzględniania w programie symulacyjnym rzeczywistej drogi widoczności; a) Pociąg 2 hamuje do sem. 4 wskazującego sygnał „S1 Stój” z powodu zajętości odstepu 4 przez pociąg 1; b) Pociąg 1 zwalnia odstep 4, co powoduje zmianę sygnału na sem. 4 na „S5”. Pociąg 2 nie znajduje się jeszcze w drodze widoczności dla sem. 4, dlatego symulowane jest jego dalsze hamowanie; c) Czoło pociągu 2 znajduje się w drodze widoczności sem. 4. Pociąg 2 rozpoczyna przyspieszanie [źródło: opracowanie własne]

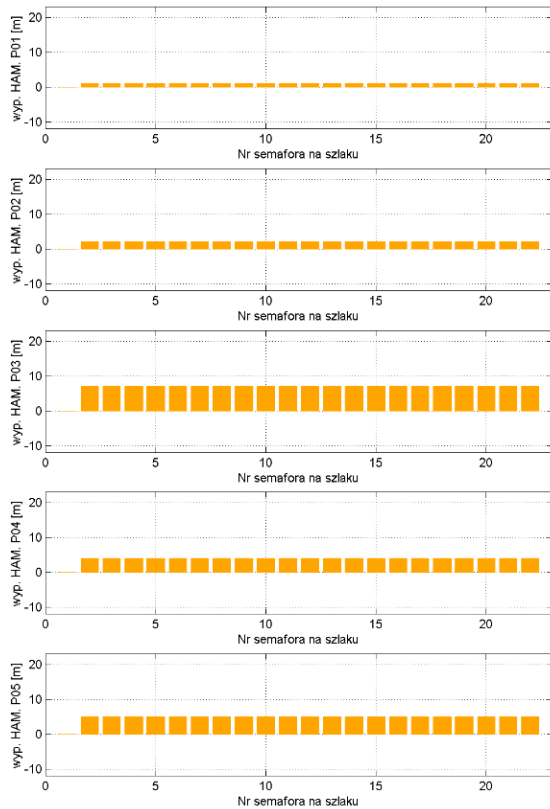
- IX. Możliwe jest wprowadzenie indywidualnie dla wszystkich semaforów współrzędnych detektorów kół (punktów oddziaływania), jako odległości od odpowiednich dla nich semaforów (Rysunek 5-8). Umożliwia to symulowanie zarówno jazdy po szlaku z wieloodstępową blokadą liniową, gdzie ta odległość powinna wynosić 15-30 [m] oraz przejazd przez stację, gdzie ta odległość może być większa (np. 50-100 [m] dla dróg ochronnych za semaforami wyjazdowymi w zależności od przyjętej prędkości maksymalnej jazdy pociągów). W oprogramowaniu symulacyjnym wprowadzony jest również detektor (D23) zlokalizowany 100 [m] za ostatnim semaforem (semaforem wjazdowym na sąsiednią stację), który umożliwia zwolnienie ostatniego odstępów blokowego, np. odległość 100 [m] dla przypadku wjazdu na stację oraz 50-100 [m] dla dróg ochronnych za semaforami wjazdowymi).



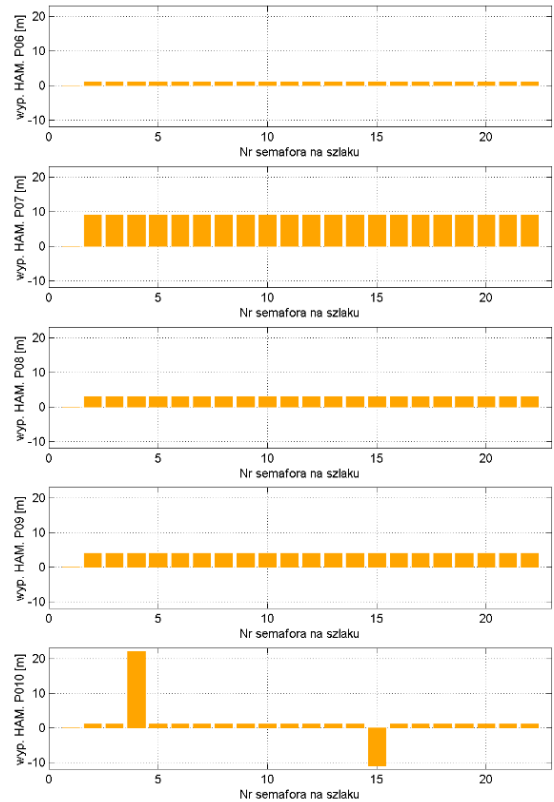
Rysunek 5-8. Indywidualne dla wszystkich semaforów współrzędne detektorów kół jako odległości od odpowiednich dla nich semaforów [źródło: opracowanie własne]

- X. Wprowadzane są indywidualnie dla danego semafora i pociągu drogi wyprzedzenia (lub nawet opóźnienia) rozpoczęcia hamowania [m] względem semafora, na którym jest wyświetlany sygnał „pomarańczowy S5” (Rysunek 5-9). Są one indywidualnie definiowane dla danego pociągu oraz semafora. Pozwala to na oddanie w modelu:
- opóźnienia pomiędzy chwilą zauważenia przez maszynistę semafora a zadziałaniem układu hamulcowego na skutek ewentualnego hamowania – tzw. czas reakcji maszynisty i czas reakcji układu hamulcowego;
 - specyfiki zachowania maszynisty w chwili rozpoczęcia hamowania pociągów o różnej masie i skuteczności hamowania, a przez to różnej drodze hamowania oraz bezwładności układu hamowania danego pociągu;
 - specyfiki rozpoczęcia hamowania przed danym semaforem w zależności od jego widoczności;
 - specyfiki zachowania maszynisty w zależności od profilu podłużnego danego odcinka szlaku (np. opóźnienie hamowania względem semafora wskazującego sygnał „S5” przy jeździe na wzniesieniu lub przyspieszenie rozpoczęcia hamowania, gdy dojazd do następnego semafora wskazującego sygnał „S1 Stój” jest zlokalizowany na zjeździe ze wzniesienia).

Wyprzedzenie hamowania: POCIAGU NR 1 względem sygnalizatora z sygnałem S5 (POMARANCZOWY)



Wyprzedzenie hamowania: POCIAGU NR 6 względem sygnalizatora z sygnałem S5 (POMARANCZOWY)



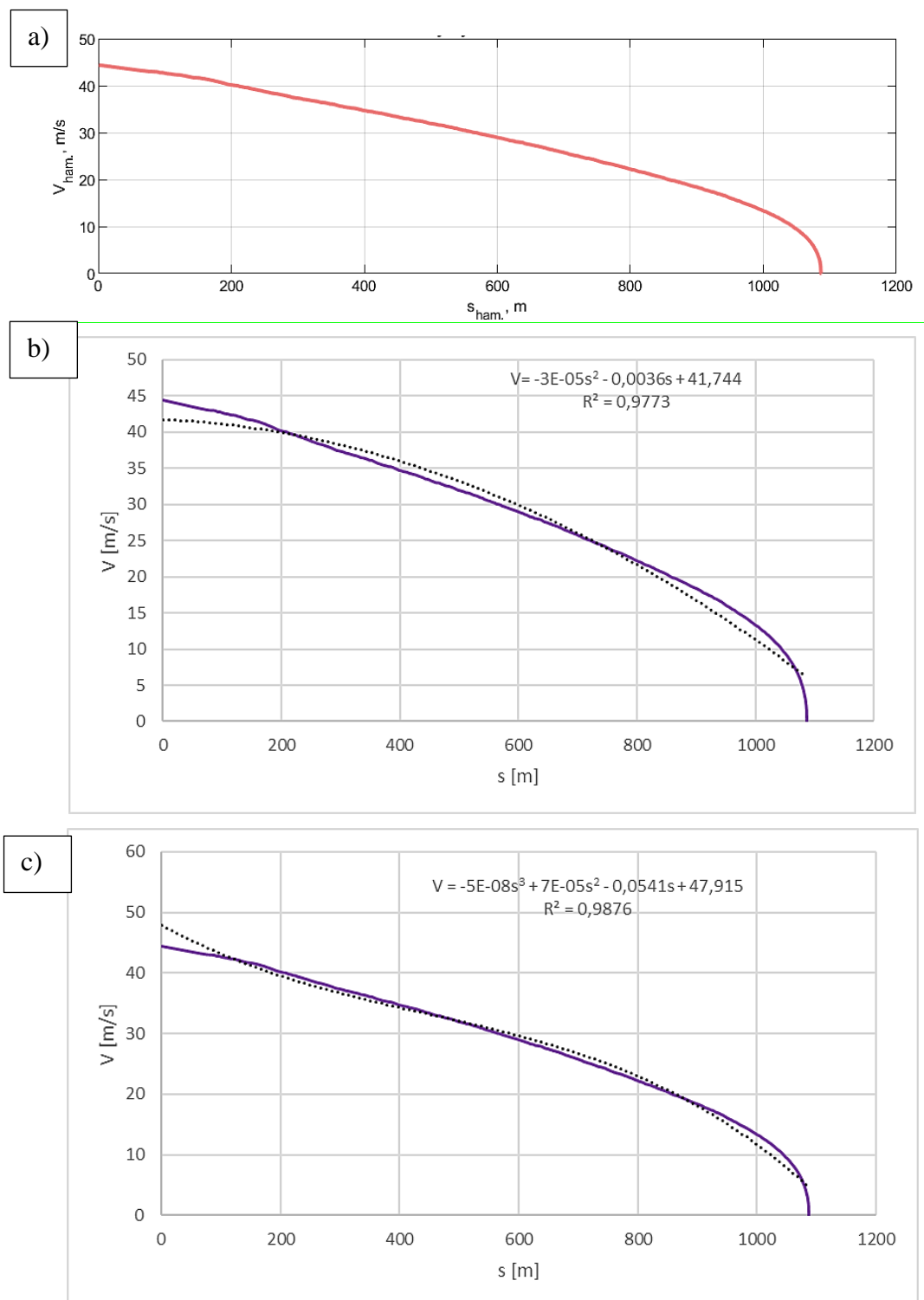
Rysunek 5-9. Indywidualne dla danego semafora i pociągu drogi wyprzedzenia (lub nawet opóźnienia) rozpoczęcia hamowania [m] względem semafora, na którym jest wyświetlany sygnał „S5” [źródło: opracowanie własne]

- XI. Hamowanie odbywa się, gdy czoło pociągu osiągnie współrzędną indywidualną dla danego semafora i pociągu drogi wyprzedzenia (lub nawet opóźnienia) rozpoczęcia hamowania [m] względem semafora, na którym jest wyświetlany sygnał „pomarańczowy S5”. Program symulacyjny umożliwia określenie indywidualnie dla danego semafora i pociągu rzeczywistych dróg widoczności oraz możliwe jest przyjęcie, podczas symulacji, że opcjonalnie droga wyprzedzenia rozpoczęcia hamowania będzie równa drodze widoczności dla jednego lub wszystkich pociągów.
- XII. Hamowanie odbywa się według co najmniej jednej charakterystyki hamowania pociągu ($v=f(s_{ham})$) (Rysunek 5-10). Charakterystykę tę zarejestrowano podczas badań prowadzonych dla lokomotywy towarowej jadącej luzem, hamującej od prędkości 160 [km/h] (44,(4) [m/s]) hamowaniem służbowym w normalnych warunkach atmosferycznych (brak opadów atmosferycznych, temp. 5 st. C).

Rysunek 5-10b pokazuje, że aproksymacja uzyskanych wyników pomiaru funkcją wielomianową 2 stopnia, pomimo uzyskania stosunkowo wysokiej wartości kwadratu współczynnika korelacji na podstawie przedstawionego (Rysunek 5-10b) równania, nie umożliwia uzyskania poprawnych wartości prędkości pociągu dla drogi odpowiadającej w wynikach pomiarów zerowej prędkości. Także dla drogi początku hamowania nie można, na podstawie przedstawionego równania, uzyskać poprawnej wartości prędkości rozpoczęcia hamowania wynoszącej 44,(4) [m/s]. Podobne wyniki uzyskanow przypadku aproksymacji funkcją 3 stopnia (Rysunek 5-10c). W związku

z czym, funkcję tę, wprowadzono w modelu, w postaci macierzy wyników uzyskanych z pomiarów, a nie w formie równania.

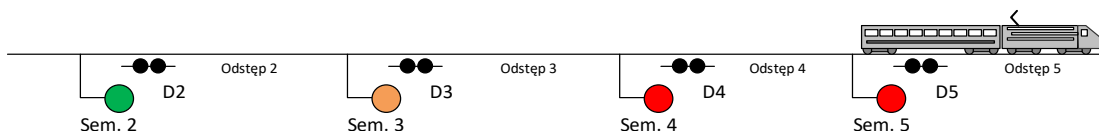
Wykonany model umożliwia również wprowadzenie innych charakterystyk hamowania dla danego pojazdu trakcyjnego lub składu pociągu. Rodzaj użytej charakterystyki hamowania będzie podany przy opisie symulacji lub pakietu symulacji.



Rysunek 5-10. Przykładowa charakterystyka hamowania pociągu ($v=f(s)$) (a), aproksymacja charakterystyki hamowania funkcją wielomianową 2 stopnia (b), aproksymacja charakterystyki hamowania funkcją wielomianową 3 stopnia (c) [źródło: opracowanie własne]

XIII. Jeżeli pociąg jadący na szlaku jako pierwszy znajduje się na odśpię 5 i jego koniec jeszcze nie przejechał przez detektor kół D5 znajdujący się za semaforem Sem. 5 (Rysunek 5-11), to:

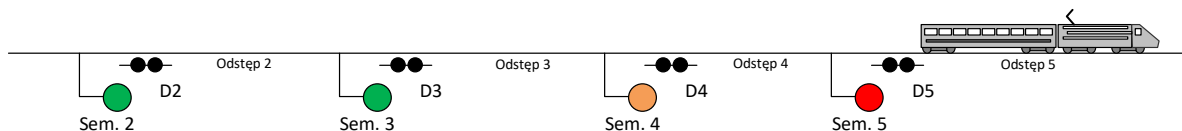
- A. na semaforze poprzedzającym odśpię 5 wyświetlany jest sygnał „S1 Stój” obowiązujący dla kolejnego pociągu i na semaforze poprzedzającym odśpię nr 4 jest wyświetlany również sygnał „S1 Stój”. Uwzględniana jest zarówno długość pociągu, jak i odległość detektora kół (w tym przypadku D5) od poprzedzającego go semafora (w tym przypadku Sem. 5). Sygnał „S1 Stój” (stój) oznacza, że należy zatrzymać pociąg przed danym semaforem;
- B. na semaforze poprzedzającym odśpię 3 wyświetlany jest sygnał „pomarańczowy S5” obowiązujący dla kolejnego pociągu. Sygnał „pomarańczowy S5” ostrzega o konieczności zatrzymania pociągu przed następnym semaforem, na którym jest już wyświetlany sygnał „S1 Stój”;
- C. na semaforze poprzedzającym odśpię 2 wyświetlany jest sygnał „zielony S2” obowiązujący dla kolejnego pociągu. Oznacza on możliwość kontynuowania jazdy z maksymalną dozwoloną prędkością, ponieważ dwa następne odśpię są niezajęte.



Rysunek 5-11. Uwzględniony w modelu przykład zachowania się semaforów (następstwo wskazań), gdy koniec pociągu pierwszego nie przejechał jeszcze obok detektora kół D5 znajdującego się za semaforem Sem. 5 [źródło: opracowanie własne]

XIV. Jeżeli pociąg jadący jako pierwszy na szlaku znajduje się na odśpię 5 i już jego koniec przejechał przez detektor kół D5 znajdujący się za semaforem Sem. 5 (Rysunek 5-12), to:

- A. na semaforze poprzedzającym odśpię 5 wyświetlany jest sygnał „S1 Stój” obowiązujący dla kolejnego pociągu”. Uwzględniana jest zarówno długość pociągu jak i odległość detektora kół (w tym przypadku D5) od poprzedzającego go semafora (w tym przypadku Sem. 5). Sygnał „S1 Stój” (stój) oznacza, że należy zatrzymać pociąg przed semaforem, bo za nim jest zajętość odcinka;
- B. na semaforze poprzedzającym odśpię 4 wyświetlany jest sygnał „pomarańczowy S5” obowiązujący dla kolejnego pociągu. Sygnał „pomarańczowy S5” ostrzega o konieczności zatrzymania pociągu przed następnym semaforem, na którym jest wyświetlany sygnał „S1 Stój” (stój);
- C. na semaforach poprzedzających odśpię 2 i 3 wyświetlany jest sygnał „S2” obowiązujący dla kolejnego pociągu. Oznacza on możliwość kontynuowania jazdy z maksymalną dozwoloną prędkością, ponieważ dwa następne odśpię są niezajęte.



Rysunek 5-12. Uwzględniony w modelu przykład zachowania się semaforów, gdy koniec pociągu pierwszego przejechał właśnie za detektor kół D5 znajdujący się za semaforem Sem. 5 [źródło: opracowanie własne]

- XV. Hamowanie nie rozpocznie się, jeżeli czoło pociągu już minęło semafor w chwili wyświetlenia na nim sygnału „S5”. Natomiast jeżeli sygnał „S5” został wyświetlony na semaforze w chwili, gdy czoło pociągu jeszcze nie minęło danego semafora, to hamowanie może się rozpocząć za tym semaforem z uwzględnieniem zagadnień opisanych m.in. w punkcie X i XI niniejszych założeń.
- XVI. Detektory kół są w stanie, w modelu symulacyjnym, rozróżnić numer kolejnego pociągu jadącego na szlaku i przyjmują przedstawiony poniżej stan dla danego pociągu:
- gdy czoło pociągu nie dojechało do współrzędnej danego detektora, to w modelu symulacyjnym detektor ten generuje on sygnał „-1”;
 - gdy czoło pociągu przejechało już współrzędną danego detektora, a koniec nie przejechał jeszcze współrzędnej tego detektora, to w modelu symulacyjnym, podobnie jak w rzeczywistości, detektor ten generuje sygnał „0”. Odpowiada to w rzeczywistości rozpoczęciu zliczania osi pociągu przez licznik osi;
 - gdy zarówno czoło pociągu, jak i jego koniec przejechały już współrzędną danego tego detektora, to w modelu symulacyjnym detektor ten generuje sygnał „1”. Odpowiada to w rzeczywistości zakończeniu zliczania osi pociągu, co oznacza, że cały skład pociągu przejechał dany detektor.

Przedstawione rozwiązanie pozwala na prowadzenie weryfikacji uzyskiwanych wyników symulacji np. poprzez wygenerowanie raportów dla wszystkich detektorów i przeanalizowanie, czy czoło i koniec danego pociągu miały dany detektor kół, i w jakiej chwili czasowej. Można to również zestawzić z:

- raportem stanu sygnałów wyświetlanych na różnych semaforach dla danego pociągu w różnych chwilach czasowych,
- chwilami początków ewentualnego hamowania wynikającego z wyświetlanych sygnałów, uwzględniając również opisane w punkcie X i XI indywidualnie dla danego semafora i pociągu drogi wyprzedzenia.

- XVII. Na każdym semaforze może być wyświetlany sygnał: „S1 Stój” lub „S5” lub „S2”. Tabela 5-1 przedstawia przykładowo wpływ rodzaju sygnałów generowanych przez detektory D3-D5 na sygnał wyświetlany na semaforze nr 3. Pozostałe semafony blokadowe oraz semafor wyjazdowy działają w sposób analogiczny, oprócz semaforów przedostatniego (ostatniego semafora blokadowego) i ostatniego (semafora wyjazdowego na sąsiedni posterunek).

Tabela 5-1 Wpływ sygnałów generowanych przez detektory D3-D5 na sygnał wyświetlany na semaforze nr 3

Sygnał z detektorów:			Sygnał sterujący w modelu semaforem „Sem. 3”: D3+D4+D5	Sygnał wyświetlany na semaforze Sem. 3
D3	D4	D5		
-1	-1	-1	$(-1)+(-1)+(-1) = -3$	Jeżeli: $D3+D4+D5=-3$ to sygnał zielony „S2”
0	-1	-1	$0+(-1)+(-1) = -2$	Jeżeli: $-3 < D3+D4+D5 \leq 0$ to sygnał „S1 Stój”
1	-1	-1	$1+(-1)+(-1) = -1$	Jeżeli: $-3 < D3+D4+D5 \leq 0$ to sygnał „S1 Stój”
1	0	-1	$1+0+(-1) = 0$	Jeżeli: $-3 < D3+D4+D5 \leq 0$ to sygnał „S1 Stój”
1	1	-1	$1+1+(-1) = 1$	Jeżeli: $0 < D3+D4+D5 \leq 2$ to sygnał pomarańczowy „S5”
1	1	0	$1+1+0 = 2$	Jeżeli: $0 < D3+D4+D5 \leq 2$ to sygnał pomarańczowy „S5”
1	1	1	$1+1+0 = 3$	Jeżeli: $D3+D4+D5 \geq 3$ to sygnał zielony „S2”

Źródło: opracowanie własne

XVIII. Wpływ rodzaju sygnałów generowanych przez detektory D21-D22 na sygnał wyświetlany na semaforze przedostatnim (ostatnim semaforze blokadowym) przykładowo nr 21, przedstawia Tabela 5-2.

Detektory D21 i D22 zlokalizowane są tuż za odpowiadającymi im semaforami Sem. 21, Sem. 22 i odpowiadają za zasymulowanie osłonięcia sygnałem „S1 Stój” odstępu, na który wjechał pociąg, analogicznie do pkt. XVIII. Detektor D23, zlokalizowany 100 [m] za ostatnim semaforem Sem. 23 (który pełni rolę semafora wjazdowego na stację) odpowiedzialny za możliwość zwolnienia ostatniego odstępu między semaforami Sem. 21 - Sem. 22 ma wpływ na sygnał wyświetlany na przedostatnim semaforze (ostatnim semaforze blokowym) Sem. 21 z sygnału „S1 Stój” na sygnał „S5”. Z przyjętej logiki działania wynika, że gdy oba detektory 21 i 22 przyjmują wartość 1, to na tym semaforze sygnał jest zależny od stanu semafora ostatniego (semafora wjazdowego na sąsiedni posterunek). W praktyce semafor ostatni (wjazdowy na sąsiedni posterunek) jest semaforem obsługiwanym przez dyżurnego ruchu („Dyż. 1” Tabela 5-3).

W modelu przyjęto, że w przypadku, gdy dyżurny nastawi przebieg wjazdowy dla kolejnego pociągu od semafora 22, to wartość parametru „Dyż. 1” od przedostatniego semafora i ostatniego (Tabela 5-3) zmieni wartość z „-1” na „1”. Spowoduje to w przypadku obu semaforów wyświetlenie sygnału „S2” (ostatni wiersz Tabela 5-2 i Tabela 5-3). Przyjęto w modelu, że dyżurny podejmuje decyzję o zmianie sygnału „Dyż. 1” z wartości „-1” na „1”, gdy współrzędna końca pociągu, który zakończył jazdę po analizowanym szlaku, znajdzie się 1000 [m] za ostatnim semaforem, w tym przypadku Sem. 22. Pozwala to na zasymulowanie zatrzymania pociągu na stacji na torze stacyjnym i nastawienie przebiegu wjazdowego dla kolejnego pociągu na inny tor stacyjny. W modelu pominięto wpływ ograniczenia prędkości przy jazdach po zwrotnicach w kierunkach zwrotnych wewnątrz stacji.

Tabela 5-2 Wpływ rodzaju sygnałów generowanych przez detektory D21-D22 na sygnał wyświetlany na semaforze nr 21 – ostatni semafor blokadowy na szlaku

Sygnał z detektorów:				Sygnał sterujący w modelu semaforem „Sem. 21”: D21+D22+D23+Dyż. 1	Sygnał wyświetlany na semaforze Sem. 21
D21	D22	D23	Dyż.1		
-1	-1	-1	-1	$(-1)+(-1)+(-1)+(-1) = -4$	Jeżeli: $D21+D22+D23+Dyż. 1=-4$ to sygnał zielony „S2”
0	-1	-1	-1	$0+(-1)+(-1)+(-1) = -3$	Jeżeli: $-3 \leq D21+D22+ D23+Dyż. \leq 1$ to sygnał „S1 Stój”
1	-1	-1	-1	$1+(-1)+(-1)+(-1) = -2$	Jeżeli: $-3 \leq D21+D22+ D23+Dyż. \leq 1$ to sygnał „S1 Stój”
1	0	-1	-1	$1+0+(-1)+(-1) = -1$	Jeżeli: $-3 \leq D21+D22+ D23+Dyż. \leq 1$ to sygnał „S1 Stój”
1	1	-1	-1	$1+1+(-1)+(-1) = 0$	Jeżeli: $-3 \leq D21+D22+ D23+Dyż. \leq 1$ to sygnał „S1 Stój”
1	1	0	-1	$1+1+(-1)+0 = 1$	Jeżeli: $-3 \leq D21+D22+ D23+Dyż. \leq 1$ to sygnał „S1 Stój”
1	1	1	-1	$1+1+(-1)+1 = 2$	Jeżeli: $D21+D22+ D23+Dyż.=2$ to sygnał pomarańczowy „S5”
1	1	1	1	$1+1+1+1 = 4$	Jeżeli: $D21+D22+ D23+Dyż. 1=4$ to sygnał zielony „S2”

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5-3 Wpływ rodzaju sygnałów generowanych przez detektory D21-D22 na sygnał wyświetlany na semaforze nr 22 – semafor wjazdowy na sąsiedni posterunek

Sygnał z detektorów:			Sygnał sterujący w modelu semaforem „Sem. 22”: D22+D23+Dyż. 1	Sygnał wyświetlany na semaforze Sem. 22
D22	D23	Dyż.1		
-1	-1	-1	$(-1)+(-1)+(-1) = -3$	Jeżeli: $D21+D23+Dyż. 1=-3$ to sygnał zielony „S2”
0	-1	-1	$0+(-1)+(-1) = -2$	Jeżeli: $-2 \leq D22+D23+Dyż. 1 \leq 1$ to sygnał „S1 Stój”
1	-1	-1	$1+(-1)+(-1) = -1$	Jeżeli: $-2 \leq D22+D23+Dyż. 1 \leq 1$ to sygnał „S1 Stój”
1	0	-1	$1+(-1)+0 = 0$	Jeżeli: $-2 \leq D22+D23+Dyż. 1 \leq 1$ to sygnał „S1 Stój”
1	1	-1	$1+1+(-1) = 1$	Jeżeli: $-2 \leq D22+D23+Dyż. 1 \leq 1$ to sygnał „S1 Stój”
1	1	1	$1+1+1 = 3$	Jeżeli: $D22+D23+Dyż. 1=3$ to sygnał zielony „S2”

Źródło: opracowanie własne

XVII. Dla każdego z semaforów dla danego pociągu wyznaczono w modelu 4 zakresy wpływu sygnału wyświetlanego przez semafor na zachowanie maszynisty (pociągu) (Rysunek 5-13).

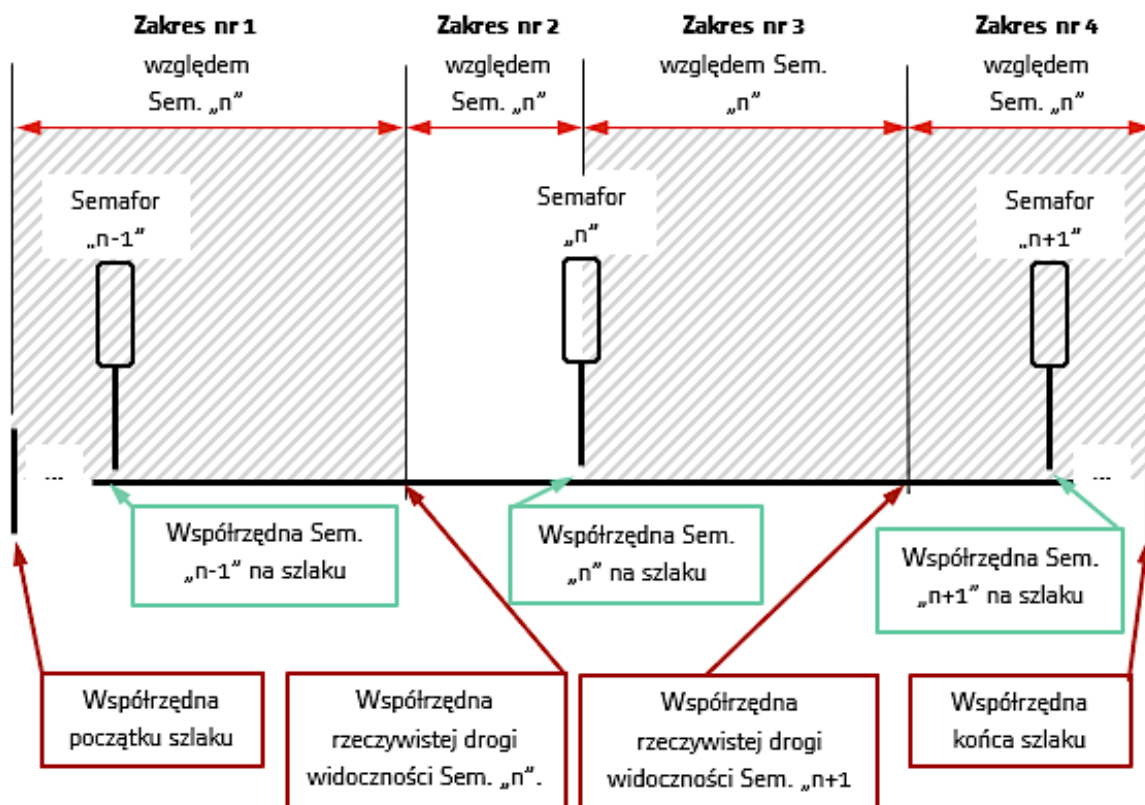
A. Zakresy nr 1 i 4: przyjęto w modelu, że gdy czoło pociągu znajduje się w tych zakresach, to zmiana sygnału wyświetlanego przez semafor „n” nie wpływa na zachowanie maszynisty (pociągu). Zakres nr 1 dla semafora „n” pokrywa się m.in. częściowo z zakresami nr 2 i 3 semafora „n-1”, a zakres nr 4 dla semafora „n” pokrywa się m.in. częściowo z zakresami nr 2 i 3 semafora „n+1”, w których to zakresach maszynista podejmuje decyzje na podstawie sygnałów pochodzących odpowiednio z semaforów „n-1” i „n+1”.

- Zakres nr 1 rozpoczyna się od współrzędnej początku szlaku, a kończy tuż przed współrzędną rzeczywistej drogi widoczności semafora „n” (przedział otwarty). Pojęcie współrzędnej rzeczywistej drogi widoczności semafora „n” przedstawiono w punkcie VIII niniejszych założeń i przyjmuje ona wartości indywidualne dla danego semafora i pociągu, gdyż widoczność nawet tego samego semafora może się zmienić wraz z upływem czasu, po którym przez ten sam punkt szlaku będzie przejeżdżał kolejny pociąg.
- Zakres nr 4 rozpoczyna się od współrzędnej rzeczywistej drogi widoczności semafora „n+1”, a kończy na końcu szlaku.

B. Zakres nr 2 (lub nazwany jako zakres: „RE”) rozpoczyna się od współrzędnej rzeczywistej drogi widoczności semafora „n”, a kończy tuż przed współrzędną semafora „n” (przedział otwarty). Gdy czoło pociągu znajduje się w tym zakresie, to maszynista widzi wyświetlany na semaforze sygnał i może np. rozpocząć hamowanie lub, po wyświetleniu sygnału „S2” albo „S5”, zmienić decyzję i zaniechać hamowania. Może on również rozpocząć przyspieszanie, jeśli wcześniej mijał semafor „n-1” wyświetlający sygnał „S5”, a widzi, że obecnie semafor „n” wyświetla sygnał „S5” lub „S2”. To, kiedy maszynista rozpocznie hamowanie, zależy w modelu od indywidualnej dla danego pociągu i semafora drogi wyprzedzenia (lub nawet opóźnienia) rozpoczęcia hamowania [m] względem semafora „n” przedstawionej w punkcie X niniejszych założeń.

C. Zakres nr 3 (lub nazwany jako zakres: „BRE”) rozpoczyna się od współrzędnej semafora „n”, a kończy tuż przed współrzędną rzeczywistej drogi widoczności semafora „n+1” (przedział otwarty). Gdy czoło pociągu znajduje się w zakresie nr 3, to maszynista w odróżnieniu od zakresu nr 2 nie widzi wyświetlanego na

semaforze sygnału, jeżeli sygnał wyświetlany na semaforze „n” zobowiązywał go do zatrzymania pociągu przed semaforem „n+1”, to nawet wtedy, gdy sygnał na semaforze „n” zmienił się na sygnał zielony „S2”, w krótkiej chwili po wjechaniu czoła pociągu na zakres nr 3, maszynista już nie zareaguje na tę zmianę. To, czy maszynista rozpoczął już hamowanie, czy też dopiero je rozpocznie na podstawie zapamiętanego sygnału wyświetlanego na semaforze „n”, zależy w modelu od indywidualnej dla danego pociągu i semafora drogi wyprzedzenia, a właściwie to w zakresie nr 3 już opóźnienia rozpoczęcia hamowania [m] względem semafora „n”. Pojęcie tej drogi przedstawiono w punkcie X i XI niniejszych założeń.

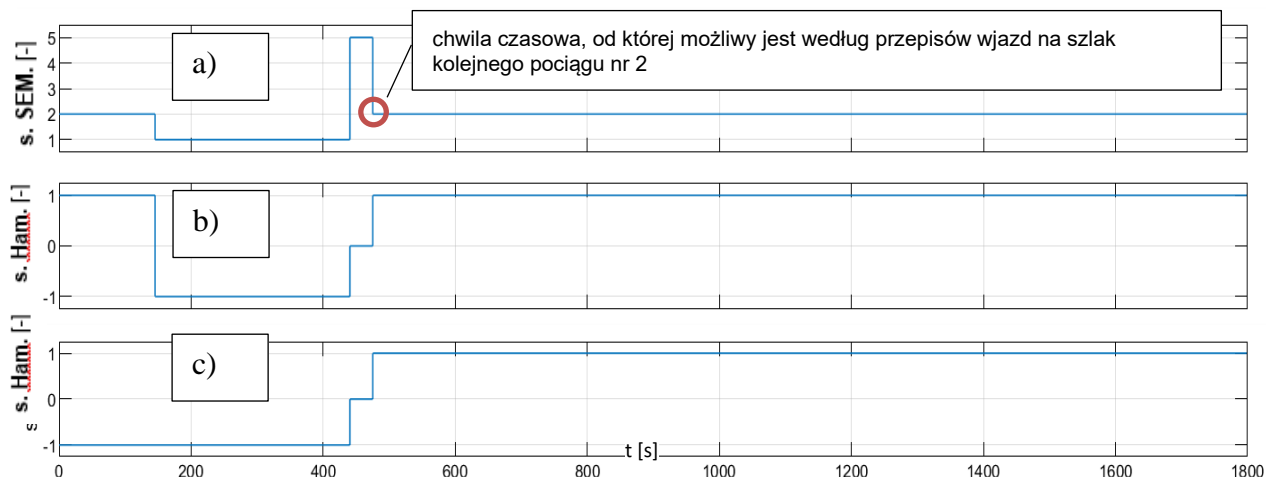


Rysunek 5-13. Zakresy wpływu lub braku wpływu sygnału wyświetlanego przez semafor na zachowanie maszynisty (pociągu) [źródło: opracowanie własne]

XVIII. Kolejny pociąg nie rozpocznie jazdy spod semafora wyjazdowego nr 1 (Sem. 1), czyli nie zostanie wyprawiony na szlak, dopóki na tym semaforze nie zostanie wyświetlony sygnał zielony „S2”. Jednakże kolejny pociąg w modelu nie rozpocznie jazdy spod semafora nr 1 (Sem. 1), dopóki na semaforze tym nie nastąpi (w wyniku przejazdu pociągu poprzedzającego) zmiana sygnału z pomarańczowego „S5” na zielony „S2”, co pozwala na zapewnienie dwóch wolnych odstępów między pociągami.

Drugi z przywołanych powyżej warunków wynika z możliwości lokalizacji pierwszego detektora Det. 1 w odległości od semafora wyjazdowego Sem. 1, odpowiadającej przyjętej drodze ochronnej. Należy zauważyć, iż do chwili odpowiadającej osiągnięciu przez czoło pociągu współrzędnej detektora nr 1 (tj. np. 100 [m] za semaforem nr 1) na semaforze nr 1 wyświetlany jest w dalszym ciągu sygnał zielony „S2”, który pozwolił temu pociągowi na rozpoczęcie jazdy w kierunku szlaku i przejazd za Sem. 1 na odstęp nr 1 (Rysunek 5-14a). Warunek ten pozwala uniknąć sytuacji, że kolejny pociąg mógłby zostać wyprawiony na szlak w momencie, gdy poprzedzający pociąg, o długości mniejszej niż przyjęta droga ochronna (np. krótszy niż 100 [m]), znajdowałby się na

odcinku pomiędzy semaforem wyjazdowym Sem. 1 a detektorem Det. 1. W praktyce ze względu na możliwość obserwacji przez maszynistę zachodzących procesów oraz znajomości przepisów zaistnienie takiej sytuacji nie jest możliwe w normalnym ruchu. Natomiast w modelu brak wprowadzenia przedstawionego powyżej warunku powodowałoby, że kolejny pociąg mógłby zostać błędnie wyprawiony za poprzedzającym pociągiem na ten sam odstęp nr 1.



Rysunek 5-14. Sygnały: a) wyświetlany na semaforze nr 1 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (s. SEM.), b) sygnał „hamuj” (s. HAM.), pozwalający na wjazd na szlak przez pociąg nr 2 bezpośrednio za pociągiem nr 1, c) sygnał „hamuj” (s. HAM.) niepozwalający na wjazd na szlak przez pociąg nr 2 bezpośrednio za pociągiem nr 1 [źródło: opracowanie własne].

XIX. W modelu wprowadzono sygnał, nazwany jako „hamuj”, indywidualny dla danego pociągu, który oznacza rozpoczęcie hamowania przez pociąg lub nierozpoczęcie jazdy. Wartość sygnału „hamuj” równa „1” oznacza brak hamowania i jazdę pociągu, natomiast wartość sygnału „hamuj” równa „0” lub „-1” oznacza hamowanie pociągu lub nierozpoczęcie jazdy (dalsze zatrzymanie). Wartość sygnału „hamuj” może przyjmować następujące wartości w zależności od sytuacji ruchowej:

- A. „1” – gdy czoło danego pociągu znajduje się w zakresach nr 1 lub 4 względem danego semafora i to niezależnie od wyświetlanego na tym semaforze sygnału, gdyż wtedy czoło danego pociągu znajduje się w zakresach nr 2 lub 3 innego semafora;
- B. „1” – gdy w trakcie znajdowania się czoła danego pociągu w zakresie 2 względem danego semafora wyświetlony jest na tym semaforze sygnał zielony „S2”;
- C. „1” – gdy w chwili znajdowania się czoła danego pociągu na końcu zakresu nr 2, względem danego semafora, na semaforze tym wyświetlany był sygnał zielony S2, a obecnie czoło analizowanego pociągu znajduje się w zakresie nr 3 względem danego semafora. Wartość sygnału „hamuj” będzie w tym przypadku taka, jaką podano („1”) i to niezależnie od tego jaki sygnał będzie wyświetlany na tym semaforze, gdyż maszynista nie jest w stanie już zauważyć zmiany sygnału na semaforze, który minął;
- D. „1” – gdy w trakcie znajdowania się czoła danego pociągu w zakresie 2 względem danego semafora na tym semaforze będzie wyświetlany sygnał „S5” oraz wartość współrzędnej czoła pociągu w danej chwili czasowej będzie mniejsza od współrzędnej drogi wyprzedzenia/opóźnienia rozpoczęcia hamowania [m]

przypisanej dla tego semafora i pociągu (punkt X i XI niniejszych założeń do modelu);

- E. „0” – gdy w trakcie znajdowania się czoła danego pociągu w zakresie 2 względem danego semafora na tym semaforze będzie wyświetlany sygnał „S5” oraz wartość współrzędnej czoła pociągu w danej chwili czasowej będzie większa lub równa współrzędnej drogi wyprzedzenia/opóźnienia rozpoczęcia hamowania [m] przypisanej dla tego semafora i pociągu;
- F. „0” – gdy w chwili znajdowania się czoła danego pociągu na końcu zakresu nr 2 względem danego semafora na semaforze tym wyświetlany był sygnał pomarańczowy S5, a obecnie czoło analizowanego pociągu znajduje się w zakresie nr 3 względem danego semafora. Wartość sygnału „hamuj” będzie w tym przypadku taka, jaką podano („0”) i to niezależnie od tego, jaki sygnał będzie wyświetlany na tym semaforze, gdyż maszynista nie jest w stanie już zauważyć zmiany sygnału na semaforze, który minął;
- G. „-1” – gdy czoło danego pociągu znajduje się w zakresie nr 2 względem tego semafora i gdy wyświetlany sygnał „S1 Stój” na danym semaforze – sytuacja awaryjna. W tym przypadku wartość sygnału „hamuj” będzie natychmiast taka, jaką podano („-1”), i to niezależnie od wartości współrzędnej czoła pociągu względem współrzędnej drogi wyprzedzenia/opóźnienia rozpoczęcia hamowania [m] przypisanej dla tego semafora i pociągu;
- H. „-1” – gdy w chwili znajdowania się czoła danego pociągu na końcu zakresu nr 2 względem danego semafora, na semaforze tym wyświetlany był sygnał S1 Stój, a obecnie czoło analizowanego pociągu znajduje się w zakresie nr 3 względem danego semafora. Wartość sygnału „hamuj” będzie w tym przypadku taka, jaką podano („-1”), i to niezależnie od tego, jaki sygnał będzie wyświetlany na tym semaforze, gdyż maszynista nie jest w stanie już zauważyć zmiany sygnału na semaforze, który minął.

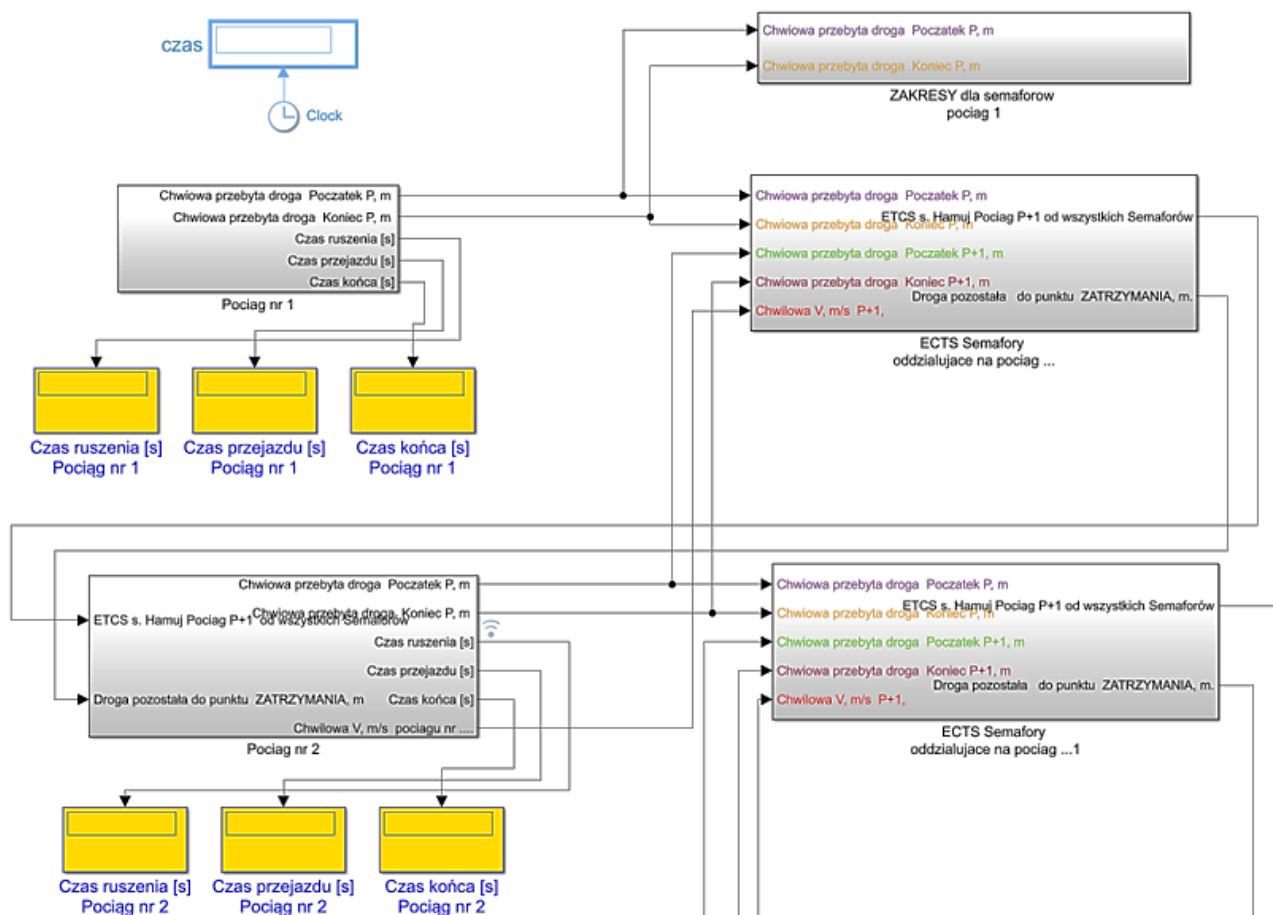
Rysunek 5-14b przedstawia wartości wyżej opisanego sygnału „hamuj”, obowiązującego dla kolejnego jadącego pociągu. W przypadku, gdyby w modelu poprzedzający pociąg miał długość mniejszą od 100 [m] (tak, jak to opisano już wcześniej), to teoretycznie za tym pociągiem mógłby wyjechać kolejny pociąg na szlak podczas wyświetlanego sygnału zielonego „zielony S2” na semaforze wyjazdowym. W celu uniknięcia w modelu takiej nieprawidłowości wprowadzono warunek wjazdu pociągu na szlak, jakim jest zmiana na semaforze nr 1 sygnału z „S5” na „S2”. Zatem podczas rozpoczynania jazdy na danym szlaku przez kolejny pociąg do chwili zaistnienia opisanej zmiany sygnałów generowany jest dla niego sygnał „hamuj”, uniemożliwiający wjazd na szlak kolejnego pociągu bezpośrednio za poprzedzającym pociągiem (Rysunek 5-14c).

- XX. Start kolejnego pociągu może być dodatkowo opóźniony w wyniku działania dyżurnego ruchu. Opcja opóźnienia będzie szczególnie przydatna między innymi w celu uniknięcia niezasadnego przyhamowywania i ponownego przyspieszenia pociągu w wyniku konfliktu ruchowego z poprzedzającym pociągiem (jego „dogonienie”), a tym samym w celu oszczędności czasu traconej na hamowanie i przyspieszanie.
- XXI. Zasadniczo model nie zmienia istniejących zasad związanych z bezpieczeństwem logiki działania urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Jednakże w modelu wprowadzono również zabezpieczenie na wypadek błędnej sytuacji polegającej na najechaniu przez pociąg na tył pociągu poprzedzającego. W takim przypadku jest natychmiast

przerwana symulacja i wyświetlane są odpowiednie komunikaty. Należy wówczas przeprowadzić analizę zorientowaną na wykrycie przyczyny takiego ewentualnego zdarzenia (np. błędnie wprowadzona charakterystyka hamowania pociągu).

- XXII. Rejestracja czasu przejazdu pociągu rozpoczyna się, gdy współrzędna czoła tego pociągu będzie większa od współrzędnej semafora początkowego szlaku, a kończy się, gdy współrzędna końca tego pociągu będzie większa od współrzędnej ostatniego detektora na szlaku. Celowo przyjęto, że detektora, a nie semafora, bo dopiero wtedy, gdy współrzędna końca tego pociągu będzie większa od współrzędnej ostatniego detektora na szlaku, pociąg ten przestaje oddziaływać na detektory związane z semaforami na szlaku, a w szczególności na ostatni i przedostatni semafor.
- XXIII. W modelu pominięto czas działania urządzeń sterowania ruchem kolejowym.
- XXIV. Czoło i koniec pociągu wyznaczają w modelu lokalizację pierwszej i ostatniej osi pociągu. W praktyce rzeczywiste czoło/koniec pociągu względem pierwszej osi jest odsunięte na odległość maksymalną 4,2 [m] (dla pociągów kolei konwencjonalnej) lub 5,0 [m] (dla pociągów kolei szybkiej), co wynika z wymagań interoperacyjności. W przyszłości model może ujmować dodatkowe warunki związane z konfiguracją pociągu, w tym z jego rzeczywistą długością.

Rysunek 5-15 przedstawia fragment jednego z istotnych części modelu opracowanego w środowisku MATLAB&Simulink.



Rysunek 5-15. Poglądowe przedstawienie jednego z istotnych fragmentu realizacji modelu w środowisku MATLAB&Simulink [źródło: opracowanie własne]

5.2. Model jazdy w oparciu o raportowaną pozycję pociągu

Model opisany w rozdziale 5.1 został uzupełniony o następujące założenia, celem uwzględnienia procesu sterowania pociągiem przy wykorzystaniu systemu bezpiecznej kontroli jazdy pociągu typu ERTMS/ETCS poziomu 2 lub 3. W modelu tym wprowadzono nowe obiekty: semafor wirtualny i detektor wirtualny. Uwzględniono możliwość wprowadzenia dodatkowego podziału odstępu dla pociągów raportujących swoją pozycję, poprzez zastosowanie wirtualnych detektorów i wirtualnych semaforów.

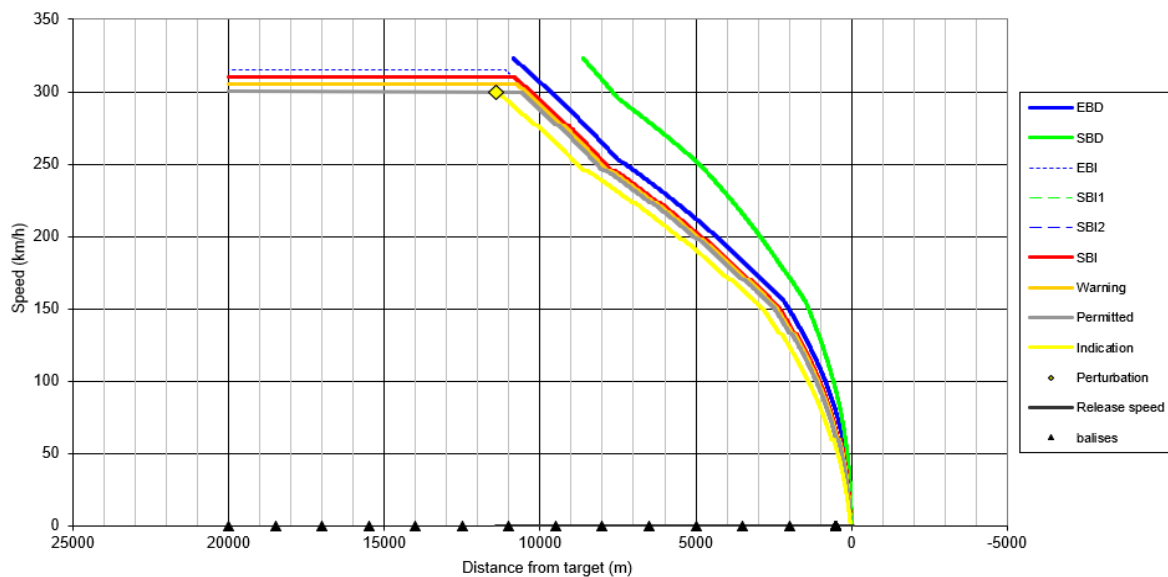
Model został opracowany z uwzględnieniem dodatkowych założeń, względem podanych i opisanych w rozdziale 5.1 i bazuje na trybie jazdy Pełnego Nadzoru systemu, opisanego w standardzie ETCS [95]:

- I. Możliwe jest indywidualnie dla każdego z pociągów określenie czy pociąg jest sterowany przez maszynistę na podstawie wskazań sygnalizacji przytorowej, czy przez system ETCS. Parametr „ETCS” może przyjąć wartość „0”, co oznacza, że pociąg jest sterowany przez maszynistę, lub „1”, co oznacza, że pociąg jest sterowany przez system ETCS i znajduje się w trybie Pełny Nadzór (ang. Full Supervision). Inne tryby, gdzie system nadzoruje ograniczenie prędkości lub jazda odbywa się na odpowiedzialność maszynisty pominięto (przykładowo tryb Na Widoczność z ETCS OS, tryb Odpowiedzialność Personelu SR).
- II. Dla pociągów sterowanych przez maszynistę, proces hamowania odbywa się według założeń XI oraz XII z rozdziału 5.1.
- III. Na pociąg sterowany przez system ETCS („ETCS=1”) nie oddziałują sygnały wyświetlane na semaforach (poza pierwszym, wyjazdowym ze stacji na szlak), tak jak to opisano w założeniu XVII z rozdziału 5.1.
- IV. Dla pociągów sterowanych przez system ETCS hamowanie pociągu odbywa się, od miejsca minięcia przez czoło pociągu osiągnięcia współrzędnej początku charakterystyki hamowania, wyliczanej przez system ETCS, do miejsca zatrzymania lub ograniczenia prędkości. Generowany w takiej sytuacji jest sygnał „hamuj=0”.

W modelu jazdy pociągów w oparciu o sygnalizację przytorową (rozdział 5.1, założenie XIX) sygnał „hamuj” mógł przyjmować wartość: „-1”, co w modelu i wynikach pozwalało wyróżnić pewne sytuacje ruchowe. W modelu jazdy w oparciu o raportowaną pozycję pociągu (tj. według systemu ETCS) **nie ma rozpatrywanych zakresów wpływu sygnału wyświetlanego przez semafor na zachowanie maszynisty, np. nr 2 względem semafora** (o których mowa w rozdziale 5.1, założenie XVII). Przykładowo wartość sygnału „hamuj” równa „-1” w modelu jazdy w oparciu o sygnalizację przytorową występowała np. w chwili, gdy pociąg stał przed semaforem nr 1 i oczekiwał na wyprawienie. Jak już wspomniano powyżej, ze względu na brak wyżej wymienionych zakresów w modelu jazdy w oparciu o raportowaną pozycję pociągu wyeliminowano dla sygnału „hamuj” wartość „-1” i przyjmuje on tylko wartości „0”, czyli hamowanie (według określonej charakterystyki) i „1”, czyli brak hamowania.

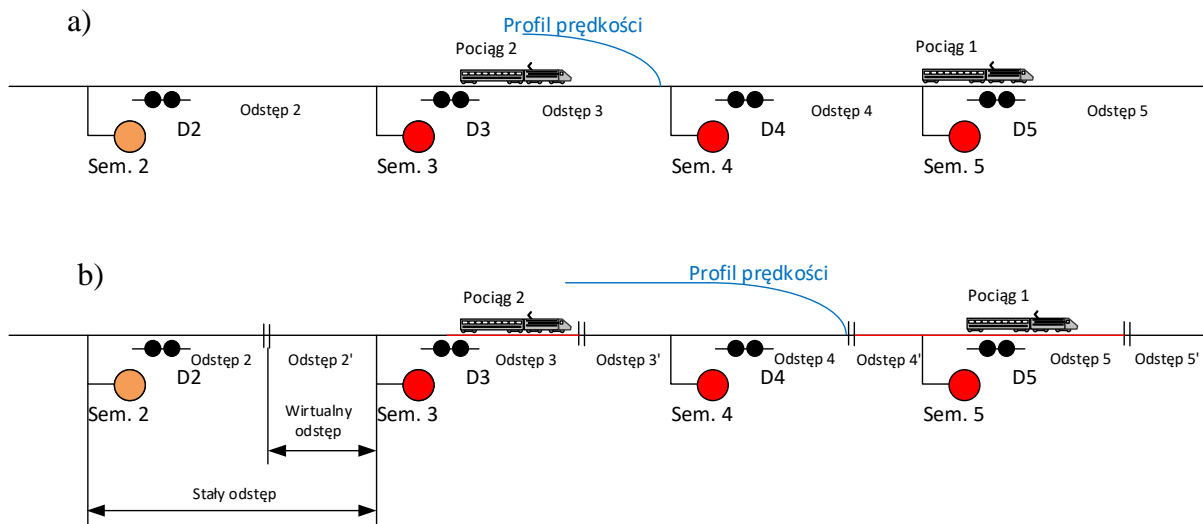
- V. Możliwe jest wprowadzenie profilu krzywej hamowania wyliczanej przez urządzenia pokładowe systemu ETCS na zgodność z modelem krzywych hamowania opisanym w specyfikacji technicznej Subset-026 [95] rozdział 3.13 wraz z modelem konwersji opisanym w rozdziale A.3.7 specyfikacji [95]. Przyjmuje się, że maszynista prowadzi pociąg zgodnie z obliczoną charakterystyką hamowania „Permitted”, czyli taką, która informuje maszynistę o potrzebie wdrożenia hamowania celem uniknięcia interwencji przez system.

VI. Profile krzywych hamowania według modelu opisanego w specyfikacji [95] zostaną wyliczone w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool v. 4.2*. Przykładową charakterystykę hamowania wyliczoną przez narzędzie dla przykładowego pociągu ilustruje Rysunek 5-16.



Rysunek 5-16. Przykładowa charakterystyka hamowania obliczona przez narzędzie ERA Braking curves simulation tool v. 4.2. [źródło: opracowanie własne]

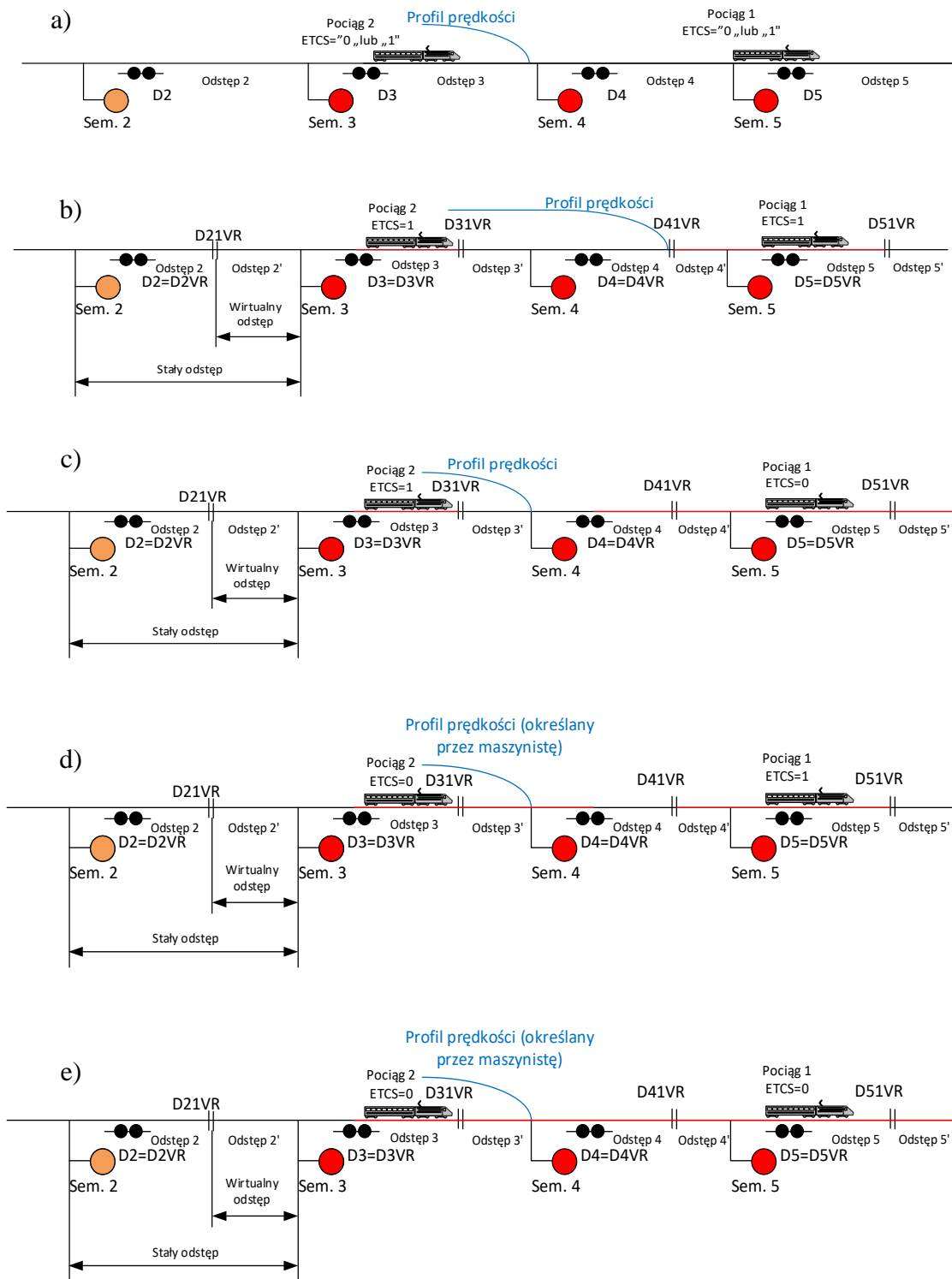
VII. Model umożliwia wprowadzenie dodatkowego, dyskretnego, podziału konwencjonalnych stałych odstępów na tzw. wirtualne odstęp (będące quasi-odpowiednikiem ruchomego odstepu blokowego) (Rysunek 5-17). Zbiór „n” wirtualnych odstępów tworzy stały odstęp.



Rysunek 5-17 Fragment linii kolejowej z a) klasycznym podziałem na stałe odstepy, b) wprowadzenie dodatkowego podziału stałych odstępów z wykorzystaniem wirtualnych odstępów. Linia czerwoną zaznaczono zajętość poszczególnych odcinków z punktu widzenia systemu. Symbolem „||” zaznaczono granicę wirtualnych odstępów [źródło: opracowanie własne]

Przy rozwiązaniu z dodatkowym podziałem odstępów, z wykorzystaniem wirtualnych odstępów, w dalszym ciągu należy stosować konwencjonalne systemy stwierdzania niezajętości (detektory) w miejscach, gdzie pociąg wykonuje start misji (np. na torach stacyjnych). Aspekt ten został opisany w pracy własnej [21], dotyczącej kontroli przejazdu w systemie ERTMS/ETCS. W przypadku odcinków zwrotnicowych pozostawienie konwencjonalnych sekcji zwrotnicowych pozwoliłoby na prawidłowe określenia pozycji pociągu w przypadku jazd poza systemem – np. w przypadku jazd manewrowych. Jednocześnie pozwoliłoby to na szybsze zwalnianie tych odcinków dla potrzeb innych przebiegów po wykryciu przejazdu pociągu.

- VIII. Miejscem zatrzymania dla pociągu wyposażonego w ETCS może być początek stałego odstępu określonego przez współrzędna semafora (punkt VI, z rozdziału 5.1), jak również współrzędna początku wirtualnego odstępu.
- IX. Wprowadza się dodatkowy detektor „DxVR”, który może przyjmować stany jak detektory kół określone w założeniu XVI z rozdziału 5.1. Dodatkowy detektor „DxVR” umożliwia wprowadzenie dodatkowego podziału stałego odstępu (wyznaczonego przez początek i koniec semafora i detektora zgodnie z założeniem VI i IX z rozdziału 5.1).
- X. Możliwe jest wprowadzenie, indywidualnie dla każdego z detektorów „DxVR” opóźnienia czasowego związanego ze zmianą jego stanu wynikającego z fizycznej lokalizacji pociągu. Opóźnienie to ma za zadanie odwzorować cykliczność raportowania pozycji przez pociąg.
- XI. Możliwe jest wprowadzenie indywidualnych lokalizacji danych detektorów „DxVR”, tj. dowolne kształtowanie długości i liczby wirtualnych odstępów. W wersji minimalnej, liczba i współrzędna detektorów „D” musi odpowiadać liczbie i współrzędnym detektorów kół, zgodnie z założeniem IX z rozdziału 5.1.
- XII. W modelu możliwe jest określenie współrzędnej miejsca zatrzymania pociągu dla danego semafora w wyniku zajętości spowodowanej przez poprzedzający pociąg. Miejscem zatrzymania dla pociągu wyposażonego w ETCS może być początek odstępu wykazującego zajętość, tzn., że detektor „DxVR” zlokalizowany na jego początku generuje stan „0” dla poprzedzającego pociągu. Można również tak skonfigurować model, by pociąg nadzorował koniec zezwolenia na jazdę z zachowaniem jednego wolnego odstępu między pociągami. Konfiguracja z jednym wolnym odstępem pozwala zasymulować zapewnienie drogi ochronnej, co wpływa na bezpieczeństwo (dodatkowe droga na wyhamowanie pociągu, gdyby nie był on w stanie zatrzymać się przed końcem zezwolenia na jazdę).
- XIII. Zmiana sygnału „hamuj” z „1” na „0” może nastąpić, gdy detektor będący na końcu uprzednio zajętego odstępu zmieni stan na „1” dla poprzedzającego pociągu, co oznacza, że odstęp ten został zwolniony i możliwe jest przedłużenie zezwolenia na jazdę dla kolejnego pociągu.
- XIV. Dodatkowe detektory „DxVR” zlokalizowane w innych współrzędnych niż detektory kół zlokalizowane przy semaforach (zgodnie z założeniem IX z rozdziału 5.1) nie oddziałują na pociągi sterowane przez maszynistę („ETCS=0”). Oznacza to, że pociąg sterowany przez maszynistę, który nie raportuje swojej pozycji, musi zwolnić cały odstęp determinowany lokalizacją semaforów, aby kolejny pociąg (nawet sterowany przez ETCS) mógł wjechać za semafor osłaniający taki odstęp. Przykładowe scenariusze związane z oddziaływaniem modelu na jazdę pociągów przedstawia Rysunek 5-18.



Rysunek 5-18 Wzajemne oddziaływanie pociągów: a) Pociągi wyposażone w ETCS lub jazda na podstawie sygnalizacji przytorowej. Klasyczny podział na odstępy. b) Dodatkowy podział odstępu na wirtualne odstępy. Jazda dwóch pociągów wyposażonych w ETCS. c) Dodatkowy podział odstępu na wirtualne odstępy. Jazda pociągu wyposażonego w ETCS za pociągiem niewyposażonym w ETCS. d) Dodatkowy podział odstępu na wirtualne odstępy. Jazda pociągu niewyposażonego w ETCS za pociągiem wyposażonym w ETCS. e) Dodatkowy podział odstępu na wirtualne odstępy. Jazda dwóch pociągów niewyposażonych w ETCS [źródło: opracowanie własne].

6. Sprawdzenie opracowanego modelu jazdy w oparciu o sygnalizację przytorową

6.1. Sprawdzenie pracy detektorów i sygnałów wyświetlanych na semaforach

Rysunek 6-1a, b i c przedstawia sygnały z detektorów kół nr 14, 15 i 16 generowane w trakcie przejazdu pociągu o długości $L_t = 800$ [m] z profilem prędkości równym profilowi maksymalnej, dozwolonej prędkości na szlaku, który przedstawia Rysunek 5-1b w rozdziale 5. Widoczne wartości są zgodne w szczególności z założeniem nr XIII, przedstawionym w rozdziale 5.1. Współrzędne umiejscowienia kolejnych semaforów początkowych na szlaku podaje Tabela 6-1.

Tabela 6-1 Współrzędne umiejscowienia kolejnych semaforów początkowych na szlaku

Nr semafora	Współrzędne umiejscowienia kolejnych semaforów początkowych na szlaku wsp_{det} [m]
1.	0
2.	2411
3.	3871
4.	5568
5.	7043
6.	8592
7.	10412
8.	12699
9.	14120
10.	15765
11.	18044
12.	19693
13.	21716
14.	23512
15.	24967
16.	26573
17.	28033
18.	29401
19.	30805
20.	32206
21.	33518
22.	34877

Źródło: opracowanie własne

Umiejscowienie semaforów na analizowanym szlaku poglądowo przedstawia również Rysunek 5-4.

Na podstawie profilu prędkości jazdy pociągu, który przedstawia Rysunek 5-1b, oraz na podstawie statycznego profilu dopuszczalnej prędkości na szlaku (Rysunek 5-1a) można zauważyć, że w zakresie lokalizacji detektorów nr 14, 15 i 16 pociąg przemieszczał się ze stałą prędkością $v = 160$ [km/h] (44,4) [m/s]). Umiejscowienie detektorów kół względem semaforów było zgodne z zasadą przedstawioną na Rysunek 5-8, a odległości semaforów od początku szlaku prezentuje Rysunek 5-4. Z kolei Rysunek 6-1d przedstawia sygnały generowane w zależności od stanu przywołanych powyżej detektorów przez semafor nr 14.

Na podstawie przedstawionych wykresów (Rysunek 6-1) widoczna jest zmiana sygnału na semaforze Sem. 14 z sygnału „S2” na „S1 Stój” w chwili czasowej zmiany sygnału z „-1” na „0” pochodzącego z det. 14 – Rysunek 6-1a (co odpowiada zajęciu przez pociąg odstępu osłanianego przez sem. 14). Kolejna zmiana sygnału na sem. 14 z „S1 Stój” na „S5” jest generowana przez zmianę sygnału det. 15 z wartości „0” na „1” ((Rysunek 6-1b), co odpowiada przejazdowi przez cały skład pociągu odstępu blokowego osłanianego przez sem. 14. Chwila czasowa zmiany sygnału z „S1 Stój” na „S5” na semaforze 15 t_{sygS5_sem14} względem chwili czasowej zmiany sygnału na tym semaforze z „S2” na „S1 Stój” na semaforze 14 t_{sygS1_sem14} jest zgodna z wyliczeniami pokazanym w równaniu 6-1.

$$t_{sygS5_sem14} = \left(\frac{wsp_{det15} - wsp_{det14} + Lt}{v} \right) + t_{sygS1_sem14} = \left(\frac{24982 - 23527 + 800}{44, (4)} \right) + 947,02 = 997,75 \text{ [s]} \quad (6-1)$$

Gdy pociąg zwolnił kolejny odstępek blokowy, co odpowiada zmianie sygnału z det. 16 z wartości „0” na „1” ((Rysunek 6-1c), sem. 14 wygenerował sygnał S2. Szczegółowe wyliczenia zostały przedstawione na równaniu 6-2.

$$t_{sygS2_sem14} = \left(\frac{wsp_{det16} - wsp_{det15}}{v} \right) + t_{sygS5_sem14} = \left(\frac{24982 - 235270}{44, (4)} \right) + 997,75 = 1033,89 \text{ [s]} \quad (6-2)$$

Pomiędzy zboczem narastającym sygnału detektora det. 14 (Rysunek 6-1a), a zboczem narastającym sygnału det. 16 (Rysunek 6-1c) upływa 86,9 [s], co zaznaczono na Rysunek 6-1 oraz jest zgodne z przyjętą prędkością przejazdu, umiejscowieniem detektorów oraz długością pociągu.

Uzyskane wartości są zgodne z zasadą przedstawioną w Tabeli 5-1. W wyniku symulacji, w ramach tzw. postprocesingu z zapisanych na dysku komputera macierzy, możliwe jest wygenerowanie wykresów dla wszystkich semaforów i detektorów kół, ale przywoływanie ich wszystkich w tym miejscu nie jest celowe.

Natomiast Rysunek 6-3a, b i c przedstawia sygnały z detektorów kół nr 21, 22 i 23 generowane w trakcie przejazdu pociągu (zgodnie z Rysunek 5-1a i w szczególności z założeniem nr XVIII z rozdziału 5.1) zgodnie z profilem prędkości przedstawionym na rys. Rysunek 5-1b, z prędkością 160 [km/h] (44, (4) [m/s]) przez współrzędne szlaku odpowiadające umiejscowieniu tych detektorów kół.

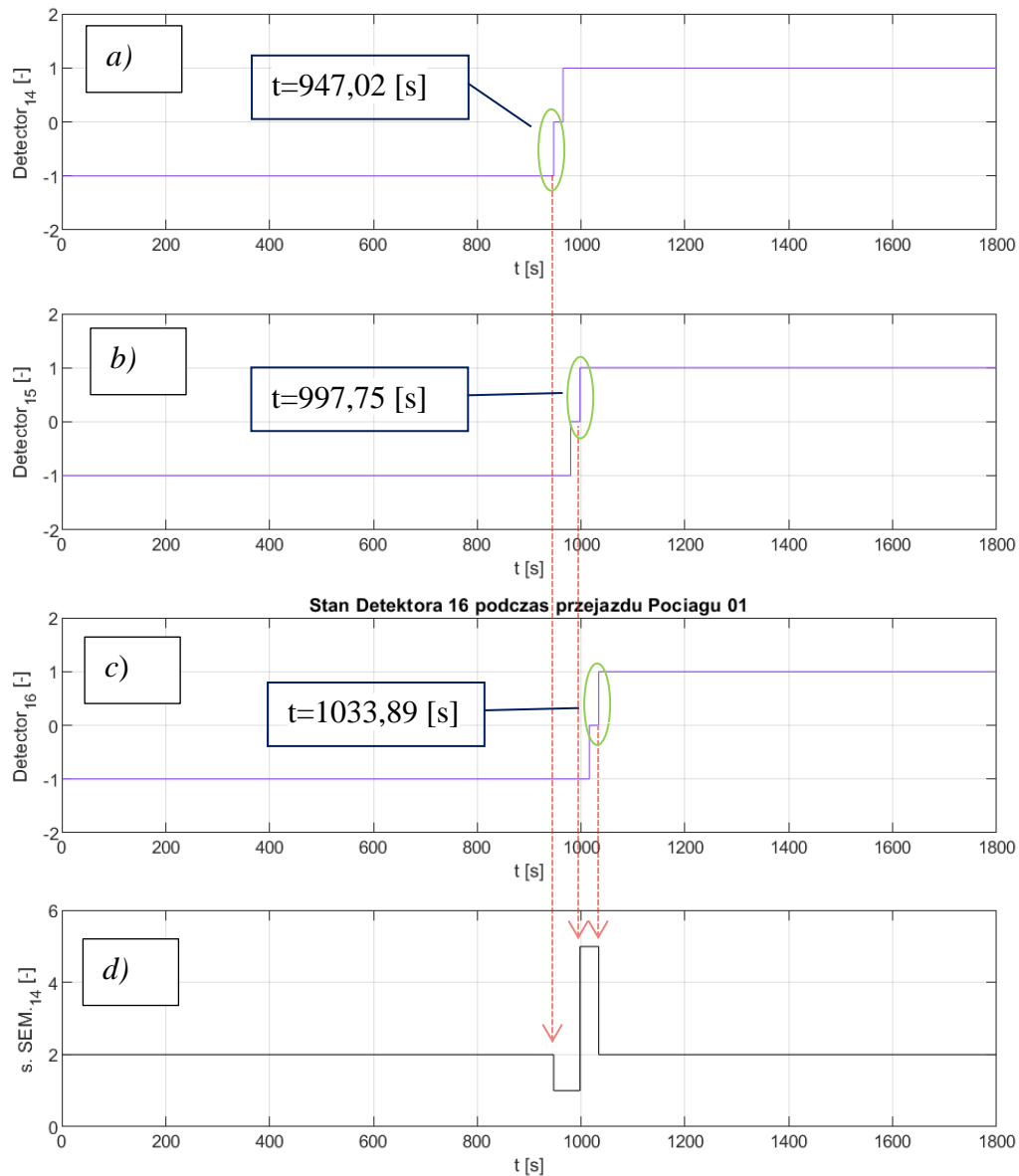
W tym przypadku oddziaływanie detektorów kół na stan semafora 21 jest zgodne z założeniem nr XVIII. Graficzną prezentację lokalizacji detektorów i tworzenia przez nie poszczególnych odstępów, oraz przebiegu wjazdowego przedstawia Rysunek 6-2.

Jak już wspomniano, również w tym przypadku symulowano, że pociąg jedzie pomiędzy detektorem nr 22 a 23 z prędkością 160 [km/h], a zgodnie z założeniem nr IX (Rysunek 5-8), detektory te są od siebie odległe o 85 [m]. Zatem w tym przypadku pomiędzy zboczem narastającym sygnału detektora 22 (Rysunek 6-3b), a zboczem narastającym sygnału detektora nr 23 (Rysunek 6-3c) upływają niecałe 2 [s], co zaznaczono na tych rysunkach (Rysunek 6-3b i Rysunek 6-3c) oraz jest to zgodne z przyjętą prędkością przejazdu.

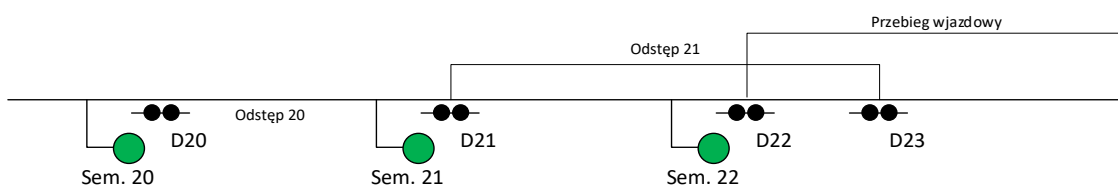
Z kolei Rysunek 6-3 d i Rysunek 6-3 e przedstawia sygnały generowane w zależności od stanu przywołanych detektorów nr 22, 23 przez semafor nr 21 i 22. Wartości tych sygnałów również należy uznać za zgodne z założeniami podanymi punkcie XVIII rozdziału 5.

Przykładowe wyliczenia dotyczące chwili czasowej wyświetlenia sygnału „S5” na semaforze 21 w wyniku przejazdu pociągu przedstawia równanie 6-3.

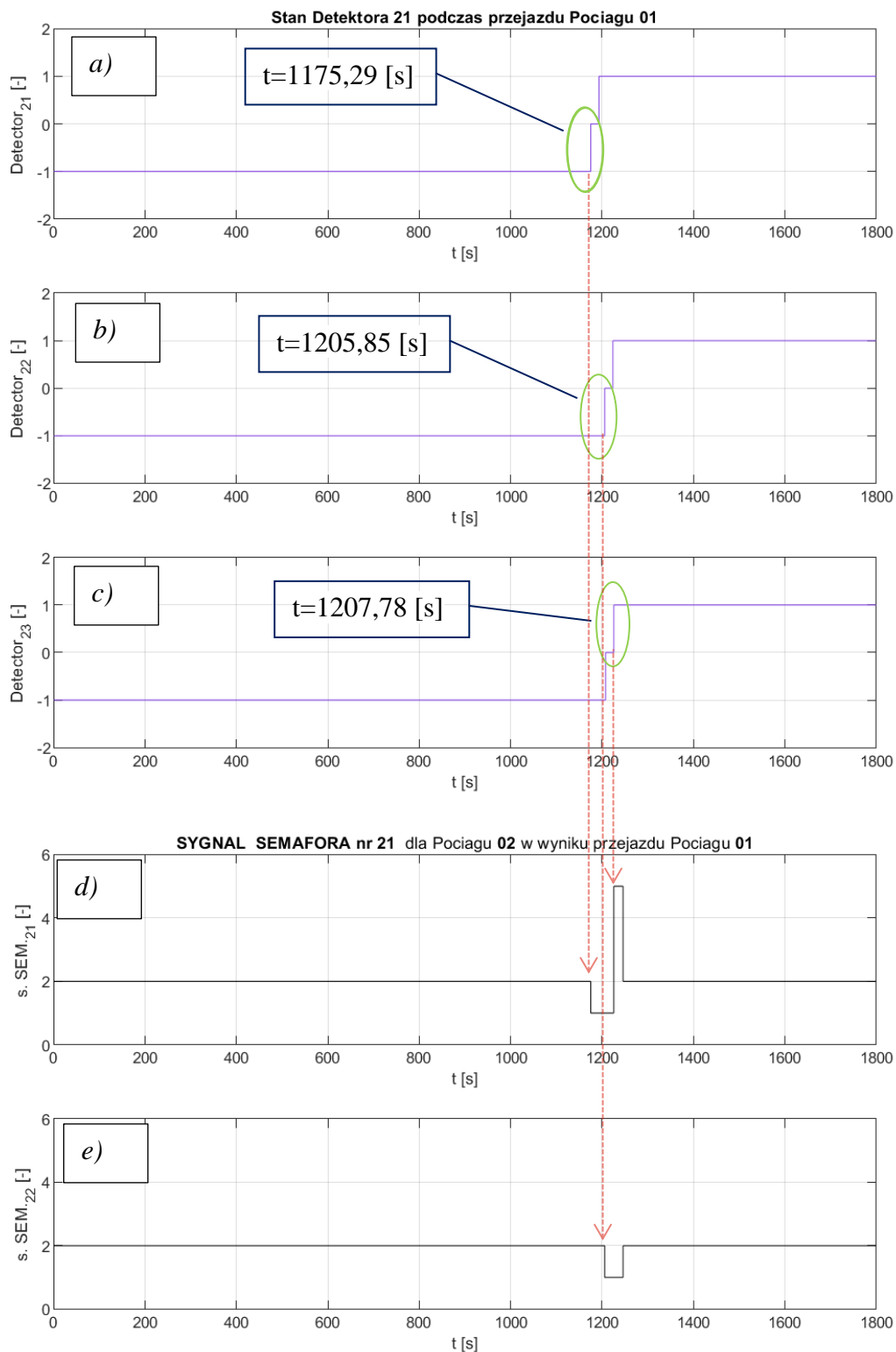
$$t_{sygS5_sem21} = \left(\frac{wsp_{det23} - wsp_{det21} + Lt}{v} \right) + t_{sygS1_sem21} = \left(\frac{34977 - 33533 + 800}{44, (4)} \right) + 1157,29 = 1207,78 [s] \quad (6-3)$$



Rysunek 6-1. Wynik symulacji umożliwiający sprawdzenie idei przedstawionej w Tabela 5-1: sygnał detektora kół nr 14 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (a), sygnał detektora kół nr 15 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (b), sygnał detektora kół nr 16 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (c), sygnał semafora 14 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 d) [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 6-2. Lokalizacja detektorów D21, D22 i D23 względem semaforów sem. 21, sem. 22 [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 6-3. Wynik symulacji umożliwiający sprawdzenie idei przedstawionej w tabeli 6-2 i 6.3: sygnał detektora kół nr 21 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (a), sygnał detektora kół nr 22 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (b), sygnał detektora kół nr 23 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (c), sygnał semafora 21 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (d), sygnał semafora 22 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (e) [źródło: opracowanie własne]

6.2. Podsumowanie

Przedstawione w rozdziale 6 sprawdzenie pracy detektorów i sygnałów wyświetlanych na semaforach w oprogramowaniu symulacyjnym dało wynik pozytywny. Pozwala to potwierdzić poprawność działania oraz zgodność z założeniami (przedstawionymi w rozdziale 5.1) modelu i oprogramowania symulacyjnego w zakresie:

- pracy detektorów i generowanych przez nie sygnałów na podstawie przejazdu pociągu o określonej długości i prędkości;
- poprawności generowania sygnałów wyświetlanych na semaforach;
- poprawności uwzględnienia w oprogramowaniu symulacyjnym geografii wprowadzonego szlaku (długości poszczególnych odstępów blokowych, odległości detektorów stanowiących punkty oddziaływania od odpowiadających im semaforów).

7. Badania symulacyjne z użyciem modelu jazdy pociągów w oparciu o sygnalizację przytorową

7.1. Wpływ opóźnienia startu pociągu na czas jazdy pociągów

W ramach badań symulacyjnych, z użyciem modelu jazdy pociągów w oparciu o sygnalizację przytorową (przedstawionego w rozdziale 5.1), przeprowadzono badanie wpływu opóźnienia wyprawienia (startu) pociągu na czas przejazdu pociągu. Opóźnienie wyprawienia (startu) pociągu może umożliwić ograniczenie niezasadnego hamowania i ponownego rozpędzenia w wyniku zaistnienia konfliktu ruchowego z poprzedzającym pociągiem, gdy znane są dokładne charakterystyki jazd obydwu pociągów. W praktyce możliwe to jest przy wykorzystaniu dodatkowych systemów związanych z automatyzacją prowadzenia pociągu.

Opóźnienie wyprawienia pociągu następuje w stosunku do wyświetlenia sygnału zezwalającego na semaforze wyjazdowym na szlak. Pomimo spełnienia warunku dotyczącego dwóch odstępów wolnych (przy sygnalizacji trzystawnej), w zależności od charakterystyki jazdy pociągu poprzedzającego, możliwe jest „dogonienie” następnego pociągu na szlaku, tj. wystąpienie konfliktu ruchowego. „Dogonienie” rozumiane jest w tym przypadku jako zbliżenie do pociągu poprzedzającego w taki sposób, że maszynista następnego pociągu będzie zmuszony do rozpoczęcia hamowania przy mijaniu semafora z sygnałem pomarańczowym „S5”.

W celu opóźnienia wyprawienia (startu) kolejnego pociągu w badaniach symulacyjnych wykorzystano sygnał „hamuj”. Wartość tego sygnału określono na podstawie kolejnych symulacji i porównaniu konieczności hamowania pociągu nr 2 w wyniku oddziaływania pociągu poprzedzającego nr 1 na kolejnych semaforach odstępowych na szlaku.

W celu umożliwienia ewentualnej weryfikacji uzyskanych wyników w symulacjach przedstawionych w niniejszym rozdziale przyjęto, że pociąg nr 1 (czyli jadący jako pierwszy na szlaku) porusza się z profilem prędkości przedstawionym w rozdziale 5.1, Rysunek 5-1b i Tabela 7-1 natomiast pociąg nr 2 (czyli jadący za pociągiem nr 1) przemieszcza się z maksymalnymi dopuszczalnymi prędkościami na szlaku podanymi w rozdziale 5.1, Rysunek 5-1a i Tabela 7-2.

Tabela 7-1 Wartości, na podstawie których uzyskano profil dopuszczalnej prędkości na szlaku przedstawiony na Rysunek 5-1b

	Wartości dotyczące danego punktu profilu prędkości																		
	Punkt nr 1	Punkt nr 2	Punkt nr 3	Punkt nr 4	Punkt nr 5	Punkt nr 6	Punkt nr 7	Punkt nr 8	Punkt nr 9	Punkt nr 10	Punkt nr 11	Punkt nr 12	Punkt nr 13	Punkt nr 14	Punkt nr 15	Punkt nr 16	Punkt nr 17	Punkt nr 18	Punkt nr 19
Współrzędna drogi na szlaku [m]	0	4000	6300	7124	7324	8200	9200	10645	11143	13000	15000	16539	16939	19000	29000	29500	30000	30500	34877
Wartość prędkości na szlaku [km/h]	1	160	160	120	120	160	160	100	100	160	160	120	120	160	160	140	140	160	160

Źródło: opracowanie własne

Tabela 7-2 Wartości, na podstawie których uzyskano profil dopuszczalnej prędkości na szlaku przedstawiony na Rysunek 5-1a

	Wartości dotyczące danego punktu profilu prędkości								
	Punkt nr 1	Punkt nr 2	Punkt nr 3	Punkt nr 4	Punkt nr 5	Punkt nr 6	Punkt nr 7	Punkt nr 8	Punkt nr 9
Współrzędna drogi na szlaku [m]	0	7124	7324	10645	11143	16539	16939	29500	30000
Wartość prędkości na szlaku [km/h]	160	120	160	100	160	120	160	140	160

Źródło: opracowanie własne

Przyjęto, że droga hamowania pociągu nr 2 wynika z wartości jednego zmiennego w czasie kroku całkowania algorytmu ODE 45, zastosowanego w środowisku MATLAB&Simulink, który przyjęto, że jest jako nie większy niż 0,1 [s]. Zatem w celu weryfikacji uzyskanych wyników można przyjąć, że droga hamowania dąży do zera. Podobnie droga przyspieszania pociągu nr 2, po zatrzymaniu na skutek wskazań sygnalizacji na semaforach, dąży do zera. Droga zmniejszania prędkości pociągu nr 1 oraz przyspieszania pociągu nr 1 ilustruje Rysunek 5-1b, a dokładne wartości prezentuje Tabela 7-1. Takie założenie nie jest zgodne z rzeczywistymi charakterystykami jazd pociągów jednak umożliwia weryfikację uzyskanych wyników metodami analitycznymi.

W symulacjach przedstawionych w niniejszym rozdziale przyjęto, że indywidualnie dla danego semafora i pociągu nr 2 drogi wyprzedzenia rozpoczęcia hamowania względem semaforów nr 2-22 na szlaku wynoszą 1 [m]. Oznacza to, że pociąg rozpoczyna hamowanie w odległości 1 [m] przed semaforem wyświetlającym sygnał „S5”. Czyli, gdyby nawet w trakcie przejazdu przez tę odległość nastąpiła zmiana sygnału z pomarańczowego „S5” na zielony „S2”, to przyjęto że maszynista nie jest w stanie, zauważyć tej zmiany sygnału (czas od osiągnięcia współrzędnej szlaku do zmiany wskazania semafora wynosi 0,0025 [s] według równania (7-1) i obliczeń (7-2)) oraz że hamowanie rozpoczyna się w tej współrzędnej szlaku na podstawie widzianego przez maszynistę przed chwilą sygnału „S5” i poczynionych w tym kierunku działań.

$$t = \frac{d}{v} \text{ [s]} \quad (7-1)$$

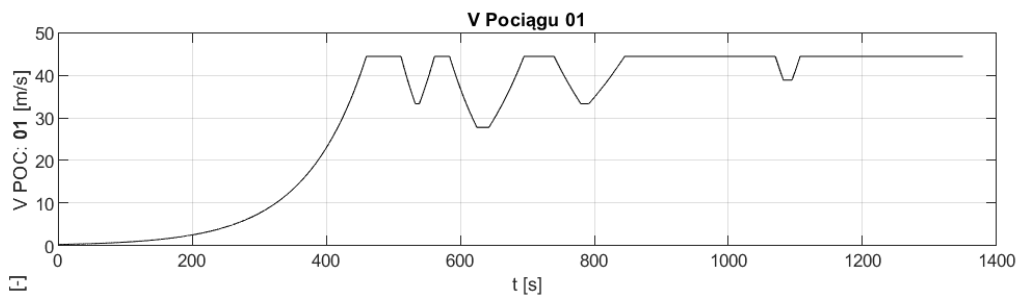
$$t = \frac{1}{44,4} = 0,0225 \text{ [s]} \quad (7-2)$$

Z opisu tego wyniku, że hamowanie to musi się odbyć na podstawie wyświetlonego sygnału „S5” i może być opóźnione, na podstawie subiektywnej oceny maszynisty. Opóźnienie to jest zależne od specyfiki szlaku i danego pociągu. Dodatkowo, zakłada się, że od momentu minięcia przez czoło pociągu lokalizacji danego semafora nie będzie już sygnału odwołującego ten sygnał „S5” aż do następnego semafora, a zatrzymanie pociągu, gdyby na semaforze kolejnym był wyświetlany sygnał „S1 Stój” musi się odbyć przed tym kolejnym semaforem. Przyjęto również, że dla pociągu nr 2 i semafora nr 1 droga rozpoczęcia hamowania względem tego semafora wynosi 0,1 [m], czyli, że praktycznie czoło pociągu znajduje się na wysokości semafora.

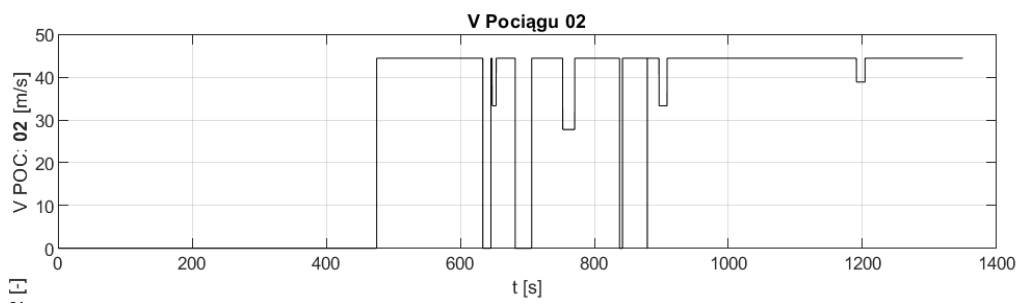
W symulacjach przedstawionych w niniejszym rozdziale, przyjęto także, że:

1. Wprowadzone w założeniu nr XII indywidualnie dla danego semafora i pociągu rzeczywiste drogi widoczności jako odległości od odpowiednich semaforów są równe przepisowym i wynoszą 533 [m].
2. Długość pociągu nr 1 wynosi 800 [m], a pociągu nr 2 – 400 [m].

Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 przedstawia Rysunek 7-1, a przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 2 przedstawia Rysunek 7-2.

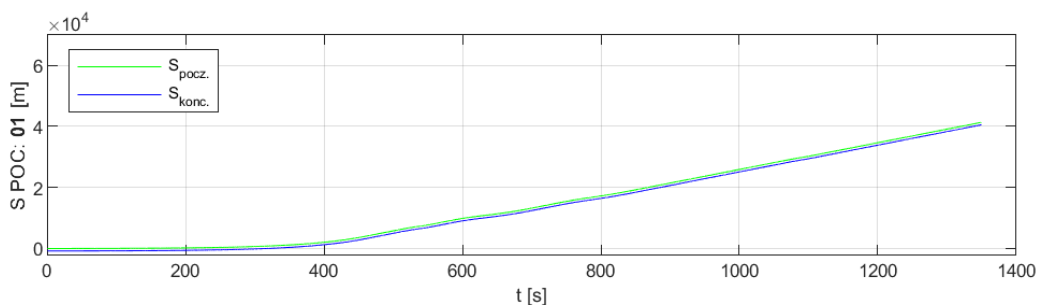


Rysunek 7-1. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 [źródło: opracowanie własne]

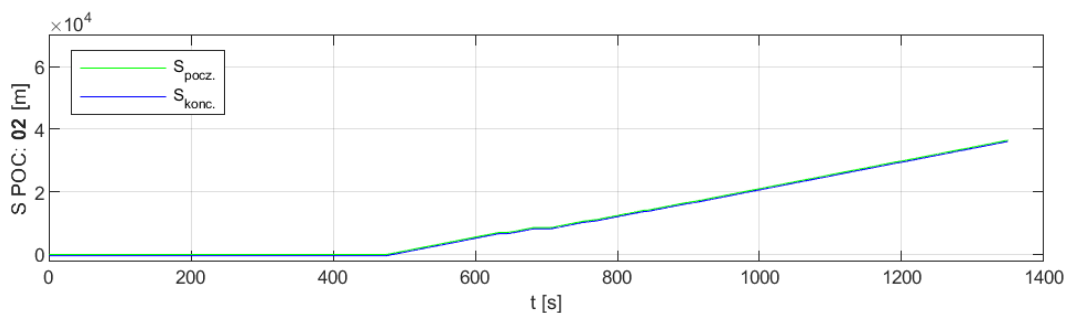


Rysunek 7-2. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 2. Przebieg wykresu wynika z przyjęcia w oprogramowaniu symulacyjnym założenia, że droga hamowania i przyspieszania pociągu dąży do zera [źródło: opracowanie własne]

Przebieg zmian wartości współrzędnych początku i końca pociągu nr 1 przedstawia Rysunek 7-3, zmiany wartości współrzędnych początku i końca pociągu nr 2 przedstawia Rysunek 7-4.



Rysunek 7-3. Przebieg zmian wartości współrzędnych początku i końca pociągu nr 1 – linia zielona oznacza czoło pociągu, a linia niebieska oznacza koniec pociągu (ze względu na przyjęte długości pociągu linie te praktycznie nakładają się na siebie na tym wykresie) [źródło: opracowanie własne]

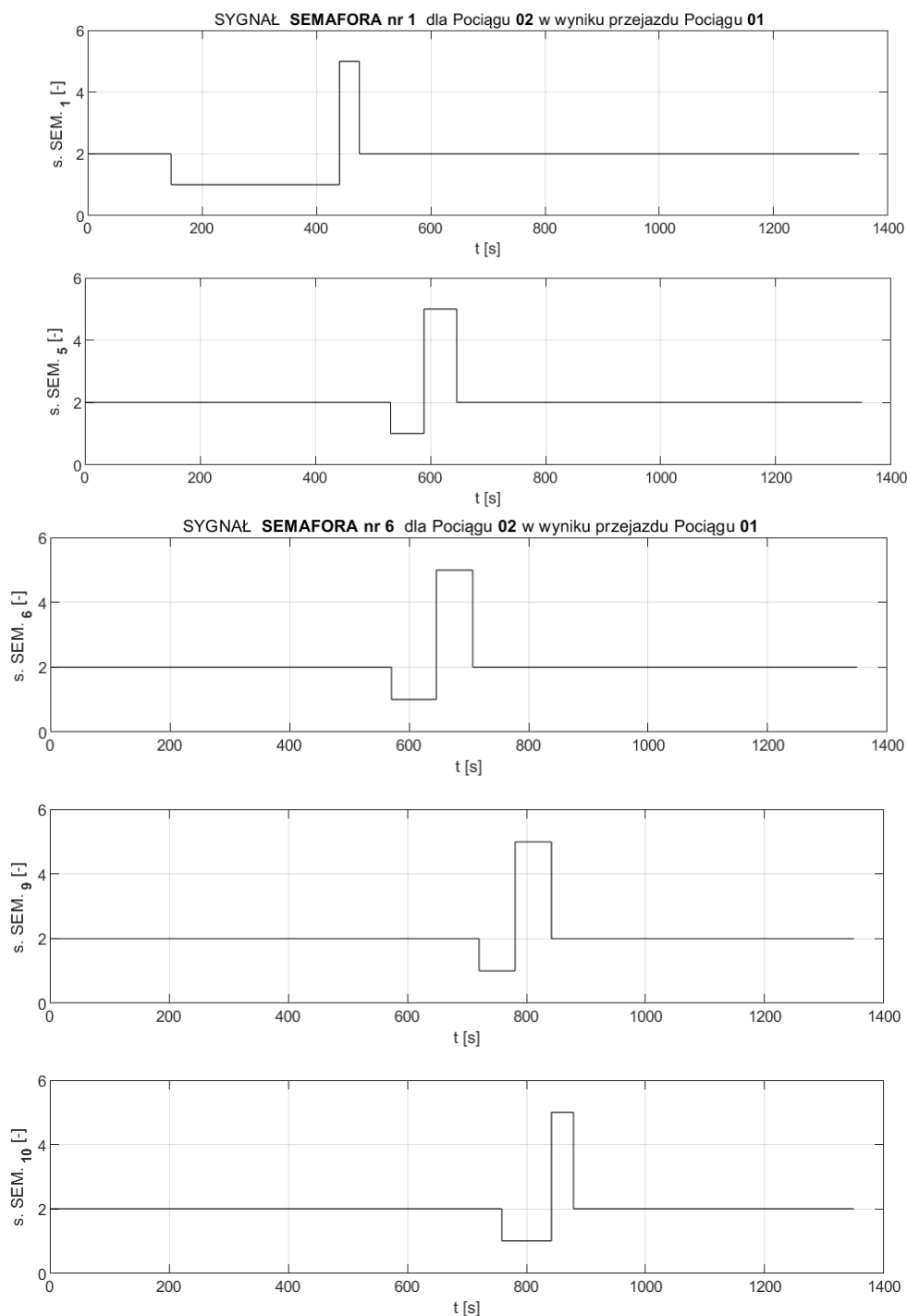


Rysunek 7-4. Przebieg zmian wartości współrzędnych początku i końca pociągu nr 2 – linia zielona oznacza czoło pociągu, a linia niebieska oznacza koniec pociągu (ze względu na przyjęte długości pociągu linie te praktycznie nakładają się na siebie na tym wykresie) [źródło: opracowanie własne]

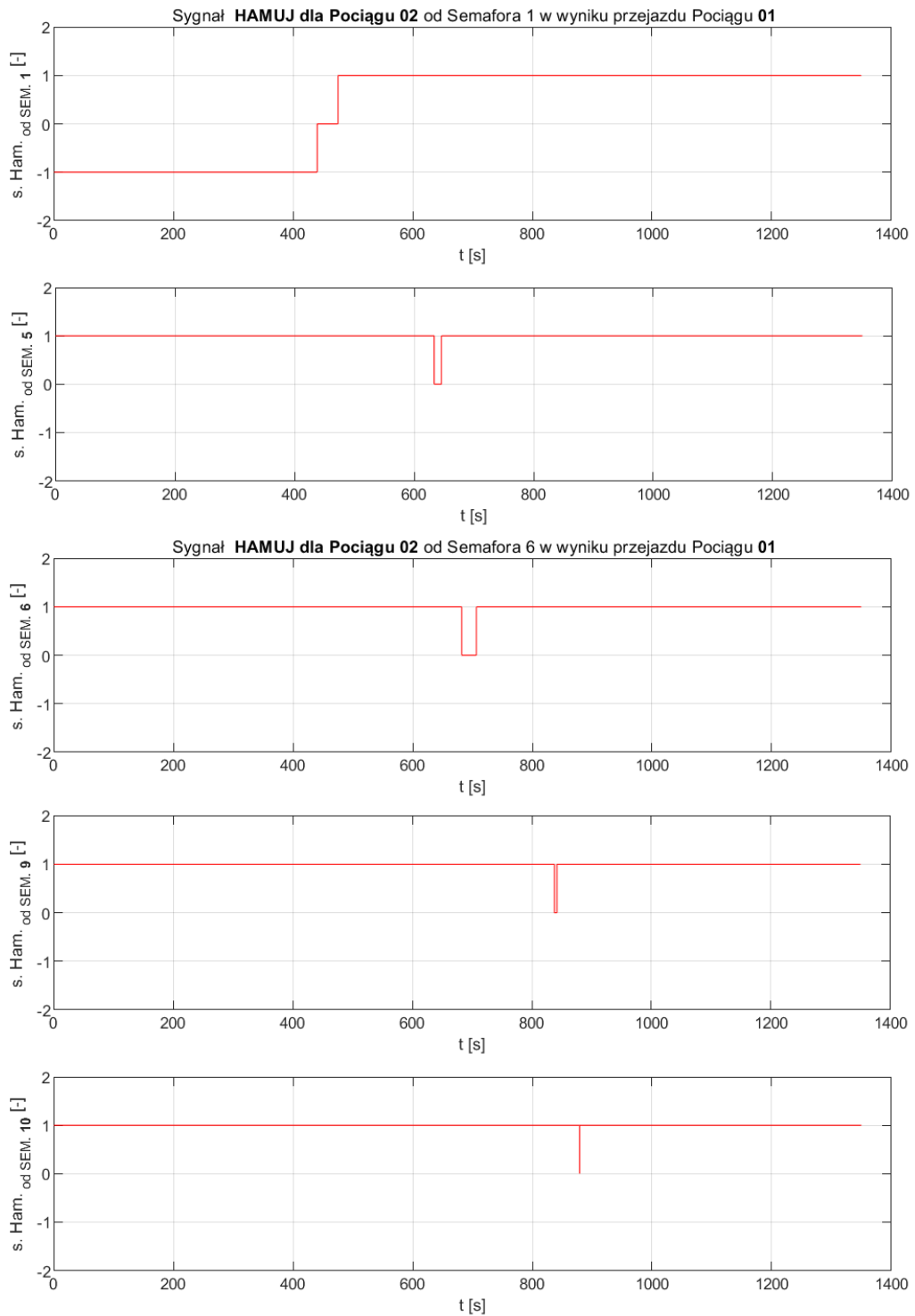
Sygnaly generowane zgodnie z przyjętymi założeniami przez wszystkie detektory kół podczas przejazdu pociągu nr 1 przedstawia Załącznik nr 7.1.1. Wybrane sygnały generowane przez semafor nr 1, 5, 6, 9 i 10, dla pociągu nr 2 przedstawia Rysunek 7-5, a wszystkie sygnały generowane przez te semafor zawiera Załącznik nr 7.1.2. Sygnały semaforów nr 1, 5, 6 9 i 10 zostały wybrane, ponieważ w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pociąg nr 2 przy przyjętych danych do symulacji musiał się zatrzymać i poczekać na sygnał „S2”.

Rysunek 7-6 przedstawia sygnały „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzące od wybranych semaforów: nr 1, nr 5, nr 6, nr 10. Sygnały „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzące od wszystkich semaforów przedstawia Załącznik nr 7.1.3.

Rysunek 7-7 przedstawia sygnały „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 złożony z wszystkich istotnych fragmentów sygnału „hamuj” dla poszczególnych zakresów nr 2 i 3 (przedstawionych w założeniu nr XVII) oraz poszczególnych semaforów. Numery zakresów, w których znajdował się pociąg nr 1 w poszczególnych chwilach czasowych przedstawia Załącznik nr 7.1.4, a numery zakresów, w których znajdował się pociąg nr 2 w poszczególnych chwilach czasowych przedstawia Załącznik nr 7.1.5.

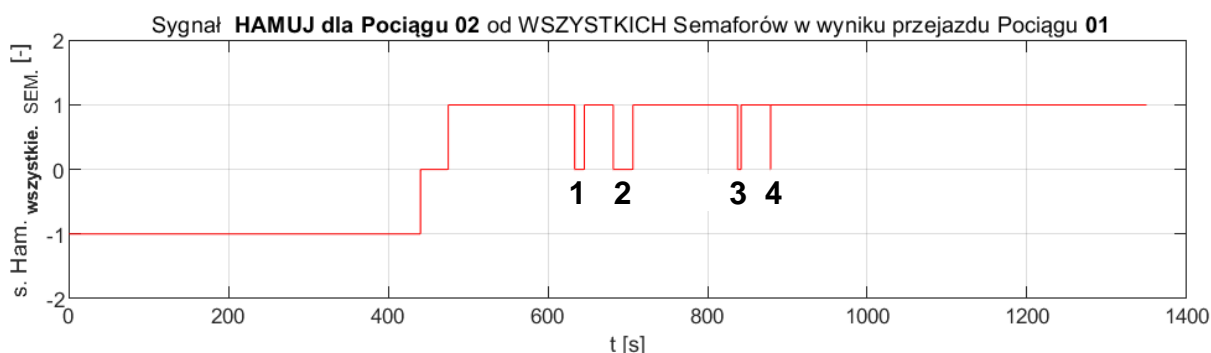


Rysunek 7-5. a) sygnał semafora nr 1 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1, b) sygnał semafora nr 5 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1, c) sygnał semafora nr 6 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1, d) sygnał semafora nr 9 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1, e) sygnał semafora nr 10 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 7-6. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od poszczególnych semaforów: a) semafora nr 1, b) semafora nr 5, c) semafora nr 6, d) semafora nr 9, e) semafora nr 10 [źródło: opracowanie własne]

Rysunek 7-7 obrazuje wszystkie chwile czasowe, w których pociąg hamował (patrz Rysunek 7-6) Takie zobrazowanie pozwala zobrazować, od którego semafora pochodzi konieczność hamowania pociągu.



Rysunek 7-7. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów [źródło: opracowanie własne]

Rysunek 7-7 zawiera naniesione numery czterech lokalnych okresów, których początek odpowiada lokalnemu początkowi zmniejszania wartości sygnału „hamuj” z wartości 1 do 0 i kończących się na początku lokalnego zwiększania wartości sygnału „hamuj” z wartości 0 do 1. Tabela 7-3 przedstawia czasy odpowiadające tym okresom.

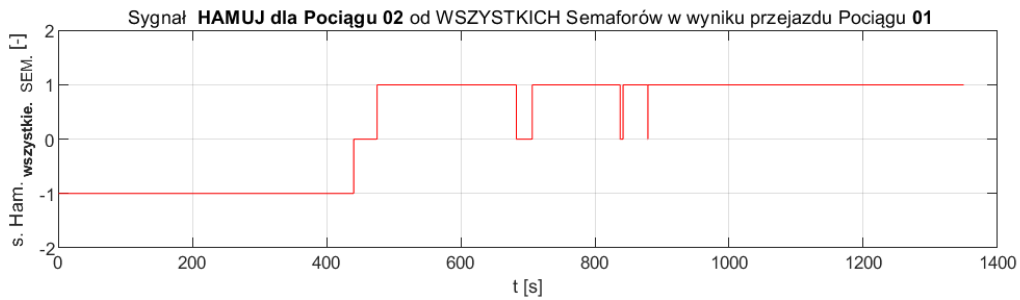
Tabela 7-3 Numery okresów występujących na rysunku Rysunek 7-7 i czasy trwania wartości sygnału „hamuj” = 0 generowanego dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 w poszczególnych okresach.

Numer okresu występujący na rys. 8-7	Czas trwania sygnału „hamuj” przyjmującego wartość „0” dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 [s]
1.	12,0
2.	24,6
3.	4,3
4.	0,1

Źródło: opracowanie własne

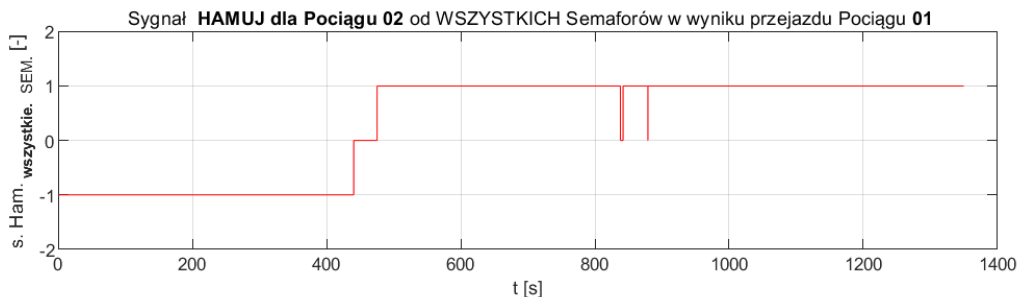
W celu zmniejszenia liczby hamowań pociągu nr 2 na szlaku zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 (Rysunek 7-5a), generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2.

Rysunek 7-8 przedstawia sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów w przypadku, gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące 13 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2. Spowodowało to, że pociąg nr 2 nie musiał hamować na semaforze nr 5 i nie występuje w tym sygnale okres nr 1, co przedstawia Rysunek 7-7.

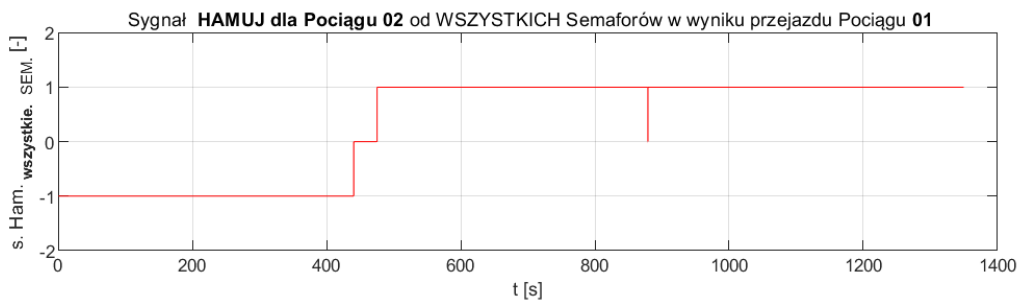


Rysunek 7-8. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące 13 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2 [źródło: opracowanie własne]

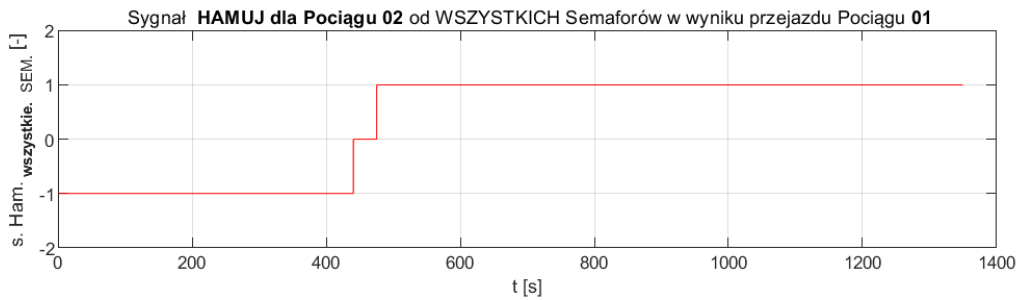
Rysunek 7-9, Rysunek 7-10 i Rysunek 7-11 przedstawiają sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, w przypadku gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące odpowiednio 37, 41 i 41,11 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2. Spowodowało to, że pociąg nr 2 nie musiał także hamować odpowiednio na semaforach nr 6, nr 9 oraz nr 10 i nie występują w tym sygnale także kolejno okresy nr 2, 3 i 4, które przedstawia Rysunek 7-7. Rysunek 7-11 pokazuje, że wprowadzenie opóźnienia startu pociągu nr 2 wynoszącego 41,11 [s] powoduje, że nie występuje konieczność hamowania pociągu nr 2 w trakcie przejazdu przez szlak.



Rysunek 7-9. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące 37 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2 [źródło: opracowanie własne]



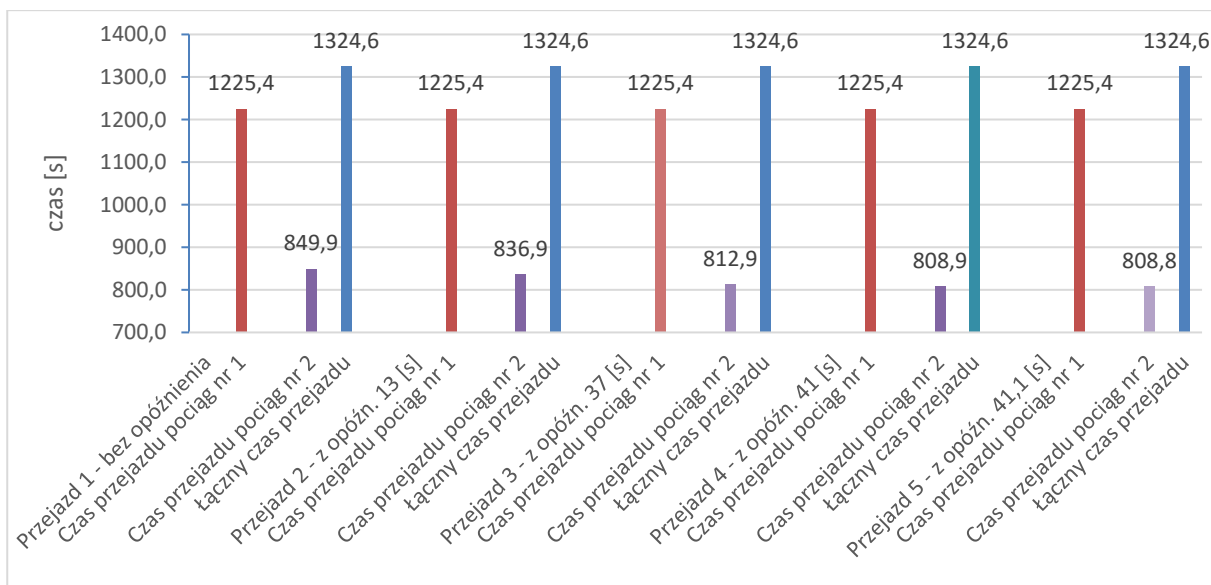
Rysunek 7-10. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące 41 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2



Rysunek 7-11. Sygnal „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące 41,11 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2

Podsumowując wyniki uzyskane w niniejszym rozdziale, można stwierdzić, że możliwość symulacji przejazdu pociągu i wprowadzenie kontrolowanego czasu wyprawiania kolejnych pociągów ze stacji na szlak poprzez możliwość symulowania przejazdów – bazując na odpowiednim modelu matematycznym – pozwalają na zmniejszenie lub ograniczenie do zera liczby hamowań pociągu na szlaku, wynikających z zaistnienia konfliktów ruchowych z poprzedzającym pociągiem („dogonienie” poprzedzającego pociągu).

Rysunek 7-12 przedstawia czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 oraz łączny czas przejazdu obu pociągów. Warto zauważyć, że wprowadzenie łączny czas przejazdu obu pociągów przy przyjętych warunkach symulacji nie zmniejszył się, ale widoczne jest to, że w przypadku przejazdu pociągu nr 2 oprócz wyeliminowania możliwych do uniknięcia hamowań i przyspieszeń, czas przejazdu uległ skróceniu w wyniku skrócenia czasu zajęcia poszczególnych odstępów, co jest efektem pożądanym i wpływającym na zdolność przepustową. W symulacjach przedstawionych w niniejszym rozdziale przyjęto, że w przypadku pociągu nr 2 droga hamowania i przyspieszania tego pociągu dąży do zera. W rzeczywistości drogi te są większe od zera, co spowoduje, że wyeliminowanie zbędnych hamowań i przyspieszeń będzie skutkowało jeszcze większym skróceniem czasu zajęcia poszczególnych odstępów, co jest również efektem korzystnym.



Rysunek 7-12. Czasy przejazdów pociągów nr 1 i nr 2 oraz łączny czas przejazdu obu pociągów [źródło: opracowanie własne]

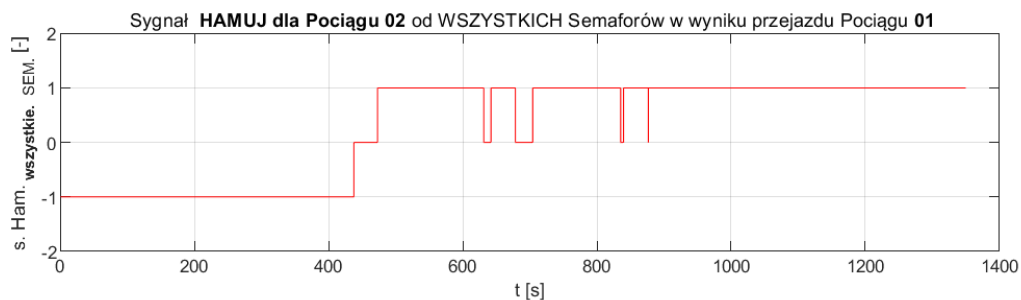
7.2. Wpływ długości pociągu na czas jazdy pociągów

W celu sprawdzenia modelu i wykazania wpływu długości pociągu na czas przejazdu pociągów przez szlak przeprowadzono symulacje, w których parametry były takie, jak przedstawione w poprzednim rozdziale, ale:

1. symulowano przejazd pociągu nr 1 o długości 700 [m] i 800 [m]. Długość pociągu nr 2 nie była zmieniana i wynosiła 400 [m];
2. indywidualnie dla każdego semafora i pociągu nr 2 drogi wyprzedzenia rozpoczęcia hamowania, względem wszystkich semaforów na szlaku, wynoszą 0,1[m]. Oznacza to, że pociąg rozpoczyna hamowanie w odległości 0,1 [m] przed semaforem wyświetlającym sygnał „S5”.

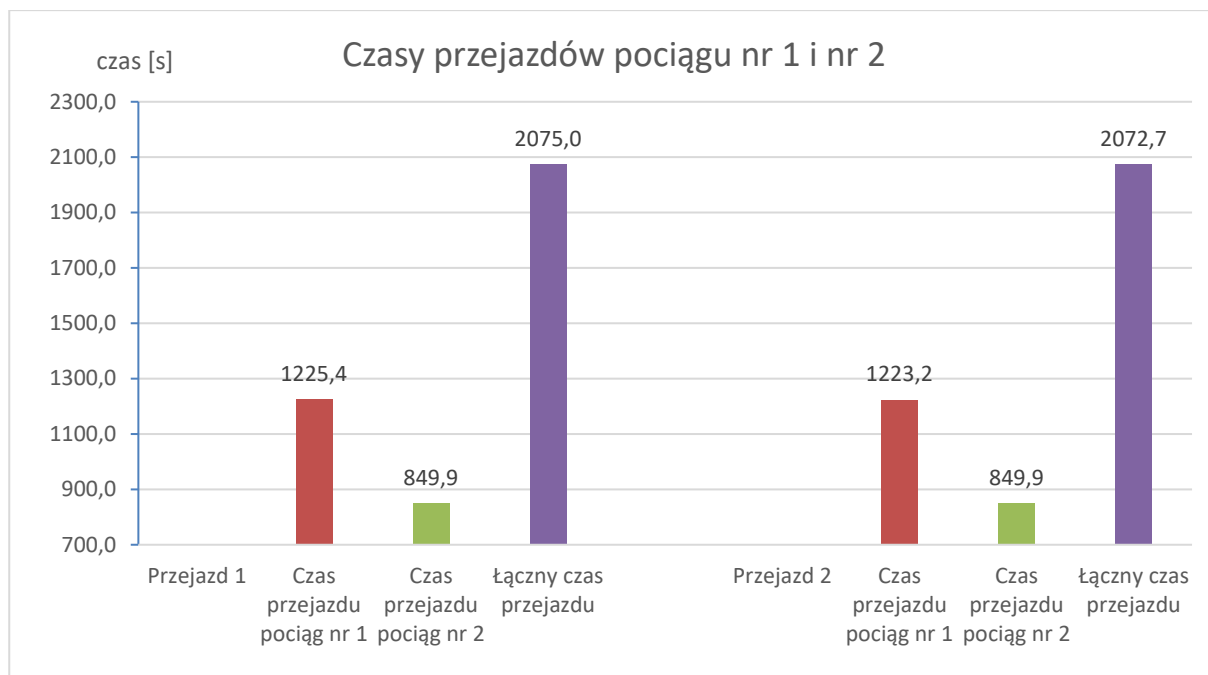
Przebieg zmian sygnału „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 o długości 800 [m], pochodzący od wszystkich semaforów przedstawia Rysunek 7-7. Natomiast przebieg zmian sygnału „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 o długości 700 [m], pochodzący od wszystkich semaforów przedstawiona Rysunek 7-13.

Oba sygnały (Rysunek 7-7 i Rysunek 7-13) mają identyczny kształt i długości trwania okresów nr 1-4, które przedstawia Rysunek 7-7, a różnią się praktycznie tym, że w przypadku przejazdu pociągu nr 2, po krótszym z obu pociągów nr 1, ma on wyświetlany sygnał zielony „S2” na semaforze nr 1 wcześniej o 2,25 [s] ($100/44,4$ [m/s]). W ten sposób zweryfikowano uzyskiwane wyniki, w przypadku zmiany długości pociągu.



Rysunek 7-13. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 o długości 700 [m] pochodzący od wszystkich semaforów

Rysunek 7-14 przedstawia czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 i łączny czas przejazdu obu pociągów, uzyskany podczas obu przedstawionych symulacji przejazdu pociągów. Wartości łącznego czasu przejazdu obu pociągów różnią się o wskazaną w poprzednim akapicie wartość wynikającą z wcześniejszego wyświetlenia sygnału zielonego „S1” na semaforze nr 1, a dalsze zmniejszanie czasu przejazdu pociągu nr 2 jest możliwe przez przedstawione w rozdziale 7.1 opóźnienie startu pociągu nr 2 w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2.



Rysunek 7-14. Czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 i łączny czas przejazdu obu pociągów [źródło: opracowanie własne]

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań modelu, w celu sprawdzenia jego działania, przez wykazanie wpływu długości pociągu na czas przejazdu pociągów przez szlak. Zaprezentowane wyniki pozwalają na potwierdzenie prawidłowości uwzględnienia w modelu parametru dotyczącego długości pociągu i jego wpływ na przebieg sygnałów generowanych przez detektory kół oraz odpowiadające im semafony.

7.3. Wpływ zmian charakterystyki jazdy pociągu na czas jazdy pociągów

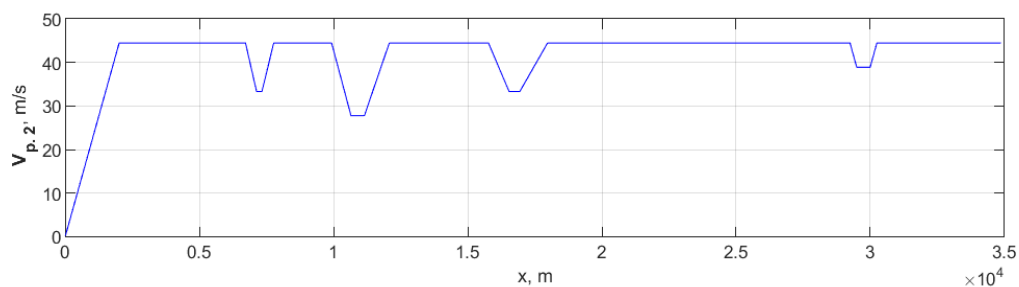
W ramach przeprowadzonych badań symulacyjnych z wykorzystaniem modelu jazdy pociągów w oparciu o sygnalizację przytorową (rozdział 5) przeanalizowano wpływ zmian charakterystyki jazdy pociągów w funkcji współrzędnej początku pociągu na szlaku na liczbę hamowań i czasy przejazdu pociągów przez szlak.

Zmiana charakterystyki jazdy (profilu prędkości) pociągu w funkcji współrzędnej początku pociągu na szlaku pozwala na odwzorowanie w modelu struktury rodzajowej pociągów, przykładowo pociągów pasażerskich oraz pociągów towarowych. Możliwe jest również odwzorowanie w modelu charakterystyki hamowania obliczanej przez pokładowy system ETCS dla danego pociągu.

W celu weryfikacji wpływu charakterystyki zmian prędkości jazdy pociągów w funkcji współrzędnej początku pociągu na szlaku na liczbę hamowań i łączny czas przejazdu pociągów przez szlak przeprowadzono symulacje, których parametry były takie same, jak w symulacjach przedstawionych rozdziale 7.2, ale przyjęto długość pociągu nr 1 jako 800 [m].

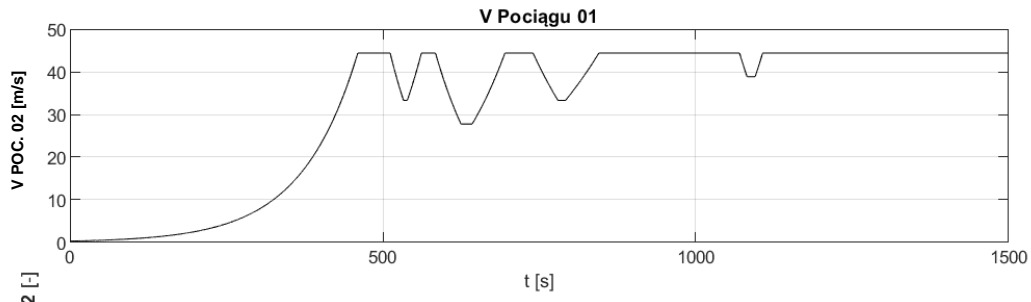
W pierwszej z symulacji przyjęto, że przejazd pociągu nr 1, jadącego jako pierwszy na szlaku, odbywa się według charakterystyki zmian prędkości, którą przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1. Przejazd pociągu nr 2 (czyli jadącego za pociągiem nr 1) odbywa się według charakterystyki zmian prędkości, którą przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1 z tą różnicą, że drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tej charakterystyki zostały skrócone dwukrotnie (Rysunek 7-15).

Warunki hamowania pociągu nr 2 na skutek wystąpienia sygnału pomarańczowego „S5” na odpowiednim w danej chwili semaforze i przyspieszania pociągu po tym hamowaniu przyjęto takie, jak w rozdziale 6.1, a indywidualnie dla danego semafora i pociągu nr 2 drogi wyprzedzenia rozpoczęcia hamowania względem wszystkich semaforów na szlaku wynosiły 0,1 [m]. Oznacza to, że pociąg rozpoczyna hamowanie w odległości 0,1 [m] przed semaforem wyświetlającym sygnał „S5”, co w praktyce oznacza rozpoczęcie hamowania, gdy czoło pociągu mija dany semafor.

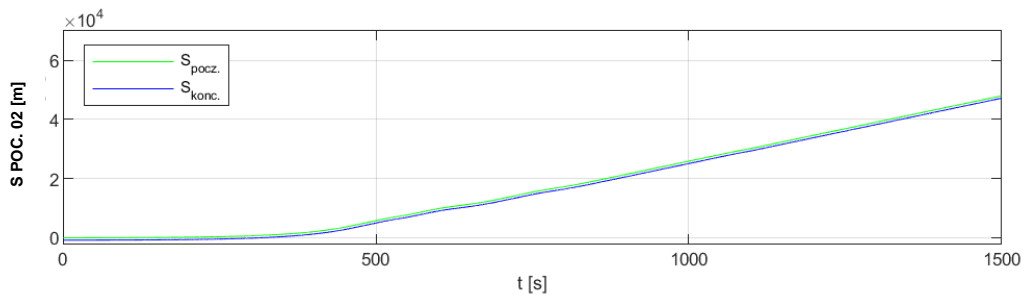


Rysunek 7-15. Charakterystyka zmian prędkości jazdy danego pociągu na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku, którą przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, z tą różnicą, że drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tej charakterystyki zostały skrócone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne]

Charakterystyka zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 i przebieg zmian wartości współrzędnych początku oraz końca pociągu nr 1 były odpowiednio takie, jak przedstawiają Rysunek 7-1, Rysunek 7-2 i Rysunek 7-3. Natomiast charakterystyka zmian prędkości jazdy pociągu nr 2 i przebieg zmian wartości współrzędnych początku oraz końca pociągu nr 2 w funkcji czasu przedstawiają odpowiednio Rysunek 7-16 i Rysunek 7-17.



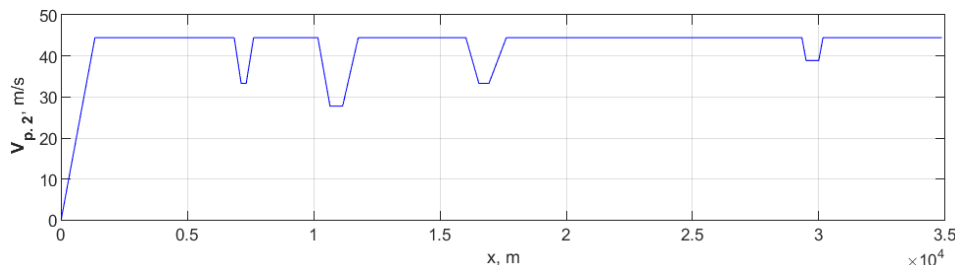
Rysunek 7-16. Charakterystyka zmian prędkości jazdy pociągu nr 2 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tej charakterystyki zostały skrócone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne]



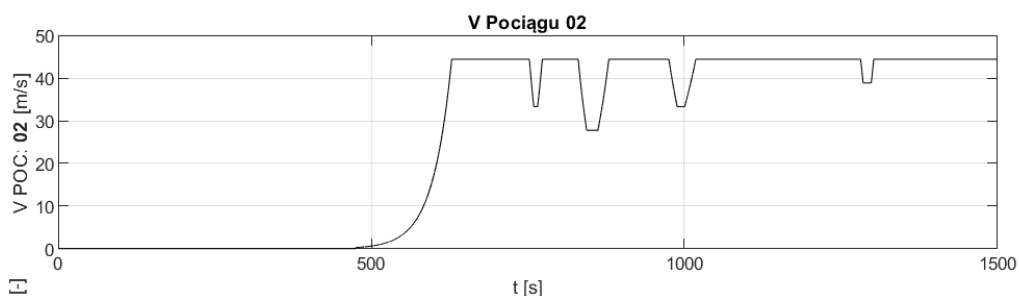
Rysunek 7-17. Przebieg zmian wartości współrzędnych początku i końca pociągu nr 2 – linia zielona oznacza czoło pociągu, a linia niebieska oznacza koniec pociągu (ze względu na przyjęte długości pociągu linie te praktycznie nakładają się na siebie na tym wykresie) [źródło: opracowanie własne]

W przypadku zastosowania przedstawionego zestawienia charakterystyk zmian prędkości jazdy obu pociągów w funkcji współrzędnej początku danego pociągu na szlaku nie wystąpiła potrzeba hamowania pociągu nr 2 przed żadnym z semaforów.

Kolejną symulację przeprowadzono w celu sprawdzenia, czy gdyby drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 zostały skrócone aż trzykrotnie (Rysunek 7-18) w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, to czy wystąpi konieczność hamowania pociągu nr 2 na którymkolwiek z semaforów. Przejazd pociągu nr 1 jadącego jako pierwszy na szlaku odbywał się według charakterystyki zmian prędkości zastosowanej w poprzedniej symulacji, czyli tej, którą przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1. Charakterystyka zmian prędkości jazdy pociągu nr 2 przedstawia Rysunek 7-19 i – jak wynika z przedstawionych wyników – nie zaszła potrzeba hamowania tego pociągu przed którymkolwiek z semaforów.



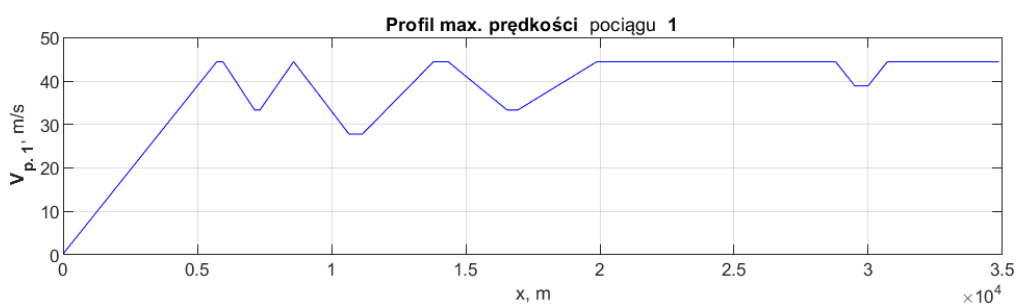
Rysunek 7-18. Charakterystyka zmian prędkości jazdy danego pociągu na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku, którą przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1 z tą różnicą, że drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały skrócone trzykrotnie [źródło: opracowanie własne]



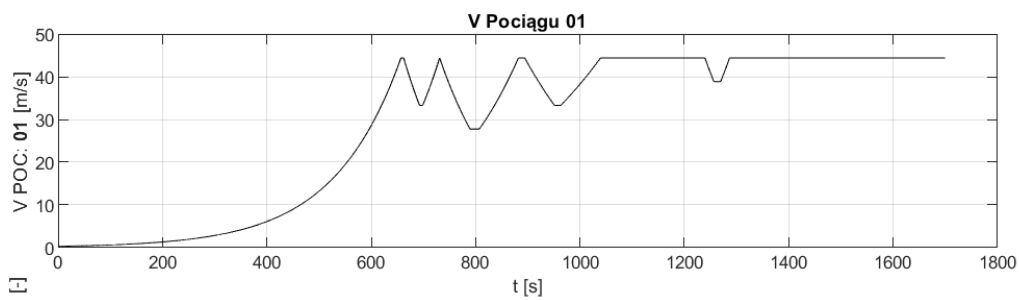
Rysunek 7-19. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 2 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały skrócone trzykrotnie [źródło: opracowanie własne]

Kolejne symulacje prowadzono w celu sprawdzenia wystąpienia konieczności hamowania pociągu nr 2 przed którymkolwiek z semaforów przy zwiększaniu drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 1 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, gdyby drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 zostały skrócone aż trzykrotnie (Rysunek 7-18).

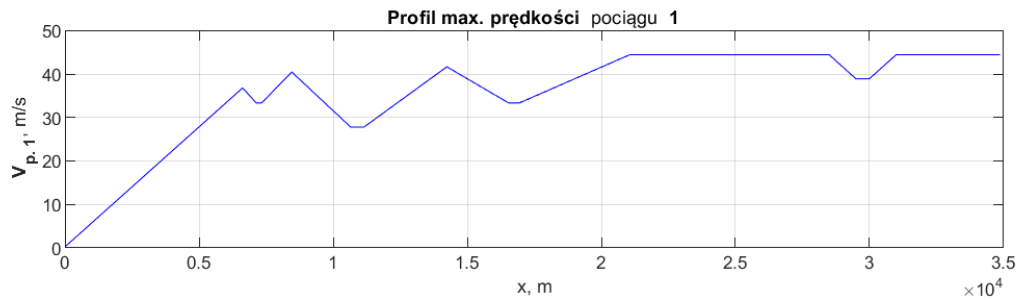
Dla przypadków, zwiększenia dróg przyspieszania i hamowania pociągu nr 1 w stosunku do tych charakterystyk, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, o 1,42 razy (Rysunek 7-20) i 2 razy (Rysunek 7-22), przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 przedstawiają odpowiednio Rysunek 7-21 i Rysunek 7-23. W obu przypadkach nie nastąpiła potrzeba hamowania przed którymkolwiek z semaforów na skutek wyświetlenia na nim sygnału pomarańczowego „S5”. W przypadku dwukrotnego zwiększenia dróg przyspieszania i hamowania, pociąg nr 1, w odróżnieniu od symulowanych wcześniej przypadków, pociąg nr 1 nie mógł osiągnąć maksymalnej prędkości 44,4 [m/s] (160 [km/h]) (Rysunek 7-22) przed pierwszym ograniczeniem prędkości, który przedstawia Rysunek 5-1a.



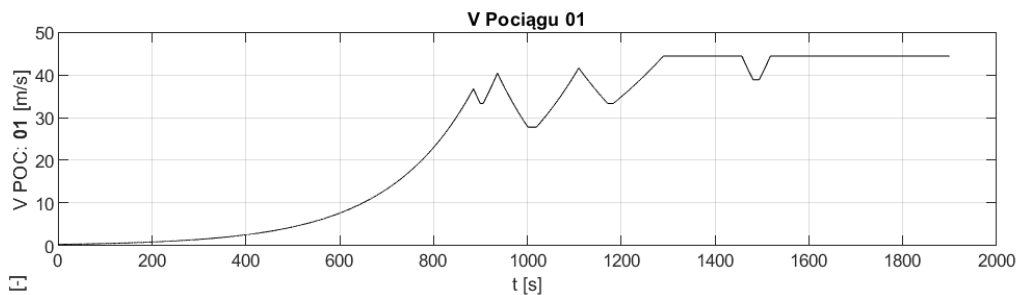
Rysunek 7-20. Charakterystyka zmian prędkości jazdy danego pociągu na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, z tą różnicą, że drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone o 1,43 razy [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 7-21. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone o 1,43 razy [źródło: opracowanie własne]

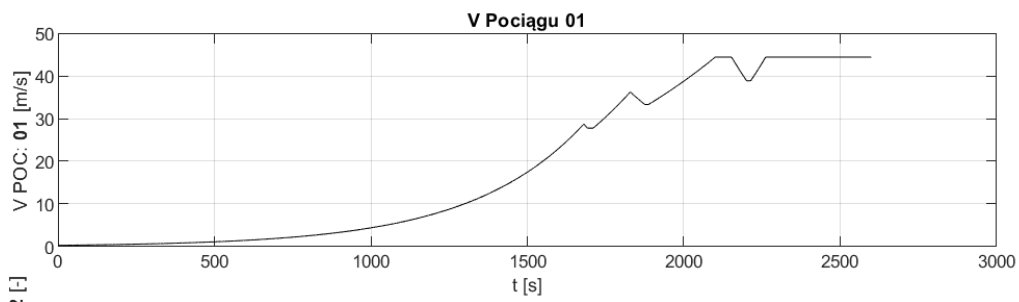


Rysunek 7-22. Charakterystyka zmian prędkości jazdy danego pociągu na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, z tą różnicą, że drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone 2 razy [źródło: opracowanie własne]

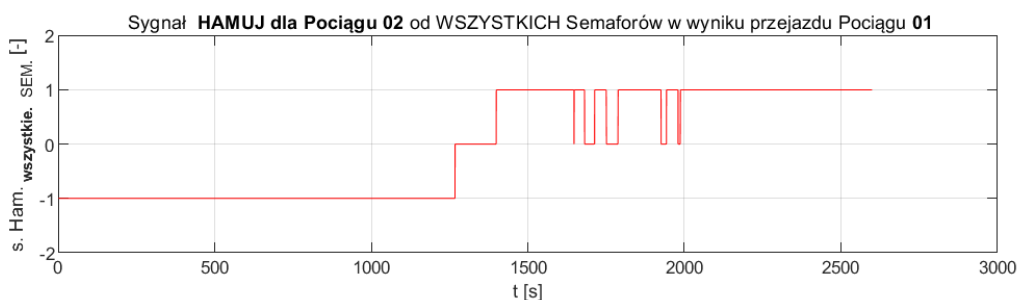


Rysunek 7-23. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne]

Natomiast w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 1 w stosunku do tych charakterystyk, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, zostały zwiększone czterokrotnie (Rysunek 5-1c), przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 przedstawia Rysunek 7-24. Należy zauważyć, że pociąg nr 1, realizując przejazd według tej charakterystyki prędkości w funkcji współrzędnej, na szlaku nie osiągał prędkości maksymalnej 44,4 [m/s] (160 [km/h]) (Rysunek 7-24) nawet przed drugim ograniczeniem prędkości, które przedstawia Rysunek 5-1. W tym przypadku nastąpiła już potrzeba hamowania pociągu nr 2 i przebieg czasowy sygnału „hamuj” przedstawia Rysunek 7-25. Hamowanie było wymagane przed semaforami nr 4, 5, 6, 9, 10.



Rysunek 7-24. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone czterokrotnie [źródło: opracowanie własne]

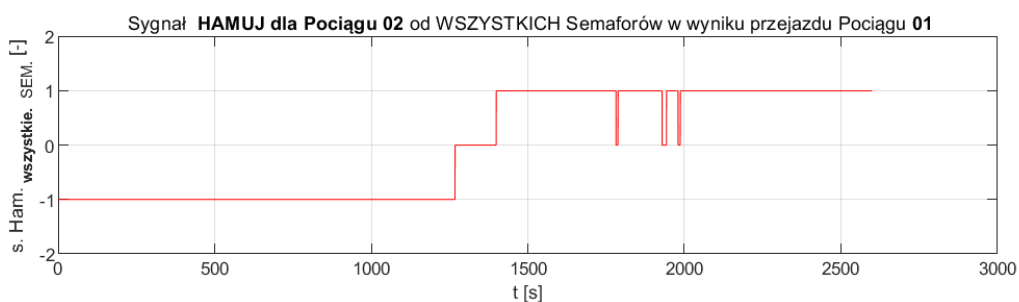


Rysunek 7-25. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, występujący w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 1 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, zostały zwiększone czterokrotnie, natomiast drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, zostały zmniejszone trzykrotnie [źródło: opracowanie własne]

Przeanalizowano również przypadek, w którym drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 w stosunku do tych charakterystyk, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, zostały zmniejszone dwukrotnie, natomiast drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 1 w stosunku do tych charakterystyk, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, pozostały zwiększone czterokrotnie (Rysunek 5-1c). Również w tym przypadku nastąpiła konieczność hamowania pociągu nr 2 w wyniku wystąpienia sygnału pomarańczowego „S5” (Rysunek 7-26), ale już tylko na semaforach nr 6, 9, 10.

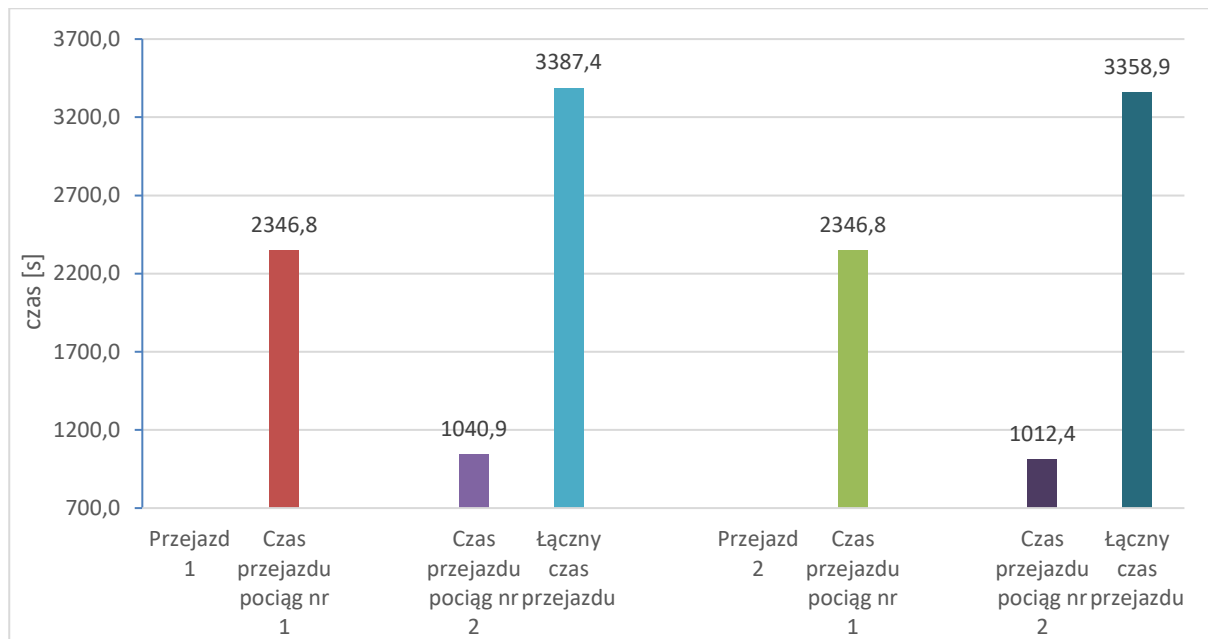
W celu lepszego zilustrowania zmian zachodzących podczas symulowanego przejazdu pociągów nr 1 i nr 2, Załącznik nr 7.3.1 przedstawia sygnały generowane zgodnie z przyjętymi założeniami przez wszystkie detektory kół. Sygnały generowane przez wszystkie semafony przedstawia Załącznik nr 7.3.2. Sygnały „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzące od wszystkich semaforów pokazuje Załącznik nr 7.3.3. Natomiast numery zakresów, w których znajdowały się pociąg nr 1 i pociąg nr 2 w poszczególnych chwilach czasowych przedstawia odpowiednio Załącznik nr 7.3.4 i Załącznik nr 7.3.5.

Warto również zauważyć, że pomimo istotnego wydłużenia drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 w tym przypadku, czas jego przejazdu wzrósł z 1038,6 [s] (w przypadku poprzedniego symulowanego przejazdu pociągu nr 2) o 2,3 [s], co stanowi wzrost o 2,2 promila.



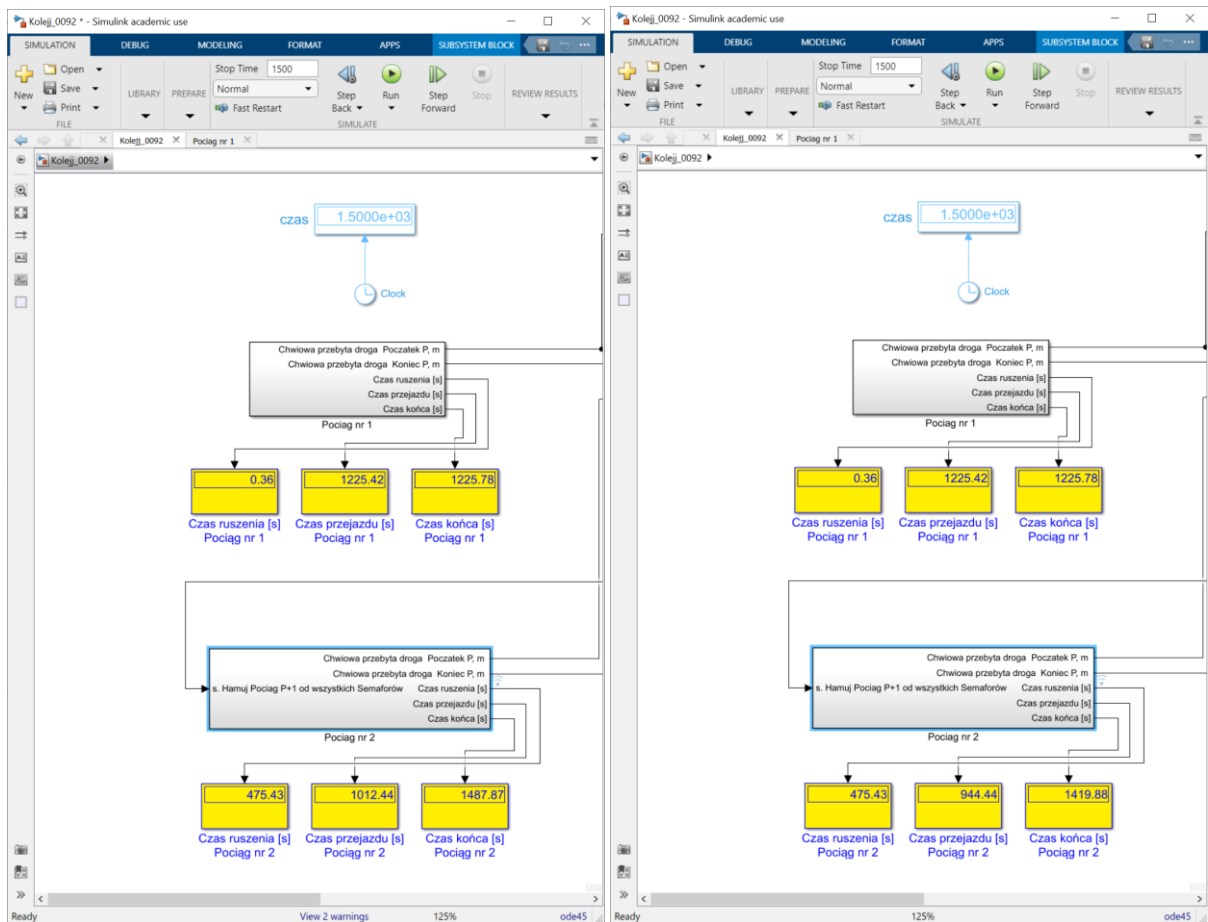
Rysunek 7-26. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów występujący w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 1 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, zostały zwiększone czterokrotnie, natomiast drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1 zostały zmniejszone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne]

W celu dalszego zmniejszenia czasu przejazdu pociągu nr 2, zastosowano opóźnienie jego startu wynoszące odpowiednio 28,5 [s], w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2. Spowodowało to, że przy przyjętych założeniach symulacji, że o taki czas zmniejszył się czas przejazdu pociągu nr 2 przez szlak, ale kolejna korzyść polega na tym, że pociąg ten nie musiał także hamować odpowiednio na semaforach nr 6, nr 9 oraz nr 10, a następnie ponownie przyspieszać. Oznacza to, że zaobserwowano skrócenie czasu przejazdu pociągu nr 2 w stosunku do poprzednio symulowanego przypadku z 1040,9 [s], do... tj.o 28,5 [s], czyli o 2,7 % (Rysunek 7-27).

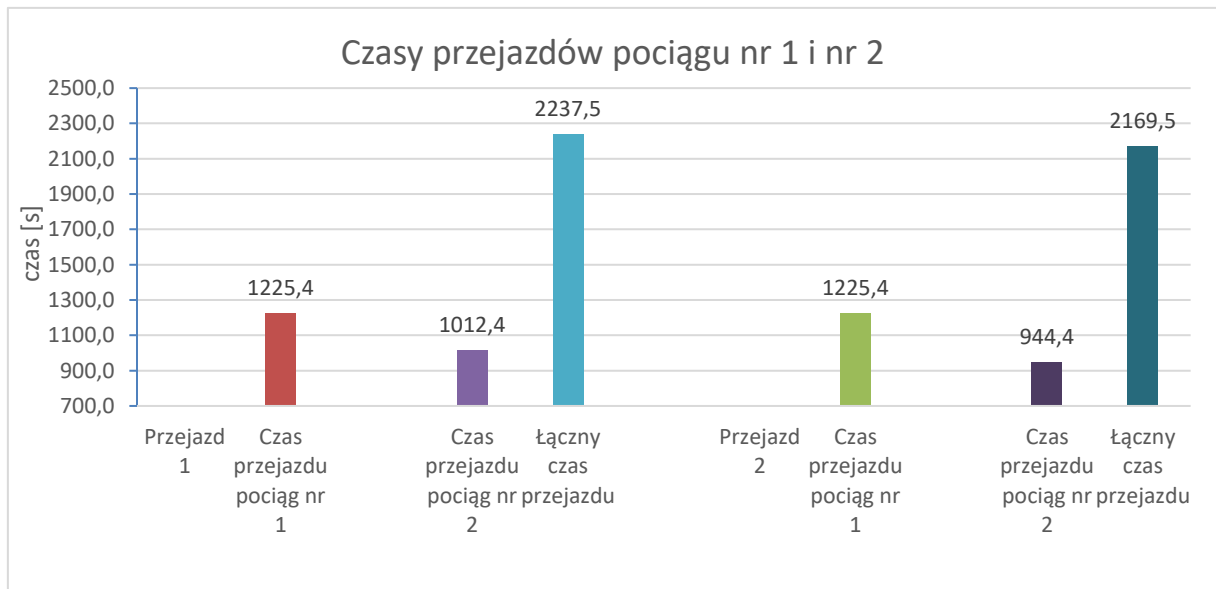


Rysunek 7-27. Czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 i łączny czas przejazdu obu pociągów w przypadku, gdy zastosowano różne opóźnienia startu pociągu nr 2, a drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1 zostały skrócone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne]

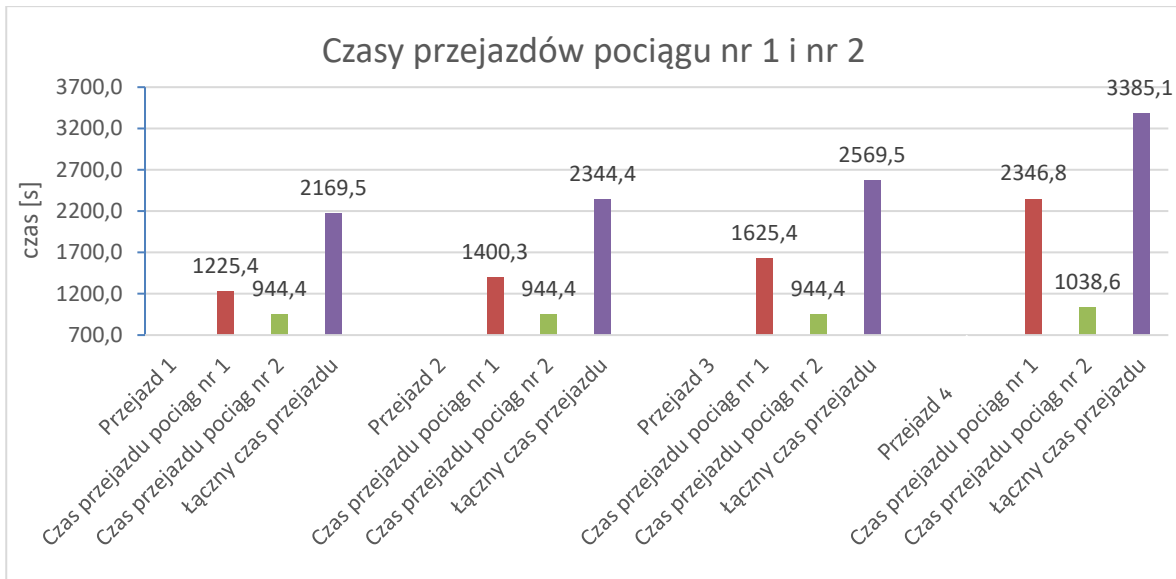
Rysunek 7-28 przedstawia przykładowe wyniki z symulacji czasu przejazdów pociągu nr 1 i pociągu nr 2, które zostały uzyskane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink. Rysunek 7-29 i Rysunek 7-30 przedstawiają zestawione czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 oraz łączny czas przejazdu obu pociągów uzyskane we wszystkich prezentowanych w niniejszym rozdziale symulacjach.



Rysunek 7-28. Przykładowe wyniki czasu przejazdu pociągów uzyskane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 7-29. Czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 oraz łączny czas przejazdu obu pociągów w przypadku, gdy dla pociągu nr 1 zastosowano profil zmian prędkości jazdy, który przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, a dla pociągu nr 2 zastosowano drogi przyspieszania i hamowania zmniejszone dwukrotnie (przejazd 1) i trzykrotnie (przejazd 2) w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1 [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 7-30. Czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 oraz łączny czas przejazdu obu pociągów w przypadku, gdy dla pociągu nr 2 zastosowano drogi przyspieszania i hamowania zmniejszone trzykrotnie w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b, a dla pociągu nr 1 zastosowano drogi przyspieszania i hamowania zwiększone o 1 (przejazd 1), 1,43 (przejazd 2), 2 (przejazd 3) i 4 razy (przejazd 4) w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b [źródło: opracowanie własne]

W rozdziale przedstawiono wyniki badań symulacyjnych z wykorzystaniem modelu jazdy pociągów oparciu o sygnalizację przytorową w celu przedstawienia wpływu zmian charakterystyki jazd pociągów w funkcji współrzędnej początku pociągu na szlaku na liczbę hamowań i czasy przejazdu pociągów przez szlak.

Zaprezentowane wyniki pozwalają na potwierdzenie poprawności działania oprogramowania symulacyjnego zgodnie z przyjętymi założeniami dla opracowanych modeli jazd pociągu. Przedstawione zmiany charakterystyk są teoretyczne z punktu widzenia praktyki (nie uwzględniają parametrów i czynników rzeczywistych), jednak pozwalają na ocenę wpływu zmian charakterystyk jazd pociągów na czas jazdy pociągu oraz łączny czas pociągów jadących po sobie.

7.4. Podsumowanie

W rozdziale 7.1 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dotyczących wpływu kontrolowanego opóźnienia (względem sygnału zezwalającego) wyprawienia kolejnego pociągu na szlak. Opóźnienie to ma na celu redukcję niezasadnego hamowania i ponownego przyspieszania pociągu w wyniku konfliktu ruchowego z poprzedzającym pociągiem („dogonienie” pociągu poprzedzającego) o znanej charakterystyce jazdy.

Przedstawione w rozdziale 7.1 wartości zmniejszenia czasu przejazdu pociągu nr 2 na skutek wprowadzenia kontrolowanego czasu wyprawiania kolejnych pociągów ze stacji na szlak wydają się być pozornie mało znaczące dla praktyki kolejowej, gdyż wynoszą zaledwie ok. 5% pierwotnego czasu przejazdu pociągu nr 2. Należy jednak zauważyć, że wartości te dotyczą zaledwie drugiego z pociągów jadących na szlaku, którego hamowania mogą wpłynąć na przebieg charakterystyki jazdy kolejnych pociągów. Ponadto, co istotne, przedstawione studium przypadku i wykorzystanie modelu ilustrują możliwość ograniczenia liczby hamowań pociągu na szlaku, a przez to ograniczenie czasów zajęć poszczególnych odstępów blokowych z uwagi na możliwe do wykluczenia hamowania pociągu i jego przyspieszenia na szlaku.

Na podstawie badań i analiz przedstawionych w rozdziałach 7.1, 7.2, 7.3 można stwierdzić, że celowe jest rozwijanie bardziej zaawansowanych metod sterowania ruchem kolejowym przez kontrolowane wyprawianie kolejnych pociągów ze stacji w oparciu o możliwości symulowania przejazdów pociągów bazujących na odpowiednim modelu matematycznym i programie symulacyjnym.

Praktyczna realizacja funkcjonalności związanej z kontrolowanym wyprawieniem pociągu na szlak może opierać się m.in. na:

- informacjach o danym pociągu uzyskane z systemu ETCS (dane statyczne pociągu dotyczące jego długości oraz numeru identyfikacyjnego);
- przyjęciu odpowiednich charakterystyk przyspieszania i hamowania pociągu (w oparciu o uczenie maszynowe);
- systemy automatyzacji nastawiania przebiegu.

Koncepcja ta mogłaby być implementowana w systemach wspomagających pracę dyżurnego ruchu, które nie wpływają na istniejące zależności w systemach srk, a więc i na bezpieczeństwo systemu kolei i prowadzenie ruchu kolejowego.

W rozdziale 7.2 przedstawiono wyniki symulacji dotyczących wpływu długości pociągu na możliwość ograniczenia łącznego czasu jazdy pociągów przez szlak. Przedstawione wyniki symulacji wydają się mało praktyczne, ale pozwalają na potwierdzenie możliwości stosowania modelu i oprogramowania symulacyjnego do badania zdolności przepustowej przy różnej strukturze rodzajowej pociągów, z różnymi długościami pociągów.

W rozdziale 7.3 przedstawiono wyniki symulacji dotyczących wpływu profilu prędkości przejazdu pociągu w funkcji współrzędnej początków i końcy pociągów na szlaku na liczbę hamowań i czasów przejazdów pociągów przez szlak. **Uzyskane rezultaty pozwalają potwierdzić poprawność: modelu i działania oprogramowania symulacyjnego, w zakresie możliwości wprowadzania różnych charakterystyk jazdy pociągów oraz ich wpływu na uzyskane czasy przejazdu danego pociągu i łączny czas przejazdu kolejnych pociągów.**

Uzyskane wyniki pozwalają również na stwierdzenie, że możliwe jest przyjęcie dla każdego z pociągów poruszających się po szlaku najbardziej korzystnego pod względem łącznego czasu przejazdu profilu prędkości jazdy pociągu na szlaku i na podstawie symulacji określenie, w jakich chwilach czasowych należałoby umożliwić wyjazd kolejnych pociągów na szlak, tak aby, realizując przejazd według zadanego profilu prędkości, nie musiały one tracić czasu na niezasadne hamowanie i ponowne przyspieszanie w wyniku konfliktu ruchowego z poprzedzającym pociągiem („dogonienie” pociągu poprzedzającego). Profil taki mógłby być dostarczany przez producenta pojazdu trakcyjnego w wyniku przeprowadzanych przez niego badań i wymagany w specyfikacji istotnych warunków zamówienia lub wyznaczany dynamicznie dla danego składu pociągu na zasadzie uczenia maszynowego. Kontrolowane wypuszczanie pociągu na szlak oraz kontrola jazdy pociągu według najbardziej korzystnego profilu prędkości mogłyby być kontrolowane przez systemy służące do automatyzacji prowadzenia pociągu (ang. ATO, Automatic Train Operation), a zmienne w czasie dane dla tego systemu mogą być dostarczane poprzez radiołącność pomiędzy pociągiem a urządzeniami przytorowymi. Przedstawione podejście wskazuje na to, że w celu realizacji zaproponowanej idei zasadne jest rozwijanie zaawansowanych systemów kierowania i sterowania ruchem kolejowym. Przykłady przedstawione w niniejszym rozdziale ilustrują zatem, jak ważne jest odpowiednie dobieranie parametrów przejazdu pociągów, w tym profilu zmian prędkości przejazdu pociągów w funkcji współrzędnej początku pociągu na szlaku oraz opóźnienia startu kolejnego z pociągów, a także, jaki może być wpływ tych parametrów na liczbę możliwych do wyeliminowania niepotrzebnych hamowań i przyspieszeń pociągu oraz zwiększenia zdolności przepustowej szlaku i jakie możliwości stwarza prowadzenie symulacji bazujących na odpowiednim modelu.

8. Sprawdzenie opracowanego modelu jazdy pociągu w oparciu o raportowaną pozycję pociągu

Model szlaku, w którym współrzędne umiejscowienia kolejnych semaforów początkowych na szlaku przedstawia Tabela 6-1, został w oprogramowaniu MATLAB&Simulink uzupełniony o dodatkowy podział odstępów z wykorzystaniem semaforów i detektorów wirtualnych. W niniejszym rozdziale przedstawiono i zweryfikowano macierze zawierające współrzędne semaforów i detektorów wirtualnych. Sprawdzone również działanie modelu przez skontrolowanie prawidłowości oddziaływania wirtualnych detektorów i wirtualnych semaforów na jazdę pociągu pod nadzorem systemu ETCS.

8.1. Sprawdzenie wygenerowania współrzędnych semaforów i detektorów wirtualnych

Dla potrzeb przeprowadzenia sprawdzenia określono macierze współrzędnych umiejscowienia dodatkowych semaforów wirtualnych między istniejącym podziałem szlaku na odstępy klasyczne, który przedstawia Tabela 6-1.

Konwencjonalny podział na odstępy blokowe ma charakter dyskretny. Można go rozwinąć, dzieląc stałe odstępy na kolejne. Przy określaniu minimalnej długości sekcji wirtualnej, należy wziąć pod uwagę następujące parametry i ograniczenia techniczne:

1. długości pociągów poruszających się po linii raportujących swoją pozycję – w zależności od struktury rodzajowej, należy przyjmować długość nie krótszą od najdłuższego pociągu poruszającego się z największą dopuszczalną prędkością;
2. możliwość zaraportowania przez pociąg przynajmniej raz pozycji pociągu znajdującego się w ramach wirtualnej odległości.

Z tego też względu rozważono następujące trzy konfiguracje z dodatkowym podziałem klasycznych odstępów, na odstępy blokowe z wykorzystaniem semaforów i detektorów wirtualnych:

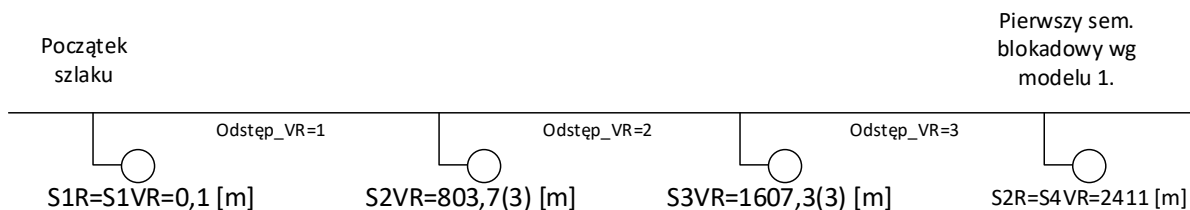
1. Liczba wirtualnych dekoderek: **2** (`Il_Sem_VIR_miedzy_REAL=2`);
2. Liczba wirtualnych dekoderek: **1** (`Il_Sem_VIR_miedzy_REAL=1`);
3. Liczba wirtualnych dekoderek: **0** (`Il_Sem_VIR_miedzy_REAL=0`).

W modelu przyjęto następujące oznaczenia:

- S_xR – semafor rzeczywisty, gdzie „x” to kolejny numer semafora;
- S_yVR – semafor wirtualny, gdzie „y” to kolejny numer semafora wirtualnego.

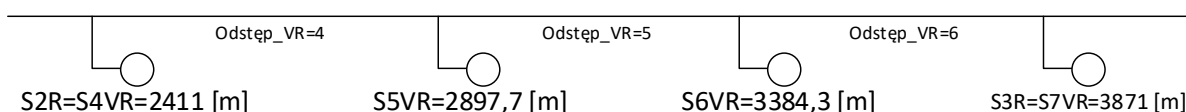
Analizując podział pierwszego odległości rzeczywistego dla przypadku nr 1 (`Il_Sem_VIR_miedzy_REAL=2`), współrzędną lokalizacji semaforów wirtualnych przedstawia Rysunek 8-1.

W modelu przyjęto, że kolejny pociąg może zostać wyprawiony na szlak za semafor $S1R=S1VR$, jeżeli poprzedzający pociąg osiągnie całą swoją długością odległość $VR3$, tzn. minie współrzędną semafora $S3VR$. Założenie to wynika z potrzeby zapewnienia braku oddziaływania poprzedzającego pociągu na wyprawiany pociąg w czasie jego przyspieszania.

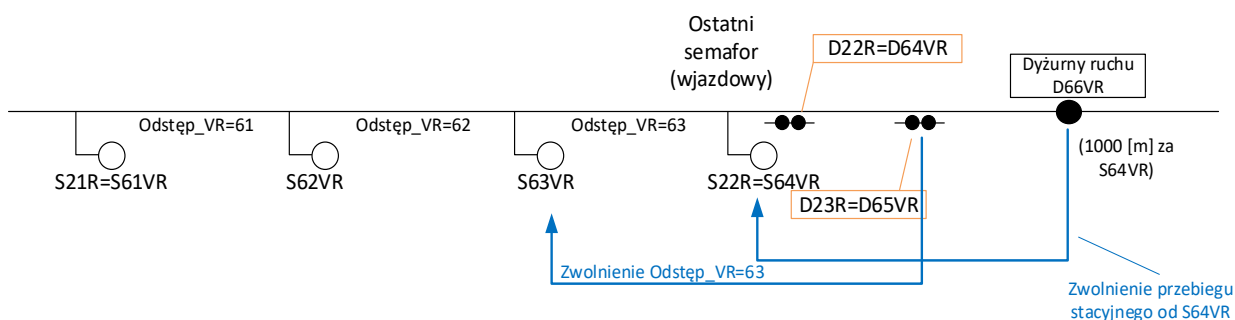


Rysunek 8-1. Dodatkowy podział pierwszego, rzeczywistego odstępu w oparciu o odstępy wirtualne [źródło: opracowanie własne]

Analizę dodatkowego podziału odstępu, z wykorzystaniem wirtualnych semaforów i detektorów, przeprowadzono również dla kolejnych odstępu rzeczywistych. Przykładowo, dla odstępu 2 dodatkowy podział przedstawia Rysunek 8-2, natomiast dla ostatniego odstępu Rysunek 8-3. Rysunek 8-3 prezentuje również oddziaływanie poszczególnych detektorów na semafony wirtualne. W zakresie rozmieszczenia detektorów za ostatnim semaforem, jak również uwzględnienie w modelu działania dyżurnego ruchu przyjęto te same założenia co dla modelu jazdy pociągów w oparciu o sygnalizację przytorową. Różnica dotyczy wyłącznie oddziaływania na wprowadzone semafony wirtualne. Z wyjątkiem detektorów D64VR, D65VR oraz D66VR (odpowiadających dyżurnemu ruchowi), współrzędne pozostałych detektorów przyjęto jako równe współrzędnej lokalizacji semaforów.



Rysunek 8-2. Dodatkowy podział drugiego, rzeczywistego odstępu w oparciu o odstępy wirtualne [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 8-3. Dodatkowy podział na ostatnim, rzeczywistym odstępie w oparciu o odstępy wirtualne [źródło: opracowanie własne]

Z przedstawionych powyżej założeń wynikają następujące zależności:

1. Liczba semaforów rzeczywistych = 22
2. Wprowadzenie dodatkowych semaforów wirtualnych:
S1R S1VR S2VR S2R S1VR S2VR ... S21R Sn-1VR SnVR S22R

Dla analizowanego szlaku:

$21 \cdot 3 = 63$ (liczba semaforów rzeczywistych oraz wirtualnych umiejscowionych w zakresie semaforów rzeczywistych od S1R do S21r)

$1 \cdot 1 = 1$ (semafor nr S22R)

Suma: **64** semafony

3. Liczba detektorów:

64 (łącznie z detektorem umiejscowionym 15 [m] za semaforem rzeczywistym S22R – S64VR)

1 (detektor umiejscowiony 100 [m] za semaforem S23R (S65VR))

1 (detektor odpowiadający dyżurnemu ruchu nr 66)

Suma: **66** detektorów

Dla pozostałych konfiguracji dotyczących liczby zastosowanych wirtualnych odstępów, tj: $Il_Sem_VIR_miedzy_REAL=1$ oraz $Il_Sem_VIR_miedzy_REAL=0$ obliczono analogicznie liczbę semaforów i detektorów, co prezentuje Tabela 8-1.

Tabela 8-1 Liczba semaforów i detektorów użytych w modelu przy konfiguracjach dodatkowego podziału odstepu z wykorzystaniem semaforów i detektorów wirtualnych

Il_Sem_VIR_miedzy_REAL	0	1	2
Semafony	22	43	64
Detektory	24	45	66

Źródło : opracowanie własne

Na podstawie przedstawionych w niniejszym rozdziale analiz można sformułować następujące obserwacje:

- Przy 2 dodatkowych wirtualnych semaforach, detektor D66VR odpowiada dyżurnemu ruchu w modelu jazdy pociągu w oparciu o sygnalizację przytorową (rozdział 5.1, założenie XVIII).
- Przy 1 dodatkowym wirtualnym semaforze, detektor D45VR odpowiada dyżurnemu ruchu w modelu jazdy pociągu w oparciu o sygnalizację przytorową (rozdział 5.1, założenie XVIII).
- Przy 2 dodatkowych wirtualnych semaforach, detektor D65VR odpowiada detektorowi umiejscowionemu 100 [m] za ostatnim semaforem w modelu jazdy pociągu w oparciu o sygnalizację przytorową (rozdział 5.1, założenie XVIII).
- Przy 1 dodatkowym wirtualnym semaforze, D44VR odpowiada detektorowi umiejscowionemu 100 [m] za ostatnim semaforem w modelu jazdy pociągu w oparciu o sygnalizację przytorową (rozdział 5.1, założenie XVIII).

Oprócz tego standardowo przyjęto detektor zlokalizowany 15 [m] za ostatnim semaforem, i w zależności od liczby wstawianych wirtualnych semaforów, oznaczono nr 64 lub 43, lub 22, czyli jego jego numer odpowiada semaforowi, do którego on przynależy.

8.2. Sprawdzenie pracy wirtualnych detektorów i wirtualnych semaforów i ich oddziaływania na zezwolenie na jazdę

W rozdziale przedstawiono sprawdzenie działania wirtualnych detektorów i wirtualnych semaforów na pociąg jadący pod nadzorem systemu ETCS.

W celu sprawdzenia pracy wirtualnych detektorów, wirtualnych semaforów i ich oddziaływania na pociąg jadący pod kontrolą systemu ETCS wykonano symulację przejazdu pociągu P. Podczas przejazdu pociągu zarejestrowano charakterystyki współrzędnych końca pociągu P oraz nr semafora i jego współrzędne określające miejsce zatrzymania następnego pociągu P+1 w danej chwili czasowej.

Sprawdzono wszystkie trzy konfiguracje dodatkowych wirtualnych i detektorów i wirtualnych semaforów wstawionych na analizowany szlak jako dodatkowy podział klasycznego odstępu, tj.:

1. Liczba wirtualnych dekoderek: **2** (I1_Sem_VIR_miedzy_REAL=2);
2. Liczba wirtualnych dekoderek: **1** (I1_Sem_VIR_miedzy_REAL=1);
3. Liczba wirtualnych dekoderek: **0** (I1_Sem_VIR_miedzy_REAL=0).

Ad. 1. Liczba dodatkowych wirtualnych dekoderek i semaforów : **2** (I1_Sem_VIR_miedzy_REAL=2)

Współrzędne semaforów i detektorów przy analizowanej konfiguracji szlaku zapisane w postaci macierzy w modelu szlaku przedstawiają się następująco:

Wsp_Sem_REAL_i_VIR_na_szlaku =

1.0e+04 *

Columns 1 through 11

0.0000	0.0804	0.1607	0.2411	0.2898	0.3384	0.3871	0.4437	0.5002
0.5568	0.6060							

Columns 12 through 22

0.6551	0.7043	0.7559	0.8076	0.8592	0.9199	0.9805	1.0412	1.1174
1.1937	1.2699							

Columns 23 through 33

1.3173	1.3646	1.4120	1.4668	1.5217	1.5765	1.6525	1.7284	1.8044
1.8594	1.9143							

Columns 34 through 44

1.9693	2.0367	2.1042	2.1716	2.2315	2.2913	2.3512	2.3997	2.4482
2.4967	2.5502							

Columns 45 through 55

2.6038	2.6573	2.7060	2.7546	2.8033	2.8489	2.8945	2.9401	2.9869
3.0337	3.0805							

Columns 56 through 64

3.1272	3.1739	3.2206	3.2643	3.3081	3.3518	3.3971	3.4424	3.4877
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

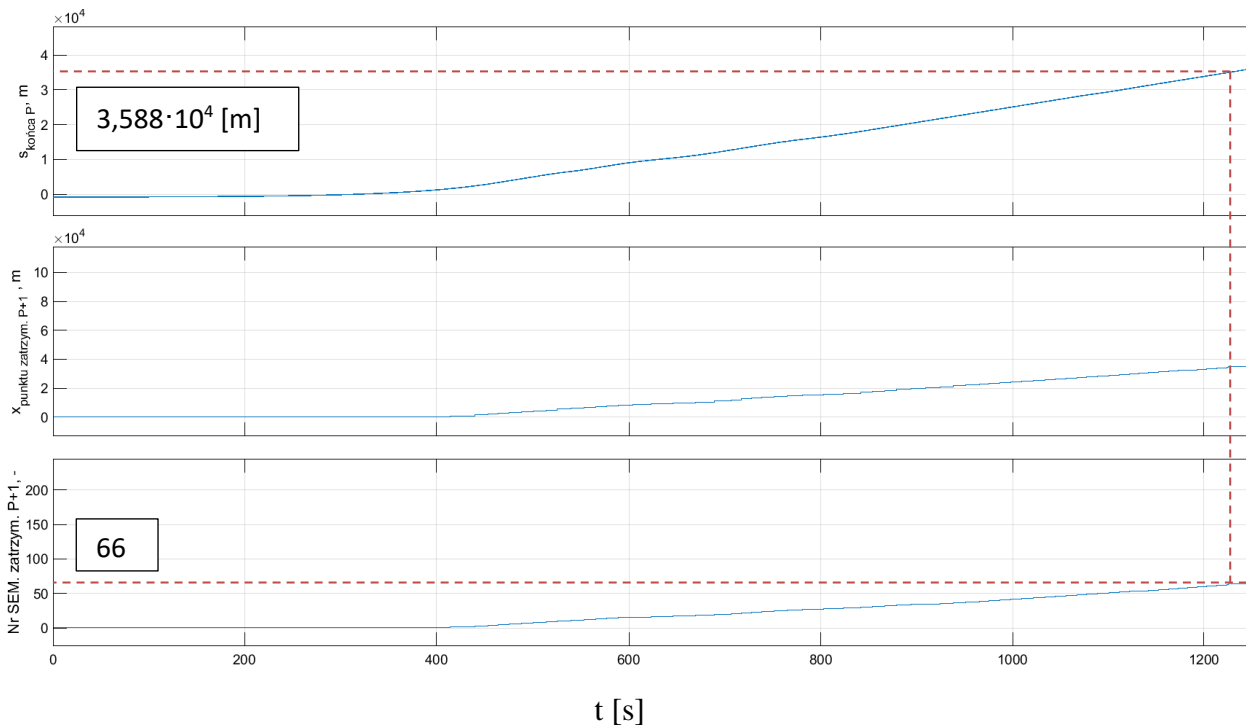
Wsp_DETEKT_REAL_i_VIR_na_szlaku =

1.0e+04 *

Columns 1 through 11

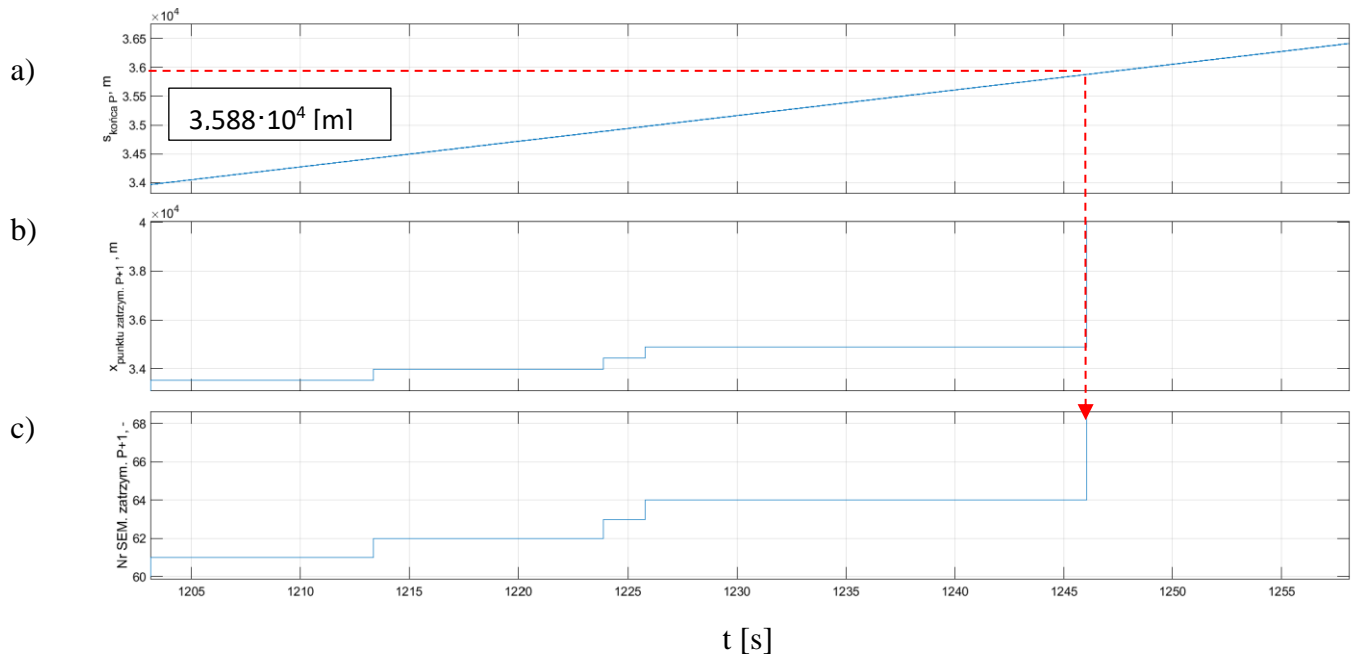
0.0100	0.0804	0.1607	0.2426	0.2898	0.3384	0.3886	0.4437	0.5002
0.5583	0.6060							

Columns 12 through 22								
0.6551	0.7058	0.7559	0.8076	0.8607	0.9199	0.9805	1.0427	1.1174
1.1937	1.2714							
Columns 23 through 33								
1.3173	1.3646	1.4135	1.4668	1.5217	1.5780	1.6525	1.7284	1.8059
1.8594	1.9143							
Columns 34 through 44								
1.9708	2.0367	2.1042	2.1731	2.2315	2.2913	2.3527	2.3997	2.4482
2.4982	2.5502							
Columns 45 through 55								
2.6038	2.6588	2.7060	2.7546	2.8048	2.8489	2.8945	2.9416	2.9869
3.0337	3.0820							
Columns 56 through 66								
3.1272	3.1739	3.2221	3.2643	3.3081	3.3533	3.3971	3.4424	3.4892
3.4977	3.5877							

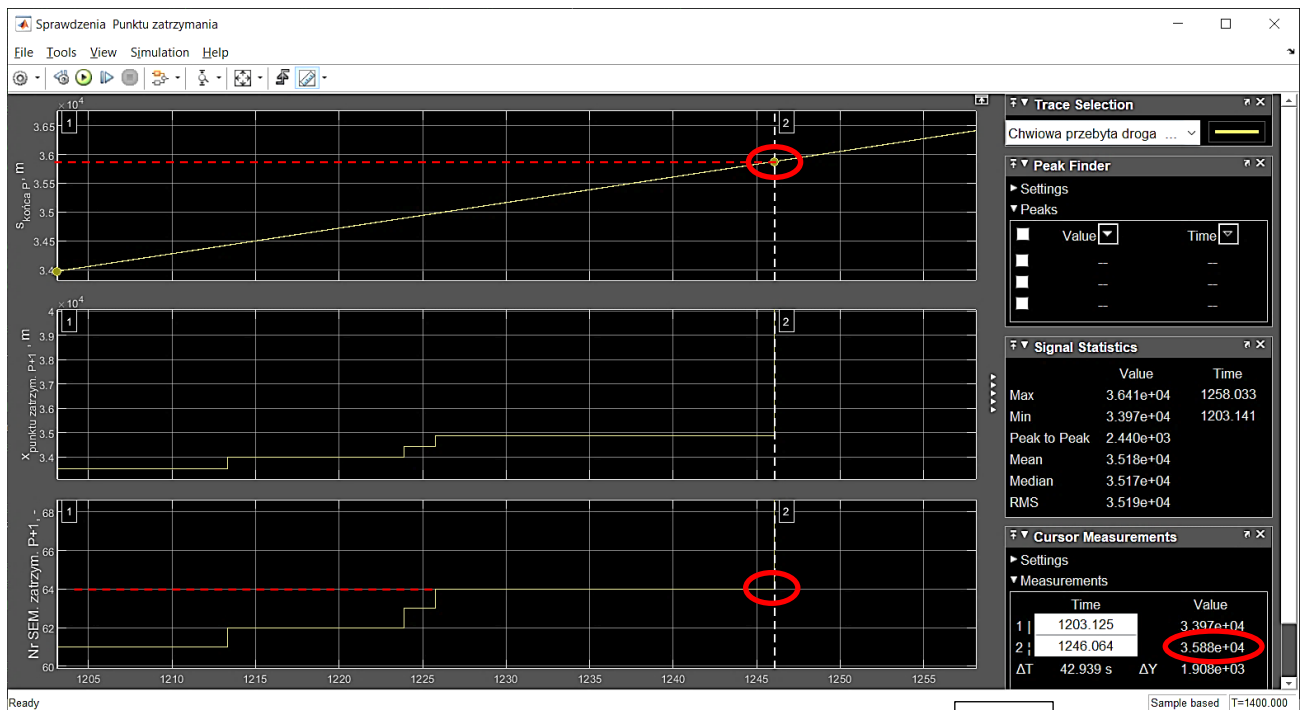


Rysunek 8-4. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 dla całego szlaku [źródło: opracowanie własne]

Rysunek 8-4 przedstawia przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz przebiegi pokazujące nr semafora i jego współrzędnę określające miejsce zatrzymania (końca zezwolenia na jazdę) dla kolejnego pociągu P+1 dla całego szlaku. Rysunek 8-5 przedstawia natomiast powiększenie wyżej wymienionych przebiegów dla końca szlaku. Rysunek 8-5 przedstawia sytuację, kiedy po minięciu przez koniec pociągu P detektora oznaczonego jako D66VR (**dyżurny ruchu**) na współrzędnej 35 877 [m] (wartość zobrazowana jako *valve* dla znacznika nr 2 = 3588·e+04, który przedstawia Rysunek 8-6, różnica wartości wynika ze sposobu obrazowania przez oprogramowanie symulacyjne), **następuje odblokowanie semafora 64 dla pociągu P+1**. Oznacza to podanie zezwolenia na jazdę dla pociągu P+1 za semafor 64, czyli możliwy jest wjazd na stację przez pociąg P+1.



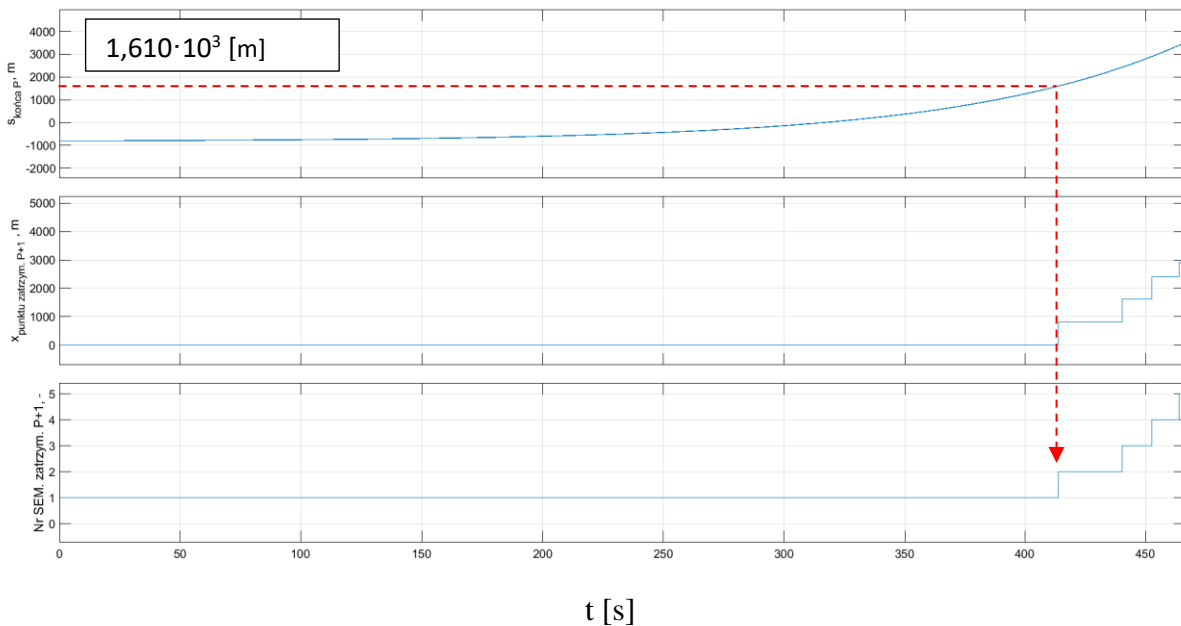
Rysunek 8-5. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 dla ostatnich semaforów na szlaku [źródło: opracowanie własne]



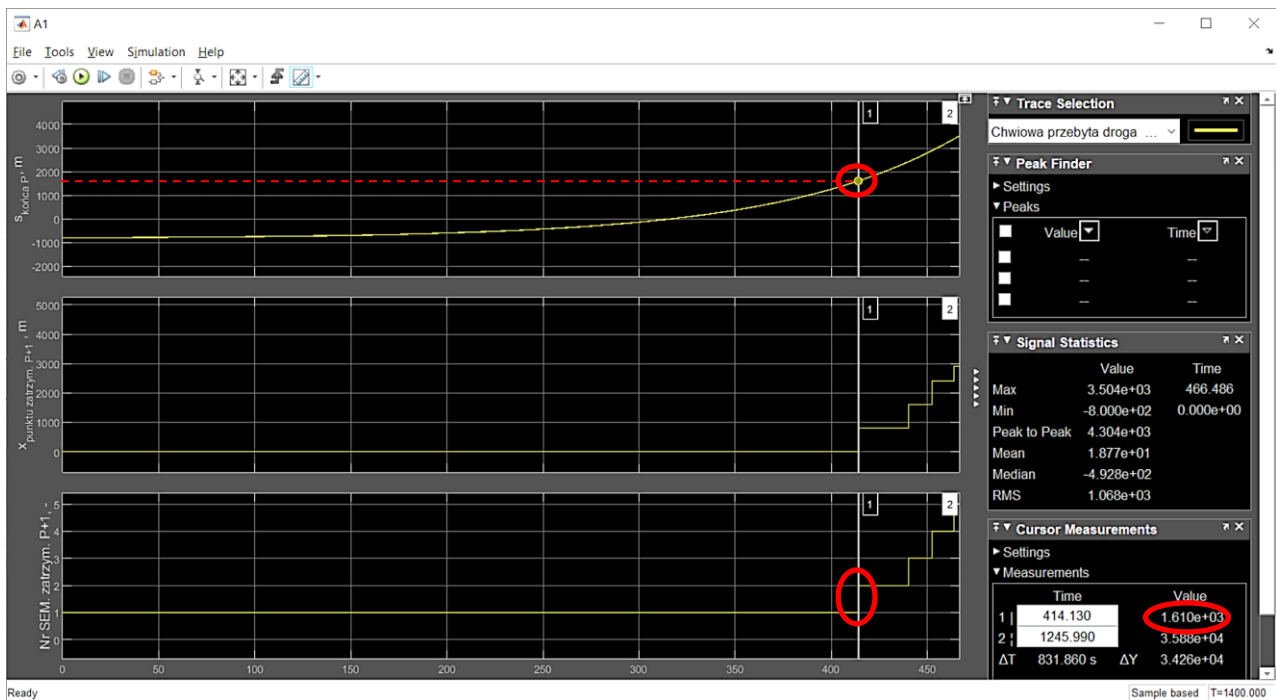
Rysunek 8-6. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla ostatnich semaforów na szlaku pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników [źródło: opracowanie własne]

W kolejnym etapie sprawdzono początek przebiegu. Rysunek 8-7 pokazuje, że kiedy koniec pociągu P minął **dekoder trzeciego semafora** na współrzędnej 1607 [m] (wartość zobrazowana jako *valve* dla znacznika nr 1 = $1.610 \cdot e+03$ – Rysunek 8-8), to następuje odblokowanie

semafora nr 1. Oznacza to możliwość jazdy pociągu P+1 do **semafora nr 2** (wartość zobrazowana jako x-punktu zatrzymania P+1= ok. 808 [m]<1000 [m] na wykresie – Rysunek 8-7).

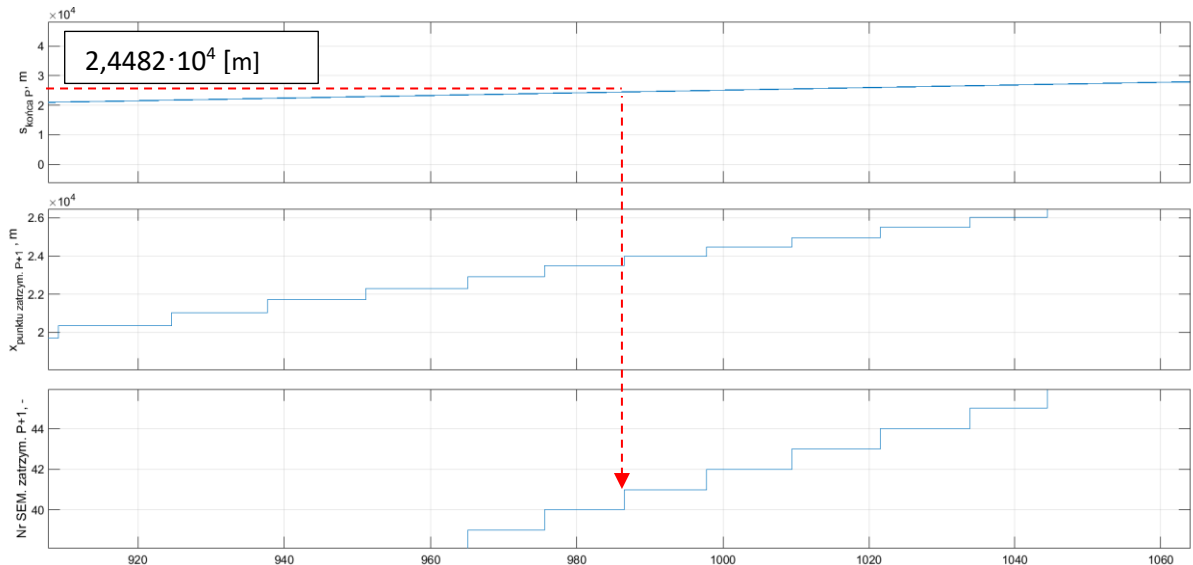


Rysunek 8-7. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 pierwszych semaforów na szlaku [źródło: opracowanie własne]

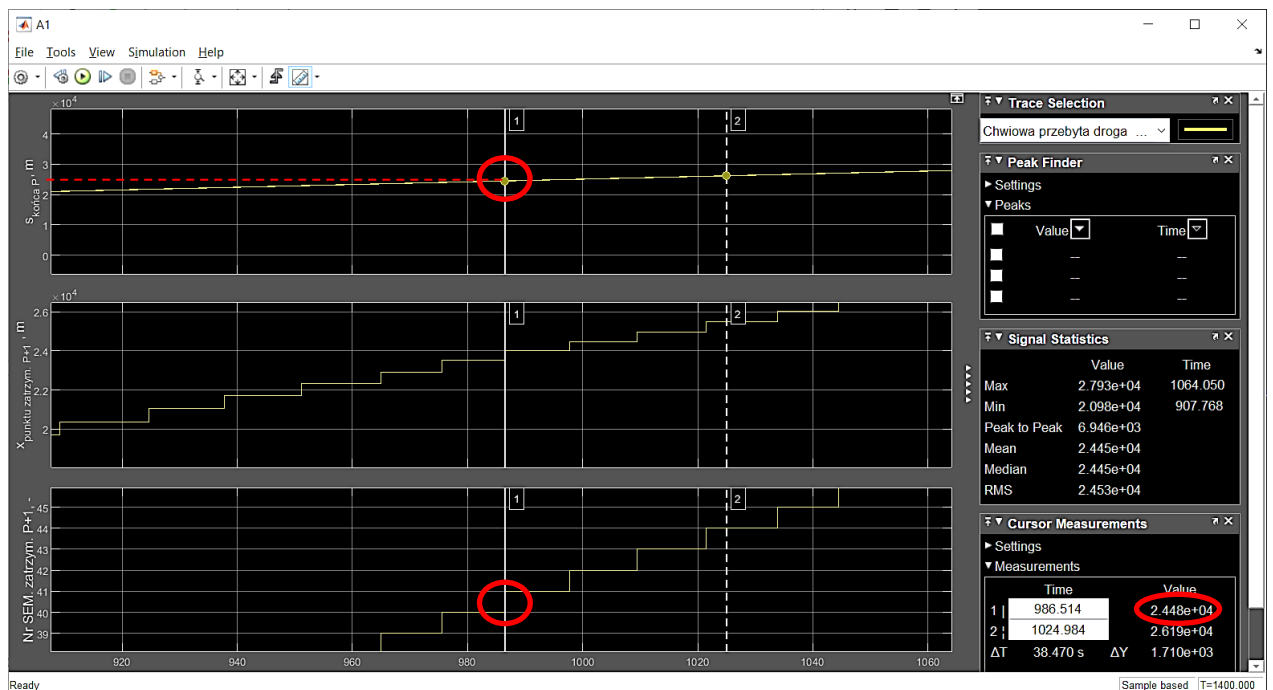


Rysunek 8-8. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla pierwszych semaforów na szlaku pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników [źródło: opracowanie własne]

Sprawdzono również działanie wirtualnych detektorów i semaforów na środku szlaku. Rysunek 8-9 pokazuje, że kiedy koniec pociągu P minął współrzędną **detektora 42 semafora** (na współrzędnej 24 482 [m]) (wartość zobrazowana jako *valve* dla znacznika nr 1 = $2.448 \cdot e+04$ – Rysunek 8-10, różnica wartości wynika ze sposobu obrazowania przez oprogramowanie symulacyjne), to odblokowany zostaje **semafor nr 40**. Oznacza to możliwość jazdy pociągu P **do semafora nr 41** (wartość zobrazowana jako x-punktu zatrzymania P+1= ok 23 997 [m] – $2,4482 \cdot 10^4$ [m] Rysunek 8-9).



Rysunek 8-9. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 dla środka szlaku [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 8-10. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla środka szlaku pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników [źródło: opracowanie własne]

Opisane w niniejszym rozdziale sprawdzenia dla początku, środka i końca szlaku potwierdzają działanie modelu zgodnie z założeniami przedstawionymi w rozdziale 5.2 dla konfiguracji z dodatkowym podziałem odstępu z wykorzystaniem dwóch dodatkowych semaforów wirtualnych.

Sprawdzenie pracy wirtualnych detektorów i wirtualnych semaforów i ich oddziaływania na jazdę pociągu pod nadzorem systemu ETCS dla pozostałych konfiguracji szlaku, tj. gdy:

- liczba wirtualnych dekoderek: **1** (Il_Sem_VIR_miedzy_REAL=**1**);
- liczba wirtualnych dekoderek: **0** (Il_Sem_VIR_miedzy_REAL=**0**).

przedstawia Załącznik nr 8.1.1

8.3. Podsumowanie

Przedstawione w rozdziale 8.2 sprawdzenie pracy wirtualnych detektorów i wirtualnych semaforów i wpływu na jazdę pociągu pod nadzorem systemu ETCS w oprogramowaniu symulacyjnym dało wynik pozytywny. Pozwala to potwierdzić poprawność działania oraz zgodność z założeniami (przedstawionymi w rozdziale 5.2) modelu i oprogramowania symulacyjnego w zakresie:

- pracy detektorów i generowanych przez nie sygnałów na podstawie przejazdu pociągu;
- poprawności odblokowania semaforów dla kolejnego pociągu P+1 w zakresie możliwości wydłużenia zezwolenia na jazdę w wyniku przejazdu pociągu P;
- poprawności uwzględnienia w oprogramowaniu symulacyjnym geografii wprowadzonego szlaku z dodatkowym podziałem odstępu (długości poszczególnych odstępów blokowych, odległości detektorów stanowiących punkty oddziaływania od odpowiadających im semaforów).

9. Badania zdolności przepustowej

9.1. Rzeczywiste charakterystyki jazd pociągów

9.1.1. Analiza procesów hamowania i przyspieszania pociągu w oparciu o dane z pomiarów

W przypadku modelowania zjawisk fizycznych istotne jest wprowadzenie do modelu danych rzeczywistych. W celu uwzględnienia w oprogramowaniu symulacyjnym, dla którego założenia opisano w rozdziale 5, rzeczywistych danych dotyczących charakterystyk jazd pociągów, zarejestrowano dane dotyczące procesu przyspieszania i hamowania dwóch typów pociągów. Pociągi te należą do jednego z przewoźników kolejowych operujących na terenie województwa śląskiego.

W pracy, ze względu na wymóg zachowania poufności, nie będą przedstawiane dane pozwalające na identyfikację typu pojazdu kolejowego, z którego uzyskano dane, jak również dane pozwalające na jednoznaczną identyfikację jazdy handlowej, z której pozyskano dane.

Zarejestrowane dane pochodzą z rejestratorów pojazdowych do celów prawnych, zabudowanych na pojazdach trakcyjnych i służących do rejestracji parametrów jazdy pociągu oraz parametrów pracy maszynisty. Zakres zarejestrowanych parametrów dotyczył prędkości, ale jednocześnie rejestrowana była droga jazdy oraz czas. Dane uzyskano dla dwóch typów pojazdów kolejowych nazwanych dla potrzeb niniejszej pracy jako:

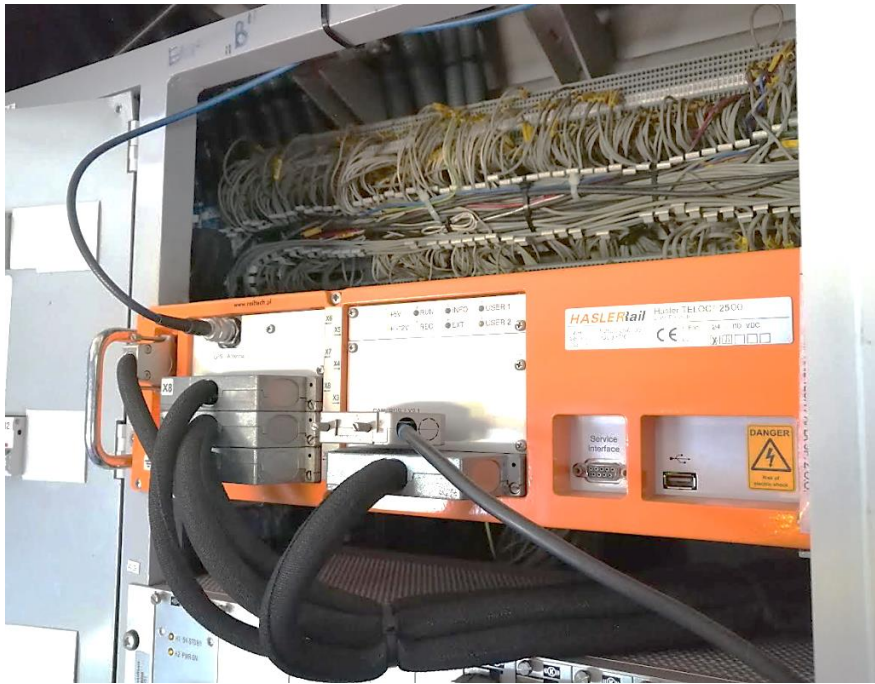
- pojazd typu A – trójczłonowy elektryczny zespół trakcyjny, wyposażony w rejestrator danych Hasler TELOC 3000;
- pojazd typu B – czteroczłonowy elektryczny zespół trakcyjny, wyposażony w rejestrator danych Hasler TELOC 2500.

Obydwa typy pojazdów są dopuszczone do eksploatacji dla jazd z prędkością maksymalną wynoszącą 160 [km/h], jednak z uwagi na ograniczenia infrastruktury, zarejestrowane dane pomiarowe dotyczą jazd z prędkością maksymalną do 120 [km/h]. Wynika to z maksymalnej prędkości odcinków linii kolejowej, na których były rejestrowane dane. Pociąg 1 dodatkowo był wyposażony w urządzenia pokładowe systemu ERTMS/ETCS, jednak system ten był wyizolowany od układów pojazdu i pozyskane dane nie obejmują jazd pod nadzorem tego systemu.

Rejestrator danych Hasler TELOC wykorzystuje optyczny generator impulsów zainstalowany na osi pojazdu. Dla dwóch tych pociągów, dla których pozyskano dane, stosowana jest konfiguracja z dwoma niezależnymi generatorami impulsów zainstalowanymi na dwóch niezależnych osiach. Obydwie osie nie są osiami napędnymi.

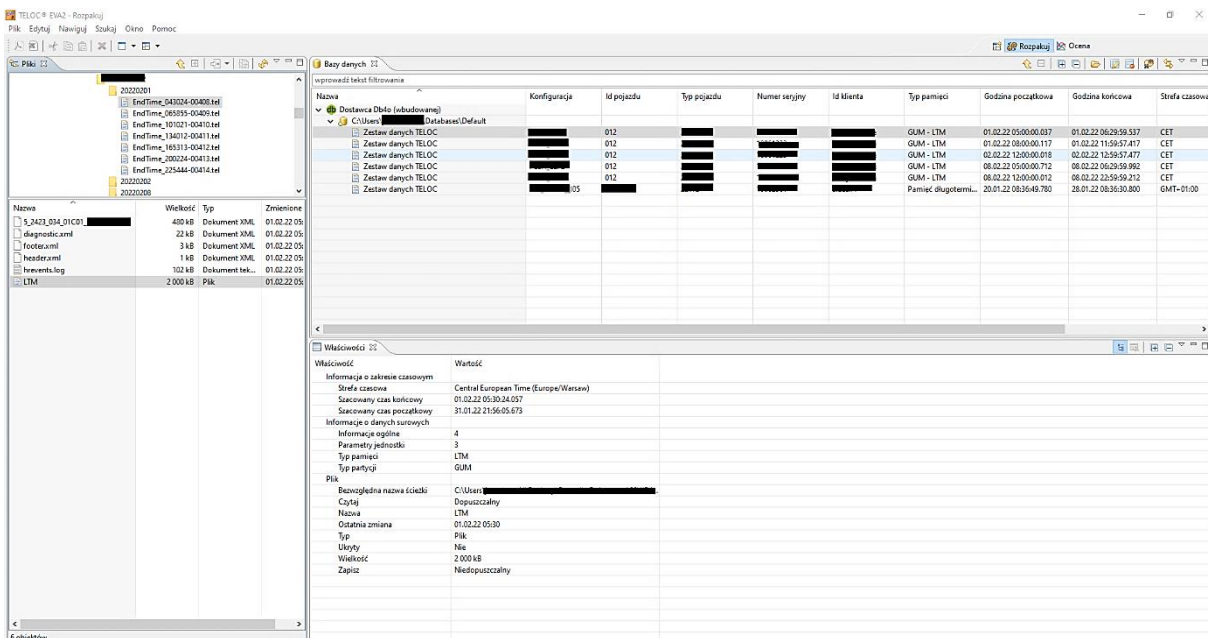
Widok rejestratora Hasler TELOC zainstalowany na pojeździe trakcyjnym użytym do rejestracji danych jako pociąg typu A przedstawia Rysunek 9-1.

Oprogramowanie użyte do importu danych z rejestratorów zainstalowanych na obydwu pojazdach i ich analizy to Hasler TELOC EVA2 w wersji 2606.2.7.2. Widok ekranu oprogramowania Hasler EVA2 służącego do importu danych z rejestratorów pojazdowych przedstawia Rysunek 9-2, natomiast Rysunek 9-3 przedstawia widok okna analizy zdekodowanych danych w postaci charakterystyki prędkości w funkcji czasu $v=f(t)$ oraz zakresu parametrów i ich zarejestrowanych wartości z danej chwili czasowej (prawa strona okna, który przedstawia Rysunek 9-3).

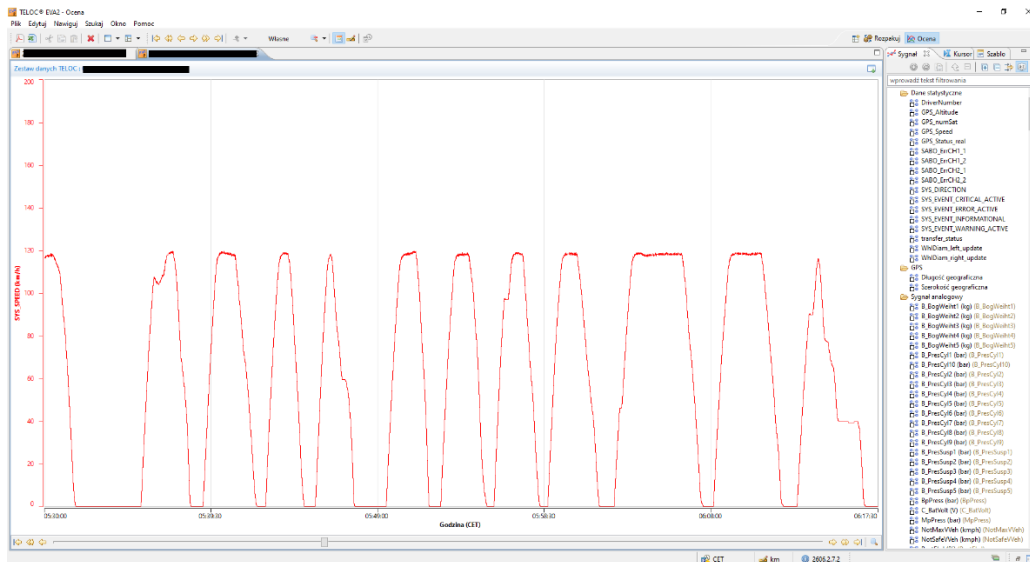


Rysunek 9-1. Rejestrator Hasler TELOC 2500 zainstalowany na pojeździe typu A [źródło: zdjęcie autora]

Zarejestrowane dane z obydwu pojazdów dotyczące charakterystyk prędkości w funkcji czasu $v=f(t)$ wyeksportowano z oprogramowania Hasler EVA2 do formatu plików PDF (Rysunek 9-4 i Rysunek 9-5) oraz w postaci macierzy danych w formacie plików XLS.

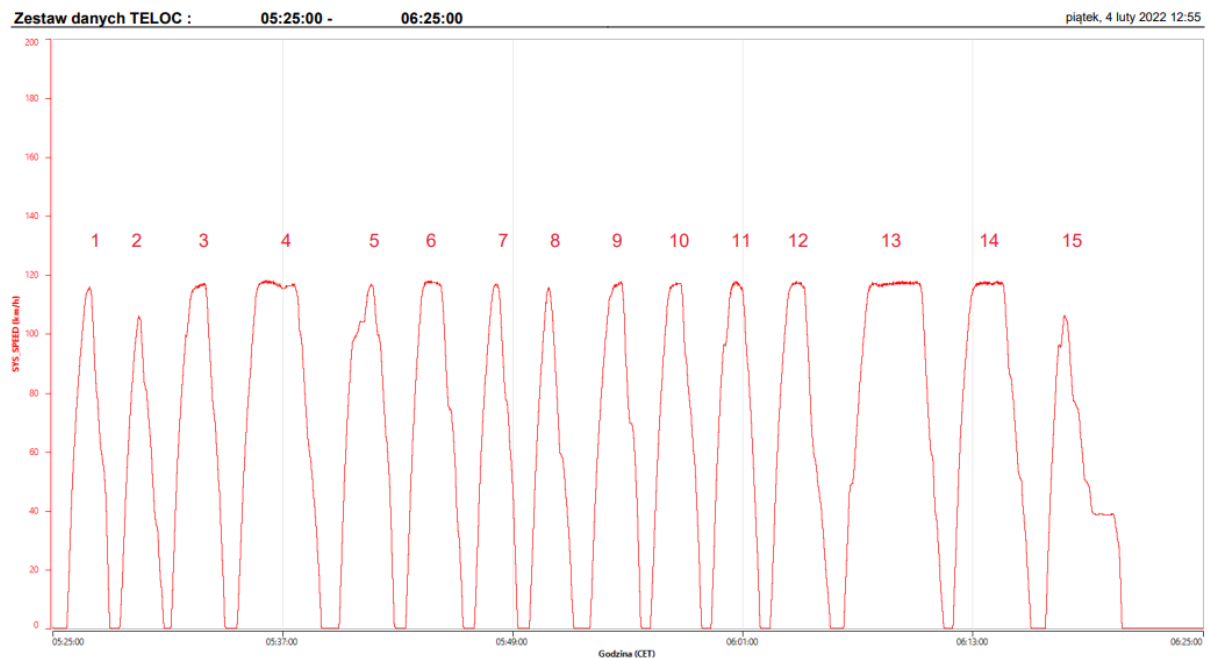


Rysunek 9-2. Oprogramowanie Hasler EVA2 – widok okna ładowania danych zarejestrowanych na pociągach [źródło: opracowanie własne]

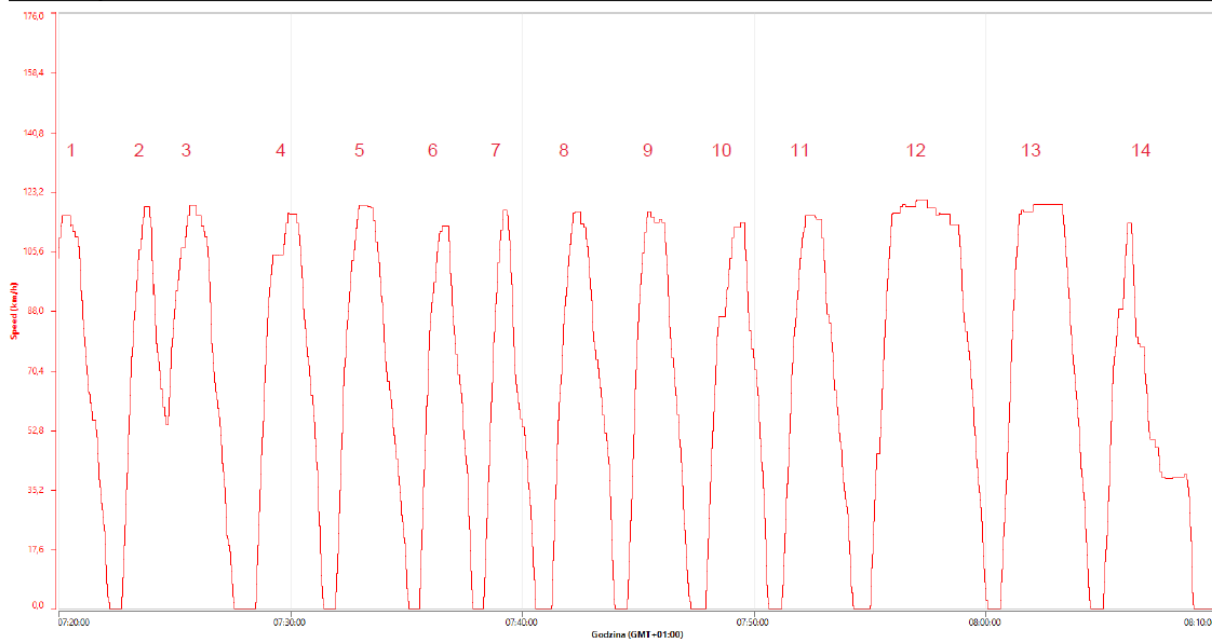


Rysunek 9-3. Oprogramowanie Hasler EVA2 – widok okna analizy danych zarejestrowanych na obydwu typach pojazdów jadących w komercyjnej jeździe handlowej [źródło: opracowanie własne]

Uzyskane charakterystyki prędkości w funkcji czasu $v=f(t)$ dla jednego przejazdu, gdy pojazd typu A był użytkowany w jeździe handlowej jako pociąg osobowy, przedstawia Rysunek 9-4, natomiast charakterystyka $v=f(t)$ dla przejazdu pojazdu określonego jako pojazd typu B na tym samym odcinku linii kolejowej, również w jeździe handlowej jako pociąg osobowy, przedstawia Rysunek 9-5. Na obydwu rysunkach zostały ponumerowane przebiegi obejmujące etap przyspieszania, jazdę ze stałą prędkością oraz hamowania między kolejnymi stacjami lub przystankami. Jazda odbywała się po odcinkach linii kolejowych, gdzie maksymalna prędkość jazdy wynosi 120 [km/h]. Macierz pomiarowa z każdego przejazdu zawierała ok. 5000 rekordów. W celu uwzględnienia zmierzonych danych w oprogramowaniu symulacyjnym dokonano analizy zarejestrowanych charakterystyk.

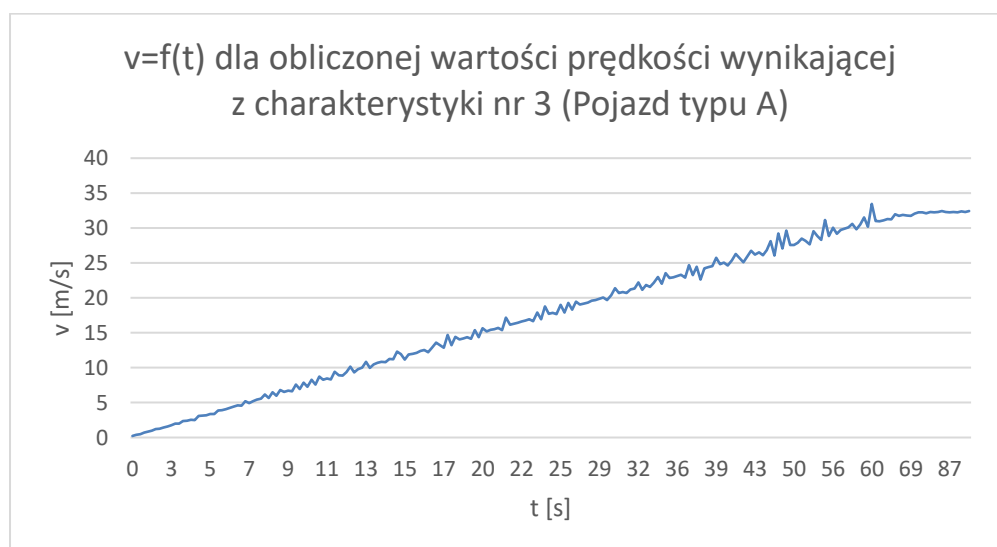


Rysunek 9-4. Charakterystyka prędkości w funkcji czasu dla rzeczywistego przejazdu pojazdu typu A [źródło: opracowanie własne, charakterystyka została wygenerowana przez oprogramowanie Hasler TELOC EVA2 w wersji 2606.2.7.]

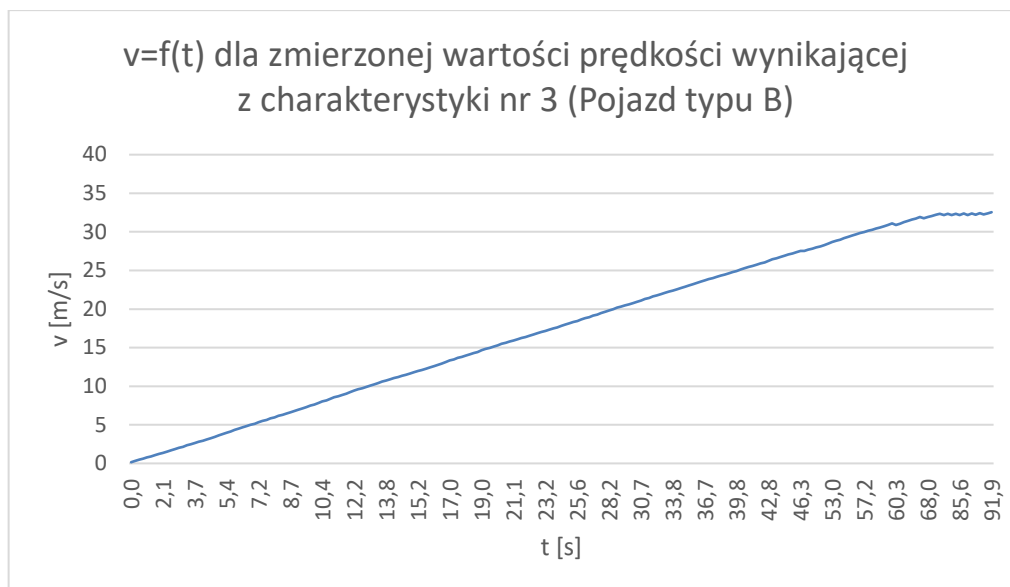


Rysunek 9-5. Charakterystyka prędkości w funkcji czasu dla rzeczywistego przejazdu pojazdu typu B [źródło: opracowanie własne, charakterystyka została wygenerowana przez oprogramowanie Hasler TELOC EVA2 w wersji 2606.2.7.]

Zarejestrowane dane obejmowały prędkość, czas i przebytą drogę. Dokonano porównania wyników uzyskanych z pomiarów i obliczonych na podstawie zmierzonej drogi i czasu. Uzyskano charakterystyki $v=f(t)$ dla wartości v uzyskanej w wyniku pomiarów dla przykładowego rozpędzania oznaczonego nr 3. Rysunek 9-6 przedstawia charakterystykę $v=f(t)$ na podstawie obliczonej wartości prędkości w funkcji czasu w oparciu o zmierzone wartości czasu i przebytej drogi. Rysunek 9-7 przedstawia natomiast charakterystykę $v=f(t)$ w oparciu o zmierzone wartości prędkości v . Przebieg $v=f(t)$, którą przedstawia Rysunek 9-6 charakteryzuje się większą wartością sygnału do szumu, dlatego do dalszych analiz przyjęto zarejestrowane dane dotyczące prędkości pociągu w danej chwili czasowej.



Rysunek 9-6. Charakterystyka obliczonej prędkości w funkcji czasu dla rzeczywistego przejazdu pojazdu typu A uzyskana z pomiarów przebytej drogi oraz czasu [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-7. Charakterystyka zmierzonej prędkości w funkcji czasu dla rzeczywistego przejazdu Pociągu1 [źródło: opracowanie własne]

Analizując charakterystyki, które przedstawiają Rysunek 9-4 oraz Rysunek 9-5, można stwierdzić, że w przypadku obu analizowanych pociągów:

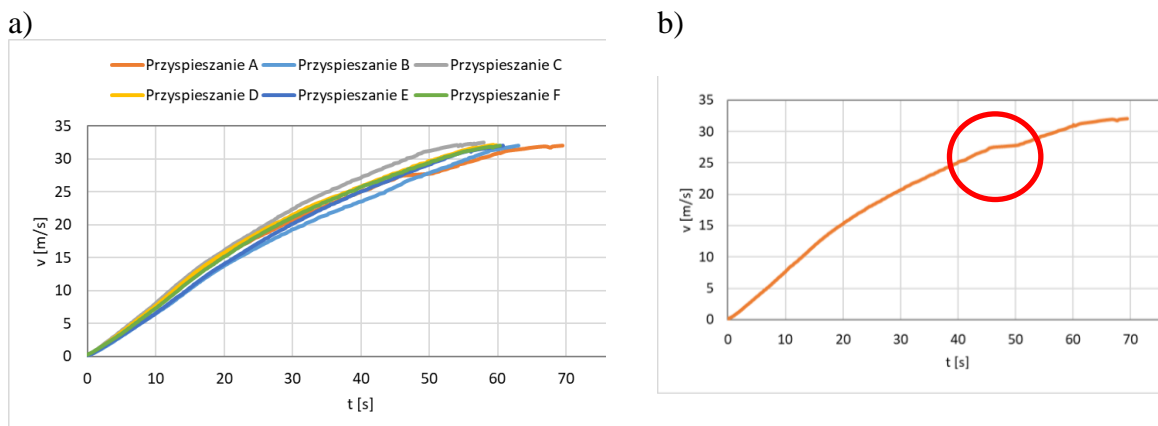
- w przypadku niektórych z procesów hamowania, hamowanie nie jest prowadzone do całkowitego zatrzymania pociągu. Pociąg zwalnia do pewnej prędkości, a następnie przyspiesza (np. nr 2 – Rysunek 9-5);
- w przypadku niektórych z procesów hamowania jest ono przerywane na pewien czas, a następnie wznowiane (np. nr 15 – Rysunek 9-4);
- w przypadku niektórych z procesów przyspieszania, przyspieszanie nie jest prowadzone do prędkości bliskiej 120 [km/h] (np. nr 2 – Rysunek 9-4);
- w przypadku niektórych z procesów przyspieszania, przyspieszanie jest przerywane na pewien czas, a następnie wznowiane (np. nr 4 – Rysunek 9-5).

Chcąc wykorzystać, w procesie modelowania ruchu kolejowego, możliwie reprezentatywny proces przyspieszania pociągu od zerowej prędkości do prędkości maksymalnej, lub proces hamowania od prędkości zbliżonej do maksymalnej do całkowitego zatrzymania pociągu, spośród zarejestrowanych przebiegów wyselekcjonowano takie, w których zmiany prędkości były wolne od przywołanych powyżej przypadków. Według tych kryteriów przyjęto do dalszych analiz następujące przebiegi:

- dla etapu przyspieszania pojazdu typu A – nr 3, 4, 6, 7, 10, 12 (Rysunek 9-4);
- dla etapu hamowania pojazdu typu A – nr 3, 10, 11 (Rysunek 9-4);
- dla etapu przyspieszania pojazdu typu B – nr 2, 5, 8, 13 (Rysunek 9-5);
- dla etapu hamowania pojazdu typu B – nr 4, 9, 13 (Rysunek 9-5).

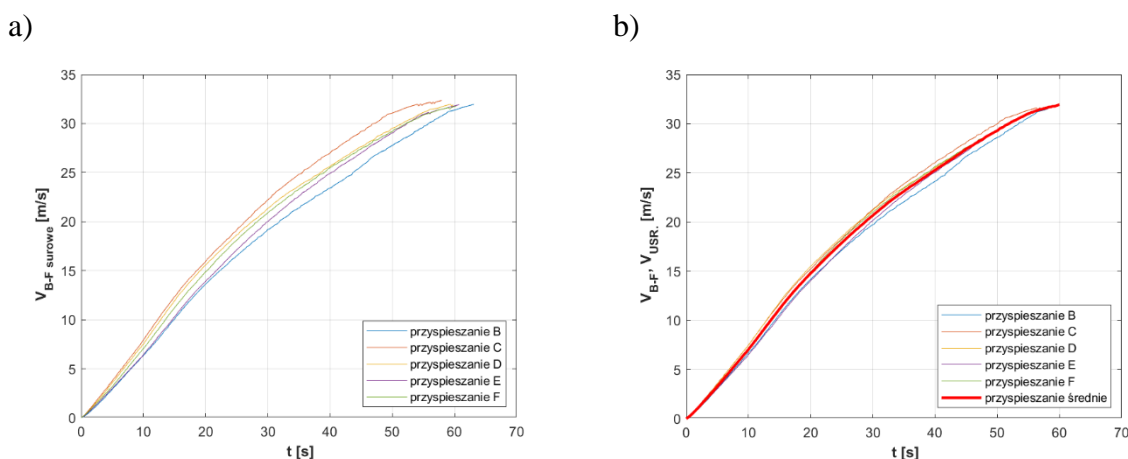
Sześć przebiegów przyspieszania pojazdu typu A, wstępnie wybranych według przedstawionych założeń, przedstawia Rysunek 9-8. W przypadku niektórych przebiegów dopiero po powiększeniu można było zauważyć krótką chwilę braku znaczącego przyspieszania pociągu zaznaczoną okręgiem – Rysunek 9-8b. Z tego powodu przyspieszenie

A, które przedstawia Rysunek 9-8 a i b, potraktowano jako obserwację odstającą, która nie została uwzględniona w dalszych analizach.



Rysunek 9-8. Wyselekcjonowane przebiegi procesu przyspieszania pojazdu typu A: przyp. A = 3 (Rysunek 9-4), przyp. B = 4 (Rysunek 9-4), przyp. C = 6 (Rysunek 9-4), przyp. D = 7 (Rysunek 9-4), przyp. E = 10 (Rysunek 9-4), przyp. F = 12 (Rysunek 9-4) (a), obserwacja odstająca: przyp. A = 3 (Rysunek 9-4) (b) [źródło: opracowanie własne]

Podczas pomiarów nie było możliwe dodatkowe rejestrowanie, czy przyspieszanie lub hamowanie odbywa się podczas poruszania się pociągu w kierunku zjazdu ze wzniesienia, czy też podjazdu pod wzniesienie. Czynniki te niewątpliwie mają znaczący wpływ na czas przyspieszania i hamowania pociągu, więc dla potrzeb modelowania zaproponowano zastosowanie uśredniania zarejestrowanych i wyselekcjonowanych przebiegów. Jednakże zauważono, że pomimo przeprowadzonej selekcji zarówno prędkości maksymalne pociągu na końcu pięciu procesów przyspieszania przedstawionych na rysunku Rysunek 9-9 a, jak i czasy przyspieszania są różne, co utrudnia bezpośrednie uśrednianie zarejestrowanych przebiegów. Kolejnym utrudnieniem, w uśrednianiu tych przebiegów, było to że krok próbkowania sygnału prędkości był zmienny w czasie. Chwila czasowa jest rejestrowana wtedy, gdy zmianie ulegnie mierzona prędkość wynikająca z pomiaru częstotliwości odczytanej z optycznego generatora impulsowego zainstalowanego na kole. Przebyta odległość jest zwiększana o prędkość wynikającą z pomiaru.

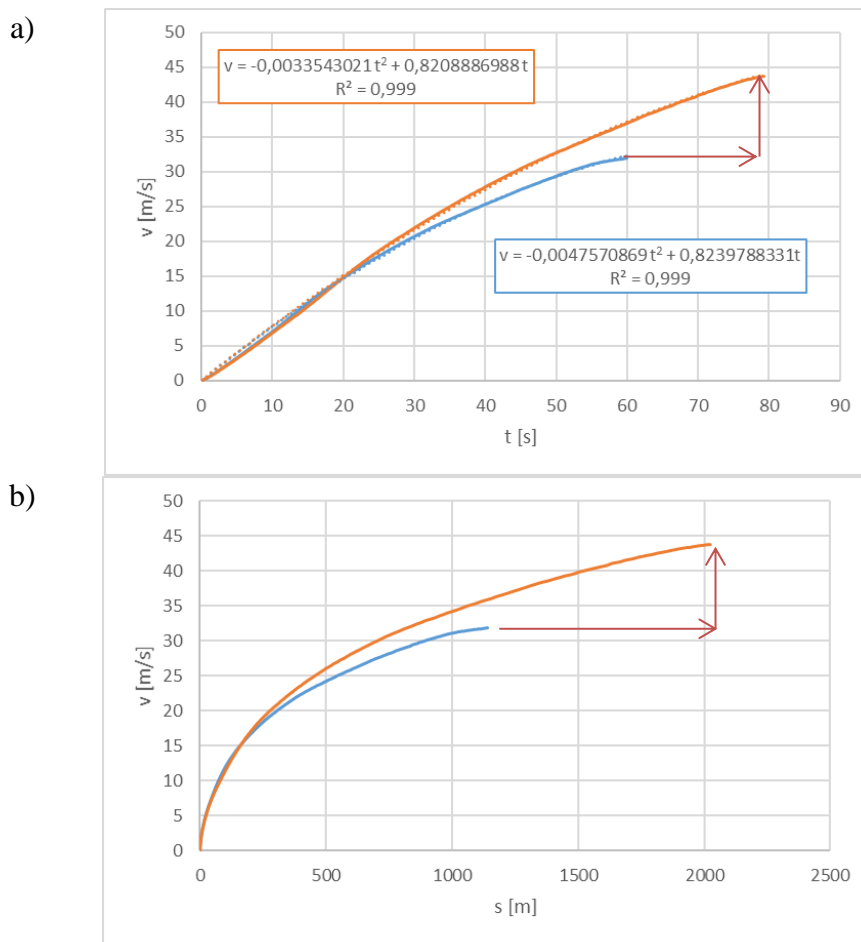


Rysunek 9-9. Wyselekcjonowane przebiegi procesu przyspieszania pojazdu typu A – przyp. B = 4 (Rysunek 9-4), przyp. C = 6 (Rysunek 9-4), przyp. D = 7 (Rysunek 9-4), przyp. E = 10 (Rysunek 9-4), przyp. F = 12 (Rysunek 9-4) z pominięciem przyp. A = 3 (Rysunek 9-4) (a), średnia wartość przyspieszenia uzyskana metodą interpolacji (b) [źródło: opracowanie własne]

Z powyższych powodów w programie MATLAB opracowano program liczący 518 linii kodu, służący do przeliczeń i wizualizacji wyników przetwarzania sygnałów oraz działający według następującego algorytmu:

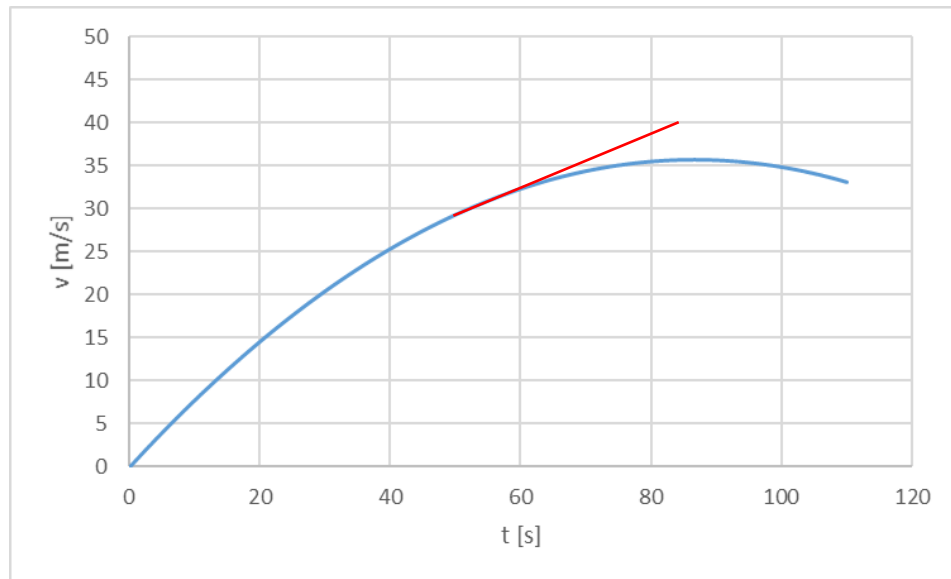
- Spośród pięciu prędkości maksymalnych przebiegów przyspieszania pociągu, które przedstawia Rysunek 9-9a, wyznaczono średnią prędkość maksymalną pociągu.
- Spośród pięciu maksymalnych czasów przyspieszania pociągu, które przedstawia Rysunek 9-9a, wyznaczono średni czas przyspieszania pociągu.
- Wyznaczono średnią macierz czasu przyspieszania, charakteryzującą się stałym krokiem próbkowania wynoszącym 0,1 [s], której końcowa chwila czasowa odpowiada wyznaczonemu średniemu czasowi przyspieszania pociągu.
- Przemnożono każdą z pięciu macierzy prędkości przez współczynnik uśredniania, będący stosunkiem średniej prędkości maksymalnej pociągu wyznaczonej powyżej w pierwszym punkcie do prędkości maksymalnej analizowanej macierzy prędkości (Rysunek 9-9a).
- Wykorzystując funkcję liniowej interpolacji każdej z pięciu macierzy prędkości otrzymanych w sposób przedstawiony w powyższym punkcie, uzyskano macierze prędkości posiadające wartości wyznaczone dla uśrednionej macierzy czasu przyspieszania pociągu, a macierz ta charakteryzowała się już stałym przedstawionym powyżej krokiem próbkowania. Dzięki przeprowadzonym operacjom matematycznym każdy z wektorów prędkości został interpolowany i próbkowany względem macierzy średniego czasu przyspieszania charakteryzującej się stałym krokiem próbkowania wynoszącym 0,1 [s]. Wynik przedstawia Rysunek 9-9b. W takim przypadku możliwe było już uśrednienie uzyskanych pięciu wektorów prędkości i wartość średnią również naniesiono na wykres – Rysunek 9-9b.

Rysunek 9-10a przedstawia równanie aproksymacji zmian prędkości uzyskane dla uśrednionego procesu przyspieszania pojazdu typu A (w niebieskiej ramce) i – co istotne – można zauważyć wysoką wartość kwadratu współczynnika korelacji. Na rysunku tym przedstawiono również zmiany prędkości pojazdu typu A: w funkcji czasu (a) i drogi (b), wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, oraz propozycję zmiany prędkości pociągu w funkcji czasu oraz drogi wyznaczone dla przypadku przyspieszania pociągu do prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy. Szczegóły dotyczące funkcji oznaczonej na wykresie, który przedstawia Rysunek 9-10, kolorem pomarańczowym, zostaną przedstawione w dalszej części niniejszego rozdziału.



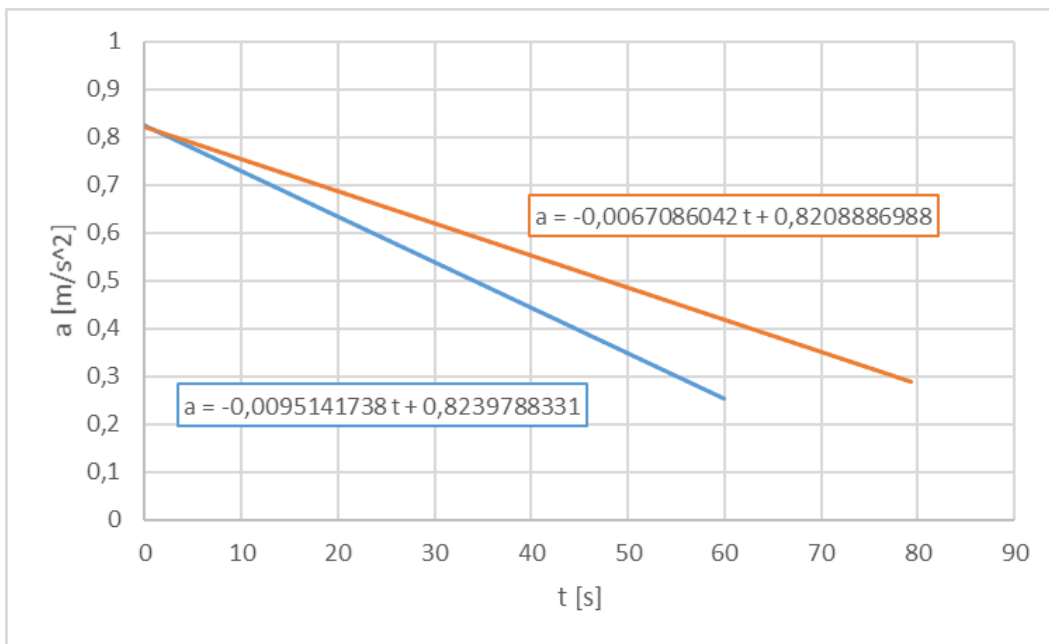
Rysunek 9-10. Zmiany prędkości pojazdu typu A: w funkcji czasu (a) i drogi (b), wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednionych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmiany prędkości pociągu w funkcji czasu oraz drogi wyznaczone dla przypadku przyspieszania pociągu do prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy. Strzałkami zaznaczono zmianę charakterystyki w wyniku przemnożenia macierzy prędkości, czasu oraz drogi przez współczynnik skali [źródło: opracowanie własne]

Ze względu na to, że na szlaku, na którym możliwe było dokonanie pomiarów przyspieszania i hamowania pojazdów typu A i B obowiązywało ograniczenie prędkości do 120 km/h na podstawie uzyskanego równania $v=f(t)$ podjęto próbę ekstrapolowania przebiegu prędkości do 160 km/h (linia niebieska, którą przedstawia Rysunek 9-11). Jednakże okazało się, że wyznaczona funkcja posiada maksimum odpowiadające prędkości 35,7 m/s co odpowiada zaledwie prędkości 128,5 km/h. Następnie wartości tej funkcji maleją wraz ze wzrostem czasu. W kolejnym kroku rozważano ekstrapolowanie liniowe uzyskanego przebiegu zmian prędkości aż do prędkości 160 km/h (linia czerwona, którą przedstawia Rysunek 9-11). Jednakże na podstawie zróżniczkowania otrzymanego równania, zmian prędkości pojazdu typu A podczas przyspieszania, uzyskano równanie i przebieg zmian przyspieszenia pociągu, który przedstawia Rysunek 9-12 (linia koloru niebieskiego). Na tej podstawie zauważono, że przyspieszenie pociągu od wartości początkowej ok. $0,8 \text{ m/s}^2$ maleje linowo wraz z przyrostem czasu, natomiast w przypadku liniowego ekstrapolowania zmian prędkości w funkcji czasu na wykresie przyspieszenia pojawiłyby się punkt, od którego przyspieszenie byłoby już stałe w czasie. Czyli charakter zmian przyspieszenia uległby znaczącej zmianie.



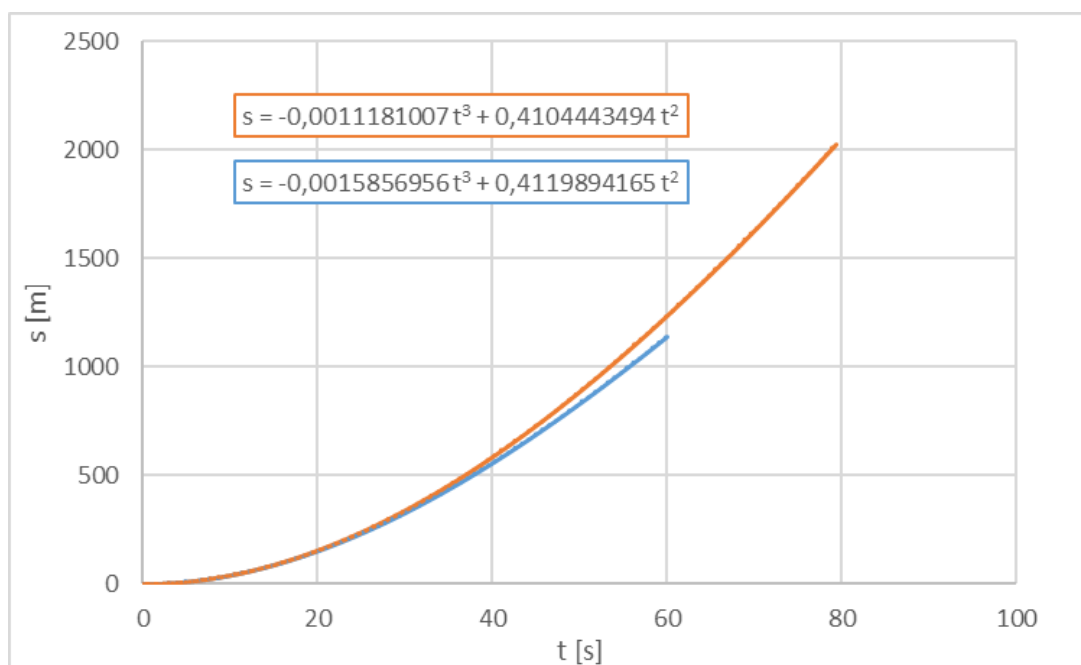
Rysunek 9-11. Propozycje ekstrapolowania przyspieszania pociągu do prędkości 160 [km/h] [źródło: opracowanie własne]

Z tego powodu, zaproponowano przemnożenie wartości macierzy prędkości uzyskanej w wyniku uśredniania przez współczynnik skali będący stosunkiem prędkości 44,(4) [m/s] (160 [km/h]) do prędkości maksymalnej uzyskanej z pomiarów, a następnie poddanej procesowi uśredniania. Przez ten sam współczynnik skali przemnożono również macierz czasu. Uzyskane w ten sposób zmiany prędkości pociągu w funkcji czasu przyspieszania przedstawia Rysunek 9-10a, kolorem pomarańczowym (wraz z pokazaniem zmian charakterystyki przy użyciu czerwonych strzałek w wyniku zastosowanej operacji), a zmiany przyspieszenia pociągu w funkcji czasu przyspieszania przedstawia Rysunek 9-12 kolorem pomarańczowym. W tym przypadku podobnie jak w przypadku uzyskanego przyspieszania pojazdu typu A z przeprowadzonych pomiarów początkowe przyspieszenie wynosi ok. 0,8 [m/s²], a następnie liniowo maleje bez zmiany przyspieszenia na stałą wartość. Warto zauważyć, że w takim przypadku przyspieszenia początkowe nie różnią się, a zatem uniknięto sytuacji, w której uzyskanie podanego na wykresie przyspieszenia nie można by uzyskać warunkach rzeczywistych, biorąc pod uwagę potencjalne poślizgi kół napędowych. Pomimo analizy wielu danych literaturowych i kontaktów z producentem pojazdu typu A nie było możliwe pozyskanie czasu przyspieszania tego pociągu do prędkości 160 [km/h]. W przypadku pozyskania takiej danej możliwe byłoby przemnożenie wartości macierzy prędkości uzyskanej (w wyniku uśredniania przez współczynnik skali będący stosunkiem prędkości 44,(4) [m/s] (160 [km/h])) oraz przemnożenie macierzy czasu przez współczynnik będący stosunkiem wartości czasu przyspieszania pojazdu typu A do 160 [km/h] do maksymalnej wartości uśrednionej macierzy czasu. W takim przypadku wystąpiłoby jeszcze wyższe prawdopodobieństwo, że uzyskany w wyniku przedstawionych działań matematycznych przebieg przyspieszenia pociągu reprezentuje rzeczywisty przebieg przyspieszenia analizowanego pociągu. Ponadto badany pojazd typu A posiadał układ napędowy o najniższej mocy wynoszącej 1600 [kW], więc zastosowanie w tym pociągu układu napędowego o większej mocy, mogłoby pozwolić na uzyskanie wartości przyspieszenia, które przedstawia Rysunek 9-12 kolorem pomarańczowym.



Rysunek 9-12. Zmiana przyspieszenia pojazdu typu A w funkcji czasu wyznaczona na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmian przyspieszenia pociągu w funkcji czasu wyznaczona dla przypadku przyspieszania pociągu do prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy [źródło: opracowanie własne]

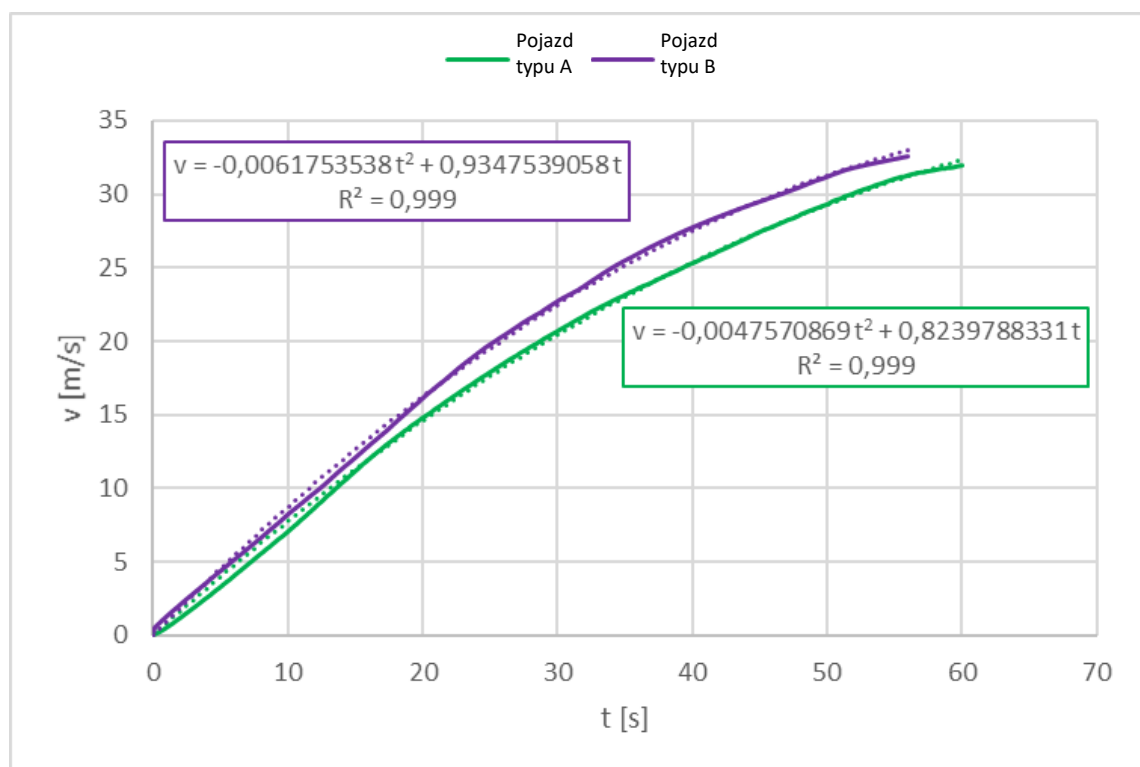
Rysunek 9-13 przedstawia drogę przebytą przez pojazd typu A w funkcji czasu uzyskaną na podstawie całkowania równań prędkości, które przedstawia Rysunek 9-10.



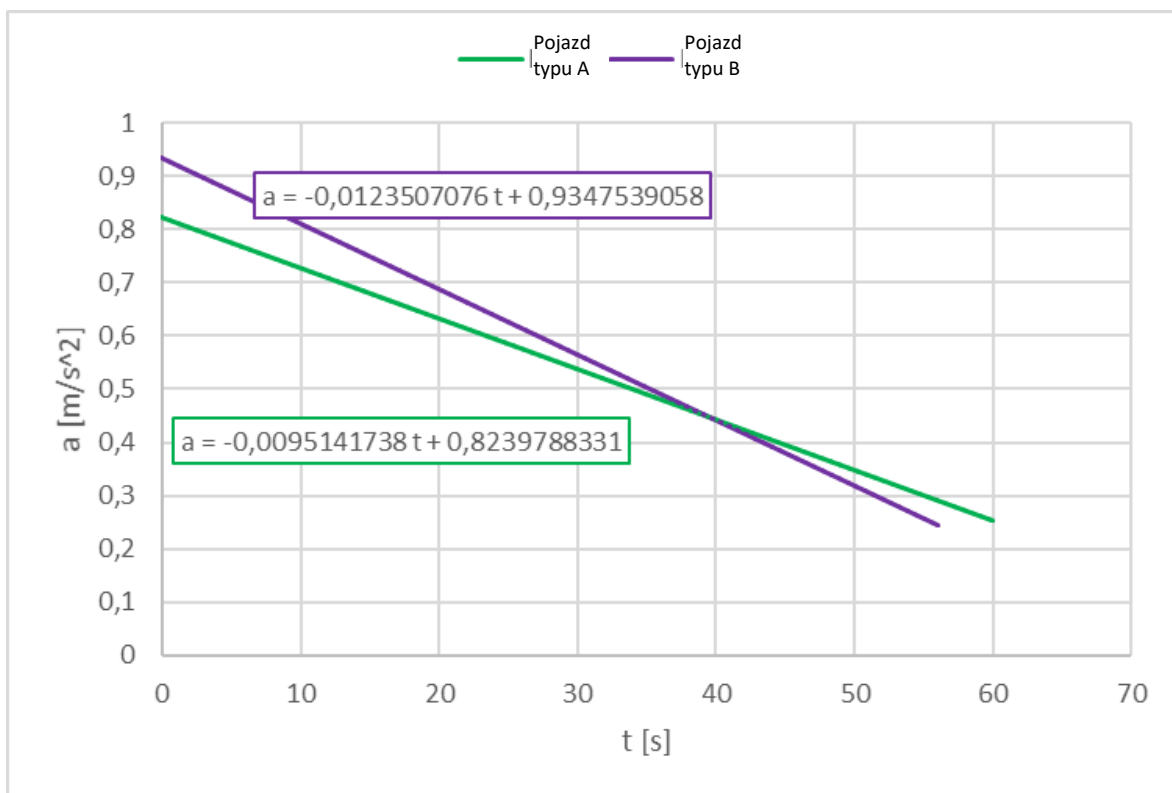
Rysunek 9-13. Zmiana drogi przebytej przez pojazd typu A w funkcji czasu, w trakcie przyspieszania, wyznaczona na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmian drogi przebytej przez pojazd typu A w funkcji czasu, w trakcie przyspieszania, wyznaczona dla przypadku przyspieszania pociągu do prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy [źródło: opracowanie własne]

W ten sposób możliwe było wprowadzenie do modelu jazdy pociągów odpowiedniej wartości przyspieszenia po hamowaniu do dowolnej i niezerowej prędkości. Było to ważne, gdyż bez analiz przeprowadzonych w niniejszym rozdziale, przyspieszenie zostałoby przyjęte jako stałe, co nie byłoby poprawne.

W celu zweryfikowania, czy przyspieszenie innego pociągu w warunkach eksploatacyjnych ma liniowy charakter zmian przyspieszenia, wykorzystano zaproponowany algorytm uśredniania zarejestrowanych i wyselekcjonowanych w opisany sposób przebiegów zmian prędkości jazdy pojazdu typu B podczas przyspieszania. Rysunek 9-14 przedstawia porównanie uśrednionych zmian prędkości pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu, wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem. Również w tym przypadku uzyskano wysoką wartość kwadratu współczynnika korelacji pomiędzy uśrednionymi wynikami a wynikami uzyskanymi w wyniku aproksymacji. Na podstawie zróżniczkowania uzyskanego równania zmian prędkości pojazdu typu B potwierdzono, że również w przypadku tego pociągu występuje podczas eksploatacji liniowy charakter zmian przyspieszenia podczas przyspieszania wyżej wymienionego pociągu – Rysunek 9-15. Warto również zauważyć, że uśredniane przyspieszenie początkowe pojazdu typu B jest większe o 0,1 [m/s²] od uśrednianego przyspieszenia początkowego pojazdu typu A, natomiast wraz ze wzrostem czasu przyspieszenie pojazdu typu B zmniejsza się szybciej niż pojazdu typu A, co przedstawia Rysunek 9-15.



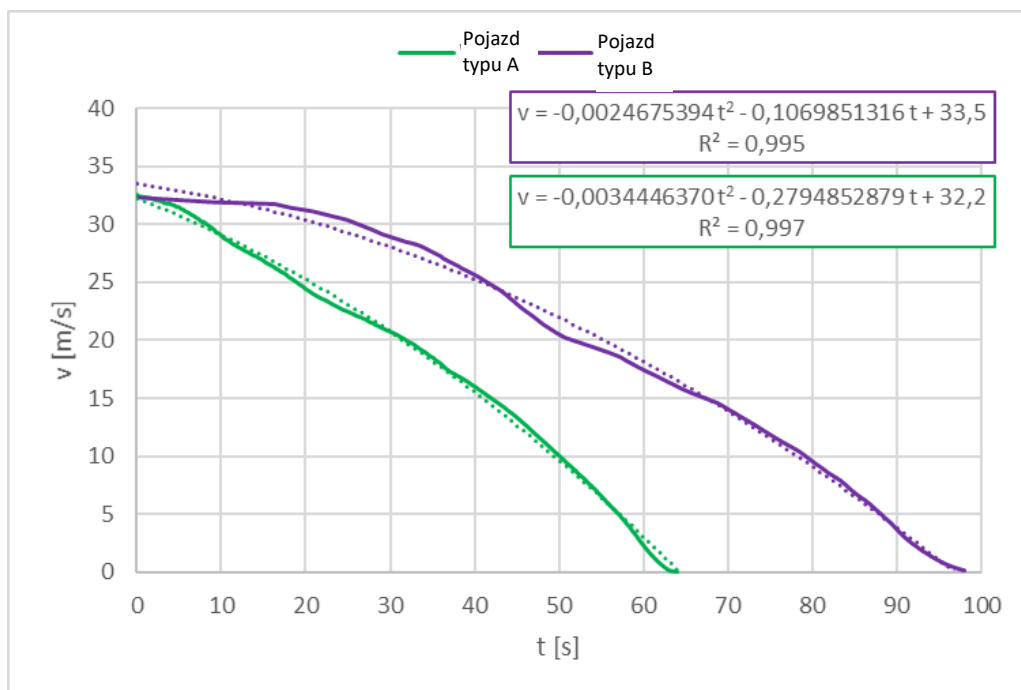
Rysunek 9-14. Zmiany prędkości pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu, wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – porównanie przyspieszenia pociągów [źródło: opracowanie własne]



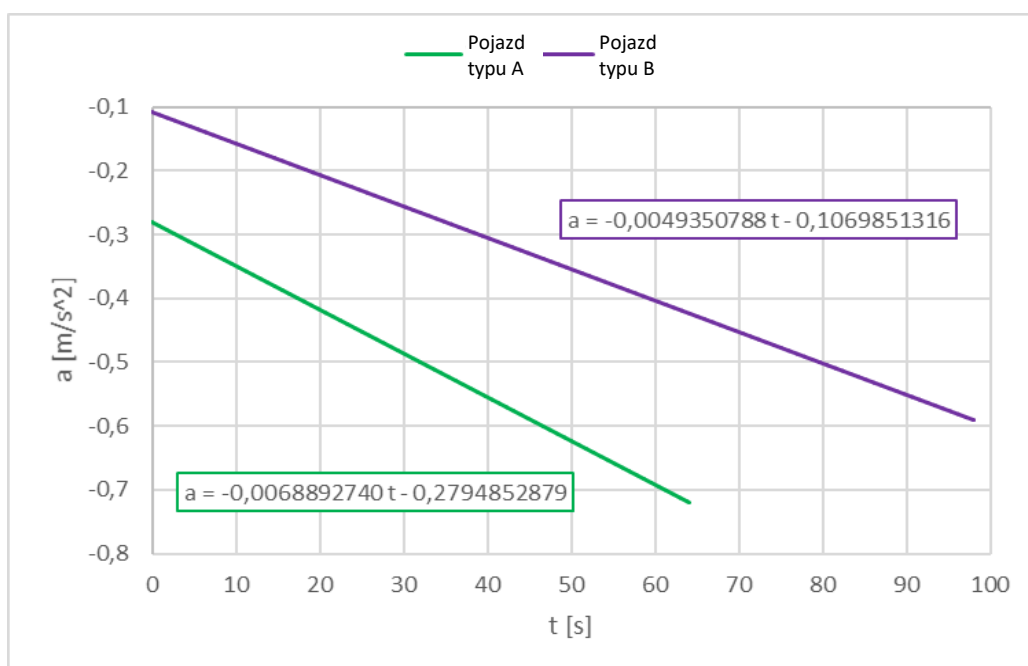
Rysunek 9-15. Zmiany przyspieszeń pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – porównanie przyspieszenia pociągów [źródło: opracowanie własne]

Przeanalizowano również procesy hamowania obu badanych pociągów w warunkach rzeczywistych. Również w tym przypadku wykorzystano zaproponowany algorytm uśredniania zarejestrowanych i wyselekcjonowanych w opisany sposób przebiegów zmian prędkości jazdy.

Rysunek 9-16 przedstawia porównanie uśrednionych zmian prędkości pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu, w przypadku hamowania pociągów. Również w tym przypadku uzyskano wysoką wartość kwadratu współczynnika korelacji pomiędzy uśrednionymi wynikami a wynikami uzyskanymi z aproksymacji. Na podstawie zróżniczkowania uzyskanych równań zmian prędkości obu badanych pociągów potwierdzono, że również w przypadku hamowania pociągu, występuje podczas eksploatacji, liniowy charakter zmian przyspieszenia (Rysunek 9-17).



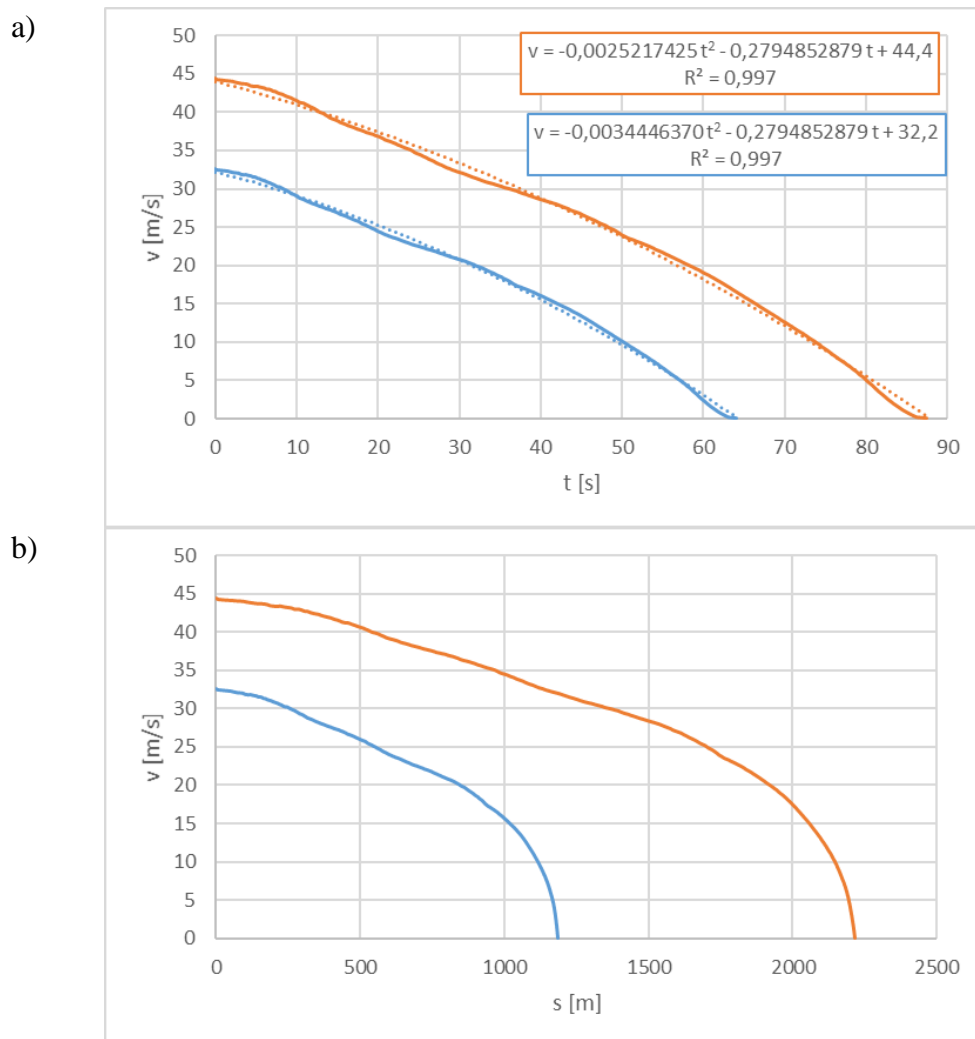
Rysunek 9-16. Zmiany prędkości pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu, wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – porównanie hamowania pociągów [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-17. Zmiany przyspieszeń pociągu pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu, wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – porównanie hamowania pociągów [źródło: opracowanie własne]

Należy również zauważyć, że na uzyskane wartości zmian prędkości podczas hamowania (Rysunek 9-16) i opóźnień hamowania (Rysunek 9-17) wpływ ma styl jazdy maszynisty, natomiast w przypadku przyspieszania ruchu analizowanych pociągów, pomimo faktu, że maszyniści mieli różny styl hamowania, to między innymi ze względu na podobną moc układu napędowego obu analizowanych pociągów, czasy przyspieszania do prędkości maksymalnej

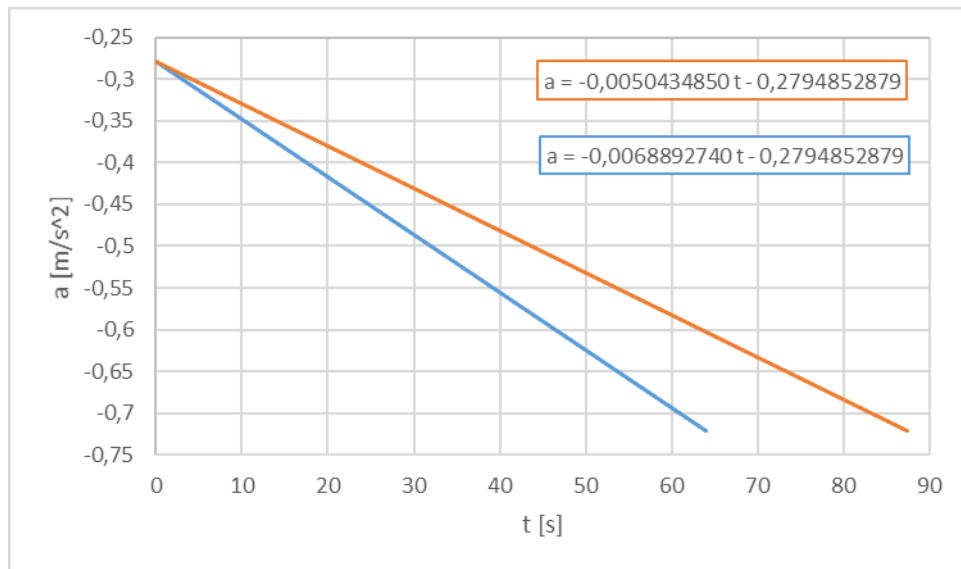
(Rysunek 9-14) i zmian wartości przyspieszenia w funkcji czasu (Rysunek 9-15) są bardzo zbliżone. Fakt ten predestynuje wyniki zarejestrowane podczas przyspieszania ruchu pociągów do wykorzystania ich w modelu symulacyjnym, natomiast w przypadku hamowania pociągów jadących według systemu sterowania ruchem kolejowym ETCS wykorzystywane są charakterystyki wynikające z odpowiednich standardów i specyfikacji systemu ETCS obliczane przez urządzenia pokładowe tego systemu, co zostanie opisane w dalszej części niniejszej pracy.



Rysunek 9-18. Zmiany prędkości pociągu pojazdu typu A w funkcji: czasu (a) i w funkcji drogi (b), w przypadku hamowania pociągu wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmian prędkości pociągu w funkcji czasu lub drogi wyznaczona dla przypadku hamowania pociągu z prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy [źródło: opracowanie własne]

Ze względu na to, że w procesie modelowania ruchu kolejowego może zaistnieć potrzeba symulowania ruchu pociągów aż do prędkości 160 [km/h] (lub nawet wyższych), a rejestrowane w warunkach rzeczywistych hamowania rozpoczynały się z prędkości ok. 115 [km/h], podobnie jak w przypadku przyspieszania zaproponowano przemnożenie wartości macierzy prędkości uzyskanej w wyniku uśredniania przez współczynnik skali będący stosunkiem prędkości 44,4 [m/s] (160 [km/h]) do prędkości maksymalnej macierzy prędkości uzyskanej w wyniku uśredniania. Przez ten sam współczynnik skali przemnożono również

macierz czasu. Porównanie tak uzyskanych prędkości w funkcji czasu oraz drogi i przyspieszeń przedstawia odpowiednio Rysunek 9-18 i Rysunek 9-19.



Rysunek 9-19. Zmiana przyspieszenia pociągu: pociąg 1 w funkcji czasu przypadku hamowania pociągu wyznaczona na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmian przyspieszenia pociągu w funkcji czasu wyznaczona dla przypadku hamowania pociągu z prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy [źródło: opracowanie własne]

Zawarte w niniejszym rozdziale badania i analizy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zaproponowano algorytm uśredniania sygnałów prędkości pojazdu typu A i pojazdu typu B na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych ze zmiennym w czasie okresem próbkowania, zarówno podczas przyspieszania, jak i hamowania pociągów.
2. Uśrednione przebiegi zmian prędkości zarówno podczas przyspieszania pociągu, jak i jego hamowania wykazują wysoką wartość kwadratu współczynnika korelacji będącego miarą dopasowania uzyskanych wyników do krzywej aproksymującej.
3. Na podstawie równań opisujących zmiany prędkości w funkcji czasu, charakteryzujących się wysoką wartością kwadratu współczynnika korelacji z wynikami pomiarów, stosując różniczkowanie lub całkowanie tych równań, możliwe jest wyznaczanie odpowiednio zarówno przyspieszeń ruchu, jak i drogi, na której odbywa się przyspieszanie lub hamowanie pociągu. Pozwala to na przedstawianie każdego z wymienionych parametrów w funkcji jednego z dwóch pozostałych.
4. Potwierdzono, że w przypadku badanych pojazdów typu A i typu B zmiany przyspieszenia w funkcji czasu zarówno podczas eksploatacyjnego przyspieszania, jak i hamowania są silnie skorelowane z liniowymi funkcjami, których równania przedstawiono w niniejszym rozdziale.
5. Przeanalizowano trzy różne metody wyznaczenia zmian prędkości w funkcji czasu dla przypadków przyspieszania pociągu do prędkości ok. 160 [km/h] i hamowania z tej prędkości do zera, bazując na podstawie zarejestrowanych przyspieszeń do niższych prędkości ok. 115 [km/h] i hamowań z podanej prędkości do zera. Metoda bazująca na ekstrapolacji równań okazała się nieprzydatna, dlatego że z jej wykorzystaniem nie było

możliwe przyspieszenie pociągu do wymaganej prędkości jazdy. Zastosowano natomiast metodę polegającą na przemnożeniu wartości macierzy prędkości uzyskanej w wyniku uśredniania przez współczynnik skali będący stosunkiem oczekiwanej prędkości maksymalnej do prędkości maksymalnej uzyskanej z pomiarów, które następnie poddano procesowi uśredniania. Przez ten sam współczynnik skali przemnożono również macierz czasu.

6. Zaobserwowano, że droga hamowania pojazdu typu B uzyskana z pomiarów była dłuższa od uzyskanej z pomiarów drogi hamowania pojazdu typu A. Różnice te wskazują na preferencje maszynistów dotyczące hamowania, gdyż zmierzona uśredniona droga hamowania, z prędkości bliskiej 120 [km/h], pojazdu typu B była o 43% dłuższa niż zmierzona uśredniona droga hamowania z tej samej prędkości pojazdu typu A ($1,7407 \cdot 10^3$ [m] dla pojazdu typu B, $1,2204 \cdot 10^3$ [m] dla pojazdu typu A). Należy dodać, że na podstawie uśrednionych dróg przyspieszenia obu pociągów do tej samej prędkości krótszą z dróg posiadał pojazd typu B (czyli sytuacja w tym przypadku była odwrotna).
7. Możliwe jest wprowadzenie do modelu jazdy pociągów według systemu sterowania ruchem kolejowym odpowiedniej wartości przyspieszenia pociągu po hamowaniu do dowolnej i niezerowej prędkości. Jest to ważne, gdyż bez analiz przeprowadzonych w niniejszym rozdziale przyspieszenie w takiej sytuacji mogłoby być przyjmowane jako stałe, co nie byłoby poprawne i nie odpowiadałoby rzeczywistości.
8. Charakterystyki hamowania pociągu w modelu jazdy pociągów według systemu sterowania ruchem kolejowym ETCS należy przyjmować jako wynikające ze standardów i specyfikacji systemu ETCS. W przypadku badania zdolności przepustowej warto zauważyć, że maszyniści, hamując np. do przystanku kolejowego (co nie wynika z uzyskanego zezwolenia na jazdę w systemie ETCS), mogą hamować z mniejszym opóźnieniem, niż ma to miejsce w przypadku charakterystyk hamowania obliczanych przez system ETCS, co może mieć wpływ na zdolność przepustową odcinka linii kolejowej.

9.1.2. Charakterystyki hamowania ETCS

W celu uwzględnienia, w oprogramowaniu symulacyjnym, jazdy pociągów pod nadzorem systemu bezpiecznej kontroli jazdy pociągu (BKJP) typu ERTMS/ETCS, wyliczono charakterystyki hamowania, w oparciu o model krzywych hamowania opisany w standardzie ETCS.

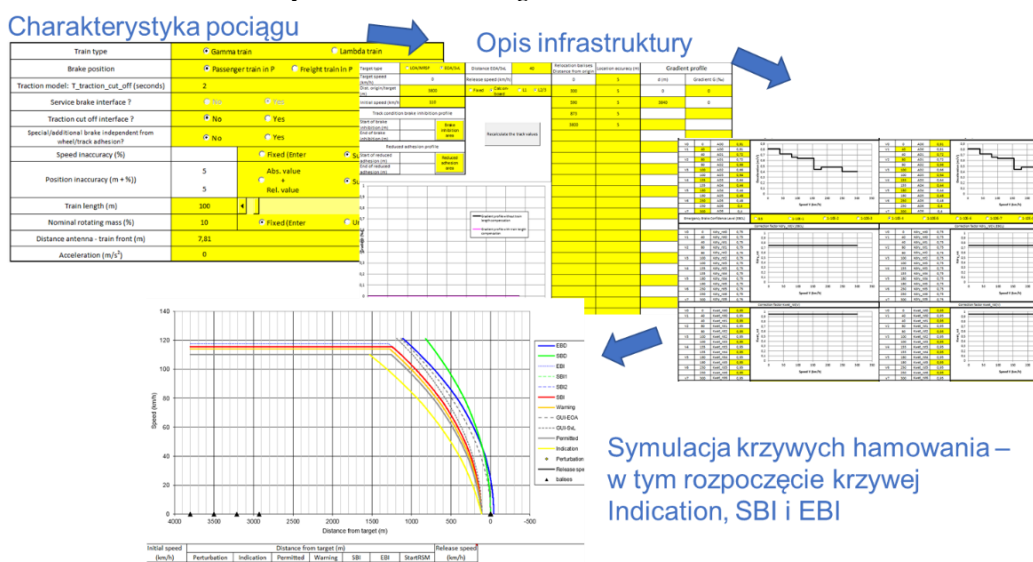
Systemy BKJP (w tym ETCS) nadzoruje zarówno położenie, jak i prędkość pociągu, aby zapewnić, że stale mieszczą się one w dozwolonych granicach prędkości i odległości, a w razie potrzeby nakazuje interwencję układu hamulcowego, aby uniknąć ryzyka, że pociąg, przekraczając te limity, może spowodować sytuację zagrażającą bezpieczeństwu.

W tym celu komputer pokładowy ETCS musi przewidzieć spadek prędkości pociągu w przyszłości na podstawie matematycznego modelu dynamiki hamowania pociągu i wyprzedzającej charakterystyki toru. Ta prognoza spadku prędkości w zależności od odległości nazywana jest krzywą hamowania. Na podstawie tej prognozy komputer pokładowy ETCS oblicza w czasie rzeczywistym drogę hamowania, która będzie również wykorzystywana do wspomaganie maszynisty i umożliwienia mu wygodnej jazdy poprzez utrzymywanie prędkości pociągu w odpowiednich granicach.

Algorytm krzywych hamowania ETCS składa się ze złożonego zestawu równań matematycznych. Europejska Agencja Kolejowa opracowała narzędzie *ERA Braking curves*

simulation tool, które pozwala wyznaczyć wszystkie krzywe hamowania, jakie byłyby obliczane przez urządzenia pokładowe ETCS. Narzędzie umożliwia zadanie wszystkich danych pociągu (w tym współczynnika korekcji Kdryrst uzyskanego z obliczeń Monte Carlo) i przytorowych, które są istotne dla obliczenia krzywej hamowania, i przedstawienie w formie graficznej tak obliczonej drogi hamowania. Z tego też względu dla potrzeb symulacji jazdy pociągów jadących pod kontrolą systemu ERTMS/ETCS posłużono się narzędziem *ERA Braking curves simulation tool* w wersji 4.2, dostępnego na stronie era.europa.eu (dostęp 21.02.2022 r.).

Symulacje przeprowadzone tym narzędziem pozwalają na wyznaczenie krzywych hamowania obliczanych przez system ETCS, na podstawie charakterystyk pociągu i infrastruktury. Są to m.in. krzywe Indication (wskazująca maszyniście potrzebę przygotowania się do rozpoczęcia hamowania), Permitted (wskazująca maszyniście moment rozpoczęcia hamowania), SBI, EBI określające miejsce wdrożenia odpowiednio hamowania służbowego i nagłego przez system. Rysunek 9-20 przedstawia metodologię symulacji krzywych hamowania w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool*.



Rysunek 9-20 Metodologia symulacji krzywych hamowania w narzędziu ERA Braking curves simulation tool [źródło: opracowane własne]

1. Charakterystyka pociągu

Tabela 9-1 zawiera przyjęte wartości parametrów pociągu uwzględnione w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool v. 4.2*. Wartości parametrów przyjęto w taki sposób, aby odpowiadały one charakterystyce pojazdu typu A oraz pojazdu typu B, dla którego pozyskano dane dotyczące charakterystyki jazdy bez użycia systemu ETCS. Z przyjętych wartości wynika, że oprócz parametru określającego długość pociągu, który jest inny dla pojazdu typu A oraz pojazdu typu B, pozostałe parametry są zbieżne dla obydwu typów.

Tabela 9-1 Charakterystyka pociągu używana do obliczania krzywych hamowania

Parametr	Definicja	Możliwe wartości	Przyjęta wartość wraz z uzasadnieniem
Typ pociągu	Określa, czy dany skład pociągu lub pojazd kolejowy charakteryzowany jest przez znane stałe parametry dotyczące charakterystyk sił hamowania w funkcji prędkości jazdy oraz znane są wartości współczynników korekcyjnych (pociąg typu Gamma). Jeśli charakterystyka hamowania i wartości parametrów korekcyjnych	Gamma/Lambda	Lambda (większość pociągów w Polsce jest zestawiana ze składów wagonowych lub kilku zespołów trakcyjnych, dlatego przyjęto

Parametr	Definicja	Możliwe wartości	Przyjęta wartość wraz z uzasadnieniem
	są różne w zależności od konfiguracji składu, to taki pociąg może być charakteryzowany przez rzeczywisty procent masy hamującej obliczanej przez rewidenta taboru (pociąg Lambda). Wprowadzony rzeczywisty procent masy hamującej jest przeliczany na wartość siły hamującej w funkcji prędkości na podstawie zdefiniowanej w standardzie ETCS modelu konwersji.		w modelu typ pociągu Lambda)
Pozycja hamulca	Określa typ użytego hamulca	Pasażerski P, Towarowy P, Towarowy G	Pasażerski P
Model odłączenia trakcji	Określa czas w [s], po którym nastąpi odłączenie trakcji po wydaniu komendy hamowania	Wartość typu integer	2 (z uwagi na brak danych dla danego typu pojazdu przyjęto wartość domyślną)
Interfejs do hamowania służbowego	Określa, czy pokładowy ETCS posiada interfejs do hamowania służbowego. Jeśli nie, jedynym typem hamulca powiązaniem z ETCS jest hamowanie nagłe	Tak/Nie	Tak (w Polsce zasadniczo stosuje się hamowanie służbowe przy hamowaniu przez system ETCS)
Interfejs zwrotny do odłączania trakcji	Określa, czy pokładowy ETCS posiada interfejs zwrotny z informacją o odłączeniu trakcji przez układy pojazdu w przypadku załączenia hamowania	Tak/Nie	Tak (przyjęto jako domyślną wartość, oznacza to, że system ETCS ma informację dotyczące odłączenia trakcji w przypadku załączenia hamowania przez system)
Specjalny /dodatkowy hamulec niezależny od adhezji szyna-koło	Określa, czy pojazd posiada dodatkowy typ hamulca, który nie jest zależny od adhezji pomiędzy kołem a szyną	Tak/Nie	Nie (przyjęto wartość domyślną)
Niedokładność prędkości [%]	Określa przewidywaną niedokładność pomiaru aktualnej prędkości jazdy przez BKJP	Stała wartość ustalona dla danej pary pokładowy ETCS-pociąg podczas bezpiecznej integracji lub zgodnie ze standardem Subset-041	Zgodnie z Subset-041: ± 2 [km·h ⁻¹] dla $v < 30$ [km·h ⁻¹], następnie liniowy wzrost do ± 12 [km·h ⁻¹] przy $v = 500$ [km·h ⁻¹]
Przedział ufnosci odometru [m]	Określa przewidywaną niedokładność pomiaru aktualnej pozycji pociągu przez BKJP	Stała wartość ustalona dla danej pary pokładowy ETCS-pociąg podczas bezpiecznej integracji lub zgodnie ze standardem Subset-041	Zgodnie Subset-041: $5\% * D_{LRBG} + 5$ [m] gdzie D_{LRBG} to dystans od ostatnio przejechanej balisy, która zeruje przedział ufnosci odometru
Długość pociągu [m]	Określa długość pociągu	0÷4095 [m]	188 [m] dla pociągu 1 i 154 [m] dla pociągu 2
Nominalna masa rotująca [%]	Określa procentowy udział masy rotującej w masie całego pojazdu	Stała wartość zależna od pojazdu lub „nieznana”	„nieznana”
Dystans anteny balisowej od czoła pojazdu [m]	Określa dystans pomiędzy czołem pojazdu a referencyjnym środkiem anteny balisowej zainstalowanej na pojeździe	0÷15 [m]	7,81 [m]

Parametr	Definicja	Możliwe wartości	Przyjęta wartość wraz z uzasadnieniem
Przyspieszenie [m·s ⁻²]	Przyspieszenia składu na prostym i poziomym torze, dla pociągu z normalnym obciążeniem i 100% dostępnej mocy trakcyjnej	Wartość typu integer	1 [m·s ⁻²]

Źródło: opracowanie własne

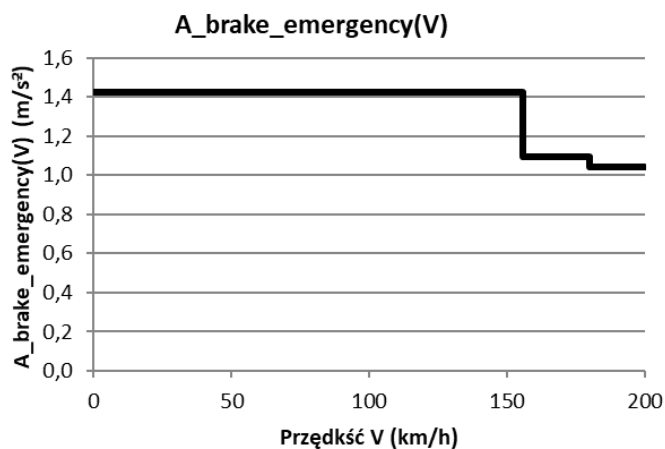
Rysunek 9-21 przedstawia wprowadzone dane dotyczące pociągu w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool*.

Train type	<input type="radio"/> Gamma train <input checked="" type="radio"/> Lambda train	
Brake position	<input checked="" type="radio"/> Passenger train in P <input type="radio"/> Freight train in P <input type="radio"/> Freight train in G	
Traction model: T_traction_cut_off (seconds)	2	
Service brake interface ?	<input type="radio"/> No <input checked="" type="radio"/> Yes	
Traction cut off interface ?	<input type="radio"/> No <input checked="" type="radio"/> Yes	
Special/additional brake independent from wheel/track adhesion?	<input checked="" type="radio"/> No <input type="radio"/> Yes	
Speed inaccuracy (%)	<input type="radio"/> Fixed (Enter) <input checked="" type="radio"/> Subset-041	
Position inaccuracy (m + %)	5	<input type="radio"/> Abs. value
	5	<input checked="" type="radio"/> Rel. value <input type="radio"/> Subset-041
Train length (m)	188	
Nominal rotating mass (%)	<input type="radio"/> Fixed (Enter) <input checked="" type="radio"/> Unknown	
Distance antenna - train front (m)	7,81	
Acceleration (m/s ²)	1	

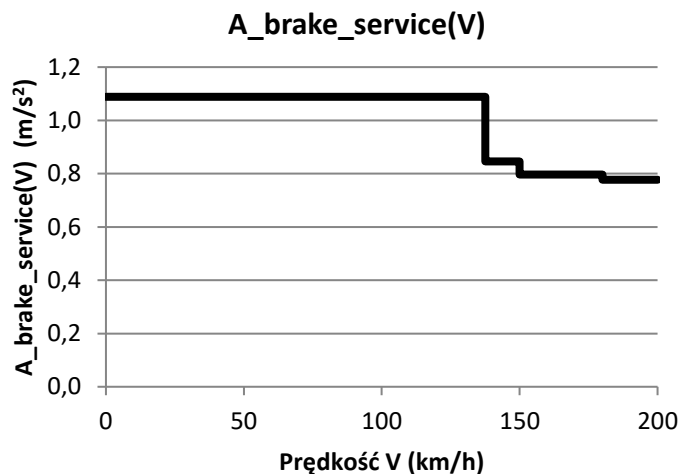
Rysunek 9-21 Charakterystyka pociągu użyta do symulacji krzywych hamowania w oprogramowaniu *ERA Braking curves simulation tool* [źródło: opracowanie własne]

W ramach symulacji charakterystyk hamowania ETCS, zgodnie z typem pociągu określonym jako Lambda (Tabela 9-1) konieczne jest podanie procentu rzeczywistej masy hamującej P_r . Wartość P_r jest następnie, w oparciu o model konwersji, przeliczana na charakterystykę siły hamowania w funkcji prędkości $A_{brake}(v)$ [m/s²] dla hamowania służbowego i nagłego (rozdział 4.2).

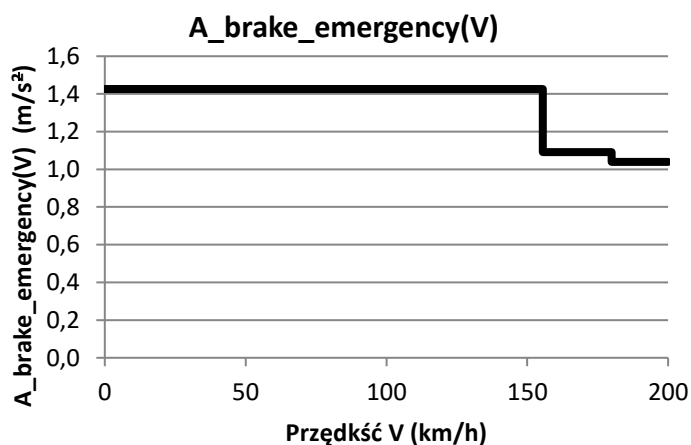
Dla analizowanych pociągów przyjęto wartości $P_{rPojA} = 180\%$ dla pociągu 1, oraz $P_{rPojB} = 155\%$ dla pociągu 2, co jest zgodne z rzeczywistymi wartościami dla pociągów, dla których uzyskano charakterystyki jazd w oparciu o sygnalizację przytorową (rozdział 9.1.1). Uzyskane charakterystyki $A_{brake}(v)$ [m/s²] w wyniku z konwersji dla pociągu 1 przedstawia Rysunek 9-22 dla hamowania nagłego oraz Rysunek 9-23 dla hamowania służbowego. Dla pociągu 2, charakterystyki $A_{brake}(v)$ [m/s²] prezentują analogicznie Rysunek 9-24 i Rysunek 9-25.



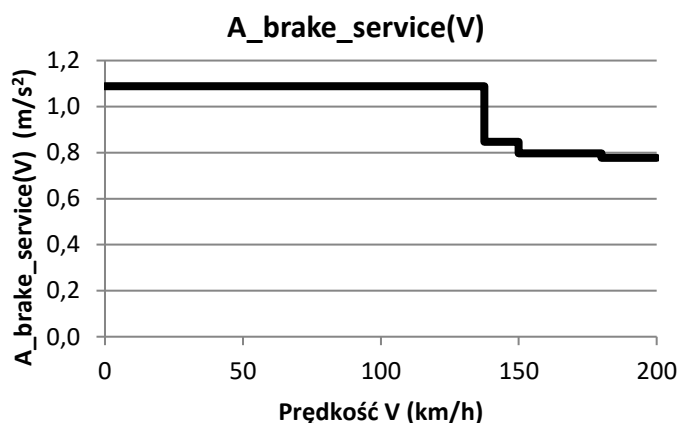
Rysunek 9-22 Charakterystyka siły hamowania nagłego w funkcji prędkości uzyskana w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool* dla pociągu 1 [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-23 Charakterystyka siły hamowania służbowego w funkcji prędkości uzyskana w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool* dla pociągu 1 [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-24 Charakterystyka siły hamowania nagłego w funkcji prędkości uzyskana w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool* dla pociągu 2 [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-25 Charakterystyka siły hamowania służbowego w funkcji prędkości uzyskana w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool* dla pociągu 2 [źródło: opracowanie własne]

2. Charakterystyka infrastruktury

Dla potrzeb przeprowadzenia symulacji krzywych hamowania przyjęto następującą charakterystykę infrastruktury.

Przyjęty dystans między pozycją pociągu, a miejscem ograniczenia prędkości lub końca zezwolenia na jazdę wynosi 5000 [m]. Dystans ten określono na podstawie wstępnych kalkulacji krzywych hamowania w narzędziu, celem otrzymania charakterystyk obejmujących punkt początkowy informowania maszynisty. *Release speed*, czyli prędkość dojazdową pozwalającą na dojazd do końca zezwolenia na jazdę, przyjęto na 20 [km/h]. Balisy umiejscowiono co 1000 [m], co jest średnią wartością przyjmowaną w instalacjach na sieci PKP PLK S.A. Profil podłużny (gradient) przyjęto jako 0‰. Na sieci PKP PLK profil podłużny na liniach magistralnych pierwszorzędnych zwykle nie przekracza 5‰, co ma pomijalne znaczenie przy kalkulacji krzywej hamowania.

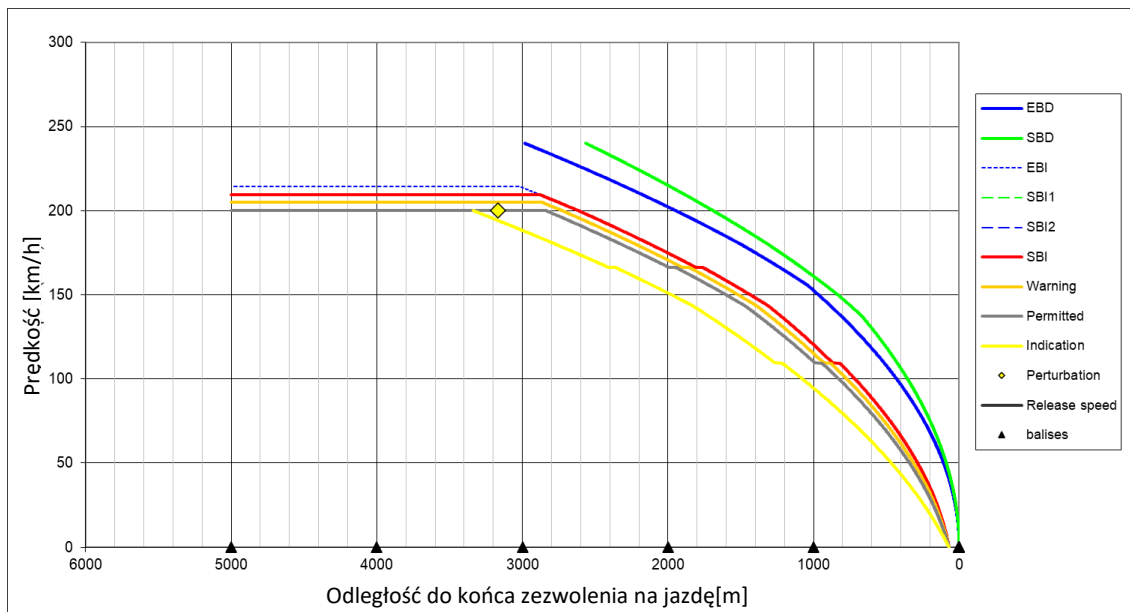
W systemie ERTMS/ETCS określono wartości zmiennych narodowych, czyli specyficznych parametrów, które można definiować w zależności od wypracowanych lub obowiązujących zasad danego zarządcy infrastruktury. Rysunek 9-26 przedstawia zmienne narodowe możliwe do skonfigurowania w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool* oraz ich przyjęte wartości w ramach prowadzonych symulacji. Przyjęte wartości zmiennych narodowych odpowiadają obecnie przyjętym dla sieci PKP PLK S.A.

Jako rezultat symulacji z wykorzystaniem narzędzia *ERA Braking curves simulation tool* uzyskano macierze wartości prędkości i odpowiadające im wyliczone charakterystyki hamowania ETCS (tzw. krzywe hamowania) oraz charakterystyki w postaci graficznej. Wyniki uzyskano osobno dla pociągu 1 i pociągu 2. Uzyskane macierze uwzględniono w modelu symulacyjnym jazdy pociągów w oparciu o system ETCS, przedstawionym w rozdziale 5.2.

Permission to use service brake in target speed monitoring	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No		Q_NVSBTSMPerm	Yes
Permission to use the guidance curve	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No		Q_NVGUIPerm	No
Permission to inhibit the compensation of the speed measurement inaccuracy	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No		Q_NVINHSMICPerm	No
Maximum deceleration value under reduced adhesion conditions(1)	1	m/s ²	A_NVMAXREDADH1	1
Maximum deceleration value under reduced adhesion conditions(2)	0,7	m/s ²	A_NVMAXREDADH2	0,7
Maximum deceleration value under reduced adhesion conditions(3)	0,7	m/s ²	A_NVMAXREDADH3	0,7

Rysunek 9-26 Zmienne narodowe przyjęte w narzędziu *ERA Braking curves simulation tool* [źródło: opracowanie własne]

Przykładowa charakterystyka hamowania uzyskana z wykorzystaniem narzędzia *ERA Braking curves simulation tool* dla pojazdu typu B przy jeździe z prędkości 200 [km/h] do zatrzymania przedstawia Rysunek 9-27. Natomiast charakterystykę hamowania dla tego samego pojazdu typu B z prędkości 200 [km/h] do prędkości 120 [km/h] prezentuje Rysunek 9-28.

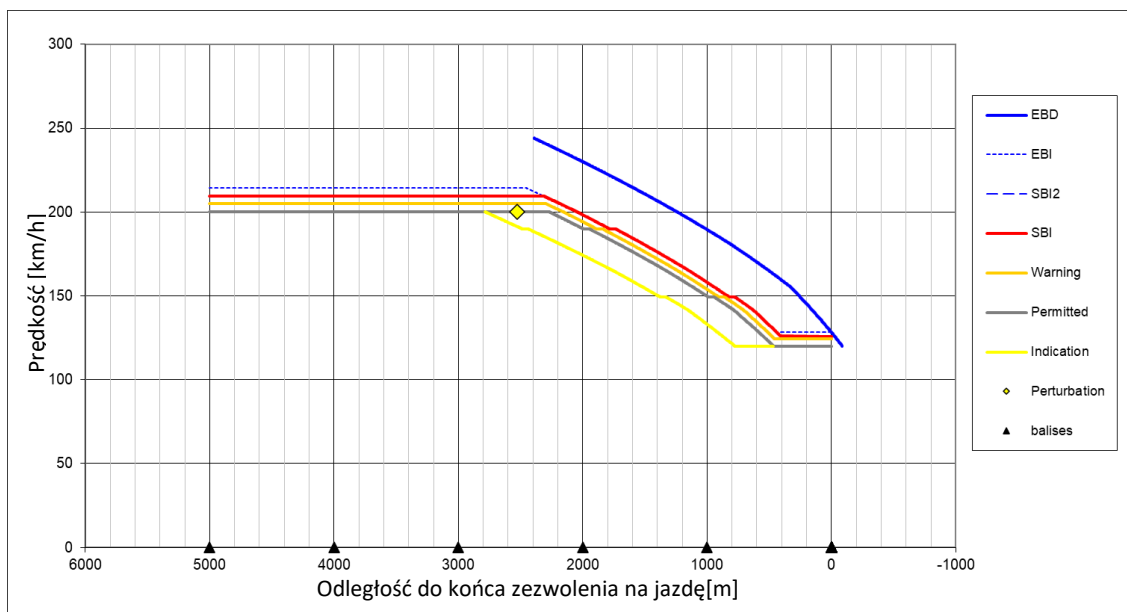


Rysunek 9-27 Obliczone krzywe hamowania z wykorzystaniem narzędzia *ERA Braking curves simulation tool* dla pojazdu typu B dla hamowania od prędkości maksymalnej 200 [km/h] do zatrzymania [źródło: opracowanie własne]

Widoczne na obydwu rysunkach (Rysunek 9-27 i Rysunek 9-28) przesunięcia wykresu powstają w lokalizacji balis (czyli stałych transponderów zamocowanych w międzytorzu), względem których następuje relokacja pozycji pociągu w systemie ETCS. Inaczej mówiąc, przedział ufności odometru ulega wyzerowaniu i możliwa jest korekta obliczonej charakterystyki, pomniejszonej o uprzednio przekalkulowany przedział ufności pozycji pociągu.

Jako istotną do dalszych symulacji wzięto pod uwagę krzywą prędkości dopuszczalnej P (ang. Permitted). Krzywa ta wyznacza dozwoloną prędkość w danym miejscu drogi jazdy, w przypadku przekroczenia której, maszynista ma dość czasu, aby stosując hamowanie służbowe, pociąg nie powinien przekroczyć punktu, w którym pokładowy system ETCS przejmie kontrolę na układem hamulcowym.

Tabela 9-2 przedstawia wyliczone początki wyznaczonych z użyciem narzędzia *ERA Braking curves simulation tool* krzywych hamowania Permitted (P), które nakazują maszyniście rozpoczęcie hamowania. Uzyskane wartości porównano z klasyczną długością odstępu dla przyjętej prędkości maksymalnej. Uzyskane wartości początku krzywych Permitted (P) przy hamowaniu z prędkości maksymalnej do zatrzymania są znacznie większe od przyjętych klasycznych długości odstępu, a więc i wymaganej drogi hamowania dla prędkości 160 [km/h]. Należy tu zauważyć, że obliczone dla obydwu pociągów wartości procentu masy hamującej P_r pozwalają na jazdę obydwu pociągów z prędkością maksymalną do 160 [km/h] w oparciu o sterowanie poprzez sygnalizację przytorową. Oznacza to, że obydwa pociągi, jadąc poza kontrolą systemu ETCS, muszą być w stanie wyhamować z prędkości 160 [km/h] do zatrzymania na długości odstępu równej 1300 [m]. Jazda z większą prędkością niż 160 [km/h] poza systemem ETCS nie jest dozwolona [113]. Przedstawione wyniki obrazują praktyczne rezultaty defensywnego sposobu nadzoru nad jazdą pociągu przez system ETCS, co było omawiane w rozdziale 4.2.



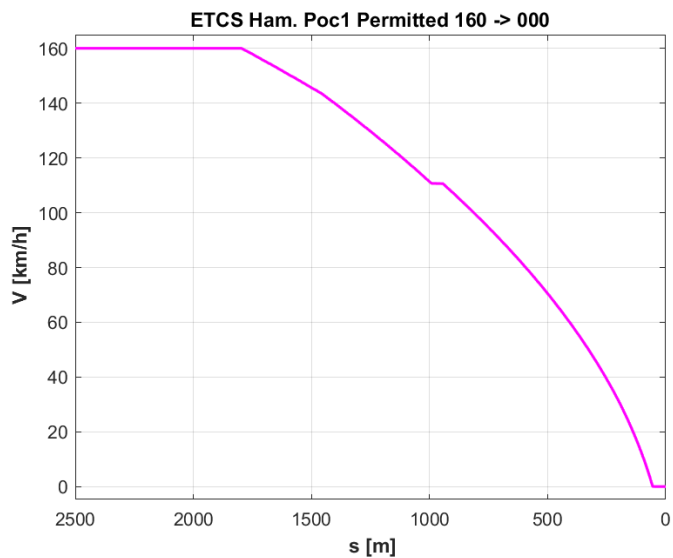
Rysunek 9-28 Obliczone krzywe hamowania z wykorzystaniem narzędzia *ERA Braking curves simulation tool* dla pojazdu typu B dla hamowania od prędkości maksymalnej 200 [km/h] do prędkości [120 km/h] [źródło: opracowanie własne]

Tabela 9-2 Wyliczone wartości początku krzywych Permitted (P) z użyciem narzędzia *ERA Braking curves simulation tool* dla pojazdu typu A oraz pojazdu typu B przy różnych prędkościach początkowych i docelowych

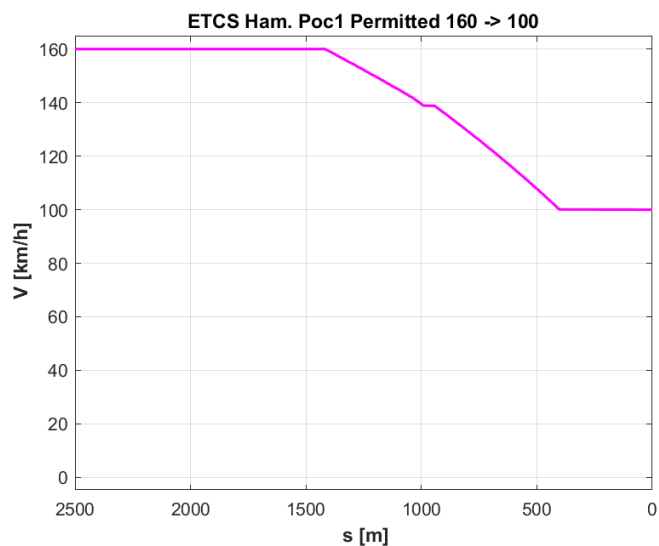
Pojazd	Prędkość początkowa [km/h]	Prędkość końcowa [km/h]	Długość charakterystyki Permitted względem zatrzymania lub początku ograniczenia prędkości [m]	Klasyczna długość odstępu [m]
Pojazd typu A	160	0	1796	1300
Pojazd typu A	160	100	1418	1300
Pojazd typu A	160	120	1218	1300
Pojazd typu A	160	140	926	1300
Pojazd typu A	200	0	2823	1300
Pojazd typu A	200	100	2465	1300
Pojazd typu A	200	120	2266	1300
Pojazd typu A	200	140	2022	1300
Pojazd typu B	160	0	1810	1300
Pojazd typu B	160	100	1418	1300
Pojazd typu B	160	120	1218	1300
Pojazd typu B	160	140	926	1300
Pojazd typu B	200	0	2837	1300
Pojazd typu B	200	100	2465	1300
Pojazd typu B	200	120	2266	1300
Pojazd typu B	200	140	2021	1300

Źródło: opracowanie własne

Rysunek 9-29 i Rysunek 9-30 przedstawiają przykładowe charakterystyki hamowania dla pojazdu typu A, uzyskane przy zastosowaniu narzędzia *ERA Braking curves simulation tool*, uwzględnione w oprogramowaniu symulacyjnym i uzyskane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink. Pozostałe charakterystyki prezentuje Załącznik nr 9.1.



Rysunek 9-29. Charakterystyka hamowania ETCS dla pojazdu typu A dla hamowania z prędkości 160 [km/h] do zatrzymania, uwzględniona w oprogramowaniu symulacyjnym [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-30. Charakterystyka hamowania ETCS dla pociągu pojazdu typu A dla hamowania z prędkości 160 [km/h] do 100 [km/h], uwzględniona w oprogramowaniu symulacyjnym [źródło: opracowanie własne]

9.1.3. Podsumowanie

Rysunek 9-31 prezentuje przykładowy profil prędkości maksymalnej szlaku, na który został nałożony profil jazdy pociągu. Profil jazdy pociągu zostanie użyty w dalszych badaniach symulacyjnych. Profil ten uwzględnia:

- charakterystykę przyspieszania uzyskaną z pomiarów dla pojazdu typu B (rozdział 9.1.1);
- charakterystykę hamowania obliczaną według modelu hamowania ETCS (rozdział 9.1.2).

Tabela 9-3 przedstawia wyliczone wartości krzywych hamowania dla obydwu typów pojazdów (A i B) z użyciem narzędzia ERA Braking curves simulation tool dla prędkości początkowej 160 [km/h].

Tabela 9-3 Wyliczone wartości krzywych hamowania z użyciem narzędzia *ERA Braking curves simulation tool* dla pojazdu typu A oraz pojazdu typu B dla prędkości 160 [km/h]

Pojazd typu A:

Initial speed (km/h)	Distance from target (m)							Release speed (km/h)
	Perturbation	Indication	Permitted	Warning	SBI	EBI	StartRSM	
160,00	2088,88	2238,87	1810,27	1721,43	1632,54	1632,54	N/A	0

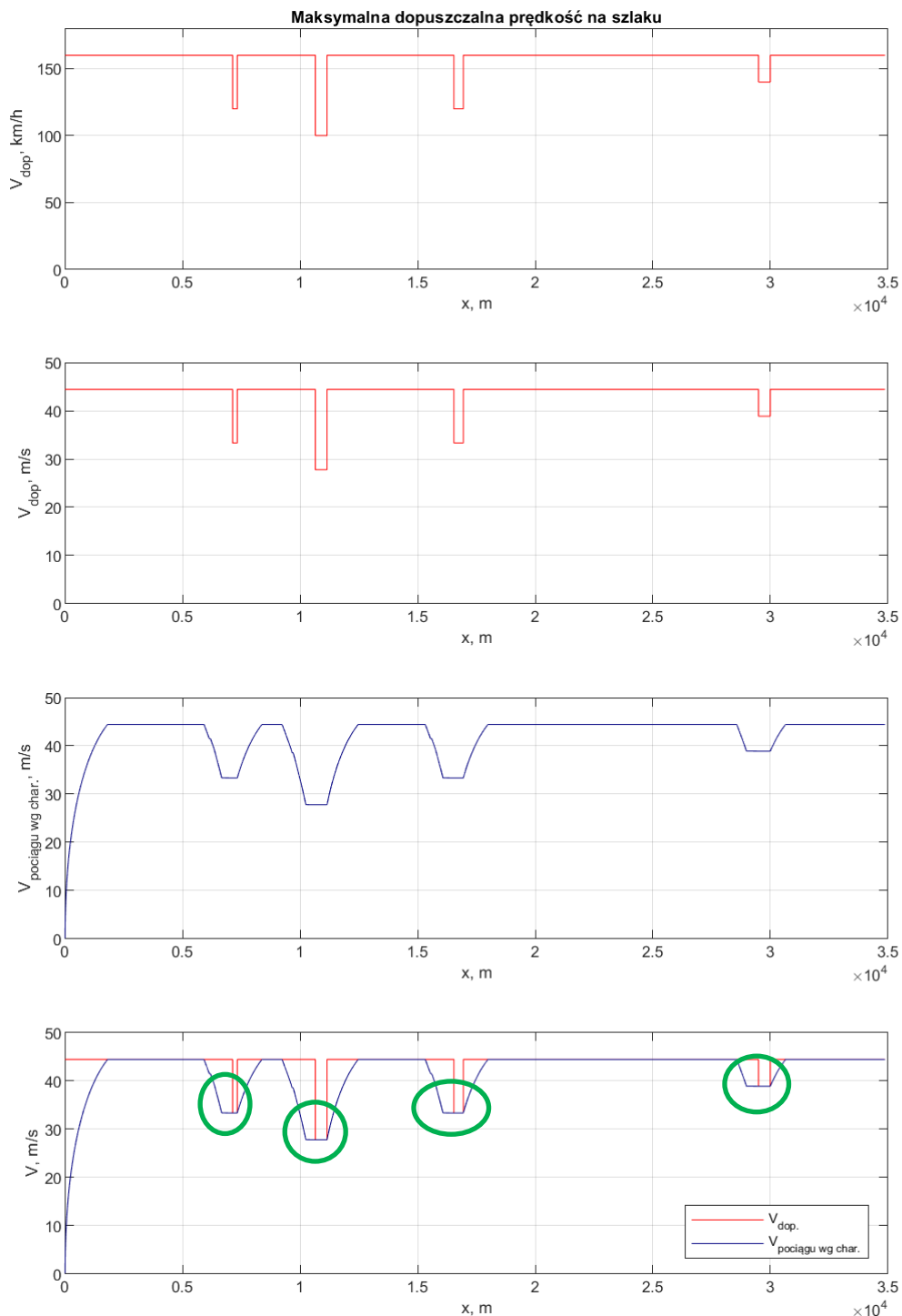
Pojazdu typu B:

Initial speed (km/h)	Distance from target (m)							Release speed (km/h)
	Perturbation	Indication	Permitted	Warning	SBI	EBI	StartRSM	
160,00	2074,58	2224,57	1796,02	1707,14	1618,25	1618,25	N/A	0

Źródło: opracowanie własne

W ramach analizy procesów hamowania i przyspieszeń, jak również podczas symulowania charakterystyk hamowania ETCS zaobserwowano następującą zależność. Długość drogi hamowania pojazdu typu B od prędkości 160 [km/h] do zatrzymania wyznaczona w sposób zaproponowany w rozdziale 9.1.1 jest zbliżona do długości drogi hamowania w charakterystyki Indication, stosowanej w systemie ETCS i wyznaczonej za pomocą symulacji, co pokazano w rozdziale 9.1.2. Dla pojazdu typu A zastosowanego w celu wyznaczenia drogi hamowania w systemie ETCS droga hamowania według charakterystyki Indication wynosi 2238,87 [m], a wyznaczona dla pojazdu typu A z pomiarów wynosi 2287,8 [m]. Różnica wynosi 2,2% i jest pomijalna. Dla pojazdu typu B zaobserwowano podobną zależność.

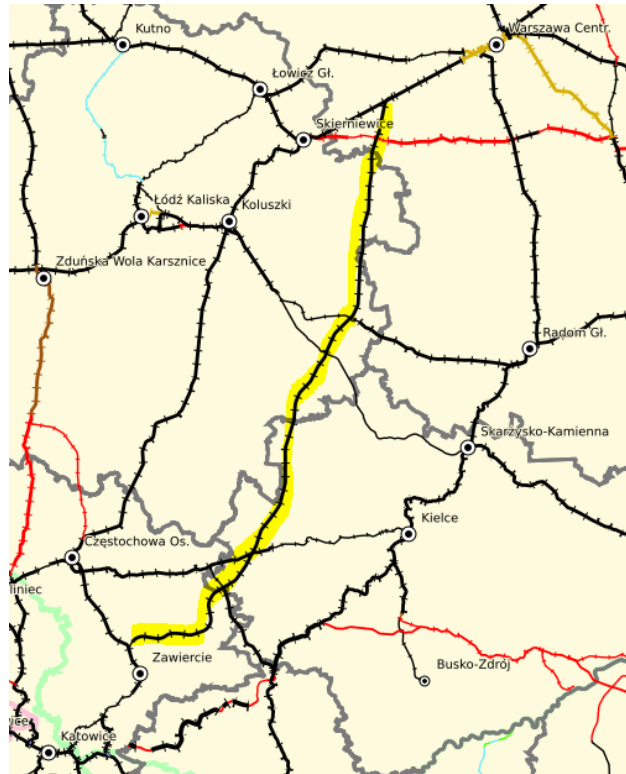
Parametry pojazdu typu A, zastosowanego w celu wyznaczenia drogi hamowania w systemie ETCS, były zgodne z parametrami pojazdu typu A, dla którego uzyskano wyniki rzeczywistych charakterystyk hamowania i przyspieszania w czasie pomiarów terenowych.



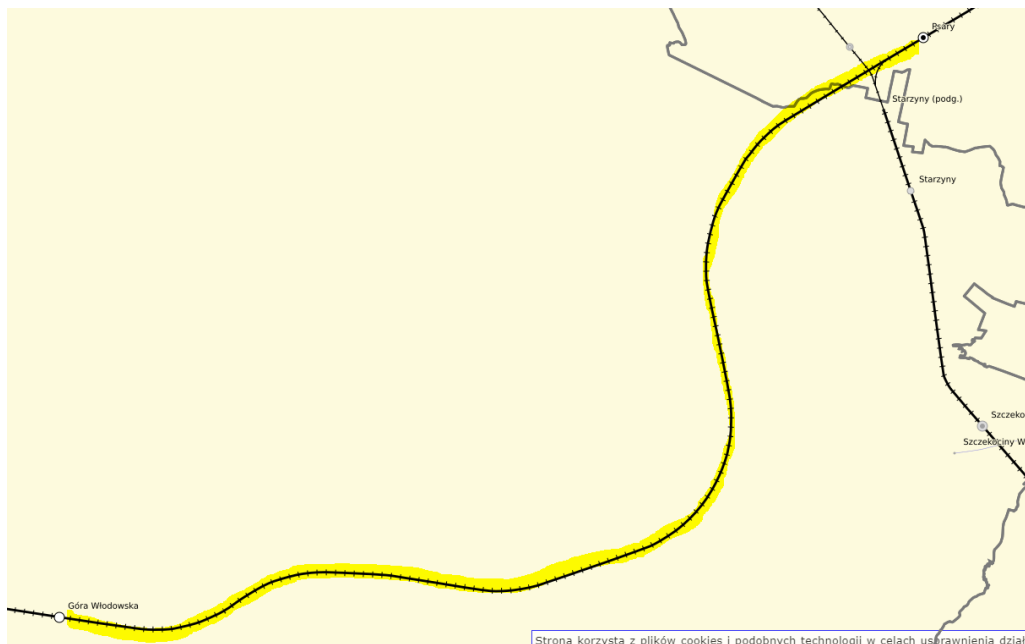
Rysunek 9-31. Profil prędkości maksymalnej szlaku i profil jazdy pociągu z uwzględnieniem charakterystyki hamowania ETCS i charakterystyki przyspieszania uzyskanej z pomiarów [źródło: opracowane własne]

9.2. Parametry infrastruktury

Dla potrzeb badań zdolności przepustowej wybrano szlak pomiędzy stacją Psary, a stacją Góra Włodowska, znajdującymi się na linii kolejowej nr 4. Linia ta jest częścią Centralnej Magistrali Kolejowej (CMK), łączącej konurbację górnośląską z Warszawą (Rysunek 9-32, Rysunek 9-33).



Rysunek 9-32. Umieszczenie linii kolejowej nr 4 na sieci kolejowej [źródło: opracowanie własne na podstawie danych [138]]



Rysunek 9-33. Przebieg linii kolejowej nr 4 na odcinku Góra Włodowska – Psary [źródło: opracowanie własne na podstawie danych z [138]]

W oprogramowaniu symulacyjnym zaimplementowano odwzorowanie rzeczywistej infrastruktury dla toru 1 ze stacji Psary w kierunku stacji Góra Włodowska, którego rozmieszczenie elementów i długości odstępów prezentuje Tabela 9-4, natomiast rozmieszczenie detektorów będących punktami oddziaływania poszczególnych semaforów względem samych semaforów przedstawia Rysunek 5-8.

Tabela 9-4 Rozmieszczenie elementów infrastruktury dla szlaku Psary Góra Włodowska, tor 1

Nazwa obwodu torowego	Nazwa semafora początkowego	Km sem. Początkowego	Nazwa semafora końcowego	Km sem. Końcowego	Długość odstępu [m]
it1713	N	0,000	1727	2,411	2411
it1727	1727	2,411	1743	3,871	1460
it1743	1743	3,871	1759	5,568	1697
it1759	1759	5,568	1773	7,043	1475
it1773	1773	7,043	1789	8,592	1549
it1789	1789	8,592	1807	10,412	1820
it1807	1807	10,412	1827	12,699	2287
it1827	1827	12,699	1841	14,120	1421
it1841	1841	14,120	1859	15,765	1645
it1859	1859	15,765	1881	18,044	2279
it1881	1881	18,044	1897	19,693	1649
it1897	1897	19,693	1917	21,716	2023
it1917	1917	21,716	1935	23,512	1796
it1935	1935	23,512	1951	24,967	1455
it1951	1951	24,967	1967	26,573	1606
it1967	1967	26,573	1981	28,033	1460
it1981	1981	28,033	1995	29,401	1368
it1995	1995	29,401	2009	30,805	1404
it2009	2009	30,805	2023	32,206	1401
it2023	2023	32,206	2035	33,518	1312
it2035	2035	33,518	B	34,877	1359

Źródło: opracowanie własne

Na analizowanym szlaku pociągi poruszają się z prędkością maksymalną do 160 [km/h] dla pociągów osobowych oraz do 120 [km/h] dla pociągów towarowych. Na szlaku zainstalowana jest blokada czterostawna, jednakże – jak przedstawia Tabela 9-4 – długości odstępu są zaprojektowane jako dłuższe niż przyjęta długość drogi hamowania (1300 [m] dla prędkości 160 [km/h] zgodnie z [53]). W związku z tym, zastosowanie blokady czterostawnej nie wpływa na zdolność przepustową analizowanego szlaku w ujęciu czasu blokowania poszczególnych odstępu. Na przedmiotowym szlaku zainstalowany jest system ERTMS/ETCS poziom 1 skonfigurowany dla jazd do 200 [km/h], natomiast obecnie trwa projekt zabudowy na analizowanym odcinku systemu ERTMS/ETCS poziomu 2.

Z uwagi na odwzorowanie, w ocenie zdolności przepustowej, wpływu zmiany profilu prędkości na linii wprowadzono w niektórych miejscach ograniczenia prędkości, mające odwzorować potencjalne ostrzeżenia stałe. Profil prędkości z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń prędkości przedstawia Rysunek 5-1a, natomiast dokładna lokalizacja początku i końca danego ograniczenia prędkości zawiera Tabela 7-1.

9.3. Symulacyjne badania zdolności przepustowej

W rozdziale przedstawiono wyniki badań symulacyjnych w oparciu o dane wejściowe dotyczące charakterystyk przyspieszania i hamowania pociągów oraz charakterystyki badanego szlaku przedstawione w rozdziałach 9.1 i 9.1.2. Badania symulacyjne miały na celu sprawdzenie maksymalnej zdolności przepustowej przy ruchu pociągów wyposażonych w system ERTMS/ETCS, na przedmiotowym szlaku, przy różnej konfiguracji podziału odstępu:

- klasyczny podział zgodny z rzeczywistym rozmieszczeniem semaforów blokadowych;
- zastosowanie dodatkowego podziału odstępu z wykorzystaniem wirtualnych odstępu.

Dodatkowy, dyskretny, podział odstępów ma zadanie zniwelowania niekorzystnego zjawiska związanego z odchyłkami od rozkładu jazdy pod nadzorem systemu ERTMS/ETCS przy wykorzystaniu ciągłej transmisji tor-pojazd wraz z raportowaniem pozycji pociągu.

Przedstawione badania mają na celu wyznaczenie maksymalnej zdolności przepustowej. Wyznaczaniu podlega maksymalna liczba pociągów o danych charakterystykach jazd, które mogą przejechać analizowany szlak przy maksymalnej prędkości wynikającej:

- z prędkości konstrukcyjnej pojazdów kolejowych jadących w jeździe pociągowej,
- z prędkością maksymalną szlaku z uwzględnieniem ograniczeń prędkości.

Maksymalną zdolność przepustową wyznaczono, biorąc pod uwagę minimalny czas następstwa pociągów. Jest to taki czas, który zapewnia:

- bezpieczną odległość między pociągami oraz
- brak hamowania i ponownego przyspieszania pociągu w wyniku osiągnięcia przez czoło pociągu punktu początku drogi hamowania do miejsca zatrzymania wynikającego z zajętości odstępu przez pociąg poprzedzający.

9.3.1. Dodatkowy podział odstępu przy zastosowaniu dwóch semaforów wirtualnych

Rozważmy sytuację, gdy wprowadzono dwa wirtualne semafony pomiędzy semafony fizyczne (konfiguracja **II_Sem_VIR_między_REAL=2** opisana w rozdziale 8.1), a system sterowania w oparciu o sygnalizację kabinową z wykorzystaniem systemu ETCS (założenia opisano w rozdziale 5.2).

Współrzędne semaforów i detektorów przy analizowanej konfiguracji szlaku zapisane w postaci macierzy w modelu szlaku przedstawiają się następująco:

```

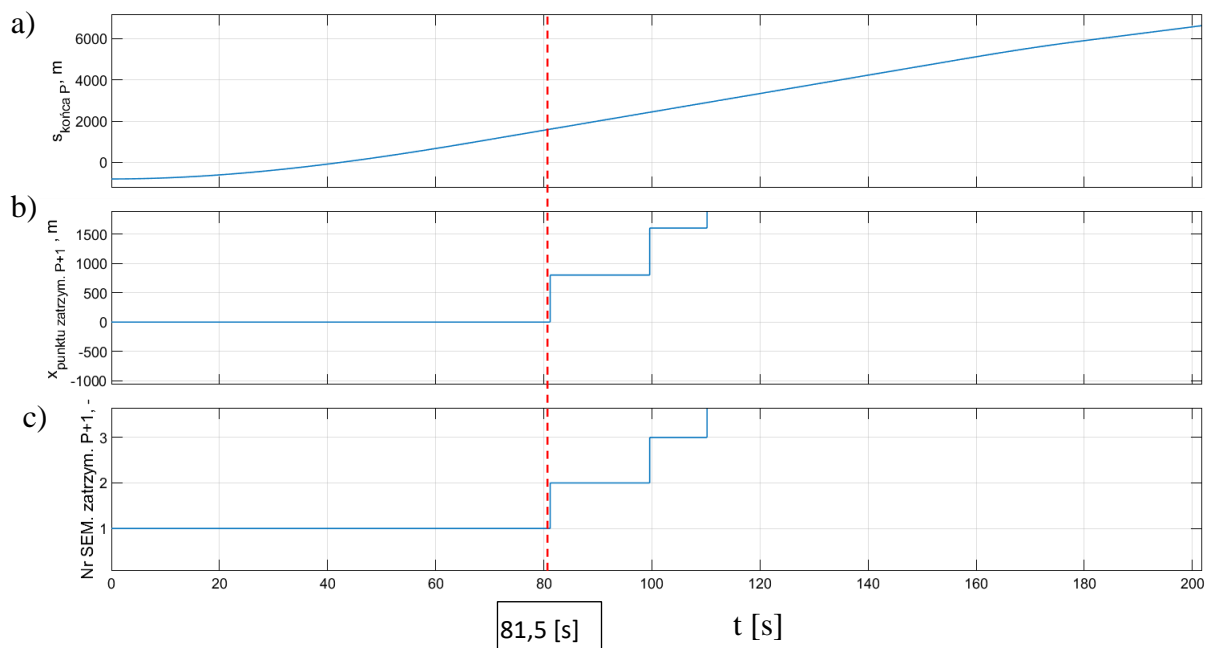
Wsp_Sem_REAL_i_VIR_na_szlaku =
1.0e+04 *
Columns 1 through 11
0.0000 0.0804 0.1607 0.2411 0.2898 0.3384 0.3871 0.4437 0.5002 0.5568 0.6060
Columns 12 through 22
0.6551 0.7043 0.7559 0.8076 0.8592 0.9199 0.9805 1.0412 1.1174 1.1937 1.2699
Columns 23 through 33
1.3173 1.3646 1.4120 1.4668 1.5217 1.5765 1.6525 1.7284 1.8044 1.8594 1.9143
Columns 34 through 44
1.9693 2.0367 2.1042 2.1716 2.2315 2.2913 2.3512 2.3997 2.4482 2.4967 2.5502
Columns 45 through 55
2.6038 2.6573 2.7060 2.7546 2.8033 2.8489 2.8945 2.9401 2.9869 3.0337 3.0805
Columns 56 through 64
3.1272 3.1739 3.2206 3.2643 3.3081 3.3518 3.3971 3.4424 3.4877

Wsp_DETEKT_REAL_i_VIR_na_szlaku =
1.0e+04 *
Columns 1 through 11
0.0100 0.0804 0.1607 0.2426 0.2898 0.3384 0.3886 0.4437 0.5002 0.5583 0.6060
Columns 12 through 22
0.6551 0.7058 0.7559 0.8076 0.8607 0.9199 0.9805 1.0427 1.1174 1.1937 1.2714
Columns 23 through 33
1.3173 1.3646 1.4135 1.4668 1.5217 1.5780 1.6525 1.7284 1.8059 1.8594 1.9143
Columns 34 through 44
1.9708 2.0367 2.1042 2.1731 2.2315 2.2913 2.3527 2.3997 2.4482 2.4982 2.5502
Columns 45 through 55
2.6038 2.6588 2.7060 2.7546 2.8048 2.8489 2.8945 2.9416 2.9869 3.0337 3.0820
Columns 56 through 66
3.1272 3.1739 3.2221 3.2643 3.3081 3.3533 3.3971 3.4424 3.4892 3.4977 3.5877

```

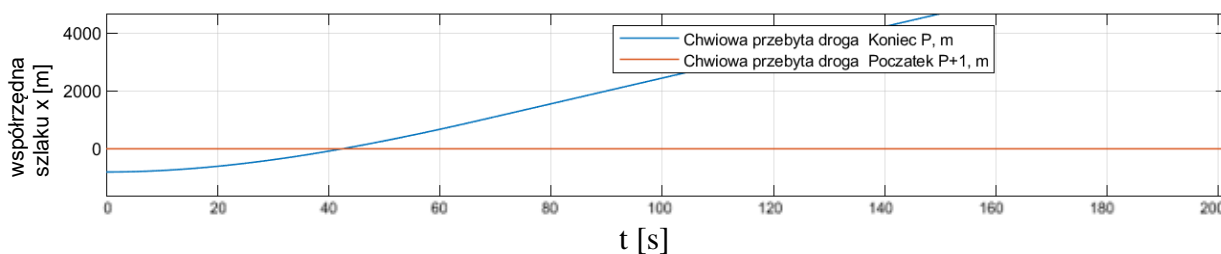
W przeprowadzonej pierwszej symulacji, która ma na celu pokazanie zależności między sygnałami, pociąg P+1 oczekiwał na sygnał zezwalający na semaforze wyjazdowym w wyniku przejazdu poprzedzającego pociągu P o długości 800 [m]. W 81,5 [s] symulacji poprzedzający

pociąg P przejechał całą swoją długością za współrzędną semafora 2 (Rysunek 9-34a,b,c), co umożliwia wyprawienie kolejnego pociągu P+1.



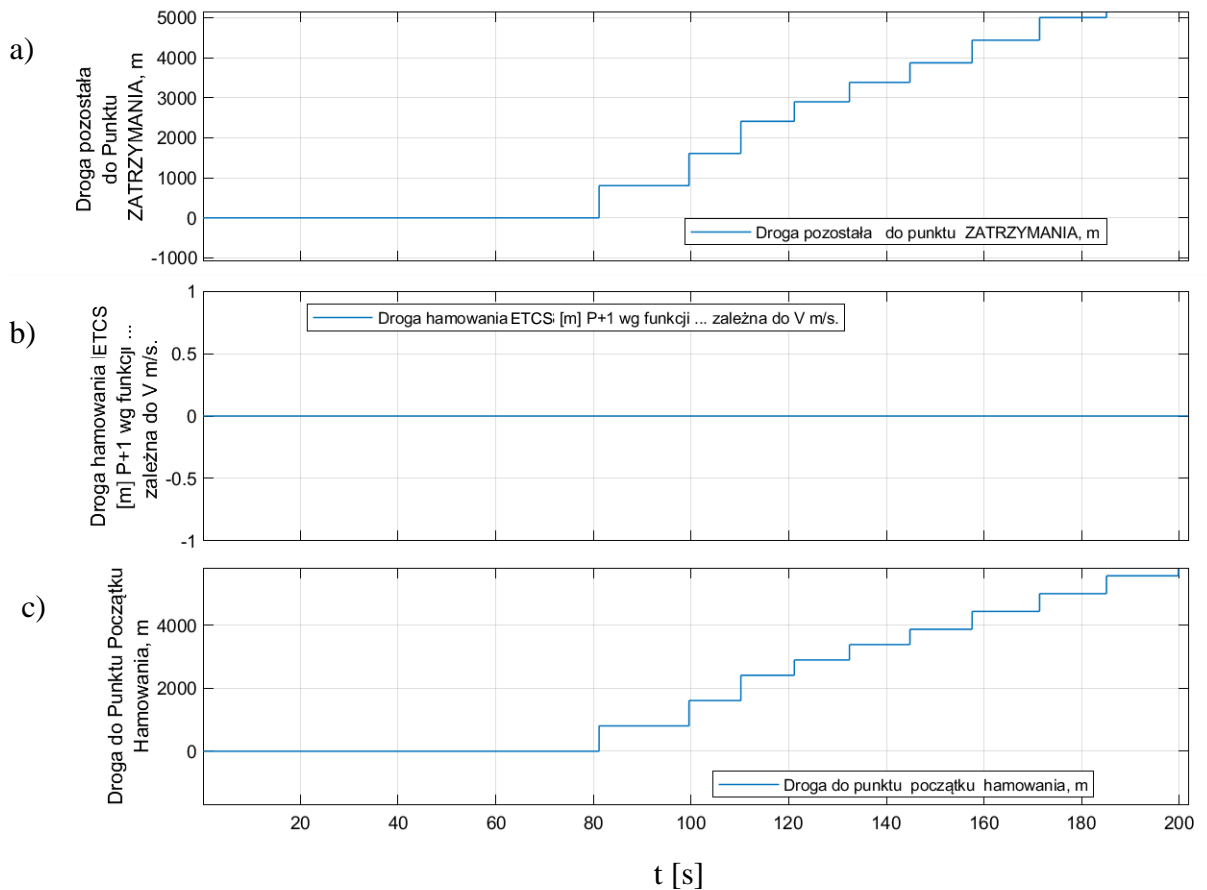
Rysunek 9-34. a – chwilowa, współrzędna końca pociągu P; b – współrzędna punktu zatrzymania (semafora wirtualnego) dla pociągu P+1 w wyniku przejazdu pociągu P; c – nr semafora zatrzymania dla pociągu P+1 w wyniku przejazdu pociągu P [źródło: opracowanie własne]

Zastosowano celowe zablokowanie możliwości wyjazdu pociągu P+1 w symulacji poprzez opóźnienie jego wyprawienia wynoszące ponad 250 [s] (Rysunek 9-35 -pomarańczowa linia).

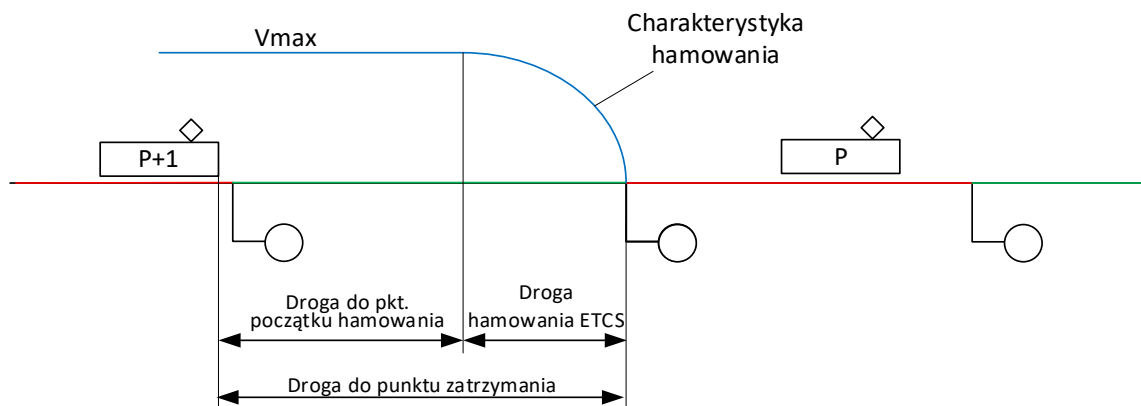


Rysunek 9-35. Chwilowa przebyta droga końca pociągu P oraz naniesiona chwilowa przebyta droga początku pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]

Rysunek 9-36a przedstawia charakterystykę chwilowej drogi pozostałej do zatrzymania (na semaforze wirtualnym) dla pociągu P+1 oraz drogę do początku punktu hamowania (Rysunek 9-36c) w oparciu o charakterystykę hamowania ETCS (Rysunek 9-36b) w wyniku interakcji z poprzedzającym pociągiem P, który poruszał się po szlaku. Pociąg P+1 w dalszym ciągu oczekiwał na wyprawienia na szlak. Rysunek 9-37 pokazuje zależności drogi do początku punktu hamowania, drogę hamowania oraz drogę do punktu zatrzymania.

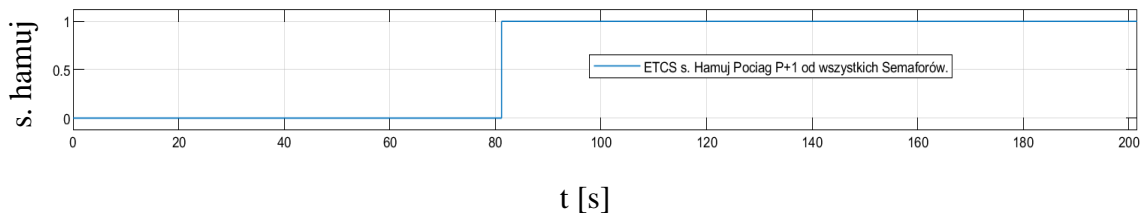


Rysunek 9-36. a – droga pozostała do punktu zatrzymania dla pociągu P+1 w wyniku zajętości kolejnych odstępów przez pociąg P; b – droga hamowania ETCS dla pociągu P=1 według funkcji określonej przez standard ETCS, zależna od prędkości chwilowej pociągu P+1; c – pozostała droga do punktu początku hamowania do końca zezwolenia na jazdę [źródło: opracowanie własne]



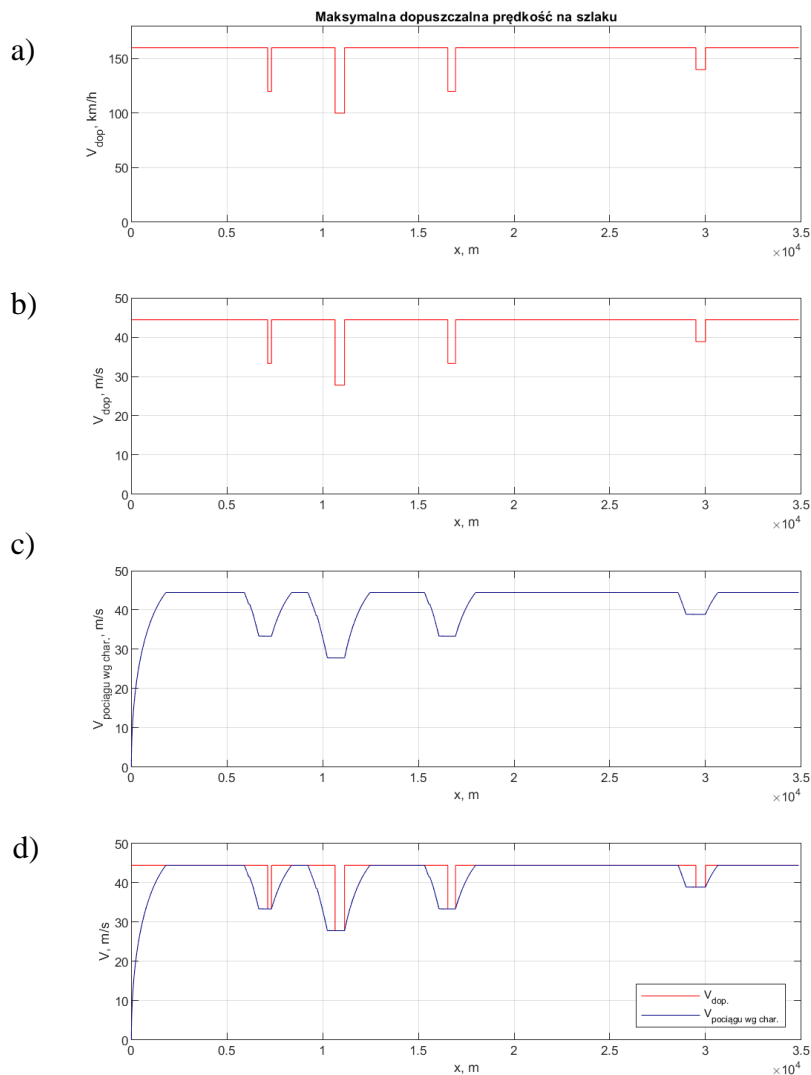
Rysunek 9-37. Droga do punktu zatrzymania, droga do punktu początku hamowania i droga hamowania dla pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]

Rysunek 9-38 przedstawia przebieg sygnału „hamuj” pochodzący od wszystkich semaforów – w tym przypadku zmienił on stan z „0” na „1” w 81,5 [s] i pozostawał w tym stanie przez cały okres analizowanego wycinka symulacji z uwagi na brak rozpoczęcia jazdy przez pociąg P+1.

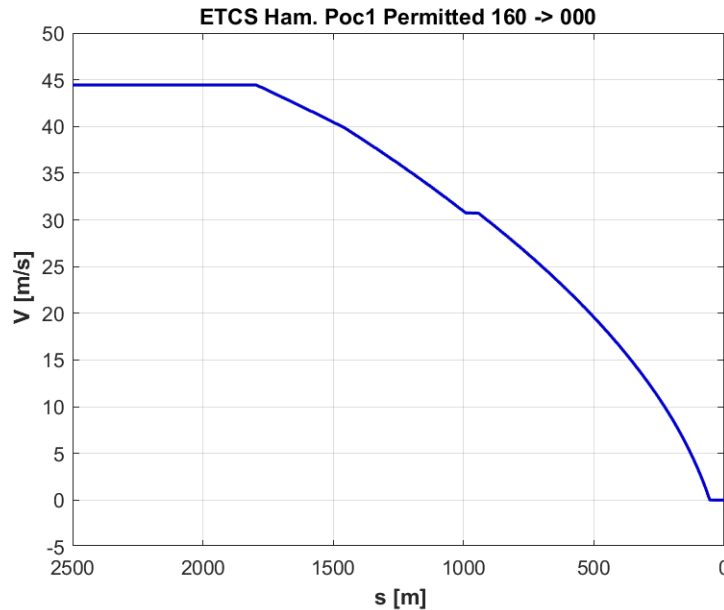


Rysunek 9-38. Przebieg sygnału „hamuj” dla pociągu P+1, pochodzący od wszystkich semaforów [źródło: opracowanie własne]

W kolejnej symulacji rozważono sytuację, w której pociąg P porusza się według profilu, który przedstawia Rysunek 9-39. Profil ten składa się z charakterystyk przyspieszeń uzyskanych z pomiarów (rozdział 9.1.1) oraz charakterystyk hamowań zgodnych z charakterystykami hamowania systemu ETCS uzyskanymi w wyniku symulacji (rozdział 9.1.2) – Rysunek 9-40.



Rysunek 9-39. Profil prędkości maksymalnej szlaku (a w [m/s] i b w [km/h]) i profil jazdy pociągu z uwzględnieniem charakterystyki hamowania ETCS i charakterystyki przyspieszania uzyskanej z pomiarów [źródło: opracowanie własne]

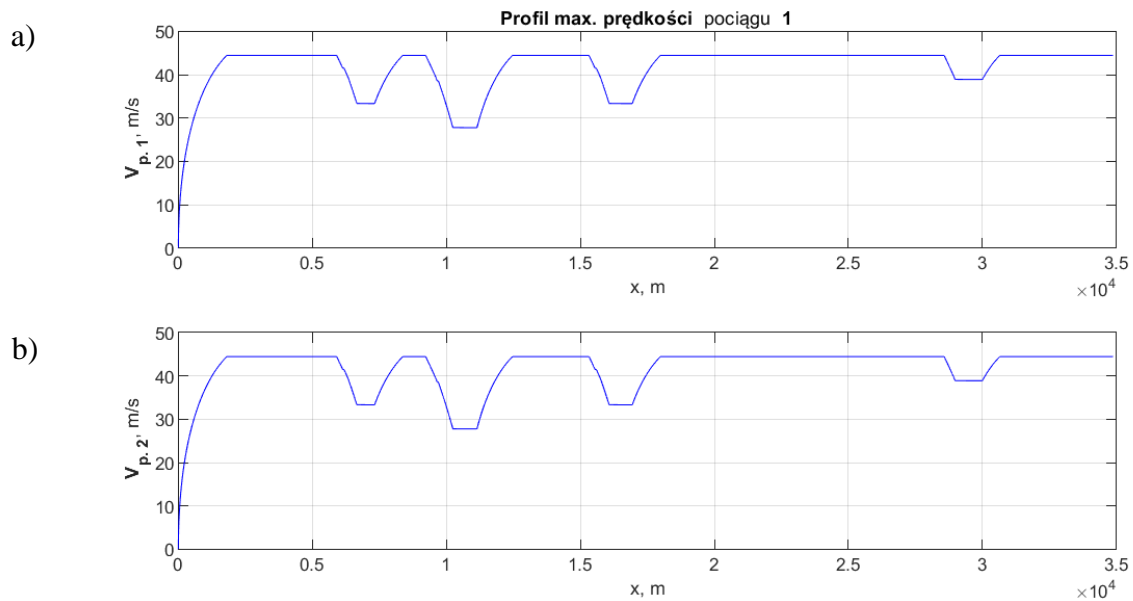


Rysunek 9-40. Przykładowa charakterystyka hamowania według modelu ETCS opisanego w [95] uwzględniona w symulacji [źródło: opracowanie własne]

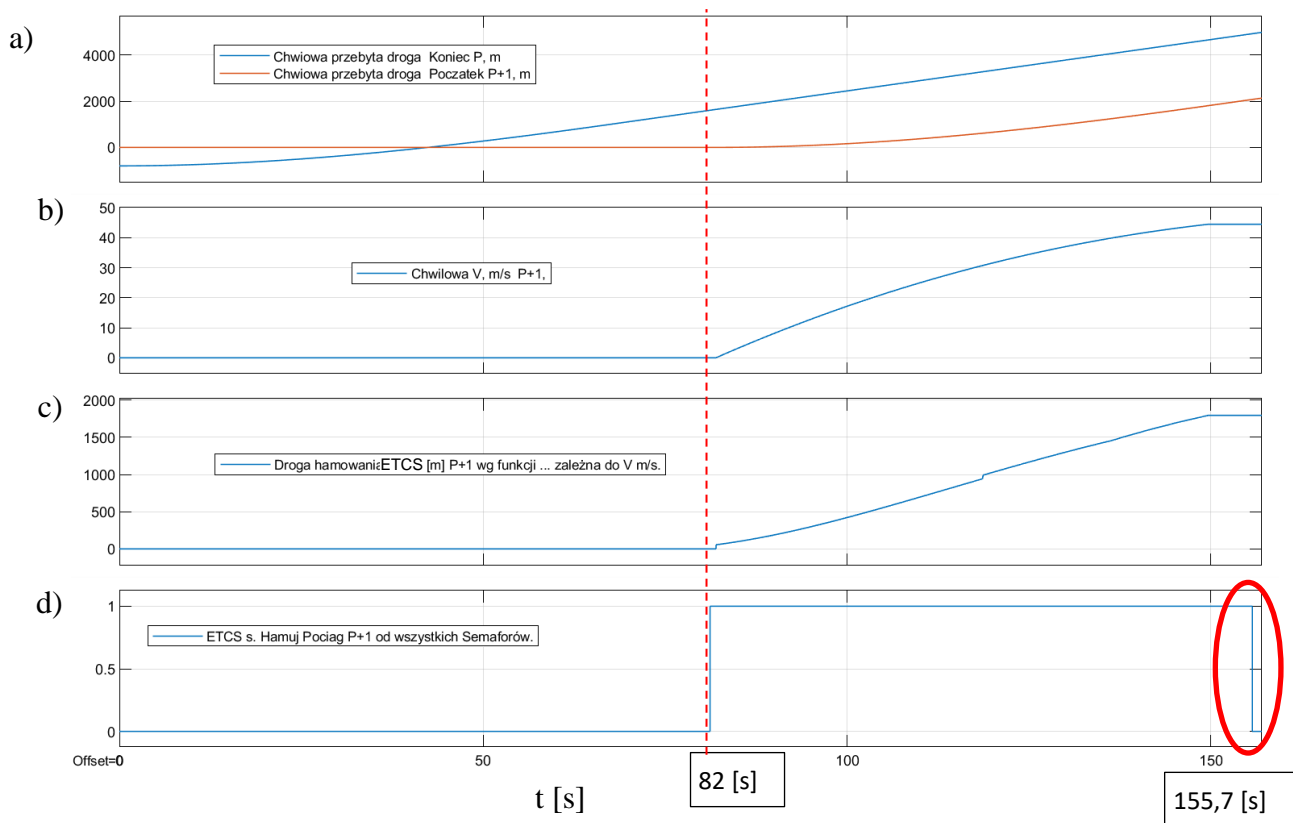
Rozważmy teraz, że pociąg kolejny ($P+1=2$) również poruszał się w określonych współrzędnych szlaku z prędkościami według charakterystyki, którą przedstawia Rysunek 9-41b. Pociąg ten ($P+1$) ruszył w 82 [s], w momencie wyświetlenia sygnału zezwalającego na semaforze wyjazdowym (Sem. 1), co miało miejsce w 81,5 [s] od rozpoczęcia symulacji.

Rysunek 9-42b przedstawia, jak prędkość pociągu $P+1$ zaczyna wzrastać od 82 [s], a Rysunek 9-42a przedstawia drogę przebytą przez koniec pociągu P i czoło pociągu $P+1$. Rysunek 9-42c przedstawia z kolei, jak wzrasta droga hamowania pociągu $P+1$ w zależności od chwili wpływającej od rozpoczęcia jazdy przez pociąg P i od prędkości jazdy pociągu $P+1$. Rysunek 9-42d przedstawia, że ok. 155,7 [s] nastąpiła zmiana sygnału „hamuj” z wartości „1” na „0”, co oznacza konieczność rozpoczęcia hamowania pociągu $P+1$. Rysunek 9-43 przedstawia, że w chwili czasowej ok. 155,7 [s] współrzędna końca pociągu P wynosi 4437 [m], co odpowiada odstępowi osłanianego przez 8 semafor wirtualny. W tej samej chwili czasowej punkt zatrzymania pociągu $P+1$ wynosi 3871 [m], co odpowiada współrzędnej semafora nr 7 z macierzy zawierającej zarówno semafony rzeczywiste, jak i wirtualne. Semafor wirtualny nr 7 jest równoważny rzeczywistemu semaforowi nr 3 (pomiędzy semaforami 1 i 2 oraz 2 i 3 są po dwa semafony wirtualne, więc razem jest 7).

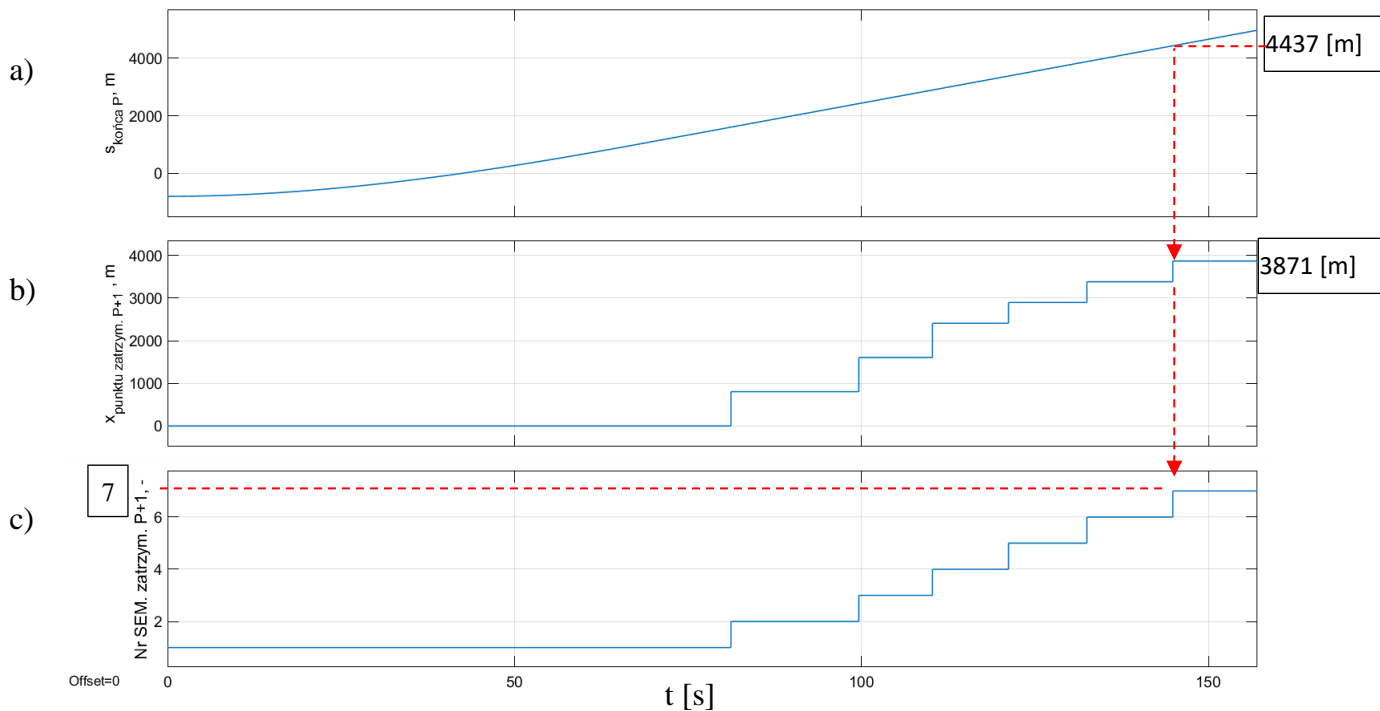
Z kolei Rysunek 9-44 przedstawia chwilową drogę hamowania według charakterystyk ETCS dla pociągu $P+1$. W analizowanej chwili czasowej (155,7 [s]) droga hamowania dla pociągu $P+1$ wynosiła 1796 [m]. W tej samej chwili czasowej czoło pociągu $P+1$ osiągnęło współrzędną względem semafora, na którym znajduje się koniec zezwolenia na jazdę (którego współrzędna na szlaku wynosi 3871 [m]), równą drodze hamowania (1796 [m]). Oznacza to, że odległość czoła pociągu do punktu początku hamowania wynosiło 0 [m] (Rysunek 9-44c), więc pociąg $P+1$ musi rozpocząć hamowanie. Gdyby pociąg $P+1$ nie rozpoczął hamowania w tej chwili czasowej, wartość drogi czoła tego pociągu do punktu początku hamowania przyjmowałyby wartości ujemne (co zobrazowano na rysunku Rysunek 9-44c w miejscu zaznaczonym okręgiem. To z kolei spowodowało, że wartość sygnału „hamuj” zmieniła się w podanej chwili czasowej z wartości „1” na wartość „0” (Rysunek 9-42d).



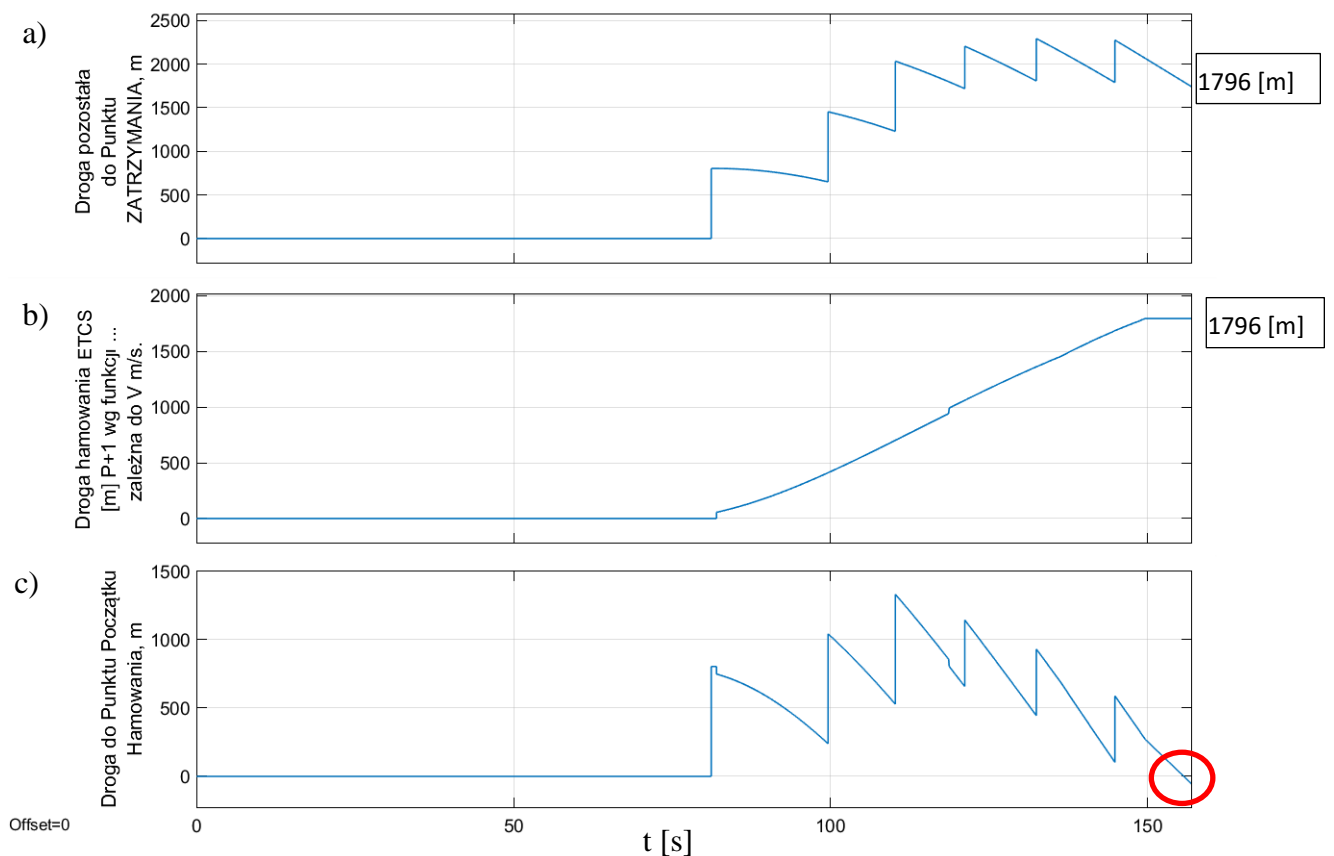
Rysunek 9-41. Charakterystyka jazdy pociągu a – P, b – P=1 [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-42. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b - wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1 według ETCS; d – przebieg s. „hamuj” pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]

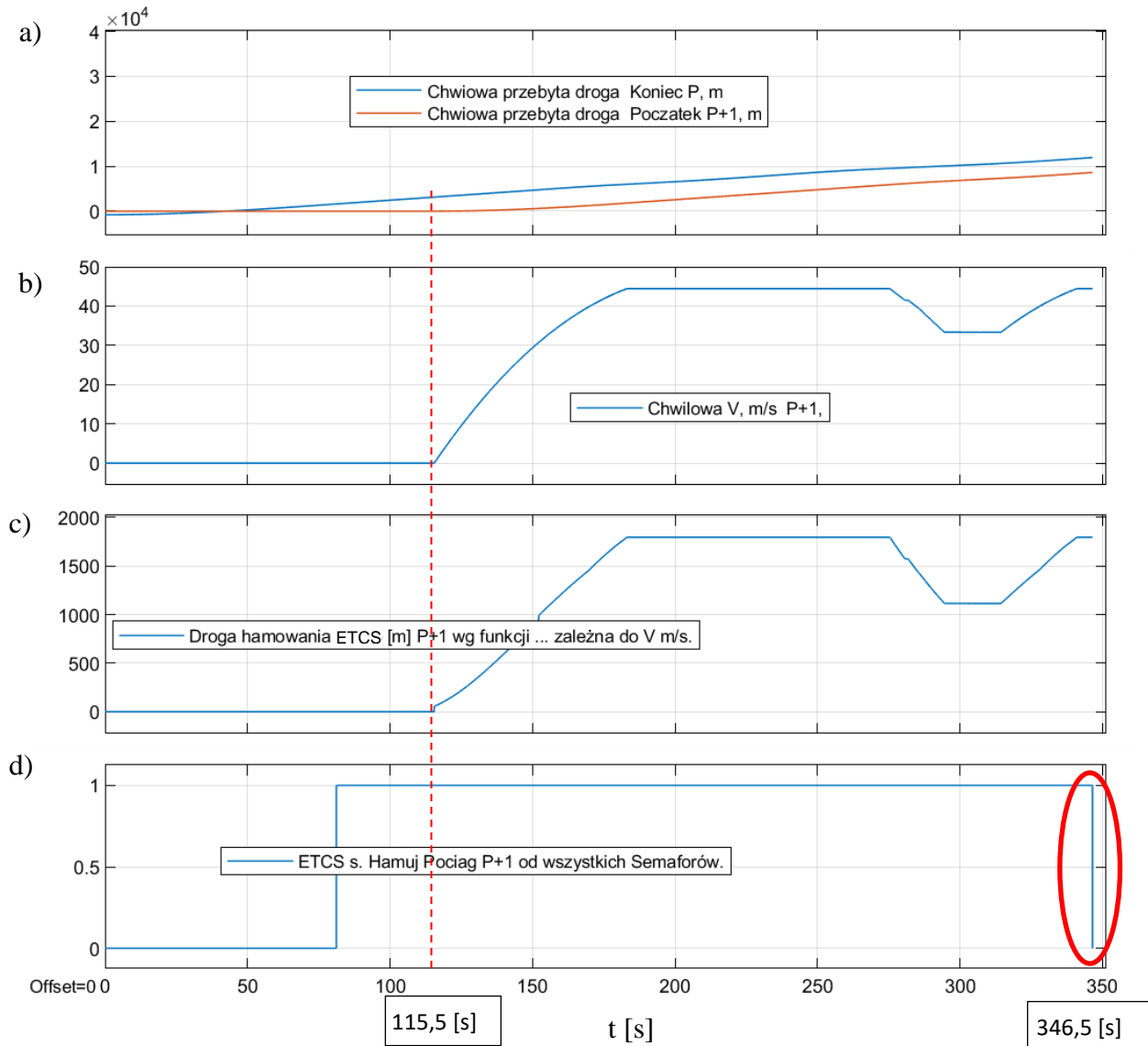


Rysunek 9-43 a – chwilowa współrzędna końca pociągu P; b – odległość do punktu zatrzymania dla pociągu P+1; c – nr semafora wyznaczającego koniec zezwolenia na jazdę/punkt zatrzymania dla pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]

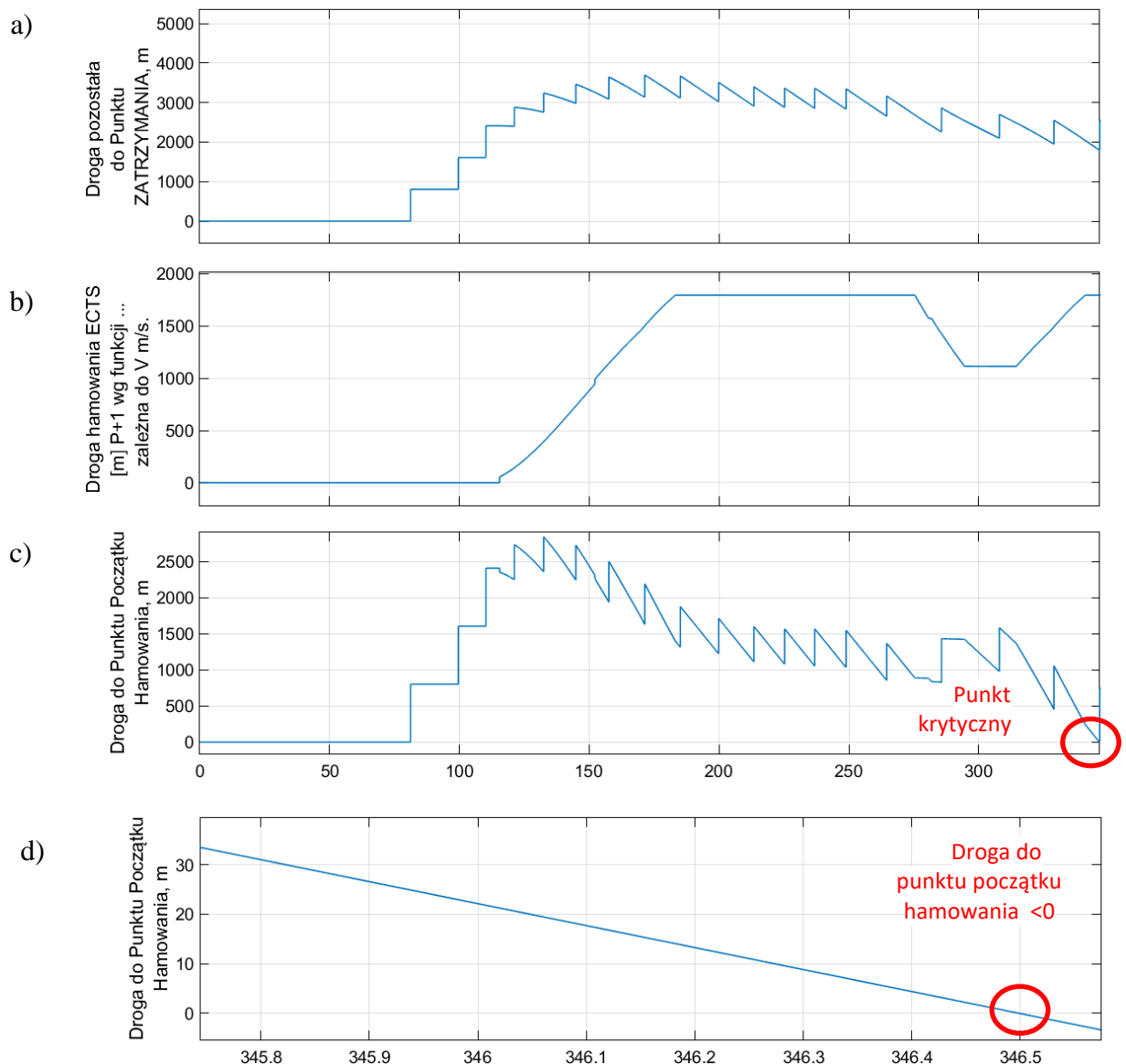


Rysunek 9-44 a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągi P+1, zaznaczono miejsce, gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartości ujemne [źródło: opracowanie własne]

W kolejnej symulacji pociąg P+1 był wyprawiany na szlak w chwili czasowej odpowiadającej symulacji 115,5 [s]. W tym przypadku sygnał „hamuj” osiąga wartość „0” w chwili czasowej ok. 346,5 [s] (Rysunek 9-45d). W tej chwili czasowej również wartość odległości czoła tego pociągu do punktu początku hamowania wynosiła 0 [m] (Rysunek 9-46c, d). W celu szerszego oglądu uzyskanych wyników przedstawiono również zmiany drogi przebytej przez pociągi P i P+1 (Rysunek 9-45a), zmiany prędkości jazdy pociągu P+1 (Rysunek 9-45b) oraz chwilową wartość długości drogi hamowania pociągu P+1 (Rysunek 9-45c).

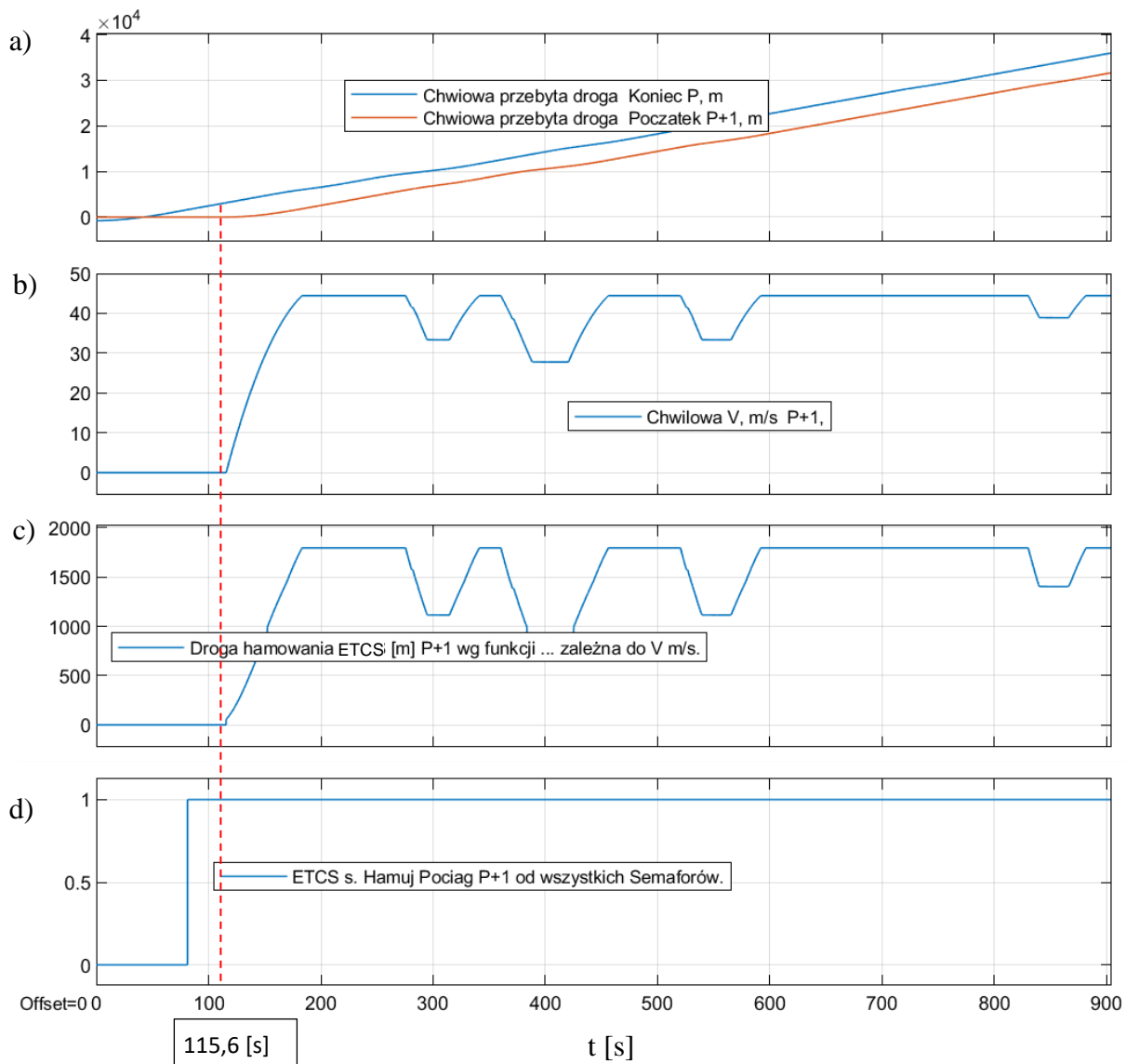


Rysunek 9-45. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b - wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1 według ETCS; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-46 a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągi P+1, zaznaczono miejsce, gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartości ujemne, tzw. punkt krytyczny; d – powiększenie, na którym widoczny jest fragment, który przedstawia Rysunek 9-46c, gdzie wartość drogi do punktu początku hamowania zaczyna przyjmować wartości mniejsze niż „0” [źródło: opracowanie własne]

Ustalono, że przy rozpoczęciu jazdy przez pociąg P+1 w chwili czasowej odpowiadającej w symulacji 115,6 [s] (a więc 74,1 [s] po możliwości jego wyprawienia w wyniku otrzymania zezwolenia na jazdę) sygnał „hamuj” nie osiąga wartości „0” podczas przejazdu pociągu P+1 przez cały szlak (Rysunek 9-47d). Oznacza to brak konieczności rozpoczęcia hamowania przez pociąg P+1 w wyniku interakcji z pociągiem P.

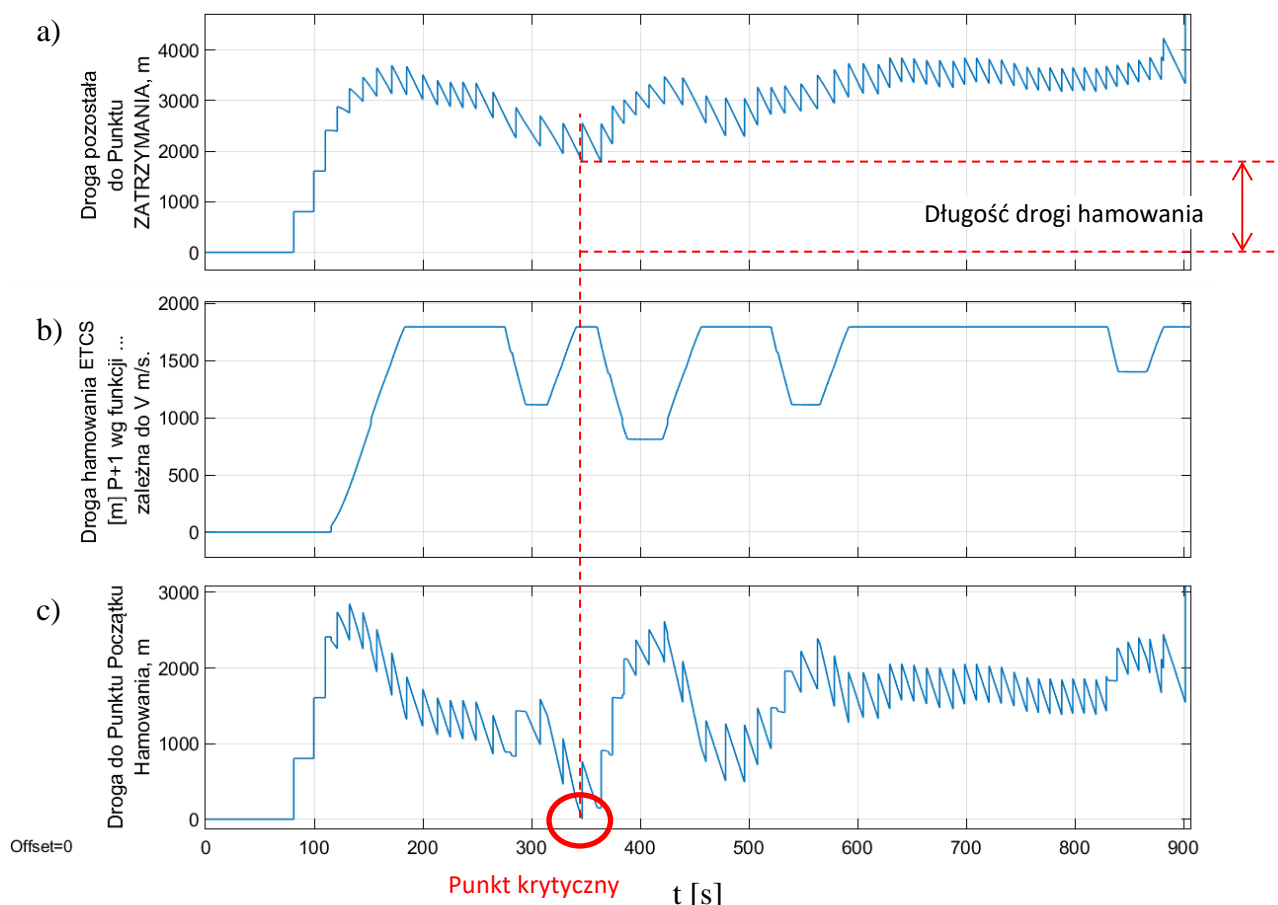


Rysunek 9-47. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b - wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1 według ETCS; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1 [źródło: opracowane własne]

Rysunek 9-48c pokazuje, że wartość odległości czoła pociągu P+1 od początku drogi hamowania dąży do wartości „0”, ale jej nie osiąga. Miejsce to można nazwać punktem krytycznym dla danej konfiguracji charakterystyk jazd pociągów P oraz P+1 na danym szlaku. Współrzędna tego punktu może się różnić w zależności od charakterystyk prędkości dwóch kolejnych pociągów poruszających się za sobą.

Należy zwrócić również uwagę na to, że w takiej sytuacji system ETCS będzie nadawał dźwiękowe i wizualne ostrzeżenia dla maszynisty z uwagi na przekroczenie odległości do punktu zatrzymania wynikającej z krzywej „Indication (I)”.

Analogicznie do poprzednich symulacji, w celu szerszego oglądu uzyskanych wyników przedstawiono również zmiany drogi przebytej przez pociągi P i P+1 (Rysunek 9-47a), zmiany prędkości jazdy pociągu P+1 (Rysunek 9-47b) oraz chwilową wartość drogi hamowania pociągu P+1 (Rysunek 9-47c).



Rysunek 9-48. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągi P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 zbliża się do wartości „0” [źródło: opracowanie własne]

Wyprawienie pociągu P+1 na szlak w 115,6 [s] od momentu wyjazdu poprzedzającego pociągu P za semafor wyjazdowy (Sem. 1), tj. 74,1 [s] po możliwości jego wyprawienia na szlak (115,6 [s] - 81,5 [s]) spowodowało, że pociąg P+1 nie musiał hamować i przyspieszać, z wyjątkiem miejsc, w których istniało na analizowanym szlaku przepisowe ograniczenie prędkości.

Przyjmując daną strukturę ruchu, w ciągu godziny przez analizowany szlak według przyjętych założeń mogłoby przejechać $N_t = 3600 / 115,6 [s] = 31,1 [poc./h]$. Jest to wartość maksymalnej liczby pociągów o zakładanych charakterystykach jazdy, które mogą być obsłużone w ciągu godziny na danym szlaku.

Czas przejazdu pociągu przez szlak wynosił 880,98 [s].

9.3.2. Dodatkowy podział odstępu przy zastosowaniu jednego semafora wirtualnego

W dalszych symulacjach liczbę wirtualnych semaforów występujących pomiędzy semaforami rzeczywistymi zmniejszono do 1 (konfiguracja **II_Sem_VIR_miedzy_REAL=1** opisana w rozdziale 8.1).

Współrzędne semaforów i detektorów przy analizowanej konfiguracji szlaku zapisana w postaci macierzy w modelu szlaku przedstawia się następująco:

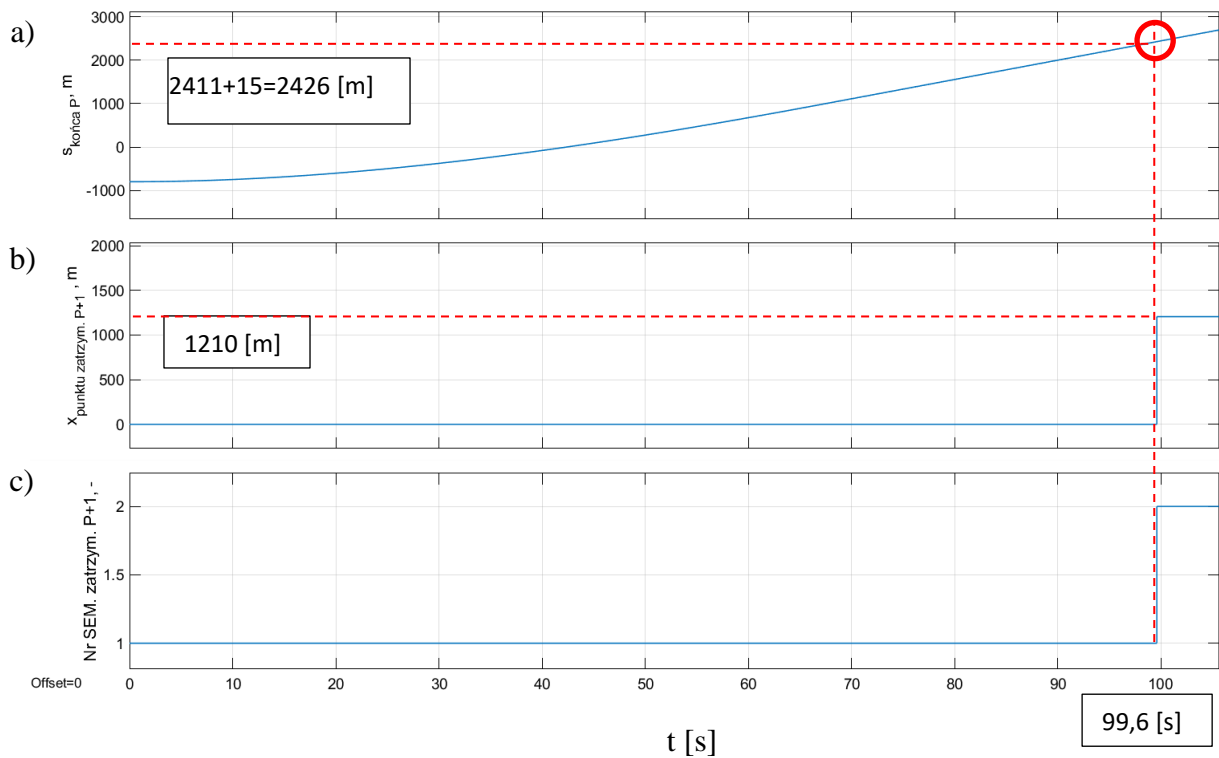
Wsp_Sem_REAL_i_VIR_na_szlaku =

```
1.0e+05 *
Columns 1 through 10
0.0000  0.0121  0.02411  0.0314  0.0387  0.0472  0.0557  0.0631  0.0704  0.0782
Columns 11 through 20
0.0859  0.0950  0.1041  0.1156  0.1270  0.1341  0.1412  0.1494  0.1577  0.1690
Columns 21 through 30
0.1804  0.1887  0.1969  0.2070  0.2172  0.2261  0.2351  0.2424  0.2497  0.2577
Columns 31 through 40
0.2657  0.2730  0.2803  0.2872  0.2940  0.3010  0.3080  0.3151  0.3221  0.3286
Columns 41 through 50
0.3352  0.3420  0.3488
```

Wsp_DETEKT_REAL_i_VIR_na_szlaku =

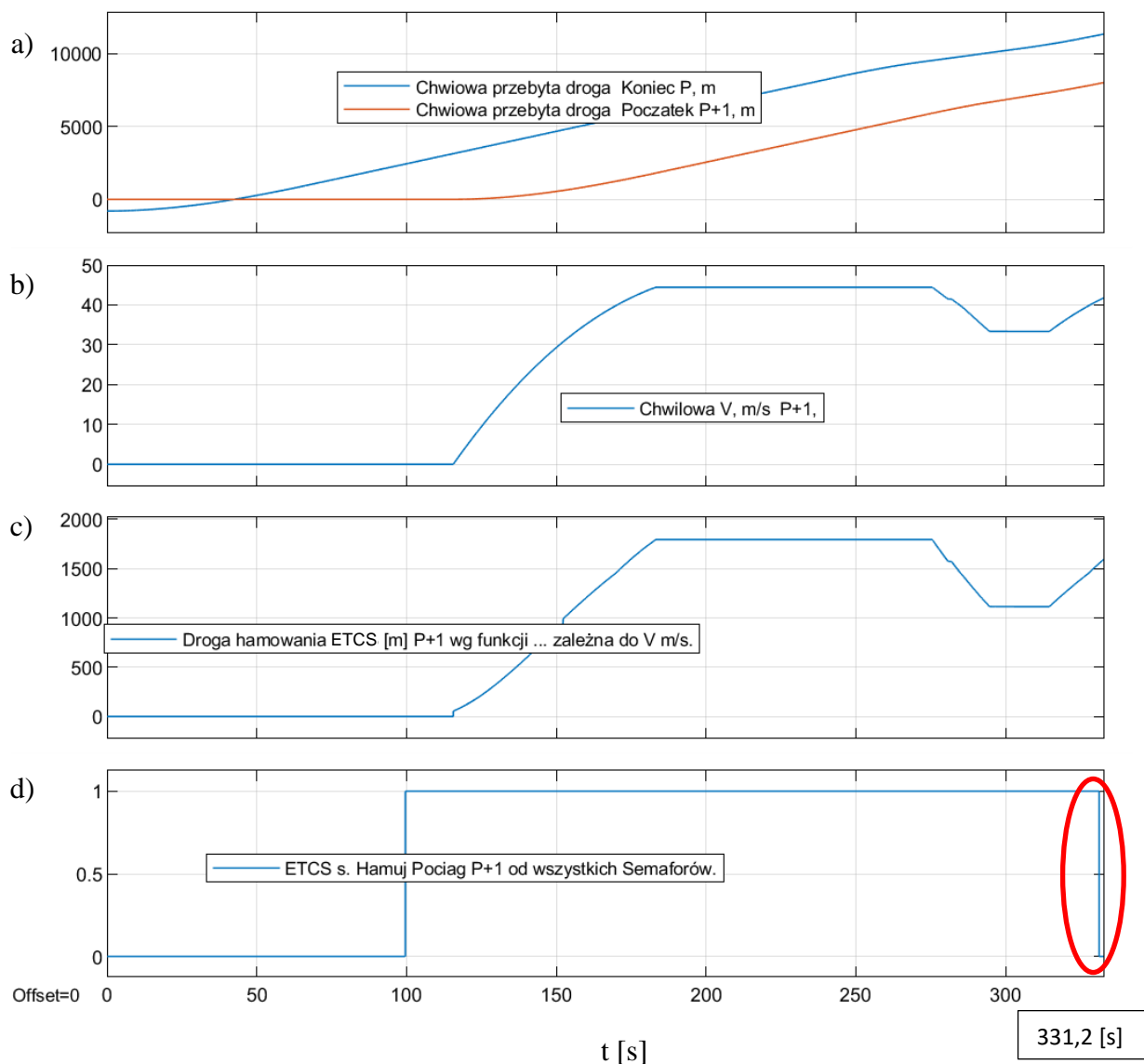
```
1.0e+05 *
Columns 1 through 10
0.0010  0.0121  0.02426  0.0314  0.0389  0.0472  0.0558  0.0631  0.0706  0.0782
Columns 11 through 20
0.0861  0.0950  0.1043  0.1156  0.1271  0.1341  0.1414  0.1494  0.1578  0.1690
Columns 21 through 30
0.1806  0.1887  0.1971  0.2070  0.2173  0.2261  0.2353  0.2424  0.2498  0.2577
Columns 31 through 40
0.2659  0.2730  0.2805  0.2872  0.2942  0.3010  0.3082  0.3151  0.3222  0.3286
Columns 41 through 50
0.3353  0.3420  0.3489  0.3498  0.3588
```

Przy takiej konfiguracji szlaku, wyprawienie pociągu P+1 możliwe jest dopiero ok. 99,6 [s], a nie jak to miało miejsce w przypadku zastosowania dwóch semaforów wirtualnych pomiędzy każdymi dwoma semaforami fizycznymi na szlaku ok. 81,5 [s]. Oznacza to dodatkowo opóźnienie wyprawienia kolejnego pociągu o 18,1 [s] względem konfiguracji z dwoma semaforami wirtualnymi. Stanowi to względne zwiększenie o 22,2% opóźnienia możliwości wyprawienia pociągu na szlak. Jest to spowodowane tym, że aby pomiędzy pociągami istniał odstęp co najmniej równy odległości pomiędzy dwoma semaforami (wirtualnymi lub wirtualnym i rzeczywistym, w zależności od ich liczby) to, gdy odległość między semaforami wzrasta, to opóźnia się chwila wyprawienia pociągu na szlak. Szczegółowo przedstawia to Rysunek 9-49, gdzie widoczna jest zmiana sygnału „hamuj” z „0” na „1” dla pociągu P+1 (co pozwala mu jechać do Sem. 2 o współrzędnych 1210 [m]) w chwili czasowej, gdy pociąg P minie całą swoją długością współrzędną 2426 [m] (odpowiadającą współrzędnej detektora za Sem. rzeczywistym 3).

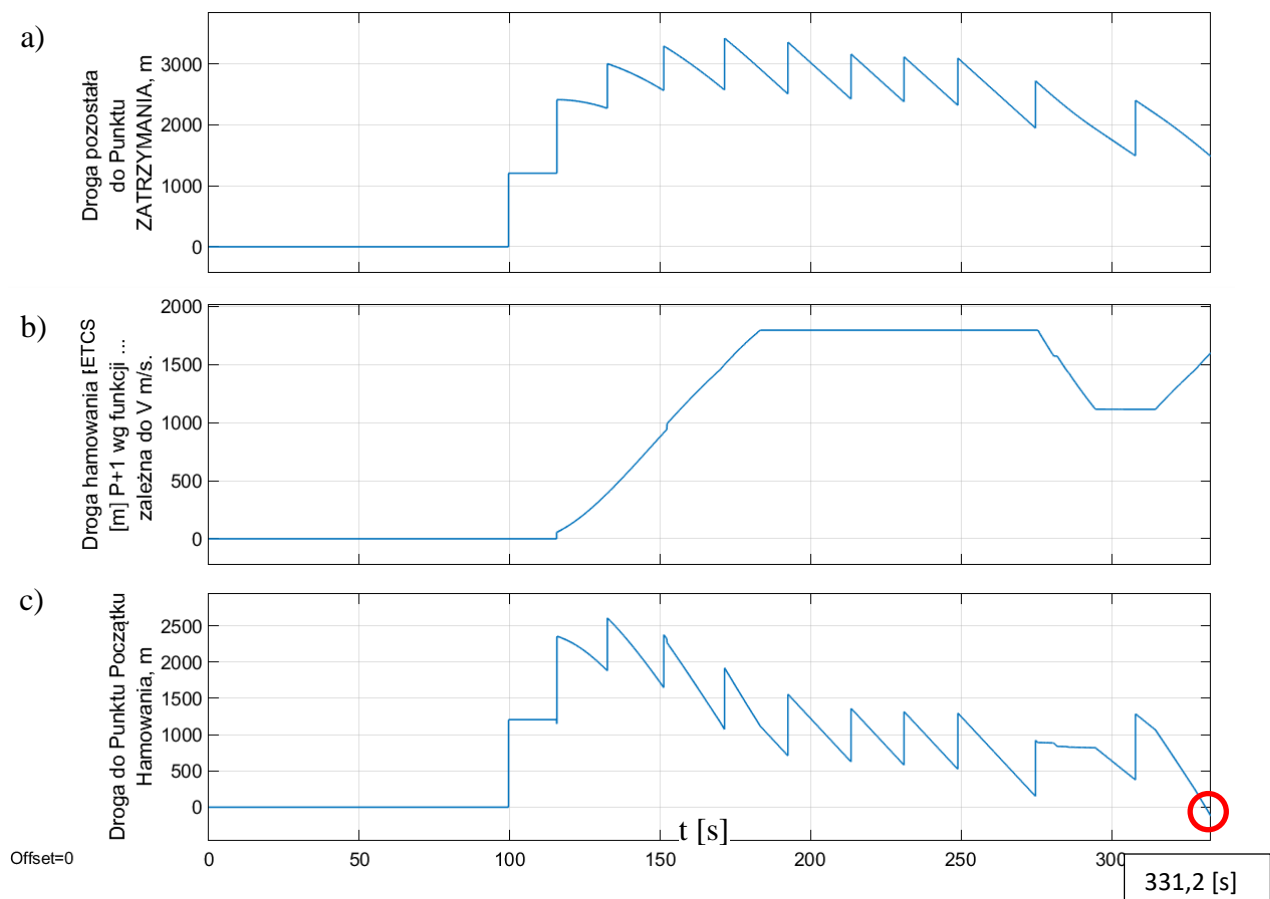


Rysunek 9-49 a – chwilowa współrzędna końca pociągu P; b – odległość do punktu zatrzymania dla pociągu P+1; c – nr semafora wyznaczającego koniec zezwolenia na jazdę/punkt zatrzymania dla pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]

W kolejnej symulacji zastosowano, podobnie jak poprzednio (tj. w przypadku zastosowania liczby semaforów wirtualnych równej dwa pomiędzy każdymi dwoma semaforami rzeczywistymi – rozdział 9.3.1), opóźnienie wyprawienia pociągu P+1 na szlak. Analogicznie do konfiguracji z dwoma semaforami wirtualnymi, pociąg P+1 wyprawiono w chwili czasowej odpowiadającej 115,6 [s] symulacji. Spowodowało to, że sygnał „hamuj” osiąga wartość „0” w chwili czasowej ok. 331,2 [s] (Rysunek 9-50d). W tej chwili czasowej również wartość odległości czoła tego pociągu do punktu początku hamowania wynosiła 0 [m] (Rysunek 9-51c), co oznacza konieczność wdrożenia hamowania. W celu szerszego oglądu uzyskanych wyników przedstawiono również zmiany drogi przebytej przez pociągi P i P+1 (Rysunek 9-50a), zmiany prędkości jazdy pociągu P+1 Rysunek 9-50b) oraz chwilową wartość drogi hamowania pociągu P+1 (Rysunek 9-50c).

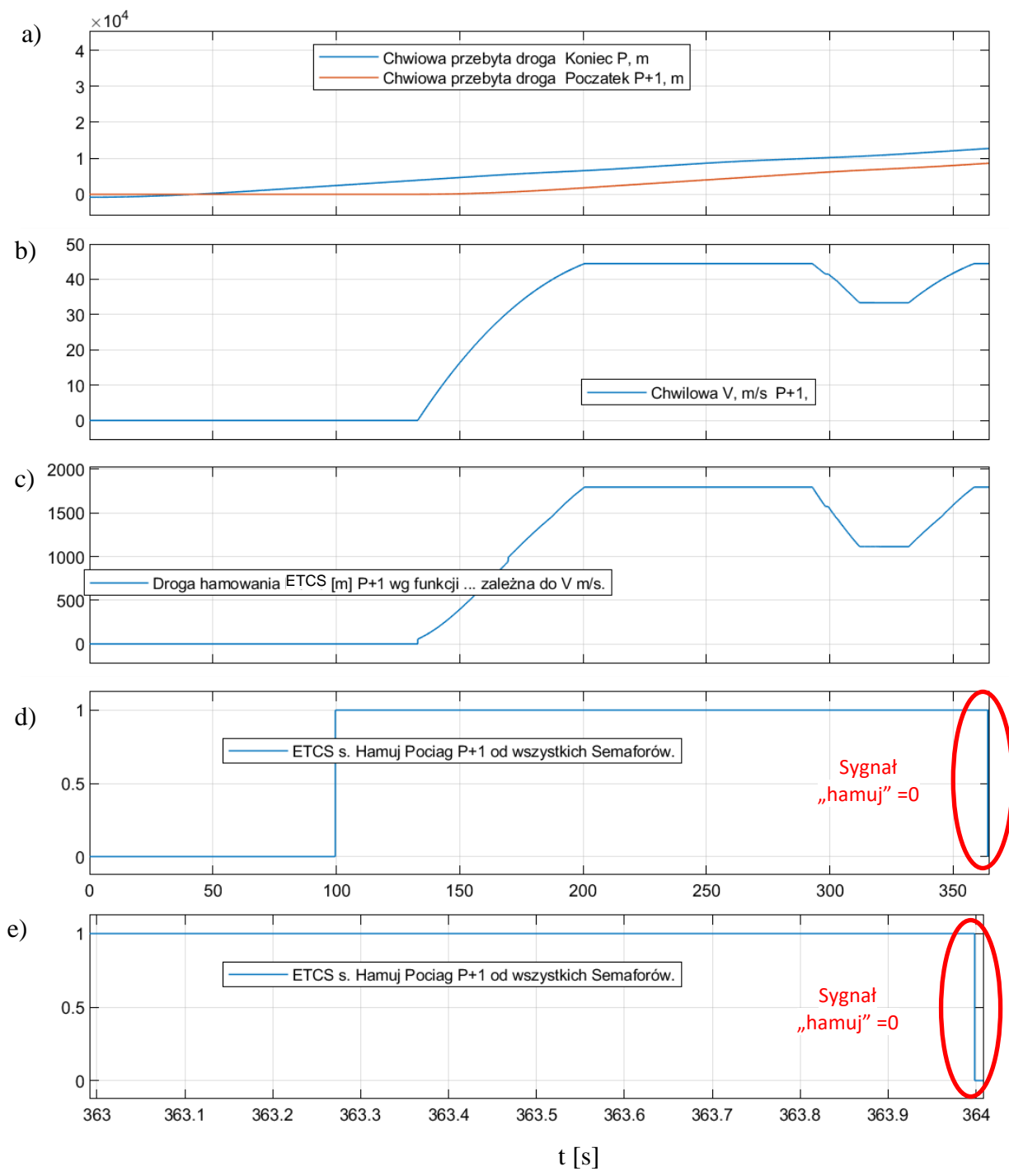


Rysunek 9-50. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1 według ETCS; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0” [źródło: opracowanie własne]

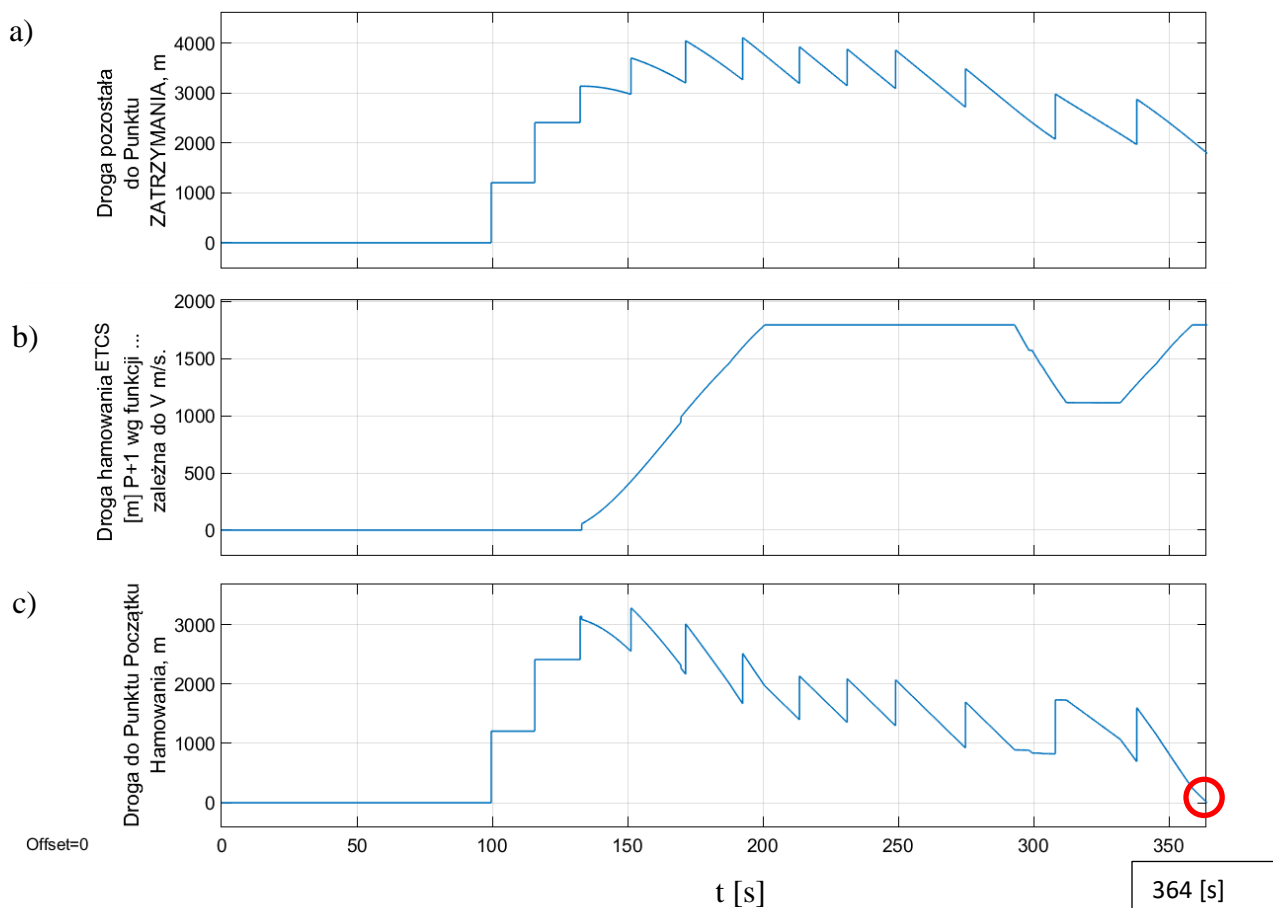


Rysunek 9-51. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągu P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartości ujemne [źródło: opracowanie własne]

W kolejnej symulacji sprawdzono, czy w przypadku wyprawienia pociągu P+1 na szlak w chwili czasowej odpowiadającej w symulacji 133 [s], sygnał „hamuj” osiągnie wartość „0”. Jak pokazały wyniki z symulacji, sygnał „hamuj” osiągnął wartość „0” w chwili czasowej ok. 364 [s] (Rysunek 9-52d, e). W tej chwili czasowej również wartość odległości czoła tego pociągu do punktu początku hamowania wynosiła 0 [m] (Rysunek 9-53c).

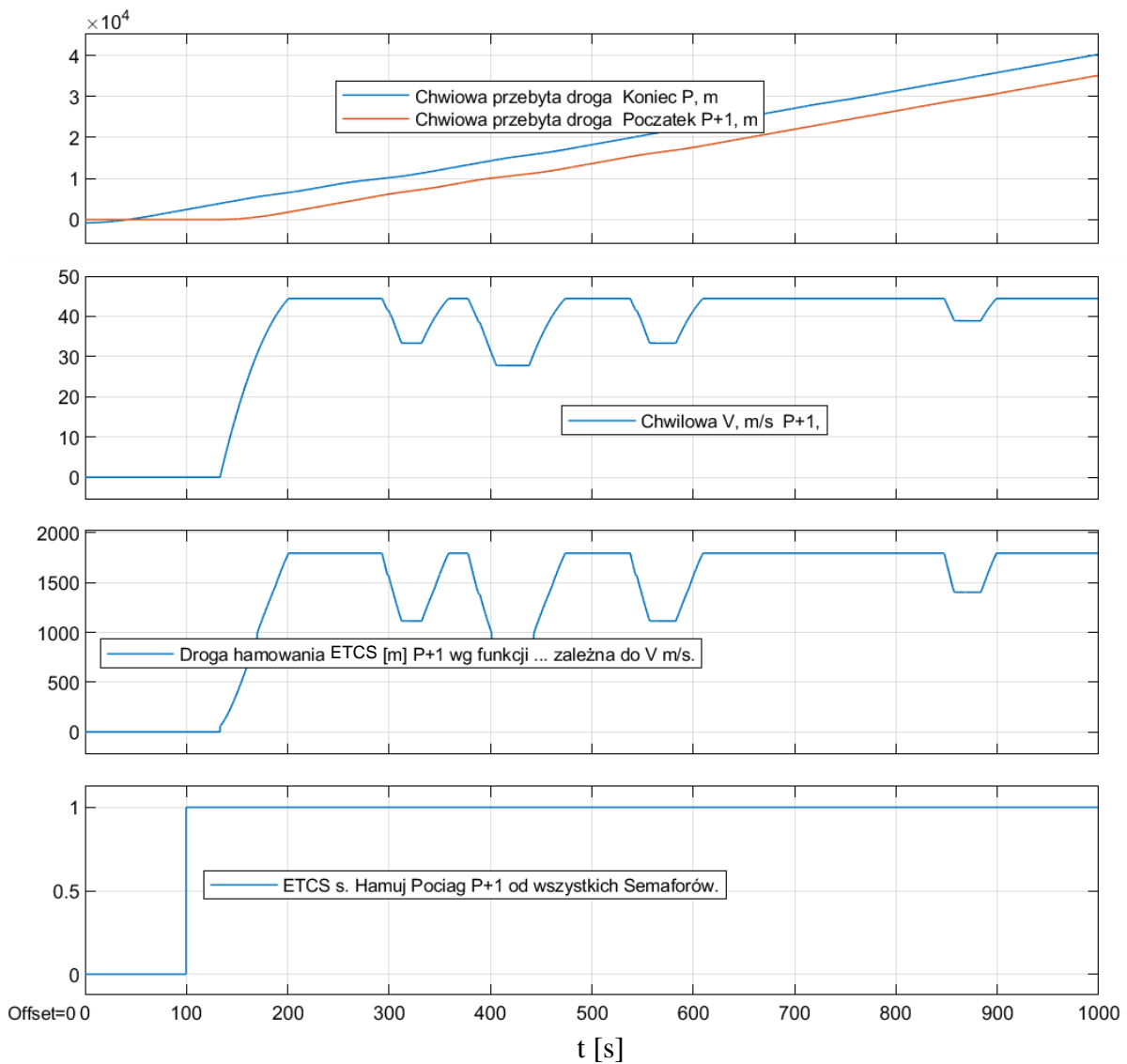


Rysunek 9-52. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1 według ETCS; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0”; e – zbliżenie na przebieg sygnału „hamuj” [źródło: opracowanie własne]

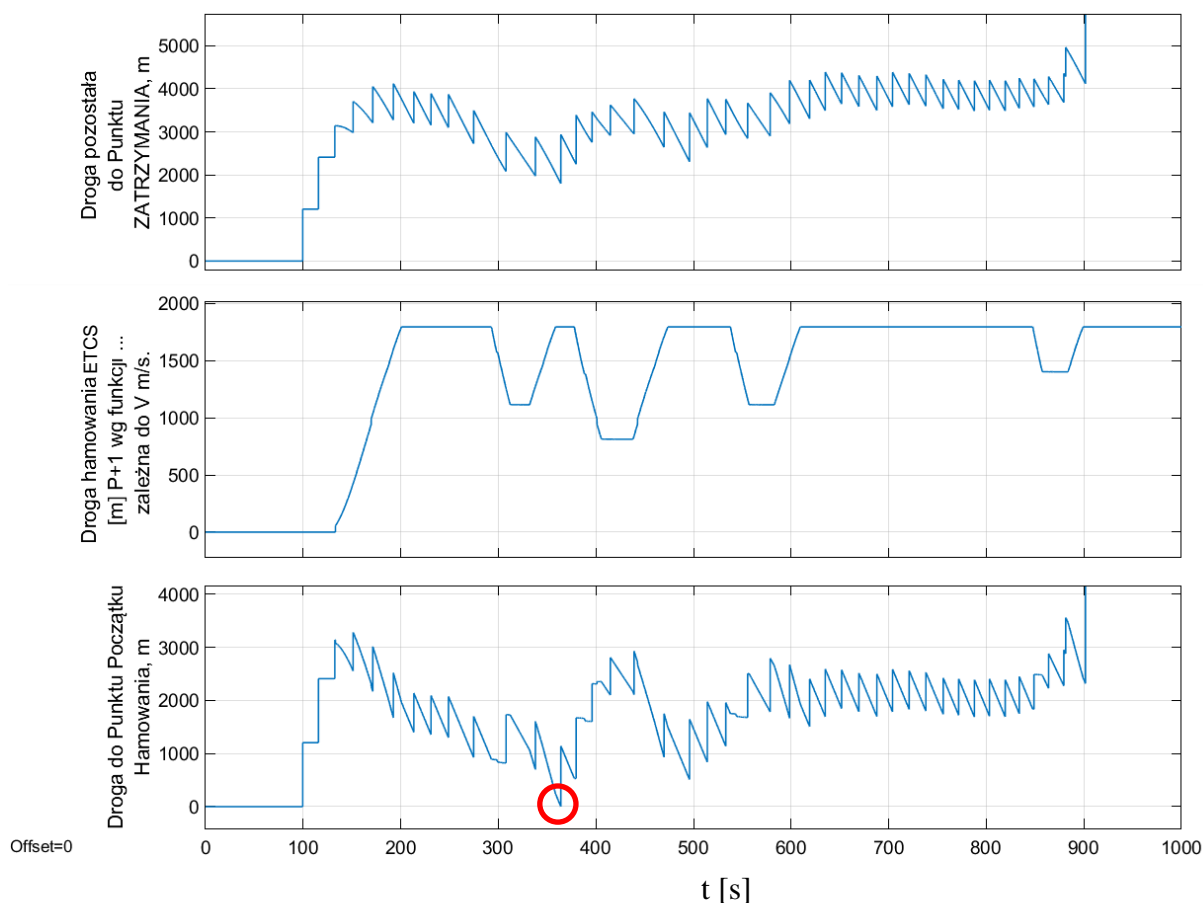


Rysunek 9-53. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągu P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartości ujemne [źródło: opracowanie własne]

Ustalono, że przy rozpoczęciu jazdy przez pociąg P+1 w chwili czasowej odpowiadającej w symulacji 133,1 [s], od chwili jego wyprawienia na szlak sygnał „hamuj” nie osiąga już wartości „0” podczas przejazdu tego pociągu P+1 przez szlak (Rysunek 9-54d). W wymienionym zakresie czasu również wartość odległości czoła tego pociągu do punktu początku hamowania zbliżała się w punkcie krytycznym do 0 [m] (Rysunek 9-55c), co jednak nie spowodowało konieczności rozpoczęcia hamowania. Podobnie jak poprzednio, w celu szerszego oglądu uzyskanych wyników przedstawiono również zmiany drogi przebytej przez pociągi P i P+1 (Rysunek 9-54a), zmiany prędkości jazdy pociągu P+1 (Rysunek 9-54b) i oraz chwilową wartość drogi hamowania pociągu P+1 (Rysunek 9-54c).



Rysunek 9-54. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1 według ETCS; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0” [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-55. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągu P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 zbliżała się do wartości „0” [źródło: opracowanie własne]

Wyprawienie pociągu P+1 na szlak przy założeniu, że ma on przejechać cały szlak bez hamowania i ponownego przyspieszania, z wyjątkiem miejsc, w których istniało na analizowanym szlaku przepisowe ograniczenie prędkości, jest możliwe w chwili czasowej 133,1 [s]. Przyjmując daną strukturę ruchu, w ciągu godziny przez analizowany szlak według przyjętych założeń mogłoby przejechać $N_t = 3600 / 133,1 [s] = 27,05 [poc./h]$. Jest to wartość maksymalnej zdolności przepustowej, tj. maksymalnej liczby pociągów o zakładanych charakterystykach jazdy, które mogą być obsłużone w ciągu godziny na danym szlaku.

Rozpatrując analizowany przypadek względem konfiguracji szlaku, gdy liczba wirtualnych wstawionych wstawianych pomiędzy każde dwa rzeczywiste semafora była większa o 1 (i wynosiła 2), **maksymalna zdolność przepustowa uległa zmniejszeniu o 13%**. Jednocześnie opóźnienie wyprawienia pociągu uległo zwiększeniu względnie o 15,1%.

Czas przejazdu pociągu przez szlak wynosił 880,98 [s], czyli analogicznie jak przy badaniach konfiguracji szlaku z dwoma dodatkowymi semaforami wirtualnymi (rozdział 9.3.1).

9.3.3. Brak dodatkowego podziału odstępu z wykorzystaniem wirtualnych semaforów

W kolejnych symulacjach liczbę wirtualnych semaforów występujących pomiędzy semaforami rzeczywistymi zmniejszono do 0, eliminując je całkowicie. Czyli występowały tylko semafony rzeczywiste. Taka konfiguracja szlaku odpowiada klasycznemu podziałowi na odstępy na analizowanym szlaku).

Współrzędne semaforów i detektorów przy analizowanej konfiguracji szlaku zapisana w postaci macierzy w modelu szlaku przedstawia się następująco:

```
Wsp_Sem_REAL_i_VIR_na_szlaku =
```

```
1.0e+05 *
```

```
Columns 1 through 10
```

```
0.0000 0.02411 0.03871 0.0557 0.0704 0.0859 0.1041 0.1270 0.1412 0.1577
```

```
Columns 11 through 20
```

```
0.1804 0.1969 0.2172 0.2351 0.2497 0.2657 0.2803 0.2940 0.3080 0.3221
```

```
Columns 21 through 30
```

```
0.3352 0.3488
```

```
Wsp_DETEKT_REAL_i_VIR_na_szlaku =
```

```
1.0e+05 *
```

```
Columns 1 through 10
```

```
0.0010 0.02426 0.03886 0.0558 0.0706 0.0861 0.1043 0.1271 0.1414 0.1578
```

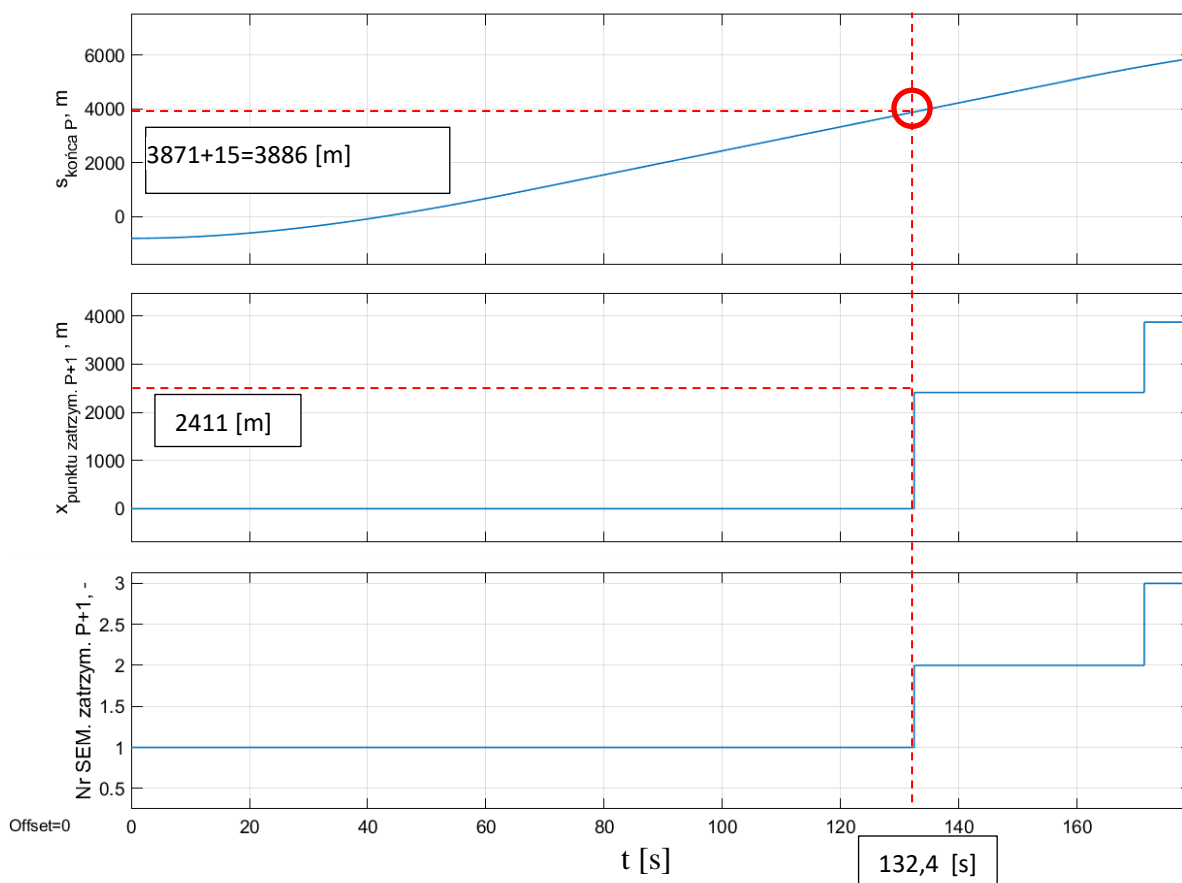
```
Columns 11 through 20
```

```
0.1806 0.1971 0.2173 0.2353 0.2498 0.2659 0.2805 0.2942 0.3082 0.3222
```

```
Columns 21 through 30
```

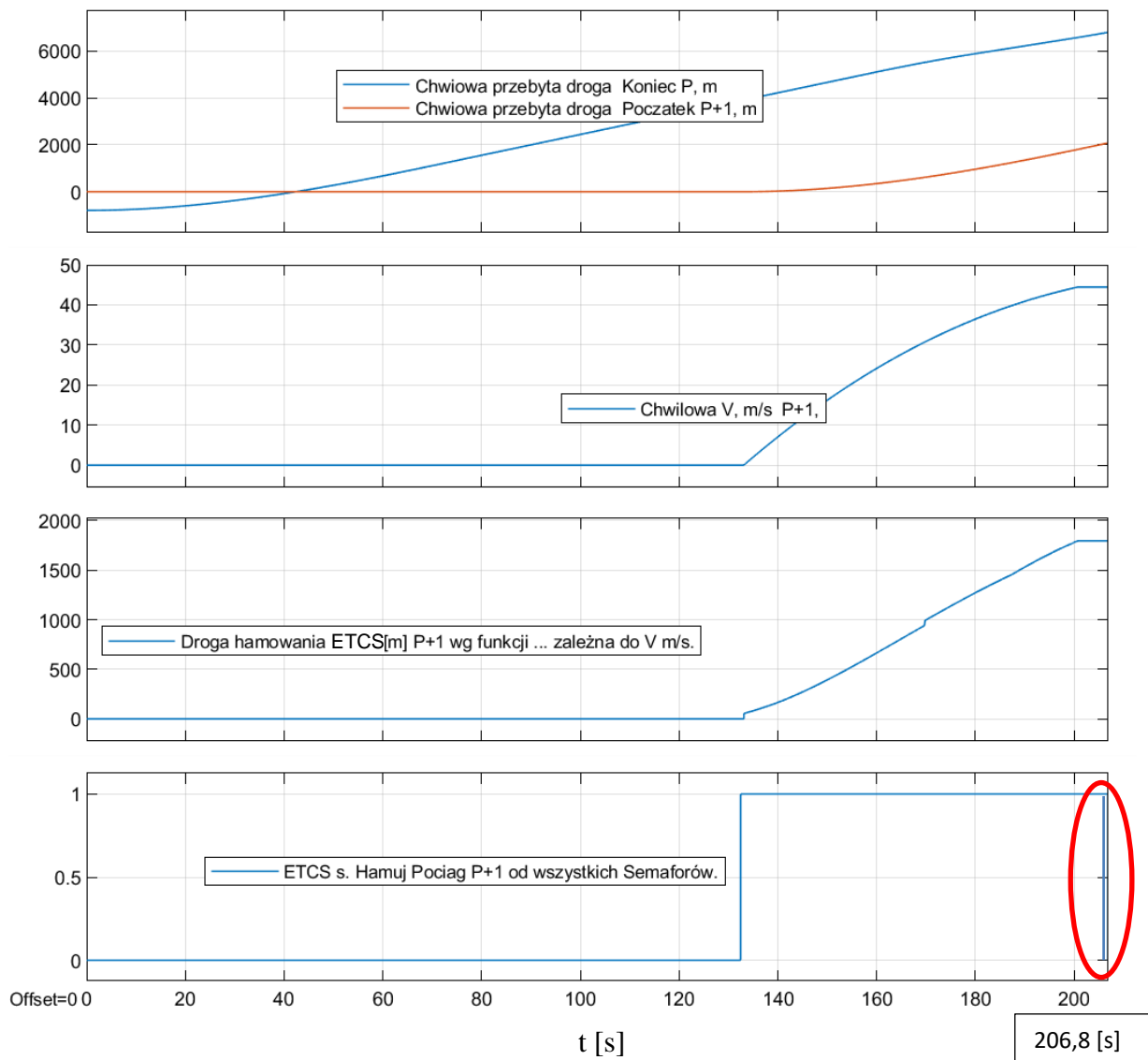
```
0.3353 0.3489 0.3498 0.3588
```

Przy analizowanej konfiguracji szlaku, wyprawienie pociągu P+1 możliwe jest dopiero ok. 132,4 [s], a nie jak to miało miejsce w przypadku zastosowania dwóch semaforów wirtualnych pomiędzy każdymi dwoma semaforami fizycznymi na szlaku ok. 81,5 [s]. Oznacza to konieczność dodatkowego opóźnienia startu pociągu o 18,1 [s] względem konfiguracji przedstawionej w rozdziale 9.3.1, co względnie stanowi wzrost o 62,4%. Jest to spowodowane tym, że aby pomiędzy pociągami istniał co najmniej odstęp równy odległości pomiędzy dwoma semaforami (wirtualnymi lub wirtualnym i rzeczywistym, w zależności od ich liczby), to – gdy odległość między semaforami wzrasta – opóźnia się chwila wyprawienia pociągu na szlak. Szczegółowo przedstawia to Rysunek 9-56.

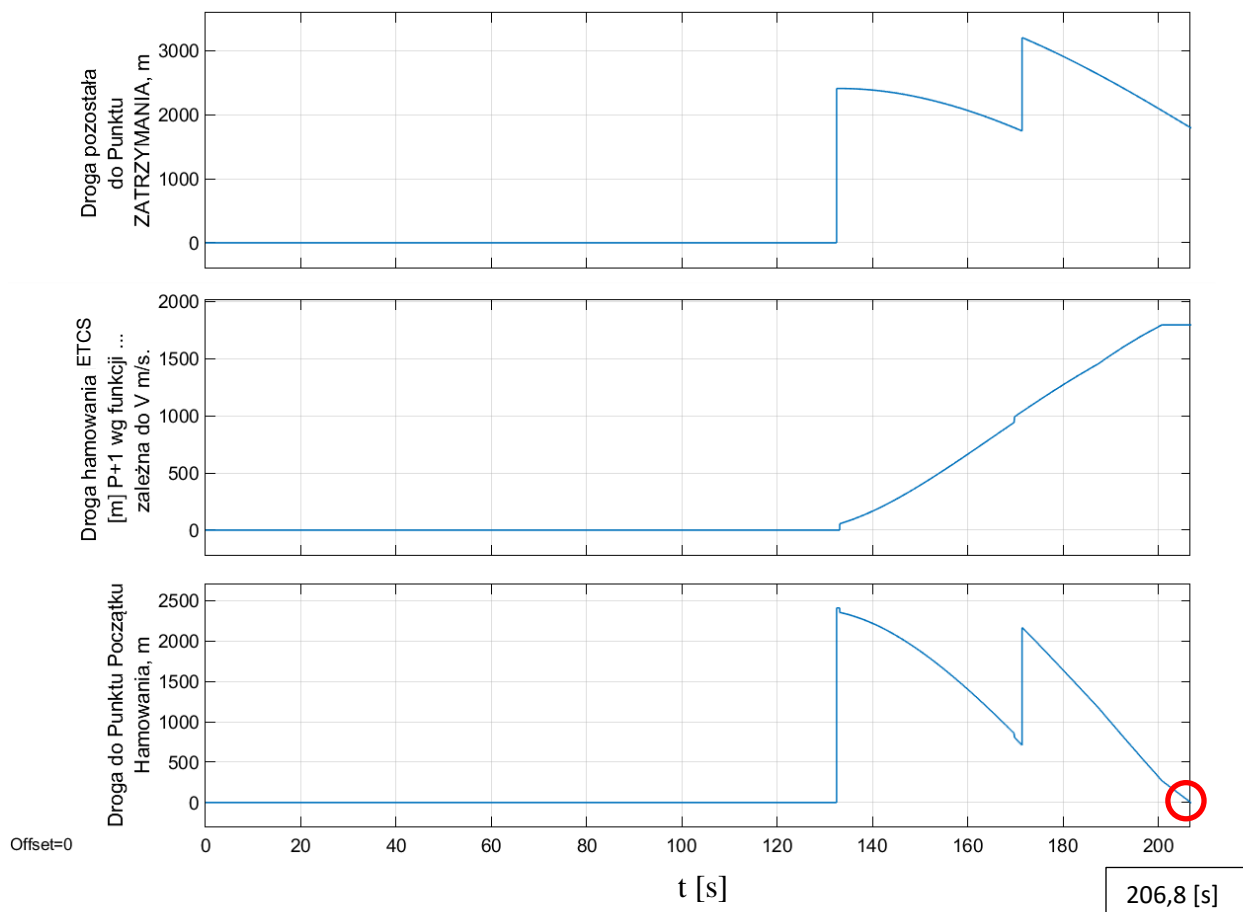


Rysunek 9-56 a – chwilowa współrzędna końca pociągu P; b – odległość do punktu zatrzymania dla pociągu P+1; c – nr semafora wyznaczającego koniec zezwolenia na jazdę/punkt zatrzymania dla pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]

W przypadku, gdy liczbę wirtualnych semaforów występujących pomiędzy semaforami rzeczywistymi zmniejszono do 0 i zastosowano – podobnie jak poprzednio (tj. w przypadku zastosowania liczby semaforów wirtualnych równej 1 pomiędzy każdymi dwoma semaforami rzeczywistymi) – wyprawienie pociągu P+1 na szlak w chwili czasowej odpowiadającej w symulacji 133,1 [s] spowodowało, że sygnał „hamuj” osiąga wartość „0” w chwili czasowej ok. 206,8 [s] (Rysunek 9-56d). W tej chwili czasowej również wartość odległości czoła tego pociągu do punktu początku hamowania osiągnęła wartość 0 [m] (Rysunek 9-58c). W celu szerszego oglądu uzyskanych wyników przedstawiono również zmiany drogi przebytej przez pociągi P i P+1 (Rysunek 9-57a), zmiany prędkości jazdy pociągu P+1 (Rysunek 9-57b) oraz chwilową wartość drogi hamowania pociągu P+1 (Rysunek 9-57c).

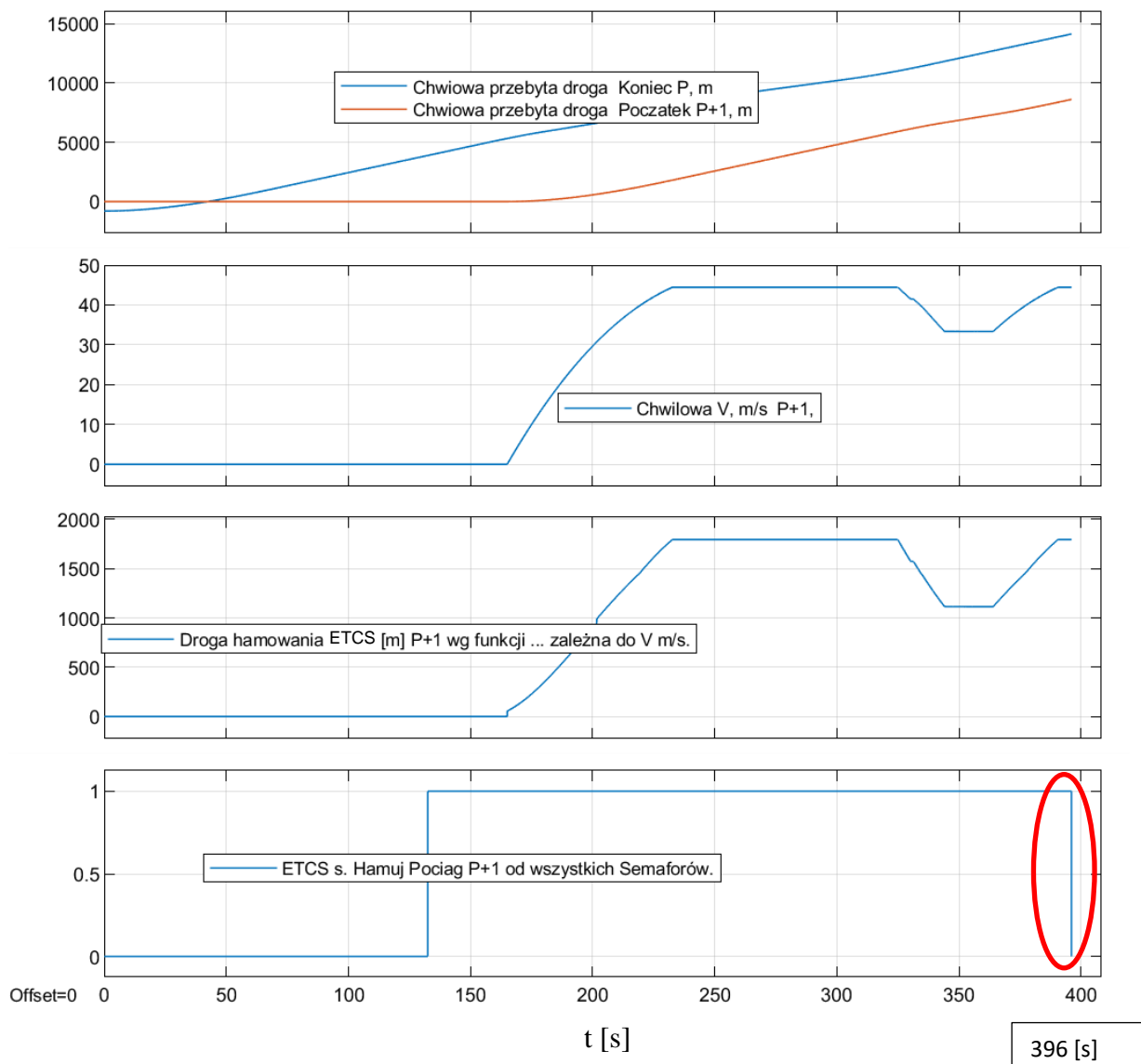


Rysunek 9-57. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1 według ETCS; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0” [źródło: opracowanie własne]

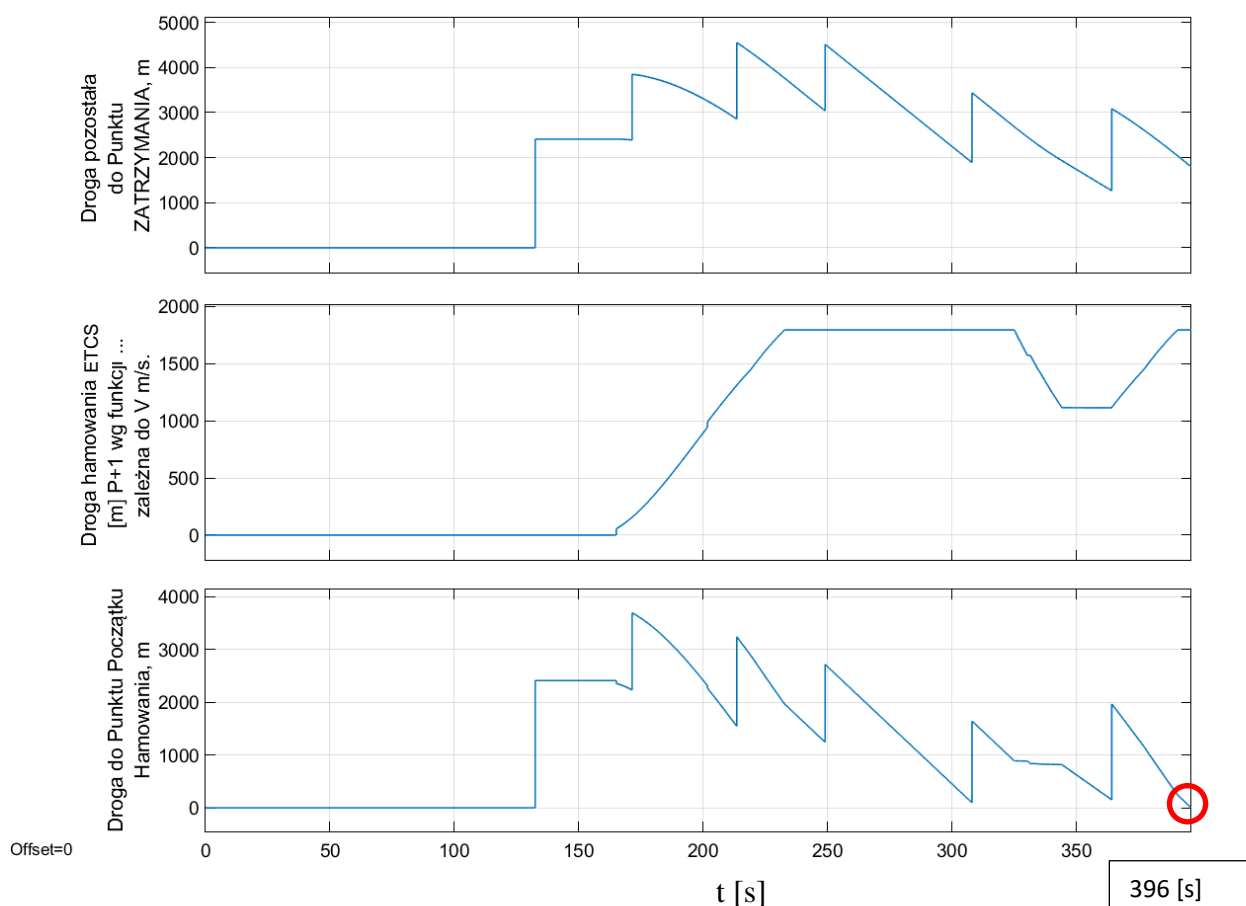


Rysunek 9-58. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągu P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartość „0” [źródło: opracowanie własne]

Nawet w przypadku wyprawienia pociągu P+1 na szlak w chwili czasowej odpowiadającej w symulacji 165 [s] sygnał „hamuj” osiąga wartość „0” w chwili czasowej ok. 396 [s] (Rysunek 9-59d). W tej chwili czasowej również wartość odległości czoła tego pociągu do punktu początku hamowania wynosiła 0 [m] (Rysunek 9-60 c).

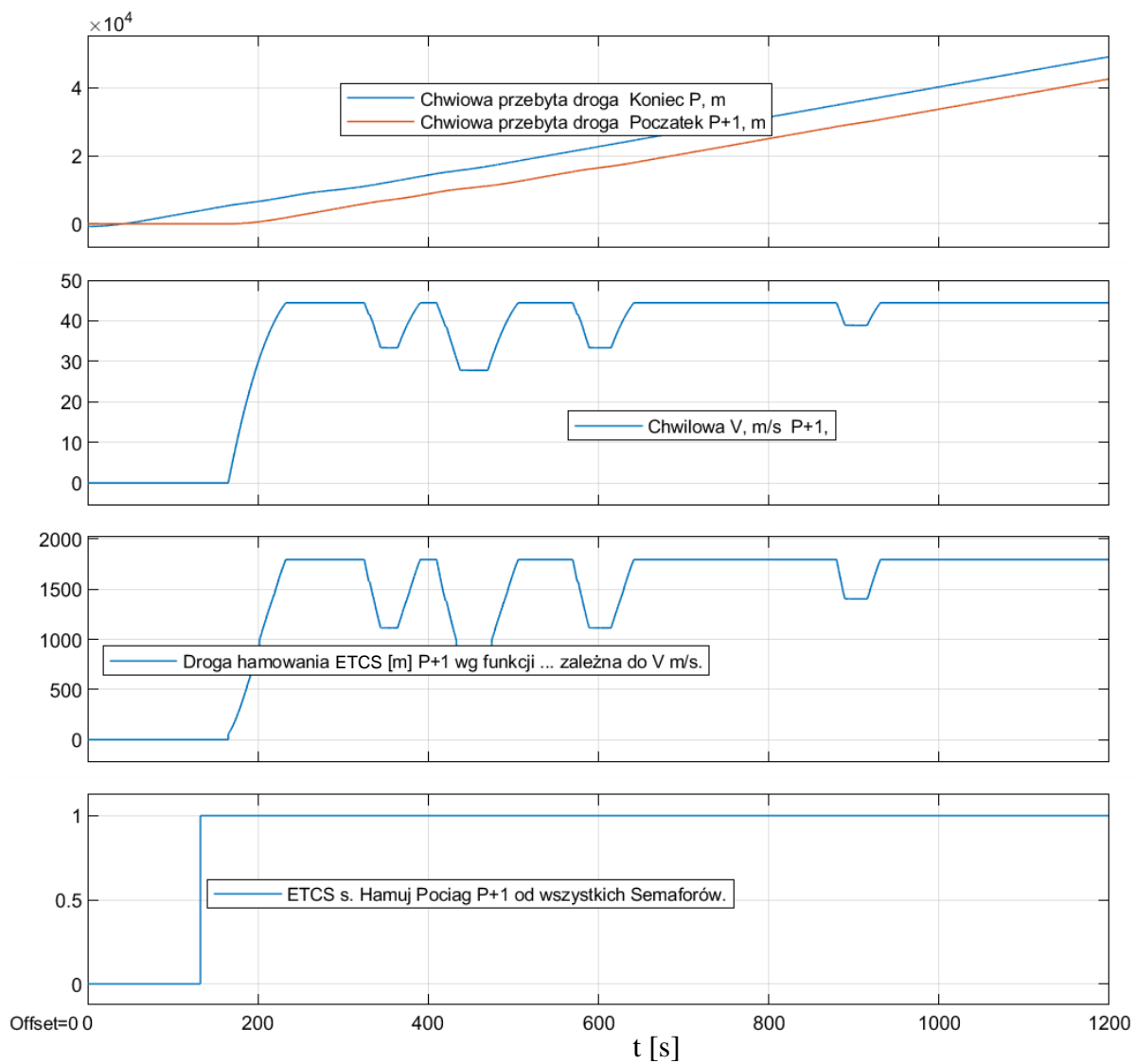


Rysunek 9-59. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1 według ETCS; d – przebieg sygnału. „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0” [źródło: opracowanie własne]

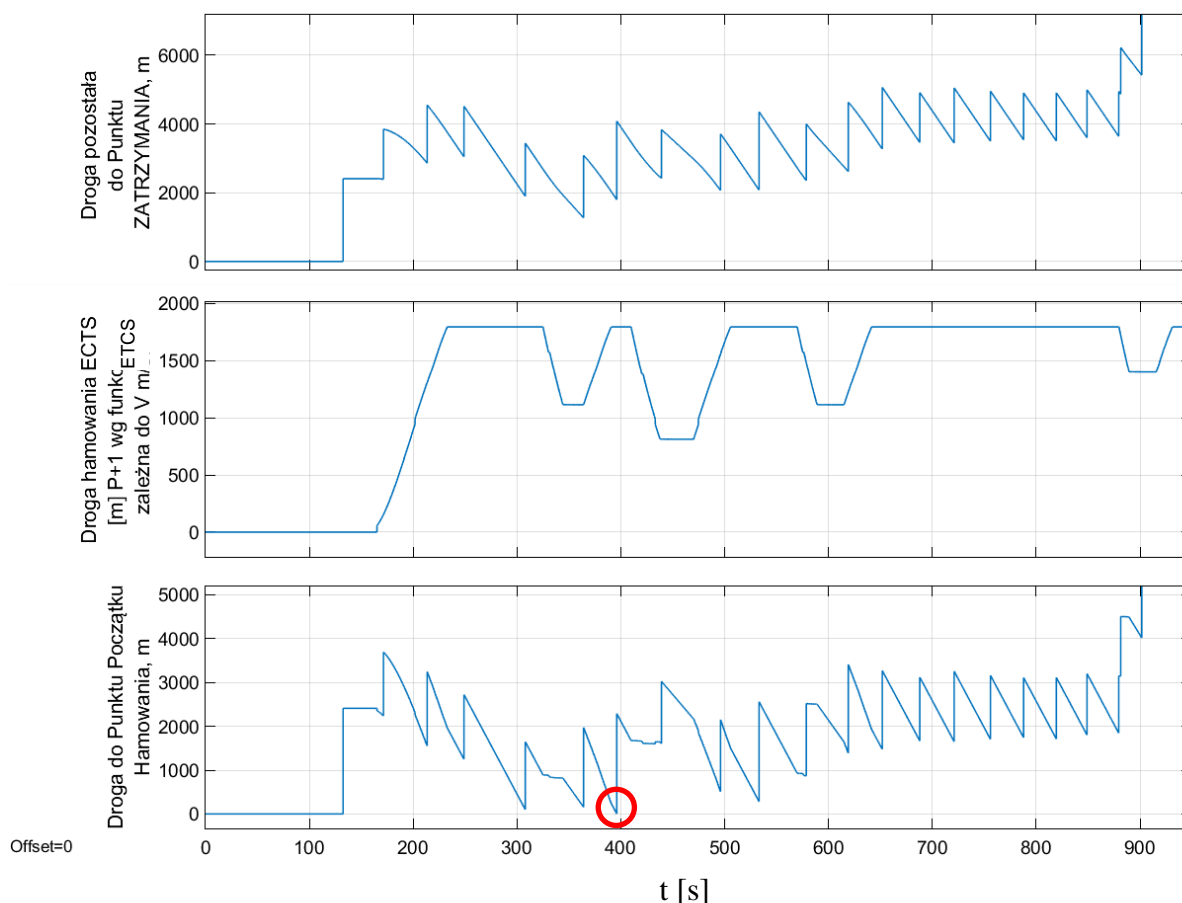


Rysunek 9-60. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągi P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartość „0” [źródło: opracowanie własne]

Ustalono, że przy rozpoczęciu jazdy przez pociąg P+1 w chwili czasowej odpowiadającej w symulacji 165,1 [s], to od chwili jego wyprawienia na szlak, sygnał „hamuj” nie osiąga już wartości „0” podczas przejazdu tego pociągu P+1 przez szlak (Rysunek 9-61d). W wymienionym zakresie czasu również wartość odległości czoła tego pociągu do punktu początku hamowania wynosiła 0 [m] (Rysunek 9-62c). Jednakże zidentyfikowano dwa miejsca krytyczne, w których odległość czoła pociągu do punktu początku hamowania zbliżała się do wartości „0”. Podobnie jak poprzednio w celu szerszego oglądu uzyskanych wyników przedstawiono również zmiany drogi przebytej przez pociągi P i P+1 (Rysunek 9-61a), zmiany prędkości jazdy pociągu P+1 (Rysunek 9-61b) oraz chwilową wartość drogi hamowania pociągu P+1 (Rysunek 9-61c).



Rysunek 9-61. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1 według ETCS; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-62. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono miejsca (tzw. punkty krytyczne), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 zbliżała się do wartości „0” [źródło: opracowanie własne]

Wyprawienie pociągu P+1 na szlak przy założeniu, że ma on przejechać cały szlak bez hamowania i ponownego przyspieszania z wyjątkiem miejsc, w których istniało na analizowanym szlaku przepisowe ograniczenie prędkości, jest możliwe w chwili czasowej 165,1 [s]. Przyjmując daną strukturę ruchu, w ciągu godziny przez analizowany szlak według przyjętych założeń mogłoby przejechać $Nt=3600/161,1 [s] = 21,8 [poc./h]$. Jest to wartość maksymalnej zdolności przepustowej, tj. maksymalnej liczby pociągów o zakładanych charakterystykach jazdy, które mogą być obsłużone w ciągu godziny na danym szlaku.

Rozpatrując analizowany przypadek względem konfiguracji szlaku, gdy liczba wirtualnych dekoderek wstawianych pomiędzy każde dwa rzeczywiste semafony była większa o 2 (i wynosiła 2), chwila ta miała wartość 115,6 [s]. Stanowi to **zmniejszenie maksymalnej zdolności przepustowej o 29,9%**. Zatem zwiększanie liczby semaforów wirtualnych pozwoliło stwierdzić, że w analizowanym przypadku wpływa to znacząco na zdolność przepustową szlaku.

Wzrost ten jest rozpatrywany dla warunków wyidealizowanych. Opracowane narzędzie symulacyjne pozwala na prowadzenie tego typu analiz także dla wielu innych szczegółowych przypadków.

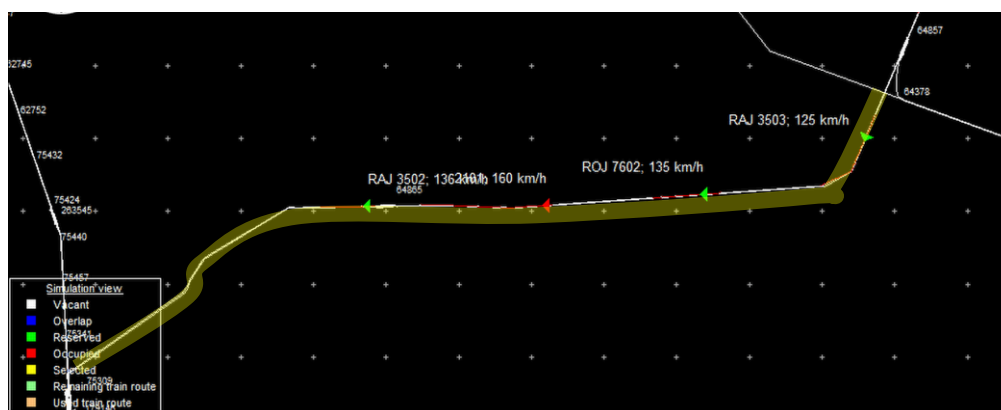
Czas przejazdu pociągu przez szlak wynosił 880,98 [s], czyli analogicznie jak przy badaniach konfiguracji szlaku z dwoma dodatkowymi semaforami wirtualnymi (rozdział 9.3.1) oraz jednym dodatkowym semaforem wirtualnym 9.3.2).

9.3.4. Sprawdzenie czasów przejazdu pociągu

Uzyskane przy wykorzystaniu opracowanego oprogramowania symulacyjnego wartości czasów przejazdu pociągu po analizowanym szlaku (rozdziały 9.3.1, 9.3.2, 9.3.3) skonfrontowano z używanym przez wielu zarządców infrastruktury oprogramowaniem komercyjnym. Oprogramowanie to służy do modelowania sieci kolejowej i symulowania jazdy pociągów według opracowanego rozkładu jazdy. Umożliwia ocenę zdefiniowanego rozkładu jazdy pod kątem wpływu między innymi na zdolność przepustową, a więc służy do rozwiązywania podobnego problemu jak opracowane autorskie modele jazd pociągów. Oprogramowanie to zostało udostępnione dzięki uprzejmości jednej z firm działających w branży kolejowej.

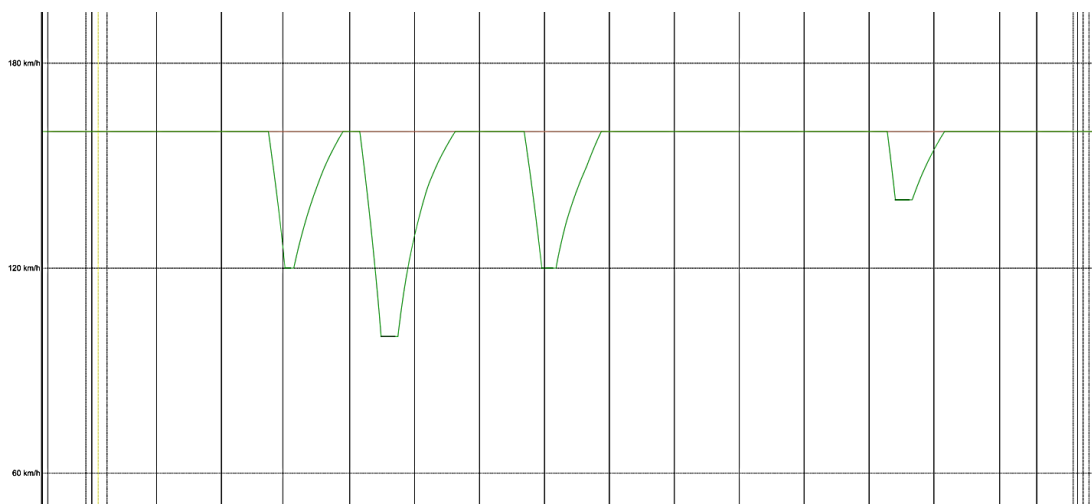
Oprogramowanie komercyjne wykorzystuje metodę kompresji rozkładu jazdy zgodnie z kartą UIC [28] do oceny zdolności przepustowej. Model jazdy pociągu opiera się na wprowadzeniu do oprogramowania charakterystyki trakcyjnej danego pociągu, czyli siły trakcyjnej w funkcji prędkości jazdy. Na podstawie wprowadzonej charakterystyki trakcyjnej i danych o infrastrukturze, oprogramowanie symuluje jazdę pociągów według określonego rozkładu jazdy i sprawdza możliwość jego realizacji. Oprogramowanie nie umożliwia wprowadzania rzeczywistych charakterystyk jazd pociągów uzyskanych z pomiarów, jak ma to miejsce w przypadku opisanych w rozdziale 5 autorskich modeli jazdy pociągów. Z tego też względu posłużono się przygotowanymi modelami elektrycznych zespołów trakcyjnych poruszających się na sieci kolejowej w Polsce o parametrach zbliżonych do pojazdów trakcyjnych użytych do uzyskania charakterystyk z pomiarów (pojazd typu A i pojazd typu B z rozdziału 9.1.1).

Na bazie zbudowanego modelu linii kolejowej nr 4, która zawiera badany szlak Psary – Góra Włodowska, oraz linii stycznych przeprowadzono symulacje jazd pociągów na podstawie wstępnie przygotowanego rozkładu jazdy. Rozkład jazdy przewidywał jazdę pociągów po sobie z minimalnym buforem czasowym. Rysunek 9-63 przedstawia fragment przeprowadzonej symulacji w oprogramowaniu komercyjnym. Oprogramowanie komercyjne nie umożliwia wprowadzania dodatkowego podziału odstępu z wykorzystaniem wirtualnych odstępów, jak ma to miejsce w przypadku autorskich modeli jazd pociągów opisanych w rozdziale 5. Z tego też powodu nie było możliwe przeprowadzanie symulacji dla konfiguracji urządzeń sterowania ruchem kolejowym z dodatkowym podziałem odstępu przy wykorzystaniu trzech oraz dwóch dodatkowych odstępów wirtualnych, jak to miało miejsce przy badaniach symulacyjnych opisanych w rozdziale 9.3.1 i 9.3.2.



Rysunek 9-63. Fragment symulacji jazdy pociągów po analizowanym szlaku Psary – Góra Włodowska linii kolejowej nr 4, przeprowadzonej w oprogramowaniu komercyjnym [źródło: opracowanie własne]

Na bazie przeprowadzonej symulacji na szlaku z wykorzystaniem klasycznych odstępów blokowych (konfiguracja urządzeń sterowania ruchem kolejowym analogiczna jak w badaniach zaprezentowanych w rozdziale 9.3.3) zarejestrowano charakterystykę jazdy zamodelowanego pociągu (Rysunek 9-64). Pociąg ten poruszał się pod nadzorem systemu ETCS, a więc adekwatnie do symulacji przeprowadzonych w rozdziale 9.3.3.



Rysunek 9-64. Charakterystyka jazdy pociągu uzyskana w oprogramowaniu komercyjnym [źródło: opracowanie własne]

W wyniku symulacji jazdy pociągu zarejestrowano czas przejazdu pociągu po przedmiotowym szlaku. **Czas przejazdu pociągu przez szlak w oprogramowaniu komercyjnym wyniósł 866 [s].** Zarejestrowany czas przejazdu pociągu przez szlak z użyciem autorskich modeli wyniósł 880,98 [s]. **Oznacza to, że czas przejazdu pociągu przez szlak z użyciem oprogramowania komercyjnego był krótszy o 14,98 [s] (co stanowi zmniejszenie o 1,73%).** Różnica czasowa może wynikać z innych charakterystyk hamowania i przyspieszania użytych w badaniach symulacyjnych oraz w oprogramowaniu komercyjnym. Należy zwrócić uwagę, że w autorskich modelach jazd pociągu i w badaniach przedstawionych w rozdziałach 9.3.1, 9.3.2 i 9.3.3 charakterystyki przyspieszania pociągów bazowały na charakterystykach uzyskanych z pomiarów rzeczywistych. W oprogramowaniu komercyjnym, charakterystyki przyspieszania oraz hamowania są obliczane przez oprogramowanie na podstawie charakterystyki trakcyjnej pojazdu. Uzyskane dane z oprogramowania komercyjnego nie pozwalają na dokładne zbadanie charakterystyki przyspieszania i hamowania ze względu na brak możliwości wyeksportowania macierzy danych tworzących charakterystyki. Oprogramowanie komercyjne nie pozwala też na modelowanie dodatkowego podziału klasycznych odstępów przy wykorzystaniu wirtualnych odstępów. Oznacza to ograniczone zastosowanie przedmiotowego oprogramowania komercyjnego do badań i oceny wpływu na zdolność przepustową prototypowych rozwiązań w systemach sterowania ruchem kolejowym.

9.3.5. Podsumowanie

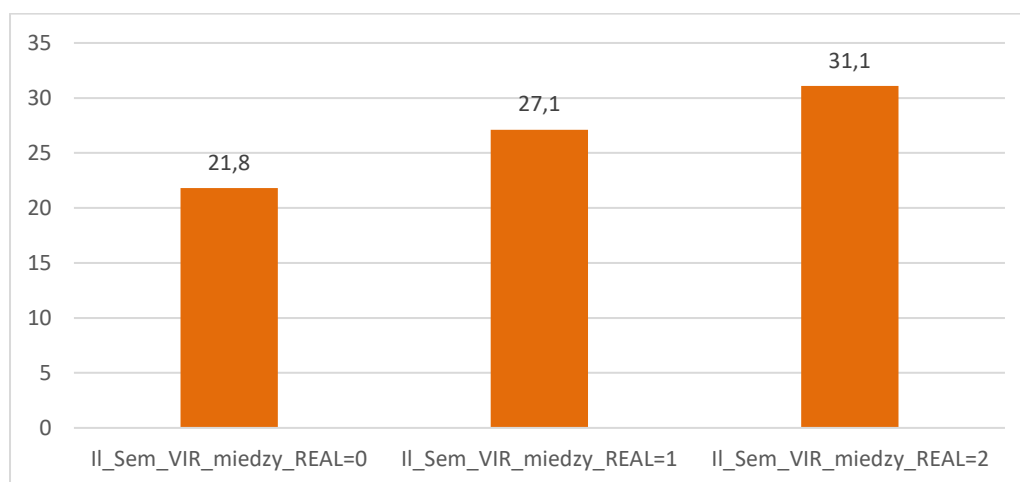
W rozdziale 9.3 przedstawiono badania symulacyjne zdolności przepustowej z wykorzystaniem modelu jazdy pociągu w oparciu o sygnalizację kabinową z zastosowaniem systemu ETCS, opisanego w rozdziale 5.2. W modelu tym uwzględniono rzeczywiste charakterystyki jazdy pociągu uzyskane z pomiarów oraz charakterystyki hamowania zgodne z modelem hamowania ETCS. Badania przeprowadzono na modelu szlaku Psary – Góra Włodowska linii kolejowej nr 4 (Centralna Magistrala Kolejowa).

Na podstawie wyników badań symulacyjnych można stwierdzić, że wprowadzenie dodatkowego podziału odstępu z zastosowaniem wirtualnych odstępów na analizowanym szlaku wpływa znacząco na zdolność przepustową:

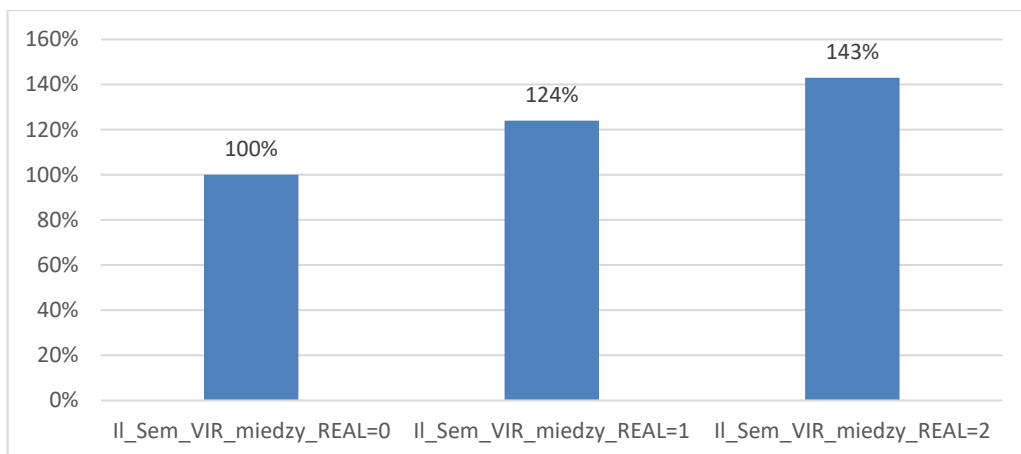
- przy braku dodatkowych semaforów wirtualnych (podział odstępu rzeczywistego na dwa dodatkowe odstępy wirtualne) maksymalna zdolność przepustowa wynosi $N_t=21,8$ [poc./h];
- przy jednym dodatkowym semaforze wirtualnym (podział odstępu rzeczywistego na dwa dodatkowe odstępy wirtualne) maksymalna zdolność przepustowa wynosi $N_t=27,1$ [poc./h], co stanowi względny wzrost o 24%;
- przy dwóch dodatkowych semaforach wirtualnych (podział odstępu rzeczywistego na trzy dodatkowe odstępy wirtualne) maksymalna zdolność przepustowa wynosi $N_t=31,1$ [poc./h], co stanowi względny wzrost o 43%.

Rysunek 9-65 przedstawia zbiorcze wyniki maksymalnej liczby pociągów danego typu o znanych charakterystykach przyspieszania i hamowania, mogących przejechać analizowany szlak w ciągu godziny, bez potrzeby niezasadnego hamowania i ponownego przyspieszania w wyniku interakcji z poprzedzającym pociągiem.

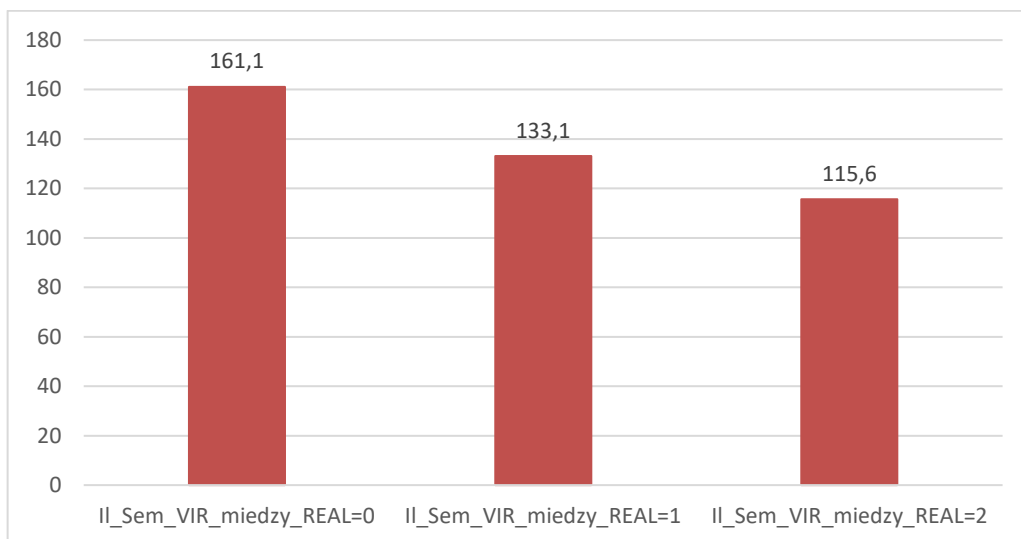
Wyniki zmiany maksymalnej liczby pociągów przy trzech rozpatrywanych konfiguracjach przedstawia Rysunek 9-66. Rysunek 9-67 przedstawia natomiast porównanie chwili czasowej wyprawienia pociągu P+1 względem wyprawienia pociągu P, która umożliwia przejazd całego szlaku przez pociąg P+1 bez potrzeby hamowania i ponownego przyspieszania w wyniku interakcji z pociągiem P.



Rysunek 9-65. Maksymalna liczba pociągów, które mogą być wyprawiane na szlak bez konieczności hamowania i rozprędzania w wyniku interakcji z poprzedzającym pociągiem, przy różnych konfiguracjach dodatkowego podziału odstępu [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-66. Względna zmiana maksymalnej liczby pociągów, które mogą być wyprawiane na szlak bez konieczności hamowania i rozpędzania w wyniku interakcji z poprzedzającym pociągiem, przy różnych konfiguracjach dodatkowego podziału odstępu [źródło: opracowanie własne]



Rysunek 9-67. Chwila czasowa wyprawienia pociągu P+1 od chwili czasowej wyprawienia pociągu P, przy różnych konfiguracjach dodatkowego podziału odstępu [źródło: opracowanie własne]

10. Podsumowanie i perspektywy dalszych badań

W ramach pracy przedstawiono tematykę oceny zdolności przepustowej szlaku kolejowego z wykorzystaniem autorskich modeli jazdy pociągu opracowanych w środowisku MATLAB&Simulink. Potrzeba zbadania tej tematyki wynikała z nowych aspektów związanych z procesem sterowania i kierowania ruchem pociągów, które są pochodną procesów cyfryzacji systemów kolejowych. Tematyka ta, nie znalazła dotąd odzwierciedlenia w literaturze, a dostępne oprogramowanie komercyjne nie pozwala na zastosowanie odpowiedniego procesu parametryzacji i realizacji badań na etapie tworzenia założeń projektowych dla rozwiązań w systemach srk.

Zrealizowanie założonych celów pracy przedstawionych w rozdziale 1.1, wymagało zamodelowania jazdy pociągu według różnych systemów sterowania ruchem kolejowym.

Pierwszy model jazdy pociągu, dla którego opracowano 25 założeń, dotyczy procesu sterowania jazdą pociągu w oparciu o jazdę maszynisty z wykorzystaniem sygnalizacji przytorowej. Model ten odwzorowuje logikę działania liniowych urządzeń srk oraz oddziaływanie infrastruktury na pociąg przez detektory kół (w celu wykrycia niezajętości) oraz sygnałów wyświetlanych na semaforach. Odwzorowano rzeczywiste zachowanie maszynisty przez uwzględnienie drogi widoczności semafora (rzeczywistej oraz przepisowej), jak również indywidualne dla pociągu i danego semafora wyprzedzenie lub opóźnienie momentu rozpoczęcia hamowania. Uwzględniono również zachowanie dyżurnego ruchu w zakresie obsługi pociągu wjeżdżającego na sąsiednią stację.

Drugi model jazdy pociągu, dla którego opracowano dodatkowych 14 założeń, dotyczy procesu sterowania jazdą pociągu w oparciu o sygnalizację kabinową z wykorzystaniem systemu ETCS. Model ten odwzorowuje logikę działania systemu ETCS w zakresie wyznaczania zezwolenia na jazdę na podstawie niezajętości odstępów. Model ten uwzględnia również wirtualne detektory i semafony, które mogą być użyte do dodatkowego podziału klasycznych odstępów.

Obydwa modele zostały zbudowane w środowisku MATLAB&Simulink i charakteryzują się dużą możliwością parametryzacji modelu pociągu, jego oddziaływania z systemami sterowania ruchem kolejowym, infrastruktury, sposobu działania i konfiguracji systemów sterowania ruchem kolejowym oddziałujących bezpośrednio na proces jazdy pociągu i dostosowania do konkretnych celów. Możliwe jest m.in. indywidualne określenie profilu jazdy każdego z pociągów uczestniczących w symulacji, podziału szlaku na odstępów, w tym zastosowanie dodatkowego podziału klasycznych odstępów na wirtualne odstępów.

Ponadto w celu modelowania zjawisk fizycznych, jakim jest jazda pociągu, opracowane autorskie modele umożliwiają wprowadzanie rzeczywistych charakterystyk przyspieszania i hamowania pociągu, co jest niewątpliwą przewagą nad dostępnymi programami komercyjnymi, używanymi do oceny zdolności przepustowej. Dla potrzeb badań symulacyjnych przedstawionych w pracy uzyskano dane zarejestrowane w rejestratorze pokładowym w czasie pomiarów przeprowadzonych na dwóch typach pojazdów trakcyjnych. Uzyskane dane posiadały zmienny w czasie krok próbkowania. Chcąc wykorzystać w procesie modelowania możliwie reprezentatywny proces hamowania i przyspieszania, dokonano analizy uzyskanych danych z pomiarów. Zaproponowany został autorski algorytm uśredniania, z wykorzystaniem funkcji liniowej, interpolacji wyselekcjonowanych wcześniej przebiegów spełniających określone kryteria.

W kolejnym etapie badań dokonano sprawdzenia poprawności działania oprogramowania symulacyjnego zbudowanego na bazie opracowanych modeli jazdy pociągów. W przypadku pierwszego modelu polegało to na weryfikacji generowanych sygnałów przez detektory i odpowiadające im semaforom w wyniku przejazdu pociągu. Sprawdzenie implementacji w oprogramowaniu symulacyjnym drugiego modelu opierało się na analizie możliwości wydłużenia zezwolenia na jazdę dla kolejnego pociągu na podstawie informacji generowanych przez wirtualne detektory. Sprawdzenie działania zarówno modelu pierwszego, jak i drugiego dało wynik pozytywny.

W celu oceny zdolności przepustowej na bazie zbudowanych modeli jazdy pociągu zaproponowano autorski sposób kontrolowanego wyprawienia kolejnych pociągów na szlak, z predykcijną oceną potencjalnych konfliktów ruchowych z poprzedzającym pociągiem. W rezultacie taki sposób wyprawienia pociągu może eliminować potrzebę hamowania i ponownego przyspieszania pociągu w wyniku dojazdu do końca zezwolenia na jazdę spowodowanego zajętością kolejnego odstępu przez poprzedzający pociąg. Zaproponowany sposób został sprawdzony w obydwu modelach jazdy pociągu. Na podstawie dokonanych badań symulacyjnych, potwierdzono możliwość wyeliminowania hamowania i przyspieszania w wyniku interakcji z pociągiem poprzedzającym. Przy przyjętych warunkach symulacji, czas przejazdu kolejnego pociągu uległ zmniejszeniu dzięki wyeliminowaniu niezasadnego hamowania i ponownego przyspieszania. Łączny czas jazdy analizowanych dwóch pociągów nie uległ jednak zmianie. W tym przypadku nie można mówić o wpływie na zdolność przepustową. Jednakże przy uwzględnieniu rzeczywistych charakterystyk jazdy pociągów, również łączny czas jazdy pociągów uległ zmniejszeniu, co jest jednoznaczne ze zwiększeniem zdolności przepustowej (krótszy czas blokowania odstępu).

W realizowanej pracy dokonano również uwzględnienia w modelu jazdy pociągu w oparciu o system ETCS charakterystyk hamowania, obliczanych przez urządzenia pokładowe ETCS na podstawie modelu hamowania opisanego w standardzie tego systemu. W tym celu wykorzystano narzędzie udostępnione przez Europejską Agencję Kolejową ERA *Braking curve simulation tool*. Chcąc uzyskać charakterystyki hamowania ETCS odpowiadające w jak największym stopniu rzeczywistości, w narzędziu tym zastosowano parametry pojazdów trakcyjnych, które były użyte do uzyskania danych z pomiarów rzeczywistych.

Na potrzeby badań symulacyjnych zdolności przepustowej linii kolejowej, dla analizowanego szlaku Psary – Góra Włodowska, znajdującego się na linii kolejowej nr 4, zaproponowano trzy konfiguracje szlaku. Oprócz konfiguracji odpowiadającej rzeczywistości, uwzględniono również dodatkowy podział klasycznych odstępow z wykorzystaniem wirtualnych odstępow. Odstępy te przyjmują określony stan logiczny na podstawie raportowanej przez pociąg pozycji. Zaproponowano konfiguracje podziału odstępow z wykorzystaniem jednego wirtualnego detektora i semafora, tj. podziału odstępu na dwa odstępy wirtualne oraz konfigurację z dwoma wirtualnymi detektorami i semaforami na każdym odstępie, tj. podziału odstępu na trzy odstępy wirtualne.

Wykorzystując opracowane autorskie modele jazdy pociągów oraz uwzględniając rzeczywiste dane dotyczące zjawisk fizycznych związanych z procesem jazdy pociągu, przeprowadzono badania zdolności przepustowej. Dzięki zaproponowanemu autorskiemu sposobowi oceny zdolności przepustowej w oparciu o kontrolowane wyprawianie kolejnych pociągów na szlak, uzyskano rzeczywisty okres wykresu ruchu. Na tej podstawie wyliczono maksymalną liczbę pociągów mogących przejechać analizowany szlak bez konieczności hamowania i przyspieszania, z wyjątkiem ograniczeń prędkości postojów handlowych występujących na danym szlaku.

Uzyskane wyniki potwierdziły nie tylko zasadność metodyki badania zdolności przepustowej w oparciu o metodę symulacyjną z wykorzystaniem kontrolowanego opóźnionego wyprawiania pociągu na szlak, ale również potwierdziły zasadność zastosowania wirtualnych odstępów. Dzięki uzyskanym wynikom możliwe jest również określenie punktu krytycznego, tzn. miejsca, gdzie potencjalnie może wystąpić konieczność hamowania pociągu w wyniku dojazdu do współrzędnej miejsca rozpoczęcia hamowania, niewynikającego z ostrzeżeń stałych lub doraźnych, co nie jest możliwe w innych rozwiązaniach, w tym komercyjnych. Należy również zauważyć, że przedstawiony algorytm mógłby potencjalnie służyć w systemach kierowania i sterowania ruchem kolejowym jako element rozwiązywania konfliktów ruchowych.

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania, należy stwierdzić, że założony cel pracy, tj. opracowanie modeli jazdy pociągów i oprogramowania symulacyjnego w celu oceny wpływu nowoczesnych systemów sterowania ruchem kolejowym na zdolność przepustową linii kolejowej, został zrealizowany. Spełnione zostały również wszystkie pozostałe cele szczegółowe.

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych na analizowanym szlaku pozwalają na potwierdzenie założonej w pracy tezy, iż: wykorzystanie modeli jazd pociągów z uwzględnieniem rzeczywistych charakterystyk przyspieszania i hamowania w badaniach symulacyjnych umożliwi ocenę zdolności przepustowej linii kolejowej przy wykorzystaniu różnych systemów sterowania ruchem kolejowym.

Należy zauważyć, że uzyskane wyniki dotyczące maksymalnej liczby pociągów stanowią tylko pewną daną wyjściową do dalszych analiz – m.in. dotyczących praktycznej zdolności przepustowej, wydajności zasilania trakcyjnego itp. Trzeba również zaznaczyć, że zdolność przepustowa szlaku kolejowego jest zależna od zdolności przepustowej stacji na końcach szlaku. Uzyskane wyniki pozwalają jednak na wyznaczenie rzeczywistego, minimalnego czasu między wyprawianiem kolejnych pociągów (tj. okres wykresu ruchu) z uwzględnieniem rzeczywistych charakterystyk jazd pociągów. Stanowią również potwierdzenie możliwości zastosowania prezentowanej metody do oceny rozwiązań projektowych w systemach sterowania i kierowania ruchem kolejowym.

Opracowując przedmiotowe modele jazdy pociągów, starano się przewidzieć możliwie dużą liczbę przypadków, które mogą wystąpić w trakcie jazdy pociągów. Z tego powodu w oprogramowaniu symulacyjnym tworzono macierze danych, opisujące te zjawiska w sposób matematyczny. Pomimo iż nie wszystkie z tych zjawisk zostały wykorzystane w prezentowanych badaniach, to dane te umożliwiają dalszy rozwój oprogramowania symulacyjnego.

W dalszych pracach badawczych planuje się:

- Przeprowadzenie badań ruchu mieszanego z użyciem obydwu modeli jazdy pociągów przy różnym stopniu udziału pociągów sterowanych przez sygnalizację przytorową oraz sygnalizację kabinową.
- Uzupełnienie modelu jazdy pociągu w oparciu o sygnalizację kabinową o proces sterowania z wykorzystaniem wirtualnego sprzęgu.
- Opracowanie algorytmu umożliwiającego automatyzację wprowadzania do opracowanego oprogramowania symulacyjnego danych rzeczywistych dotyczących charakterystyk jazd pociągów uzyskiwanych z rejestratorów pokładowych.

Bibliografia

- [1] Góra I. *How will the railway develop? ECTS, ATO, H2O. Jak będzie rozwijać się kolej? ECTS, ATO, H2O.* Konferencja Transport XXI wieku 31.08-2.09.2022, Józefów, Polska.
- [2] Pogorzelska A. *Analysis of the changes proposed in TSI CCS 2022, Analiza zmian proponowanych w TSI Sterowanie 2022.* Konferencja Transport XXI wieku 31.08-2.09.2022, Józefów, Polska.
- [3] Folęga P., Burchart-Korol D. *Environmental assessment of road transport in a passenger car using the life cycle approach.* 2017. Transport Problems Vol.:12 Issue:2. 147-153.
- [4] Burchart-Korol D., Folęga P. *Impact of road transport means on climate change and human health in Poland.* 2019. Promet-traffic & transportation Vol.:31, Issue:2. 195-204.
- [5] Burchart-Korol D., Jursova S., Folęga P., et al. *Life cycle impact assessment of electric vehicle battery charging in European Union countries.* 2020. Journal of Cleaner Production Vol.:257, Article Number: 120476.
- [6] Tsumura Y., Nakagawa D., Matsunaka R., Oba T. *A study on the timing of Asian metropolitan railway development with motorization and its effect on CO2 emissions from transportation.* IATSS Res. 2019. Vol. 43, Issue 3, 161-175.
- [7] Pietrzak O., Pietrzak K. *The role of railway in handling transport services of cities and agglomerations.* 2019. Transportation Research Procedia. Vol. 39, 405-416.
- [8] Pietrzak K., Pietrzak O. *Can the Metropolitan Rail System Hamper the Development of Individual Transport? (Case Study on the Example of the Szczecin Metropolitan Railway, Szczecin, Poland).* 2019. Suchanek M. (eds) Transport Development Challenges in the 21st Century. TranSopot 2019. Springer Proceedings in Business and Economics. Springer, Cham.
- [9] Wołowicz P. *Systemy kolei aglomeracyjnych w Polsce.* 2021. Transport miejski i regionalny. Vol. 6. S. 23-30.
- [10] Dong-ling C., Yi-bin X., Changmin J. *Competition between high-speed rail and airlines: Considering both passenger and cargo.* 2021. Transport Policy, Volume 110. S. 379-393
- [11] Juan L., He L., *Can high-speed rail improve enterprise capacity utilization? A perspective of supply side and demand side.* 2022. Transport Policy. Volume 115. S. 152-163
- [12] Dolinayova, A., Zitricky, V. & Cerna, L. *Decision-Making Process in the Case of Insufficient Rail Capacity.* 2020. Sustainability Vol. 12.
- [13] Shift2Rail Innovation Programme 2 – TD2.9 – Traffic management system - https://projects.shift2rail.org/s2r_ip_TD_r.aspx?ip=2&td=a86b26b5-2680-4765-9bc6-c935804d6aa6 [dostęp 21.09.2022]
- [14] Shift2Rail Innovation Programme 2 – TD2.2 – Automatic Train Operations – ATO (up to GoA4) - https://projects.shift2rail.org/s2r_ip_TD_r.aspx?ip=2&td=a86b26b5-2680-4765-9bc6-c935804d6aa6 [dostęp 21.09.2022]
- [15] <https://www.ncrtc.in/project-details/> [dostęp 21.09.2022]
- [16] Akbari M., Hoogewoonink B., et. al. *Expediency of ATO in heavy rail: A survey for the Dutch Railways.* 2020. MATEC Web of Conferences 314

- [17] Kycko M., Zabłocki W. *Wybrane zagadnienia analizy wyboru systemu srk dla linii kolejowej o zadanych parametrach ruchowo-przewozowych*. **2016**. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport. Z. 113. S. 277-285.
- [18] Engelhardt J. *Komponent Kolei Dużych Prędkości w koncepcji budowy CPK 2017-2020*. **2020**. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne. Vol 2 (121). 17-34.
- [19] Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa: *Krajowy Plan Wdrażania Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności "Sterowanie"*, czerwiec **2017** r., <http://utk.gov.pl/download/1/48211/KrajowyPlanWdrazaniaTechnicznejSpecyfikacjiInteroperacyjnosciSterowaniezCzerwca2.pdf> (dostęp 7.02.2021)
- [20] Nachtigal P., Ouředníček J. *Wider aspects of deceleration supervision in ERTMS/ETCS*. **2018**. Horizons of Railway Transport, „MATEC Web of Conferences”, Strecno, Slovakia Vol. 235.
- [21] Irlik M. *Kontrola przejazdu przy implementacji ERTMS/ETCS poziomu 2 na liniach kolejowych z ruchem mieszanym*. **2018**. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z. 123 S. 33-39.
- [22] Folęga P., Irlik M. *Effect of train position reporting on railway line capacity*. **2021**. Transport Problems. Volume 16, Issue 2, S. 59-72
- [23] Landex A. & Jensen L. W. *Infrastructure Capacity in the ERTMS Signaling System*. **2019**. 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis – Rail Norrkoping. Norrkoping. Sweden. P. 607-622.
- [24] Abril M., Barber F., Ingolotti, L., et al. *An Assessment of Railway Capacity*. **2008**. Transportation Research Part Logistics and Transportation Review. Vol. 44, P. 774-806.
- [25] Lai Yung-Cheng, Liu Yun-Hsuan, Lin Yi-Ju. *Standardization of capacity unit for headway - based rail capacity analysis*. **2015**. Transportation Research. Vol. C57. S. 68-84.
- [26] Pouryousef H., Lautala P., White T. *Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe*. **2015**. J. Mod. Transport. Vol. 23. P. 30-42.
- [27] Zhao N. *Railway traffic flow optimisation with differing control systems*, PhD thesis. 2013. Available at : <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/4725/1/Zhao13PhD.pdf> (dostęp 7.02.2021). Str. 58. ISBN 2-7461-1455-0
- [28] *UIC leaflet 406, Capacity*. UIC International Union of Railways, France **2004**.
- [29] Rosberg T., Thorslund, B. *Simulated and real train driving in a lineside automatic train protection (ATP) system environment*. **2020**. Journal of Rail Transport Planning & Management. 2020. Vol. 16. Nr artykułu 100205.
- [30] Gao H., Zhang Y., Guo J. *Calculation and Optimization of Minimum Headway in Moving Block System*. **2020** IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering, ICITE, September 2020, Beijing; China. Article number 9231437, P. 482-486.
- [31] Diaz De Rivera A., Dick C.T., Evans L.E. *Potential for Moving Blocks and Train Fleets to Enable Faster Train Meets on Single-Track Rail Corridors*. **2020**. Journal of Transportation Engineering Part A: Systems, Vol 146, Issue 8, 1. Nr artykułu 04020077
- [32] Ates E., Ustoglu I. *An Approach for Moving Block Signalling System and Safe Distance Calculation*. **2018**. 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Istanbul, Turkey, doi: 10.1109/CEIT.2018.8751745.

- [33] Landex A., Jensen L. W. *Infrastructure Capacity in the ERTMS Signaling System*. **2019**. 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis – Rail. Norrköping, Sweden.
- [34] Ljubaj I., Mikulčić M., Mlinarić T. J. *Possibility of increasing the railway capacity of the R106 regional line by using a simulation tool*. **2020**. Transportation Research Procedia. Vol. 44. S. 137-144.
- [35] Li Ch., et al. *Robust Cooperative Control of Networked Train Platoons: a Negative-Imaginary Systems' Perspective*. **2021**. IEEE Transactions on Control of Network Systems.
- [36] D'Acerno L., Botte M., Pignatiello G. *A simulation-based approach for estimating railway capacity*. **2019**. International Journal of Transport Development and Integration. Vol.: 3 No. 3: 232–244. DOI: 10.2495/TDI-V3-N3-232-244
- [37] Riboni A., et al. *Design for testability of ERTMS Applications*. **2019** IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW). Berlin, Germany. 27-30 Oct. 2019
- [38] Kochan A., Koper E. *Symulacje procesów ruchowych na linii wyposażonej w system ERTMS/ETCS w środowisku ERSA*. **2019**. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, Seria: Materiały Konferencyjne 2019/2 (119). S. 121-132.
- [39] Aksentijevic J., Schöbel A. *OpenTrack – A tool for simulation of railway networks*. **2017**. Mechanics Transport Communications. Vol. 15. Issue 3. Nr artykułu: 1532. S. 32-40.
- [40] Lipiński L., Miszewski M. *Wyznaczanie charakterystyk trakcyjnych pojazdów kolejowych z asynchronicznymi napędami trakcyjnymi*. **2012**. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 1/2012 (94). S. 67-74.
- [41] Dąbrowa-Bajon M. *Podstawy sterowania ruchem kolejowym: funkcje, wymagania, zarys techniki*. Wydanie III popr. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. **2014**. 391.
- [42] Gajda B. *Zarys techniki ruchu kolejowego. Tom II - Technologia ruchu kolejowego* WKiŁ, Warszawa, **1972**.
- [43] Cao N., Ullrich M. *A study of homogeneity of operating programs on operation quality considering the occupancy of infrastructure*. **2017**. Journal of Rail Transport Planning & Management Vol.: 7 Issue: 1-2: 1-18.. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.05.002>
- [44] Gleba R., Grulkowski S., Zariczny J. *Analiza i ocena zdolności przepustowej linii kolejowej o zróżnicowanej strukturze ruchu*. **2016**. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, Oddział w Krakowie nr 3(110). Str. 83-96.
- [45] Landex A., Jensen W., Jokiranta A., Musto M. *ERTMS/ETCS level 2 capacity benefits on the city lines of the Helsinki Region*. **2019**. Finnish Transport Infrastructure Agency. Dostęp 15.02.2020:
https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/172793/vj_2019-43_978-952-317-722-2.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [46] Irlik M. *Prewencyjna diagnostyka i utrzymanie rozproszonych systemów sterowania ruchem kolejowym*. **2017**. Diagnostyka maszyn. XLIV Ogólnopolskie sympozjum, Wisła, 26.02. - 2.03.2017 r. Streszczenia. S. 39
- [47] Irlik M., Fołęga P. *Diagnostyka i utrzymanie systemu sterowania ruchem kolejowym - ERTMS/ETCS*, WibroTech **2017**. XIX Konferencja Naukowa Wibroakustyki

i Wibrotechniki. XIV Ogólnopolskie Seminarium Wibroakustyka w Systemach Technicznych, Warszawa - Pruszków, 19-20 maja 2017 r. Instytut Podstaw Budowy Maszyn. Politechnika Warszawska, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, s. 38-39, 2017

- [48] Goverde R. M. P., Corman F., D'Ariano A. *Railway line capacity consumption of different railway signalling systems under scheduled and disturbed conditions*. **2013**. Journal of Rail Transport Planning & Management, Vol. 4, S. 78-94.
- [49] Becker M., Schreckenberg M., *Analytical Method for the Precise and Fast Prediction of Railway Running Times and Its Application*. **2018**. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 19, No. 11.
- [50] Kosicki D. *O wybranych metodach obliczania przepustowości sieci kolejowej*. **2015**. Drogi Kolejowe Vol.: 9. Str. 19-23.
- [51] Odolinski K., Boysen H. E. *Railway line capacity utilisation and its impact on maintenance costs*. **2019**. Journal of Rail Transport Planning & Management 9, 22-23.
- [52] Lenze W., Nießen N. *Quality in rail timetabling - A detailed review of stakeholders' interests compared with current practices in Germany*. **2021**. Journal of Rail Transport Planning & Management. Vol. 20. Nr artykułu 100282.
- [53] *Ie-4 (WTB-E10) Wytyczne techniczne budowy urządzeń sterowania ruchem kolejowym*. PKP PLK S.A. Załącznik nr 3 do Uchwały Nr 518/2018 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 10 lipca. 2018 r.
- [54] Żurkowski A. *Metody obliczania zdolności przepustowej linii szybkiego ruchu*. **2015**. Logistyka, Vol 4. S. 7129-7135
- [55] UNISIG Subset-093 GSM-R Bearer Service Requirements wersja 4.0.0. 2022.
- [56] Landex A., Kaas A. H., Schittenhelm B., Schneider-Tilli J. *Evaluation of railway capacity*. **2008**. Springer Science Business Media, LLC.
- [57] Jacyna M., Gołębiowski P., Krześniak M., Szkopiński J. **2019**. *Organizacja ruchu kolejowego*. Wydanie I, Wyd. Naukowe PWN SA. Warszawa. ISBN 978-83-01-20689-5.
- [58] Guo Z., Qiao J., Lin S. *Modelling of European Train Control System using process algebra*. **2018**. Chinese Control And Decision Conference (CCDC), nr artykułu: 5888-5892
- [59] Biagi M., Carnevali L. Paolieri M., Vicario E. *Performability evaluation of the ERTMS/ETCS – Level 3*. **2017**. Transportation Research Part C 82, 314–336.
- [60] Cheng J., Chen Z. *Impact of high-speed rail on the operational capacity of conventional rail in China*. **2021**. Transport Policy Vol. 110. 354-367
- [61] Woch J. *Teoria potoków ruchu*. Politechnika Śląska, Katowice **2001**.
- [62] Woch J. *Narzędzia analizy efektywności i optymalizacji sieci kolejowe*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice **2007**.
- [63] Woch J. *Optymalizacja sieci transportowych*. Politechnika Śląska, Katowice **2002**.
- [64] Woch J. *Statystyka procesów transportowych*. Politechnika Śląska, Katowice **2000**.
- [65] Woch J. *Podstawy inżynierii ruchu kolejowego*. WKiŁ, Warszawa **1983**.
- [66] Borodin A., Panin V. *The distribution of marshalling work of industrial and mainline rail transport*. Transport Problems. **2018**. Vol. 13 Issue 4. P. 37-46.
- [67] Boroun M., et al. *An efficient heuristic method for joint optimization of train scheduling and stop planning on double-track railway systems*. **2020**. INFOR: Information Systems and Operational Research, Vol. 58 Issue 4, 652-679.

- [68] Rao X., Montigel M., Weidmann U. *A new rail optimisation model by integration of traffic management and train automation*. **2016**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 71, s. 382-405
- [69] Bababeik M., Khademi N., et al. *Vulnerability Analysis of Railway Networks in Case of Multi-Link Blockage*. **2017**. Transportation Research Procedia, Volume 22, s. 275-284.
- [70] Rosell F., Codina E. *A model that assesses proposals for infrastructure improvement and capacity expansion on a mixed railway network*. **2020**. Transportation Research Procedia. Vol. 47, s. 441–448.
- [71] Widyastuti H., Budhi W. S. *Railway capacity analysis using indonesian method and UIC code 405 method*. **2020**. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 930(1)
- [72] Wittrup J. S., Schmidt M., Nielsen Otto A. *Determination of infrastructure capacity in railway networks without the need for a fixed timetable*. **2020**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies Vol.:119, nr artykułu: 102751.
- [73] Gao M., Zhou L., Chen Y. *An Alternative Approach for High Speed Railway Carrying Capacity Calculation Based on Multiagent Simulation*. **2016**. Discrete Dynamics in Nature and Society. Vol. 2016. Nr artykułu 4278073.
- [74] Saidi S., Wilson .. H. M., et al. *Mesoscopic Modeling of Train Operations: Application to the MBTA Red Line*. **2019**. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. IEEE. 27-30 Oct. Auckland, New Zealand. DOI: 10.1109/ITSC.2019.8917313
- [75] Zhao J., Ma X. Gong. Y, et al. *Optimization of Train Headway in Automatic Train Control System*. **2018**. 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). 12-14 Nov. 2018. Ningbo, China
- [76] Shakhar S., Singh A., et al. *Development of a railway junction simulator for evaluation of control strategies and capacity utilization optimization*. **2019**. Fifth Indian Control Conference (ICC). 9-11 Jan. 2019. Delhi, India.
- [77] Vieira A. P., Christofoletti L. M., Vilela P. *Analysis railway capacity using a planning tool*. **2018**. The 2018 Joint Rail Conference Pittsburgh.
- [78] Dunbar R., Roberts, C., Zhao, N. *A tool for the rapid selection of a railway signalling strategy to implement train control optimization for energy saving*. **2017**. Journal of Rail Transport Planning & Management. Vol. 7. S. 224-244.
- [79] Shakibayifar M., Sheikholeslami A., Corman F. *A simulation-based optimization approach to rescheduling train traffic in uncertain conditions during disruptions*. **2018**. Scientia Iranica Transactions A: Civil Engineering. Vol. 25. S. 646-662.
- [80] Shakibayifar M., Hassannayebi E., et al. *An intelligent simulation platform for train traffic control under disturbance*. **2019**. International Journal Of Modelling And Simulation. Vol. 38. No. 3. S. 135-156.
- [81] Hassan A. H., Nicholson G. L., Roberts C. *Impact of train positioning inaccuracies on railway traffic management systems: framework development and impacts on TMS functions*. **2020**. IET Intell. Transp. Syst. Vol. 14 Iss. 6, S. 534-544.
- [82] Zappacosta C., Vetrucchio S., Mancini G. *A simulation environment for railway dynamics and signalling, aimed to European certification of safe vital computers*. **2018** AEIT International Annual Conference. 3-5 Oct. 2018. Bari, Italy.
- [83] Onischenko A.A., Chenykh I.V. *Development a Simulation Model of Automatic Locomotive Signaling Continuous Type of Action*. **2019**. International Multi-

Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 1-4 Oct. 2019. Vladivostok, Russia.

- [84] Abate C., Campanile L., Marrone S. *A flexible simulation-based framework for model-based/data-driven dependability evaluation*. **2020**. IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW). 12-15 Oct. 2020. Coimbra, Portugal.
- [85] Szpytko J., Salgado D. Y. *Robust simulation method of complex technical transport systems*. **2021**. Transport Problems. Vol. 16 Issue 2. S. 101-112.
- [86] Dudzik M. *Metodyka obliczania największego możliwego przyspieszenia ograniczonego warunkiem przyczepności dla pojazdu trakcyjnego na przykładzie pojazdu FLIRT ED 160 firmy Stadler*. **2018**. PTiL. Wyd. 3/2018 (43). S. 21-31.
- [87] Żurkowski, A. *Techniczno-ruchowe i eksploatacyjne uwarunkowania automatycznego prowadzenia pociągu*. **2018**. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport. Z. 121. S. 453-463.
- [88] Pawlik M., *Czas na kompleksowe podejście do bezpieczeństwa systemów transportowych opartych na predefiniowanych drogach przebiegu (bezpieczeństwo, ochrona, cyberbezpieczeństwo)*. **2019**. TTS, Wyd. 7-8/2019. S. 40-43
- [89] Lista Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego w sprawie właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei
- [90] Kochan A., Koper E., Ilczuk P. *Wybrane zagadnienia automatyzacji prowadzenia pojazdów szynowych*. **2019**. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport. Vol. 127, S. 37-47.
- [91] Kochan A., Koper E. *Analiza bezpieczeństwa funkcjonalności systemów automatycznego prowadzenia pociągu*. **2020**. Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, styczeń 2020
- [92] Fernández-Rodríguez A., Cucala A.P., Fernández-Cardador A. *An Eco-Driving Algorithm for Interoperable Automatic Train Operation*. **2020**. Application Science. Vol. 10. Nr artykułu 7705
- [93] Białoń A., Toruń A., Gradowski P. *Nowoczesny System Zarządzania Ruchem Kolejowym (ERTMS)*. **2009**. Problemy kolejnictwa. Z. 148, S. 137-170.
- [94] Pawlik M. *Europejski System zarządzania ruchem kolejowym. Przegląd funkcji i rozwiązań technicznych - Od idei do wdrożeń i eksploatacji.*, KOW, Warszawa, 2015
- [95] SUBSET-026 System Requirements Specification v. 3.6.0
- [96] Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/776 z dnia 16 maja 2019 r. w sprawie TSI dla podsystemu „Sterowanie”.
- [97] Irlík M. *Linear positioning of railway objects*. **2017**. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Transport, tom 96. S. 49-57.
- [98] Irlík M. *Wyznaczanie pozycji obiektów na linii kolejowej dla systemu ERTMS/ETCS*. **2019**. Diagnostyka maszyn. XLVI Ogólnopolskie sympozjum, Wisła, 3.03. - 7.03.2019, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, 2019
- [99] Hansen D., Leuschel M., et al. *Validation and real-life demonstration of ETCS hybrid level 3 principles using a formal B model*. **2020**. International Journal on Software Tools for Technology Transfer. Vol. 22. S. 315-332.

- [100] Gaspari P., Riccobene E., Gargantini A. *A formal design of the Hybrid European Rail Traffic Management System*. **2019**. Proceedings of the 13th European Conference on Software Architecture . Vol. 2. S. 156-162.
- [101] Tueno Fotso S.J., Frappier M., Laleau R. et al. *Modeling the hybrid ERTMS/ETCS level 3 standard using a formal requirements engineering approach*. **2020**. Int J Softw Tools Technol Transfer Vol. 22, 349–363
- [102] Mammar A., Frappier, M., Tueno Fotso S.J., et al. *A formal refinement-based analysis of the hybrid ERTMS/ETCS level 3 standard*. **2020**. Int J Softw Tools Technol Transfer 22, 333–347
- [103] Białoń A., Gradowski P., Gryglas M. *Wpływ nowoczesnych urządzeń srk na wzrost przepustowości linii kolejowych*. **2010**. Logistyka Vol.: 4.
- [104] Verkehrswissenschaftliches Institut – Lehrstuhl für Schienen-bahnwesen und Verkehrswirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. *Influence of ETCS on the line capacity*. **2008**.
- [105] Lewiński A., Toruń A. *Funkcjonalność i bezpieczeństwo w systemach srk wykorzystujących zmienny odstęp blokowy*. **2012**. Logistyka. Tom 3.
- [106] Mickoski H., Djidrov M., Mickoski I. *Estimation and analysis of various influential factors in the braking process of rail vehicles*. **2021**. Vehicle System Dynamics, Vol. 59. Issue 1, 1-16
- [107] Hougardy A., Europejska Agencja Kolejowa, ERA. *Introduction to ETCS braking curves*, ERA_ERTMS_040026, 2016
- [108] Ilczuk P., Zabłocki W. *Wybrane zagadnienia wyznaczania krzywych hamowania pociągów*. **2013**. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 95.
- [109] Havryliuk V. I., *An alternative approach for high speed railway*. **2017**. Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті Vol. 13, 2017
- [110] Kochan A., Koper-Olecka E., Gruba Ł. *Simulation of the Effect of Selected National Values on the Braking Curves of an ETCS Vehicle*. **2019**. Development of Transport by Telematics. S. 17-31
- [111] Irlik M. *Train headway optimisation using virtual blocks*. **2021**. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. Vol. 112. S. 75-84
- [112] Lenze W., Nießen N. *Optimization of speed changes and its effects on running time and capacity*. 2019. Computers in Railways XVI, doi:10.2495/CR180271.
- [113] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 18 lipca 2005 r. W sprawie ogólnych warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji, Dz.U. 2005 nr 172 poz. 1444
- [114] Estil-les M. d. C., Bersani C., Sacile R. *High-speed train scheduling and rescheduling models*. **2020**. IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE). S. 331-336.
- [115] Simonelli F., Tinessa F., Gallo M., Romano A., Marzano V. *Ecodriving in high frequency rail services*. **2020**. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2020, 1-6.
- [116] Song T., Tang, T., et al. *Train Headway Adjustment Using Potential Function Based on Multi-agent Formation Control*. **2018** International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Singapore.
- [117] Goverde R. M. P., Corman F., D’Ariano A. *Investigation on the capacity consumption at Dutch railways for various signalling technologies and traffic conditions*. **2014**.

93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB 2014). Waszyngton, USA. 12-16 stycznia 2014.

- [118] R. M. P. Goverde, N. Bešinović. *Capacity Assessment in Railway Networks*. **2018**. International Series in Operations Research and Management Science. Vol. 268. P. 25-45.
- [119] Landex A., Wittrup J. L. *Infrastructure Capacity in the ERTMS Signaling System*. 2019. RailNorrköping **2019**. 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA). Norrköping, Szwecja.
- [120] Ljubaj I., Mlinarić T. J., Ležaić T., Starčević M. *The Possibility of Capacity Increase on the Modernised and Electrified Railway Line R201 along the Zaprešić – Zabok Section*. **2018**. MATEC Web of Conferences Vol. 235, Article number 00009 10th International Scientific Conference Horizons of Railway Transport, HORT 2018. Strecno. Słowacja.
- [121] Vignali V., Cuppi F., Lantieri C., et al. *A methodology for the design of sections block length on ETCS L2 railway networks*. **2020**. Journal of Rail Transport Planning & Management. Vol. 13. Nr artykułu 100160
- [122] Diana M. S. R., Ali Z. H., Haytham N. Z., Akram K. S. *Proposed models to calculate and optimise line capacity under different operation conditions for Egyptian railway network*. **2021**. Journal of Applied Engineering Science, Vol. 19(1). S. 77 - 83
- [123] Sun W., Newton D., Cox S. *Signalling the Layout – Automatic Design of the Optimum ETCS L2 Track Sections*. **2020**. WEC World Engineer Convention Australia, ISBN 978-1-925627-25-1.
- [124] Rail Delivery Group, RDG: Guidance Note Delivering Good Schemes – ETCS, RDG-GN/NTI/001, **2017**
- [125] Sun W., Newton D., Cox S. *Signalling the layout-automatic design of the optimum ETCS L2 track sections*. **2019**. WEC2019: World Engineers Convention. Engineers Australia. Jan. 2019. S. 217-231.
- [126] Basile D., Beekm M., Alessio F., Legay A. *Modelling and Analysing ERTMS L3 Moving Block Railway Signalling with Simulink and Uppaal SMC, Formal Methods for Industrial Critical Systems*. **2019**. 24th International Conference, FMICS, Amsterdam, Holandia.
- [127] Toruń A., Lewiński A. *Metoda lokalizacji pojazdów w procesie sterowania ruchem kolejowym*. **2010**. Logistyka 4/2010.
- [128] Duan H., Schmid F. *Optimised Headway Distance Moving Block with Capacity Analysis*. **2018** International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), Singapore, 2018, S. 1-5.
- [129] Meo C. D., Vaio M. D., Flammini Francesco F., et al. *ERTMS/ETCS Virtual Coupling: Proof of Concept and Numerical Analysis*. **2019**. IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems Vol.: 21, Issue: 6. S. 2545-2556.
- [130] Yang J., Zhang Y., Jin Y. *Technology and application of multiple train cooperative control system based on train to train communication*. **2021**. 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, S. 1654–1657
- [131] Xu B., Wu C., Lu S. and Xue F. *Virtual-Coupling Operation for High-Speed Rail based on Following- Train Speed Profile Optimization*. **2021**. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2021, S. 1249-1254

- [132] Irlik M. *Wybrane aspekty metody detekcji pociągu w oparciu o raportowaną pozycję*. **2020**. Materiał konferencyjny, XVIII Studencka Sesja Naukowa Wydziału Transportu i Inżynierii Lotniczej Politechniki Śląskiej, Katowice.
- [133] Irlik M., Folega P. *Symulacyjna metoda badań rozwiązań w systemach sterowania ruchem kolejowym na zdolność przepustową linii kolejowej*. **2022**. VI Young Scientists Academy. 14-16 listopada 2022, Sucha.
- [134] Irlik M., Wojnar G. *Multicriteria train running model and simulator for railway capacity assessment*. **2022**. Transport Problems. Vol. 17 Issue 2. S. 199-212
- [135] Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym (tekst jednolity: Dz. U. z 2017 r., poz. 2117)
- [136] *Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów Ir-1*, Załącznik do uchwały Nr 693/2017 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 27 czerwca **2017** r.
- [137] *Instrukcja sygnalizacji Ie-1 (E-1)*, Załącznik do uchwały Nr 810/2019 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 10 grudnia **2019** r. PKP PLK. S.A.
- [138] RailMap – baza kolejowa www.bazakolejowa (dostęp 20.02.2022)
- [139] Kochan A., Konopiński L., Ilczuk P., Karolak J., *Wymagania formalno-prawne dotyczące badania interfejsów w systemach sterowania ruchem kolejowym*. **2015**. Problemy kolejnictwa. Vol. 168. S. 21-26

Spis tabel

<i>Tabela 3-1: Rekomendowane wartości współczynnika α celem ujęcia zapasu technicznego zajętości infrastruktury kolejowej</i>	23
<i>Tabela 3-2 Minimalny czas następstwa oraz liczba semaforów przy zastosowaniu różnych systemów sterowania ruchem kolejowym</i>	34
<i>Tabela 4-1 Zależność między poziomem aplikacji ETCS a zdolnością przepustową linii kolejowej</i>	42
<i>Tabela 4-2 Drogi hamowania dla prędkości 160 [km/h] wyznaczone metodami symulacyjnymi dla systemu ETCS oraz wyznaczone w testach terenowych</i>	46
<i>Tabela 4-3 Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę na szlaku przy zastosowaniu wirtualnych odstępów względem innych metod sterowania pociągiem</i>	49
<i>Tabela 4-4 Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę na wyjeździe ze stacji na szlak przy zastosowaniu wirtualnych odstępów względem innych metod sterowania pociągiem</i>	51
<i>Tabela 5-1 Wpływ sygnałów generowanych przez detektory D3-D5 na sygnał wyświetlany na semaforze nr 3</i> .60	
<i>Tabela 5-2 Wpływ rodzaju sygnałów generowanych przez detektory D21-D22 na sygnał wyświetlany na semaforze nr 21 – ostatni semafor blokadowy na szlaku</i>	61
<i>Tabela 5-3 Wpływ rodzaju sygnałów generowanych przez detektory D21-D22 na sygnał wyświetlany na semaforze nr 22 – semafor wjazdowy na sąsiedni posterunek</i>	62
<i>Tabela 6-1 Współrzędne umiejscowienia kolejnych semaforów początkowych na szlaku</i>	71
<i>Tabela 7-1 Wartości, na podstawie których uzyskano profil dopuszczalnej prędkości na szlaku przedstawiony na Rysunek 5-1b</i>	76
<i>Tabela 7-2 Wartości, na podstawie których uzyskano profil dopuszczalnej prędkości na szlaku przedstawiony na Rysunek 5-1a</i>	77
<i>Tabela 7-3 Numery okresów występujących na rysunku Rysunek 7-7 i czasy trwania wartości sygnału „hamuj” = 0 generowanego dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 w poszczególnych okresach</i>	82
<i>Tabela 8-1 Liczba semaforów i detektorów użytych w modelu przy konfiguracjach dodatkowego podziału odstępu z wykorzystaniem semaforów i detektorów wirtualnych</i>	98
<i>Tabela 9-1 Charakterystyka pociągu używana do obliczania krzywych hamowania</i>	121
<i>Tabela 9-2 Wyliczone wartości początku krzywych Permitted (P) z użyciem narzędzia ERA Braking curves simulation tool dla pojazdu typu A oraz pojazdu typu B przy różnych prędkościach początkowych i docelowych</i>	127
<i>Tabela 9-3 Wyliczone wartości krzywych hamowania z użyciem narzędzia ERA Braking curves simulation tool dla pojazdu typu A oraz pojazdu typu B dla prędkości 160 [km/h]</i>	129
<i>Tabela 9-3 Rozmieszczenie elementów infrastruktury dla szlaku Psary Góra Włodowska, tor 1</i>	132

Spis ilustracji

Rysunek 1-1. Dane eksploatacyjne przewozów pasażerskich w latach 2010-2020 [źródło: dane.utk.gov.pl]	13
Rysunek 1-2 Charakterystyka hamowania maszynisty na podstawie wskazań sygnalizacji oraz charakterystyki hamowania obliczone przez system ETCS dla tego samego typu pojazdu trakcyjnego [źródło: opracowanie własne na podstawie charakterystyk hamowania ETCS obliczone za pomocą oprogramowania ERA Braking curve simulation tool wersja 4.1 oraz pomiarów własnych]	15
Rysunek 3-1 Wykres balansu zdolności przepustowej [źródło: opracowano na podstawie [28]]	21
Rysunek 3-2. Model blokowania odstępów. Dla a pociągu „1” pokazano wpływ hamowania (ab) i ponownego rozpędzania pociągu (b) na czas blokowania danego odstęp; [opracowanie własne na podstawie [45] - [49]]	21
Rysunek 3-3. Model blokowania odstępów [opracowanie własne na podstawie [103]]	22
Rysunek 3-4 Jazda pociągów po szlaku wyposażonym w trzystawną blokadę liniową [źródło: opracowanie na podstawie [41]]	25
Rysunek 3-5 Jazda pociągów po szlaku wyposażonym w czterostawną blokadę liniową [źródło: opracowanie na podstawie [41]]	25
Rysunek 3-6 Jazda pociągów po szlaku wyposażonym w czterostawną blokadę liniową [źródło: opracowanie na podstawie [41]]	26
Rysunek 3-7 Wpływ sygnalizacji optycznej na zdolność przepustową [źródło: opracowanie własne na podstawie [20], [53]]	27
Rysunek 3-8 Przykład konfliktu przy heterogeniczności ruchu [źródło: [56]]	28
Rysunek 3-9 Przykład rozkładu jazdy z rozkładem ruchu (a) heterogenicznym oraz (b) homogenicznym. [źródło: [56]]	29
Rysunek 3-10 Wykres ruchu pociągów wraz z pokazaniem zajętości poszczególnych odcinków. [źródło: [50]]	31
Rysunek 3-11 Wykres ruchu pociągów wraz z pokazaniem zajętości poszczególnych odcinków po przeprowadzeniu kompresji dla odcinków AB i BC. [źródło: [50]]	31
Rysunek 3-12 Zależność płynności od intensywności ruchu [źródło: [61]]	32
Rysunek 4-1 Proces sterowania ruchem pociągów w oparciu o sygnalizację przytorową i podział na odstęp [źródło: opracowanie własne na podstawie [53]]	37
Rysunek 4-2 Architektura systemów srk [źródło: opracowanie własne na podstawie [27]]	39
Rysunek 4-3 Schemat działania systemu ERTMS/ETCS poziomu 2. [źródło: opracowanie własne na podstawie [95]]	41
Rysunek 4-4 Charakterystyka hamowania pociągu przez maszynistę. [źródło: opracowanie własne na podstawie [107]]	43
Rysunek 4-5 Charakterystyka hamowania pociągu przez system bezpiecznej kontroli jazdy pociągu [źródło: opracowanie własne na podstawie [107]]	44
Rysunek 4-6 Charakterystyki hamowania wyliczane przez system BKJP (ETCS). Źródło: [108]	45
Rysunek 4-7. Charakterystyki hamowania pojazdu trakcyjnego będącego lokomotywą elektryczną przeznaczoną do ruchu pasażerskiego (charakterystyki EBD, EBI, Warning, Permitted obliczone metodami symulacyjnymi, charakterystyka hamowania maszynisty wyznaczona metodą testów terenowych) [źródło: opracowanie własne na podstawie charakterystyk hamowania ETCS obliczone za pomocą oprogramowania ERA Braking curve simulation tool wersja 4.1 oraz pomiarów własnych.]	46
Rysunek 4-8 Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę na szlaku przy zastosowaniu wirtualnych odstępów względem innych metod sterowania pociągiem [źródło: opracowanie własne na podstawie badań własnych [22]]	50
Rysunek 4-9 Fragment stacji Bolesławiec (Bc) i szlaku w kierunku Zebrzydowej (Zb) z rzeczywistą lokalizacją semaforów wyjazdowych, wjazdowych oraz blokadowych wraz z propozycją dodatkowego podziału klasycznych odstępów przy wykorzystaniu wirtualnych odstępów. Granice wirtualnych odstępów zaznaczono poprzez symbole wskaźników miejsca zatrzymania „Si” dla jazd w kierunku Zebrzydowej [źródło: opracowanie na podstawie badań własnych [111]]	51
Rysunek 4-10 Względna zmiana teoretycznej liczby pociągów na godzinę na wyjeździe ze stacji na szlak przy zastosowaniu wirtualnych odstępów względem innych metod sterowania pociągiem [źródło: opracowanie własne na podstawie badań własnych [111]]	51
Rysunek 5-1. Profil dopuszczalnej prędkości na szlaku (a), profil maksymalnej prędkości pociągu nr 1 na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku (b), (c) [źródło: opracowanie własne]	52
Rysunek 5-2. Indywidualne długości pociągów znajdujących się na szlaku [źródło: opracowanie własne]	53
Rysunek 5-3. Przykład uwzględniania w programie symulacyjnym współrzędnych początku i końca pociągu na szlaku – linia zielona oznacza czoło pociągu, a linia niebieska oznacza koniec pociągu. Przypadek, gdyby	

pociąg mógł przemieszczać się z maksymalnymi dopuszczalnymi prędkościami na szlaku (Rysunek 5-1c) – okręgami zaznaczono chwile, w których pociąg musi zmniejszyć prędkość [źródło: opracowanie własne]	53
Rysunek 5-4. Indywidualne dla danego szlaku współrzędne semaforów rozpoczynających dany odstęp [źródło: opracowanie własne].....	54
Rysunek 5-5. Indywidualne dla wszystkich semaforów drogi widoczności jako odległości od odpowiednich semaforów [źródło: opracowanie własne]	54
Rysunek 5-6. Przykładowy rozkład rzeczywistej widoczności semaforów dla poszczególnych pociągów [źródło: opracowanie własne].....	55
Rysunek 5-7. Przykład uwzględniania w programie symulacyjnym rzeczywistej drogi widoczności; a) Pociąg 2 hamuje do sem. 4 wskazującego sygnał „S1 Stój” z powodu zajętości odstępu 4 przez pociąg 1; b) Pociąg 1 zwalnia odstęp 4, co powoduje zmianę sygnału na sem. 4 na „S5”. Pociąg 2 nie znajduje się jeszcze w drodze widoczności dla sem. 4, dlatego symulowane jest jego dalsze hamowanie; c) Czoło pociągu 2 znajduje się w drodze widoczności sem. 4. Pociąg 2 rozpoczyna przyspieszanie [źródło: opracowanie własne].....	55
Rysunek 5-8. Indywidualne dla wszystkich semaforów współrzędne detektorów kół jako odległości od odpowiednich dla nich semaforów [źródło: opracowanie własne]	56
Rysunek 5-9. Indywidualne dla danego semafora i pociągu drogi wyprzedzenia (lub nawet opóźnienia) rozpoczęcia hamowania [m] względem semafora, na którym jest wyświetlany sygnał „S5” [źródło: opracowanie własne]	57
Rysunek 5-10. Przykładowa charakterystyka hamowania pociągu ($v=f(s)$) (a), aproksymacja charakterystyki hamowania funkcją wielomianową 2 stopnia (b), aproksymacja charakterystyki hamowania funkcją wielomianową 3 stopnia (c) [źródło: opracowanie własne].....	58
Rysunek 5-11. Uwzględniony w modelu przykład zachowania się semaforów (następstwo wskazań), gdy koniec pociągu pierwszego nie przejechał jeszcze obok detektora kół D5 znajdującego się za semaforem Sem. 5 [źródło: opracowanie własne].....	59
Rysunek 5-12. Uwzględniony w modelu przykład zachowania się semaforów, gdy koniec pociągu pierwszego przejechał właśnie za detektor kół D5 znajdujący się za semaforem Sem. 5 [źródło: opracowanie własne]	59
Rysunek 5-13. Zakresy wpływu lub braku wpływu sygnału wyświetlanego przez semafor na zachowanie maszynisty (pociągu) [źródło: opracowanie własne]	63
Rysunek 5-14. Sygnały: a) wyświetlany na semaforze nr 1 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (s. SEM.), b) sygnał „hamuj” (s. HAM.), pozwalający na wjazd na szlak przez pociąg nr 2 bezpośrednio za pociągiem nr 1, c) sygnał „hamuj” (s. HAM.) niepozwalający na wjazd na szlak przez pociąg nr 2 bezpośrednio za pociągiem nr 1 [źródło: opracowanie własne].....	64
Rysunek 5-15. Poglądowe przedstawienie jednego z istotnych fragmentu realizacji modelu w środowisku MATLAB&Simulink [źródło: opracowanie własne].....	66
Rysunek 5-16. Przykładowa charakterystyka hamowania obliczona przez narzędzie ERA Braking curves simulation tool v. 4.2. [źródło: opracowanie własne]	68
Rysunek 5-17. Fragment linii kolejowej z a) klasycznym podziałem na stałe odstępów, b) wprowadzenie dodatkowego podziału stałych odstępów z wykorzystaniem wirtualnych odstępów. Linia czerwoną zaznaczono zajętość poszczególnych odcinków z punktu widzenia systemu. Symbolem „ ” zaznaczono granicę wirtualnych odstępów [źródło: opracowanie własne].....	68
Rysunek 5-18. Wzajemne oddziaływanie pociągów: a) Pociągi wyposażone w ETCS lub jazda na podstawie sygnalizacji przytorowej. Klasyczny podział na odstępów. b) Dodatkowy podział odstępu na wirtualne odstępów. Jazda dwóch pociągów wyposażonych w ETCS. c) Dodatkowy podział odstępu na wirtualne odstępów. Jazda pociągu wyposażonego w ETCS za pociągiem niewyposażonym w ETCS. d) Dodatkowy podział odstępu na wirtualne odstępów. Jazda pociągu niewyposażonego w ETCS za pociągiem wyposażonym w ETCS. e) Dodatkowy podział odstępu na wirtualne odstępów. Jazda dwóch pociągów niewyposażonych w ETCS [źródło: opracowanie własne].....	70
Rysunek 6-1. Wynik symulacji umożliwiający sprawdzenie idei przedstawionej w Tabeli 5-1: sygnał detektora kół nr 14 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (a), sygnał detektora kół nr 15 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (b), sygnał detektora kół nr 16 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (c), sygnał semafora 14 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (d) [źródło: opracowanie własne].....	73
Rysunek 6-2. Lokalizacja detektorów D21, D22 i D23 względem semaforów sem. 21, sem. 22 [źródło: opracowanie własne].....	73
Rysunek 6-3. Wynik symulacji umożliwiający sprawdzenie idei przedstawionej w tabeli 6-2 i 6.3: sygnał detektora kół nr 21 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (a), sygnał detektora kół nr 22 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (b), sygnał detektora kół nr 23 generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (c), sygnał semafora 21 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (d), sygnał semafora 22 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (e) [źródło: opracowanie własne]	74
Rysunek 7-1. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 [źródło: opracowanie własne].....	78

Rysunek 7-2. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 2. Przebieg wykresu wynika z przyjęcia w oprogramowaniu symulacyjnym założenia, że droga hamowania i przyspieszania pociągu dąży do zera [źródło: opracowanie własne]	78
Rysunek 7-3. Przebieg zmian wartości współrzędnych początku i końca pociągu nr 1 – linia zielona oznacza czoło pociągu, a linia niebieska oznacza koniec pociągu (ze względu na przyjęte długości pociągu linie te praktycznie nakładają się na siebie na tym wykresie) [źródło: opracowanie własne]	78
Rysunek 7-4. Przebieg zmian wartości współrzędnych początku i końca pociągu nr 2 – linia zielona oznacza czoło pociągu, a linia niebieska oznacza koniec pociągu (ze względu na przyjęte długości pociągu linie te praktycznie nakładają się na siebie na tym wykresie) [źródło: opracowanie własne]	79
Rysunek 7-5. a) sygnał semafora nr 1 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1, b) sygnał semafora nr 5 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1, c) sygnał semafora nr 6 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1, d) sygnał semafora nr 9 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1, e) sygnał semafora nr 10 dla pociągu nr 2, generowany w wyniku przejazdu pociągu nr 1 [źródło: opracowanie własne]	80
Rysunek 7-6. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od poszczególnych semaforów: a) semafora nr 1, b) semafora nr 5, c) semafora nr 6, d) semafora nr 9, e) semafora nr 10 [źródło: opracowanie własne]	81
Rysunek 7-7. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów [źródło: opracowanie własne]	82
Rysunek 7-8. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące 13 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2 [źródło: opracowanie własne]	83
Rysunek 7-9. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące 37 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2 [źródło: opracowanie własne]	83
Rysunek 7-10. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące 41 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2	83
Rysunek 7-11. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, gdy zastosowano opóźnienie startu pociągu nr 2 wynoszące 41,11 [s] w stosunku do chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału pochodzącego od semafora nr 1 dla pociągu nr 2 z sygnału pomarańczowego S5 na sygnał zielony S2	84
Rysunek 7-12. Czasy przejazdów pociągów nr 1 i nr 2 oraz łączny czas przejazdu obu pociągów [źródło: opracowanie własne]	84
Rysunek 7-13. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 o długości 700 [m] pochodzący od wszystkich semaforów	85
Rysunek 7-14. Czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 i łączny czas przejazdu obu pociągów [źródło: opracowanie własne]	86
Rysunek 7-15. Charakterystyka zmian prędkości jazdy danego pociągu na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku, którą przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, z tą różnicą, że drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tej charakterystyki zostały skrócone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne].	87
Rysunek 7-16. Charakterystyka zmian prędkości jazdy pociągu nr 2 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tej charakterystyki zostały skrócone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne]	88
Rysunek 7-17. Przebieg zmian wartości współrzędnych początku i końca pociągu nr 2 – linia zielona oznacza czoło pociągu, a linia niebieska oznacza koniec pociągu (ze względu na przyjęte długości pociągu linie te praktycznie nakładają się na siebie na tym wykresie) [źródło: opracowanie własne]	88
Rysunek 7-18. Charakterystyka zmian prędkości jazdy danego pociągu na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku, którą przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1 z tą różnicą, że drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały skrócone trzykrotnie [źródło: opracowanie własne]	88
Rysunek 7-19. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 2 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały skrócone trzykrotnie [źródło: opracowanie własne]	89
Rysunek 7-20. Charakterystyka zmian prędkości jazdy danego pociągu na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, z tą różnicą, że drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone o 1,43 razy [źródło: opracowanie własne]	89

Rysunek 7-21. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone o 1,43 razy [źródło: opracowanie własne]	89
Rysunek 7-22. Charakterystyka zmian prędkości jazdy danego pociągu na szlaku w funkcji współrzędnej szlaku, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, z tą różnicą, że drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone 2 razy [źródło: opracowanie własne]	90
Rysunek 7-23. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne]	90
Rysunek 7-24. Przebieg zmian prędkości jazdy pociągu nr 1 w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania występujące w różnych punktach tego profilu zostały wydłużone czterokrotnie [źródło: opracowanie własne]	90
Rysunek 7-25. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów, występujący w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 1 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, zostały zwiększone czterokrotnie, natomiast drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, zostały zmniejszone trzykrotnie [źródło: opracowanie własne]	91
Rysunek 7-26. Sygnał „hamuj” dla pociągu nr 2 w wyniku przejazdu pociągu nr 1 pochodzący od wszystkich semaforów występujący w przypadku, gdy drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 1 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, zostały zwiększone czterokrotnie, natomiast drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1 zostały zmniejszone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne]	91
Rysunek 7-27. Czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 i łączny czas przejazdu obu pociągów w przypadku, gdy zastosowano różne opóźnienia startu pociągu nr 2, a drogi przyspieszania i hamowania pociągu nr 2 w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1 zostały skrócone dwukrotnie [źródło: opracowanie własne]	92
Rysunek 7-28. Przykładowe wyniki czasu przejazdu pociągów uzyskane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink [źródło: opracowanie własne]	93
Rysunek 7-29. Czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 oraz łączny czas przejazdu obu pociągów w przypadku, gdy dla pociągu nr 1 zastosowano profil zmian prędkości jazdy, który przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1, a dla pociągu nr 2 zastosowano drogi przyspieszania i hamowania zmniejszone dwukrotnie (przejazd 1) i trzykrotnie (przejazd 2) w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b oraz Tabela 7-1 [źródło: opracowanie własne]	93
Rysunek 7-30. Czasy przejazdu pociągów nr 1 i nr 2 oraz łączny czas przejazdu obu pociągów w przypadku, gdy dla pociągu nr 2 zastosowano drogi przyspieszania i hamowania zmniejszone trzykrotnie w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b, a dla pociągu nr 1 zastosowano drogi przyspieszania i hamowania zwiększone o 1 (przejazd 1), 1,43 (przejazd 2), 2 (przejazd 3) i 4 razy (przejazd 4) w stosunku do tych, które przedstawia Rysunek 5-1b [źródło: opracowanie własne]	94
Rysunek 8-1. Dodatkowy podział pierwszego, rzeczywistego odstępu w oparciu o odstępy wirtualne [źródło: opracowanie własne]	97
Rysunek 8-2. Dodatkowy podział drugiego, rzeczywistego odstępu w oparciu o odstępy wirtualne [źródło: opracowanie własne]	97
Rysunek 8-3. Dodatkowy podział na ostatnim, rzeczywistym odstępie w oparciu o odstępy wirtualne [źródło: opracowanie własne]	97
Rysunek 8-4. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 dla całego szlaku [źródło: opracowanie własne]	100
Rysunek 8-5. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 dla ostatnich semaforów na szlaku [źródło: opracowanie własne]	101
Rysunek 8-6. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla ostatnich semaforów na szlaku pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników [źródło: opracowanie własne]	101
Rysunek 8-7. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 pierwszych semaforów na szlaku [źródło: opracowanie własne]	102
Rysunek 8-8. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla pierwszych semaforów na szlaku pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników [źródło: opracowanie własne]	102

Rysunek 8-9. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 dla środka szlaku [źródło: opracowanie własne]	103
Rysunek 8-10. Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla środka szlaku pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników [źródło: opracowanie własne]	103
Rysunek 9-1. Rejestrator Hasler TELOC 2500 zainstalowany na pojeździe typu A [źródło: zdjęcie autora]	106
Rysunek 9-2. Oprogramowanie Hasler EVA2 – widok okna ładowania danych zarejestrowanych na pociągach [źródło: opracowanie własne]	106
Rysunek 9-3. Oprogramowanie Hasler EVA2 – widok okna analizy danych zarejestrowanych na obydwu typach pojazdów jadących w komercyjnej jeździe handlowej [źródło: opracowanie własne]	107
Rysunek 9-4. Charakterystyka prędkości w funkcji czasu dla rzeczywistego przejazdu pojazdu typu A [źródło: opracowanie własne, charakterystyka została wygenerowana przez oprogramowanie Hasler TELOC EVA2 w wersji 2606.2.7.]	107
Rysunek 9-5. Charakterystyka prędkości w funkcji czasu dla rzeczywistego przejazdu pojazdu typu B [źródło: opracowanie własne, charakterystyka została wygenerowana przez oprogramowanie Hasler TELOC EVA2 w wersji 2606.2.7.]	108
Rysunek 9-6. Charakterystyka obliczonej prędkości w funkcji czasu dla rzeczywistego przejazdu pojazdu typu A uzyskana z pomiarów przebytej drogi oraz czasu [źródło: opracowanie własne]	108
Rysunek 9-7. Charakterystyka zmierzonej prędkości w funkcji czasu dla rzeczywistego przejazdu Pociągu I [źródło: opracowanie własne]	109
Rysunek 9-8. Wyselekcjonowane przebiegi procesu przyspieszania pojazdu typu A: przysp. A = 3 (Rysunek 9-4), przysp. B = 4 (Rysunek 9-4), przysp. C = 6 (Rysunek 9-4), przysp. D = 7 (Rysunek 9-4), przysp. E = 10 (Rysunek 9-4), przysp. F = 12 (Rysunek 9-4) (a), obserwacja odstająca: przysp. A = 3 (Rysunek 9-4) (b) [źródło: opracowanie własne]	110
Rysunek 9-9. Wyselekcjonowane przebiegi procesu przyspieszania pojazdu typu A – przysp. B = 4 (Rysunek 9-4), przysp. C = 6 (Rysunek 9-4), przysp. D = 7 (Rysunek 9-4), przysp. E = 10 (Rysunek 9-4), przysp. F = 12 (Rysunek 9-4) z pominięciem przysp. A = 3 (Rysunek 9-4) (a), średnia wartość przyspieszenia uzyskana metodą interpolacji (b) [źródło: opracowanie własne]	110
Rysunek 9-10. Zmiany prędkości pojazdu typu A: w funkcji czasu (a) i drogi (b), wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmiany prędkości pociągu w funkcji czasu oraz drogi wyznaczone dla przypadku przyspieszania pociągu do prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy. Strzałkami zaznaczono zmianę charakterystyki w wyniku przemnożenia macierzy prędkości, czasu oraz drogi przez współczynnik skali [źródło: opracowanie własne]	112
Rysunek 9-11. Propozycje ekstrapolowania przyspieszania pociągu do prędkości 160 [km/h] [źródło: opracowanie własne]	113
Rysunek 9-12. Zmiana przyspieszenia pojazdu typu A w funkcji czasu wyznaczona na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmian przyspieszenia pociągu w funkcji czasu wyznaczona dla przypadku przyspieszania pociągu do prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy [źródło: opracowanie własne]	114
Rysunek 9-13. Zmiana drogi przebytej przez pojazd typu A w funkcji czasu, w trakcie przyspieszania, wyznaczona na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmian drogi przebytej przez pojazd typu A w funkcji czasu, w trakcie przyspieszania, wyznaczona dla przypadku przyspieszania pociągu do prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy [źródło: opracowanie własne]	114
Rysunek 9-14. Zmiany prędkości pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu, wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – porównanie przyspieszenia pociągów [źródło: opracowanie własne]	115
Rysunek 9-15. Zmiany przyspieszeń pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – porównanie przyspieszenia pociągów [źródło: opracowanie własne]	116
Rysunek 9-16. Zmiany prędkości pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu, wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – porównanie hamowania pociągów [źródło: opracowanie własne]	117
Rysunek 9-17. Zmiany przyspieszeń pociągu pojazdu typu A i pojazdu typu B w funkcji czasu, wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – porównanie hamowania pociągów [źródło: opracowanie własne]	117

Rysunek 9-18. Zmiany prędkości pociągu pojazdu typu A w funkcji: czasu (a) i w funkcji drogi (b), w przypadku hamowania pociągu wyznaczone na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmian prędkości pociągu w funkcji czasu lub drogi wyznaczona dla przypadku hamowania pociągu z prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy [źródło: opracowanie własne].....	118
Rysunek 9-19. Zmiana przyspieszenia pociągu: pociąg 1 w funkcji czasu przypadku hamowania pociągu wyznaczona na podstawie sygnałów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych i uśrednianych zgodnie z przedstawionym algorytmem – kolor niebieski, propozycja zmian przyspieszenia pociągu w funkcji czasu wyznaczona dla przypadku hamowania pociągu z prędkości 160 [km/h] – kolor pomarańczowy [źródło: opracowanie własne].....	119
Rysunek 9-20 Metodologia symulacji krzywych hamowania w narzędziu ERA Braking curves simulation tool [źródło: opracowanie własne].....	121
Rysunek 9-21 Charakterystyka pociągu użyta do symulacji krzywych hamowania w oprogramowaniu ERA Braking curves simulation tool [źródło: opracowanie własne]	123
Rysunek 9-22 Charakterystyka siły hamowania nagłego w funkcji prędkości uzyskana w narzędziu ERA Braking curves simulation tool dla pociągu 1 [źródło: opracowanie własne]	123
Rysunek 9-23 Charakterystyka siły hamowania służbowego w funkcji prędkości uzyskana w narzędziu ERA Braking curves simulation tool dla pociągu 1 [źródło: opracowanie własne]	124
Rysunek 9-24 Charakterystyka siły hamowania nagłego w funkcji prędkości uzyskana w narzędziu ERA Braking curves simulation tool dla pociągu 2 [źródło: opracowanie własne]	124
Rysunek 9-25 Charakterystyka siły hamowania służbowego w funkcji prędkości uzyskana w narzędziu ERA Braking curves simulation tool dla pociągu 2 [źródło: opracowanie własne]	124
Rysunek 9-26 Zmienne narodowe przyjęte w narzędziu ERA Braking curves simulation tool [źródło: opracowanie własne]	125
Rysunek 9-27 Obliczone krzywe hamowania z wykorzystaniem narzędzia ERA Braking curves simulation tool dla pojazdu typu B dla hamowania od prędkości maksymalnej 200 [km/h] do zatrzymania [źródło: opracowanie własne]	126
Rysunek 9-28 Obliczone krzywe hamowania z wykorzystaniem narzędzia ERA Braking curves simulation tool dla pojazdu typu B dla hamowania od prędkości maksymalnej 200 [km/h] do prędkości [120 km/h] [źródło: opracowanie własne].....	127
Rysunek 9-29. Charakterystyka hamowania ETCS dla pojazdu typu A dla hamowania z prędkości 160 [km/h] do zatrzymania, uwzględniona w oprogramowaniu symulacyjnym [źródło: opracowanie własne].....	128
Rysunek 9-30. Charakterystyka hamowania ETCS dla pociągu pojazdu typu A dla hamowania z prędkości 160 [km/h] do 100 [km/h], uwzględniona w oprogramowaniu symulacyjnym [źródło: opracowanie własne]... 128	128
Rysunek 9-31. Profil prędkości maksymalnej szlaku i profil jazdy pociągu z uwzględnieniem charakterystyki hamowania ETCS i charakterystyki przyspieszania uzyskanej z pomiarów [źródło: opracowanie własne]	130
Rysunek 9-32. Umiejscowienie linii kolejowej nr 4 na sieci kolejowej [źródło: opracowanie własne na podstawie danych [138]].....	131
Rysunek 9-33. Przebieg linii kolejowej nr 4 na odcinku Góra Włodowska – Psary [źródło: opracowanie własne na podstawie danych z [138]]	131
Rysunek 9-34. a – chwilowa, współrzędna końca pociągu P; b – współrzędna punktu zatrzymania (semafora wirtualnego) dla pociągu P+1 w wyniku przejazdu pociągu P; c – nr semafora zatrzymania dla pociągu P+1 w wyniku przejazdu pociągu P [źródło: opracowanie własne]	134
Rysunek 9-35. Chwilowa przebyta droga końca pociągu P oraz naniesiona chwilowa przebyta droga początku pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]	134
Rysunek 9-36. a – droga pozostała do punktu zatrzymania dla pociągu P+1 w wyniku zajętości kolejnych odstępów przez pociąg P; b – droga hamowania ETCS dla pociągu P=1 według funkcji określonej przez standard ETCS, zależna od prędkości chwilowej pociągu P+1; c – pozostała droga do punktu początku hamowania do końca zezwolenia na jazdę [źródło: opracowanie własne]	135
Rysunek 9-37. Droga do punktu zatrzymania, droga do punktu początku hamowania i droga hamowania dla pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne].....	135
Rysunek 9-38. Przebieg sygnału „hamuj” dla pociągu P+1, pochodzący od wszystkich semaforów [źródło: opracowanie własne].....	136
Rysunek 9-39. Profil prędkości maksymalnej szlaku (a w [m/s] i b w [km/h]) i profil jazdy pociągu z uwzględnieniem charakterystyki hamowania ETCS i charakterystyki przyspieszania uzyskanej z pomiarów [źródło: opracowanie własne].....	136
Rysunek 9-40. Przykładowa charakterystyka hamowania według modelu ETCS opisanego w [95] uwzględniona w symulacji [źródło: opracowanie własne]	137
Rysunek 9-41. Charakterystyka jazdy pociągu a – P, b – P=1 [źródło: opracowanie własne].....	138

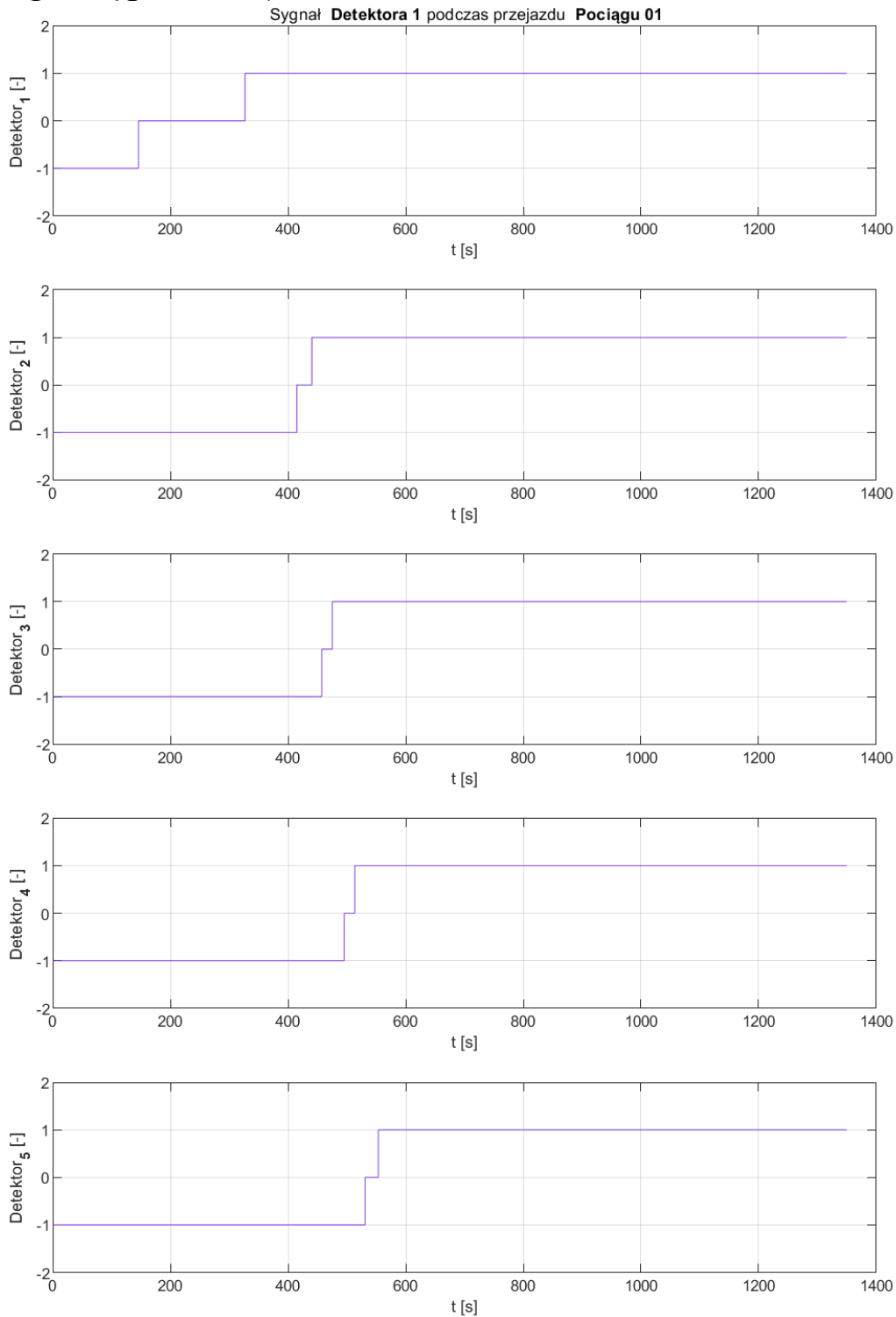
Rysunek 9-42. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b - wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg s. „hamuj” pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]	138
Rysunek 9-43 a – chwilowa współrzędna końca pociągu P; b – odległość do punktu zatrzymania dla pociągu P+1; c – nr semafora wyznaczającego koniec zezwolenia na jazdę/punkt zatrzymania dla pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]	139
Rysunek 9-44 a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągi P+1, zaznaczono miejsce, gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartości ujemne [źródło: opracowanie własne]	139
Rysunek 9-45. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b - wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne].....	140
Rysunek 9-46 a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągi P+1, zaznaczono miejsce, gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartości ujemne, tzw. punkt krytyczny; d – powiększenie, na którym widoczny jest fragment, który przedstawia Rysunek 9-46c, gdzie wartość drogi do punktu początku hamowania zaczyna przyjmować wartości mniejsze niż „0” [źródło: opracowanie własne]	141
Rysunek 9-47. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b - wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne].....	142
Rysunek 9-48. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągi P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 zbliża się do wartości „0” [źródło: opracowanie własne]	143
Rysunek 9-49 a – chwilowa współrzędna końca pociągu P; b – odległość do punktu zatrzymania dla pociągu P+1; c – nr semafora wyznaczającego koniec zezwolenia na jazdę/punkt zatrzymania dla pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]	145
Rysunek 9-50. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0” [źródło: opracowanie własne].....	146
Rysunek 9-51. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągu P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartości ujemne [źródło: opracowanie własne]	147
Rysunek 9-52. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0”; e – zbliżenie na przebieg sygnału „hamuj” [źródło: opracowanie własne].....	148
Rysunek 9-53. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągu P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartości ujemne [źródło: opracowanie własne]	149
Rysunek 9-54. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0” [źródło: opracowanie własne].....	150
Rysunek 9-55. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągu P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 zbliżała się do wartości „0” [źródło: opracowanie własne]	151
Rysunek 9-56 a – chwilowa współrzędna końca pociągu P; b – odległość do punktu zatrzymania dla pociągu P+1; c – nr semafora wyznaczającego koniec zezwolenia na jazdę/punkt zatrzymania dla pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]	153
Rysunek 9-57. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0” [źródło: opracowanie własne].....	154
Rysunek 9-58. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągu P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartość „0” [źródło: opracowanie własne].....	155
Rysunek 9-59. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono chwilę czasową, gdy wartość sygnału zmieniła się na „0” [źródło: opracowanie własne].....	156

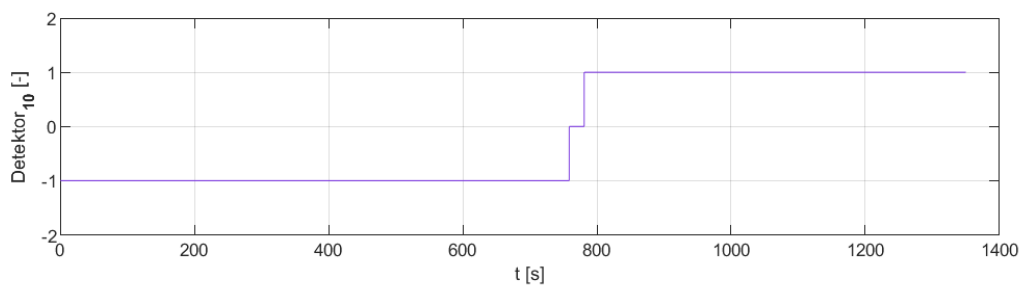
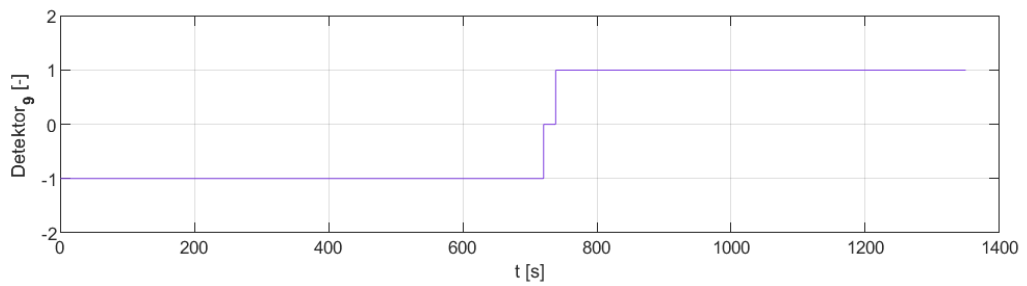
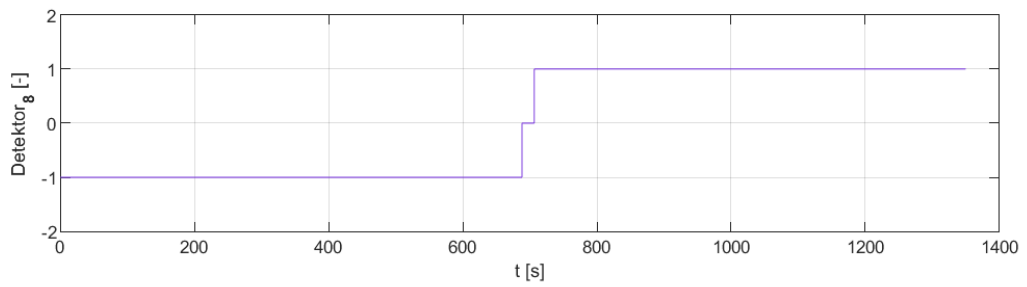
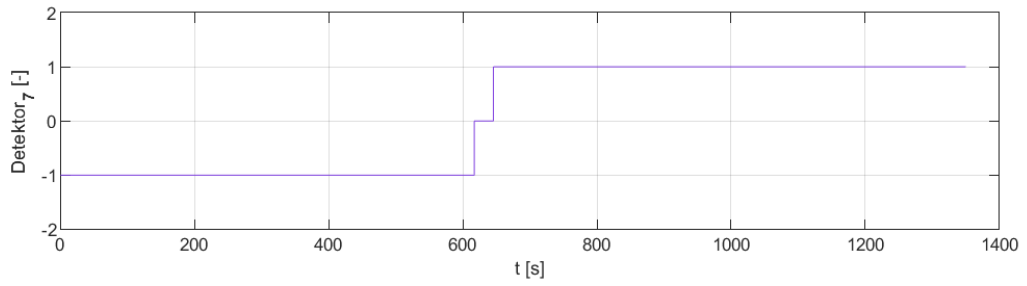
Rysunek 9-60. a – chwilowa droga do punktu zatrzymania pociągu P+1; b – chwilowa, przewidywana, droga hamowania pociągu P+1; c – chwilowa droga do punktu początku rozpoczęcia hamowania dla pociągi P+1, zaznaczono miejsce (tzw. punkt krytyczny), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 osiągnęła wartość „0” [źródło: opracowanie własne]	157
Rysunek 9-61. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1 [źródło: opracowanie własne]	158
Rysunek 9-62. a – chwilowa przebyta droga pociągów; b – wykres prędkości pociągu P+1; c – długość drogi hamowania pociągu P+1; d – przebieg sygnału „hamuj” pociągu P+1, zaznaczono miejsca (tzw. punkty krytyczne), gdzie droga do punktu początku hamowania dla pociągu P+1 zbliżała się do wartości „0” [źródło: opracowanie własne].....	159
Rysunek 9-63. Fragment symulacji jazdy pociągów po analizowanym szlaku Psary – Góra Włodowska linii kolejowej nr 4, przeprowadzonej w oprogramowaniu komercyjnym [źródło: opracowanie własne]	160
Rysunek 9-64. Charakterystyka jazdy pociągu uzyskana w oprogramowaniu komercyjnym [źródło: opracowanie własne].....	161
Rysunek 9-65. Maksymalna liczba pociągów, które mogą być wyprawiane na szlak bez konieczności hamowania i rozpędzania w wyniku interakcji z poprzedzającym pociągiem, przy różnych konfiguracjach dodatkowego podziału odstępu [źródło: opracowanie własne].....	162
Rysunek 9-66. Względna zmiana maksymalnej liczby pociągów, które mogą być wyprawiane na szlak bez konieczności hamowania i rozpędzania w wyniku interakcji z poprzedzającym pociągiem, przy różnych konfiguracjach dodatkowego podziału odstępu [źródło: opracowanie własne].....	163
Rysunek 9-67. Chwila czasowa wyprawienia pociągu P+1 od chwili czasowej wyprawienia pociągu P, przy różnych konfiguracjach dodatkowego podziału odstępu [źródło: opracowanie własne]	163

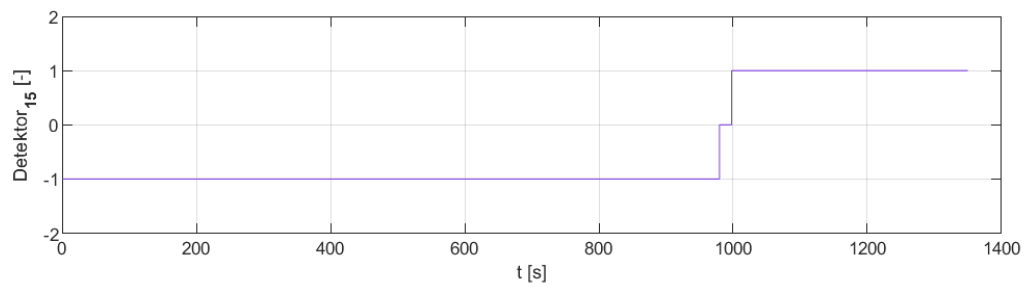
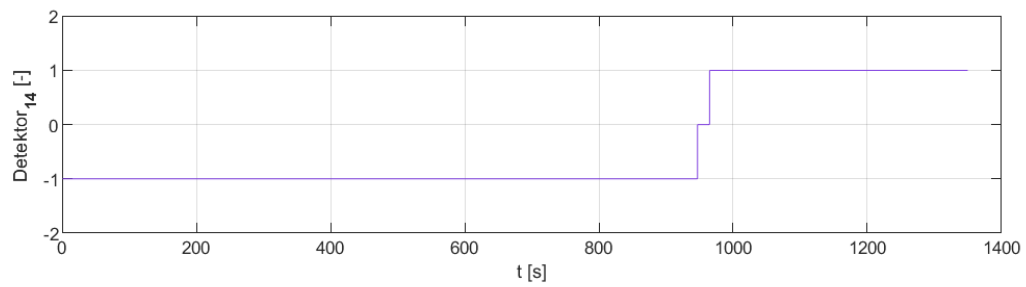
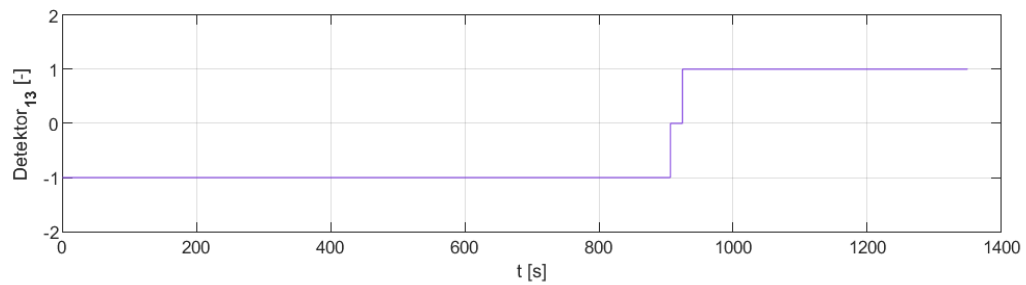
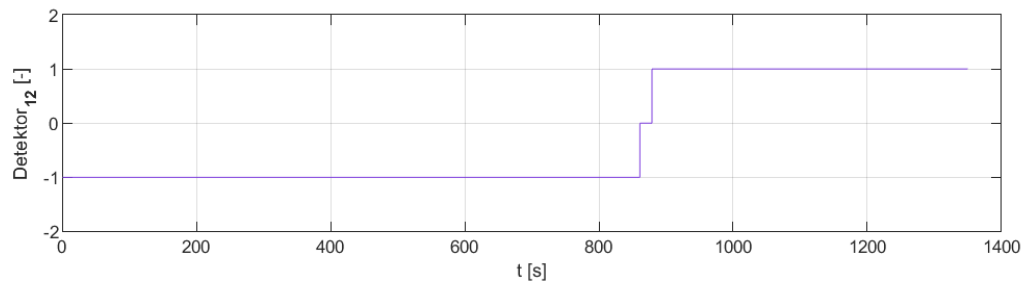
ZAŁĄCZNIKI

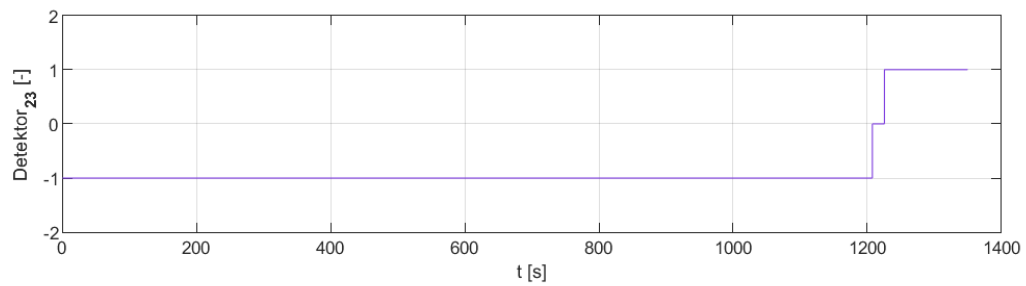
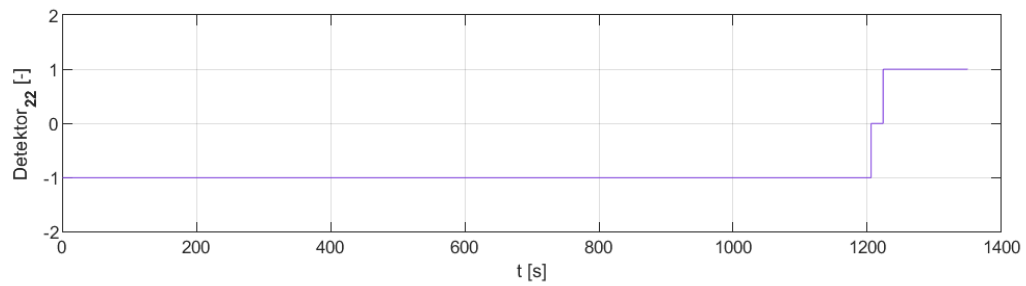
Załącznik nr 7.1.1

Sygnaly generowane przez detektory kół w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (założenie nr IX i XVI, rozdział 5)



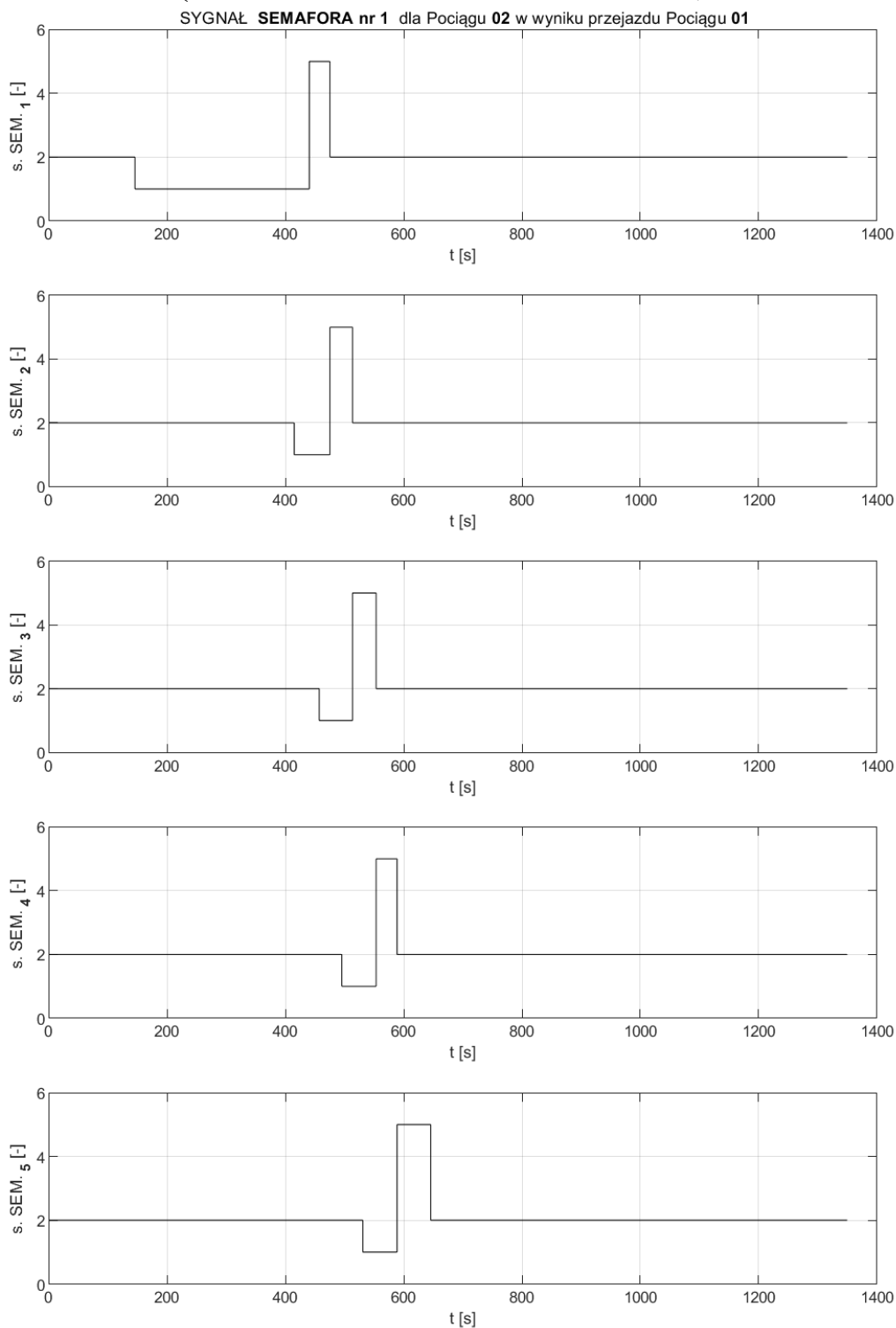


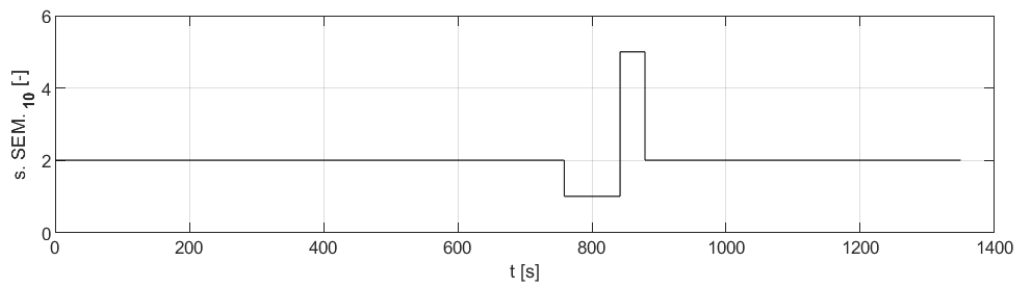
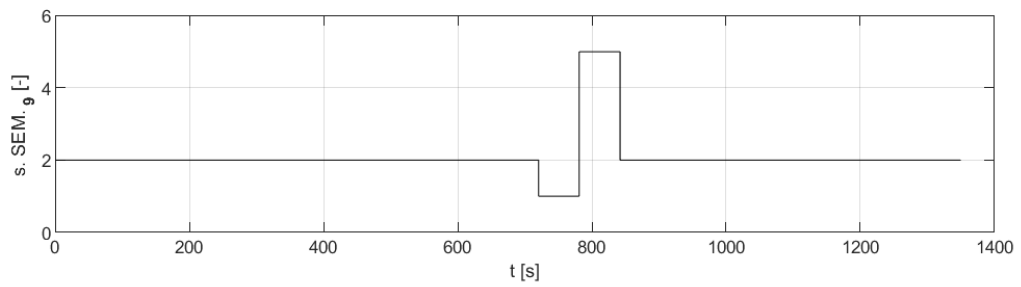
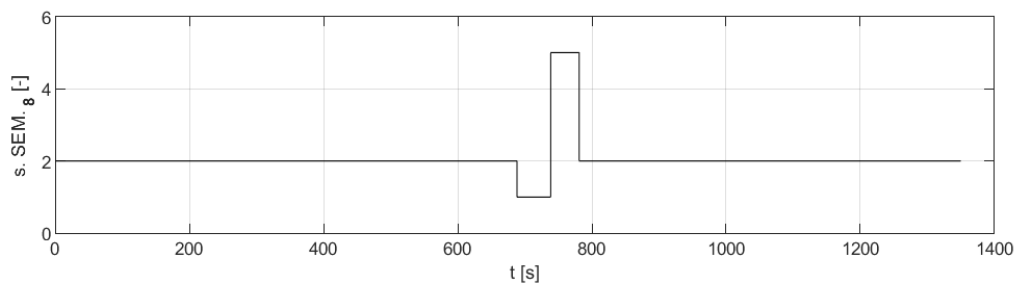
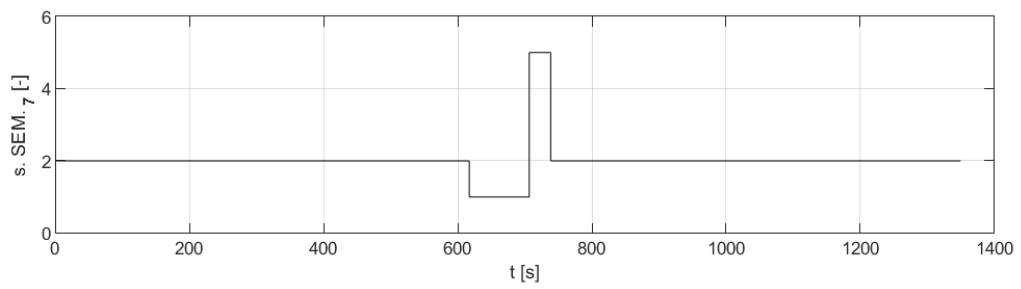
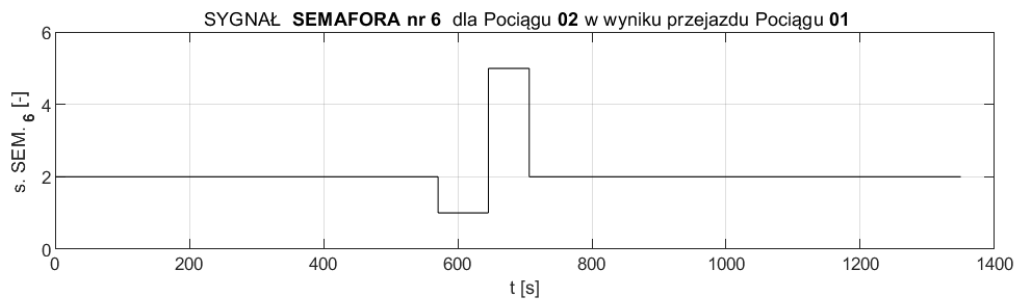


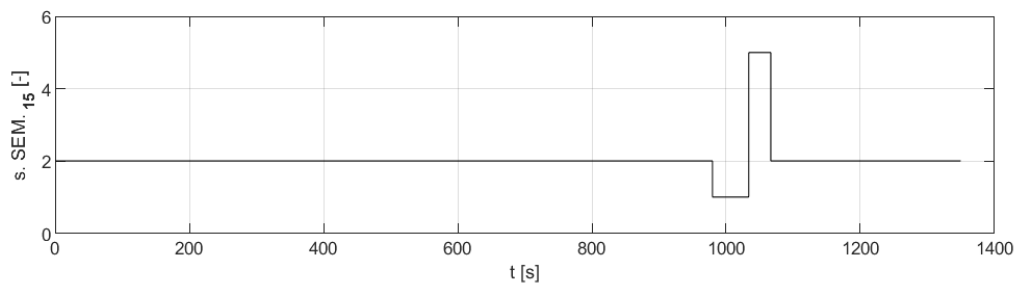
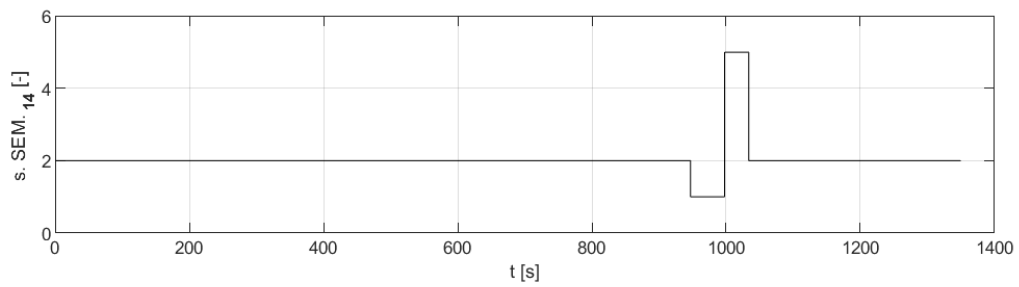
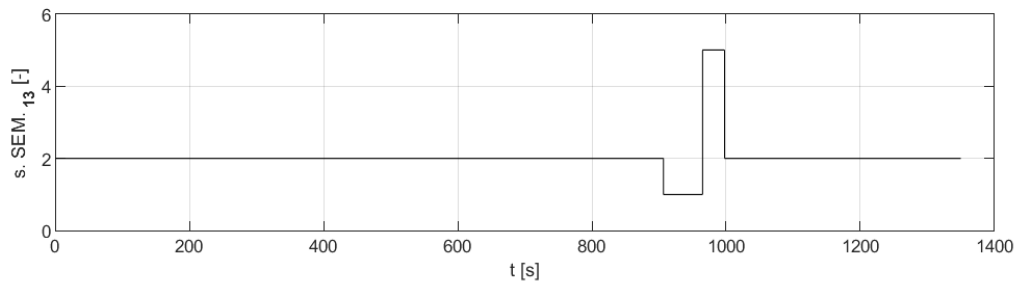
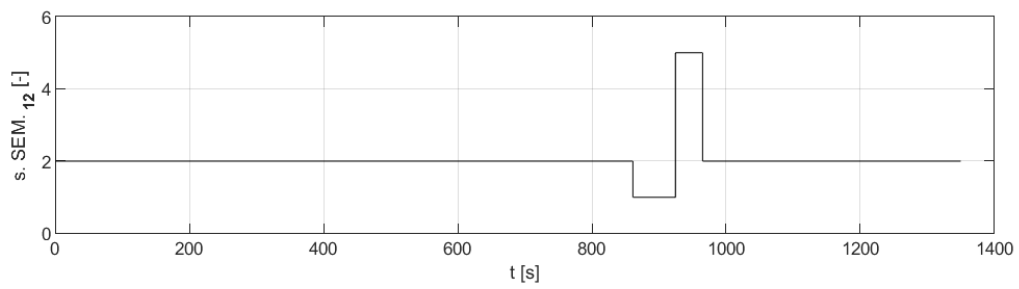
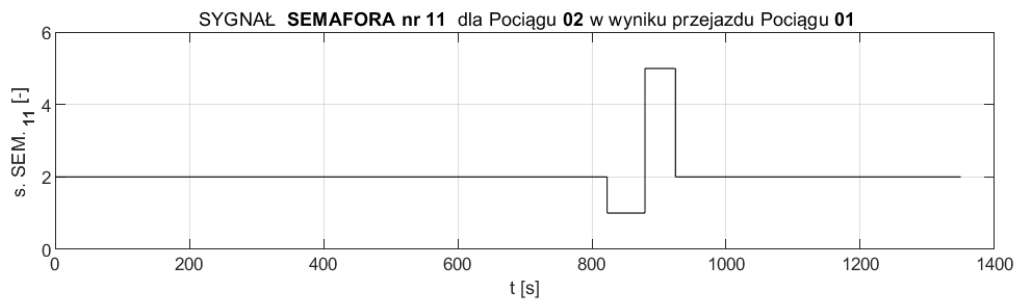


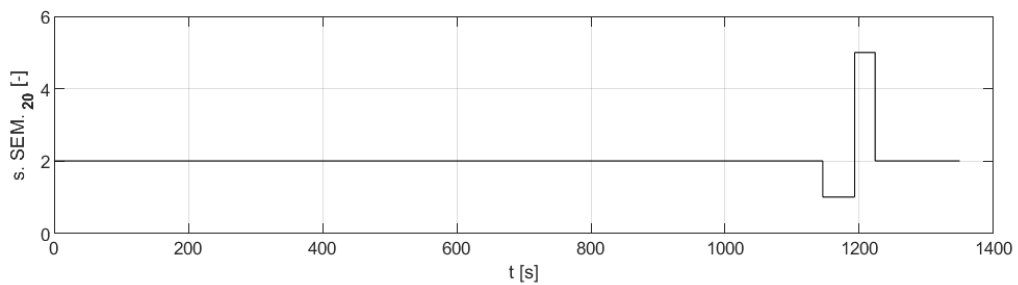
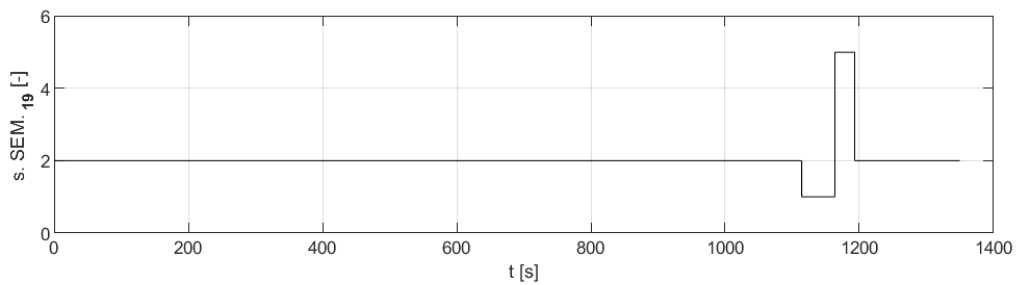
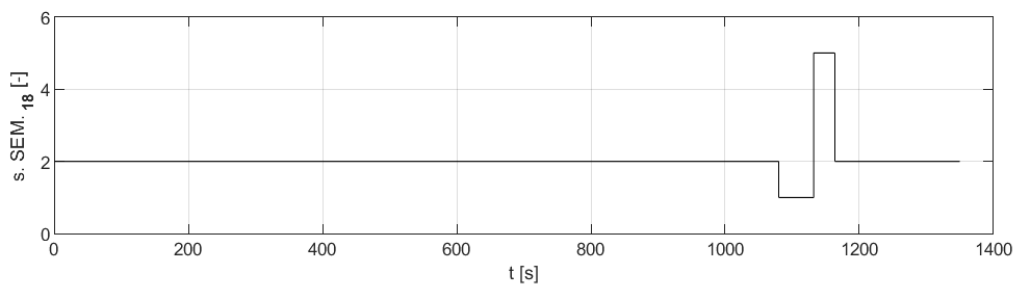
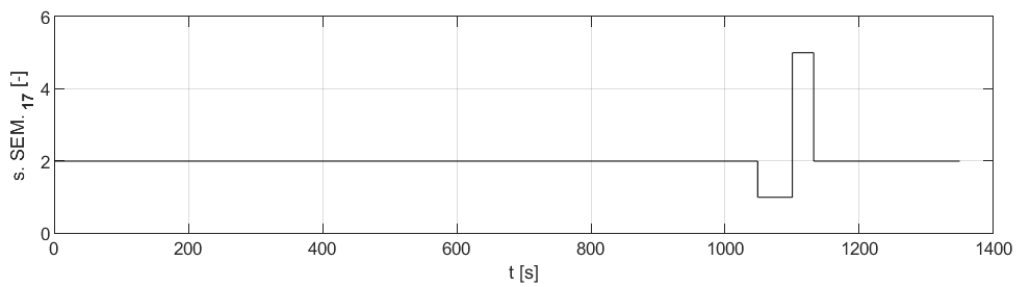
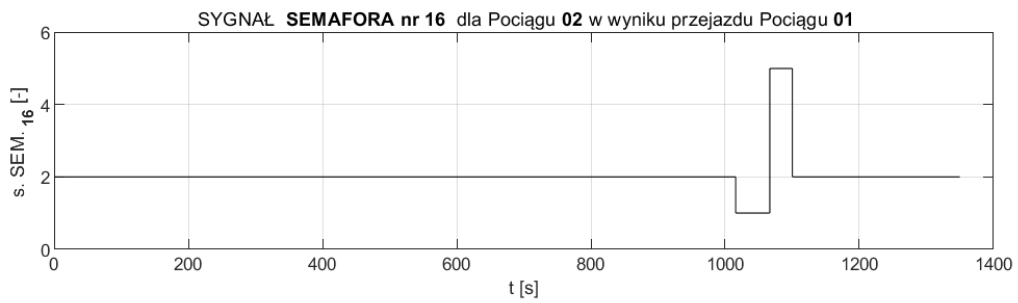
Załącznik nr 7.1.2

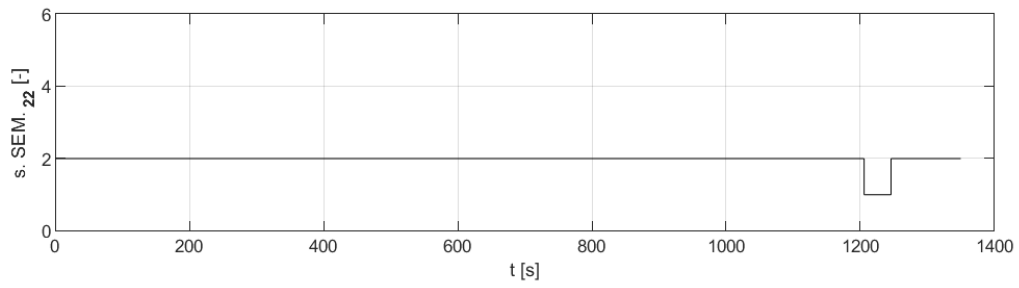
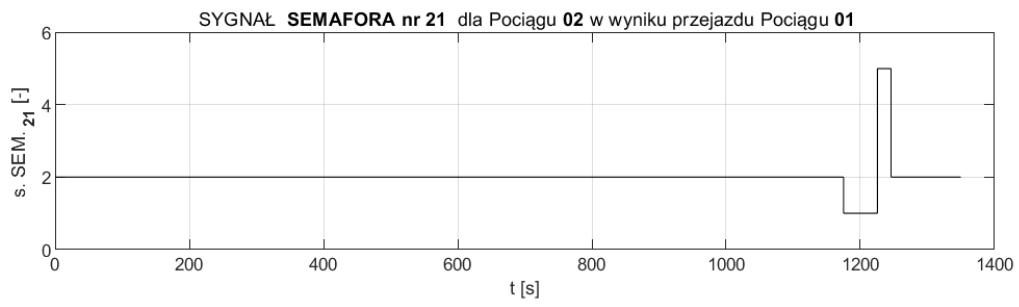
Sygnaly („S1”, „S2”, „S5”) generowane przez semafor
w wyniku przejazdu pociągu nr 1 dla pociągu nr 2
(założenie nr XIII , rozdział 5)





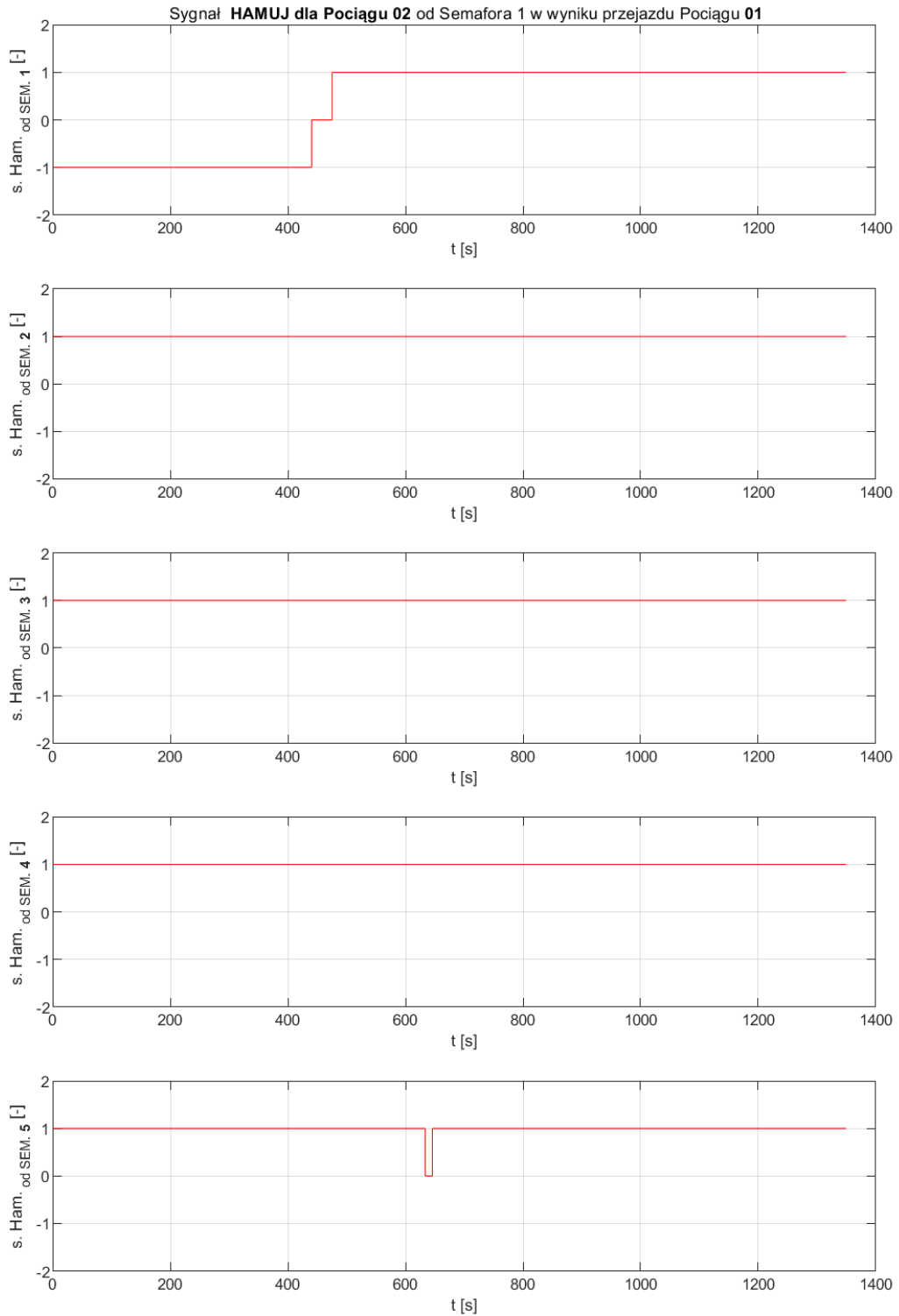


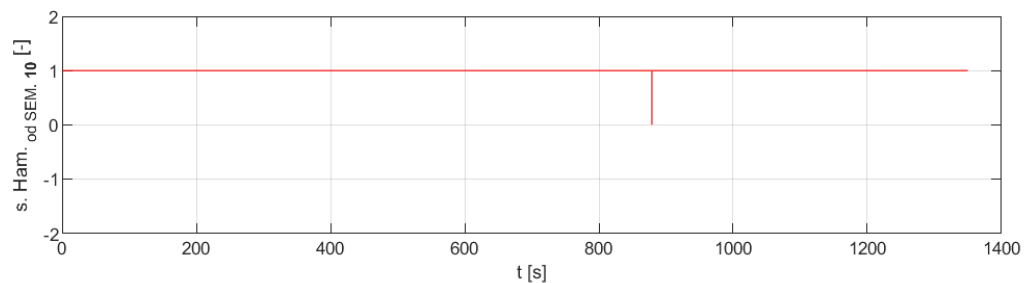
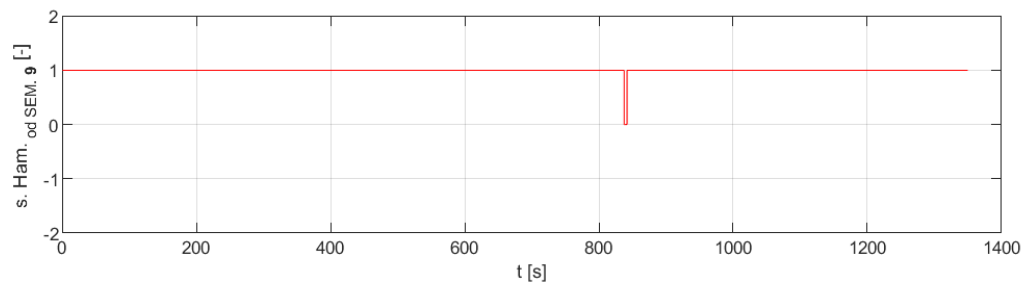
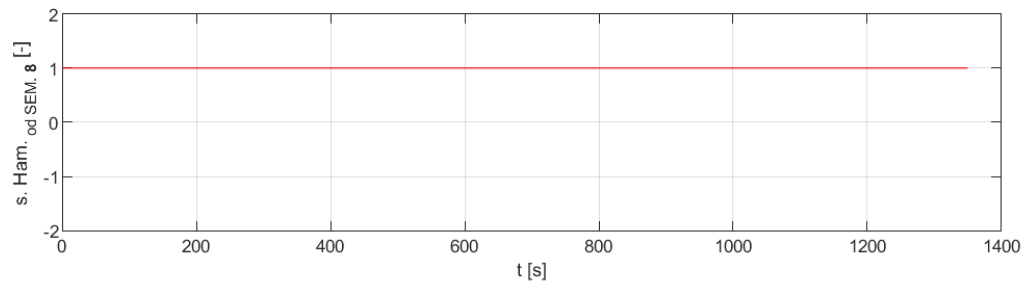
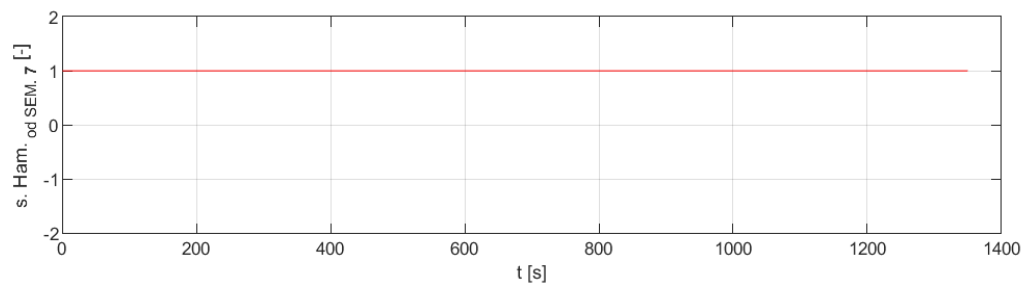
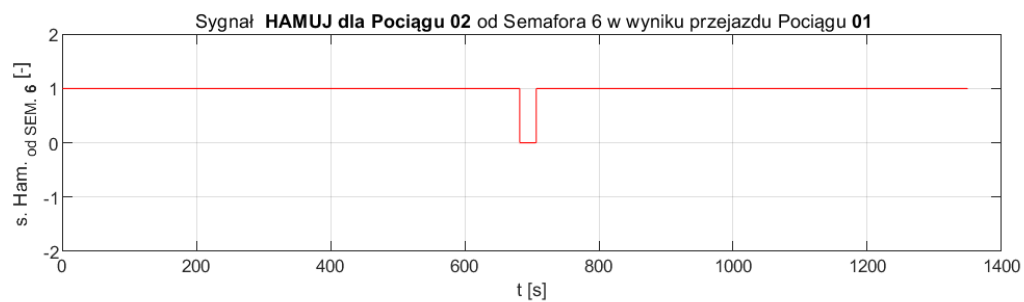


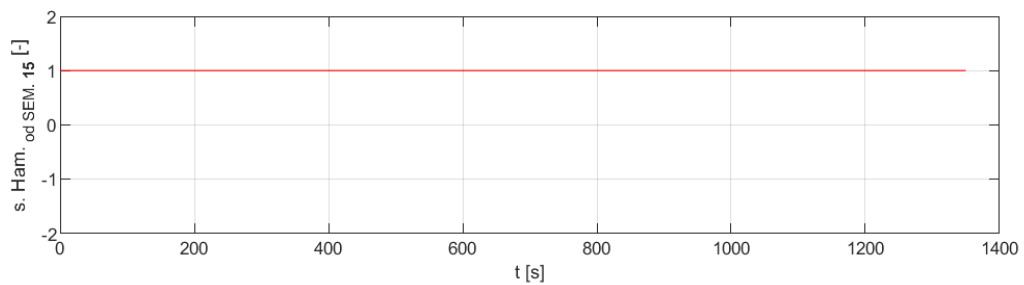
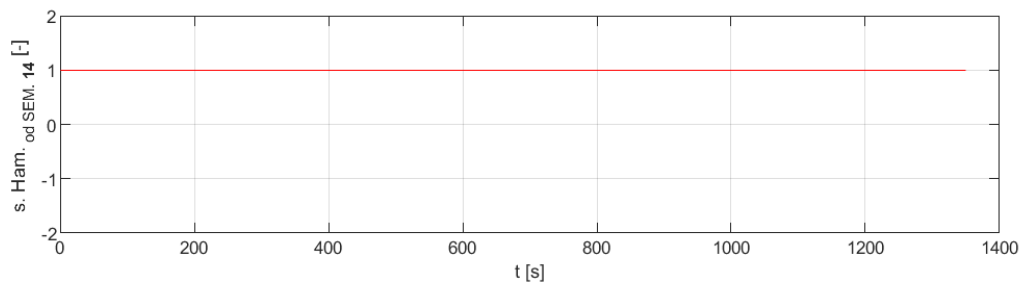
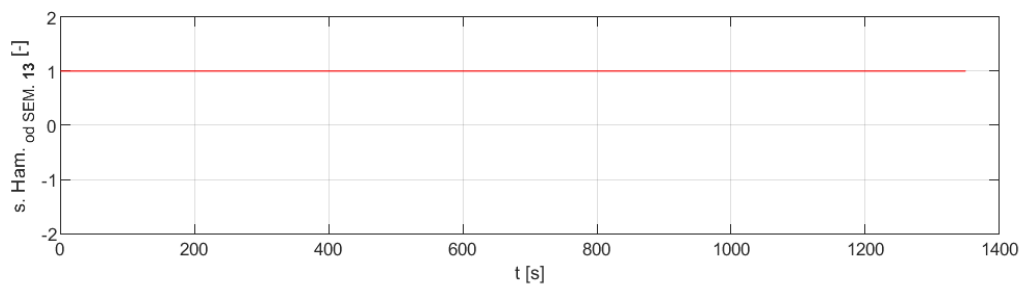
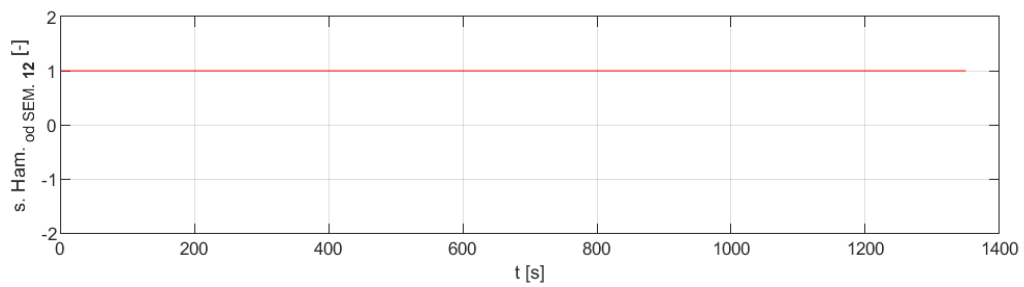
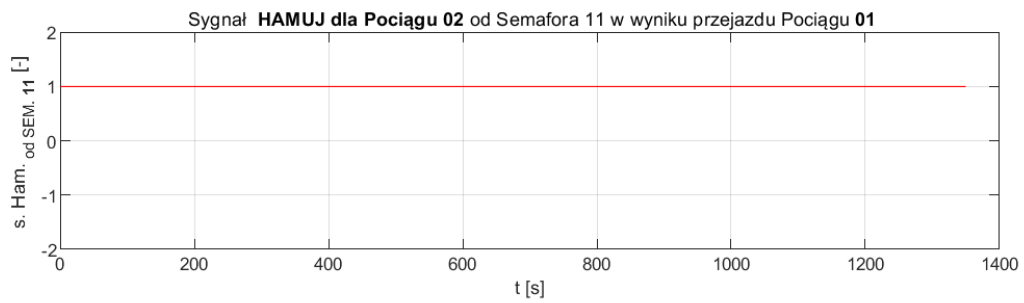


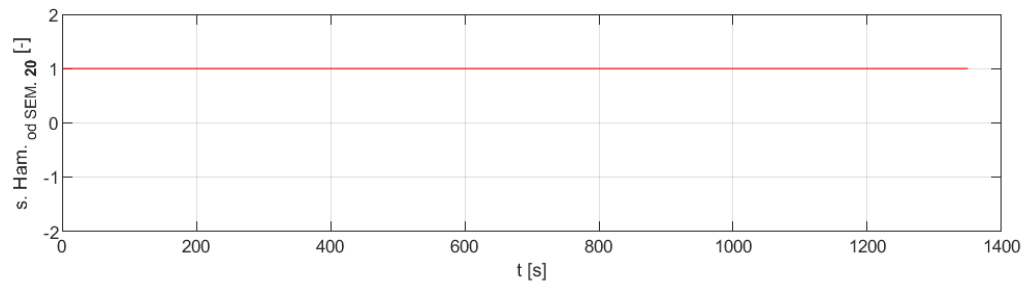
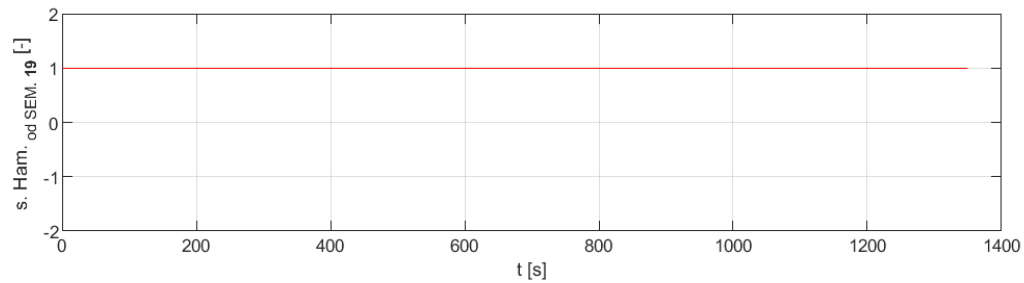
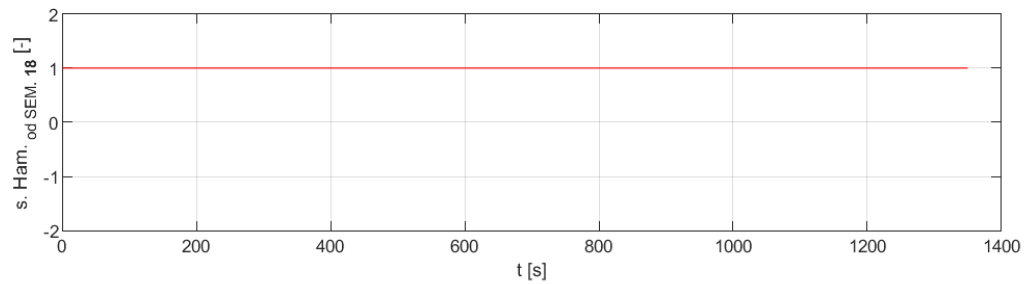
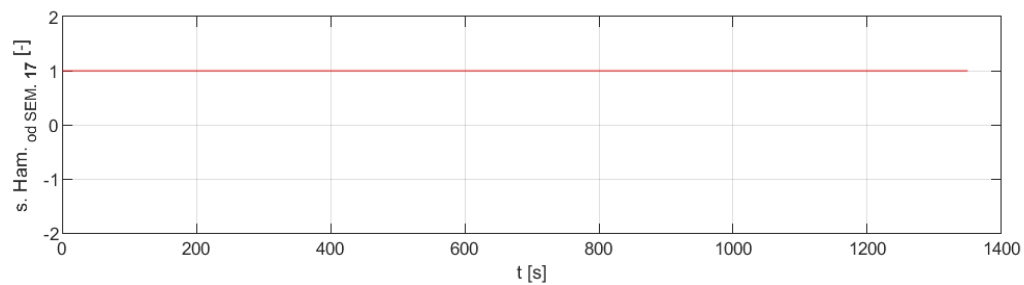
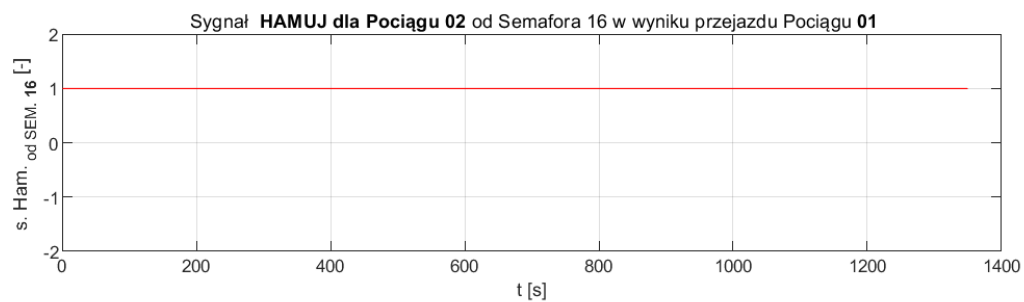
Załącznik nr 7.1.3

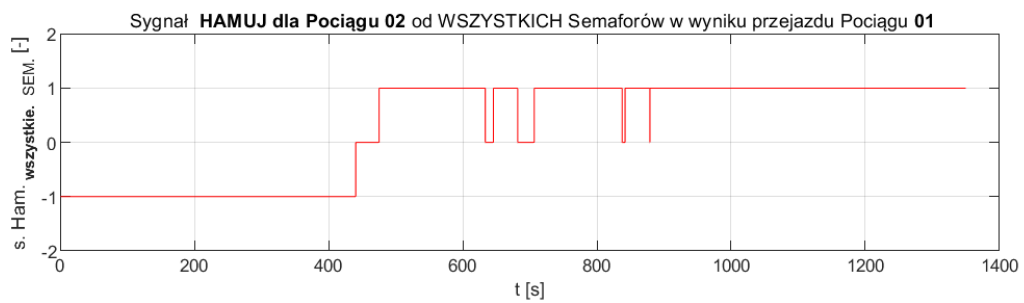
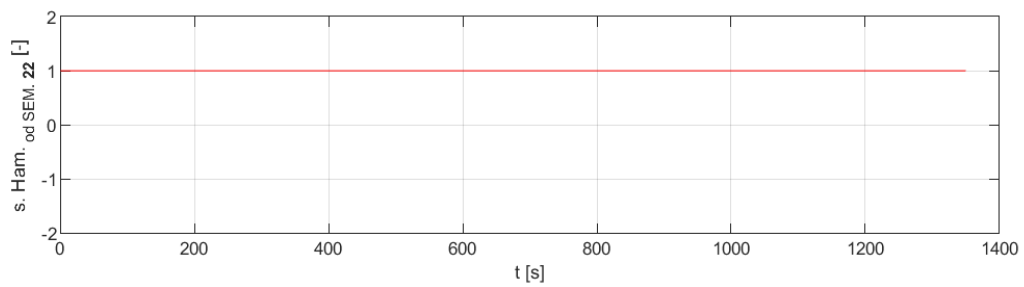
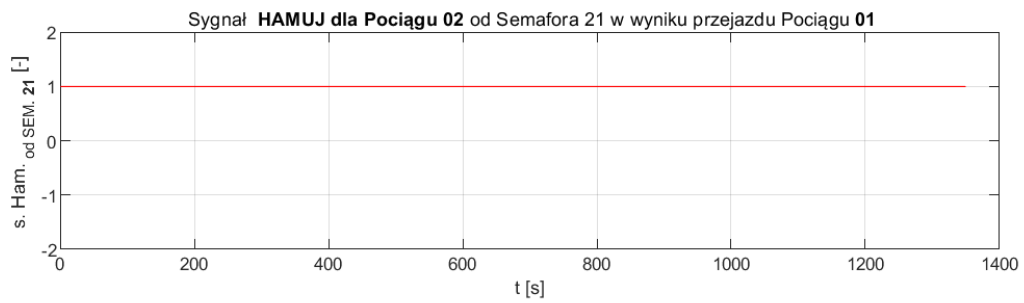
Sygnały „hamuj” dla pociągu nr 2 generowane w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (założenie nr XVIII, rozdział 5)







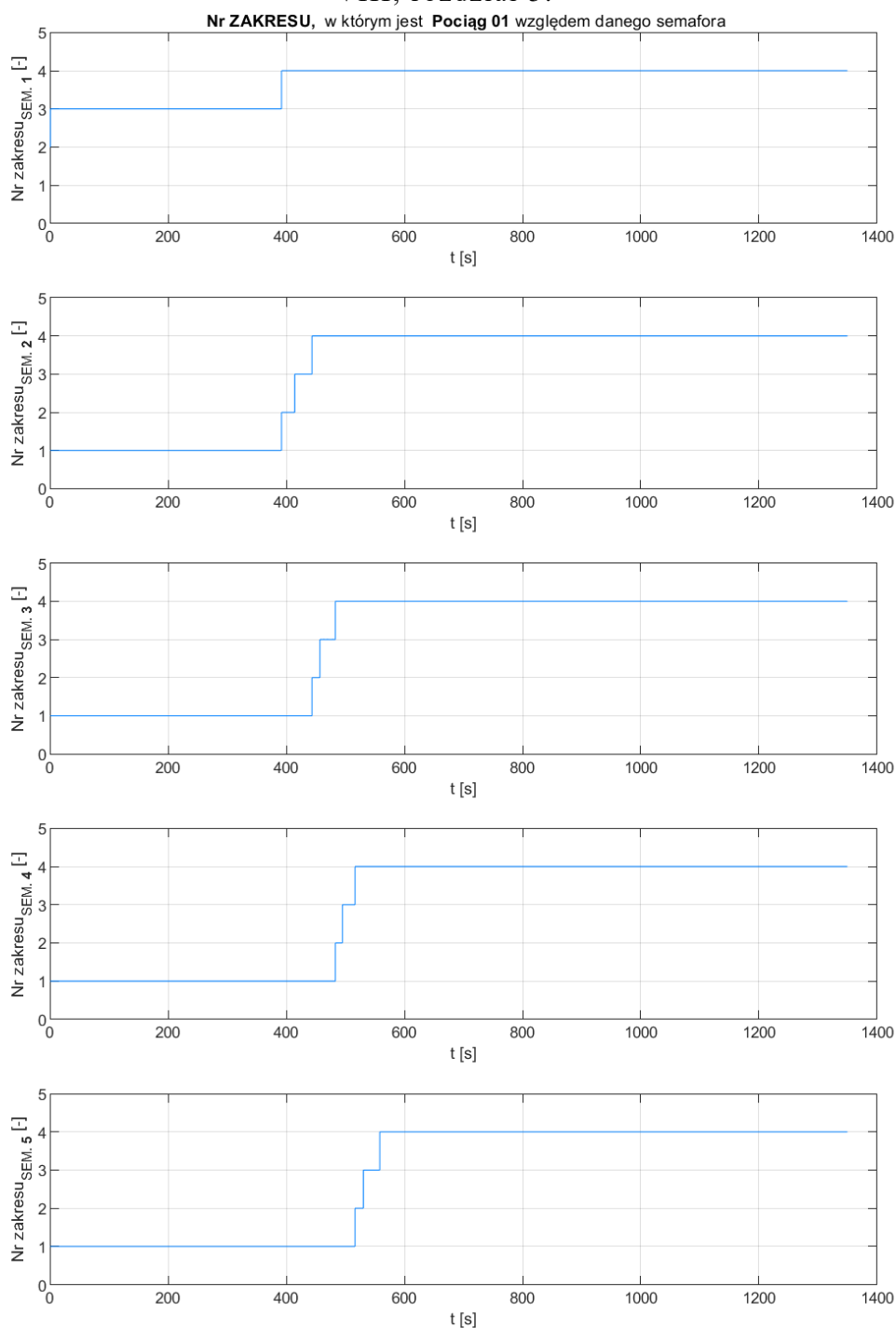


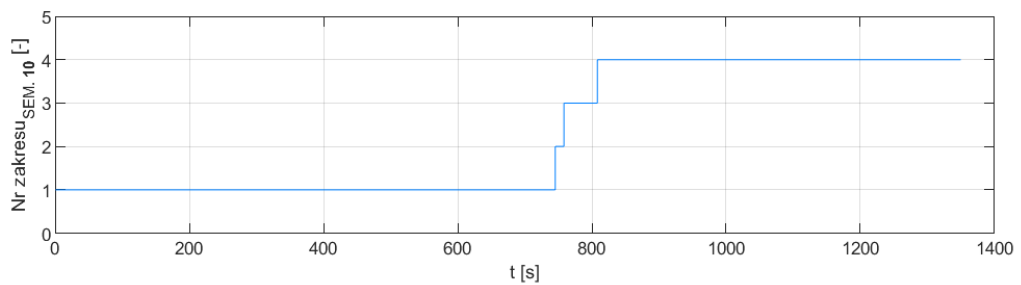
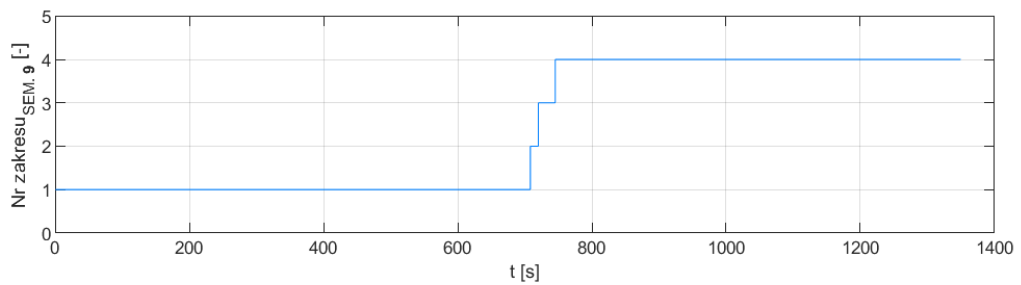
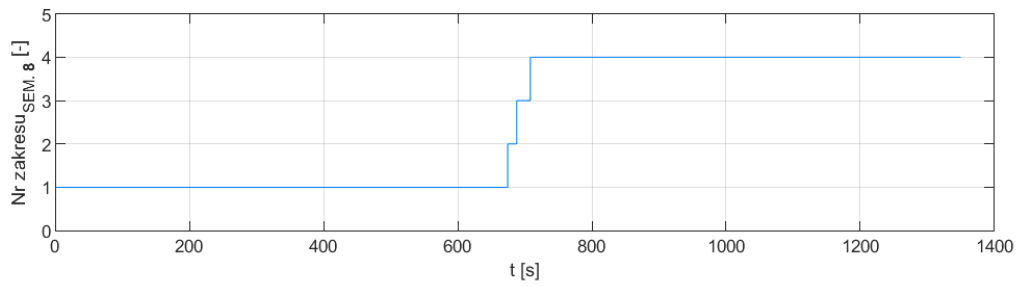
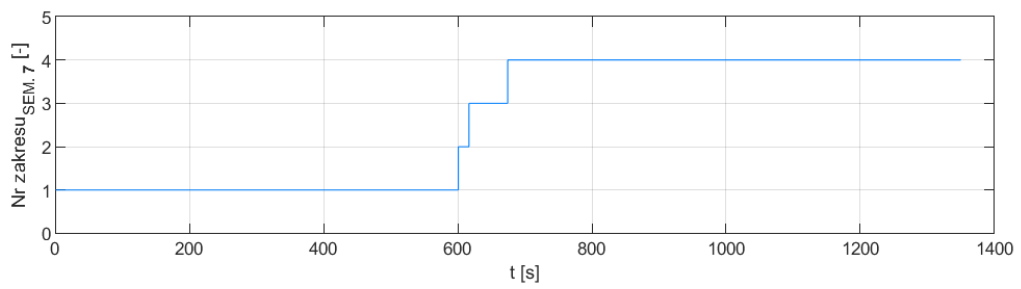


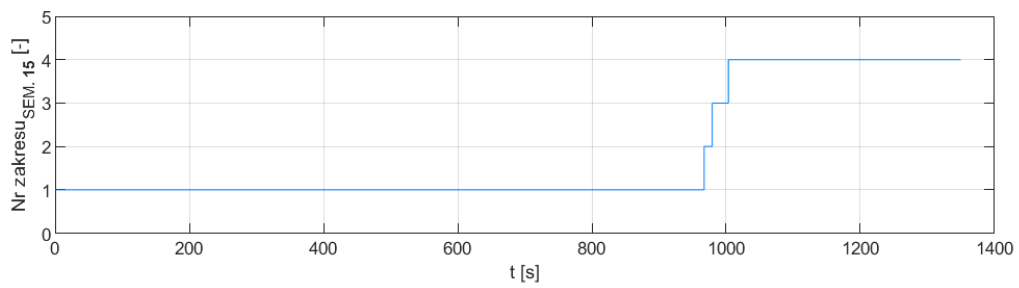
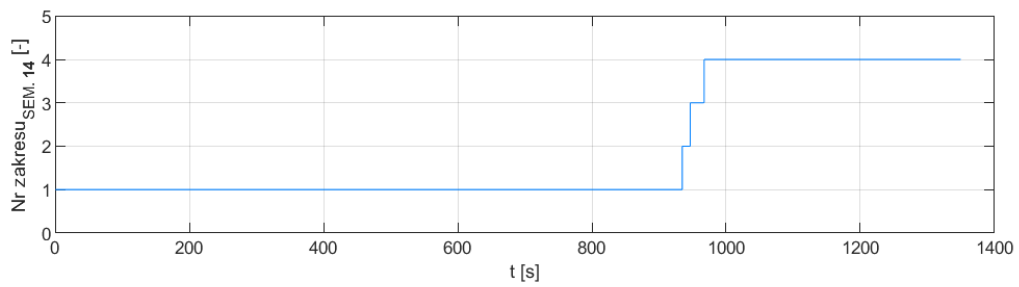
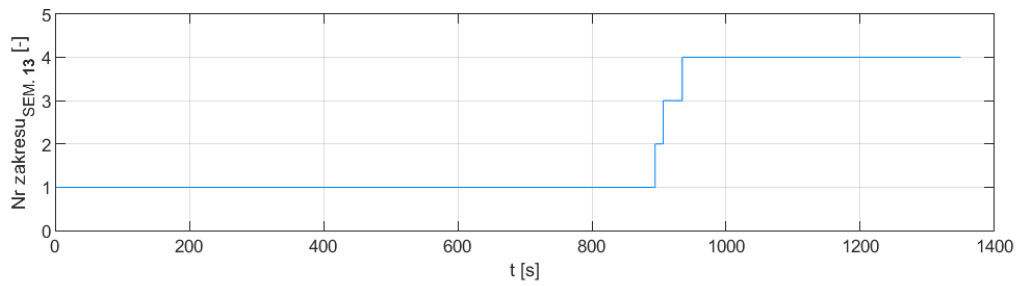
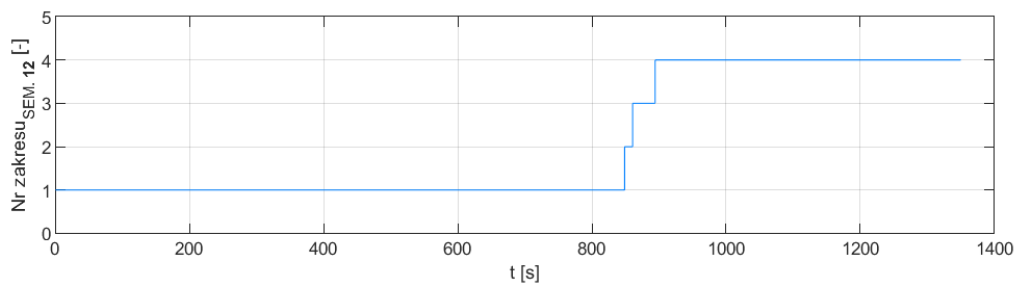
Załącznik nr 7.1.4

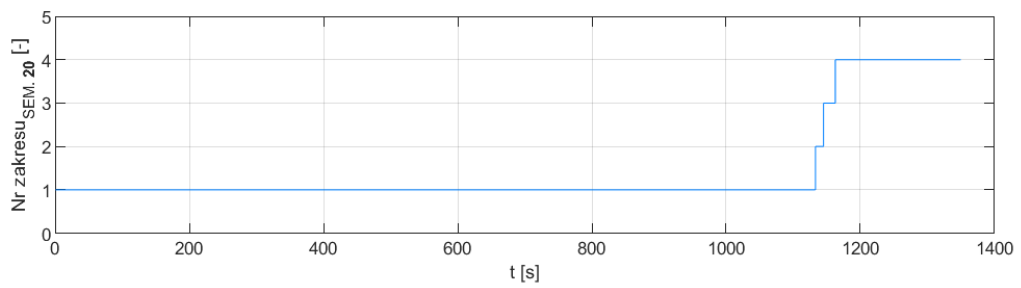
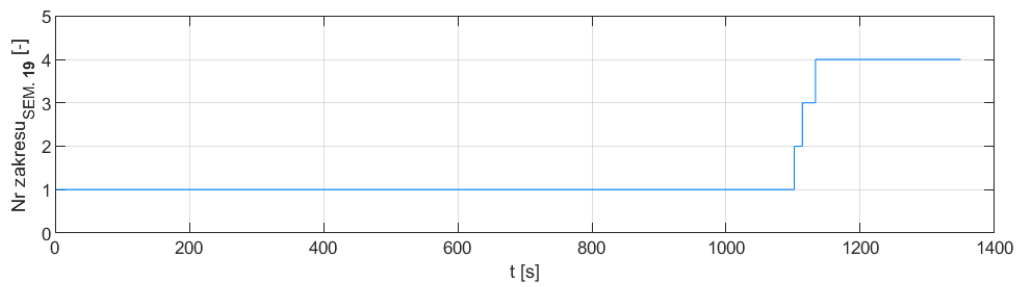
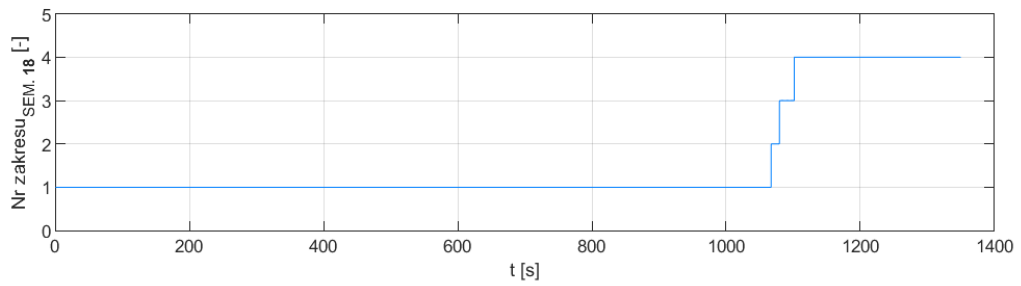
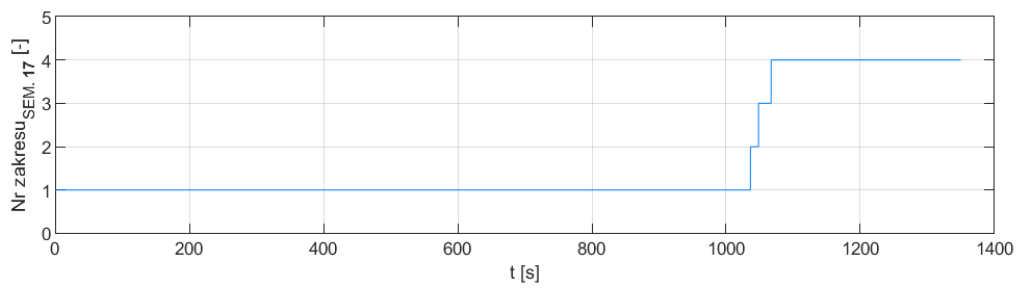
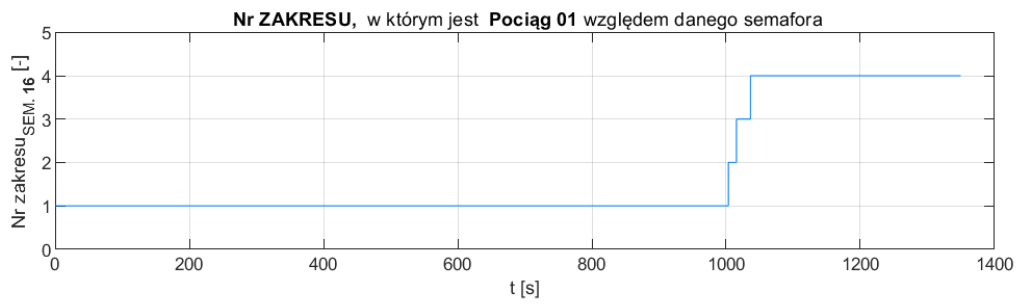
Zakresy, w których znajduje się pociąg nr 1 względem odpowiednich semaforów (założenie nr XVII, rozdział 5)

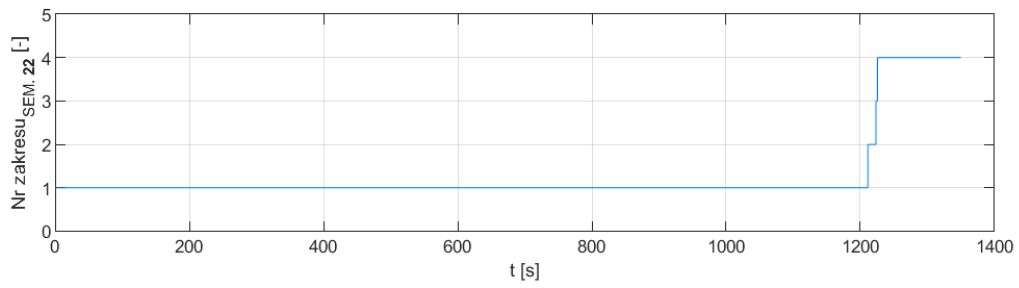
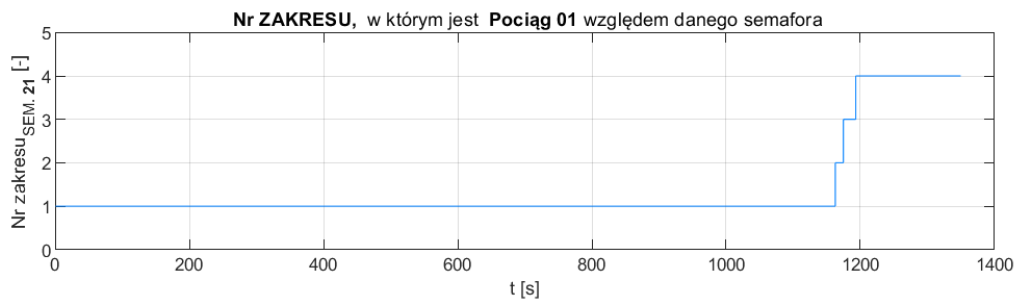
Jest to również istotny parametr, gdyż zgodnie z założeniem X może istnieć w symulacji **niezerowa** droga wyprzedzenia (lub nawet opóźnienia) rozpoczęcia hamowania [m] względem danego semafora oraz droga rzeczywistej widoczności danego semafora nie musi być równa przepisowej (np. w wyniku mgły) – założenie VIII, rozdział 5.







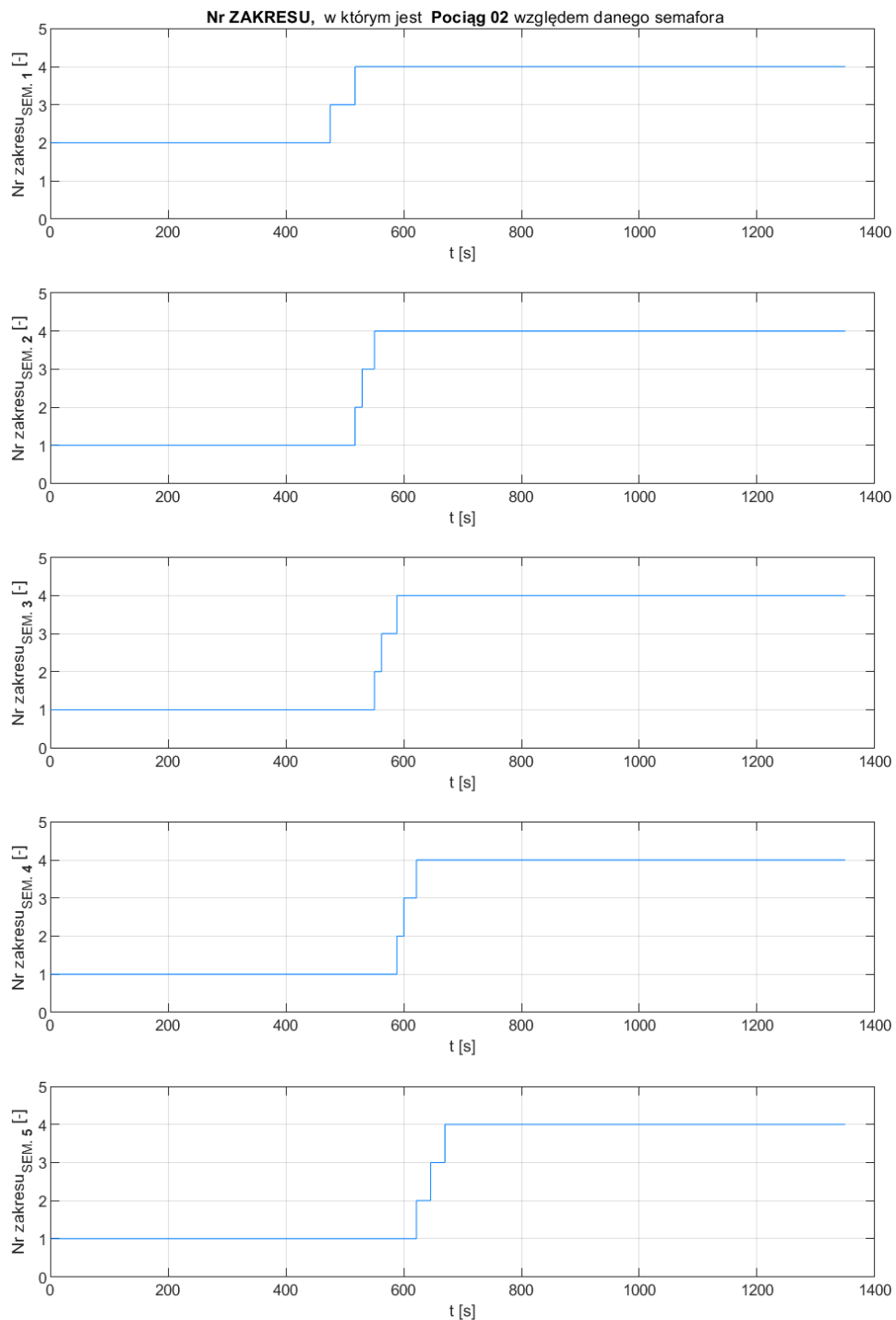


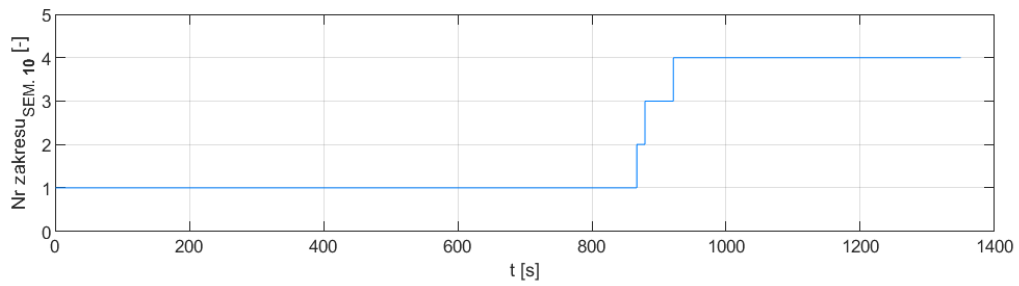
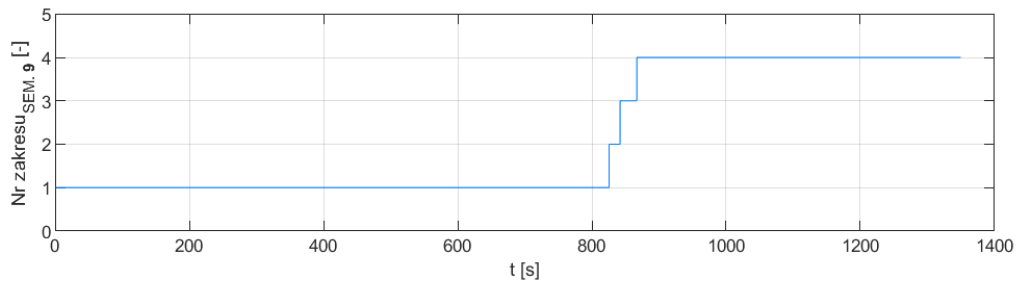
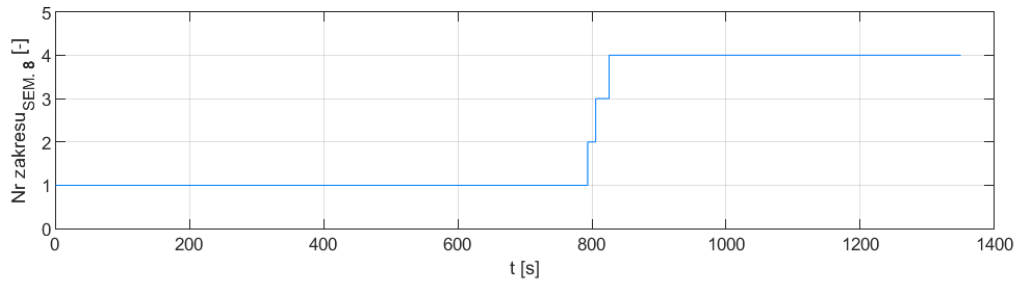
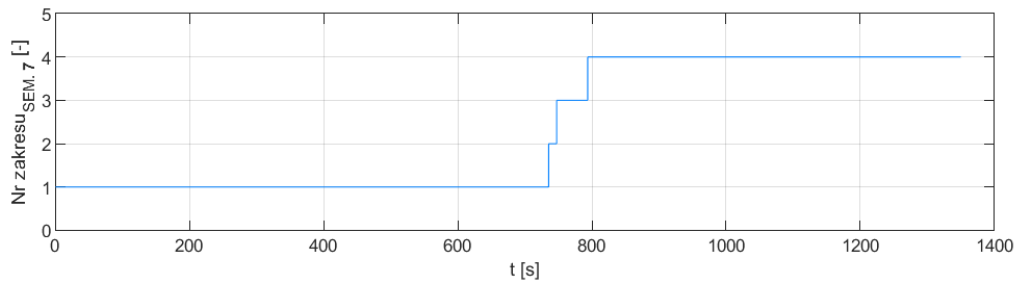
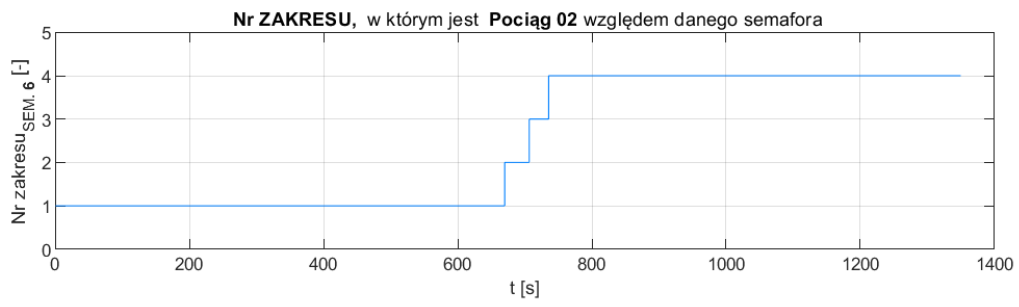


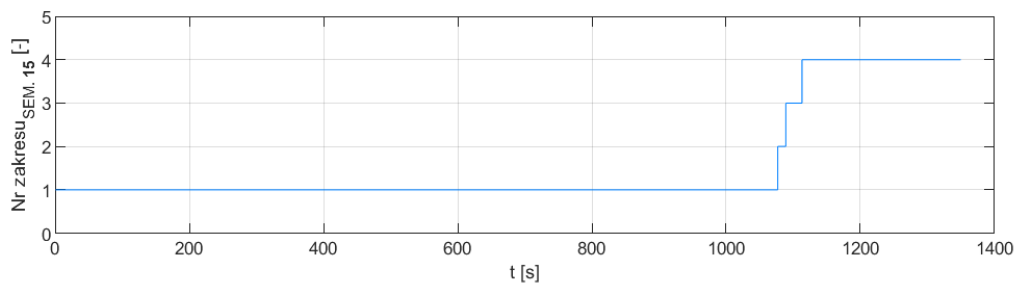
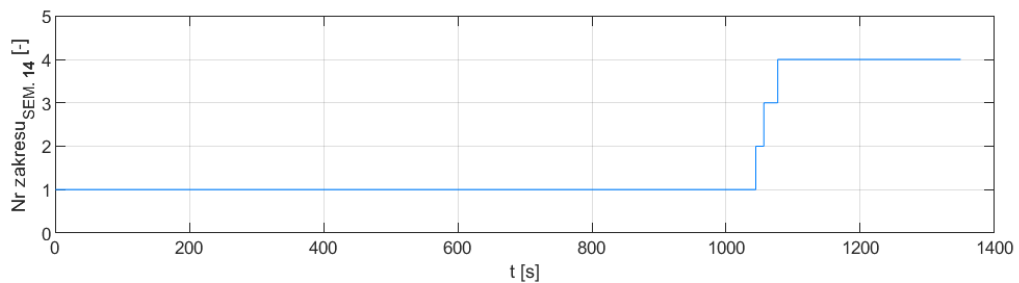
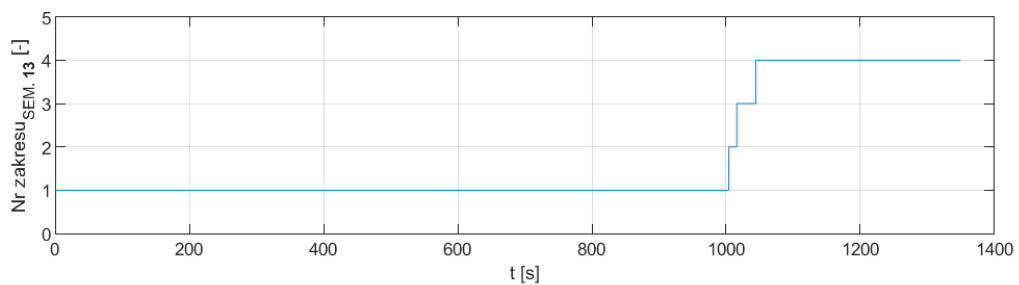
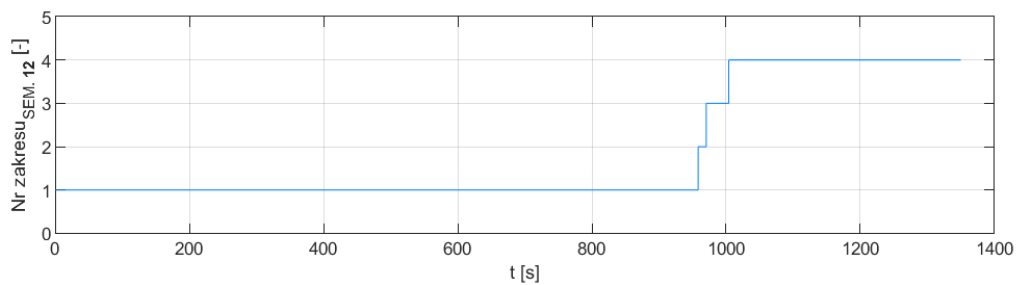
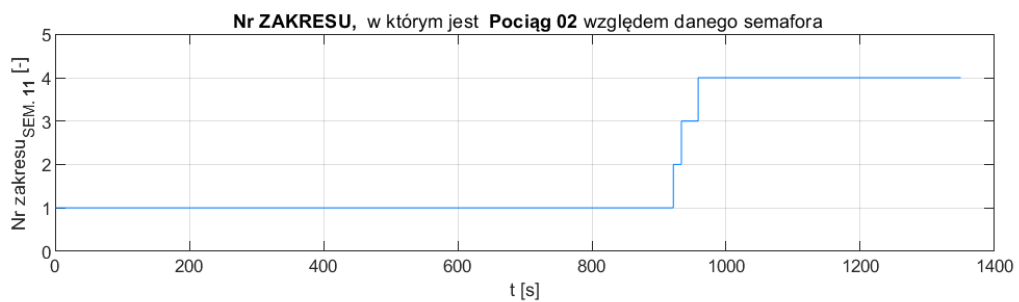
Załącznik nr 7.1.5

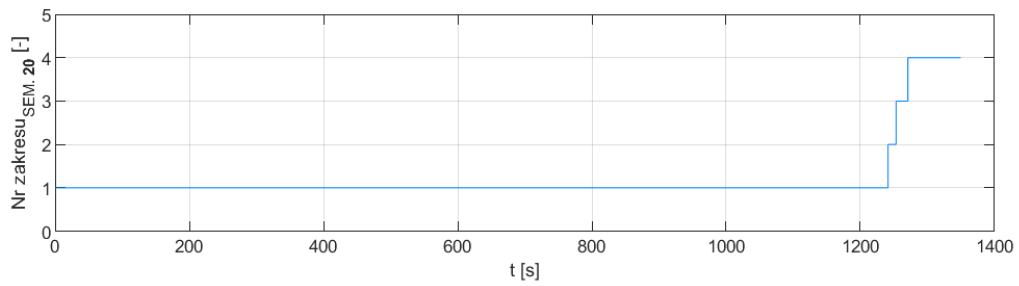
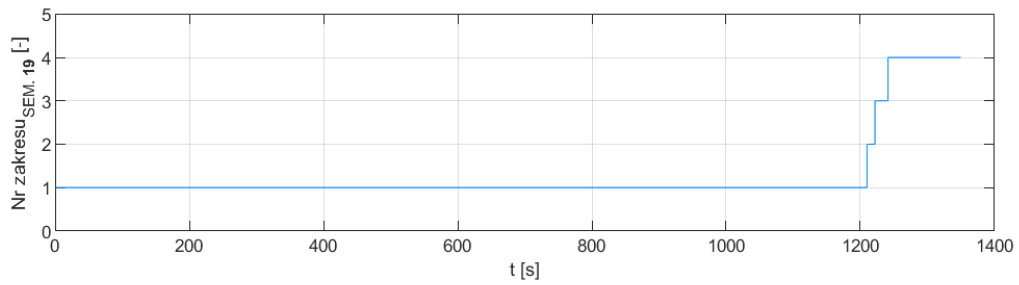
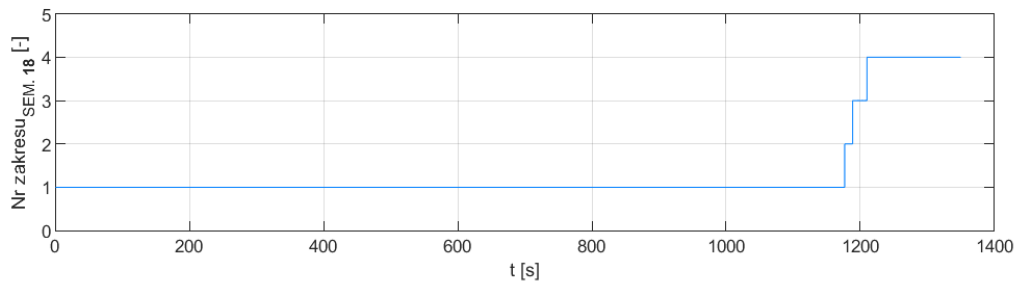
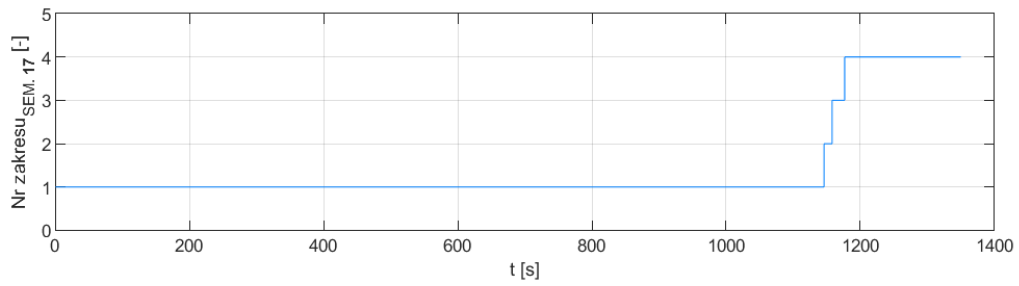
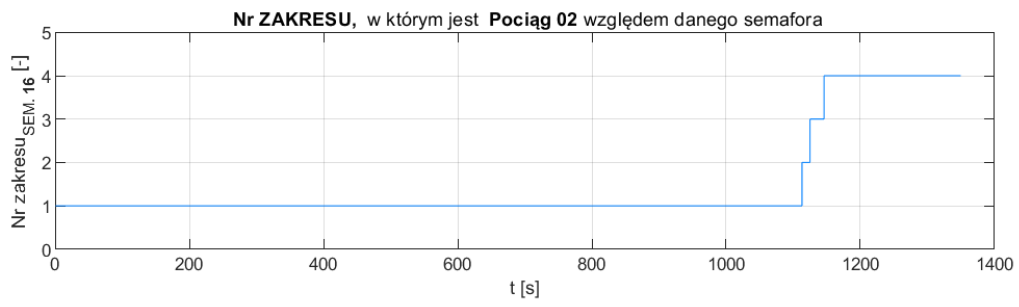
Zakresy, w których znajduje się pociąg nr 2 względem odpowiednich semaforów (założenie nr XVII, rozdział 5)

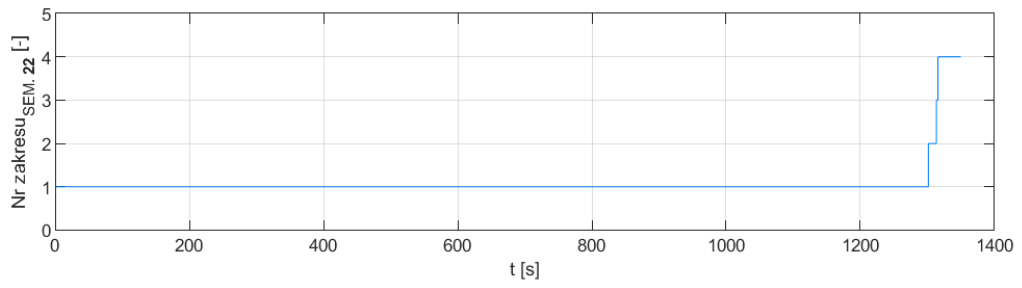
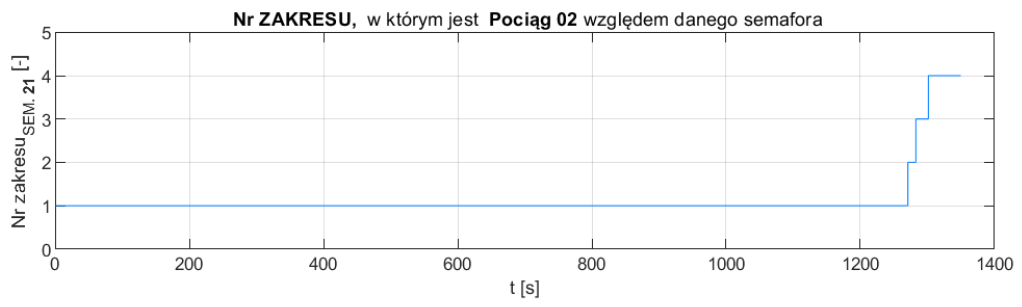
Jest to również istotny parametr, gdyż zgodnie z założeniem X może istnieć w symulacji **niezerowa** droga wyprzedzenia (lub nawet opóźnienia) rozpoczęcia hamowania [m] względem danego semafora oraz droga rzeczywistej widoczności danego semafora nie musi być równa przepisowej (np. w wyniku mgły) – założenie VIII, rozdział 5.





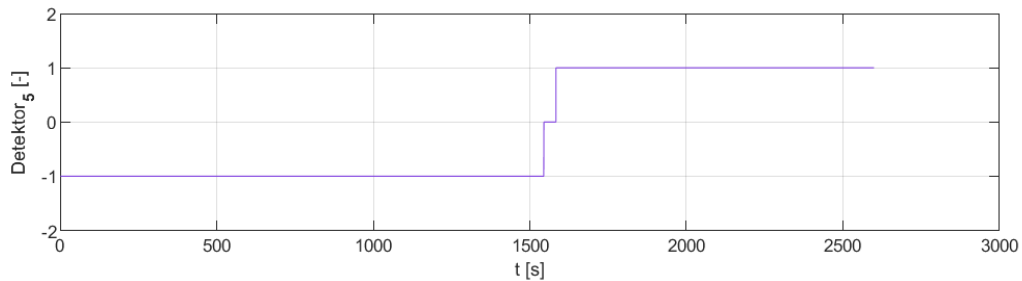
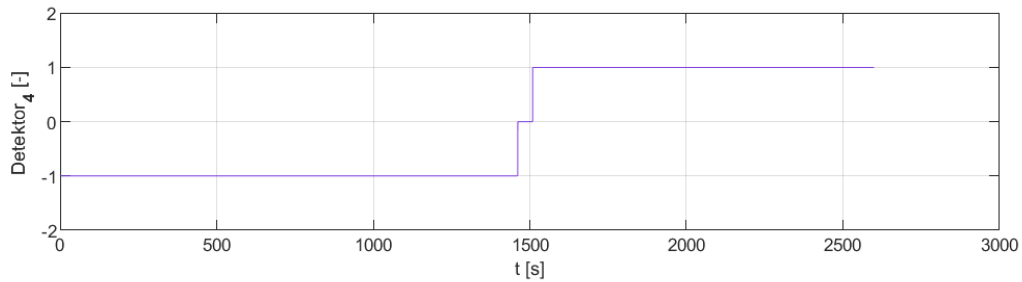
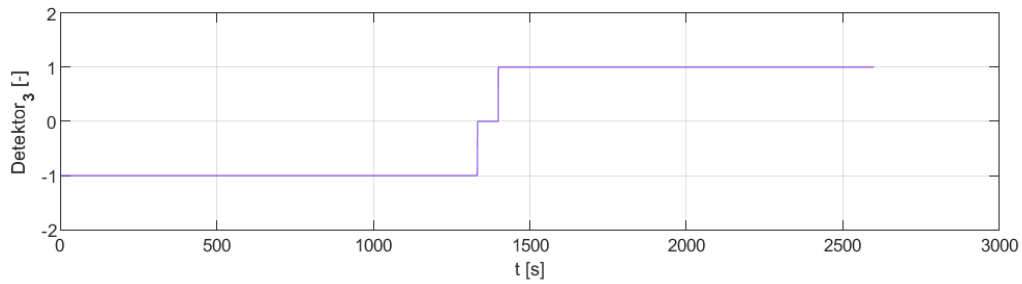
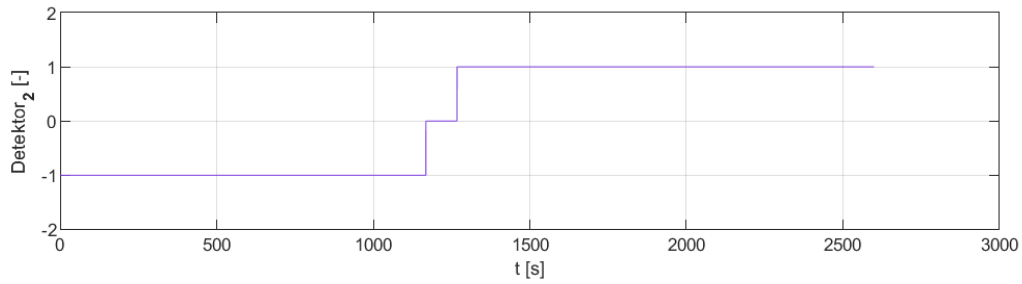
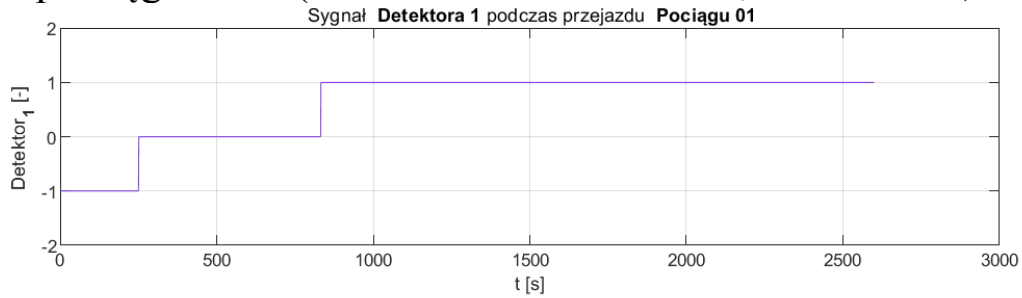




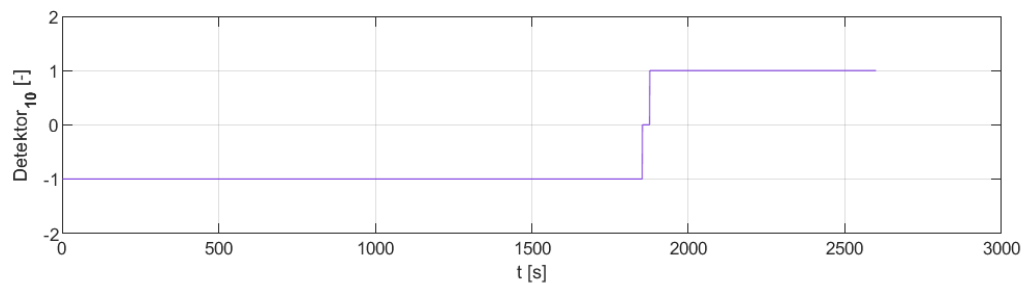
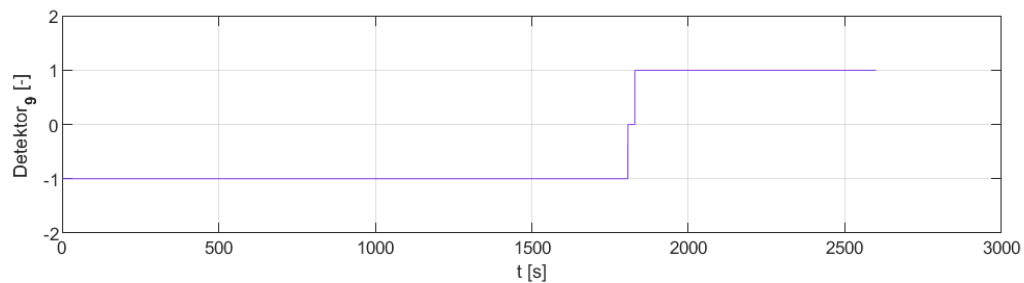
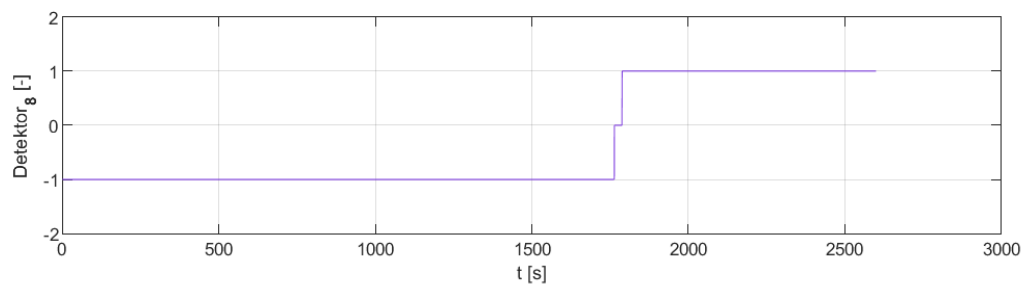
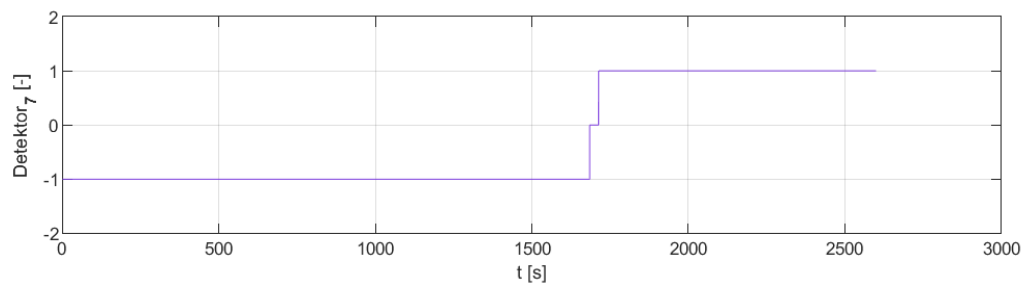


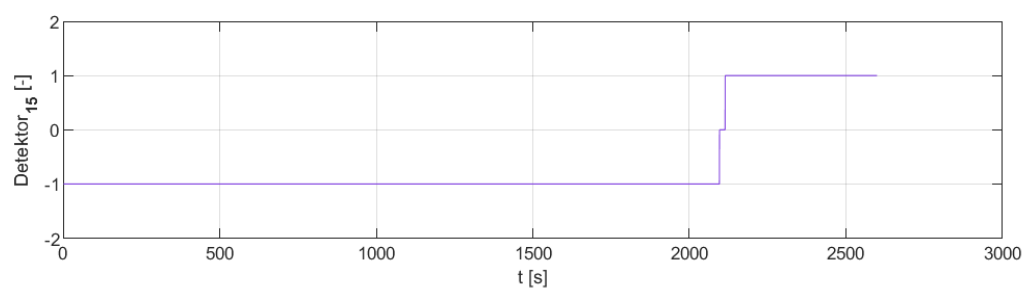
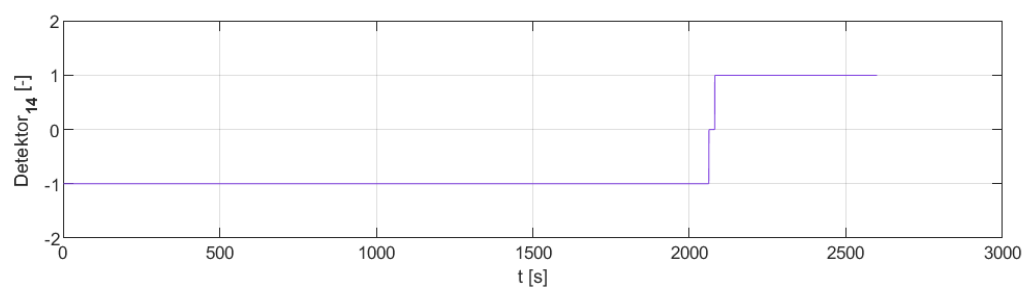
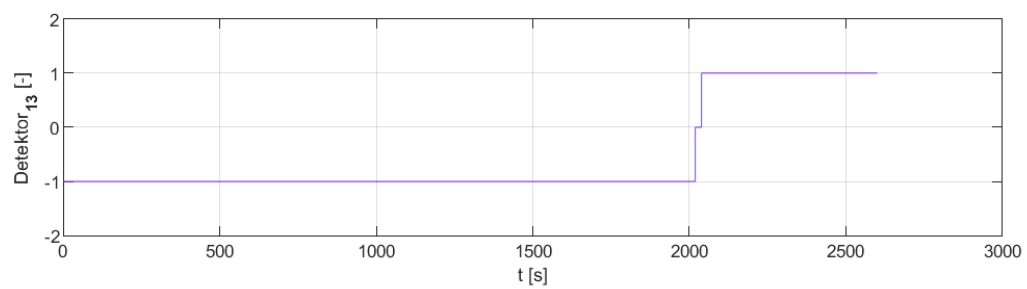
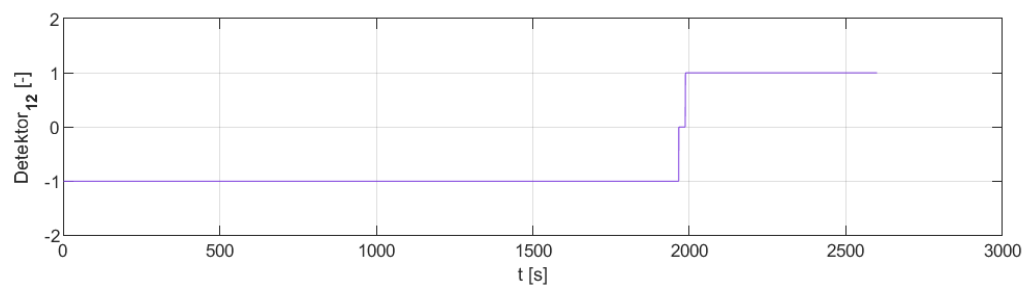
Załącznik nr 7.3.1

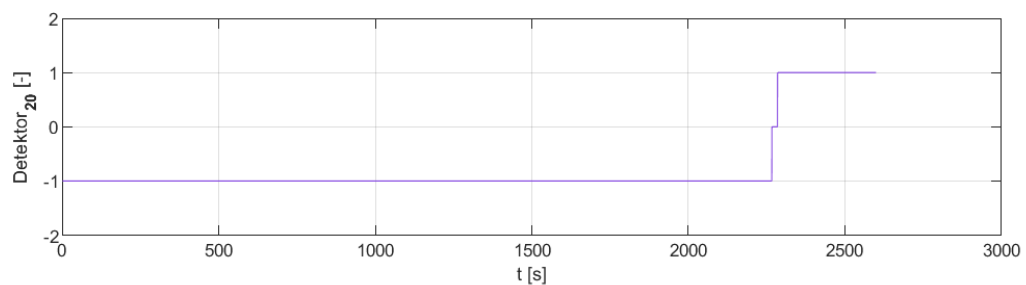
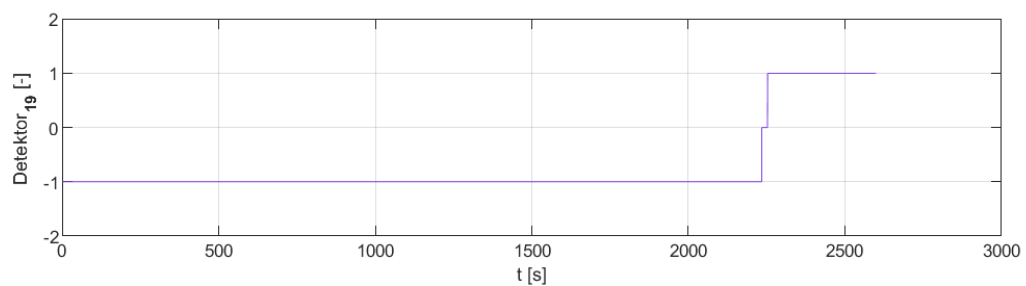
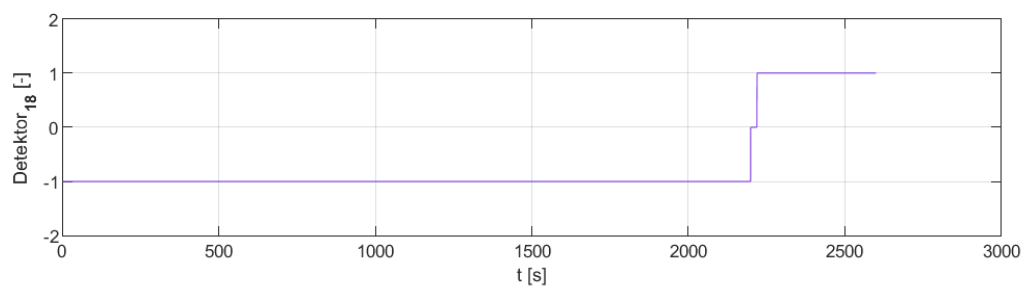
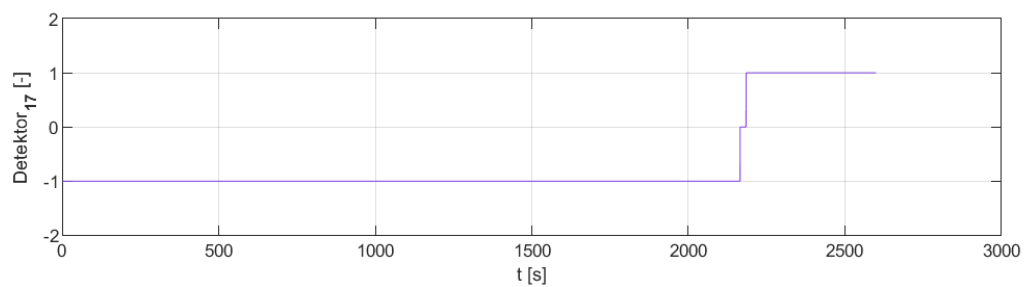
Sygnały generowane przez detektory kół w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (założenie nr IX i XVI, rozdział 5)

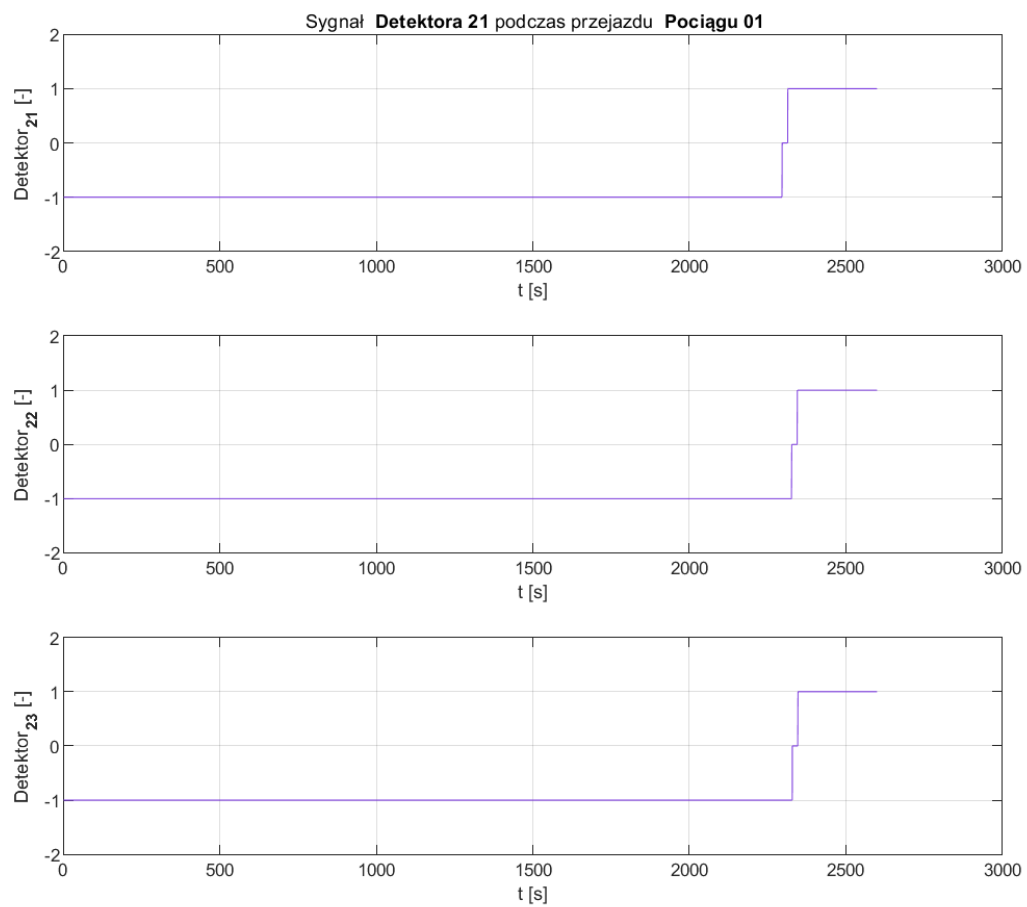


Sygnal Detektora 6 podczas przejazdu Pociągu 01



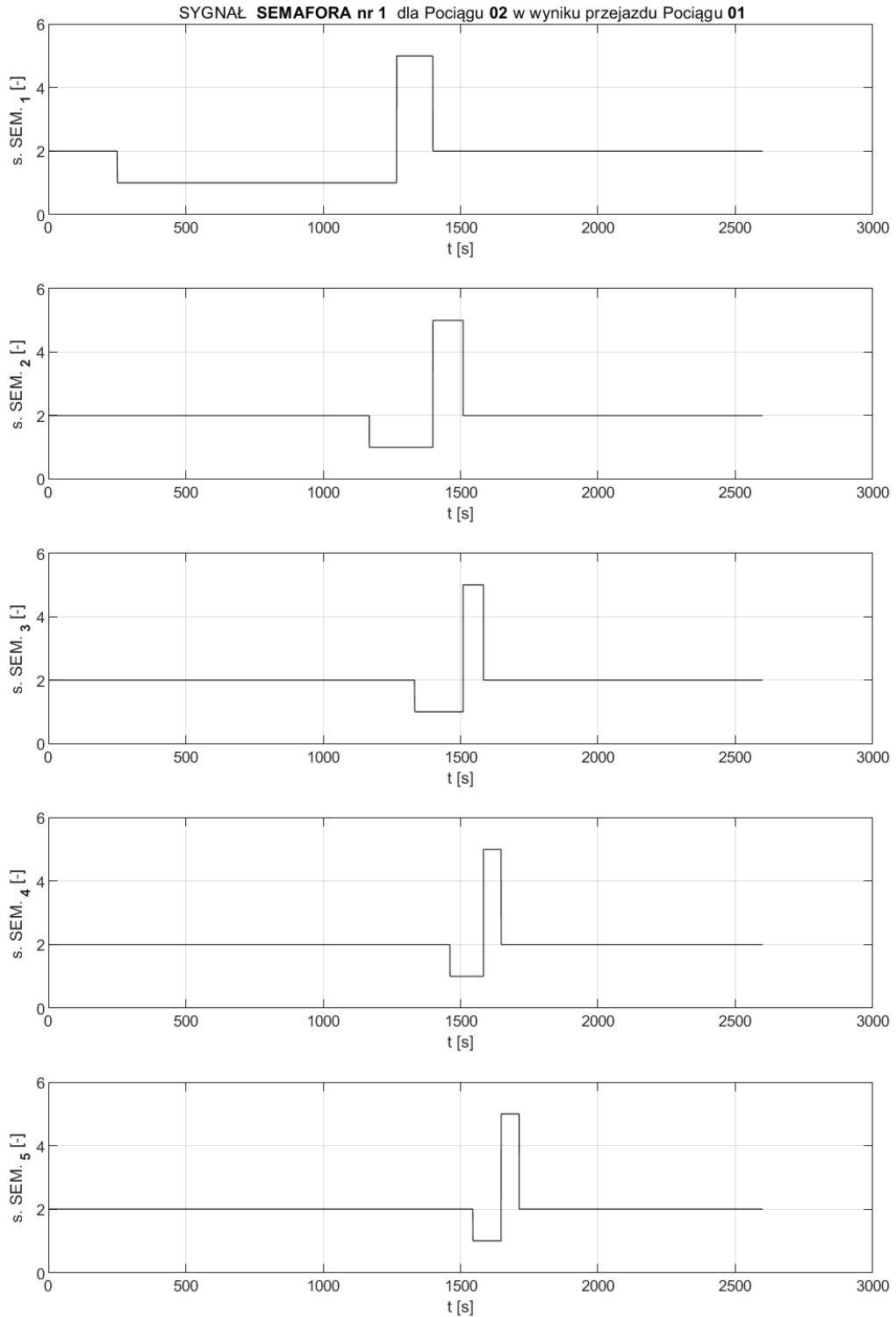


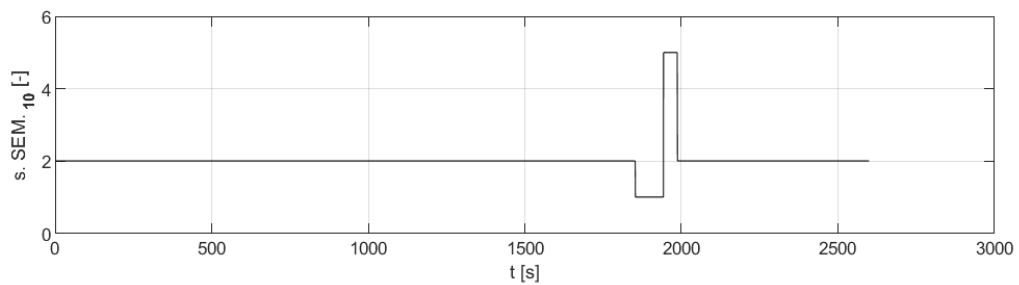
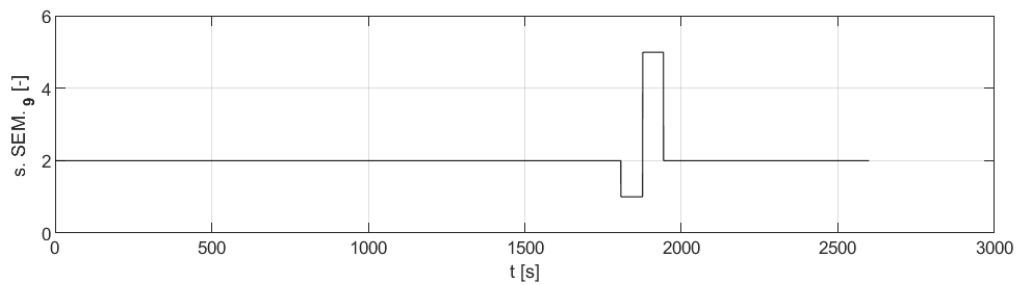
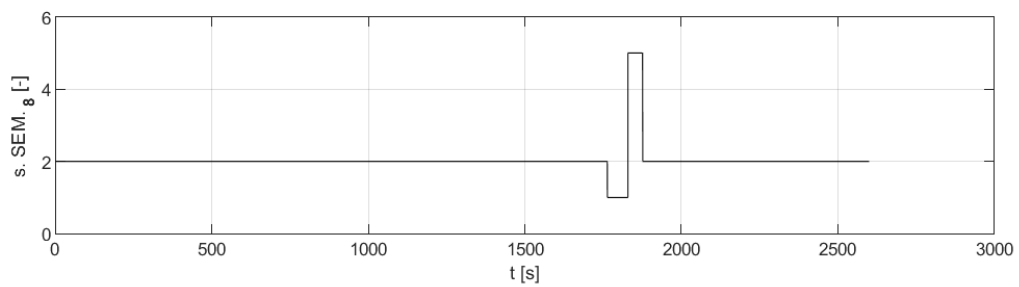
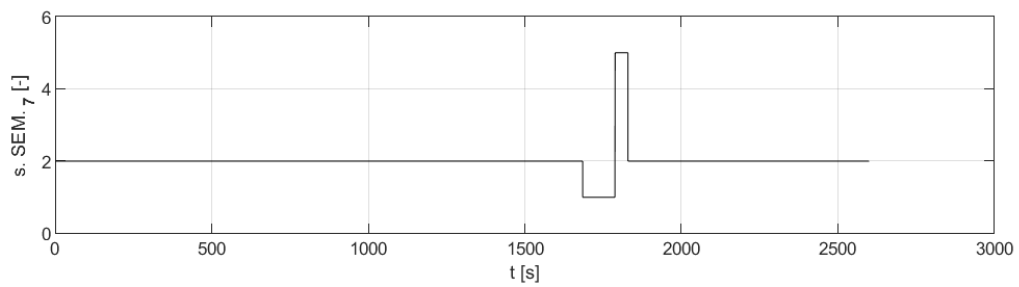
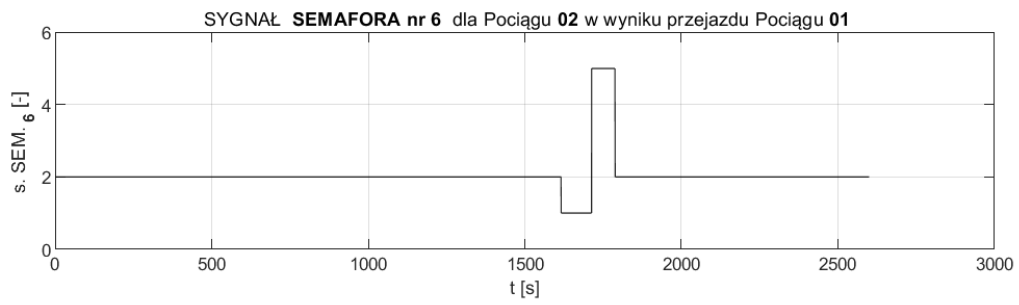


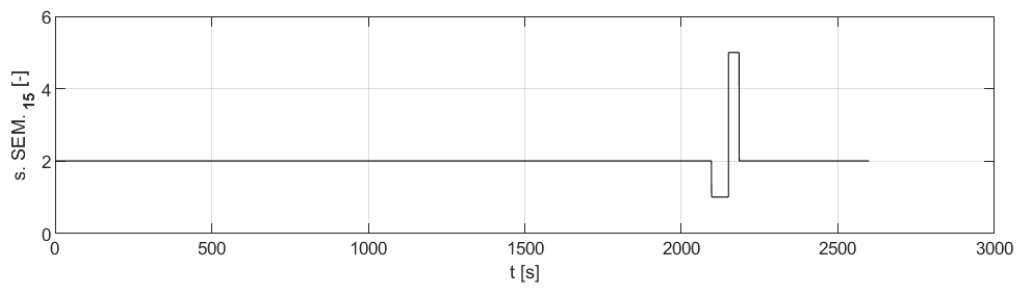
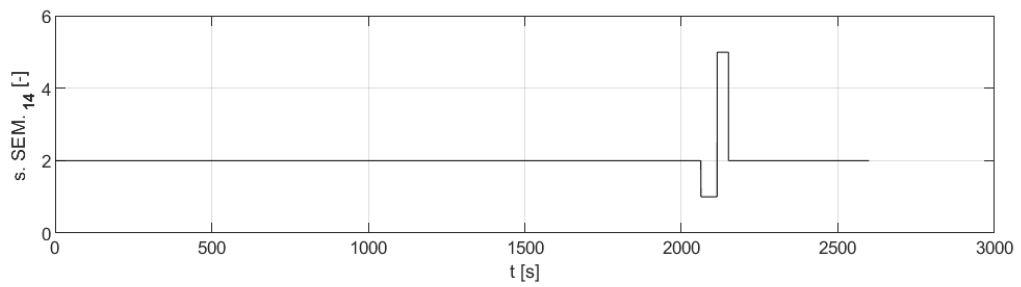
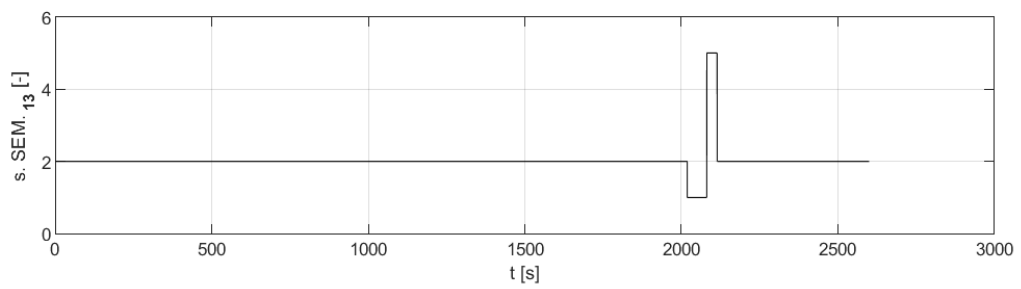
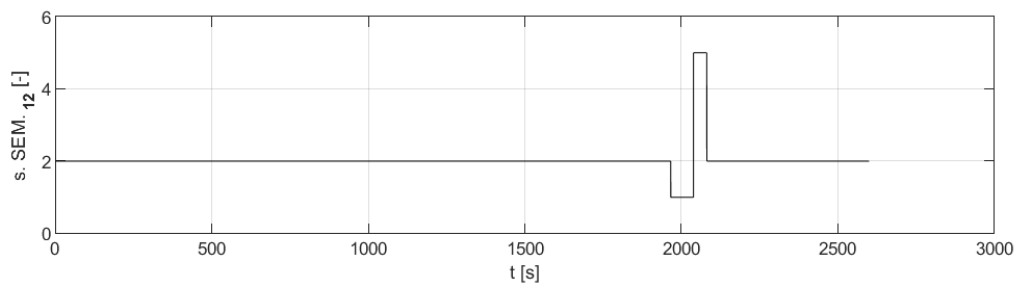
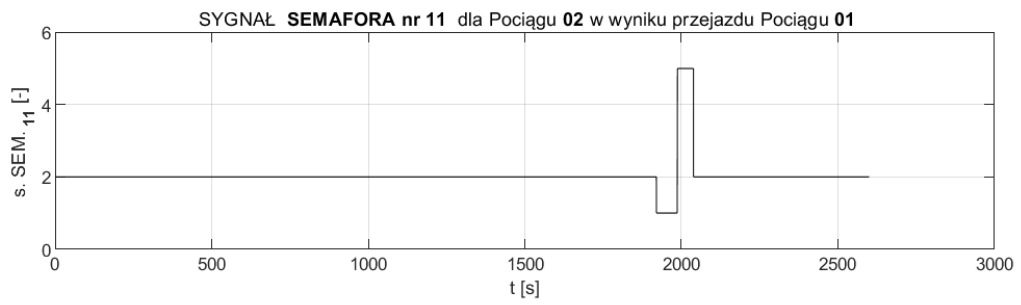


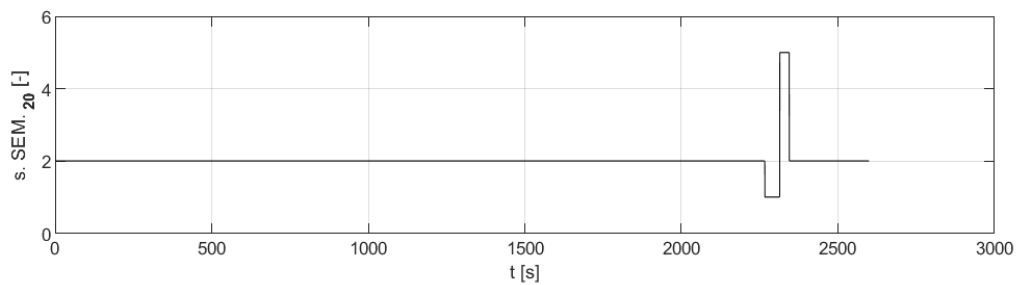
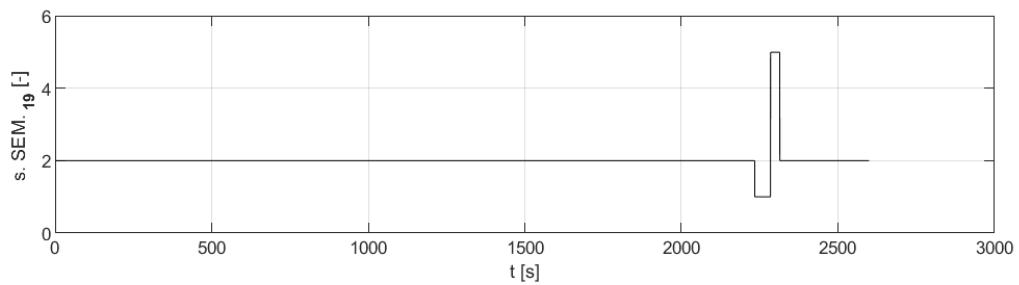
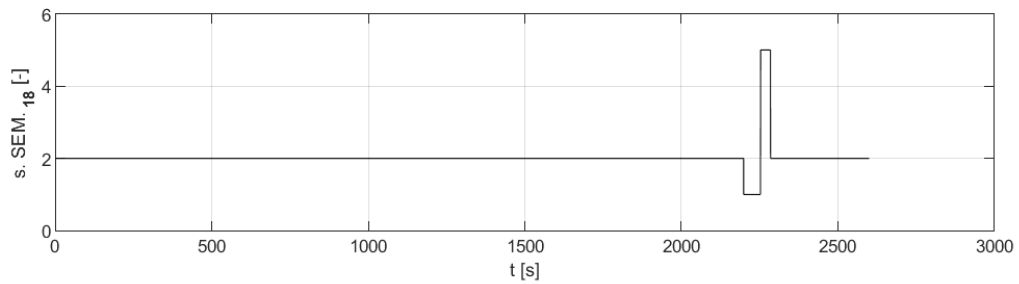
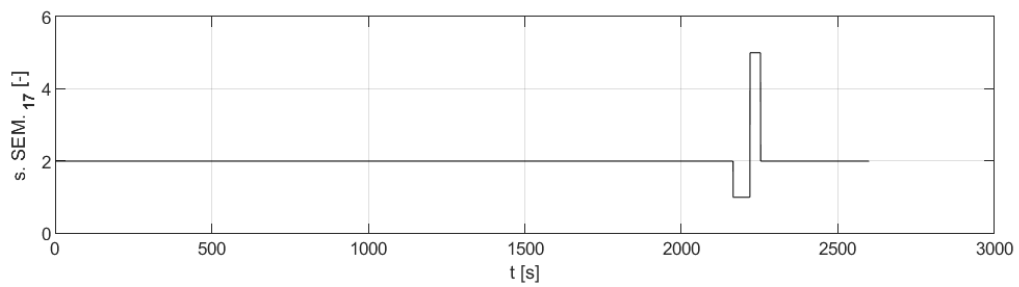
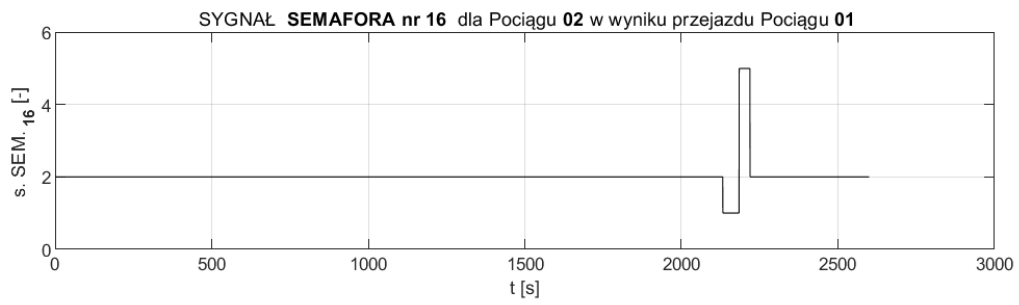
Załącznik nr 7.3.2

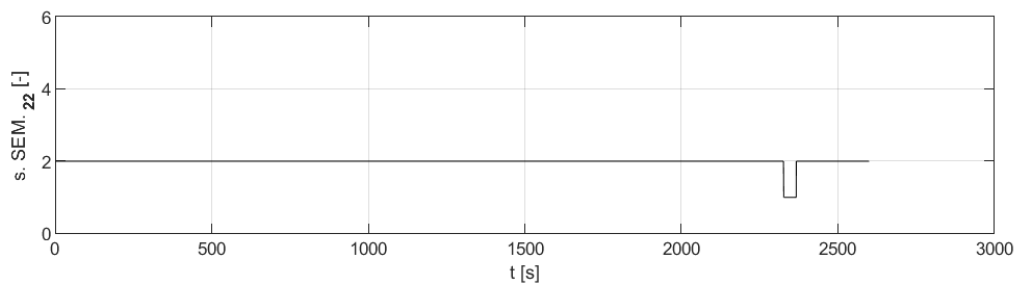
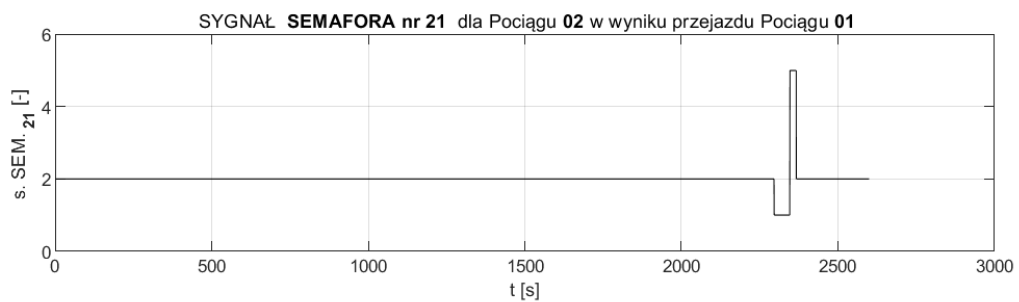
Sygnaly („S1”, „S2”, „S5”) generowane przez semafor
w wyniku przejazdu pociągu nr 1 dla pociągu nr 2
(założenie nr XIII , rozdział 5)





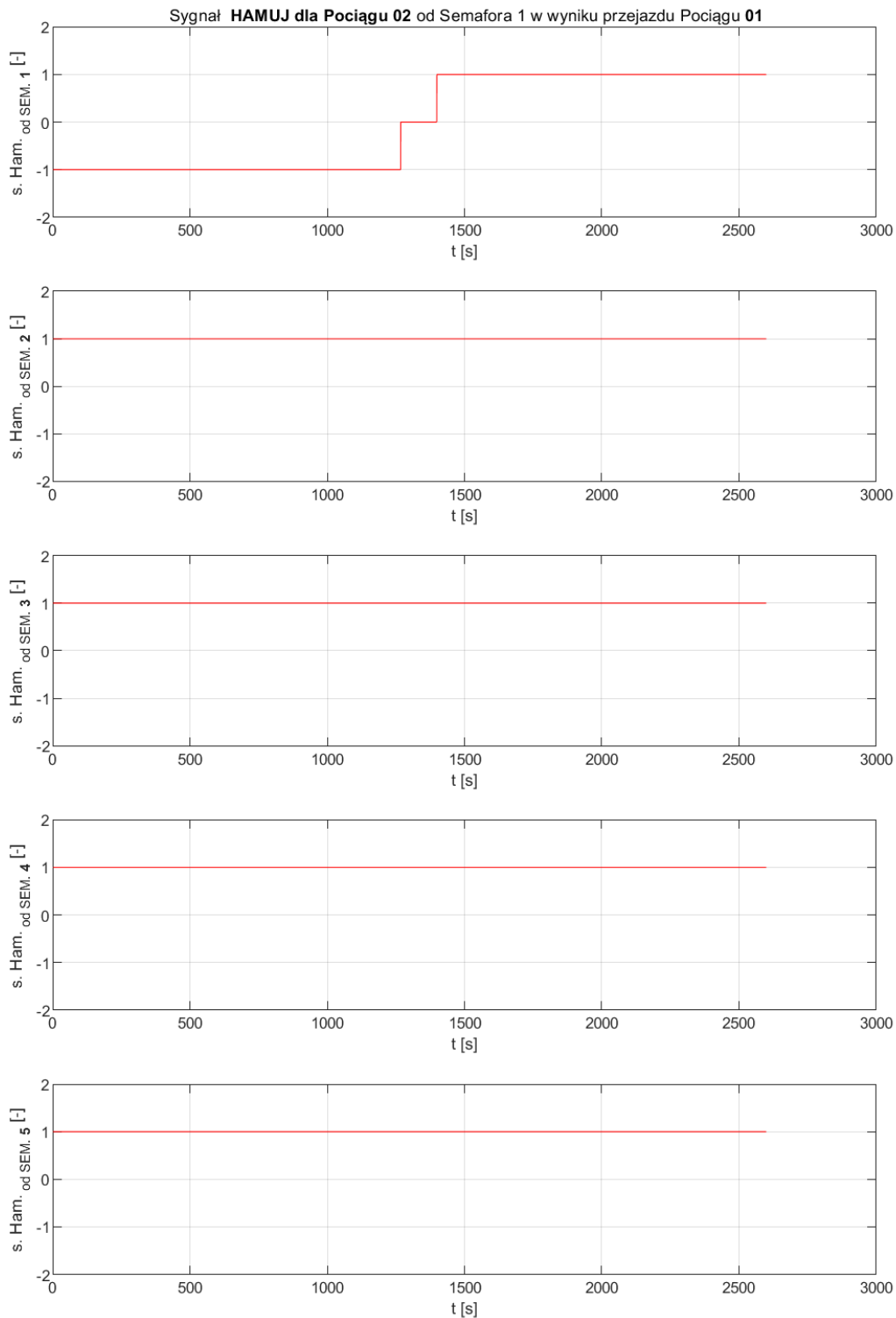


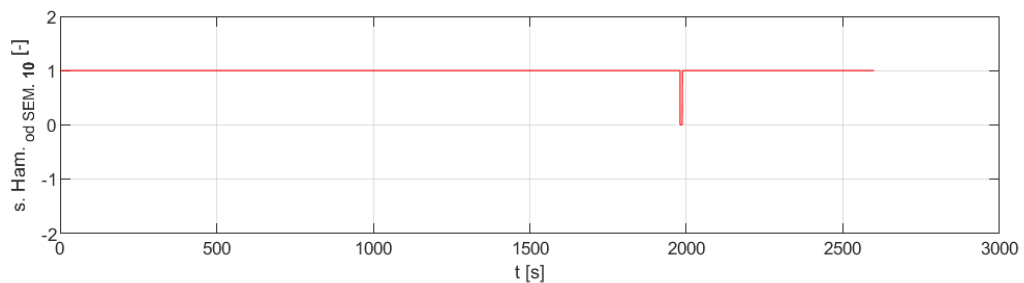
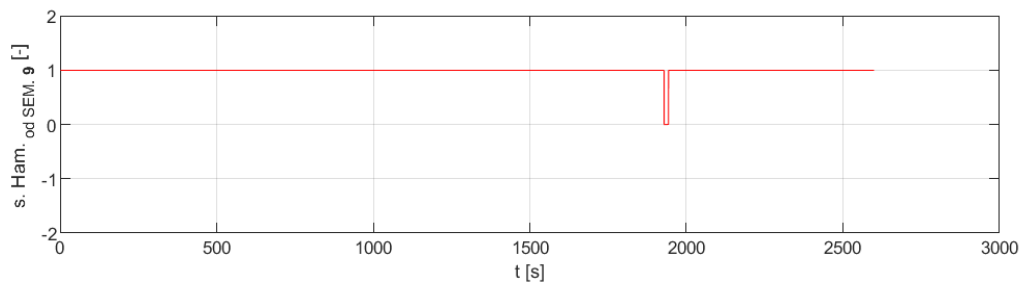
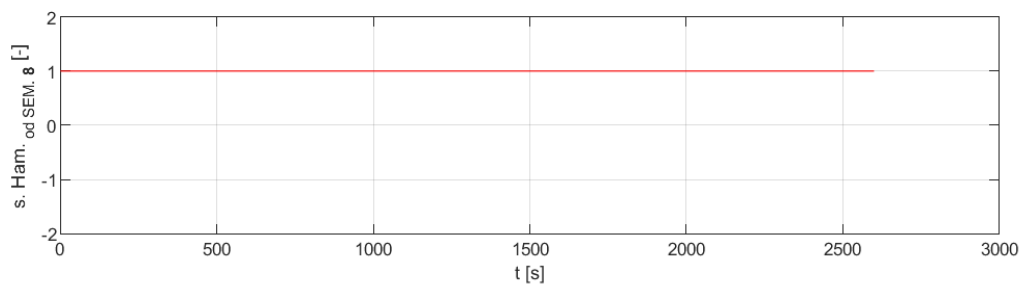
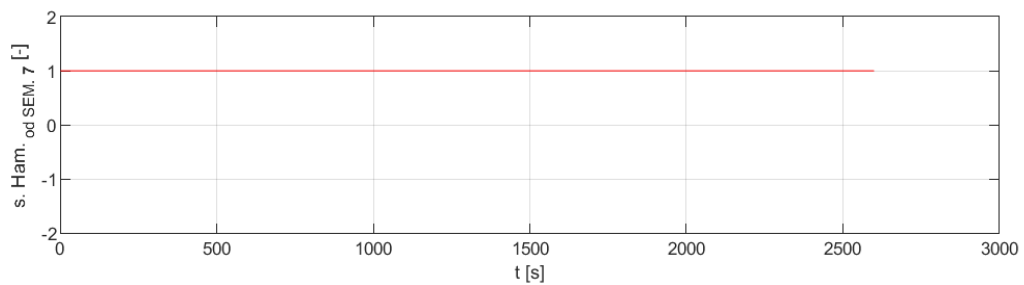
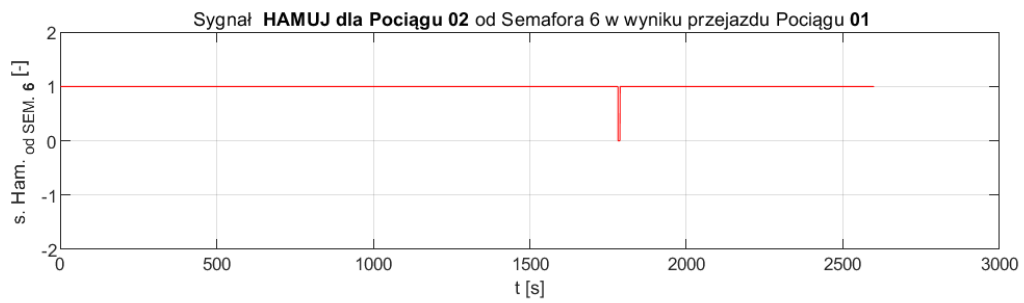


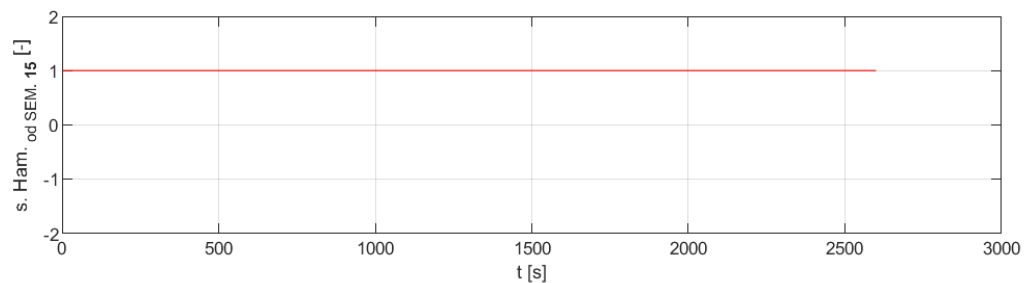
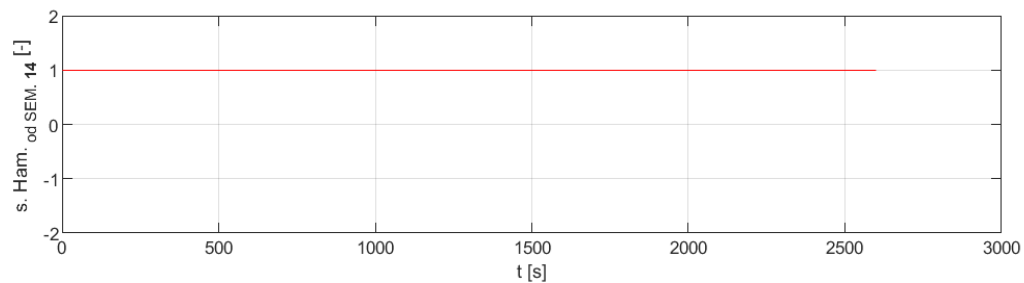
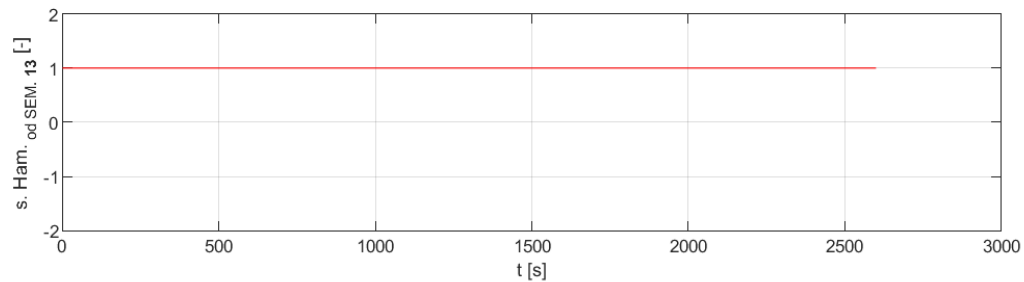
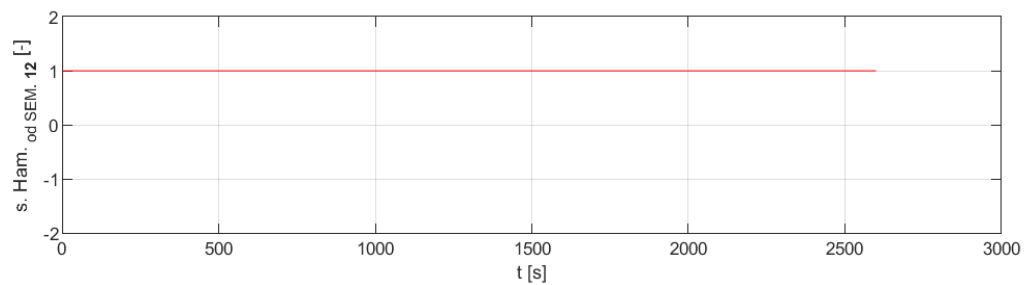
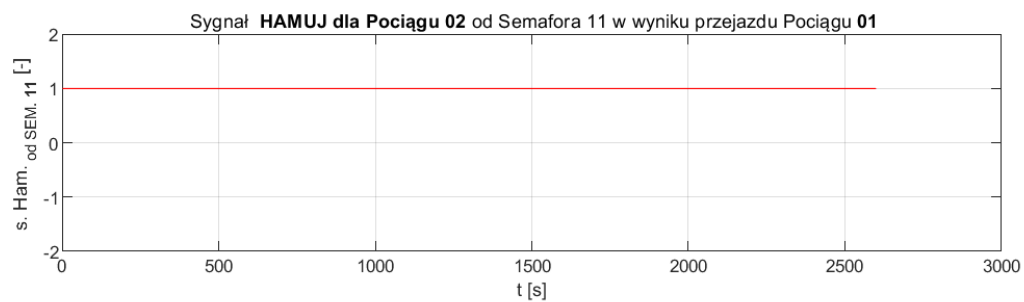


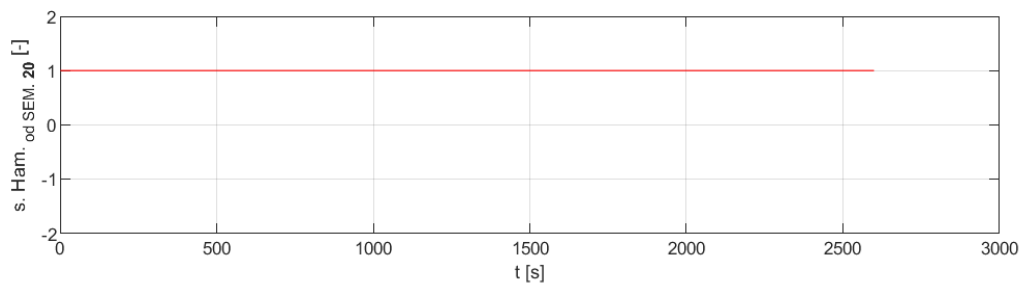
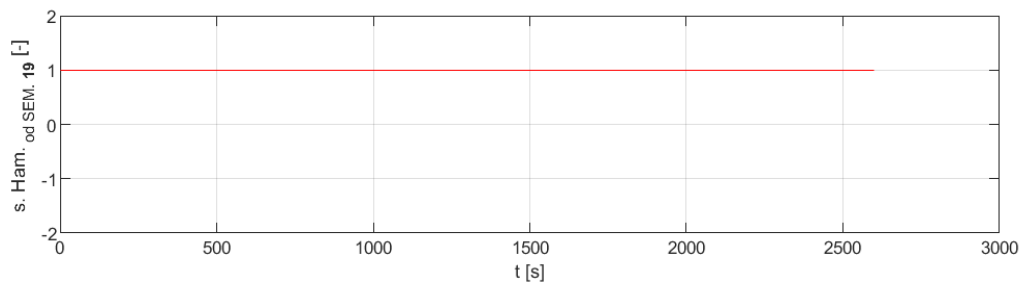
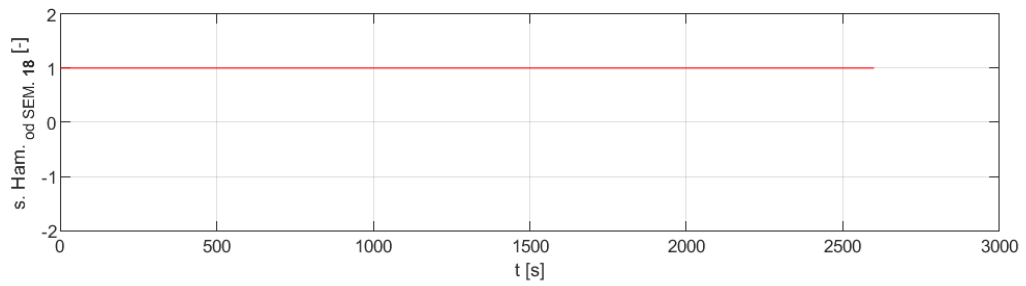
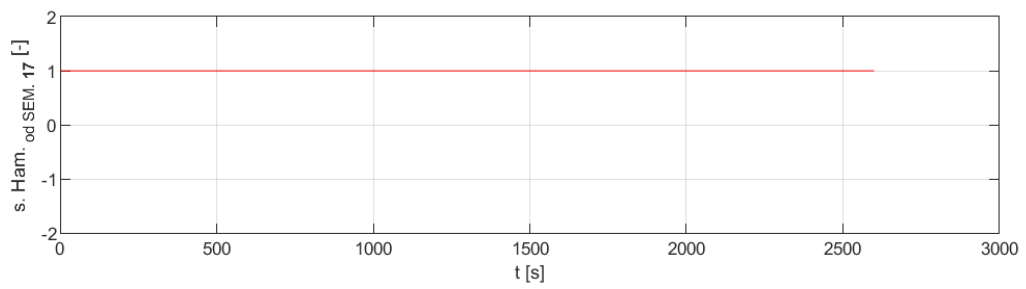
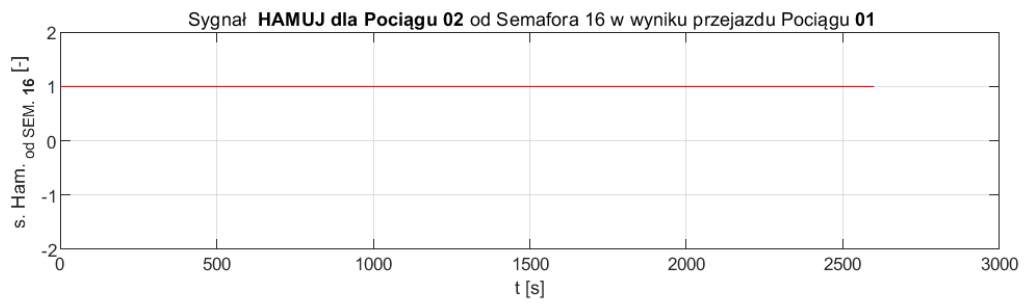
Załącznik nr 7.3.3

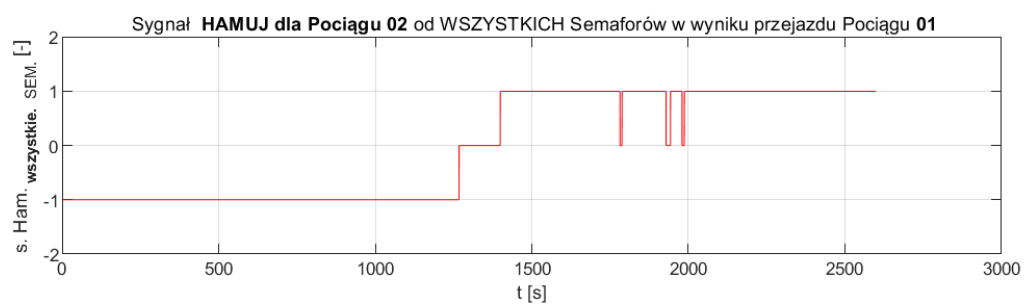
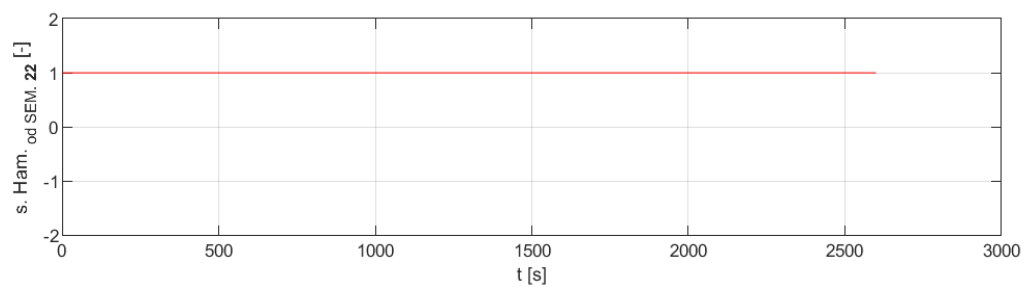
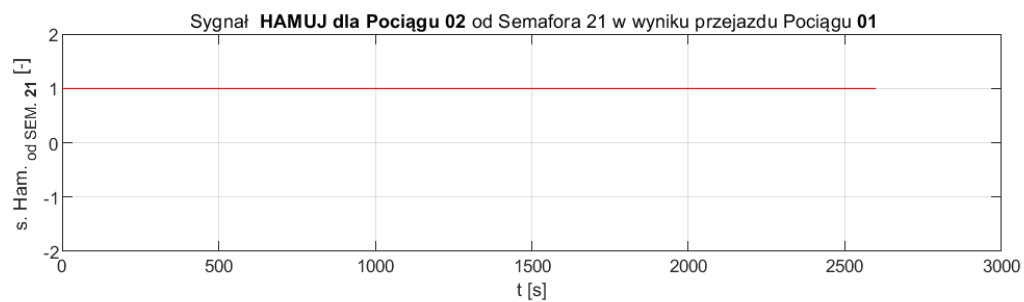
Sygnały „hamuj” dla pociągu nr 2 generowane w wyniku przejazdu pociągu nr 1 (założenie nr XVIII, rozdział 5)







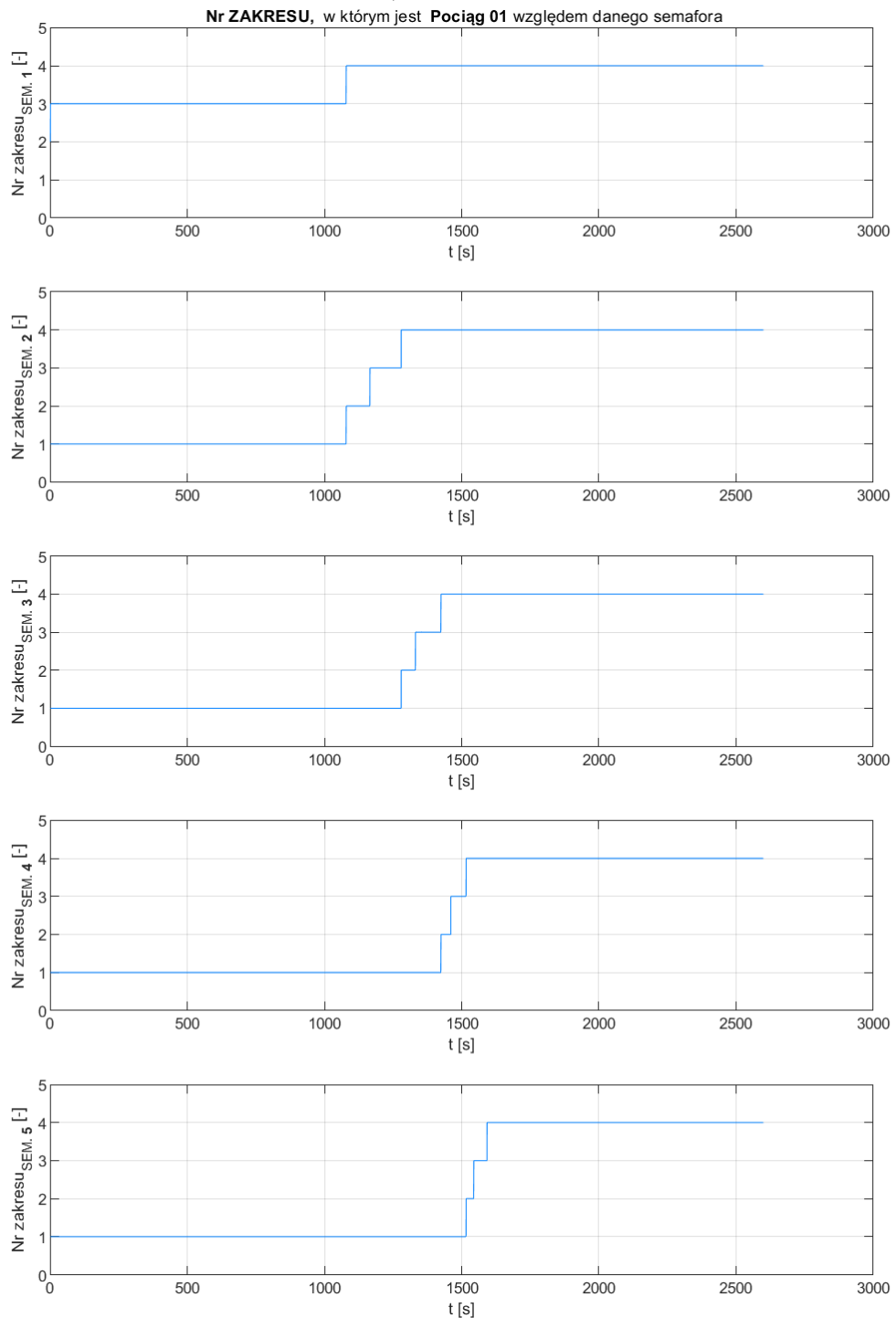


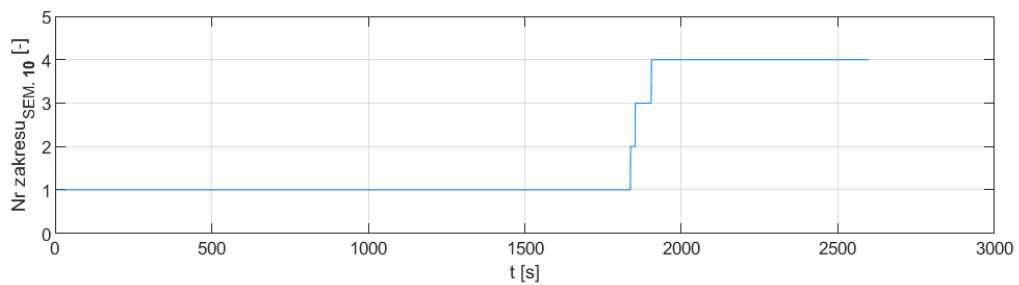
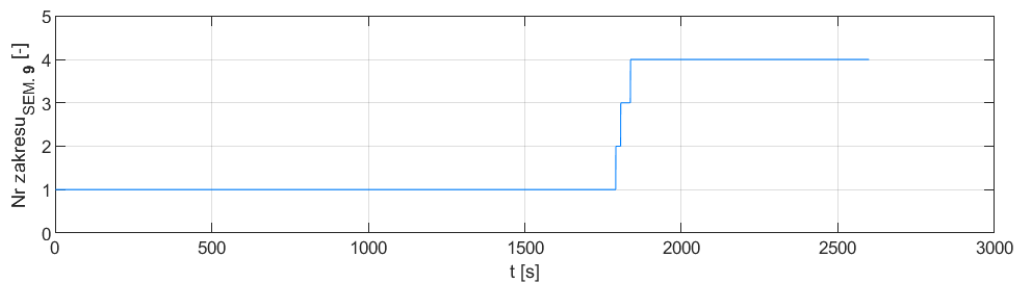
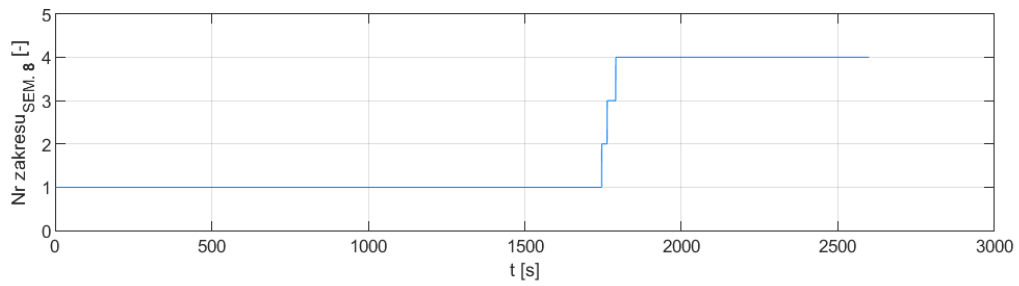
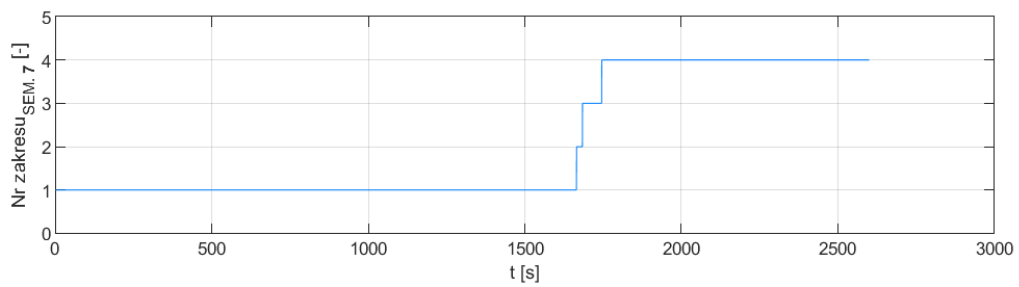


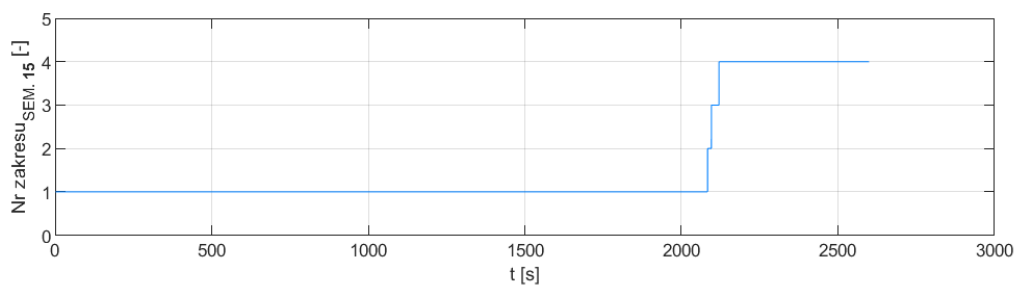
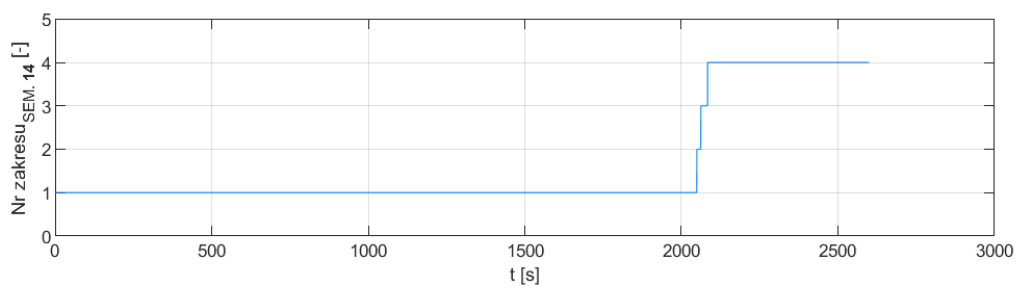
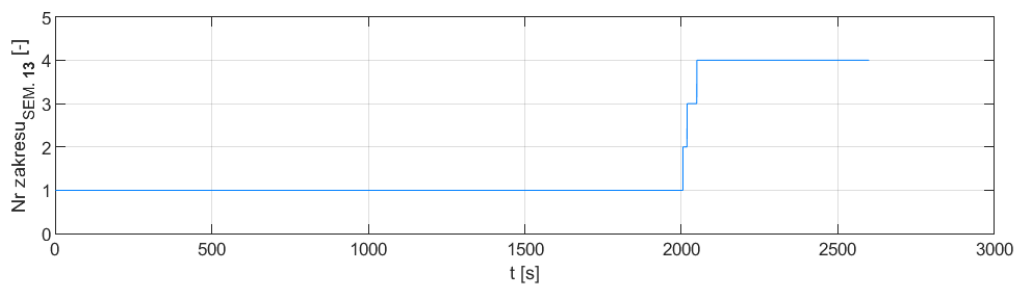
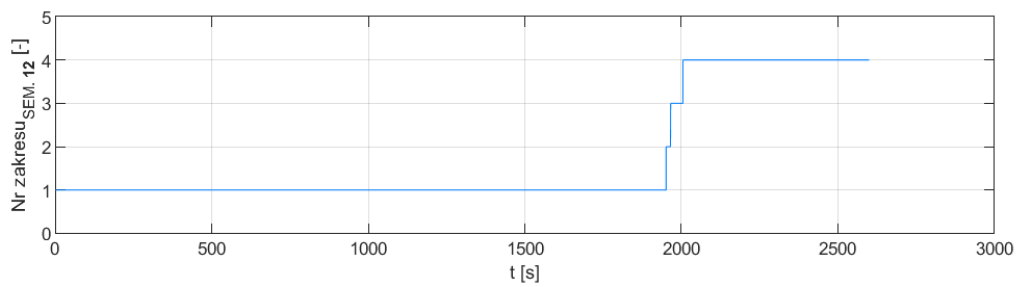
Załącznik nr 7.3.4

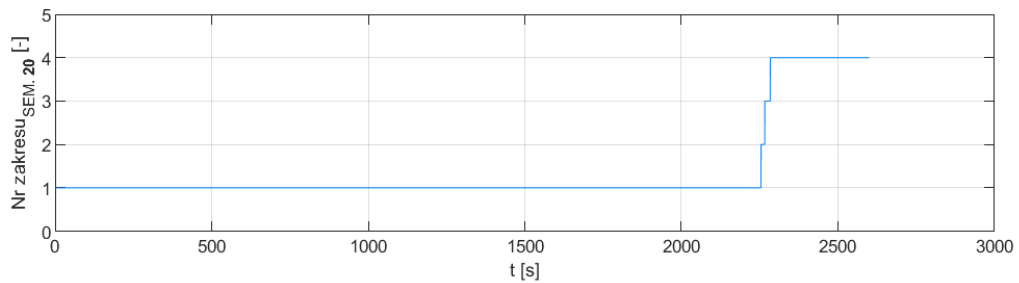
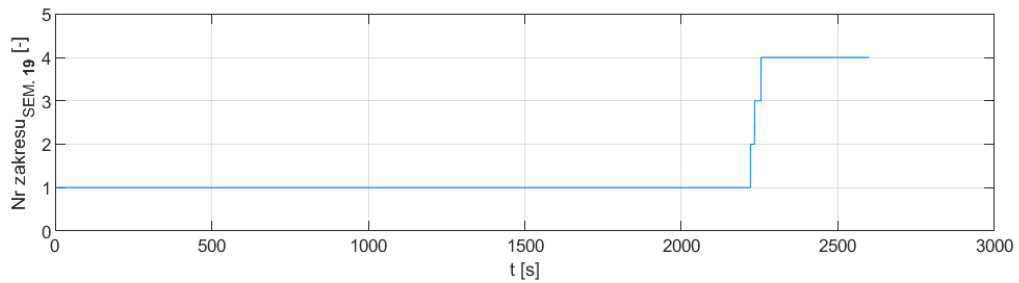
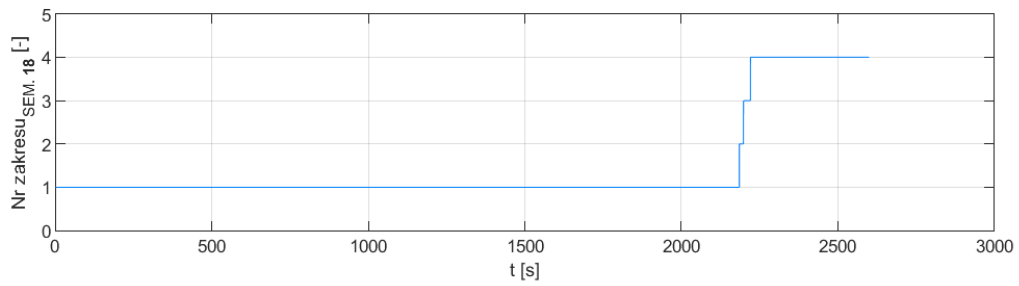
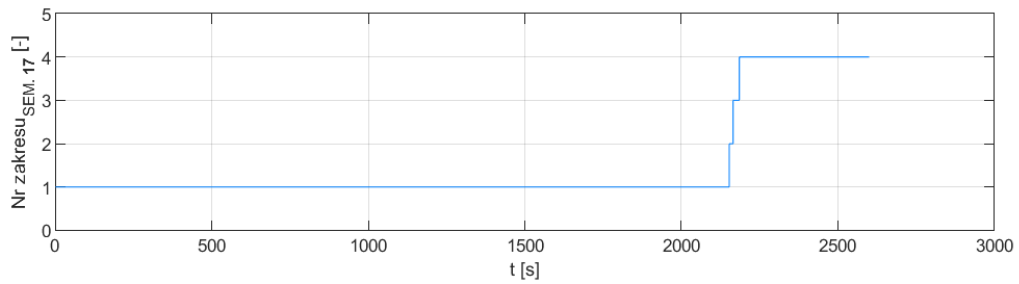
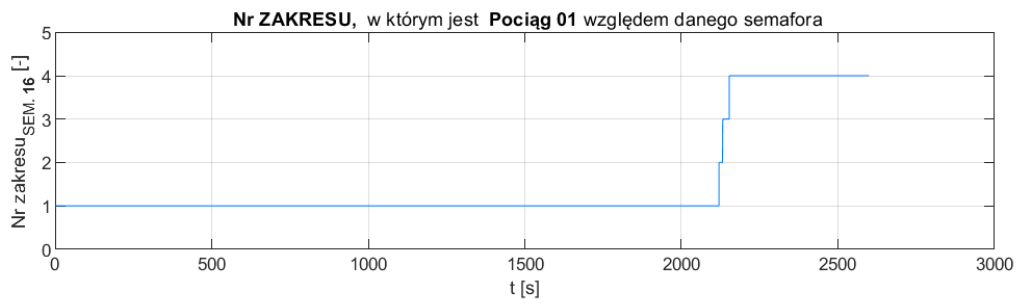
Zakresy, w których znajduje się pociąg nr 1 względem odpowiednich semaforów (założenie nr XVII, rozdział 5)

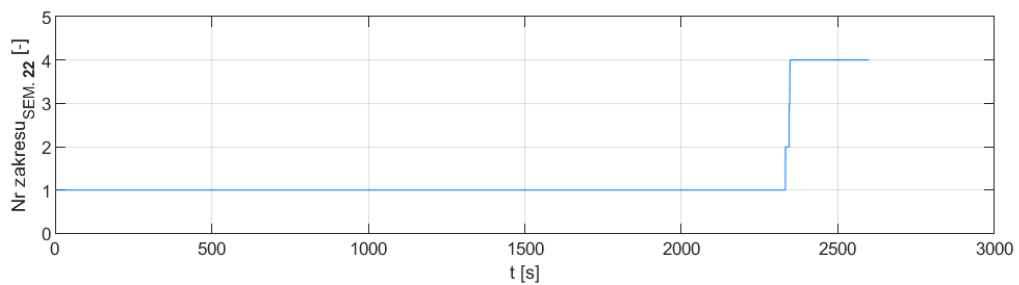
Jest to również istotny parametr, gdyż zgodnie z założeniem X może istnieć w symulacji **niezerowa** droga wyprzedzenia (lub nawet opóźnienia) rozpoczęcia hamowania [m] względem danego semafora oraz droga rzeczywistej widoczności danego semafora nie musi być równa przepisowej (np. w wyniku mgły) –założenie VIII, rozdział 5.







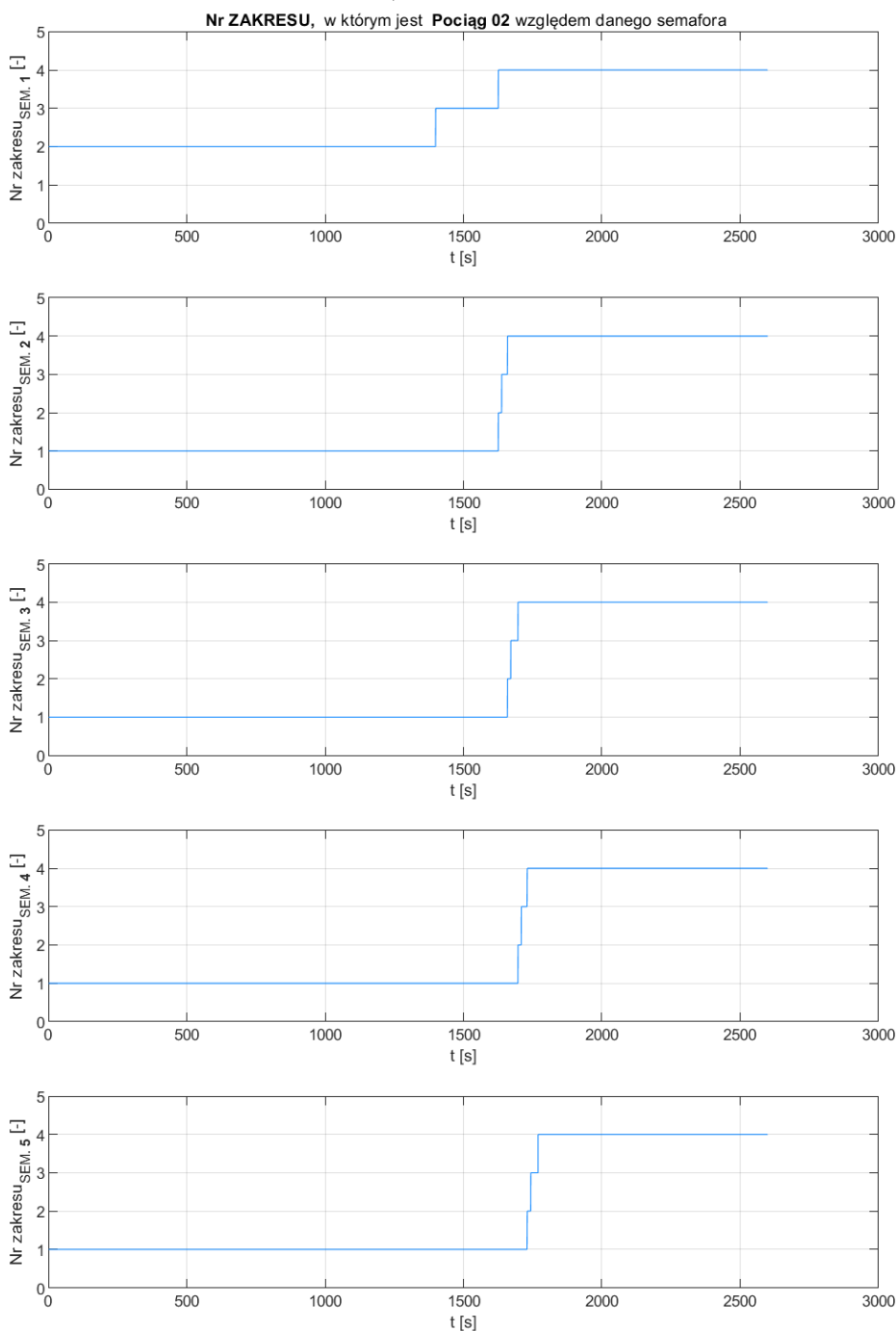


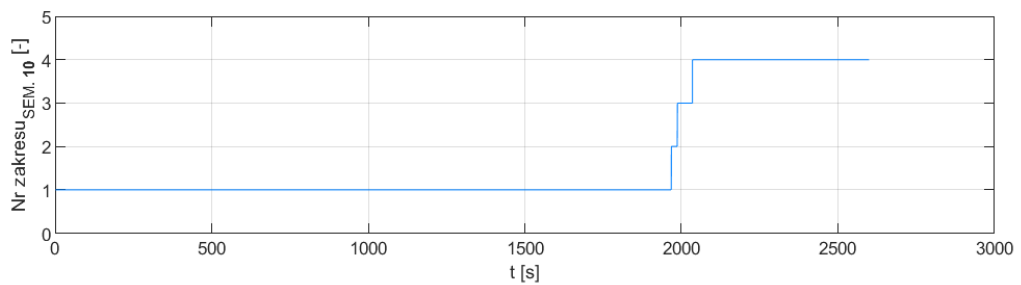
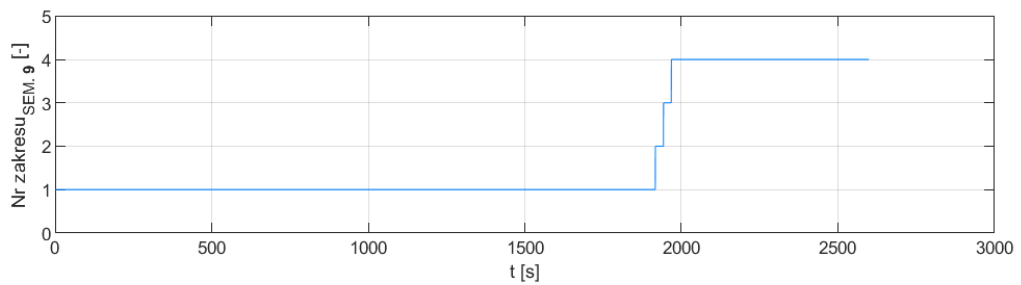
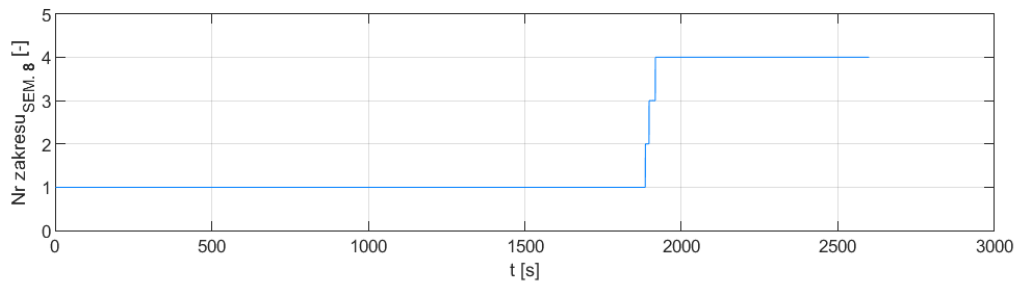
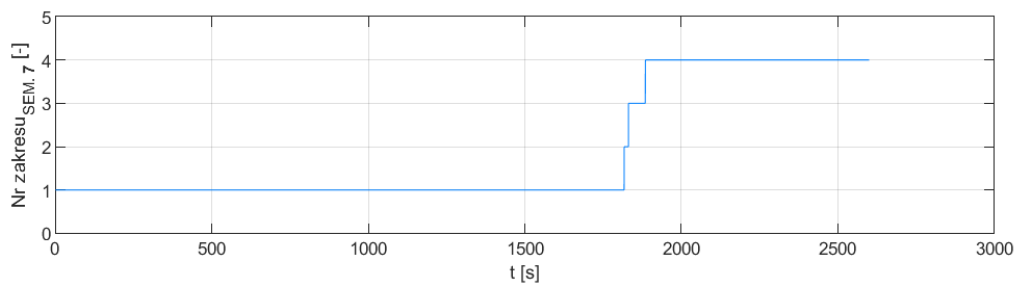


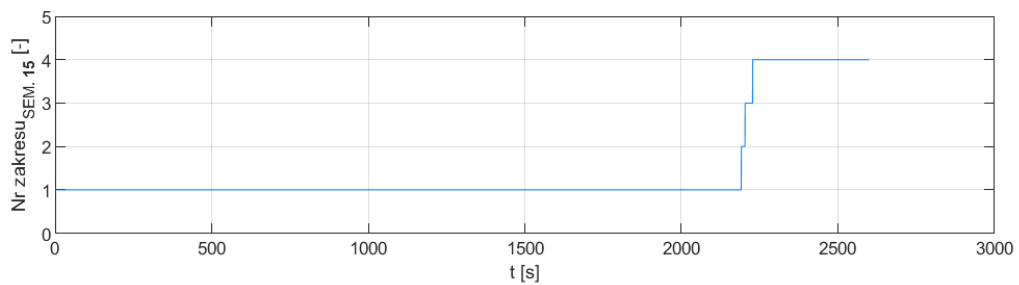
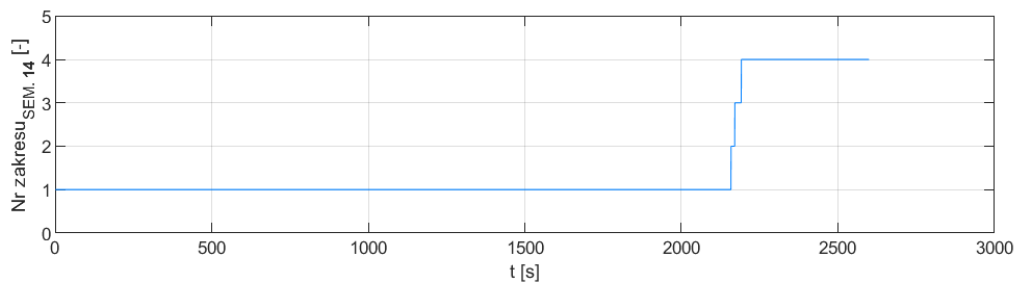
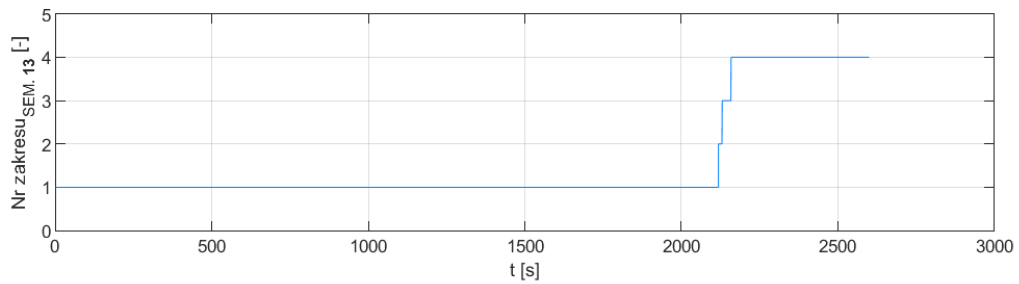
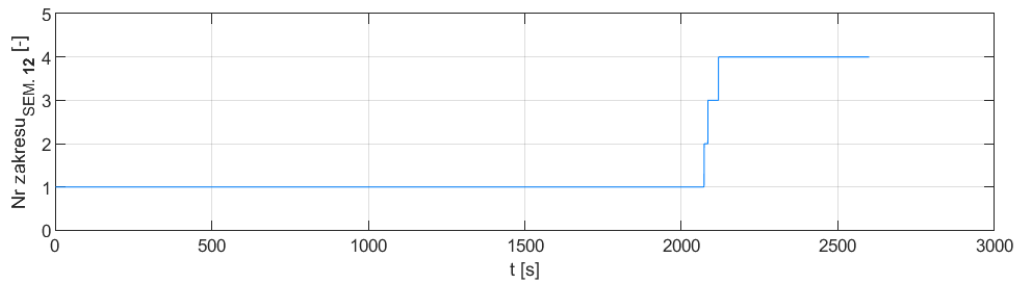
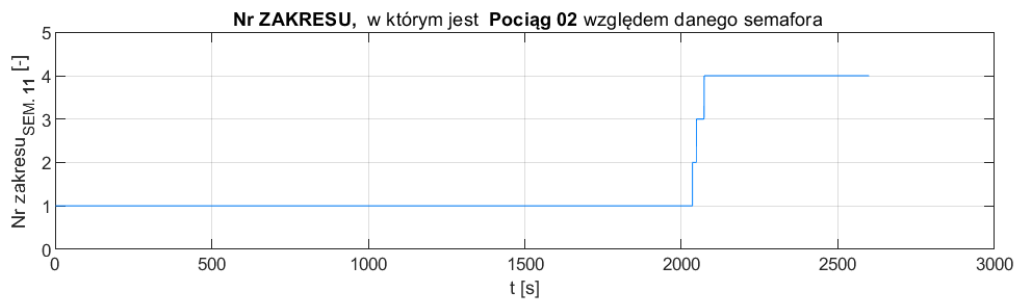
Załącznik nr 7.3.5

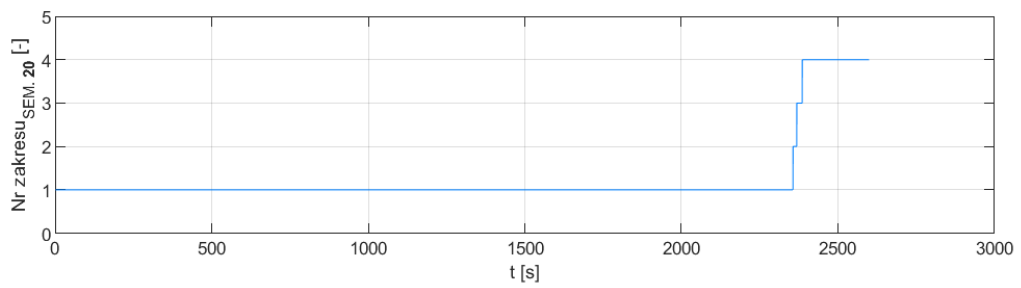
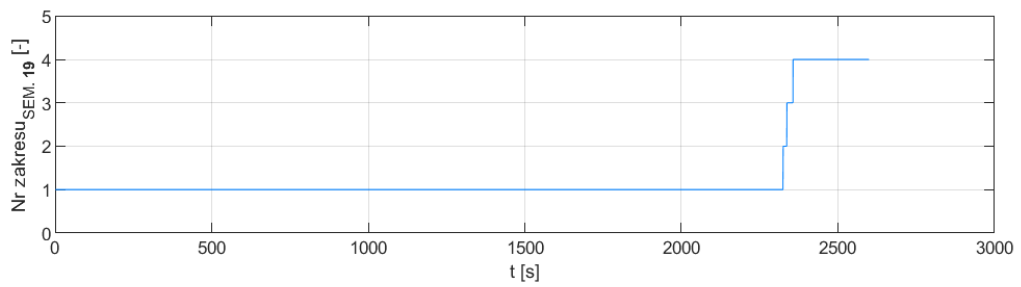
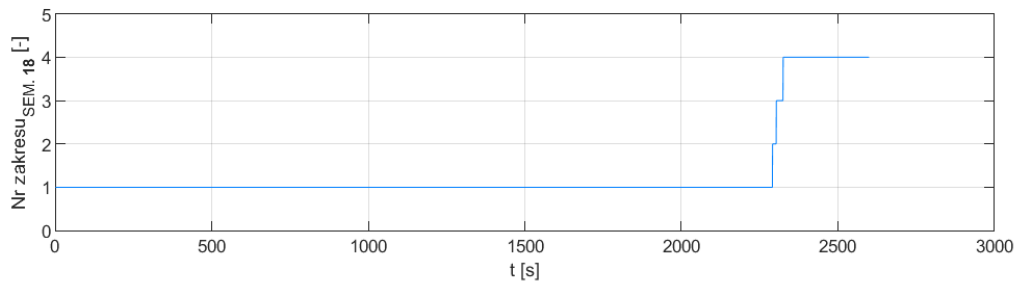
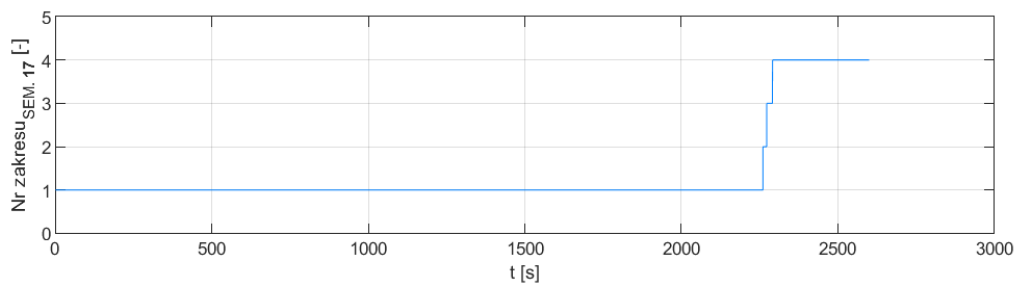
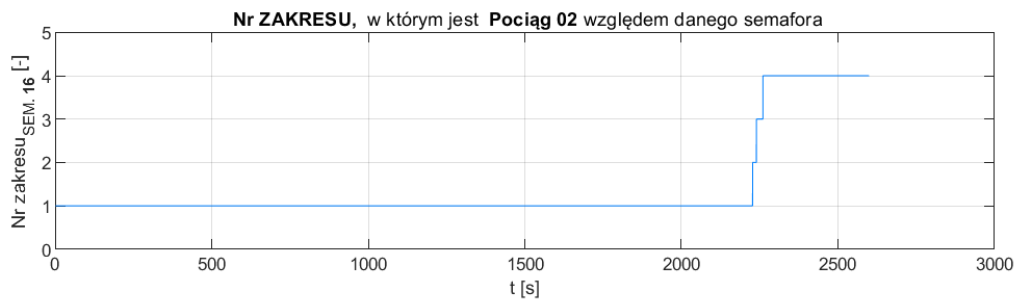
Zakresy, w których znajduje się pociąg nr 2 względem odpowiednich semaforów (założenie nr XVII, rozdział 5)

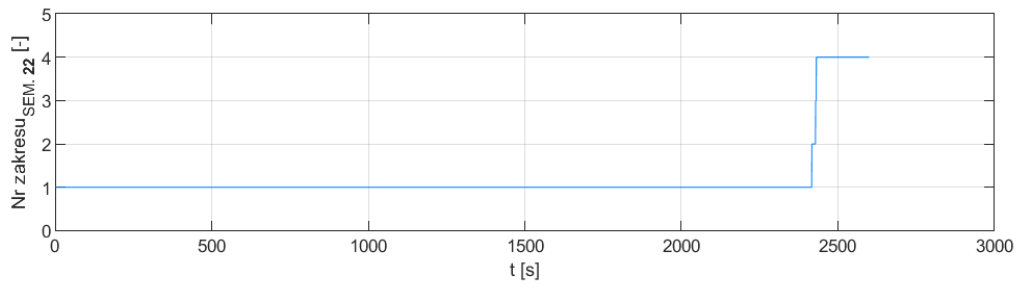
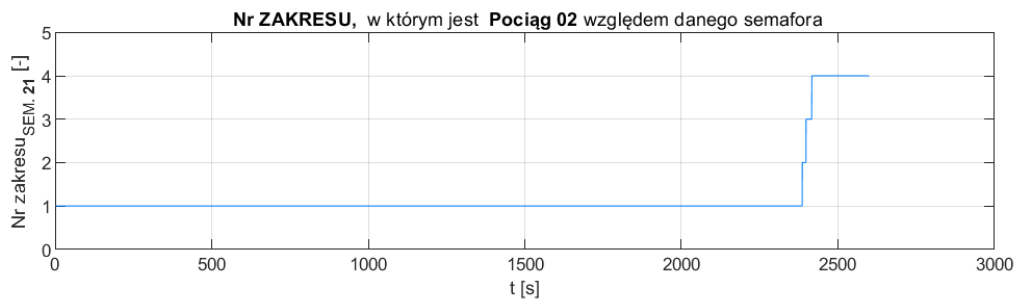
Jest to również istotny parametr, gdyż zgodnie z założeniem X może istnieć w symulacji **niezerowa** droga wyprzedzenia (lub nawet opóźnienia) rozpoczęcia hamowania [m] względem danego semafora oraz droga rzeczywistej widoczności danego semafora nie musi być równa przepisowej (np. w wyniku mgły) – założenie VIII, rozdział 5.











Załącznik nr 8.1.1

Sprawdzenie pracy wirtualnych detektorów, wirtualnych semaforów i ich oddziaływania na pociąg jadący pod kontrolą systemu ETCS

Współrzędne semaforów i detektorów przy analizowanej konfiguracji szlaku

Liczba wirtualnych dekoderek: **1 (Il_Sem_VIR_miedzy_REAL=1)**

Wsp_Sem_REAL_i_VIR_na_szlaku =

1.0e+05 *

Columns 1 through 10

0.0000	0.0121	0.02411	0.0314	0.0387	0.0472	0.0557	0.0631	0.0704	0.0782
--------	--------	---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 11 through 20

0.0859	0.0950	0.1041	0.1156	0.1270	0.1341	0.1412	0.1494	0.1577	0.1690
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 21 through 30

0.1804	0.1887	0.1969	0.2070	0.2172	0.2261	0.2351	0.2424	0.2497	0.2577
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 31 through 40

0.2657	0.2730	0.2803	0.2872	0.2940	0.3010	0.3080	0.3151	0.3221	0.3286
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 41 through 50

0.3352	0.3420	0.3488
--------	--------	--------

Wsp_DETEKT_REAL_i_VIR_na_szlaku =

1.0e+05 *

Columns 1 through 10

0.0010	0.0121	0.02426	0.0314	0.0389	0.0472	0.0558	0.0631	0.0706	0.0782
--------	--------	---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 11 through 20

0.0861	0.0950	0.1043	0.1156	0.1271	0.1341	0.1414	0.1494	0.1578	0.1690
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 21 through 30

0.1806	0.1887	0.1971	0.2070	0.2173	0.2261	0.2353	0.2424	0.2498	0.2577
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

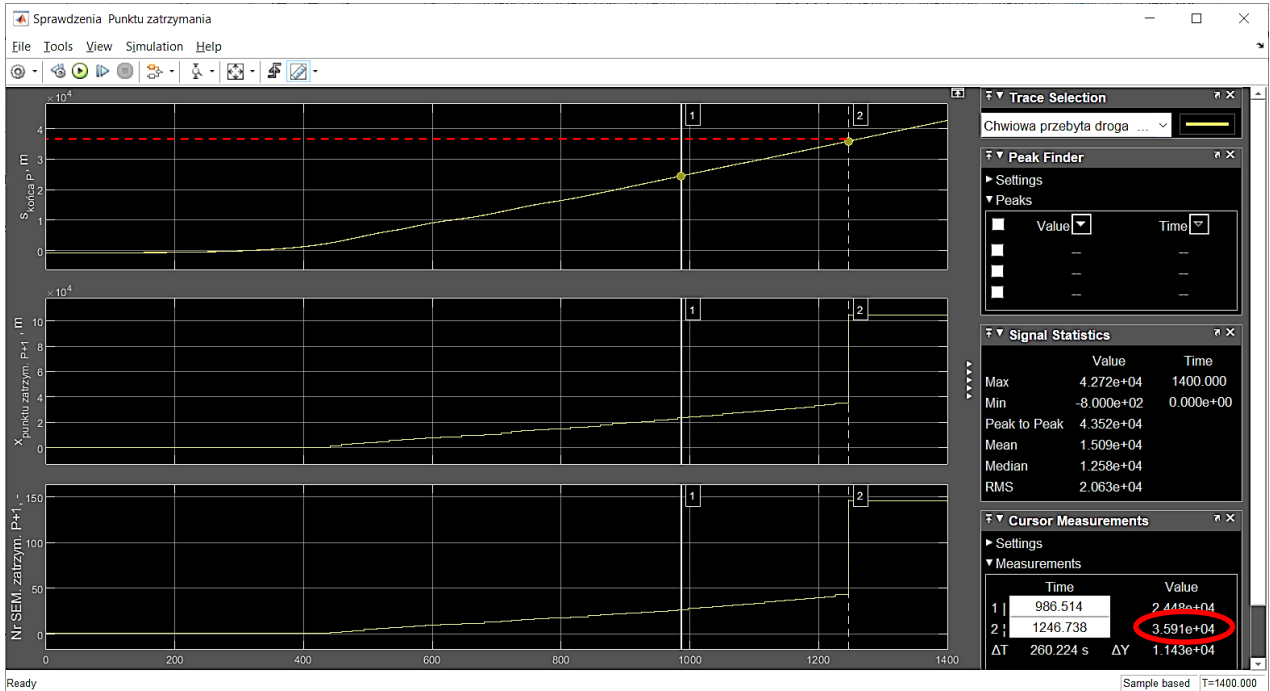
Columns 31 through 40

0.2659	0.2730	0.2805	0.2872	0.2942	0.3010	0.3082	0.3151	0.3222	0.3286
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

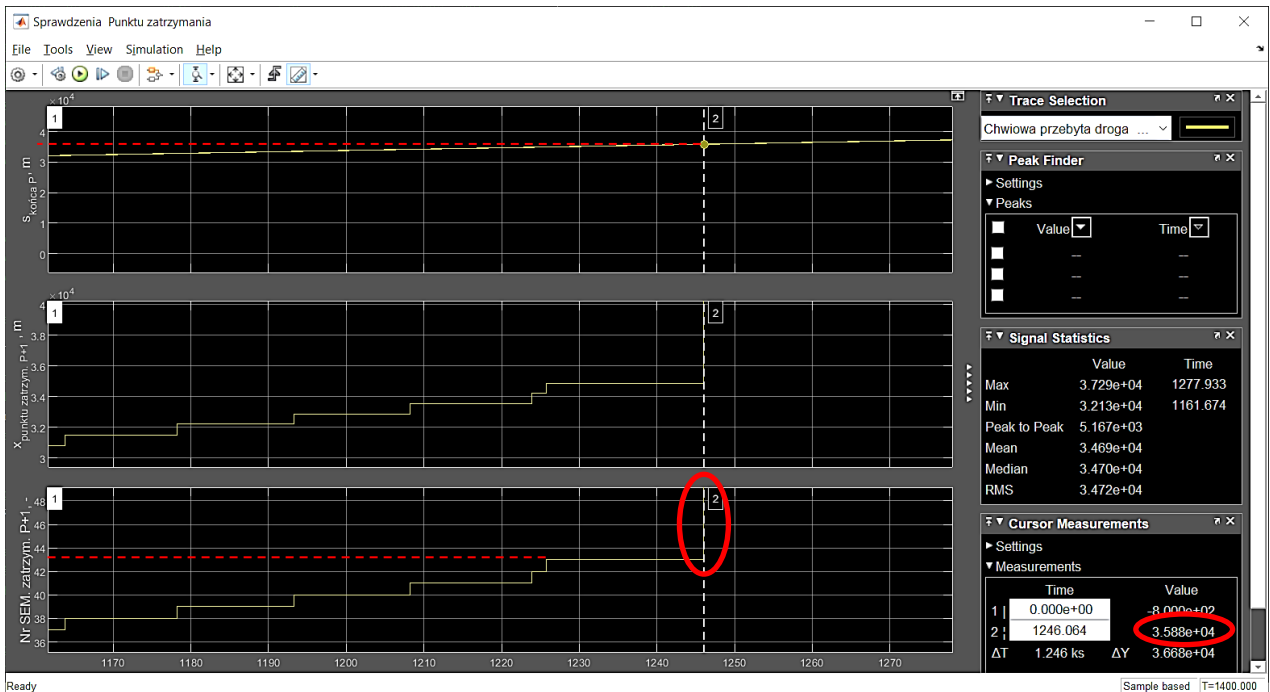
Columns 41 through 50

0.3353	0.3420	0.3489	0.3498	0.3588
--------	--------	--------	--------	--------

Koniec szlaku:



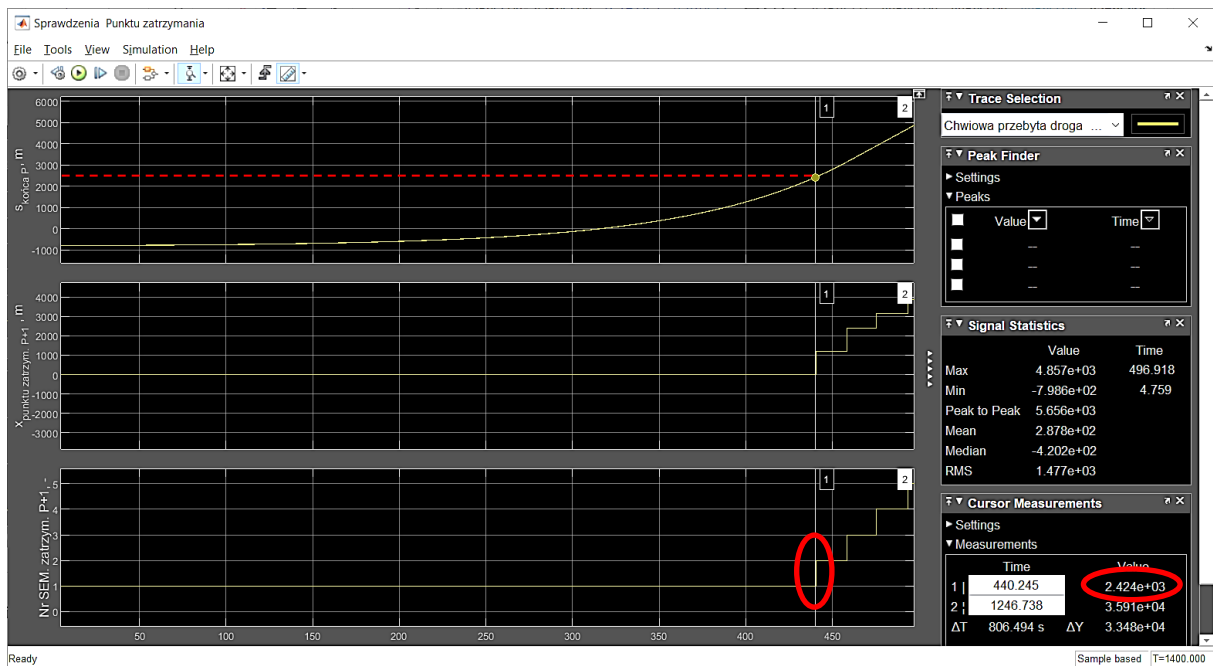
Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 dla całego szlaku



Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla ostatnich semaforów na szlaku, pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników

Zgadza się. Koniec pociągu P minął detektor odpowiadający **Dyżurnego ruchu (liczonego jako 45 detektor)** na współrzędnej 35 877 [m] (wartość zobrazowana *valve* dla znacznika nr 2 = 3.591·e+04 – różnica wartości wynika ze sposobu obrazowania przez oprogramowanie symulacyjne) i **wtedy następuje odblokowanie semafora 43** dla pociągu P+1 co umożliwi wjazd pociągu P+1 na stację.

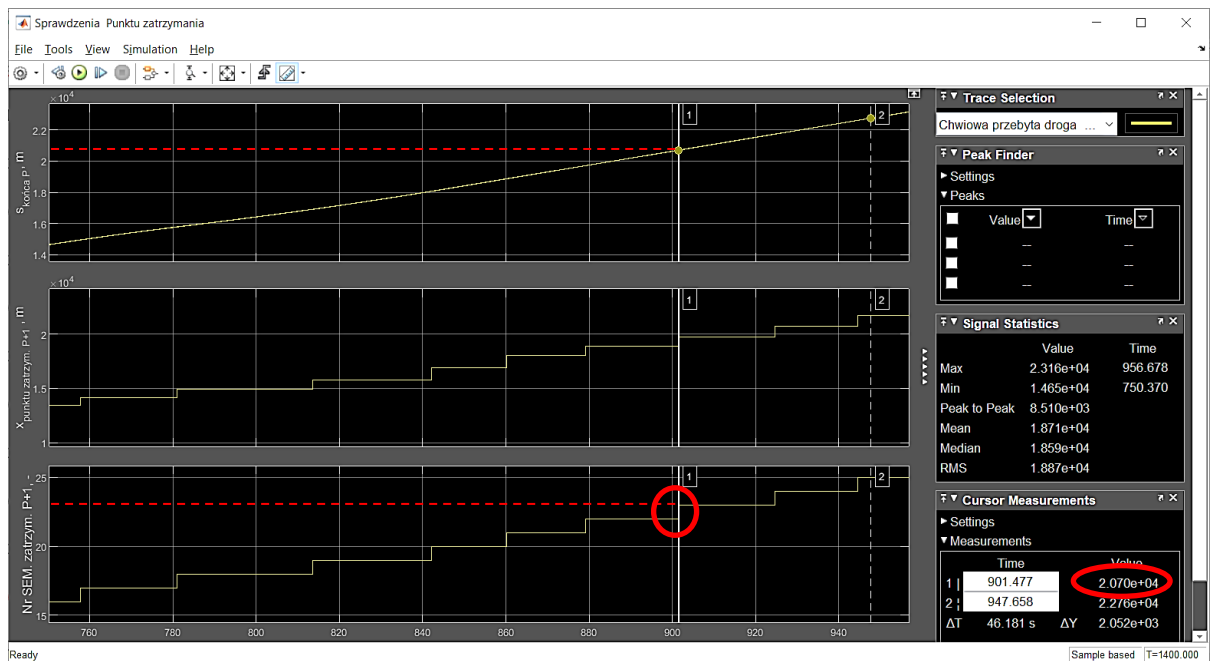
Początek szlaku:



Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. Semafora wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla pierwszych semaforów na szlaku, pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników

Zgadza się. Koniec pociągu P minął **detektor trzeciego semafora** na współrzędnej $0,0243 \cdot 10^5$ [m] (wartość zobrazowana jako *value* dla znacznika nr 1 = $2,424 \cdot e+03$). Nastąpiło odblokowanie **semafor nr 1** co pozwala na jazdę pociągowi P+1 do **semafora nr 2** (x-punktu zatrzymania P+1= ok. $0,0121 \cdot 10^5$).

Środek szlaku:



Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla środka szlaku, pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników

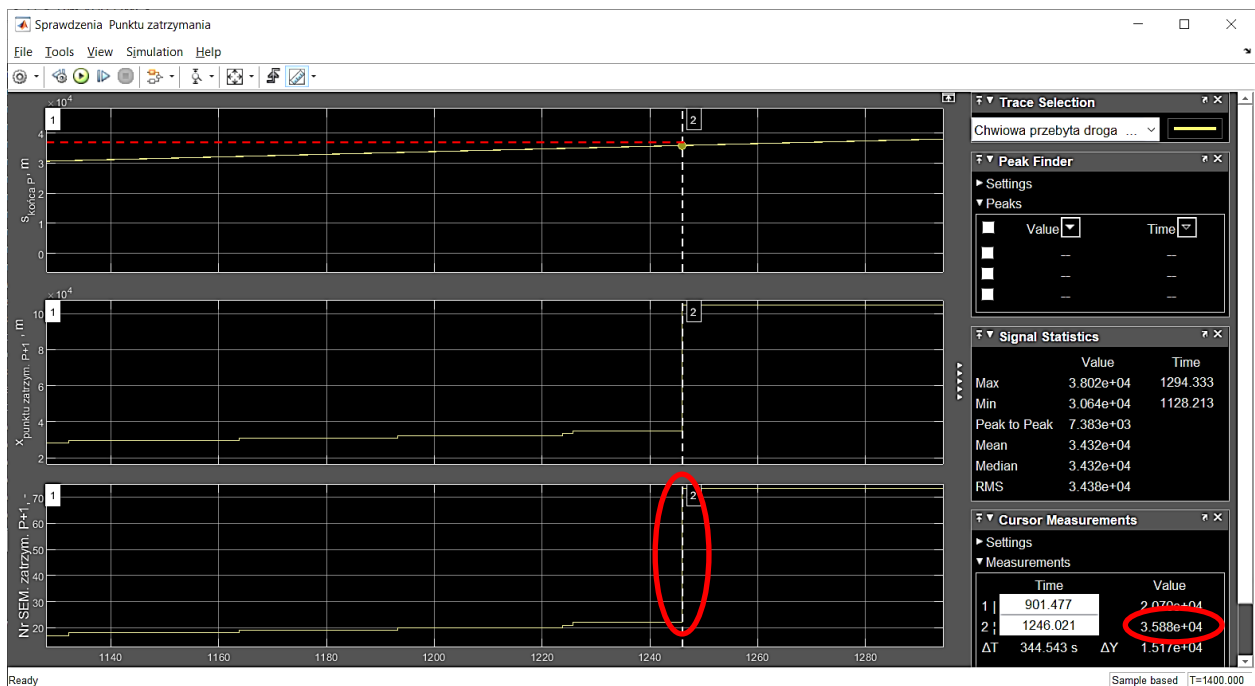
Zgadza się. Koniec pociągu P minął **detektor 24. semafora** na współrzędnej $0,2070 \cdot 10^5$ [m] (wartość zobrazowana jako *valve* dla znacznika nr 1 = $2.070 \cdot e+04$). Nastąpiło wtedy odblokowanie **semafora nr 22**, co pozwoliło na podjazd pociągowi P+1 **do semafora nr 23** (x-punktu zatrzymania P+1= ok $0,1969 \cdot 10^5$ [m] na wykresie środkowym powyżej).

Liczba wirtualnych dekoderów: 0 (I1_Sem_VIR_miedzy_REAL=0)

```
Wsp_Sem_REAL_i_VIR_na_szlaku =
1.0e+05 *
Columns 1 through 10
0.0000 0.02411 0.03871 0.0557 0.0704 0.0859 0.1041 0.1270 0.1412 0.1577
Columns 11 through 20
0.1804 0.1969 0.2172 0.2351 0.2497 0.2657 0.2803 0.2940 0.3080 0.3221
Columns 21 through 30
0.3352 0.3488
```

```
Wsp_DETEKT_REAL_i_VIR_na_szlaku =
1.0e+05 *
Columns 1 through 10
0.0010 0.02426 0.03886 0.0558 0.0706 0.0861 0.1043 0.1271 0.1414 0.1578
Columns 11 through 20
0.1806 0.1971 0.2173 0.2353 0.2498 0.2659 0.2805 0.2942 0.3082 0.3222
Columns 21 through 30
0.3353 0.3489 0.3498 0.3588
```

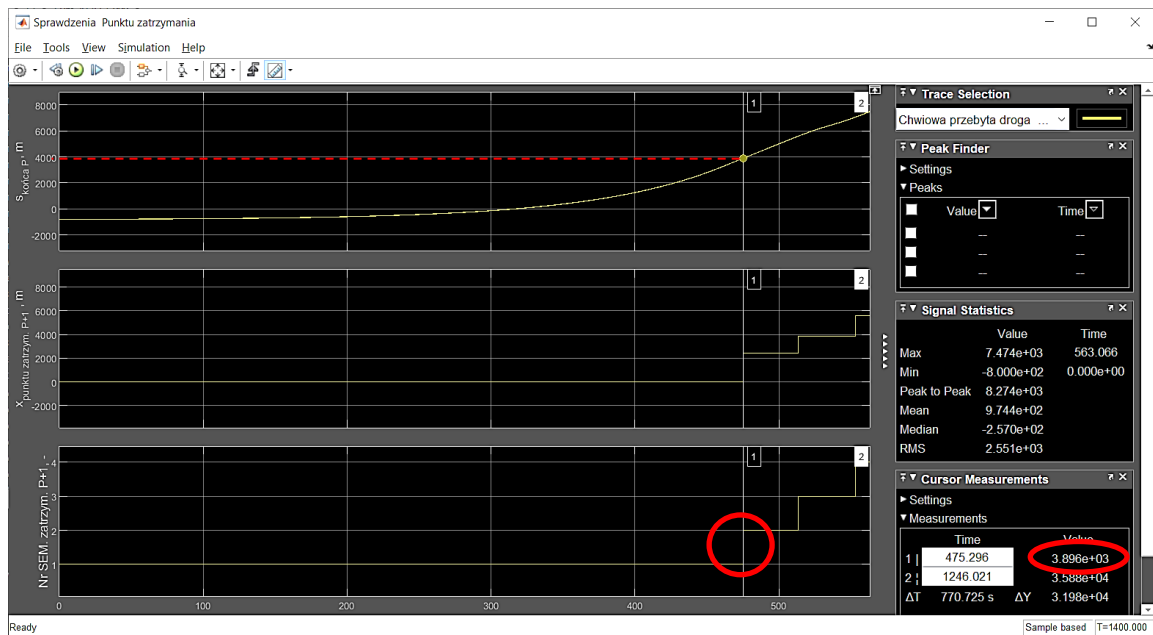
Koniec szlaku:



Przebiegi czasowe jazdy pociągu P (a) oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” (b) dla kolejnego pociągu P+1 dla końca szlaku

Zgadza się. Koniec pociągu P minął detektor odpowiadający **Dyżurnemu ruchu (liczonego jako 24 detektor)** na współrzędnej $35\,877$ [m] (wartość zobrazowana jako *valve* dla znacznika nr 2 = $3588 \cdot e+04$) i **wtedy następuje odblokowanie semafora 22** dla pociągu P+1, co umożliwia wjazd pociągu P+1 na stację.

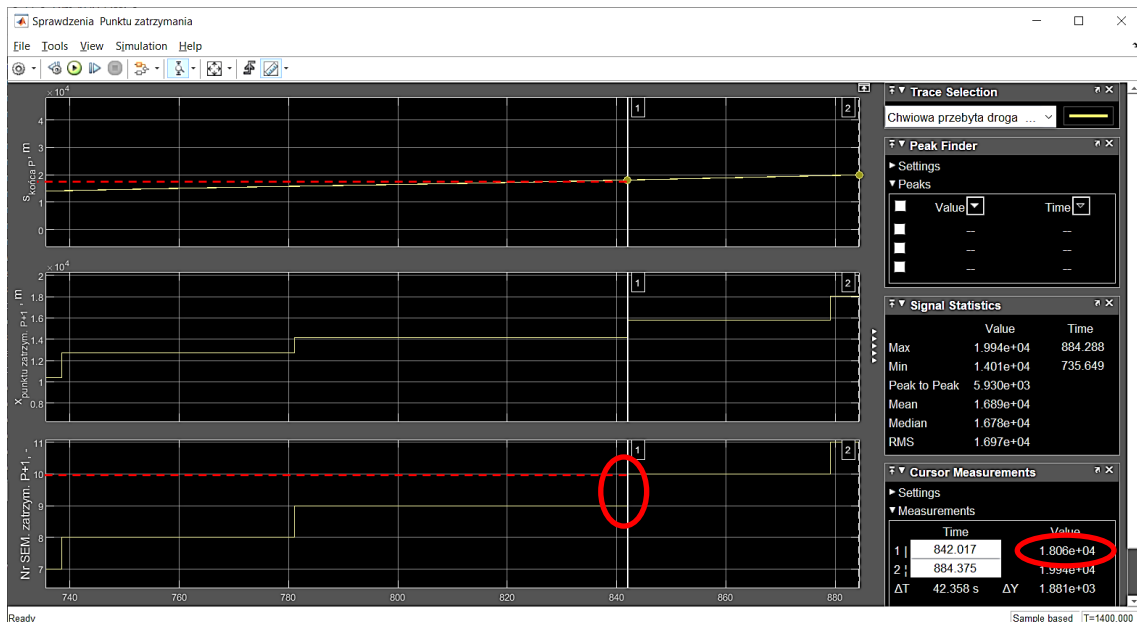
Początek szlaku:



Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla pierwszych semaforów na szlaku, pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników

Zgadza się. Koniec pociągu P minął **detektor trzeciego semafora** na współrzędnej $0,0389 \cdot 10^5$ [m] (wartość zobrazowana jako *valve* dla znacznika nr 1 = $3.896 \cdot e+03$). Nastąpiło odblokowanie **semafor nr 1**, co pozwala na jazdę pociągowi P+1 do **semafora nr 2** (x-punktu zatrzymania P+1 = $0,0241 \cdot 10^5$ [m]).

Środek szlaku:

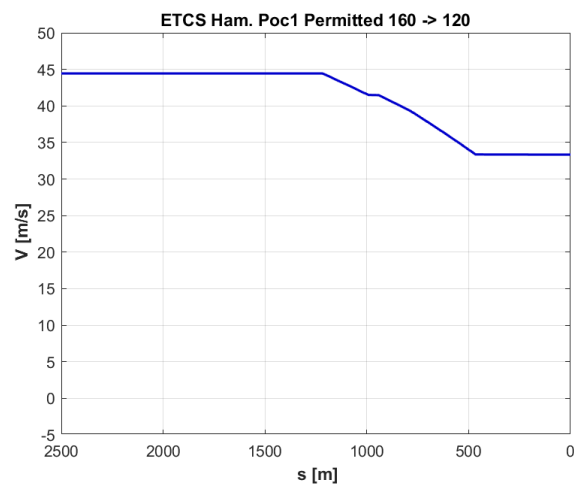
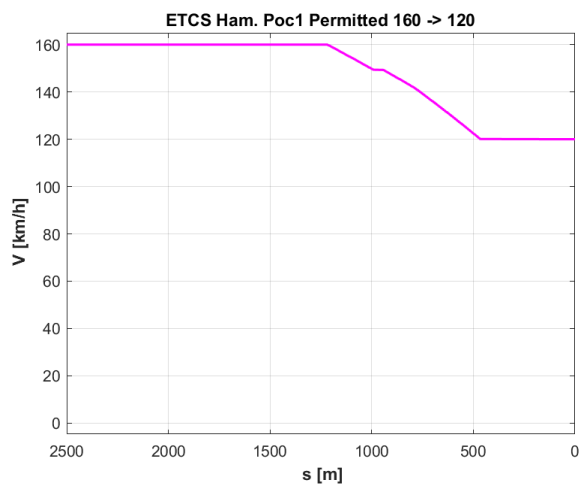
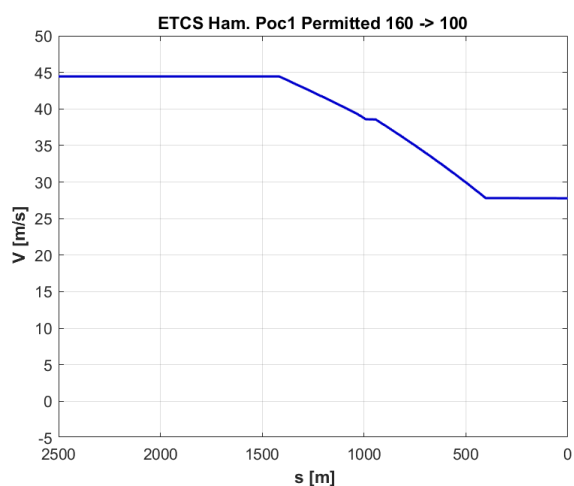
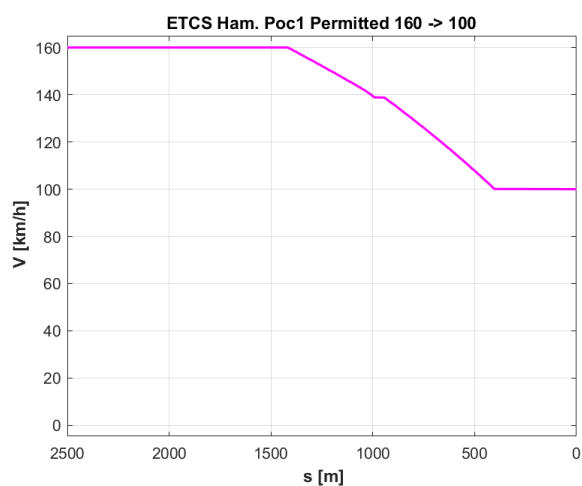
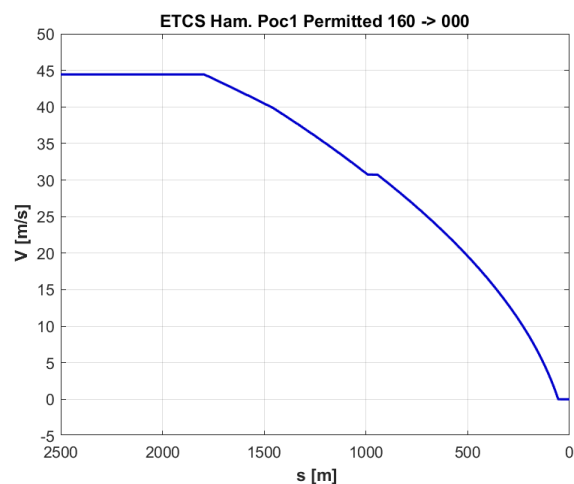
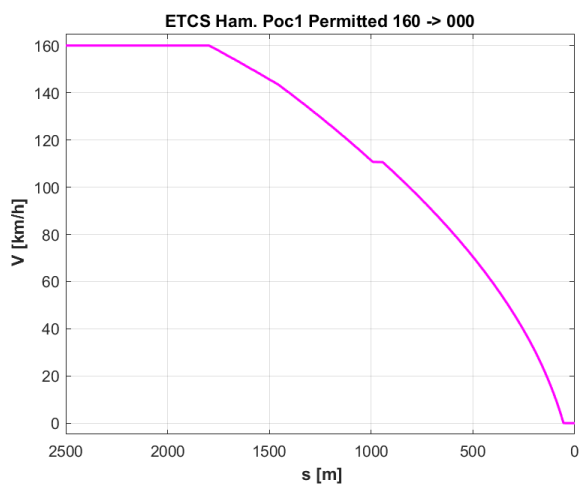


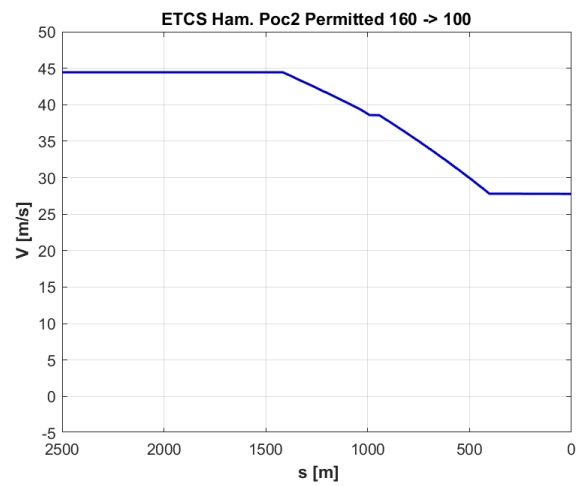
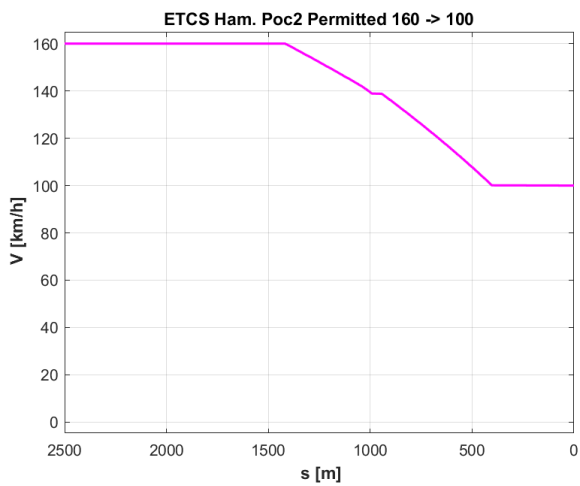
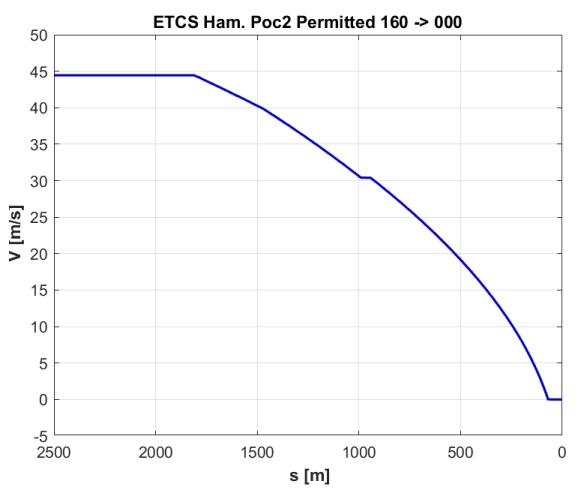
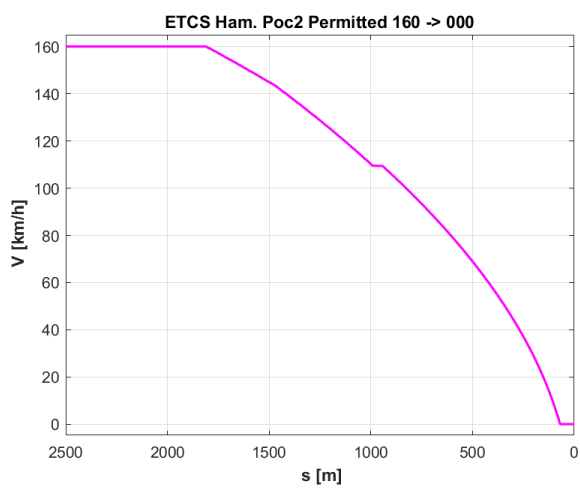
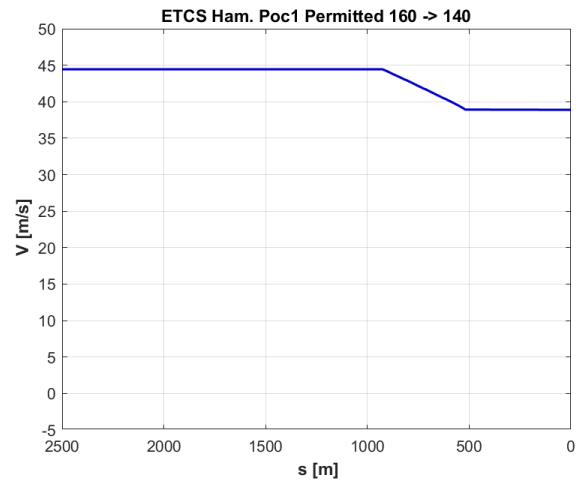
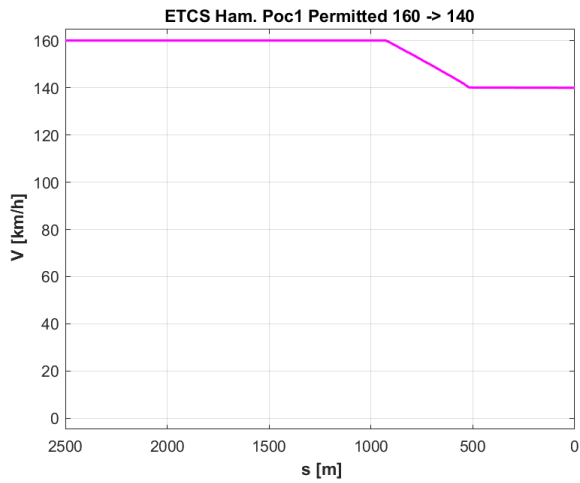
Przebiegi czasowe jazdy pociągu P oraz odpowiadające im punkty zatrzymania z nr. semafora (c) wraz z jego współrzędną „x” dla kolejnego pociągu P+1 dla środka szlaku, pokazane w oprogramowaniu MATLAB&Simulink z zaznaczeniem znaczników

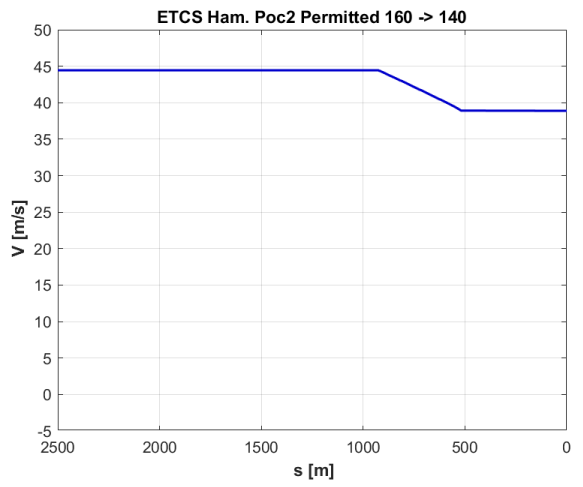
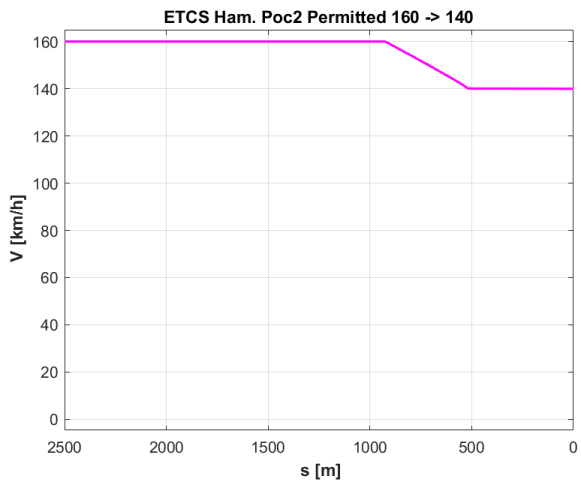
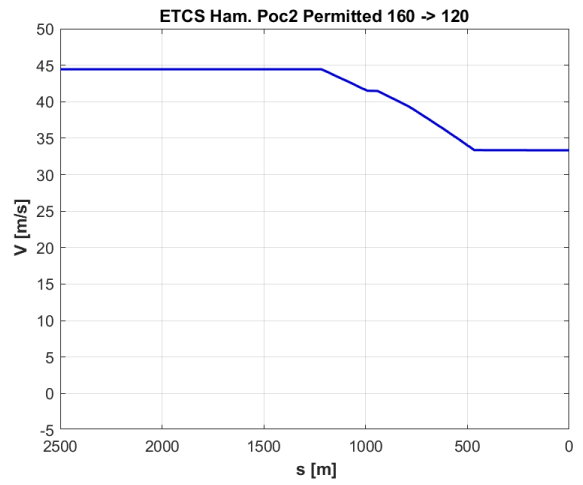
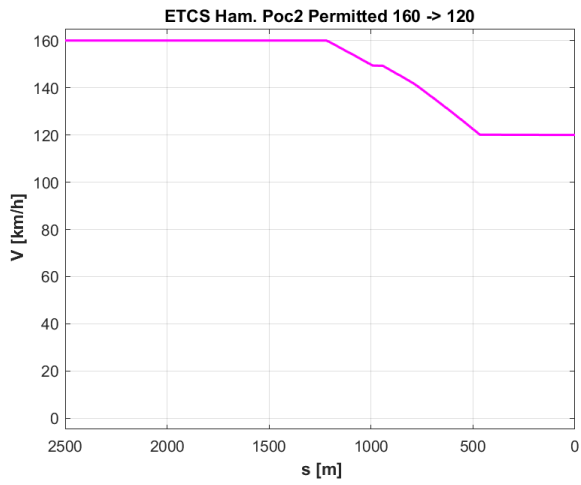
Zgadza się. Koniec pociągu P minął **detektor 11. semafora** na współrzędnej $0,1806 \cdot 10^5$ [m] (wartość zobrazowana jako *valve* dla znacznika nr 1 = $1.806 \cdot e+04$). Nastąpiło wtedy odblokowanie **semafor nr 9**, co pozwoliło na podjazd pociągowi P+1 do **semafora nr 10** (x-punktu zatrzymania P+1 = ok $0,1577 \cdot 10^5$ [m] co odpowiada wartości $1,6 \cdot e+04$ [m] zobrazowanej na skali na wykresie powyżej).

Załącznik nr 9.1.1

Rysunki z oprogramowania MATLAB&Simulink prezentujące charakterystyki hamowania ETCS uzyskane przy zastosowaniu narzędzie ERA Braking curves simulation tool (rozdział 9.1.2)



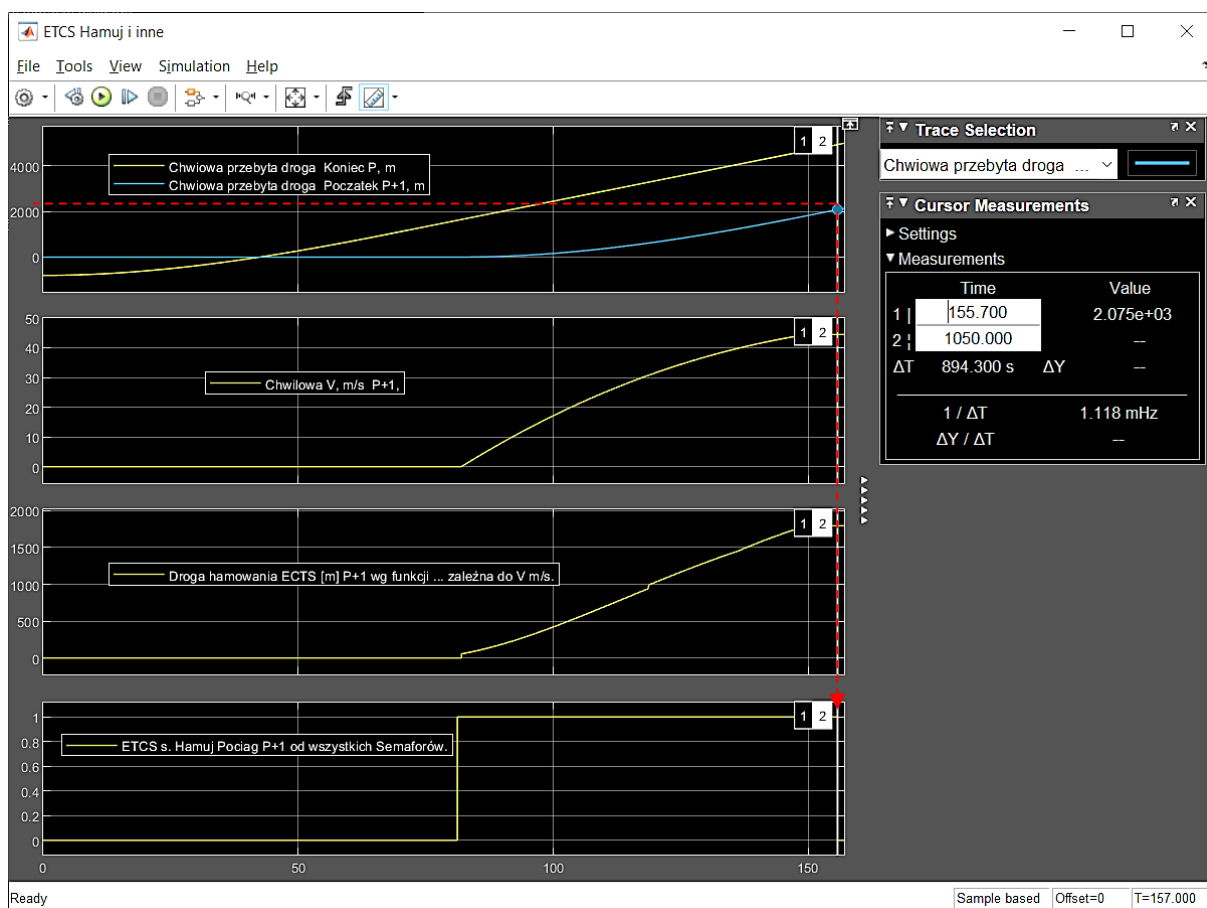




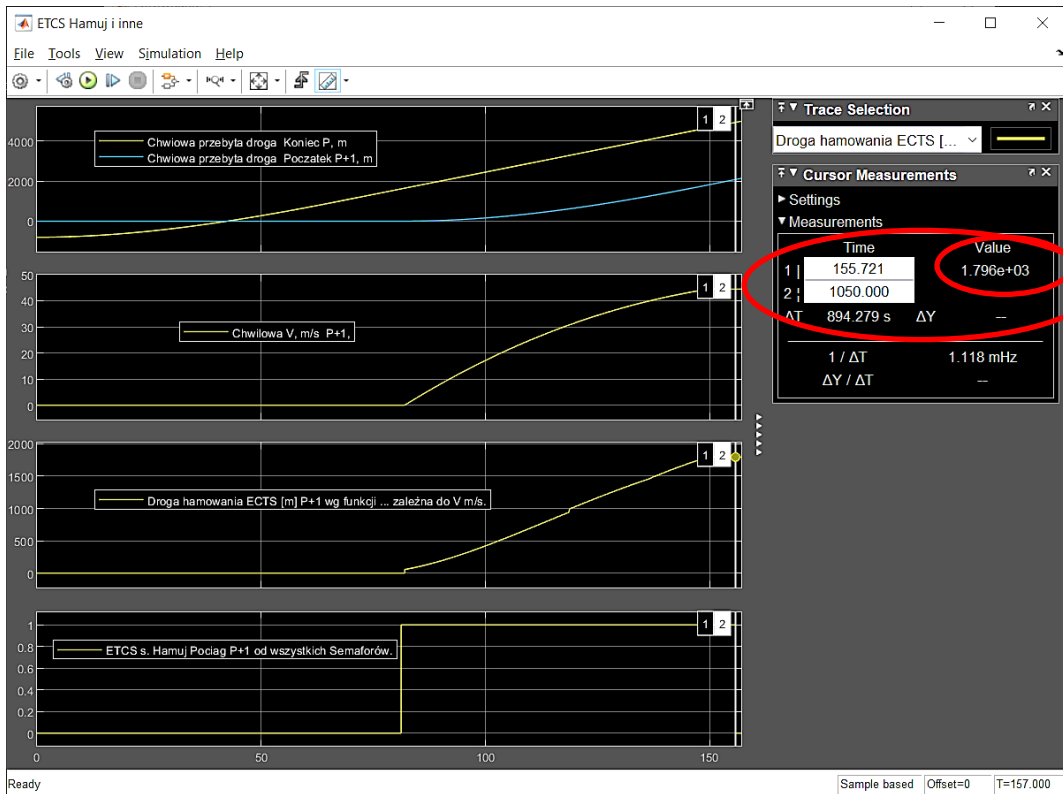
Załącznik nr 9.1.2

Rysunki z oprogramowania MATLAB&Simulink prezentujące przykładowe wyniki z symulacji dotyczące badania zdolności przepustowej (rozdział 9.3)

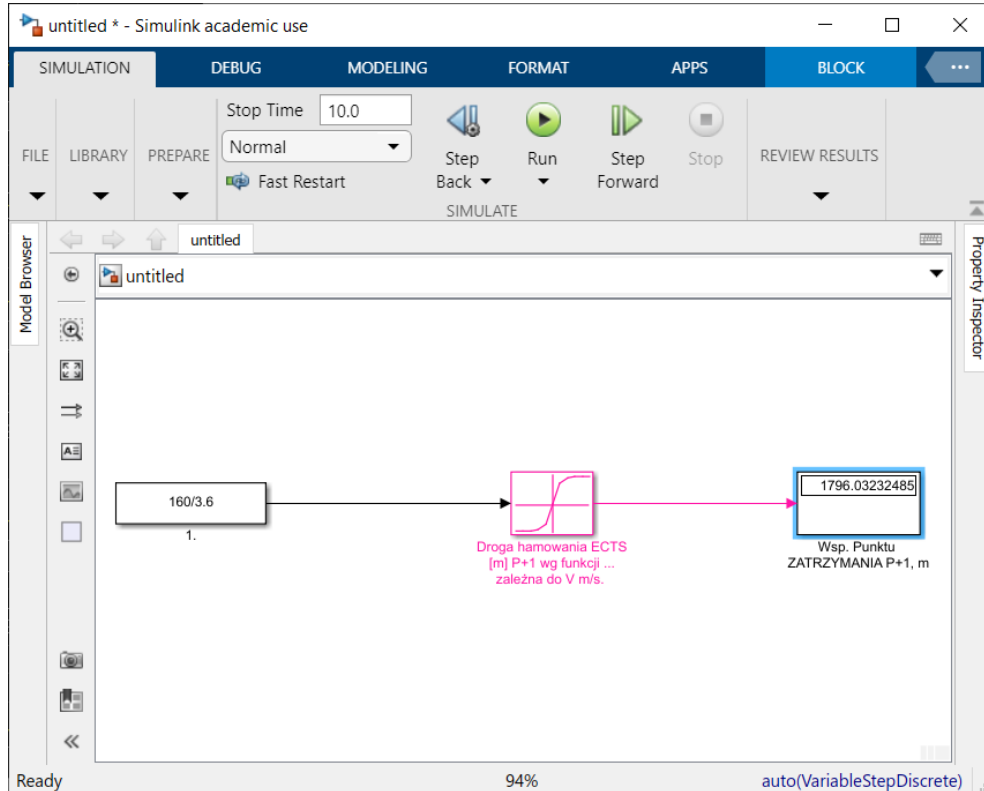
Przedstawione w niniejszym załączniku rysunki dowodzą wartości przedstawionych na odpowiednich wykresach w rozdziale 9.3).



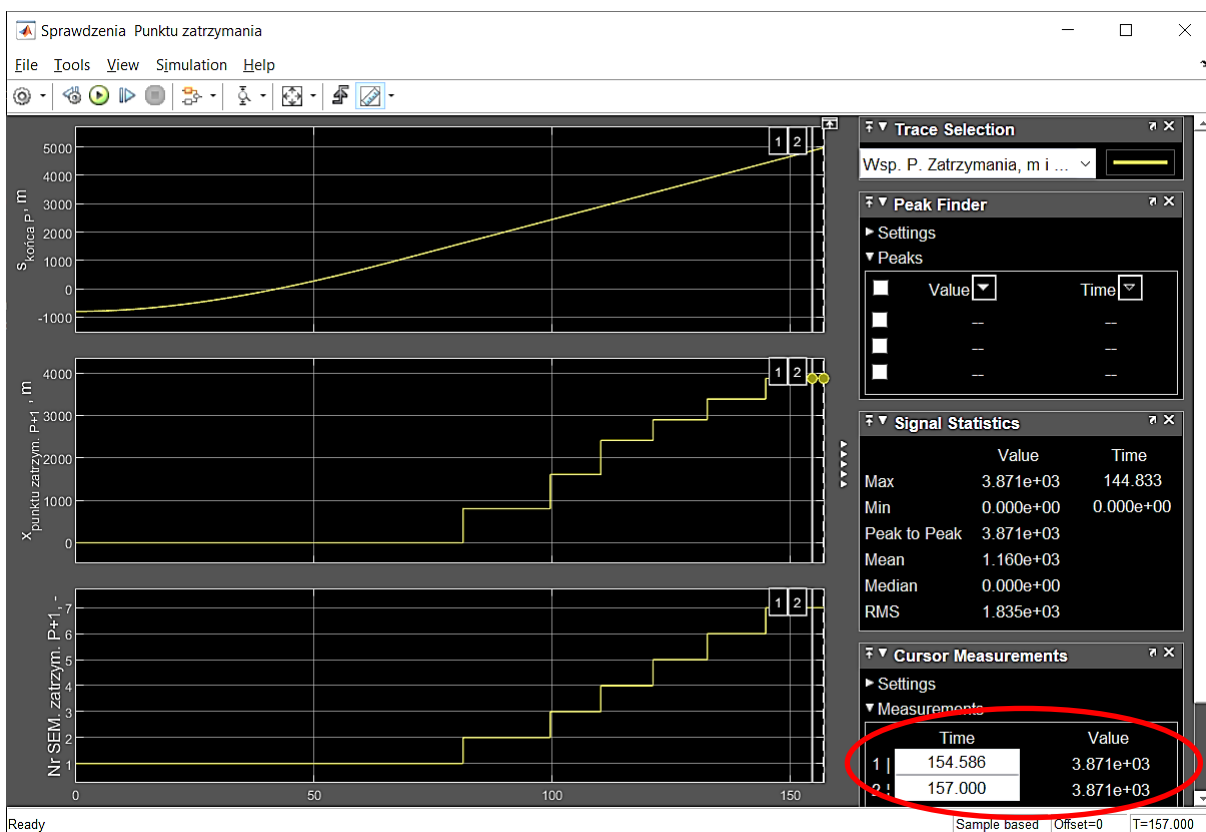
Rysunek dowodzący, że współrzędna czoła pociągu w chwili czasowej odpowiadającej zmianie sygnału „hamuj” (Rysunek 9-42) ma wartość 2075 [m].



Rysunek uzupełniający względem Rysunek 9-44a,b, dowodzący, że droga hamowania przy prędkości 160 [km/h] według przyjętej charakterystyki wynosiła 1796 [m].



Rysunek uzupełniający względem Rysunek 9-44a,b, dowodzący, że droga hamowania przy prędkości 160 [km/h] według przyjętej charakterystyki wynosiła 1796 [m].



Rysunek dowodzący, że punkt zatrzymania na Rysunek 9-43b ma współrzędną 3871 [m].

Zatem współrzędna czoła pociągu w chwili czasowej 155,7 [s] (2075 [m]) oraz długość drogi hamowania (1796 [m]) jest równa współrzędnej semafora, na którym znajduje się koniec zezwolenia na jazdę (punktu zatrzymania, 3871 [m]). Można zatem stwierdzić zgodność działania programu symulacyjnego z założeniami.