



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Mechaniczny



Imię i nazwisko autora rozprawy: mgr inż. Paweł Kortas
Dyscyplina naukowa: Budowa i Eksploatacja Maszyn

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Model układu napędowego lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Model of the diesel-electric locomotive propulsion system

Promotor <i>podpis</i>	Drugi promotor _____ <i>podpis</i>
dr hab. inż. Jacek Kropiwnicki	
Promotor pomocniczy _____ <i>podpis</i>	Kopromotor _____ <i>podpis</i>

Gdańsk, rok 2015



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Mechaniczny



OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: mgr inż. Paweł Kortas

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody*~~ na bezpłatne korzystanie z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Model układu napędowego lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną do celów naukowych lub dydaktycznych.¹

Gdańsk, dnia.....

.....
podpis doktoranta

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),² a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem drem hab. inż. Jackiem Kropiwnickim, ~~drugim promotorem, promotorem pomocniczym, kopromotorem*~~.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia.....

.....
podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody*~~ na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia.....

.....
podpis doktoranta

*) niepotrzebne skreślić

¹ Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

² Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym: Rozdział 7 Odpowiedzialność dyscyplinarna doktorantów, Art. 226.



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Mechaniczny



OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: mgr inż. Paweł Kortas

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Model układu napędowego lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Model of the locomotive diesel-electric propulsion system

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Jacek Kropiwnicki

~~**Drugi promotor rozprawy doktorskiej*:**~~

~~**Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej*:**~~

~~**Kopromotor rozprawy doktorskiej*:**~~

Data obrony:

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polski: model układu napędowego lokomotywy, lokomotywa spalinowa z przekładnią elektryczną, zużycie paliwa, obciążenie układu napędowego, metoda grafów wiązań, równania stanu

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: model of the locomotive propulsion system, diesel-electric locomotive, fuel consumption, propulsion load, bond graph method, state equations

Streszczenie rozprawy w języku polskim: W niniejszej pracy przedstawiono model układu napędowego lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną, opisany za pomocą metody Grafów Wiązań (GW) i Równań Stanu (RS). Metoda GW i RS ze względu na prostotę modyfikacji i możliwość rozbudowania o nowe elementy, umożliwia odwzorowanie pracy lokomotywy spalinowej wyposażonej w dowolny układ napędowy. Przy tworzeniu powyższego modelu wykorzystano charakterystyki poszczególnych urządzeń i podzespołów wchodzących w skład układu napędowego. Dane do tego celu zaczerpnięto z literatury, jak również wykorzystano charakterystyki stworzone na podstawie wyników badań eksploatacyjnych lokomotywy serii ST44. Badania eksploatacyjne były wykonane podczas eksploatacji pociągów towarowych na linii kolejowej 201 na odcinku Bydgoszcz Wschód – Gdynia Port.

W pracy zaprezentowano model automaszynisty, który odwzorowuje procesy decyzyjne podejmowane przez maszynistę podczas prowadzenia pociągu. W modelu automaszynisty położono szczególny nacisk na odwzorowanie specyfiki regulacji mocy układu napędowego lokomotywy spalinowej przez doświadczonych maszynistów.



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Mechaniczny



Streszczenie rozprawy w języku angielskim: This dissertation treats about a model of diesel-electric locomotive propulsion system described by the Bond Graphs and State Equations method. The Bond Graphs and State Equations method, due to the simplicity of modification and ability of developing new elements, allows the representation of the work of a locomotive equipped with any kind of drivetrain. In the process of the model creation the characteristics of particular devices and components of propulsion system were used. Some of the characteristic were taken from the literature, while others were based on the results of the research conducted on an operated ST44 locomotive. The researches were carried out during the operation of freight trains running on railway 201 from Bydgoszcz Wschod Station to Gdynia Port Station.

In this dissertation the train auto-driver model that represents the process of a driver's decision-making was presented. In the model, strong emphasis was placed on representation of the power control of locomotive propulsion system practiced by experienced drivers.

*) niepotrzebne skreślić.

**Autor gorąco dziękuje promotorowi
Panu drowi hab. inż. Jackowi Kropiwnickiemu
za serdeczną opiekę
oraz swojemu Ojcu Piotrowi Kortasowi
– maszyniście z wieloletnim stażem
i Pracownikom spółek PKP Cargo S.A.
i PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.
za pomoc podczas powstawania tej pracy.**

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	8
1. Wprowadzenie	11
1.1. Informacje wstępne	11
1.2. Współczesne lokomotywy spalinowe	14
2. Modele układów napędowych lokomotyw oraz opis warunków eksploatacji	17
- stan wiedzy	
2.1. Informacje wstępne	17
2.2. Struktura warunków eksploatacji lokomotyw	17
2.3. Wykorzystanie modeli układów napędowych w programach symulacyjnych	20
2.3.1. Program RSEL i RSDL	20
2.3.2. Program wykorzystujący model maszynisty	26
2.4. Podsumowanie	32
3. Teza i cel pracy	35
4. Założenia dla przyjętej metodyki badań	36
4.1. Informacje wstępne	36
4.2. Struktura warunków eksploatacji lokomotywy spalinowej	36
4.3. Dane pomiarowe i informacje niezbędne przy tworzeniu modelu układu napędowego	40
4.3.1. Pomiar masowego i objętościowego strumienia paliwa	40
4.3.1.1. Pomiar strumienia paliwa podczas pracy na biegu jałowym	46
4.3.1.2. Pomiar strumienia paliwa przy jeździe pod obciążeniem	48
4.4. Pomiar i rejestracja parametrów jazdy	50
4.4.1. System pomiaru i rejestracji parametrów jazdy	50
4.4.2. Obliczanie prędkości i przyspieszenia lokomotywy	52
4.5. Informacje dotyczące pracy lokomotywy	55
4.6. Droga kolejowa	55
4.7. Określanie pozycji pociągu na linii kolejowej	63
4.8. Wpływ zużycia zestawów kołowych na parametry ruchu lokomotywy	69

5. Model układu napędowego lokomotywy.....	70
5.1. Budowa układu napędowego lokomotywy.....	70
5.2. Model układu napędowego lokomotywy w formie GW.....	72
5.3. Zespół silnika spalinowego i prądnicy.....	76
5.4. Regulator mocy.....	77
5.5. Silniki trakcyjne.....	79
5.6. Przekładnia zębata.....	83
5.7. Charakterystyka trakcyjna lokomotywy.....	83
5.8. Urządzenia pomocnicze.....	84
5.9. Opory ruchu.....	88
5.10. Hamowanie pociągu.....	92
6. Model automaszynisty.....	94
6.1. Informacje wstępne.....	94
6.2. Model automaszynisty– algorytm.....	95
7. Badania symulacyjne układu napędowego lokomotywy.....	109
7.1. Informacje wstępne.....	109
7.2. Wyniki symulacji.....	109
7.3. Weryfikacja modelu automaszynisty.....	111
8. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	114
Bibliografia.....	116

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

$a_{f_r}, b_{f_r}, c_{f_r}$	– współczynniki funkcji aproksymującej jednostkowej siły oporów ruchu [-],
$A_{F_r}, B_{F_r}, C_{F_r}$	– współczynniki funkcji aproksymującej jednostkowych oporów ruchu [-],
A_L, B_L, B_L, C_L	– współczynniki funkcji aproksymującej drogi pomierzonej przez system Teloc [-],
a_{rz}	– przyspieszenie rzeczywiste pociągu [m/s^2],
a_{teloc}	– przyspieszenie obliczone na podstawie danych z systemu Teloc [m/s^2],
ATCbrk	– sygnał hamowania,
ATCcst	– sygnał jazdy wybiegiem,
cst _{start}	– sygnał wdrażający jazdę wybiegiem,
cst _{stop}	– sygnał przerywający jazdę wybiegiem,
DO_{rz}	– rzeczywista średnica toczna koła kolejowego [mm],
DO_{lok}	– średnica toczna zestawu kołowego lokomotywy [mm],
DO_{teloc}	– średnica toczna koła wpisana do rejestratora [mm],
DO_{wag}	– średnica toczna zestawów kołowych wagonu kolejowego [mm],
f_R	– jednostkowa siła oporów ruchu [N/kg],
Flag _{cst}	– sygnał dot. jazdy wybiegiem w bieżącym korku obliczeniowym,
Flag _{cst}	– sygnał dot. jazdy wybiegiem w poprzednim korku obliczeniowym,
F_H	– siła oporów układu hamulcowego [N],
F_R	– siła oporów ruchu [N],
F_T	– siła trakcyjna [N],
f_R	– jednostkowa siła oporów ruchu [N/kg],
Ge	– masowy strumień paliwa [kg/h],
$G_{(i)}$	– pochylenie linii kolejowej [%o],
g	– przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
H_k	– wysokość końca pociągu [m],
H_p	– wysokość czoła pociągu [m],
i	– krok obliczeniowy [-],
i_{zas}	– pochylenie zastępcze [%o],
I_{pg}	– natężenie prądu w prądnicy głównej [A],
I_{st}	– natężenie prądu w silniku trakcyjnym [A],
j, k, l, m	– liczba odpowiednio: zestawów kołowych lokomotywy, silników trakcyjnych, wagonów, zestawów kołowych wagonów [-],
J_{izklok}	– moment bezwładności i-tego zestawu kołowego lokomotywy [$kg \cdot m^2$],
J_{lzkwa}	– moment bezwładności l-tego zestawu kołowego wagonu [$kg \cdot m^2$],
J_{jwir}	– moment bezwładności j-tego wirnika silnika trakcyjnego [$kg \cdot m^2$],
k_{pol}	– współczynnik politropy [-],
L_p	– długość pociągu [m],
M_{st}	– moment obrotowy silnika trakcyjnego [N·m],

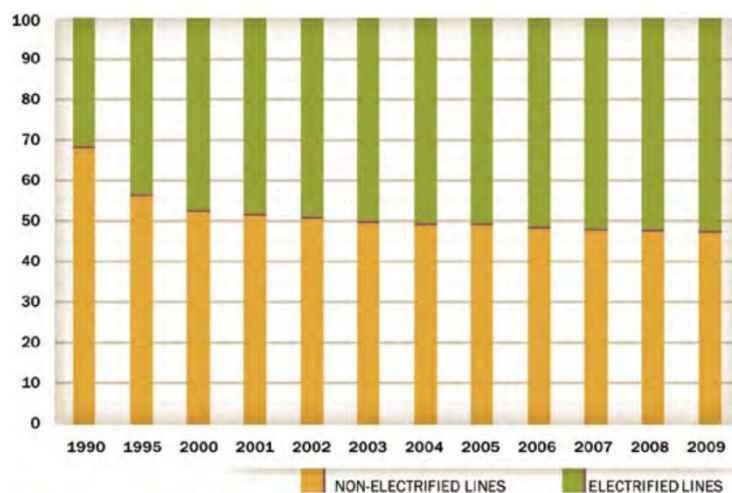
M_{zk}	–	moment obrotowy zestawu kołowego [N·m],
m_{kwa_g}	–	masa k-tego wagonu [kg],
m_{lok}	–	masa lokomotywy [kg],
m_p	–	masa pociągu [kg],
m_z	–	masa zredukowana [kg],
\bar{m}_{prz}	–	średnia wartość rzeczywistej ilości zużytego paliwa [kg],
n	–	prędkość obrotowa [obr/min],
n_{spr}	–	prędkość obrotowa wału korbowego sprężarki [obr/min],
n_{went}	–	maksymalna prędkość obrotowa wentylatora [obr/min],
n_{went1}	–	prędkość obrotowa wentylatora [obr/min],
P	–	wektor nastaw i parametrów konstrukcyjnych,
P_{el}	–	moc elektryczna prądnicy głównej [kW],
P_{went}	–	moc znamionowa wentylatora przy prędkości n_{went} [kW],
P_{went1}	–	moc znamionowa wentylatora przy prędkości n_{went1} [kW],
P_{spr}	–	moc sprężarki [kW],
P_{sprt}	–	moc sprężarki teoretyczna [kW],
p_{it}	–	średnie ciśnienie indykowane [MPa],
p_0	–	ciśnienie w króćcu ssawnym [MPa],
p_k	–	ciśnienie w króćcu tłocznym [MPa],
S_{brk}	–	droga hamowania [m],
S_{lead}	–	odległość punktu decyzji od sygnalizatora [m],
s	–	współrzędna położenia czoła pociągu [m],
S_{rz}	–	rzeczywista droga przebyta przez lokomotywę [m],
S_{teloc}	–	droga przebyta przez lokomotywę, zmierzona przez rejestrator Teloc [m],
S_{OP}	–	długość odcinka pomiarowego wg dokumentacji drogi kolejowej [m],
$S_{OPteloc}$	–	długość odcinka pomiarowego zmierzona przez rejestrator Teloc [m],
S_{sym}	–	przebyty dystans wg symulacji [m],
t	–	czas [h],
t_{prac}	–	czas pracy [s],
U	–	wektor wymuszeń (wejść),
U_{pg}	–	napięcie na zaciskach prądnicy głównej [V],
U_N	–	nastawa mocy układu napędowego [-],
U_H	–	nastawa stopnia hamowania [-],
u	–	nastawa układu napędowego [-],
V	–	prędkość [m/s],
V_{dop}	–	prędkość dopuszczalna [m/s],
V_{pz}	–	objętość paliwa w zbiorniku [dm ³],
V_{rz}	–	prędkość rzeczywista [m/s],
V_{sym}	–	lokomotywy wg symulacji [m/s],

\dot{V}_{sk}	–	wydajność skokowa sprężarki [m^3/h],
V_{teloc}	–	prędkość obliczona na podstawie danych z sytemu Teloc [m/s],
v	–	prędkość [m/s],
v_a^+	–	górna odchyłka prędkości [m/s],
v_a^-	–	dolna odchyłka prędkości [m/s],
v_{b1}	–	prędkość dopuszczalna [m/s],
v_{b2}	–	prędkość graniczna wdrażająca hamownie [m/s],
v_{ATC}	–	prędkość dopuszczalna wg systemu ATC [m/s],
X	–	wektor stanu,
Y	–	wektor wyjść,
Z	–	wektor zakłóceń,
z_{st}	–	liczba zębów koła zębatego silnika trakcyjnego [-],
z_{zk}	–	liczba zębów koła zębatego zestawu kołowego [-],
β	–	stopień hamowania [-],
γ	–	stopień hamowania [-],
δ_{mprz}	–	błąd względny [-],
η_{pz}	–	sprawność przekładni zębatej [-],
η_{spr}	–	sprawność całkowita sprężarki [-],
η_{st}	–	sprawność silnika trakcyjnego [-],
λ_d	–	wskaźnik dławienia [-],
λ_{dst}	–	stopień dostarczenia [-],
λ_p	–	współczynnik podgrzania [-],
λ_{sz}	–	wskaźnik szczelności [-]
λ_v	–	wskaźnik przestrzeni szkodliwej [-],
λ_p^{ppr}	–	udział czasu pracy przesyłowej [-],
λ_p^{ppm}	–	udział pracy manewrowej [-],
λ_p^{ppp}	–	udział pracy pociągowej w trakcji pojedynczej [-],
λ_p^{ppw}	–	udział pracy pociągowej w trakcji wielokrotnej lub wspomagającej [-],
σ_{mprz}	–	odchylenie standardowe różnicy rzeczywistej ilości zużytego paliwa i ilości zużytego paliwa wg symulacji [kg],
$\sigma_{\bar{m}_{prz}}$	–	błąd kwadratowy odwzorowania rzeczywistej ilości zużytego paliwa [kg],
$\sigma_{S_{rz}}$	–	odchylenie standardowe wyników przebytej drogi [m],
$\sigma_{\bar{s}_{rz}}$	–	błąd kwadratowy wyników przebytej drogi [m].

1. WPROWADZENIE

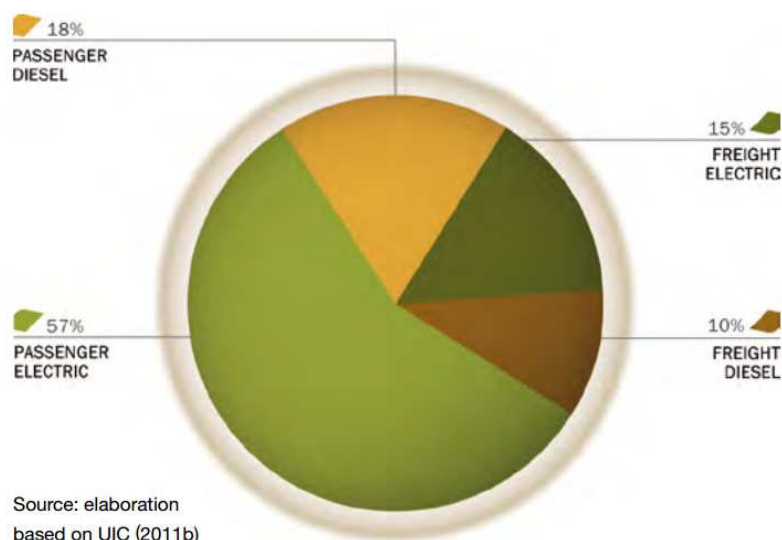
1.1. Informacje wstępne

Pomimo zaobserwowanego wzrostu zainteresowania w transporcie kolejowym trakcją elektryczną, po zaistniałym w latach 70-tych kryzysie paliwowym, ok. 48% linii kolejowych w krajach EU27 pozostaje wciąż nie zelektryfikowana (rys. 1.1).



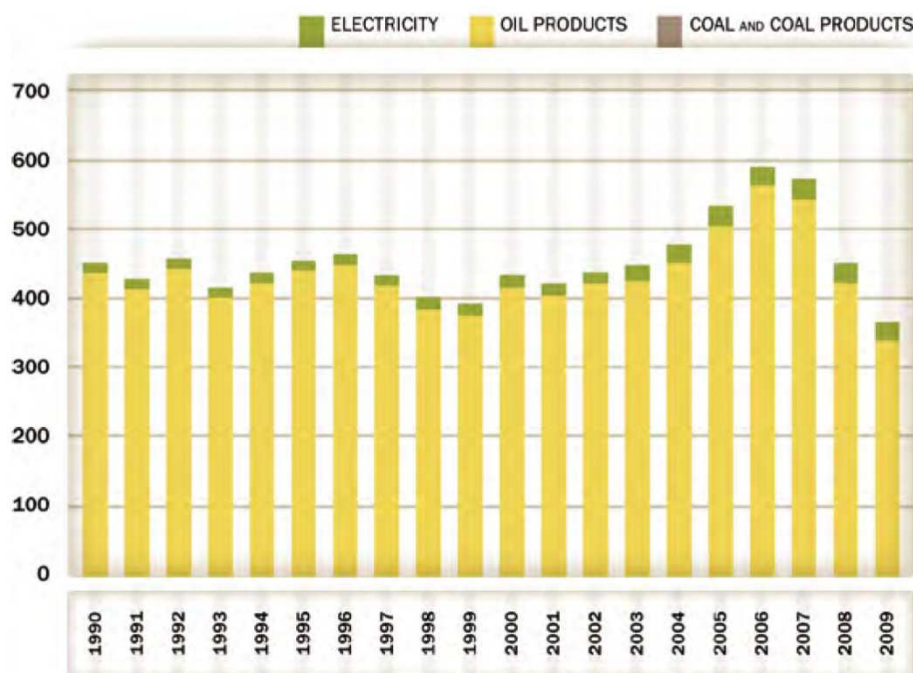
Rys. 1.1. Udział długości linii kolejowych zelektryfikowanych i niezelektryfikowanych w krajach EU27 [37]

Należy jednak mieć na uwadze, że transport zarówno pasażerów jak i towarów na liniach niezelektryfikowanych jest mniej intensywny niż w przypadku linii zelektryfikowanych, dlatego też energia wykorzystana w trakcji spalinowej stanowi 28% całkowitego zużycia energii na cele trakcyjne (rys. 1.2) [37].



Rys. 1.2. Zużycie energii na cele trakcyjne w zależności od trakcji i rodzaju transportu kolejowego [37]

Na rysunku 1.3 przedstawiono zmianę sumarycznego zużycia energii na cele trakcyjne w transporcie kolejowym Stanów Zjednoczonych w okresie czasu od 1990 do 2009 roku.



Rys. 1.3. Sumaryczne zużycie energii na cele trakcyjne w transporcie kolejowym Stanów Zjednoczonych wyrażone w PJ (10^{15} J) [37]

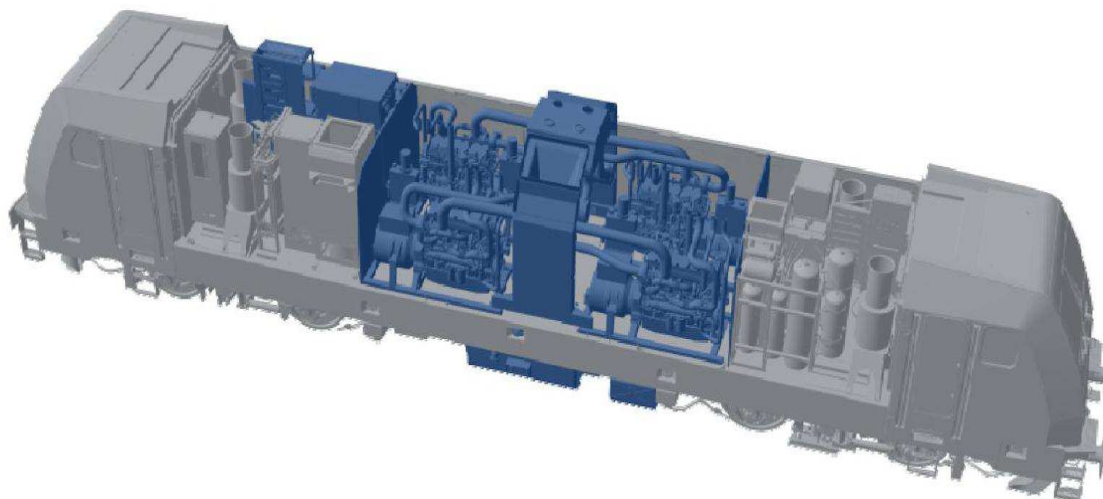
Pomimo systematycznego wzrostu udziału trakcji elektrycznej blisko 93% energii wykorzystywanej w celach trakcyjnych przypada w Stanach Zjednoczonych na spalinowe pojazdy kolejowe. Należy zaznaczyć, że transport kolejowy w wielu krajach, jak np. Kanada wciąż oparty jest wyłącznie na trakcji spalinowej.

Wzrost świadomości ekologicznej spowodował intensyfikację prac badawczo-rozwojowych, mających na celu ograniczenie szkodliwego oddziaływania transportu, w tym także transportu kolejowego na środowisko poprzez redukcję, emisji CO_2 i związków toksycznych do atmosfery [64]. Należy zaznaczyć redukcja emisji CO_2 pociąga za sobą obniżenia zużycia energii, co oprócz aspektu ekologicznego powoduje obniżenie kosztów transportu. Jest to szczególnie istotne w projektowaniu systemów logistycznych [38, 39].

Obecnie prowadzi się badania nad zastosowaniem paliw alternatywnych, głównie pochodzenia roślinnego [66, 23]. Innym kierunkiem rozwoju jest ulepszenie silników spalinowych. Zmniejszanie emisji związków toksycznych osiąga się między innymi przez poprawę procesu spalania, a także poprzez zastosowanie katalitycznych układów oczyszczania spalin, wyposażonych dodatkowo w filtry cząsteczek stałych [31, 35, 62, 82].

Ogólną sprawność energetyczną układów napędowych pojazdów kolejowych można podnieść poprzez użycie ciepła odpadowego, którego źródłem są gazy wydechowe [32, 92]. Na rynku dostępny jest system o nazwie handlowej SteamTrac, opracowany przez koncern Voith AG [84]. System ten bazuje na wykorzystaniu obiegu Clausiusa-Rankine'a, w którym woda stanowi czynnik roboczy. Natomiast jako ekspander wykorzystano parowy silnik tłokowy.

Jedną z metod redukcji zużycia paliwa jest ograniczenie eksploatacji silnika spalinowego w stanie biegu jałowego oraz częściowego obciążenia, w którym silnik zazwyczaj wykazuje niższą sprawność. Realizowane jest to poprzez zastąpienie jednego silnika spalinowego dużej mocy wieloma mniejszymi [53]. W przypadku częściowego obciążenia układu napędowego lokomotywy, określona liczba silników spalinowych jest wyłączana przez maszynistę lub automatycznie poprzez system zarządzania mocą. Pod koniec 2012 roku rozpoczęto seryjną produkcję lokomotywy Bombardier Traxx Diesel Multi-Engine (rys. 1.4), w której zastosowano cztery silniki z zapłonem samoczynnym Caterpillar C18.



Rys. 1.4. Schemat lokomotywy Bombardier Traxx Diesel Multi-Engine [53]

Prowadzi się również badania dotyczące zastosowania w układach napędowych pojazdów kolejowych zasobników energii odzyskiwanej w trakcie hamowania [8, 16, 65, 36, 69, 81]. Przeprowadzone analizy teoretyczne, a także badania eksploatacyjne eksperymentalnych pojazdów wykazują dużą przydatność wspomnianego rozwiązania, zwłaszcza podczas wykonywania prac manewrowych. Należy zaznaczyć, że w przypadku lokomotyw wyposażonych w przekładnię elektryczną zastosowanie zasobników energii w postaci akumulatorów elektrycznych nie wiąże się z koniecznością wprowadzania istotnych zmian w układzie napędowym pojazdu.

Obecnie redukcję zużycia paliwa próbuje się osiągnąć poprzez poprawę efektywności energetycznej eksploatacji pojazdów kolejowych [4, 17, 22, 25, 29, 55, 56, 78, 83, 89, 93]. Poprawę efektywności energetycznej eksploatacji uzyskuje się głównie poprzez poprawę organizacji ruchu na danej linii kolejowej, polegającej na odpowiedniej synchronizacji ruchu pociągów. Synchronizacja ruchu ma na celu redukcję liczby hamowań pociągów. Wpływ na poziom efektywności eksploatacyjnej ma technika prowadzenia pociągów przez maszynistów. Technikę tą poprawia się poprzez okresowe szkolenia maszynistów. Obecnie na rynku dostępne są systemy wspomagające pracę maszynisty, działające w sposób zbliżony do systemów rozpowszechnionych w transporcie kołowym [47, 70, 10]. Głównym zadaniem systemów wspomagających pracę maszynistów jest informowanie o optymalnej prędkości

jazdy, wymaganej nastawie mocy układu napędowego, czy układu hamulcowego [43]. Prowadzi się również badania nad urządzeniami całkowicie przejmującymi proces prowadzenia pociągu.

Podstawą systemów, wspomagających pracę maszynisty są modele układów napędowych, które wykorzystywane są w procesach decyzyjnych, zachodzących w trakcie ich działania. Modele układów napędowych pojazdów kolejowych są również wykorzystywane w symulatorach jazdy pociągów, które znalazły zastosowanie w procesie szkolenia maszynistów.

Należy zaznaczyć, że proces poprawy efektywności eksploatacyjnej nie wiąże się z koniecznością ponoszenia wysokich nakładów inwestycyjnych, jakie towarzyszą poprawie efektywności energetycznej, polegającej na wprowadzaniu zmian konstrukcyjnych w pojazdach kolejowych. Powoduje to, że ten kierunek redukcji zużycia energii w transporcie kolejowym cieszy się największym zainteresowaniem.

1.2. Współczesne lokomotywy spalinowe

Współczesne lokomotywy spalinowe dzielimy na dwie zasadnicze grupy: lokomotywy wykorzystywane w pracy manewrowej oraz lokomotywy wykorzystywane w pracy pociągowej.

Ponieważ praca manewrowa wiąże się z koniecznością częstej zmiany kierunku jazdy, w celu poprawy komfortu pracy maszynisty lokomotywy manewrowe posiadają pojedynczą kabinę. Na rys. 1.5 - 1.8 przedstawiono przykłady lokomotywy manewrowych, które można spotkać na terenie Polski.

Lokomotywy wykorzystywane w pracy pociągowej (rys. 1.9 - 1.12) charakteryzują się większą mocą i prędkością konstrukcyjną. Należy zaznaczyć, że w przypadku lekkich pociągów do pracy pociągowej wykorzystuje się również lokomotywy manewrowe, które ze względu na mniejszą moc, charakteryzują się mniejszym zużyciem paliwa.



Rys. 1.5. SM42 18D [67]
Rodzaj przekładni: elektryczna AC/DC
Moc silnika spalinowego: 563 kW
Prędkość maksymalna: 90 km/h



Rys. 1.6. ST48 16D [67]
Rodzaj przekładni: elektryczna DC/DC
Moc silnika spalinowego: 880 kW
Prędkość maksymalna: 90 km/h



Rys. 1.7. SM42 6Dk [15]
Rodzaj przekładni: elektryczna AC/DC
Moc silnika spalinowego: 2x403 kW
Prędkość maksymalna: 90 km/h

Rys. 1.8. Voith Gravita 10CC [85]
Rodzaj przekładni: hydrokinetyczna
Moc silnika spalinowego: 1200 kW
Prędkość maksymalna: 100 km/h





Rys. 1.9. ST44 [30]
 Rodzaj przekładni: elektryczna DC/DC
 Moc silnika spalinowego 1470 kW
 Prędkość maksymalna 100 km/h

Rys. 1.10. EMD Class 66 [88]
 Rodzaj przekładni: elektryczna AC/DC
 Moc silnika spalinowego 2,420 kW
 Prędkość maksymalna 105 km/h



Rys. 1.11. Bombardier Traxx F140 DE [88]
 Rodzaj przekładni: elektryczna AC/AC
 Moc silnika spalinowego 2,200 kW
 Prędkość maksymalna 140 km/h

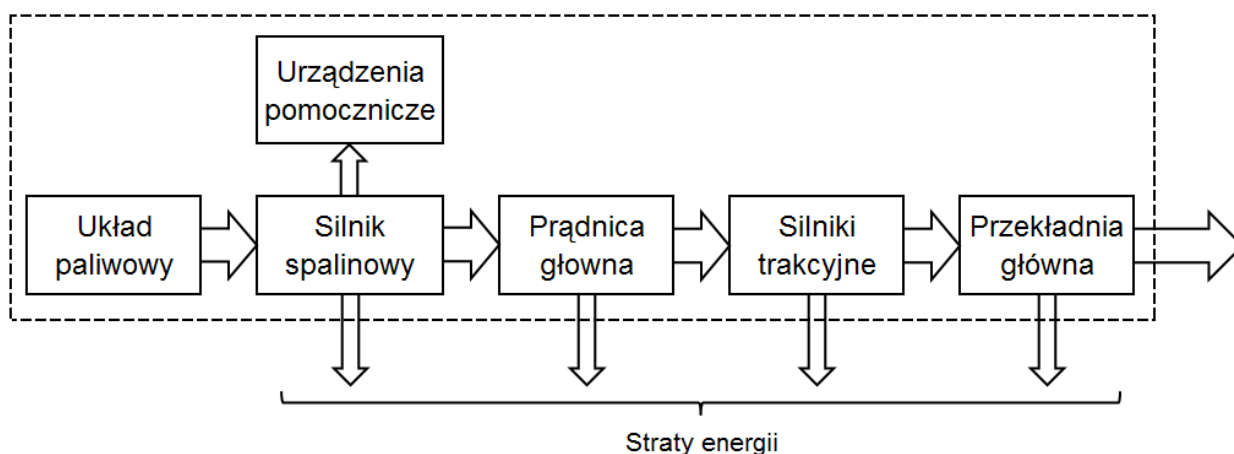
Rys. 1.12. Voith Maxima 40CC [85]
 Rodzaj przekładni: hydrokinetyczna
 Moc silnika spalinowego 3600 kW
 Prędkość maksymalna 120 km/h



2. MODELE UKŁADÓW NAPĘDOWYCH LOKOMOTYW ORAZ OPIS WARUNKÓW EKSPLOATACJI– STAN WIEDZY

2.1. Informacje wstępne

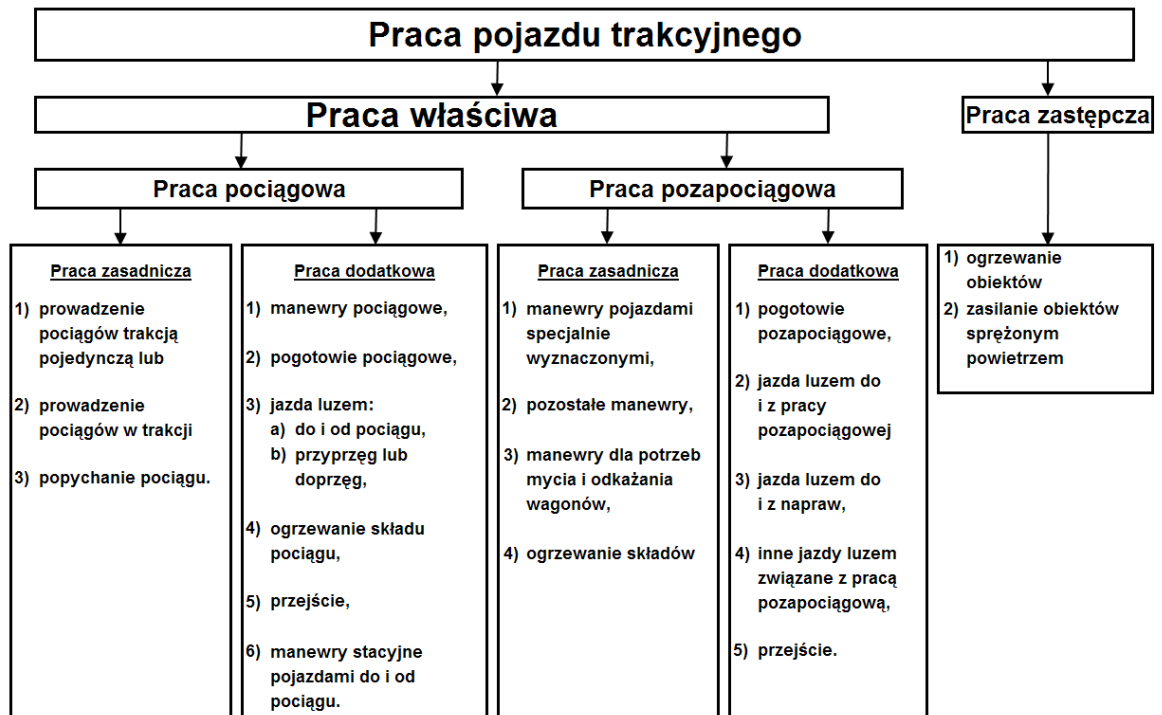
Najliczniejszą grupą lokomotyw spalinowych eksploatowanych w Polsce są lokomotywy z przekładnią elektryczną [14]. Schemat przepływu energii w tego typu lokomotywach został przedstawiony na rys. 2.1. Energia cieplna uwolniona w procesie spalania paliwa w cylindrze silnika spalinowego jest zamieniana na energię mechaniczną. Głównym odbiornikiem energii mechanicznej jest prądnica główna, w której następuje konwersja tej pracy na energię elektryczną. Następnie w silnikach trakcyjnych energia elektryczna jest zamieniana ponownie na pracę mechaniczną, przekazywaną za pomocą przekładni zębatej do zestawów kołowych. Energia mechaniczna wytworzona w silniku spalinowym wykorzystywana jest również do napędu urządzeń pomocniczych takich, jak sprężarka powietrza, wentylatory układu chłodzenia silnika spalinowego, itd.



Rys. 2.1. Schemat układu napędowego lokomotywy spalinowej [27]

2.2. Struktura warunków eksploatacji lokomotyw

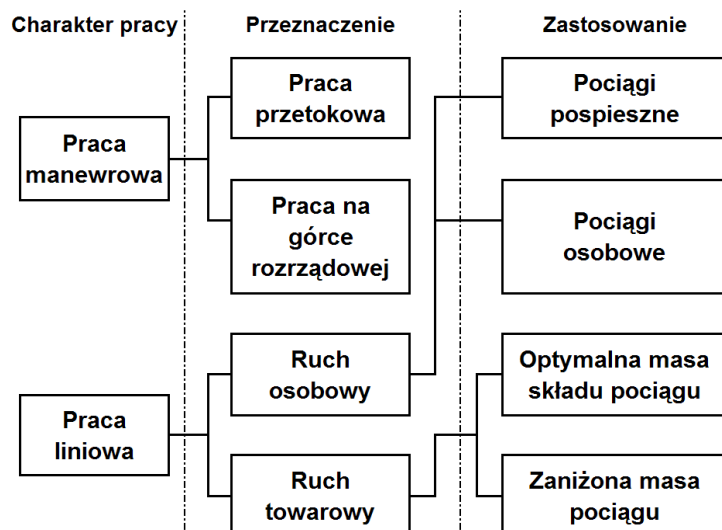
W trakcie użytkowania pojazdów trakcyjnych, do których zalicza się lokomotywy spalinowe, pojawia się konieczność rozwiązywania szeregu problemów eksploatacyjnych i ekonomicznych, np. planowania przeglądów i obliczania kosztów eksploatacji. Na rys 2.2 [Car07] przedstawiono strukturę warunków pracy pojazdu trakcyjnego wykorzystywaną przez PKP CARGO S.A. do realizacji wymienionych wyżej celów.



Rys. 2.2. Struktura warunków eksploatacji pojazdu trakcyjnego wg [72]

Przedstawiona struktura (rys. 2.2) jest bardzo rozbudowana. Wynika to z jej wykorzystywania nie tylko do analizy pracy samych lokomotyw, ale także do analizy pracy drużyn trakcyjnych, do których zaliczają się maszyniści i pomocnicy maszynistów. Ta struktura uwzględnia wszystkie możliwe rodzaje pracy pojazdu, nawet obecnie niewykorzystywane. Dotyczy to pracy zastępczej, w skład której wchodzi ogrzewanie obiektów oraz zasilanie obiektów sprężonym powietrzem. Ponadto, w przypadku analizy wyłącznie pojazdu trakcyjnego, stosowanie powyższego podziału może sprawiać pewne problemy. Wynika to z uwzględnienia pracy manewrowej zarówno w pracy pociągowej, jak i pozapociągowej, chociaż z punktu widzenia np. obciążenia silnika spalinowego oba przypadki pracy manewrowej niczym się od siebie nie różnią.

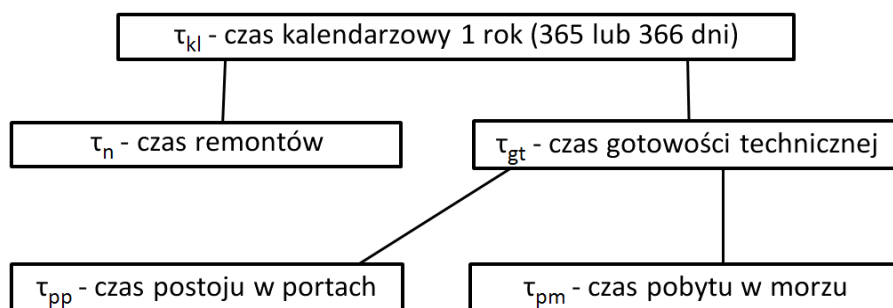
Znacznie prostsza struktura pracy została przedstawiona na rys. 2.3. Ta struktura [27] zawiera podział pracy lokomotywy na manewrową oraz liniową i nie zawiera np. pracy przesyłowej, polegającej na jeździe bez wagonów. Zaproponowana w pracy [27] klasyfikacja obciążeń lokomotyw spalinowych umożliwi przeprowadzenie doboru najlepszej lokomotywy dla analizowanego charakteru pracy (manewrowa lub liniowa), ze względu na minimalizację zużycia paliwa. W tej metodzie praca lokomotywy opisywana jest funkcją gęstości prawdopodobieństwa obciążenia lokomotywy traktowanego jako zmienna losowa.



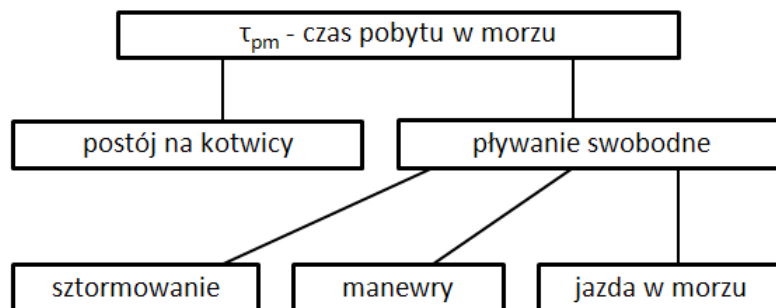
Rys. 2.3. Klasyfikacja obciążeń lokomotyw spalinowych wg [27]

Na rys. 2.4 przedstawiona została struktura warunków eksploatacji dla statku towarowego [5], który tak jak samochody osobowe i ciężarowe, autobusy, maszyny robocze i lokomotywy spalinowe napędzane tłokowymi silnikami spalinowymi stanowi obiekt autonomiczny energetycznie środek transportu [6]. Zadaniem silników napędowych we wszystkich tych grupach pojazdów jest zapewnienie możliwości ruchu (jazdy, pływania) i przewożenia określonych ładunków, w niektórych przypadkach również realizacji innych procesów technologicznych (chłodzenie ładunku, wydobywanie urobku, połowy, i in.) [6].

a)



b)



Rys. 2.4. Ogólna struktura warunków eksploatacji statków [5]:

a) warunki eksploatacji statków w okresie 1 roku,

b) warunki eksploatacji statków podczas pobytu w morzu

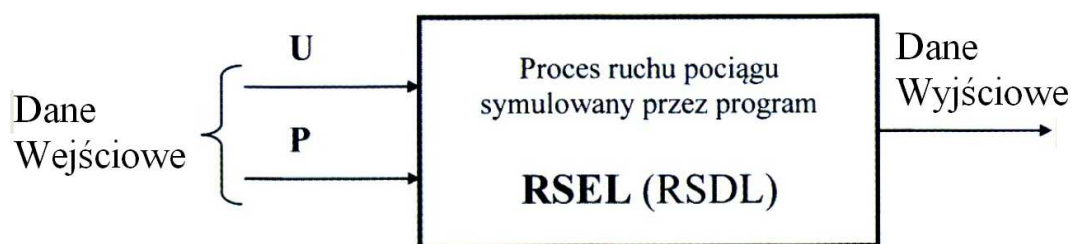
Zaletą powyższej struktury jest fakt, że obejmuje praktycznie wszystkie warunki eksploatacji jednostki pływającej. Umożliwia to, po wprowadzeniu odpowiednich współczynników udziału, dokładną analizę energetyczną statków.

2.3. Wykorzystanie modeli układów napędowych w programach symulacyjnych

2.3.1. Program RSEL i RSDL

Istotną składową kosztów przewozu ładunków transportem kolejowym są koszty eksploatacyjne i związane z nimi koszty energii [40]. Wpływ na zużycie energii przez układ napędowy lokomotywy ma wiele czynników podczas realizacji zadania przewozowego, polegającego na prowadzeniu pociągu ze stacji początkowej do stacji końcowej. Należą do nich masa pociągu, średnia prędkość przejazdu czy profil linii kolejowej, na który składa się nachylenie oraz parametry łuków. Znaczna liczba przedstawionych czynników powoduje, że w praktyce określenie zapotrzebowania na energię realizowane jest przy wykorzystaniu symulacji komputerowych.

Na rys. 2.5 przedstawiono przykładowy schemat programu do symulacji jazdy pociągu RSEL (Run Simulation of Electric Locomotives) i RSDL (Run Simulation of Diesel Locomotives) [51].

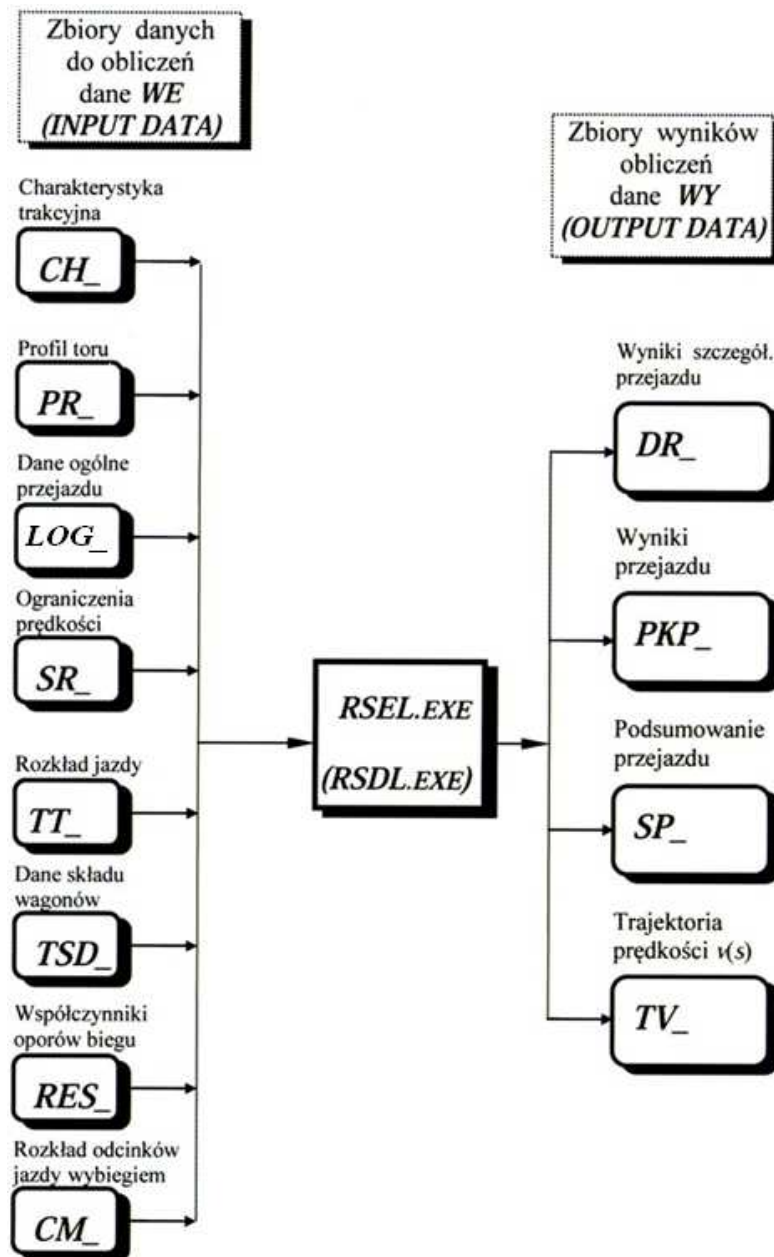


Rys. 2.5. Schemat ideowy symulatorów jazdy [51]

Modele te w sposób szczegółowy zostały opisane w publikacji [52]. Poniżej przytoczono jedynie informacje ogólne mające na celu zaprezentowanie istoty eksperymentów symulacyjnych.

Zbiór danych wejściowych został podzielony na podzbiór wielkości sterujących U takich jak siła trakcyjna i podzbiór parametrów P, obejmujący zarówno parametry pojazdu jak i drogi kolejowej. Dane wyjściowe, będące wynikiem symulacji zawierają przebiegi zmiennych stanu pociągu oraz parametry jego jazdy.

Dane wejściowe i wyjściowe zostały przedstawione na schemacie przetwarzania głównych programów symulacyjnych (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Schemat przetwarzania głównych programów symulacyjnych [51]

Przedstawiony jako pierwszy z pośród danych wejściowych zbiór CH zawiera główne parametry techniczne, jak masa, liczba zestawów kołowych, prędkość dopuszczalną. Ponadto w zbiorze tym zawarto współczynniki oporów ruchu lokomotywy, a także charakterystyki trakcyjne jak: charakterystykę siły pociągowej w funkcji prędkości $F(v)$, czy charakterystykę natężenia prądu elektrycznego silników trakcyjnych $I(v)$. W przypadku lokomotyw spalinowych charakterystyka trakcyjna została uzupełniona o charakterystykę godzinowego użycia paliwa dla poszczególnych pozycji regulacyjnych $B(v)$.

Zbiór PR zawiera istotne parametry drogi kolejowej, do których należą nachylenie torów oraz promienie łuków. Oba parametry opisane są w funkcji pikietażu.

Przedstawiony jako trzeci w kolejności zbiór LOG zawiera ogólne parametry przejazdu, informacje o sposobie zapisu wyników, a także procedurę, według której ma być wykonany eksperyment symulacyjny.

Kolejny zbiór SR zawiera informacje, dotyczące prędkości dopuszczalnych obowiązujących na linii kolejowej.

W zbiorze TT zawarto szczegółowy rozkład jazdy. W skład zbioru wchodzi ponadto dane o współrzędnych i nazwach stacji, a także dane o czasie postojów na stacjach.

W zbiorze określonym jako TSD zapisywane są parametry składu pociągu takie jak: sumaryczna masa i długość wagonów, sumaryczna liczba zestawów kołowych oraz współczynniki mas wirujących.

Zbiór RES zawiera współczynniki oporów ruchu wagonów, znajdujących się w składzie pociągu. Należy podkreślić, że zbiór ten nie obejmuje współczynników oporów ruchu lokomotywy, które zostały zawarte w zbiorze CH.

W ostatnim zbiorze CM umieszczone są współrzędne odcinków linii kolejowej, po których realizowana jest jazda wybiegiem. Odcinki te obejmują fragmenty linii kolejowej, charakteryzujące się dużymi spadkami oraz fragmenty linii, poprzedzające punkty hamowania lub ograniczenia prędkości. Do wyznaczenia wspomnianych odcinków używa się dodatkowego oprogramowania.

Wyniki uzyskane podczas eksperymentu symulacyjnego przedstawione są w czterech zbiorach: DR, PKP, SP i TV.

W zbiorze DR zapisane są szczegółowe wyniki symulacji dla każdego kroku obliczeniowego. Zbiór ten zawiera dane o współrzędnych drogi, prędkości jazdy oraz przyspieszenia, czasu bieżącego oraz czasu dobowego, siły na obwodzie kół z uwzględnieniem siły przyczepności, wartości oporów ruchu oraz wartości opisujące profil toru. Ponadto w zbiorze DR zawarto parametry opisujące pracę układu napędowego lokomotywy jak sprawność całkowita oraz ogólne zapotrzebowanie na energię.

Poza szczegółowymi wynikami po każdej stacji w zbiorze PKP zapisywane są dane podsumowujące dany przejazd pomiędzy wspomnianymi stacjami.

Dane podsumowujące dotyczące całego analizowanego przejazdu przedstawiane są w zbiorze SP.

Ostatni zbiór TV będącym tzw. zbiorem trajektorii prędkości zawiera przebieg zmian prędkości jazdy v w funkcji drogi s oraz informacje o relacji czasu symulowanego przejazdu i czasu zadanego rozkładem jazdy.

Programy RSEL i RSDL bazują na ogólnym matematycznym modelu ruchu pociągu opisany równaniem różniczkowym:

$$m_z \frac{dv}{dt} = F_T(V(t), U_N(t)) + F_R(V(t), s(t)) \quad (2.1)$$

$$\frac{ds}{dt} = V(t) \quad (2.2)$$

gdzie:

m_z - masa zastępcza pociągu z uwzględnieniem dodatkowej bezwładności mas wirujących,

$\frac{dV}{dt}$ - przyspieszenie pociągu wzdłuż osi toru,

F_T - siła na obwodzie kół,

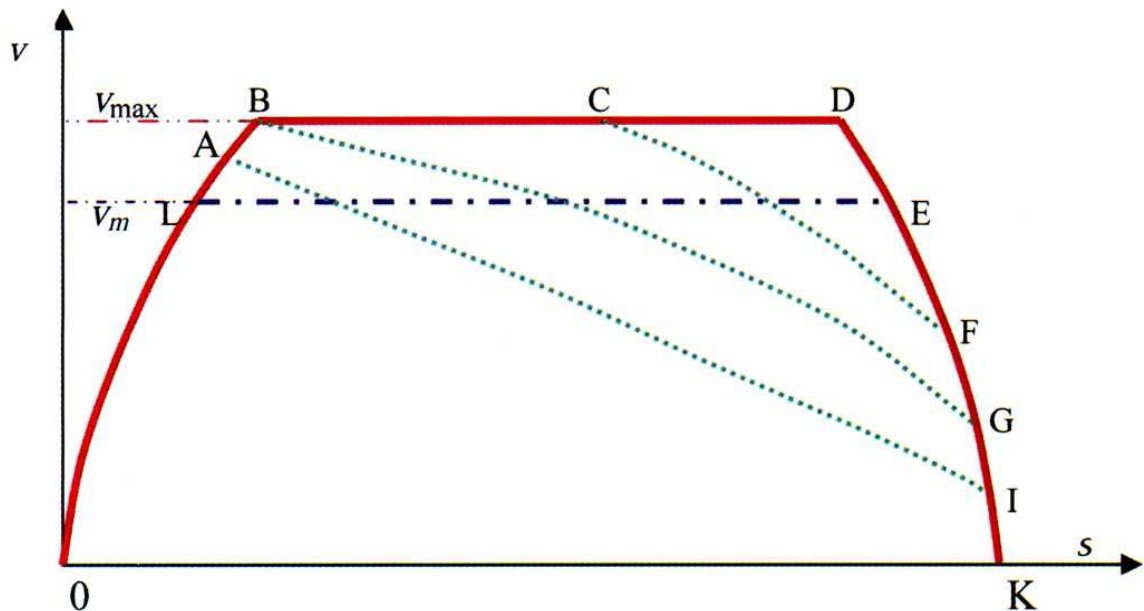
V - prędkość pociągu,

s - współrzędna czoła pociągu,

U_N - nastawa układu napędowego,

F_R - opory ruchu pociągu, gdzie: $R = R(v) + R(s)$ oraz $R(v)$ - opory zasadnicze, $R(s)$ - opory pochodzące od profilu drogi kolejowej.

W opisywanych programach założono, że jazda pociągu składa się z czterech elementarnych faz jazdy. Fazy te zostały zobrazowane na wykresie zmian prędkości w funkcji drogi (rys. 2.7) [51], podczas realizacji przykładowego przejazdu pomiędzy dwoma stacjami.



Rys. 2.7. Przykładowy przebieg prędkości v w funkcji drogi s podczas realizacji przejazdu pomiędzy dwoma stacjami [51]:

- jazda forsowna (minimalno-czasowa) w czasie t_{\min} według procedury MT lub MR,
- · - · - jazda quasi-forsowna w czasie rozkładowym t_f według procedury SL,
- jazda energooszczędna w czasie rozkładowym t_f według procedury FC

Pierwszą fazą jest rozruch, przedstawiony krzywą 0-L-A-B, podczas którego pociąg rusza z postoju i realizuje jazdę z przyspieszeniem do momentu osiągnięcia zadanej prędkości.

Po rozruchu następuje zazwyczaj faza jazdy z prędkością dopuszczalną, przedstawiona za pomocą prostej B-C-D. Wartość prędkości dopuszczalnej wynika z ograniczeń, obowiązujących na danym odcinku linii kolejowej lub związana jest z parametrami konstrukcyjnymi pojazdów, znajdujących się w składzie pociągu.

Za trzecią fazę uważa się hamowanie, mające na celu zatrzymanie pociągu lub redukcję jego prędkości do wartości prędkości dopuszczalnej na danym odcinku linii kolejowej. Fazę hamowania zobrazowano za pomocą krzywej D-E-F-G-I-K.

Czwartą podstawową fazę jazdy pociągu stanowi jazda wybiegiem. W fazie tej jazda realizowana jest bez napędu i bez hamowania z wykorzystaniem wyłącznie energii kinetycznej, zakumulowanej w masie pociągu. Podczas jazdy wybiegiem prędkość redukowana jest przez siły oporu ruchu. Należy zaznaczyć, że podczas jazdy wybiegiem po torze o znacznym spadku może nastąpić wzrost prędkości pociągu. Przykładowa jazda wybiegiem została przedstawiona za pomocą krzywej C-F.

Jak można wywnioskować z przedstawionego rys. 2.7 możliwe jest realizowanie przejazdów pociągu na danym odcinku według wielu sposobów prowadzenia, różniących się między sobą udziałami czasowymi poszczególnych faz jazdy.

Obliczenia symulacyjne z wykorzystaniem modeli RSEL i RSDL mogą być realizowane z uwzględnieniem trzech sposobów prowadzenia pociągu, zwanych również procedurami obliczeniowymi.

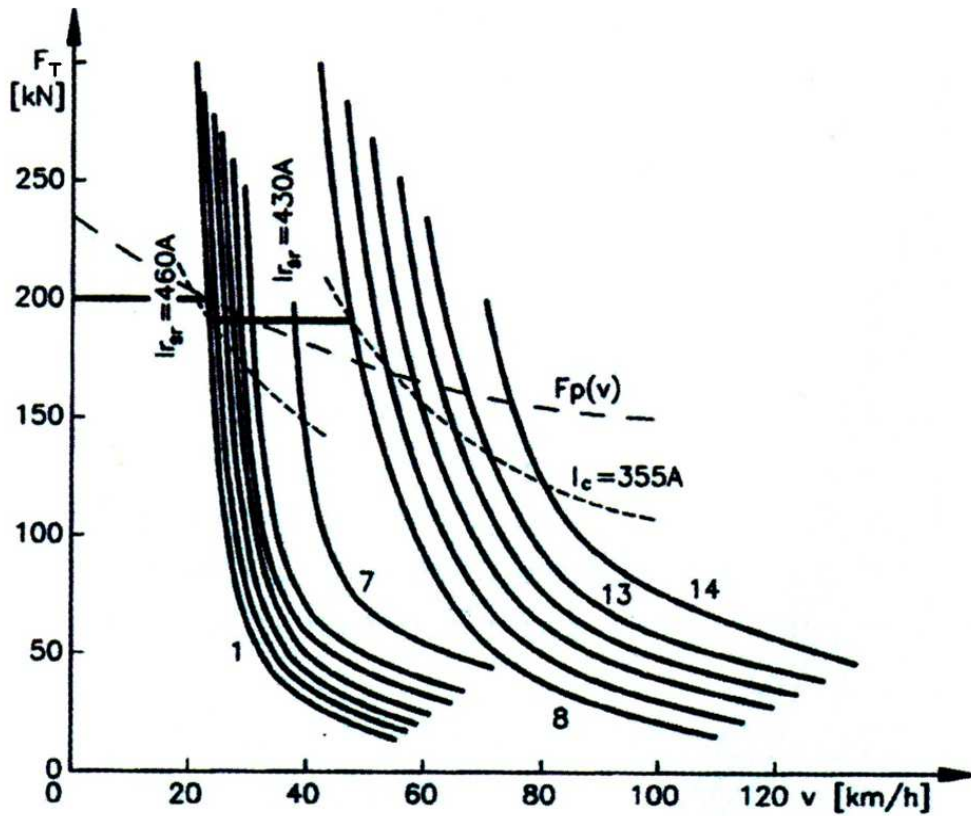
Pierwszą procedurą obliczeniową jest procedura MT (Minimum Time), zwana również przejazdem forsownym. Przejazd ten odbywa się przy maksymalnym obciążeniu układu napędowego i hamulcowego i realizowany jest z prędkością wyznaczoną liniami 0-B-D-K, obejmując tym samym trzy fazy jazdy pociągu jak: rozruch, jazda ustalona oraz hamowanie. Przejazd forsowany, chociaż w praktyce nie jest stosowany podczas rzeczywistego prowadzenia pociągu stanowi bazę do określania czasu minimalnego t_{\min} oraz maksymalnego zużycia energii E_{\max} dla analizowanego przejazdu.

Drugą procedurą obliczeniową jest procedura SL (speed limit), zwana również przejazdem quasi-forsownym. Przejazd ten realizowany jest z prędkością wyznaczoną liniami 0-L-E-K i podobnie jak przejazd forsowny składa się z trzech faz: rozruch, jazda ustalona, hamowanie. Przy wykorzystaniu procedury SL regulacja zadanej przez rozkład jazdy czasu t_i , dokonywana jest poprzez redukcję prędkości maksymalnej.

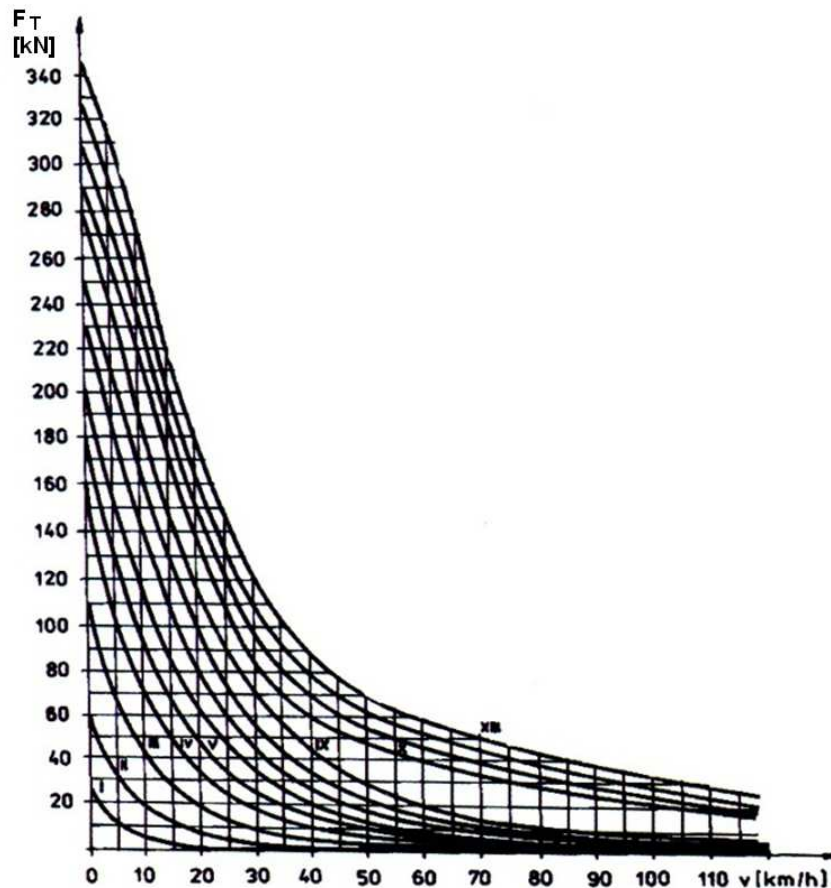
Ostatnią procedurą jest procedura FC (fixed caosting), nazywana również przejazdem energooszczędnym. Przejazd energooszczędny realizowany jest z prędkością wyznaczoną liniami 0-A-B-C-F-K, składając się tym samym z wszystkich czterech faz jazdy pociągu: rozruch, jazda ustalona, jazda wybiegiem (C-F) oraz hamowania. W przypadku przejazdu energooszczędnego regulacja zadanej przez rozkład jazdy czasu t_i , realizowana jest przez regulację długości odcinka linii kolejowej na którym realizowana jest jazda wybiegiem. Przejazd energooszczędny może odbywać się z pominięciem fazy jazdy z prędkością ustaloną według

przebiegu prędkości, wyznaczonego liniami 0-B-I-K lub 0-A-I-K, gdy dodatkowo obniżana jest prędkość maksymalna.

Na przebieg prędkości v w funkcji drogi s podczas realizacji fazy rozruchu ma wpływ wartość sił występujących na styku szyn i kół napędowych, których sumaryczna wartość równa się tzw. sile trakcyjnej. W celu określenia wartości wspomnianej siły wykorzystuje się charakterystykę trakcyjną lokomotywy, przedstawianą zwyczajowo w formie zbioru charakterystyk siły pociągowej lokomotywy w funkcji prędkości $F_i(v)$ (rys. 2.8 i 2.9)



Rys. 2.8. Charakterystyka trakcyjna lokomotywy elektrycznej serii ET22 [51]

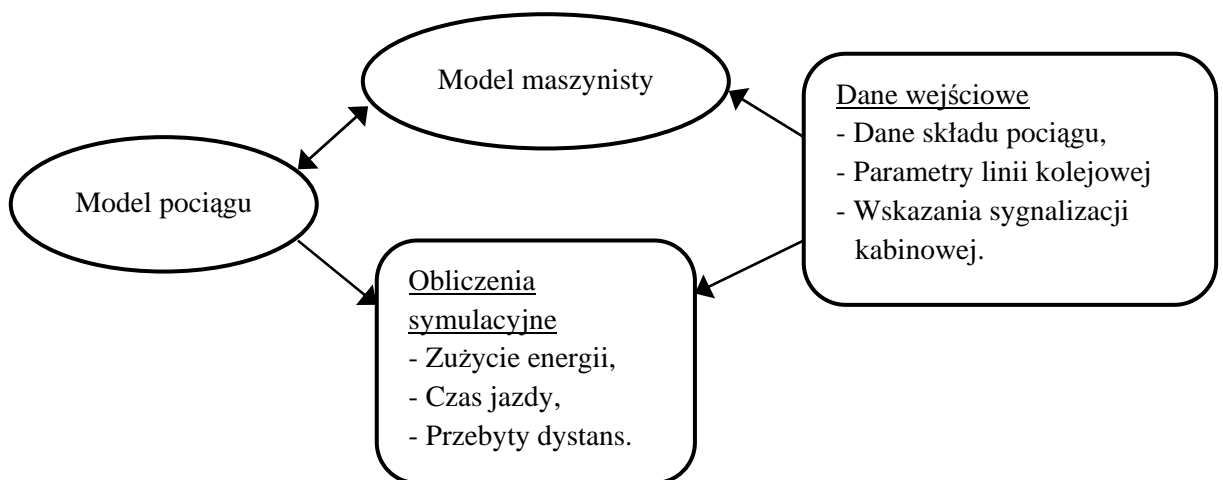


Rys. 2.9. Charakterystyka trakcyjna lokomotywy spalinowej serii SU45 [51]

Wartość nastawy układu napędowego i jest określana również podczas badań symulacyjnych z wykorzystaniem programów RSEL i RSDL.

2.3.2. Program wykorzystujący model maszynisty

Przedstawiony w pracy [57] program do symulacji jazdy pociągiem składa się z czterech zasadniczych elementów (rys. 2.10): danych wejściowych, modelu pociągu, modelu maszynisty oraz danych wyjściowych.



Rys. 2.10 Podstawowe elementy programu do symulacji [57] {tłumaczył: P. Kortas}

Zasadniczym elementem programu jest model pociągu. Podobnie jak w przypadku programów RSEL i RSDL, model pociągu bazuje na ogólnym matematycznym modelu ruchu pociągu, opisanym równaniami 2.1 i 2.2.

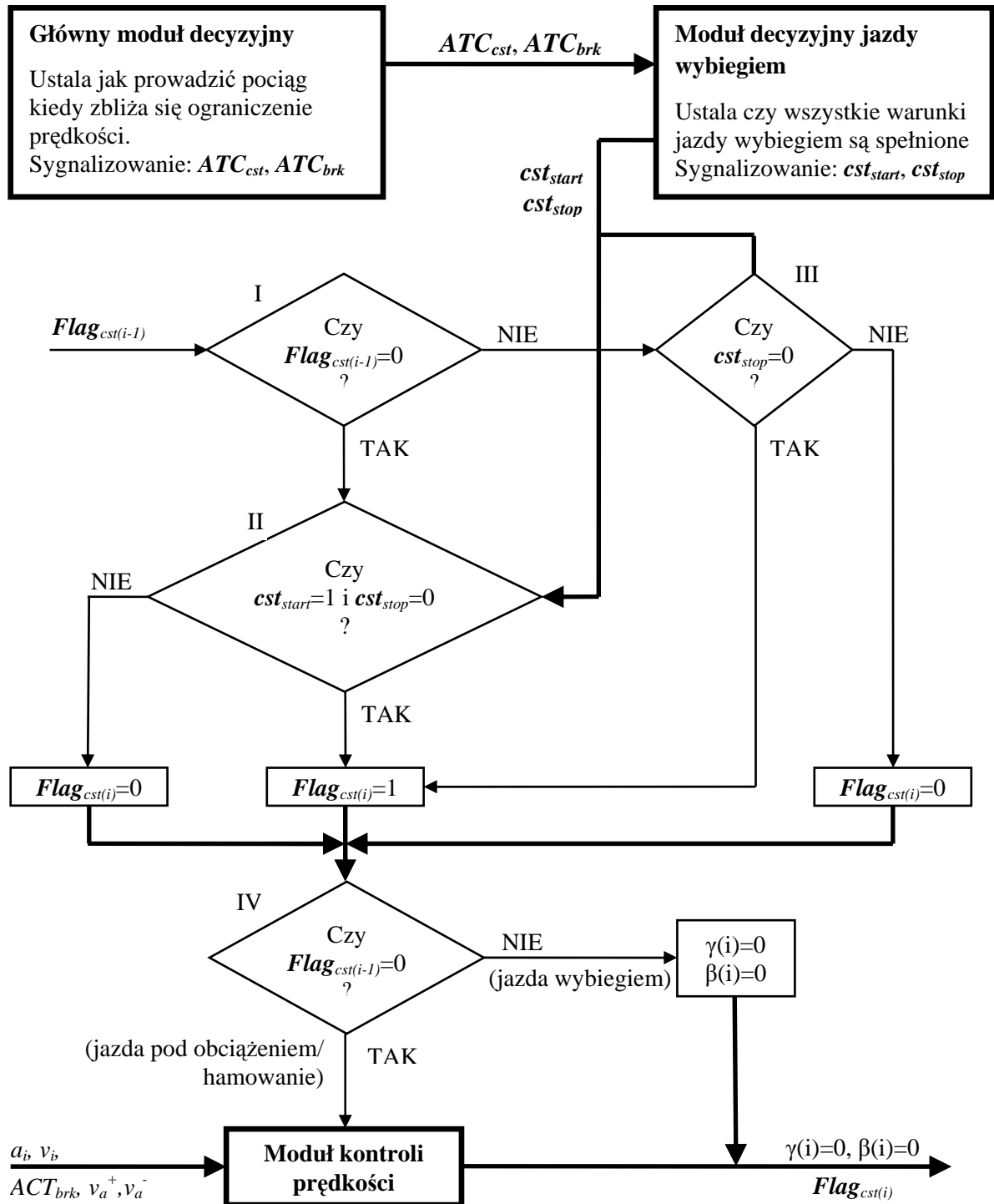
Dane wejściowe, wykorzystywane w obliczeniach obejmują podstawowe informacje dotyczące pociągu jak: masa i jego długość, liczba wagonów, liczba zestawów kołowych, jak również typy wagonów, znajdujących się w składzie. Danymi wejściowymi są również parametry linii kolejowej, jak informacje pochodzące z urządzeń sygnalizacji kabinowej. Należy zaznaczyć, że opisywany program do symulacji jazdy pociągu powstał w oparciu o badania pojazdów kolejowych eksploatowanych na terenie Szwecji. Na większości linii kolejowych w tym kraju wykorzystywany jest system ATC (Automatic Train Control), w skład którego wchodzi między innymi wspomniane urządzenia sygnalizacji kabinowej montowane w pojazdach kolejowych. Sygnalizacja kabinowa ma za zadanie między innymi informować maszynistę o dopuszczalnej prędkości $v_{ATC(n)}$, obowiązującej na odcinku linii kolejowej, po której jedzie pociąg. Ponadto wyświetlana jest informacja o dopuszczalnej prędkości na następnym odcinku linii $v_{ATC(n+1)}$, a także odległość do punktu, w którym prędkość ta zacznie obowiązywać.

Wynikiem obliczeń symulacyjnych jest zużycie energii, czas jazdy oraz przebyty przez pociąg dystans.

W opisywanym programie wyodrębniono jeszcze jeden istotny element, jakim jest model maszynisty. W elemencie tym zachodzą procesy decyzyjne, dotyczące jazdy pod obciążeniem, jazdy wybiegiem oraz hamowania. Ponadto ustalana jest nastawa mocy układu napędowego oraz stopień hamowania.

Model maszynisty ma za zadanie jak najdokładniejsze odzwierciedlenie procesu manualnego prowadzenia pociągu, co wymaga by uwzględniał on wiele czynników, występujących podczas jazdy pociągu. Przykładowo podczas realizacji hamowania lub redukcji prędkości, ze względu na długą drogę hamowania, wynikającą z dużej bezwładności, a także fakt występującej zwłoki czasowej w działaniu układu hamulcowego decyzja o wdrożeniu hamowania musi być podjęta ze znacznym wyprzedzeniem.

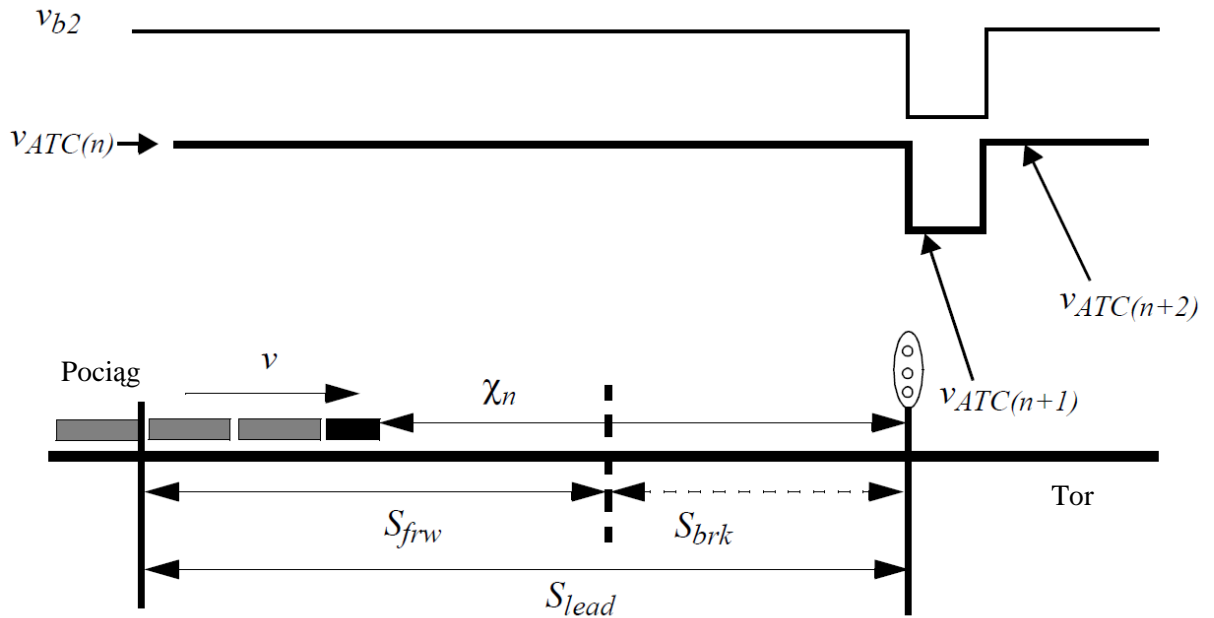
Na rys. 2.11 przedstawiono główny algorytm modelu maszynisty, w którym wyróżniono trzy zasadnicze moduły: główny moduł decyzyjny, moduł decyzyjny jazdy wybiegiem oraz moduł regulacji prędkości.



Rys. 2.11. Główny algorytm modelu maszynisty [57] {tłumaczył: P. Kortas}

i – krok obliczeniowy, ATC_{cst} – sygnał jazdy wybiegiem, ATC_{brk} – sygnał hamowania, cst_{start} – sygnał wdrażający jazdę wybiegiem, cst_{stop} – sygnał przerywający jazdę wybiegiem, $Flag_{cst(i-1)}$ – sygnał dot. jazdy wybiegiem w poprzednim korku obliczeniowym, $Flag_{cst(i)}$ – sygnał dot. jazdy wybiegiem w bieżącym korku obliczeniowym, $\gamma(i)$ – stopień obciążenia układu napędowego, $\beta(i)$ – stopień hamowania, a_i – przyspieszenie, v_i – prędkość pociągu, v_a^+ – górna odchyłka prędkości, v_a^- – dolna odchyłka prędkości

Główny moduł decyzyjny, który ma za zadanie dokonanie wyboru pomiędzy hamowaniem a jazdą wybiegiem przed zbliżającym się ograniczeniem prędkości. Na rys. 2.12 przedstawiono pociąg poruszający się z prędkością v oraz będący w odległości χ_n od punktu ograniczenia prędkości.



Rys. 2.12. Pociąg zbliżający się do ograniczenia prędkości [57] {tłumaczył: P. Kortas}

v_{b2} - prędkość graniczna wdrażająca hamownię, v_{ATC} - prędkość dopuszczalna, v - prędkość pociągu,
 χ_n - odległość czoła pociągu od sygnalizatora, S_{lead} – odległość punktu decyzji od sygnalizatora

Jak wspomniano, w takim przypadku decyzja o odpowiednim działaniu musi być podjęta z wyprzedzeniem. W modelu maszynisty przyjęto, że decyzja podejmowana jest w punkcie poprzedzającym sygnalizator. Odległość punktu decyzji od wspomnianego sygnalizatora przedstawiona jest w formie dystansu S_{lead} , podzielonego na dwa odcinki S_{frw} oraz S_{brk} . W obrębie odcinka S_{frw} może zostać podjęta decyzja o zmianie obciążenia układu napędowego lokomotywy, wdrożeniu jazdy wybiegiem lub hamowania o ograniczonym stopniu.

W obrębie odcinka S_{brk} by zredukować prędkość pociągu do wartości $v_{ACT(n+1)}$ konieczne jest wdrożenie hamowania. Wartość s_{brk} wyrażona jest równaniem empirycznym:

$$S_{brk} = v_{(i)}\Delta t - \left(\frac{4,9G_{(i)}}{1000} + 0,05\right)\Delta t^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{(v_{(i)} - \Delta v)^2 - v_{ACT(n+1)}^2}{g\left(0,032 + \frac{G_{(i)}}{1000}\right)} \quad (2.3)$$

gdzie:

- S_{brk} - droga hamowania,
- Δt - przyrost czasu,
- $v_{(i)}$ - prędkość pociągu,
- $v_{ACT(n+1)}$ - prędkość dopuszczalna na następnym odcinku,
- $G_{(i)}$ - nachylenie linii kolejowej,
- g - przyspieszenie ziemskie.

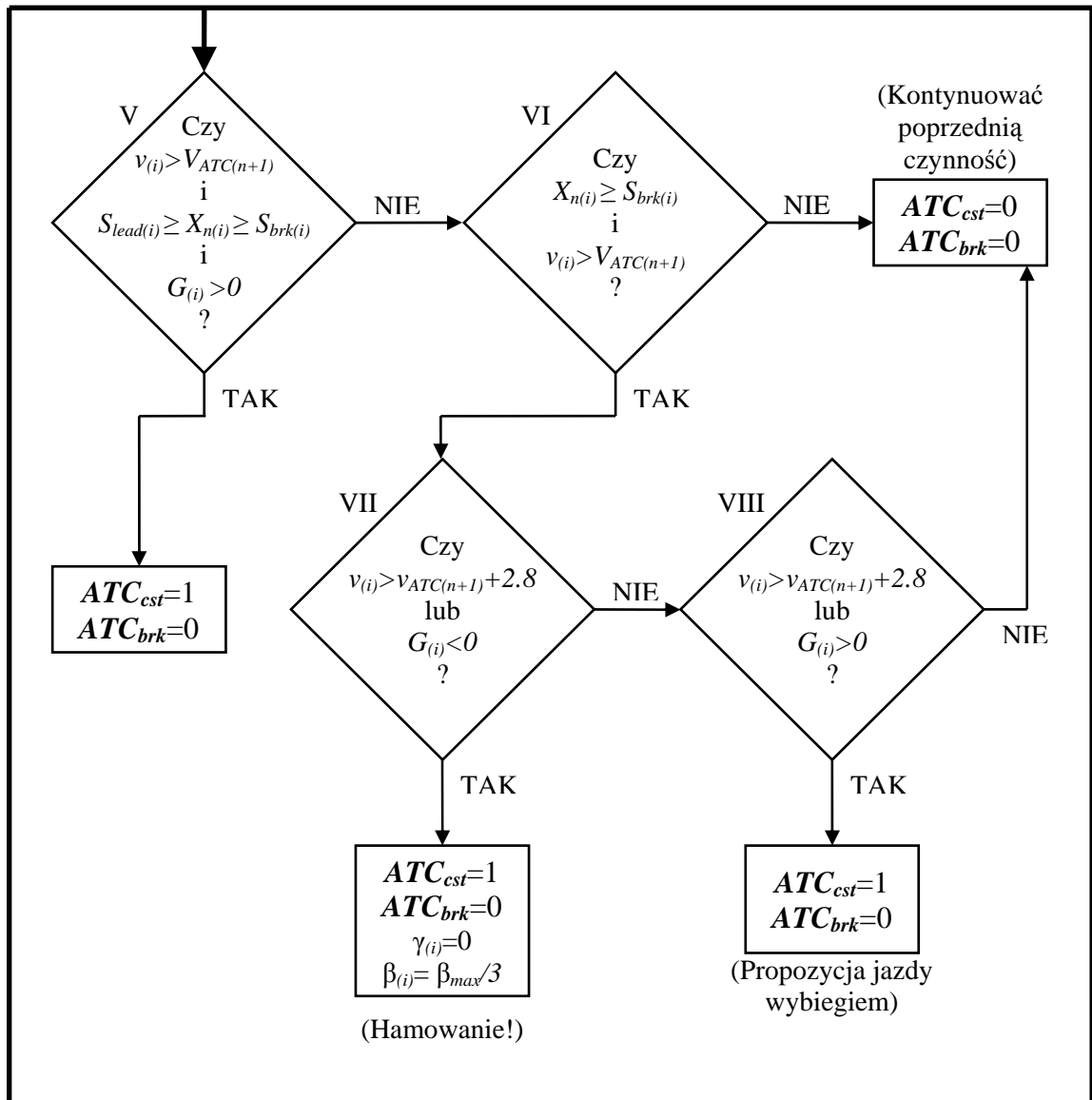
Warto zaznaczyć, że na rys. 2.11 zaznaczona jest prędkość v_{b2} , która oznacza prędkość graniczną, po przekroczeniu której system ATC (Automatic Train Control) wdraża pełne hamowanie. Wartość prędkości v_{b2} jest o 2,8 m/s (10 km/h) większa od dopuszczalnej prędkości na danym odcinku linii kolejowej, co wyrażono równaniem:

$$v_{b2} = v_{ACT} + 2,8 \quad (2.4)$$

gdzie:

- v_{b2} - prędkość graniczna wdrażająca hamownie,
- v_{ACT} - prędkość dopuszczalna.

Na rys. 2.13 przedstawiono algorytm głównego modułu zarządzającego, składającego się z czterech bloków decyzyjnych.



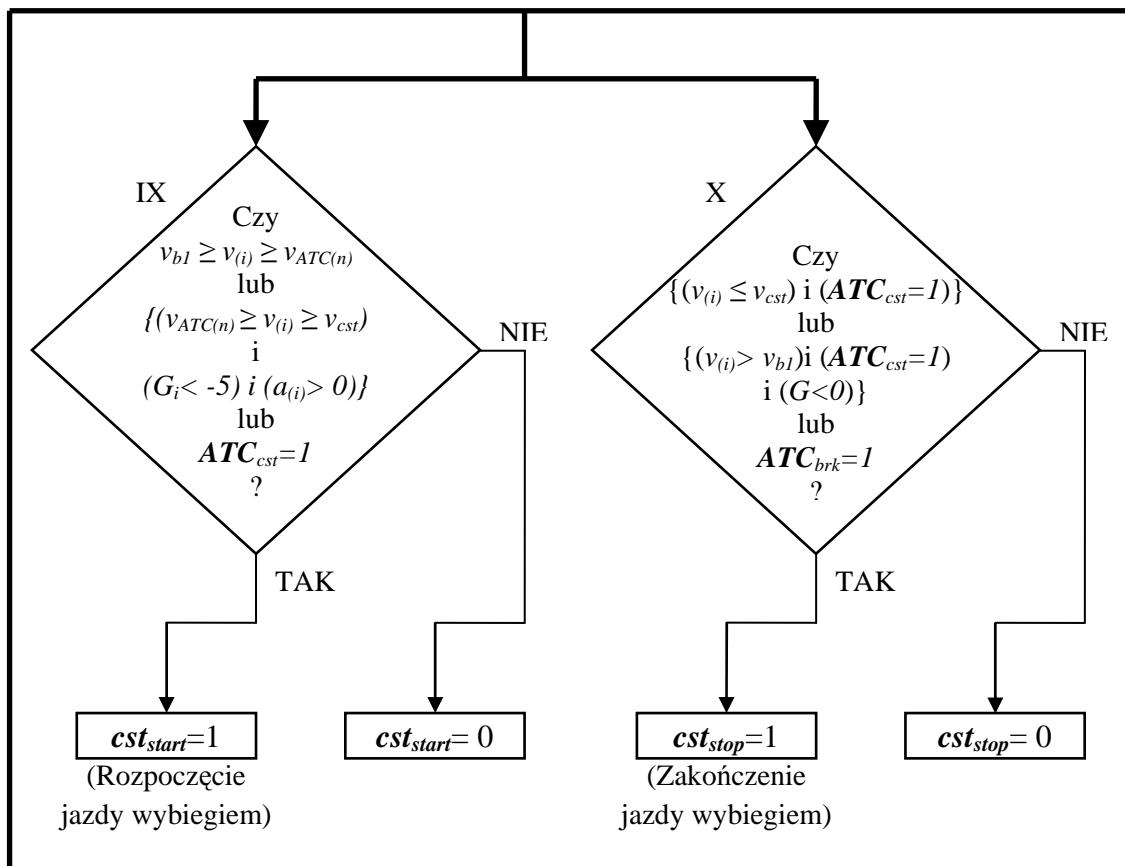
Rys. 2.13. Algorytm głównego bloku decyzyjnego [57] {tłumaczył: P. Kortas}

i – krok obliczeniowy, $v_{(i)}$ – prędkość pociągu, v_{ATC} – prędkość dopuszczalna wg ATC, $S_{lead(i)}$ – odległość punktu decyzji od sygnalizatora, $S_{brk(i)}$ – droga hamowania, $\chi_{n(i)}$ – odległość czoła pociągu od sygnalizatora, $G_{(i)}$ – nachylenie toru, ATC_{cst} – sygnał jazdy wybiegiem, ATC_{brk} – sygnał hamowania, $\gamma_{(i)}$ – stopień obciążenia układu napędowego, $\beta_{(i)}$ – stopień hamowania

Wynikiem procesu decyzyjnego są dwa sygnały ATC_{brk} oraz ATC_{cst} . Są to sygnały dwustanowe, przyjmujące wartości 0 lub 1. Osiągnięcie przez sygnał ATC_{brk} wartości 1 oznacza wdrożenie hamowania. Natomiast osiągnięcie przez sygnał ATC_{cst} wartości 1 oznacza jedynie propozycję jazdy wybiegiem. Proces decyzyjny rozpoczyna się w bloku V. Gdy spełniony jest warunek, że prędkość pociągu v_i jest większa od zbliżającego się ograniczenia prędkości $v_{ATC(n+1)}$ wg systemu ACT oraz pociąg znajduje się w obrębie odcinka S_{brk} oraz nachylenie G_i jest

większe od 0, co oznacza jazdę „pod górę” sygnał ATC_{cst} osiąga wartość 1. Gdy któryś z warunków nie jest spełniony proces decyzyjny jest kontynuowany w bloku IV, gdzie sprawdzane są warunki czy pociąg jest w zakresie odcinka S_{brk} oraz czy prędkość v_i jest większa od zbliżającego się ograniczenia prędkości $v_{ATC(n+1)}$ wg sytemu ACT. Gdy pierwszy lub drugi warunek nie jest spełniony proces decyzyjny jest przerywany. Natomiast gdy spełnione są oba warunki następuje kontynuacja procesu decyzyjnego w bloku VII. Gdy spełniony jest warunek, że prędkość pociągu jest większa od dopuszczalnej prędkości $v_{ATC(n+1)}$ powiększonej o wartość 2.8 m/s, lub jazda odbywa się „w dół” po nachyleniu toru, wdrażane jest hamowanie. Hamowanie odbywa się przy stopniu $\beta_{(i)}$, odpowiadającym 1/3 maksymalnego hamowania β_{max} . Gdy warunki zawarte w bloku VII nie są spełnione proces decyzyjny realizowany jest w bloku w bloku VIII, gdzie sprawdzane są warunki, czy prędkość v_i jest mniejsza bądź równa prędkości dopuszczalnej $v_{ATC(n+1)}$ powiększonej o wartość 2.8 m/s lub jazda realizowana jest „pod górę”. Gdy któryś z warunków jest spełniony sygnał ATC_{cst} osiąga wartość 1. Gdy oba warunki nie są spełnione następuje przerwanie procesu decyzyjnego.

Sygnały ATC_{brk} oraz ATC_{cst} są wykorzystywane w module decyzyjnym jazdy wybiegiem. Wynikami procesu decyzyjnego, zachodzącego w module są dwa sygnały dwustanowe cst_{start} , cst_{stop} . Algorytm wspomnianego modułu przedstawiono na rys. 2.14.



Rys. 2.14. Algorytm modułu decyzyjnego jazdy wybiegiem [57] {tłumaczył: P. Kortas}

i – krok obliczeniowy, $v_{(i)}$ – prędkość pociągu, $a_{(i)}$ – przyspieszenie pociągu, v_{b1} – prędkość dopuszczalna, v_{cst} – dolna granica prędkości, v_{ATC} – prędkość dopuszczalna, $G_{(i)}$ – nachylenie toru, ATC_{cst} – sygnał jazdy

wybiegiem, ATC_{brk} – sygnał hamowania, cst_{start} – sygnał wdrażający jazdę wybiegiem, cst_{stop} – sygnał przerywający jazdę wybiegiem

Moduł ten składa się z dwóch bloków decyzyjnych IX i X. Jak można zauważyć w blokach decyzyjnych pojawiają się wartości prędkości v_{b1} oraz v_{cst} . Prędkość v_{b1} jest prędkością pociągu, po przekroczeniu której maszynista musi podjąć środki ostrożności, by nie przekroczyć prędkości v_{b2} , która spowoduje automatyczne hamowanie pociągu. Wartość prędkości v_{b1} wyrażona jest równaniem:

$$v_{b1} = v_{ACT} + v_a^+ \quad (2.5)$$

gdzie:

- v_{b1} - maksymalna prędkość dopuszczalna [m/s],
- v_{ACT} - prędkość podana przez system ATC [m/s],
- v_a^+ - górna granica prędkości [m/s].

Prędkość v_{cst} jest prędkością, poniżej której musi zostać zakończona jazda wybiegiem. Prędkość ta określona jest równaniem:

$$v_{cst} = v_{ACT} - v_a^- \quad (2.6)$$

gdzie:

- v_{cst} - dolna granica prędkości pociągu [m/s],
- v_{ACT} - prędkość podana przez system ATC [m/s],
- v_a^- - dolnej granica prędkości [m/s].

Dla zaprezentowanego modelu maszynisty górna granica prędkości v_a^+ wynosi 1,4 m/s, a dolna v_a^- 3,2 m/s.

Sygnał cst_{start} osiąga wartość 1, gdy spełniony jest warunek dla którego, prędkość pociągu $v_{(i)}$ zawiera się w przedziale $\langle v_{ACT(n)}; v_{b1} \rangle$, lub prędkość pociągu $v_{(i)}$ zawiera się w przedziale $\langle v_{cst}; v_{ACT(n)} \rangle$, przy czym spełniony jest jeszcze warunek $G_i < -5$, co świadczy o zjeździe po stromym zboczu oraz warunek, że $a_{(i)} > 0$, czyli pociąg przyspiesza. Ponadto $cst_{start} = 1$, gdy po procesie decyzyjnym w głównym module decyzyjnym sygnał $ACT_{cst} = 1$.

Sygnał cst_{stop} osiąga wartość 1, gdy spełniony jest warunek dla którego, prędkość pociągu $v_{(i)}$ jest mniejsza od prędkości v_{cst} . Ponadto sygnał cst_{stop} osiąga wartość 1, gdy spełnione są warunki: prędkość pociągu $v_{(i)}$ jest większa niż prędkość v_{b1} i $G_i < 0$ oraz sygnał $ACT_{cst} = 0$. Spełnienie warunku $ACT_{brk} = 1$ również powoduje, że sygnał $cst_{stop} = 1$.

Ostateczna decyzja o jeździe wybiegiem jest podejmowana po procesie decyzyjnym, mającym miejsce w blokach I, II i III (rys. 6). Oprócz sygnałów ACT_{cst} , ACT_{brk} , cst_{start} , cst_{stop} uwzględniany jest sygnał $Flag_{cst(i-1)}$. Wartość sygnału $Flag_{cst(i-1)} = 1$ oznacza, że w poprzednim kroku obliczeniowym była realizowana jazda wybiegiem.

Jazda wybiegiem w bieżącym kroku obliczeniowy jest wdrażana w dwóch przypadkach. W pierwszym przypadku sygnał $Flag_{cst(i-1)}$ osiąga wartość 0 (blok I) oraz sygnał $cst_{start} = 1$,

a także $cst_{stop}=0$ (blok II). W drugim natomiast sygnał $Flag_{cst(i-1)}=1$ (blok I) oraz $cst_{stop}=0$ (blok III).

Model maszynisty zawiera moduł kontroli prędkości, który pełni rolę regulatora mocy układu napędowego i stopnia hamowania. W przypadku jazdy moduł ma za zadanie odpowiedni dobór mocy lub stopnia hamowania, by utrzymać zadaną prędkość v_{atc} . W przypadku realizacji hamowania stopień hamowania zależy od chwilowego opóźnienia pociągu.

2.4. Podsumowanie

Zaprezentowane programy udowodniły przydatność w badaniach symulacyjnych elektrycznych pojazdów kolejowych, mających na celu określenie ilości zużytej podczas pracy energii oraz czasu jazdy. Brak w literaturze jest jednak informacji o wykorzystaniu powyższych programów w badaniach symulacyjnych lokomotyw spalinowych przez co trudno jest ocenić jakość programów.

Zastosowane we wspomnianych programach procedury regulacji mocy, które sprawdzają się w przypadku silników elektrycznych, mogą okazać się mało przydatne w przypadku silników spalinowych.

Trzeba mieć na uwadze, że regulacja mocy układów napędowych pojazdów elektrycznych jest znacznie prostsza, szczególnie w przypadku stosowanych obecnie układów zasilających, opartych na elementach półprzewodnikowych. Moc silnika elektrycznego można zmieniać dynamicznie, ze względu na brak negatywnego wpływu stanów przejściowych na parametry pracy. Jedynym ograniczeniem w procesie regulacji mocy jest wartość natężenia prądu zasilającego, która bezpośrednio wpływa na temperaturę uzwojeń silnika.

Natomiast w przypadku silników spalinowych stany przejściowe powodują nie tylko obniżenie sprawności ogólnej, ale powodują zwiększenie emisji związków szkodliwych w spalinach do atmosfery i przyczyniają się do szybszego zużywania poszczególnych części silnika.

Należy również zaznaczyć, że w przeciwieństwie do silnika elektrycznego silnik spalinowy osiąga wysoką sprawność jedynie w wąskim przedziale momentu obrotowego i prędkości obrotowej wału korbowego.

Program symulacyjny pracy lokomotywy spalinowej musi zatem uwzględniać procedury regulacji mocy, które mają na celu redukcję czasu pracy w stanach nieustalonych, a także zapewniają pracę silnika spalinowego w zakresie o najwyższej sprawności.

3. TEZA I CEL PRACY

Teza:

Wykorzystując wyniki analizy literaturowej oraz rezultaty badań własnych przyjęto, że możliwa jest poprawa odwzorowania pracy lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną w rzeczywistych warunkach eksploatacji za pomocą modelu matematycznego wykorzystującego wybrane charakterystyki silnika spalinowego, prądnicy głównej, silników trakcyjnych i urządzeń pomocniczych oraz model automaszynisty lokomotywy, który odwzoruje proces decyzyjny operatora tego systemu.

Cel:

Celem pracy jest stworzenie efektywnego modelu układu napędowego lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną. Ten model powinien:

- umożliwiać przeprowadzenie optymalnego, ze względu na zużycie paliwa, doboru lokomotywy do wyznaczonego zadania,
- wspomagać proces projektowania oraz doboru układów napędowych nowych i modernizowanych lokomotyw,
- wspomagać proces decyzyjny zakupu nowych lokomotyw dla zdefiniowanych zadań,
- wspomagać proces tworzenia rozkładu jazdy poprzez możliwości wyznaczania wpływu masy pociągu oraz typu lokomotywy na własności trakcyjne składu.

4. ZAŁOŻENIA DLA PRZYJĘTEJ METODYKI BADAŃ

4.1. Informacje wstępne

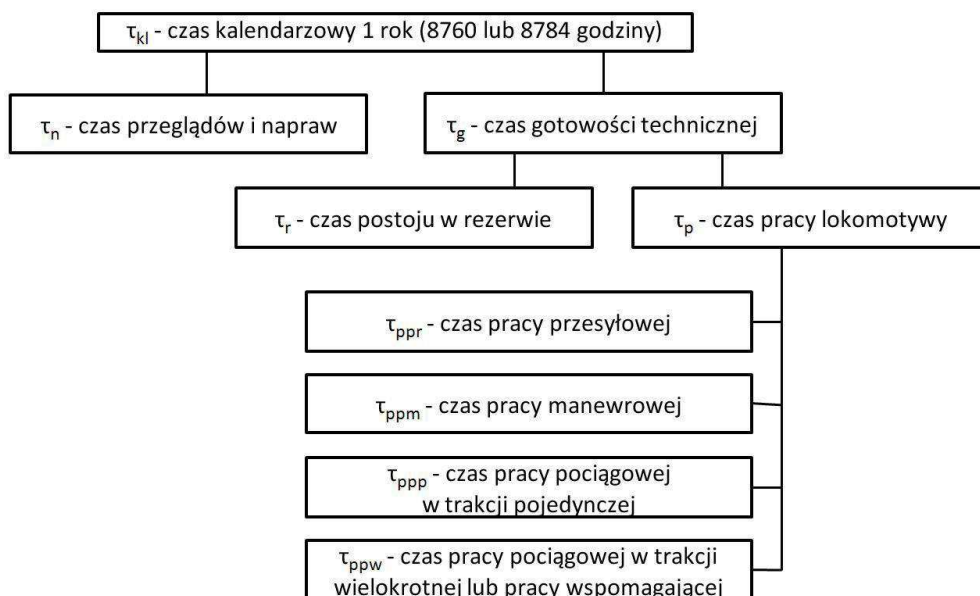
Obiektem badań jest lokomotywa ST44 (rys. 1.9.), wykorzystywana do prowadzenia pociągów towarowych. Lokomotywa wyposażona jest w dwa zasadnicze systemy pomiarowo-rejestrujące, wykorzystywane do pomiaru i rejestracji parametrów jazdy, jak również do pomiaru i rejestracji zmiany ilości paliwa w zbiornikach. Dane z rejestratorów parametrów jazdy wykorzystywane są głównie w dochodzeniach, prowadzonych po zaistniałych zdarzeniach, jak: wykolejenia, kolizje z innymi pojazdami kolejowymi lub samochodowymi czy potrącenia ludzi. Te dane służą do oceny prawidłowości zachowania maszynisty, związanego z przestrzeganiem przez niego ograniczenia prędkości, użyciem sygnału dźwiękowego, ostrzegającego o niebezpieczeństwie czy odpowiednim wdrożeniem hamowania awaryjnego. Dane z rejestratorów ilości paliwa natomiast wykorzystywane są wyłącznie do tworzenia raportów zużycia paliwa podczas pracy oraz ochrony paliwa przed kradzieżą.

Podczas swojej kariery zawodowej w spółkach kolejowych PKP Cargo S.A. i PKP Intercity S.A. autor pracy zauważył, że ze względu na dużą liczbę parametrów rejestrowanych systemy pomiarowo-rejestrujące mogą one również znaleźć zastosowanie w diagnostyce urządzeń, wchodzących w skład układu napędowego lokomotywy. Wspomniane dane były wykorzystywane podczas tworzenia przez autora pracy ekspertyz technicznych na okoliczność zaistniałych usterek.

Duża liczba rejestrowanych danych w przypadku badań, przeprowadzanych przez autora na poczet niniejszej pracy, skutkowało brakiem konieczności stosowania dodatkowych urządzeń pomiarowych, spowodowało to znaczne obniżenie nakładów finansowych prowadzonych badań.

4.2. Struktura warunków eksploatacji lokomotywy spalinowej

Zadaniem układu energetycznego jest dostarczenie energii mechanicznej, elektrycznej i cieplnej do odpowiednich wydzielonych odbiorników oraz grup odbiorników. W ogólnym przypadku układ energetyczny obejmuje elementy paliwochłonne, tj. silniki cieplne (spalinowe), kocioł opalany (wytwornica ciepła) oraz urządzenia przekształcające rodzaje energii (prądnice, turbiny utylizacyjne), a także urządzenia zmieniające parametry strumieni energii (przekładnie, kotły utylizacyjne). Autonomiczne układy energetyczne w transporcie drogowym i kolejowym, jak również jednostki pływające w transporcie morskim, wykazują w tym względzie wiele analogii [6], do dalszej analizy proponuje się strukturę warunków eksploatacji lokomotyw spalinowych wzorowaną na rozwiązaniu przedstawionym na rys. 2.2. Propozycja ogólnej struktury czasowej warunków eksploatacji lokomotyw spalinowych z przekładniami elektrycznymi (rys. 4.1) [44] bazuje na wieloletnim doświadczeniu eksploatacyjnym jednego z autorów i jednocześnie wykorzystuje terminologię branżową powszechnie wykorzystywaną w transporcie kolejowym.



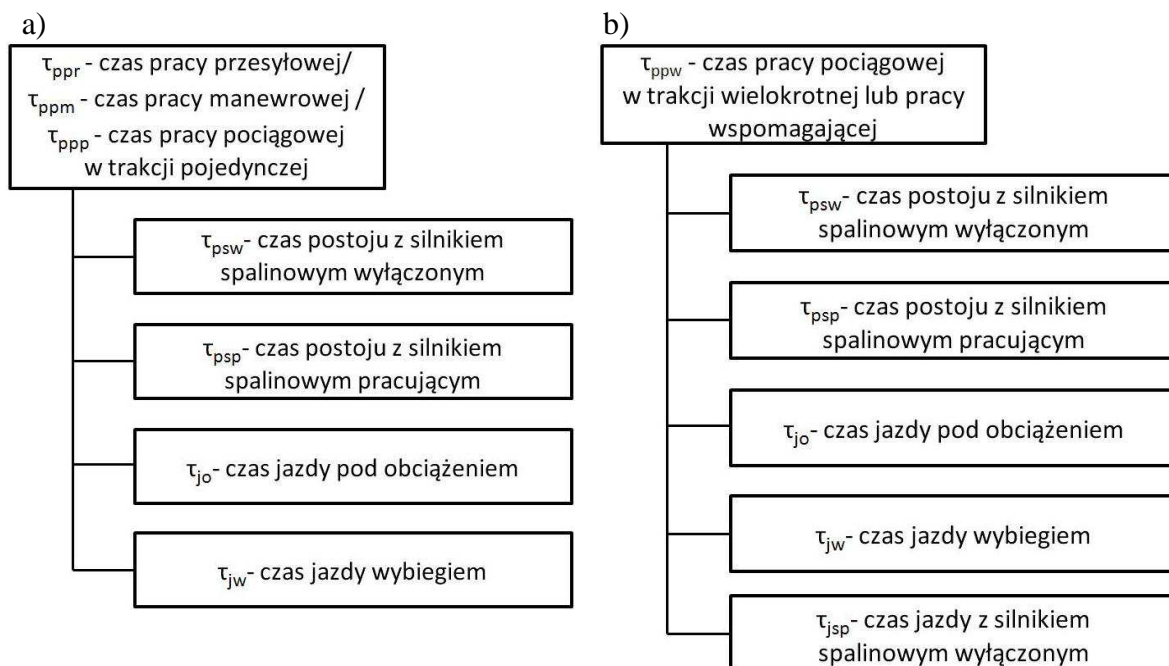
Rys. 4.1. Ogólna struktura czasowa warunków eksploatacji lokomotyw spalinowych z przekładniami elektrycznymi [44]

Istotnym problemem towarzyszącym analizie warunków eksploatacji lokomotyw jest sezonowa zmienność warunków zewnętrznych. Warunki te mogą mieć bezpośredni wpływ na eksploatację lokomotyw wynikającą np. z innego współczynnika tarcia między kołem a szyną w okresie jesiennym lub koniecznością wstępnego podgrzewania silników spalinowych. Zauważalny jest również wpływ pośredni warunków zewnętrznych, np. w postaci wzrostu masy przewożonego paliwa w okresie zimowym. W celu uwzględnienia wpływu takich czynników na pracę lokomotyw spalinowych należałoby przeprowadzać analizę czasową struktury warunków eksploatacji dla okresu 1 roku. W okresie tym lokomotywa jest poddawana planowym przeglądom i naprawom w czasie (τ_n), jak również znajduje się w stanie gotowości technicznej w czasie (τ_g). Zgodnie z zaproponowaną na rys. 4.1 strukturą można wymienić następujące warunki eksploatacji lokomotyw spalinowych z przekładniami elektrycznymi:

- **przeglądy i naprawy** - lokomotywa nie może być wykorzystywana do wykonywania pracy,
- **gotowość techniczna** - lokomotywa jest zdolna do wykonywania pracy,
 - o **postój w rezerwie** - lokomotywa jest przygotowana do pracy i przebywa na terenie lokomotywowni, stacji lub bocznicy bez załogi obsługującej oraz bez wyznaczonego zadania,
 - o **praca lokomotywy** - lokomotywa wraz z załogą wykonuje wyznaczone zadanie,
 - **praca przesyłowa** - lokomotywa poruszająca się po szlaku kolejowym bez wagonów w celu dojazdu do miejsca podjęcia wagonów, wykonywania prac manewrowych lub innych prac, takich jak prace pomocnicze czy prace ze specjalnymi pojazdami kolejowymi. Z pracą przesyłową mamy również do czynienia w ramach potrzeb własnych lokomotywowni, w przypadku przejazdu lokomotywy do i z miejsca wykonywania napraw okresowych, skierowania lokomotywy do innej lokomotywowni oraz jazdy próbnej.

- **praca manewrowa** - lokomotywa wykorzystywana jest do rozrządu i zestawiania pociągów, podstawiania wagonów na punkty ładunkowe oraz ich zabierania, podstawiania i zabierania składów pasażerskich na perony i z peronów na grupę odstawczą, przestawiania wagonów, grup wagonów i całych składów pociągowych z jednego toru na drugi, podstawiania wagonów lub innych pojazdów kolejowych do wykonania czynności dodatkowych, jak: czyszczenia, mycie, odkażanie, ważenie, naprawy itp.
- **praca pociągowa w trakcji pojedynczej** - lokomotywa wykorzystywana jest do ciągnięcia lub pchania wagonów lub innych pojazdów kolejowych na szlaku kolejowym zgodnie z wyznaczonym rozkładem jazdy.
- **praca pociągowa w trakcji wielokrotnej lub praca wspomagająca** - prowadzenie pociągu odbywa się za pomocą co najmniej dwóch lokomotyw. Ten rodzaj pracy charakterystyczny jest dla pociągów, których trasa wyznaczona jest szlakami o dużym zróżnicowaniu pochyłości, przebiega zarówno szlakami zelektryfikowanymi jak i nie zelektryfikowanymi lub gdy na trasie pociągu następuje zmiana liczby wagonów w składzie o dużej masie. Różnica pomiędzy pracą w trakcji wielokrotnej a pracą wspomagającą polega na sposobie sterowania lokomotyw. W pierwszym przypadku lokomotywy połączone są za pomocą sprzęgów wielokrotnych, co umożliwia ich sterowanie z jednego stanowiska sterowniczego znajdującego się w lokomotywie prowadzącej. W przypadku pracy wspomagającej dodatkowa lokomotywa posiada własną drużyną trakcyjną, a sterowanie nią odbywa się z własnego stanowiska sterowniczego.

W ramach wymienionych warunków eksploatacji: pracy przesyłowej, pracy manewrowej, pracy pociągowej w trakcji pojedynczej i pracy pociągowej w trakcji wielokrotnej lub pracy wspomagającej wymienić można bardziej szczegółowo kolejne warunki eksploatacji (rys. 4.2), które w zasadniczy sposób różnią się między sobą ze względu na sposób wykorzystania silnika spalinowego, generowaną moc, a w konsekwencji również masę zużywanego paliwa w rozważanym okresie.



Rys. 4.2. Struktura czasowa warunków eksploatacji lokomotyw spalinowych z przekładniami elektrycznymi [44]:

- a) podczas pracy przesyłowej, pracy manewrowej, pracy pociągowej w trakcji pojedynczej,
- b) podczas pracy pociągowej w trakcji wielokrotnej lub pracy wspomagającej

Zgodnie z zaproponowaną na rys. 4.2 strukturą można wymienić następujące warunki eksploatacji lokomotyw spalinowych z przekładniami elektrycznymi podczas pracy przesyłowej, manewrowej, pociągowej w trakcji pojedynczej i wielokrotnej lub wspomagającej:

Postój z wyłączonym silnikiem spalinowym - podczas przeprowadzania prac manewrowych możliwa jest realizacja postoju z silnikiem wyłączonym. Wymaga to jednak dokładnej organizacji tych prac.

Postój z pracującym silnikiem spalinowym - podczas pracy na szlaku realizacja postoju odbywa się zazwyczaj przy włączonym silniku spalinowym pracującym na biegu jałowym. Wynika to ze stosunkowo krótkich okresów postoju. Ten stan realizowany jest w następstwie braku możliwości kontynuowania jazdy spowodowanej wskazaniem przez semafor sygnału „stój”. Postój jest również realizowany na dodatkowych torach stacyjnych, na które jest skierowany pociąg towarowy lub lokomotywa w celu odblokowania szlaku dla pociągu o wyższej kategorii.

Jazda pod obciążeniem, podczas której moc z silnika spalinowego przekazywana jest za pośrednictwem przekładni elektrycznej na zestawy kołowe.

Jazda wybiegiem, podczas której silnik pracuje na biegu jałowym. Znaczny udział czasu jazdy wybiegiem jest charakterystyczny dla transportu kolejowego i wynika z faktu relatywnie małych oporów ruchu i dużej energii kinetycznej zgromadzonej w poruszającej się masie lokomotywy oraz wagonów.

Jazda z wyłączonym silnikiem spalinowym, która może występować wyłącznie w przypadku pracy pociągowej w trakcji wielokrotnej lub pracy wspomagającej. Ma to miejsce

w przypadku, gdy nie ma zapotrzebowania na moc dodatkowej lokomotywy, a jej silnik spalinowy jest wyłączony.

W opisie warunków eksploatacji lokomotywy pojawiło się także pojęcie biegu jałowego silnika spalinowego, które w przypadku lokomotyw różni się od ogólnej definicji stanu pracy silnika, w którym energia doprowadzona do silnika zużywana jest na pokrycie własnych oporów ruchu. W odniesieniu do silników pojazdów kolejowych stanem biegu jałowego określa się zwyczajowo stan pracy silnika przy braku przekazywania mocy na zestawy kołowe oraz do napędu wielu urządzeń pomocniczych pojazdu, takich jak: sprężarka powietrza, prądnica pomocnicza lub prądnica ogrzewcza w przypadku lokomotyw pasażerskich.

W celu uzyskania charakterystyk elementów struktury warunków eksploatacji, przydatnych do przeprowadzenia analiz porównawczych oraz obliczeń, należy posługiwać się udziałami czasu poszczególnych rodzajów pracy w rozważanym okresie eksploatacji:

$$\tau_y^x = \frac{\tau_x}{\tau_y} \quad (4.1)$$

gdzie:

τ_x – czas eksploatacji lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną w rozważanym okresie eksploatacji,

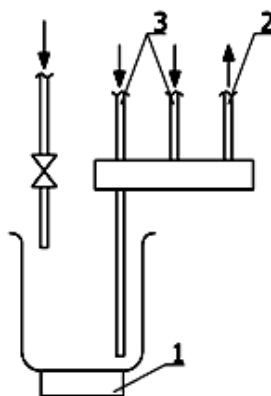
τ_y – rozważany okres eksploatacji, np. 1 rok.

Przyjmując przykładowo, że rozważany okres pracy danej lokomotywy wynosi - τ_p , czas pracy przesyłowej - τ_{ppr} , manewrowej - τ_{ppm} , pociągowej w trakcji pojedynczej - τ_{ppm} , pociągowej w trakcji wielokrotnej lub wspomagającej - τ_{ppw} , można wyznaczyć udziały czasu pracy: przesyłowej - λ_p^{ppr} , manewrowej - λ_p^{ppm} , pociągowej w trakcji pojedynczej - λ_p^{ppp} i pociągowej w trakcji wielokrotnej lub wspomagającej - λ_p^{ppw} .

4.3. Dane pomiarowe i informacje niezbędne przy tworzeniu modelu układu napędowego

4.3.1. Pomiar masowego i objętościowego strumienia paliwa

Istnieje wiele metod pomiaru masowego lub objętościowego strumienia paliwa zużywanego przez silnik spalinowy lokomotywy. Najprostszą metodą, z uwagi na brak konieczności używania specjalistycznych urządzeń pomiarowych, jest określenie objętościowego strumienia przez pomiar ubytku objętości paliwa w określonym czasie z zewnętrznego zbiornika pomiarowego np. menzurki, a następnie uwzględnienie gęstości paliwa. Oczywiście wymaga to uwzględnienia zwrotów nadwyżek paliwa odprowadzanych za pomocą układu przelewowego do zbiornika lokomotywy. Można to osiągnąć między innymi poprzez skierowanie strumienia paliwa z układu przelewowego z powrotem do zbiornika pomiarowego. Zautomatyzowany pomiar można przeprowadzić wykorzystując układ złożony z zewnętrznego zbiornika wyposażonego w wagę tensometryczną (rys. 4.3, 4.4) [45, 21]. Zaletą tej metody jest bezpośrednio określanie masowego strumienia paliwa.

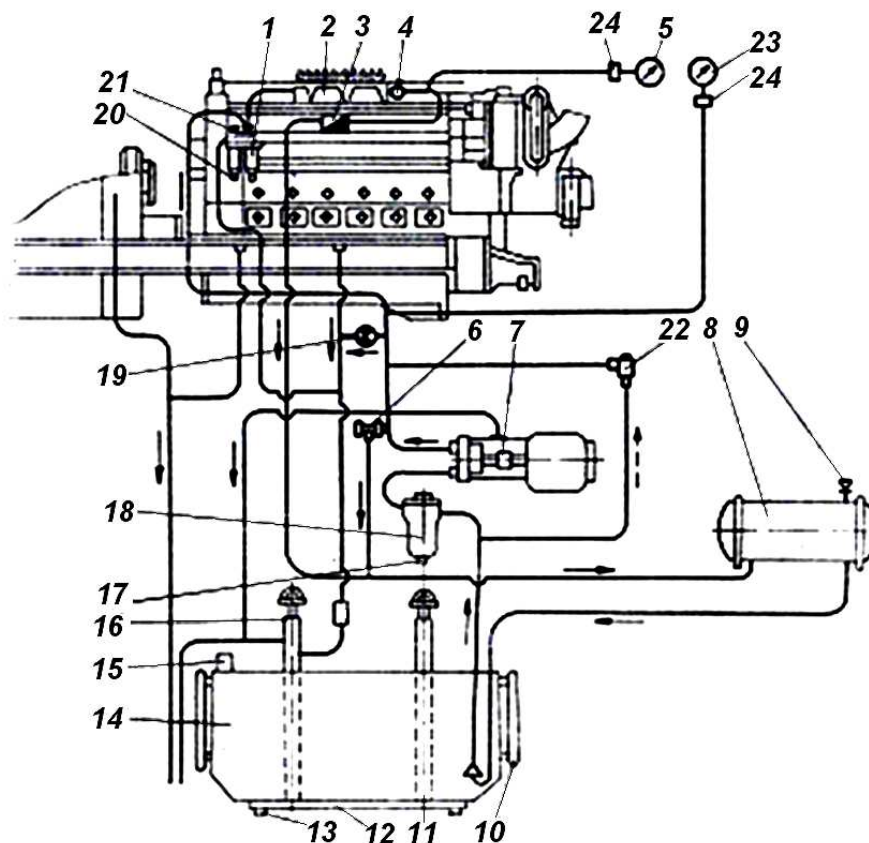


Rys. 4.3. Schemat układu pomiaru masy zużytego paliwa [45]:
1 – waga tensometryczna, 2- przewód zasilający, 3- przewody układu przelewowego



Rys. 4.4. Naczynie pomiarowe układu pomiaru zużycia paliwa [21]

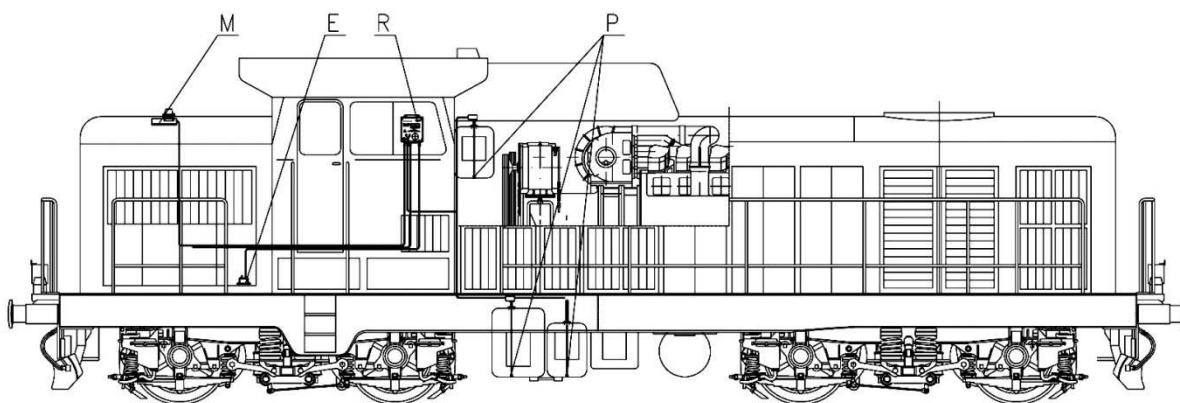
Wadą opisanych powyżej metod pomiaru masowego strumienia paliwa zużytego przez silnik jest konieczność ingerencji w układ paliwowy (rys. 4.5) [18]. Stopień ingerencji zależy od poziomu komplikacji wspomnianego układu. Strumień paliwa powrotnego trafia do zbiornika paliwa więcej niż jednym przewodem, co wymusza konieczność rozkręcania wielu złączy przewodów w celu połączenia ich z zewnętrznym zbiornikiem pomiarowym. Przygotowanie lokomotywy do pomiaru zajmuje dużo czasu, co bezpośrednio przekłada się na wydłużenie czasu postoju, a tym samym na zmniejszenie gotowości lokomotywy do wykonywania pracy. Dlatego też opisane powyżej metody praktycznie nie są wykorzystywane.



Rys. 4.5. Schemat układu paliwowego lokomotyw ST44 [18]:

1 – filtr dokładnego oczyszczenia, 2- pompa wtryskowa, 3- zawór przelewowy, 4, 9, 19, 21- zawory odpowietrzające, 5, 23- manometry, 6- zawór bezpieczeństwa, 7- pompa paliwa, 8- podgrzewacz paliwa, 10- szkło kontrolne poziomu paliwa w zbiorniku, 11, 17, 20- korki spustowe, 12- osadnik, 13- zawór spustowy osadu, 14- zbiornik paliwa, 15- króciec wlewowy, 16- wskaźnik poziomu paliwa, 18- wstępny oczyszczania, 22- zawór zasilania awaryjnego pompy wtryskowej, 24- tłumiki pulsacji paliwa, 25- odpieniacz.

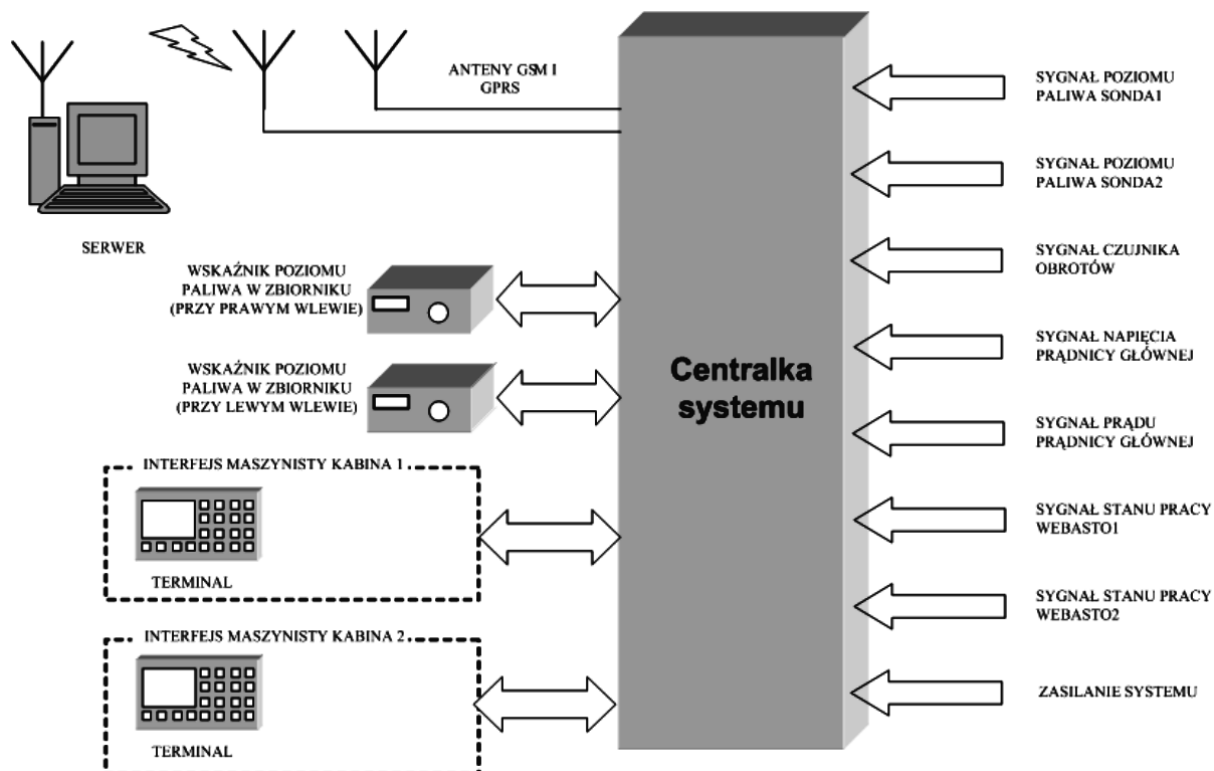
Obecnie coraz częściej w lokomotywach spalinowych z przekładnią elektryczną montowane są urządzenia monitoringu poziomu paliwa w zbiorniku rozchodowym, które za pomocą odpowiednich algorytmów obliczeniowych wyznaczają objętościowe lub masowe natężenie przepływu paliwa. Przykładami takich urządzeń mogą być systemy producentów: ENTE Sp. z o.o. [20, 49], AKSEL Sp. z o.o. [1], ELTE Sp. z o.o.[19], ZPEWN Jerzy Czerwiński [90]. Dokonują one często, w celach diagnostycznych, porównania zapotrzebowania energii elektrycznej przez silniki trakcyjne z masowym strumieniem paliwa zużywanym przez silnik spalinowy. Strumień paliwa obliczany jest na podstawie pomiaru zmieniającego się poziomu lub masy paliwa w zbiorniku. Ponadto dzięki zastosowaniu modułu GPS, możliwe jest określenie położenia i prędkości pojazdu [9]. Na rys. 4.6 [91] przedstawiono układ monitoringu firmy ZPEWN Jerzy Czerwiński, który do określania ubytku paliwa wykorzystuje pomiar jego masy za pomocą sond hydrostatycznych. W niektórych systemach strumień paliwa określany jest w jednostkach objętości za pomocą pomiaru zmiany poziomu paliwa przy wykorzystaniu sond ultradźwiękowych. Ponadto pomiar objętościowego strumienia może być uzupełniony o dane z przepływomierza paliwa dostarczanego do silnika spalinowego.



Rys. 4.6. Układ monitoringu masowego strumienia paliwa [91]: R – rejestrator CL400, P – hydrostatyczne sondy poziomu paliwa CL411, E – miernik energii elektrycznej, M – moduł telemetryczny GPRS/GPS i antena

Obecnie w nowych lub modernizowanych lokomotywach stosuje się co raz częściej silniki spalinowe wyposażone w zasobnikowy układ wtrysku paliwa, z elektromagnetycznie sterowanymi wtryskiwaczami. Powyższe rozwiązanie umożliwia określenie objętościowego strumienia paliwa na podstawie znajomości czasu otwarcia wtryskiwaczy [61, 63].

W przypadku lokomotywy ST44, do obliczenia strumienia paliwa wykorzystano dane z systemu monitoringu Metronix firmy ENTE (rys. 4.7) [71].



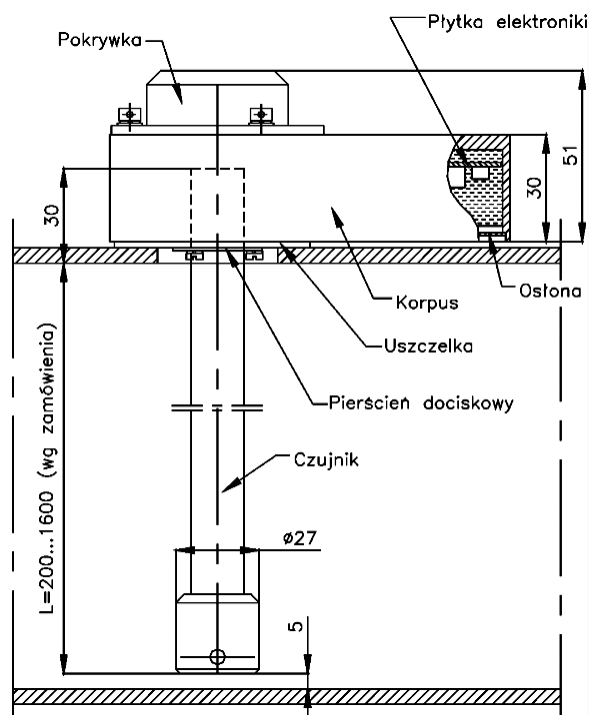
Rys. 4.7. Architektura systemu Metronix [71]

Ten system wykorzystuje sondy hydrostatyczne typu CS-25 (rys. 4.8 i 4.9) [3], [2], umieszczone w zbiorniku paliwa. Sondy służą do pomiaru ciśnienia hydrostatycznego przy dnie

zbiornika, które następnie jest przeliczane na objętość paliwa przy uwzględnieniu tzw. krzywej kalibracyjnej zbiornika paliwa.



Rys. 4.8. Sonda CS-25 – widok [3]



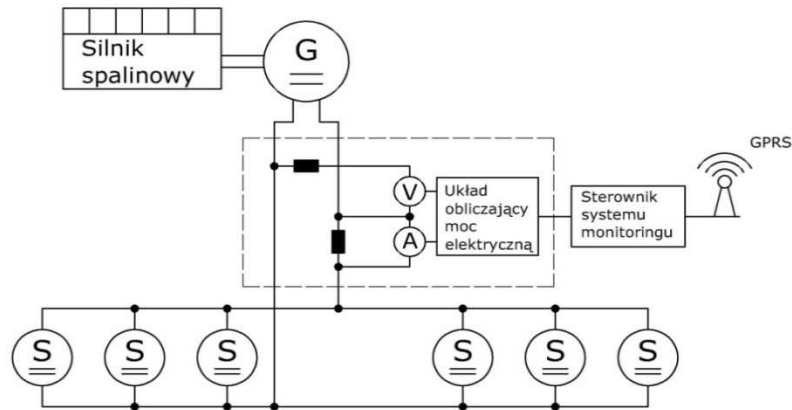
Rys. 4.9. Sposób zamontowania sondy w zbiorniku [2]

Pomiar realizowany jest za pomocą czujnika piezorezystancyjnego, który oddzielony od cieczy jest przez membranę separującą, umieszczoną 5 mm nad dnem zbiornika. Sonda charakteryzuje się błędem podstawowym wynoszącym 0,16% i histerezą 0,05%. Zastosowanie dwóch sond, zamontowanych po przekątnej zbiornika ma na celu eliminację wpływu pochyłości toru na wynik pomiaru.

Oprócz danych dotyczących poziomu paliwa w zbiorniku, dostarcza wiele innych informacji, które niezbędne są w dalszej analizie. Do najważniejszych z nich należą informacje, dotyczące stanów układu napędowego, które w przypadku powyższego systemu monitoringu są zdefiniowane w następujący sposób:

- „Jazda, silnik wyłączony”, w którym lokomotywa porusza się z wyłączonym silnikiem spalinowym, co ma miejsce w przypadku, gdy lokomotywa jest ciągnięta lub pchana przez inny pojazd kolejowy.
- „Jazda, silnik włączony” realizowany, gdy lokomotywa jest w ruchu z pracującym silnikiem spalinowym. Warto zaznaczyć, że stan ten jest sygnalizowany zarówno w przypadku pracy silnika spalinowego pod obciążeniem, gdy przekazywana jest moc z silnika spalinowego na zestawy kołowe jak i w przypadku pracy silnika na biegu jałowym.
- „Postój, silnik wyłączony”, gdy prędkość lokomotywy równa jest 0 km/h i jej silnik jest wyłączony.
- „Postój, silnik włączony” jest realizowany podczas postoju lokomotywy z pracującym silnikiem spalinowym.

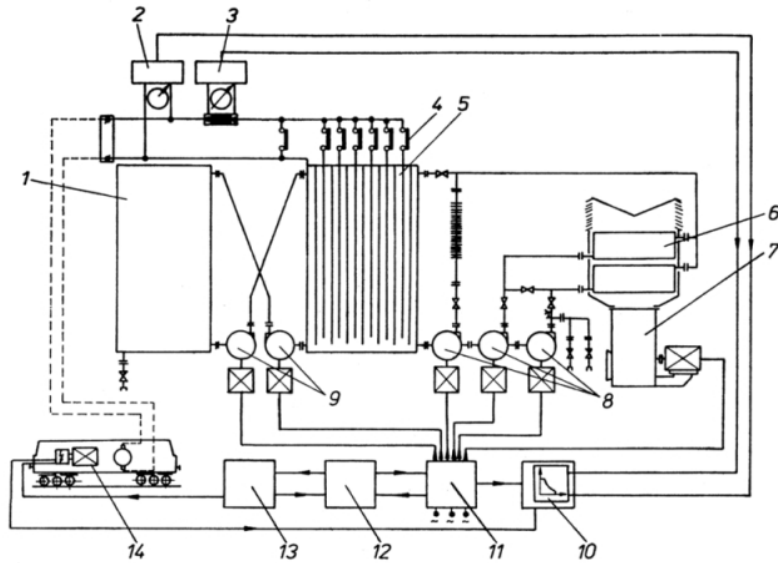
Oprócz identyfikacji stanów układu napędowego, system monitoringu umożliwia rejestrację danych dotyczących mocy prądnicy głównej. Ponieważ w przypadku lokomotywy ST44 prądnica główna jest maszyną prądu stałego, moc elektryczna jest iloczynem napięcia i natężenia prądu w przewodach łączących prądnicę główną z silnikami trakcyjnymi. Ogólny schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4.10.



Rys. 4.10. Schemat systemu pomiarowego lokomotywy z przekładnią elektryczną

Powyższe dane są podawane w funkcji czasu (t), średnio co 60 sekund, bez względu na stan pracy.

Pomiar strumienia paliwa, zużywanego przez silnik dokonywany jest również podczas badań na stanowisku diagnostycznym [21, 80], którego przykład przedstawiono na rys. 4.11 [26]. To stanowisko wyposażone jest w opornik wodny 5 połączony za pomocą przewodów z prądnicą główną badanej lokomotywy 14 i daje możliwość dowolnego obciążania jej układu napędowego. Umożliwia tym samym symulowanie wszystkich trybów pracy, jakie występują w rzeczywistej eksploatacji. Opornik wodny wykonany jest w formie zbiornika, w którym znajdują się elektrody w postaci płyt zanurzonych w elektrolicie, będącym roztworem soli w wodzie. W przypadku opornika wodnego wartość obciążenia może być dowolnie regulowana poprzez zmianę powierzchni czynnej płyt zanurzonych w elektrolicie. Zmiana powierzchni realizowana jest za pomocą zmiany liczby płyt włączonych w obwód za pomocą styczników 4, jak również poprzez zmianę stopnia zanurzenia elektrod w wyniku zmiany poziomu elektrolitu przy użyciu pomp 9. Stosuje się również rozwiązania, wykorzystujące ruchome elektrody. W trakcie badań energia elektryczna wytworzona przez prądnicę główną zamieniana jest w oporniku wodnym na energię cieplną elektrolitu.

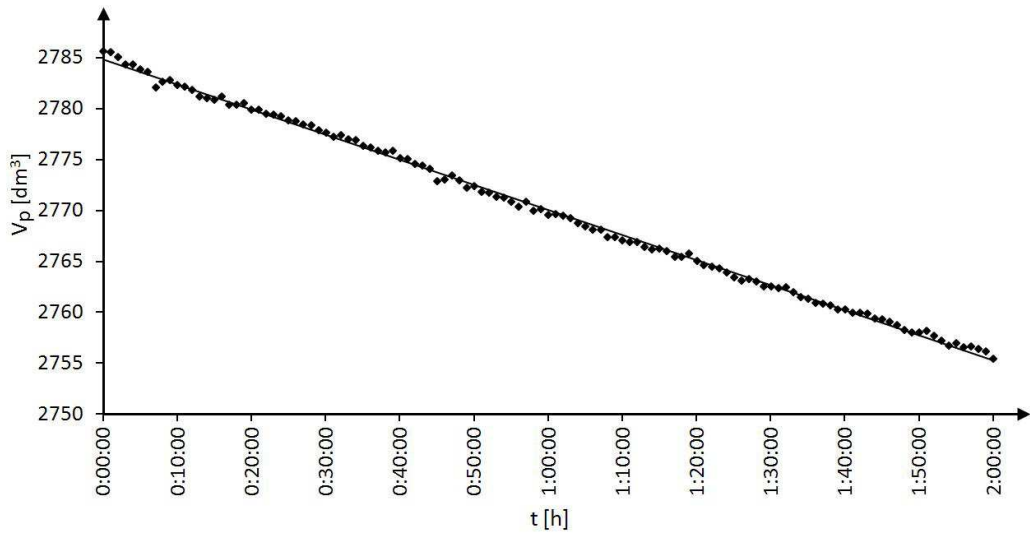


Rys. 4.11. Stanowisko diagnostyczne [26]: 1- zbiornik elektrolitu, 2- woltomierz, 3- amperomierz, 4- styczniki, 5- opornik wodny, 6- chłodnica, 7- wentylator, 8- pompy układu chłodzącego, 9- pompy regulacji poziomu elektrolitu, 10- analizator, 11- blok zasilania elektrycznego, 12- układ sterownia opornikiem, 13- układ sterownia badaną lokomotywą

Opornik wodny wymaga chłodzenia za pomocą układu chłodzącego, który składa się z chłodnicy 6, wentylatora 7 oraz pomp 8. Oprócz powyższych elementów, stanowisko diagnostyczne posiada również układy do pomiaru strumienia paliwa, czujniki wykorzystywane do pomiarów różnych parametrów silnika spalinowego, jak ciśnienia i temperatury w układach dolotowych i wylotowych, ciśnienia w układzie paliwowym oraz ciśnienia spalania w cylindrach. Ze względu na wysoką klasę dokładności czujników, pomiary charakteryzują się wysokim poziomem precyzji, co stanowi istotną zaletę badania na stanowisku diagnostycznym. Jednak badanie to jest czasochłonne, co wymaga długotrwałego wyłączenia lokomotywy z eksploatacji, dlatego też przeprowadza je się jedynie w sytuacjach, gdy jest to wymagane przez harmonogram zamieszczony w Dokumentacji Techniczno-Ruchowej lokomotywy lub w przypadku stwierdzenia znaczących nieprawidłowości w pracy układu napędowego.

4.3.1.1. Pomiar strumienia paliwa podczas pracy na biegu jałowym

Dokonanie pomiaru strumienia paliwa zużywanego przez silnik spalinowy w stanie biegu jałowego wymaga identyfikacji tego stanu. W przypadku systemu Metronix z pracą silnika w stanie biegu jałowego mamy do czynienia w przypadku, gdy system monitoringu wykazuje stan „Postój, silnik włączony” lub „Jazda, silnik włączony”. Ponadto drugi ze stanów musi być dodatkowo uzupełniony o dane dotyczące mocy elektrycznej, która w tym konkretnym przypadku musi być równa 0 kW. Na rys. 4.12 przedstawiono zmiany objętości paliwa w zbiorniku (V_{pz}) zarejestrowane podczas pracy silnika spalinowego w stanie biegu.



Rys. 4.12. Zmiany objętości paliwa w zbiorniku zarejestrowane podczas pracy silnika spalinowego w stanie biegu jałowego [45]

Ten przebieg został aproksymowany funkcją liniową:

$$V_{pz} = -0,0675 \cdot t + 188,2 \quad (4.2)$$

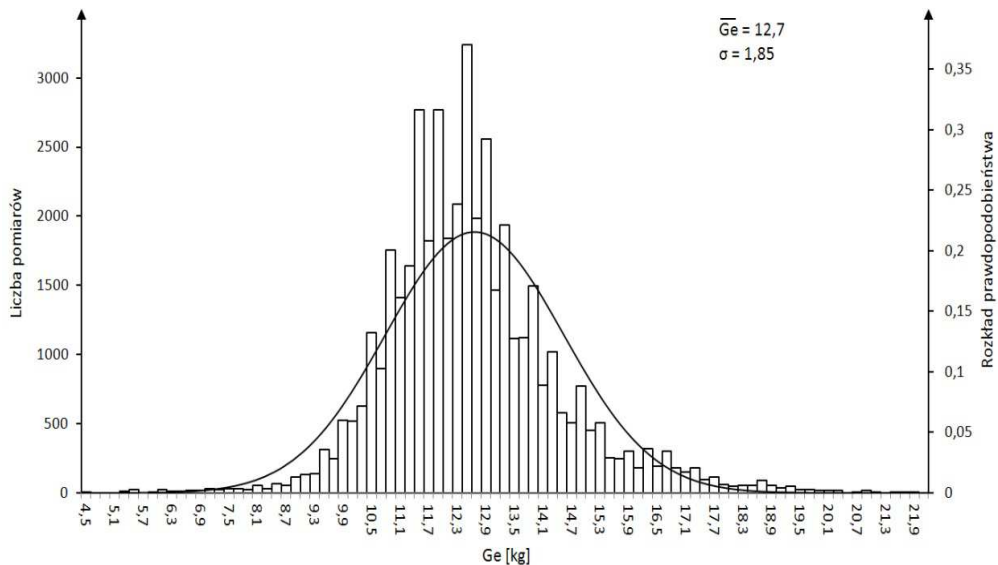
gdzie:

V_{pz} - objętość paliwa w zbiorniku [dm^3]

t - czas [h]

Przy założeniu, że gęstości oleju napędowego wynosi $0,830 \text{ kg/dm}^3$ masowy strumień paliwa dla powyższego pomiaru wynosi $12,3 \text{ kg/h}$.

Uzyskanie dokładniejszych wyników jest możliwe przy dłuższym czasie pomiaru w czasie postoju. Na rys. 4.13 [45] przedstawiono rozkład wartości masowego strumienia paliwa uzyskanych w trakcie rocznej eksploatacji przy realizacji stanu postoju z silnikiem włączonym.

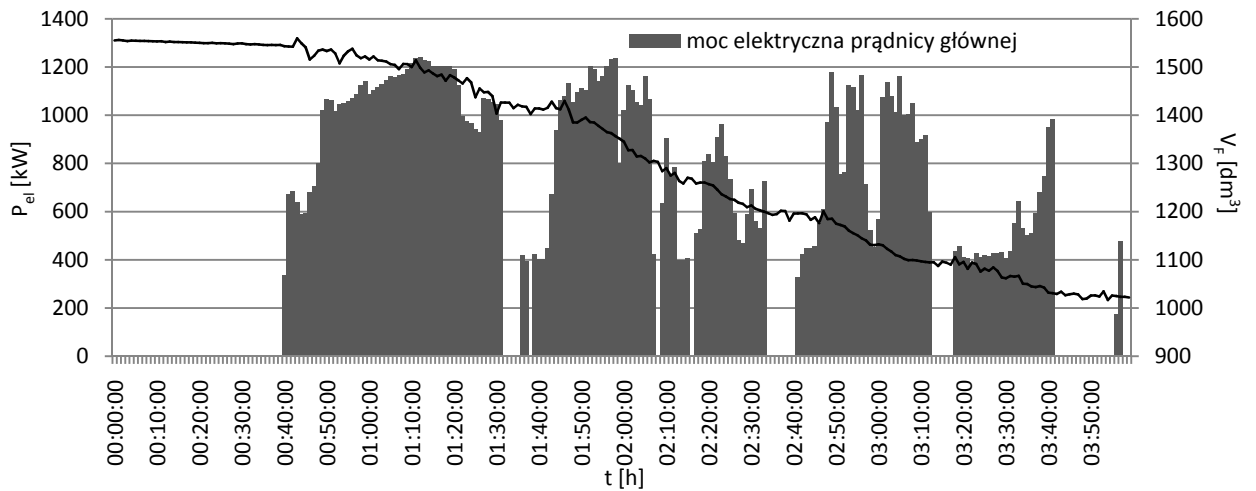


Rys. 4.13. Rozkład wartości masowego strumienia paliwa podczas pracy silnika spalinowego w stanie biegu jałowego [45]

Minimalny czas postoju, dla którego obliczano masowy strumień paliwa, wnosił 30 min, w następstwie otrzymano liczbę pomiarów wynoszącą 44 311. Dla tych danych (rys. 4.13) średni masowy strumień paliwa wynosi 12,7 kg/h.

4.3.1.2. Pomiar strumienia paliwa przy jeździe pod obciążeniem

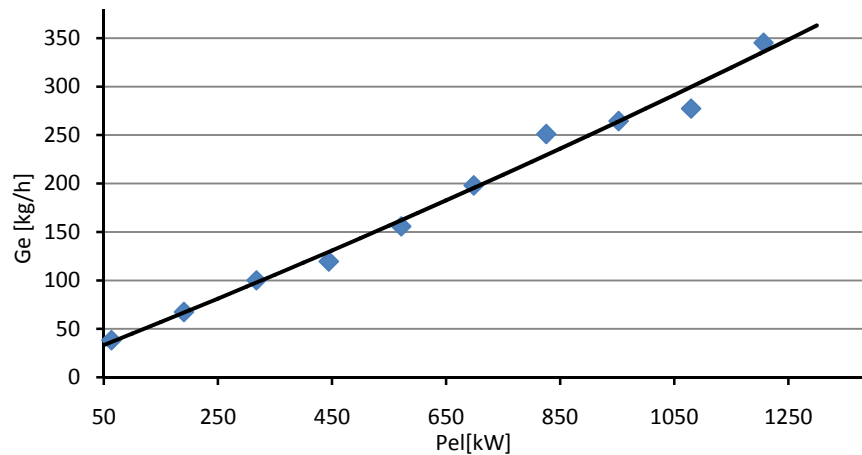
Na rys.4.14 [48] przedstawiono wykres zmian poziomu paliwa i mocy elektrycznej prądnicy głównej podczas pracy pociągowej lokomotywy, trwającej 4 godziny.



Rys. 4.14. Zmiana poziomu paliwa i mocy elektrycznej prądnicy głównej podczas pracy pociągowej lokomotywy [48].

Na skutek występujących błędów pomiarowych przebieg zmiany poziomu paliwa ma nieregularny kształt. W przypadku sond hydrostatycznych oprócz błędu czujnika pojawiają się dodatkowe błędy. Są one spowodowane pochyleniem zbiornika, kiedy lokomotywa porusza się po torze pochyłym, a także zaburzeniami powierzchni paliwa na skutek sił dynamicznych, występujących podczas jazdy. Błędy te są minimalizowane poprzez zastosowanie odpowiednich filtrów i oprogramowania zastosowanego w komputerze sterującym systemem monitoringu. Dalszą minimalizacją błędów osiąga się poprzez zwiększenie liczby pomiarów.

Na wykresie 4.15 [48] przedstawiono wartość strumienia paliwa w funkcji mocy elektrycznej generowanej przez prądnicę główną.



Rys. 4.15. Strumień paliwa zużywanego przez silnik spalinowy w funkcji mocy generowanej przez prądnicę główną [48]

Przebieg ten został aproksymowany za pomocą wielomianu drugiego stopnia:

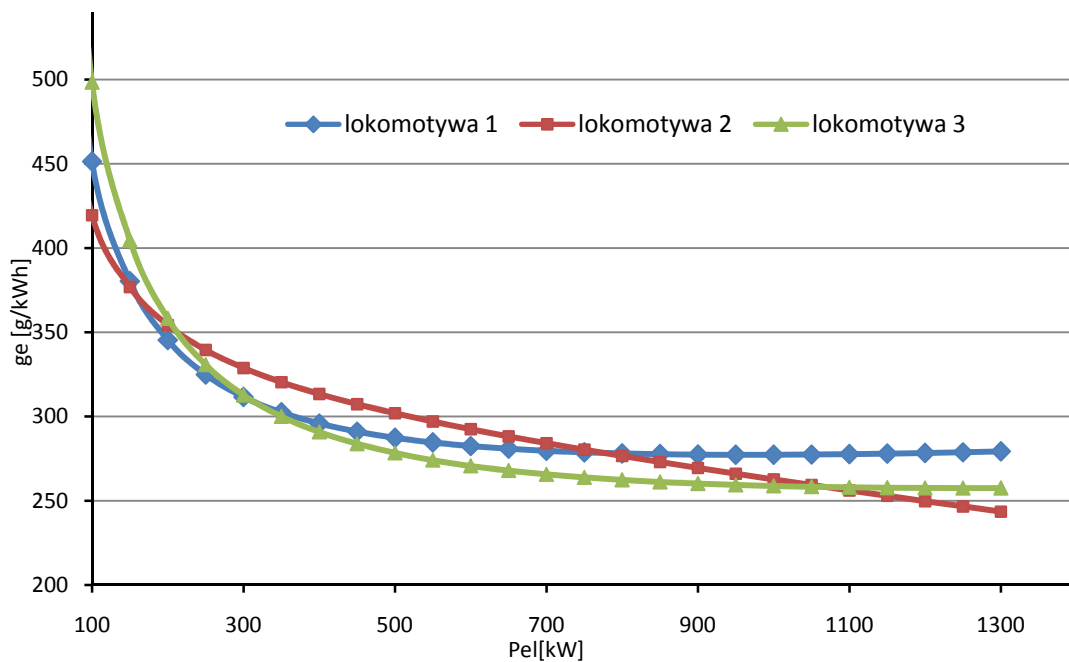
$$Ge = 2,3 \cdot 10^{-5} P_{el}^2 + 0,23 P_{el} + 21,65 \quad (4.3)$$

gdzie:

Ge - masowy strumień paliwa [h],

P_{el} - moc elektryczna prądnicy głównej [kW].

Powyższe równanie zostało wykorzystane do obliczenia jednostkowego zużycia paliwa (rys. 4.16) [48]. Na rys. 4.16 przedstawiono również przebieg jednostkowego zużycia paliwa dla dwóch innych lokomotyw.



Rys. 4.16. Jednostkowe zużycie paliwa dla trzech lokomotyw [48]

Pomimo, że są to lokomotywy tej samej serii, posiadające identyczne układy napędowe, odznaczają się innymi charakterystykami jednostkowego zużycia paliwa. Może się więc okazać, że lokomotywa, charakteryzująca się najniższym zużyciem paliwa podczas prowadzenia ciężkiego pociągu nie będzie równie ekonomiczna podczas lekkiej pracy pociągowej lub manewrowej.

4.4. Pomiar i rejestracja parametrów jazdy

4.4.1. System pomiaru i rejestracji parametrów jazdy

Do pomiaru i rejestracji prędkości oraz innych parametrów jazdy lokomotywy wykorzystano system firmy Hasler. W skład systemu wchodzi jednostka sterująca Teloc 1500 (rys. 4.17) [33], jednostka obrazowania i komunikacji A302H (rys. 4.18) [77] oraz czujnik obrotów Halla GEL2710.x. (rys. 4.19)[34]. Głównym przeznaczeniem systemu jest pomiar, rejestracja oraz wizualizacja podstawowych parametrów jazdy jak prędkość oraz przebyty dystans. Ponadto system wykorzystywany jest do rejestracji innych sygnałów analogowych, jak ciśnienie powietrza w głównym przewodzie hamulcowym, a także sygnałów binarnych, wysyłanych przez układy bezpieczeństwa, jak: układ Samoczynnego Hamowania Pociągu (SHP) i Czuwaka Aktywnego (CA). System ten umożliwia również rejestrację parametrów pracy układu napędowego lokomotywy, takich jak napięcie i prąd w przewodach łączących prądnicę z silnikami trakcyjnymi. Rejestracja parametrów jazdy oraz danych pociągu realizowana jest w wbudowanej w jednostkę centralną pamięci typu FLASH.



Rys. 4.17. Jednostka centralna systemu Teloc [33]



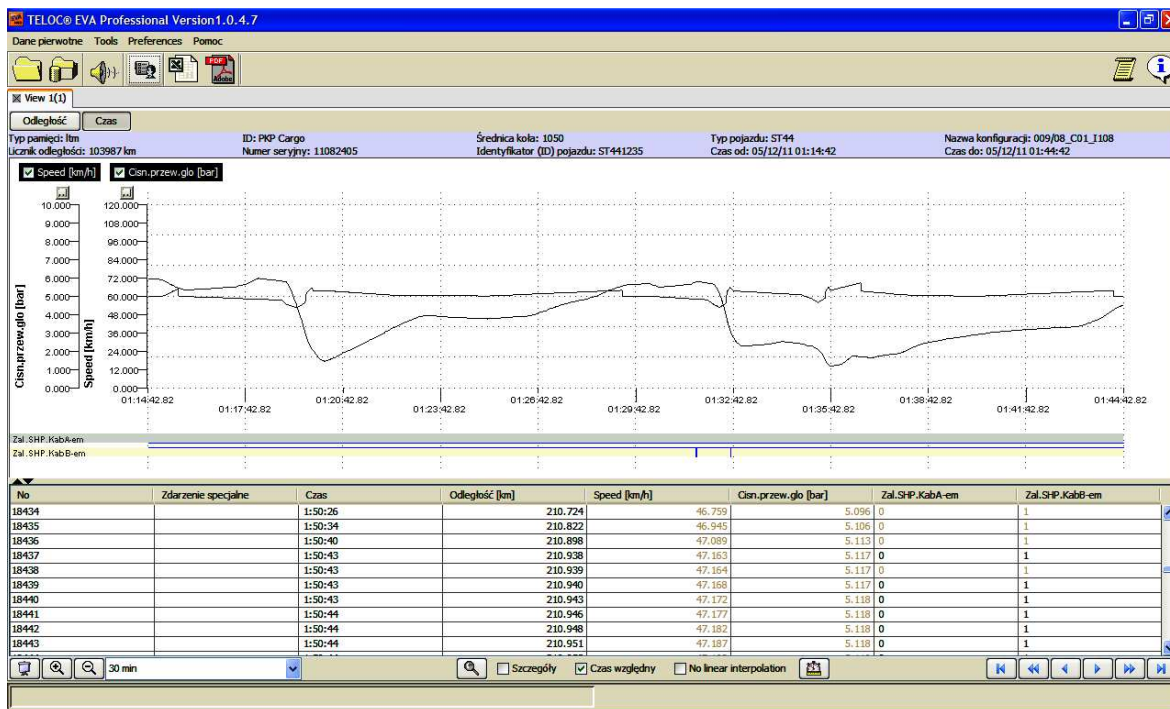
Rys. 4.18. Jednostka obrazowania i komunikacji A302H [77]



Rys. 4.19. Generator impulsów [34]

Jednostka obrazowania i komunikacji oprócz wizualizacji parametrów jazdy, umożliwia wprowadzanie do pamięci systemu danych dotyczących pociągu, takich jak: długość, masa, oraz sumaryczna liczba zestawów kołowych wagonów.

Zarejestrowane dane można transmitować do komputera. Za pomocą zainstalowanego na komputerze odpowiedniego oprogramowania EVA 2 firmy Hasler, możliwa jest wizualizacja transmitowanych danych zarówno w funkcji czasu jak i przebytej drogi (rys. 4.20). Program umożliwia tworzenie raportów, a także eksportowanie ich do programu Microsoft EXCEL w celu ich dalszej obróbki.



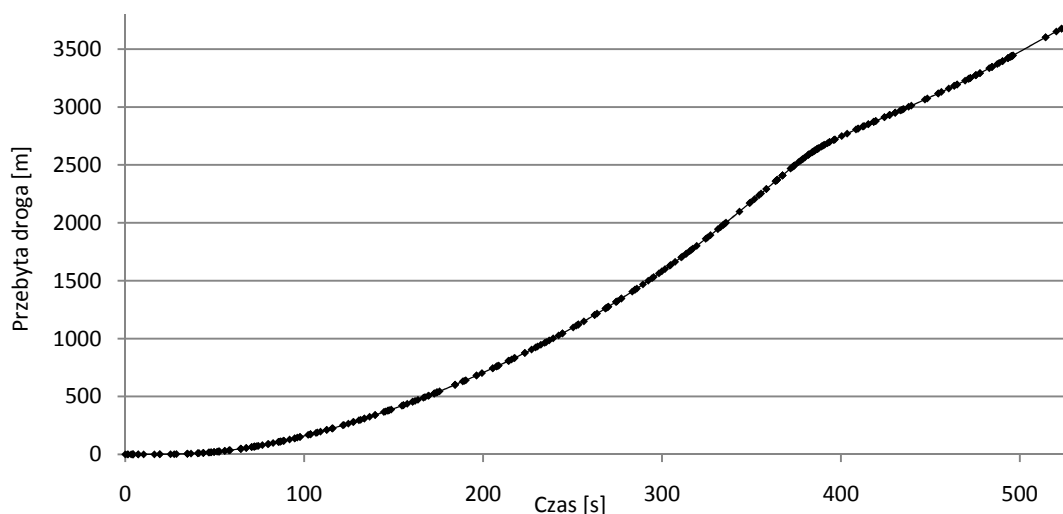
Rys. 4.20. Okno programu EVA 2

4.4.2. Obliczanie prędkości i przyspieszenia lokomotywy

Znajomość wartości prędkości i przyspieszenia jest niezbędna w analizie pracy lokomotywy. Wartość prędkości jest rejestrowana za pomocą systemu firmy Hasler, rejestracja odbywa się z różnym krokiem czasowym, w zależności od wartości przyspieszenia lokomotywy. Gdy wartość bezwzględna przyspieszenia lokomotywy jest mała np. podczas jazdy wybiegiem krok czasowy jest większy niż 30 s. W przypadku realizacji rozruchu lub hamowania krok czasowy ulega skróceniu nawet do wartości 0,2 s. Dynamiczna zmiana długości kroku czasowego ma na celu ograniczenie ilości danych zapisywanych w pamięci systemu rejestrującego.

Oprócz prędkości system rejestruje drogę przebytą przez lokomotywę. Podczas analizy zarejestrowanych danych można stwierdzić, że przebyty dystans rejestrowany jest z krótszym krokiem czasowym niż prędkość.

Wykres przebytego dystansu lokomotywy w funkcji czasu przedstawiono na rys. 4.21.



Rys. 4.21. Droga przebyta przez lokomotywę zarejestrowana przez system Teloc

Ze względu na wysoką dokładność pomiaru przebytej drogi oraz krótszy krok czasowy niż ma to miejsce w bezpośrednim pomiarze prędkości, prędkość lokomotywy została określona metodą obliczeniową. W tym celu dokonano aproksymacji zmierzonego dystansu przebytego przez lokomotywę za pomocą wielomianu w przedziale czasu trwającym 60s:

$$s_{teloc}(t) = A_L t^3 + B_L t^2 + C_L t + D_L \quad (4.4)$$

gdzie:

$s_{teloc}(t)$ - dystans przebyty przez lokomotywę w funkcji czasu wg systemu Teloc [m],

t - czas [s],

A_L, B_L, B_L, C_L - współczynniki funkcji aproksymującej.

Traktując prędkość, jako pochodną drogi przebytej przez pojazd po czasie wartość prędkości można obliczyć za pomocą następujących zależności:

$$V_{teloc} = \frac{ds_{teloc}(t)}{dt} \quad (4.5)$$

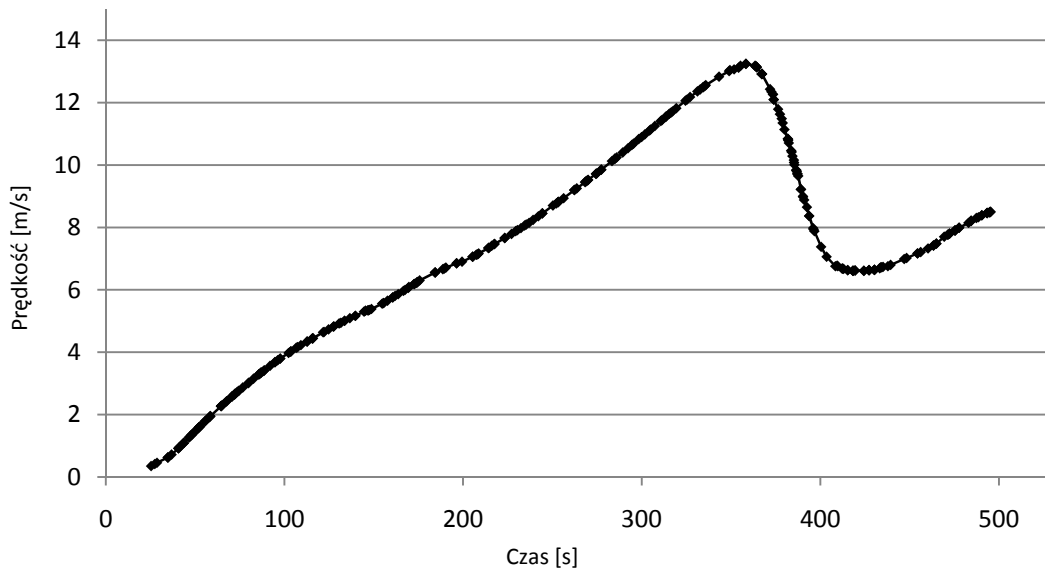
$$V_{teloc} = 3A_L t^2 + 2B_L t + C_L \quad (4.6)$$

Uwzględniając natomiast, że przyspieszenie jest pochodną prędkości po czasie wartość przyspieszenia można obliczyć za pomocą następujących zależności :

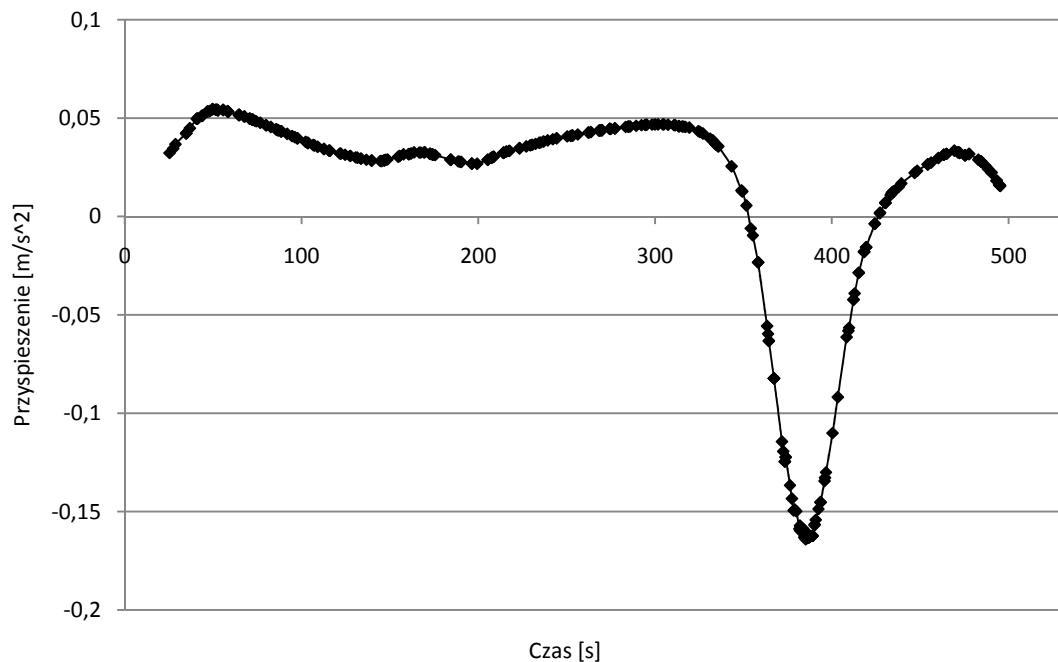
$$a_{teloc} = \frac{dV_{teloc}(t)}{dt} \quad (4.7)$$

$$a_{teloc} = 6A_L t + 2B_L \quad (4.8)$$

Na rysunku 4.22 i 4.23 przedstawiono przykładowe przebiegi prędkości i przyspieszenia, otrzymane w wyniku przeprowadzonych obliczeń z wykorzystaniem zależności (4.5÷4.8). Wartość przyspieszenia $-0,16 \frac{m}{s^2}$ osiągnięto podczas realizacji hamowania kontrolnego pociągu.



Rys. 4.22. Przykładowy przebieg prędkości lokomotywy



Rys. 4.23. Przykładowy przebieg przyspieszenia lokomotywy

W celu zminimalizowania błędu, proces obliczania wartości prędkości i przyspieszenia przeprowadzono dla punktu środkowego 60-cio sekundowego przedziału czasu.

4.5. Informacje dotyczące pracy lokomotywy

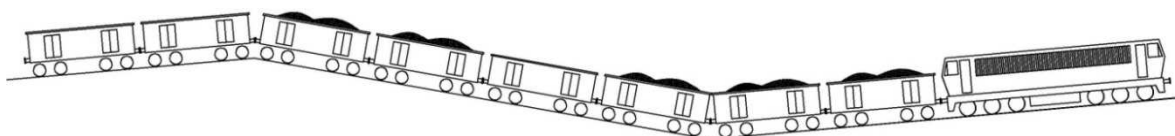
Oprócz danych dotyczących stanów eksploatacji, w analizie pracy lokomotywy niezbędne są informacje dotyczące składu pociągu przez nią prowadzonego.

Jednym z najważniejszych dokumentów wykorzystywanym w eksploatacji lokomotywy jest Karta Pracy Drużyny Trakcyjnej i Pojazdów. Dokument ten zawiera dane maszynisty, czas i miejsce rozpoczęcia i zakończenia pracy lokomotywy, numer zamówienia, rodzaj pracy lokomotywy, numer pociągu, czas jazdy, czas postoju, dystans przebyty podczas służby, sumaryczną liczbę osi wagonów, masę brutto pociągu oraz „stan” paliwa na początku i na końcu pracy. Ten dokument zawiera także informacje o opóźnieniach, oraz uwagi dotyczące usterek. Karta pracy drużyny trakcyjnej i pojazdów jest wypełniana przez każdego maszynistę podczas „obejmowania służby na lokomotywie”. Ponadto część informacji dotyczących pociągu, jak długość i masa jest wprowadzana przez maszynistów do pamięci prędkościomierzy rejestrujących.

4.6. Droga kolejowa

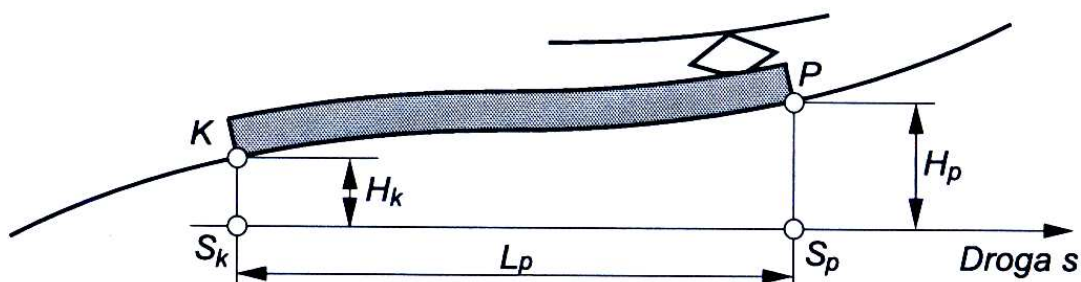
Istotnym elementem, mającym wpływ na energochłonności transportu kolejowego są parametry drogi, na której eksploatowane są pojazdy szynowe. Szczególnie istotnym parametrem jest pochylenie drogi, gdyż ma on bezpośredni wpływ na siły zachowawcze związane z kumulacją energii potencjalnej.

Na rysunku 4.24 przedstawiono skład pociągu, poruszający się na przykładowym fragmencie drogi kolejowej o złożonym profilu poprzecznym.



Rys. 4.24. Skład pociągu na przykładowym fragmencie drogi kolejowej o złożonym profilu poprzecznym

Ze względu na swoją długość skład pociągu obejmuje zazwyczaj wiele fragmentów trasy o różnych pochyłościach. Wymaga to traktowania pociągu jako zbioru pojedynczych pojazdów. Jednak analiza pracy lokomotywy w przypadku pociągów, składających się z większej liczby wagonów wiąże się z koniecznością wykonywania dużej liczby obliczeń. Z tego względu powszechnie stosuje się uproszczony model pociągu (rys. 4.25), który umożliwi zredukowanie masy pociągu do jednego punktu poruszającego się po drodze o pochyleniu zastępczym [59].



Rys. 4.25. Uproszczony model składu [59]

Wartość pochylenia zastępczego wyrażona jest zależnością:

$$i_{zast}[\text{‰}] = \frac{H_p - H_k}{L_p} 10^3 \quad (4.9)$$

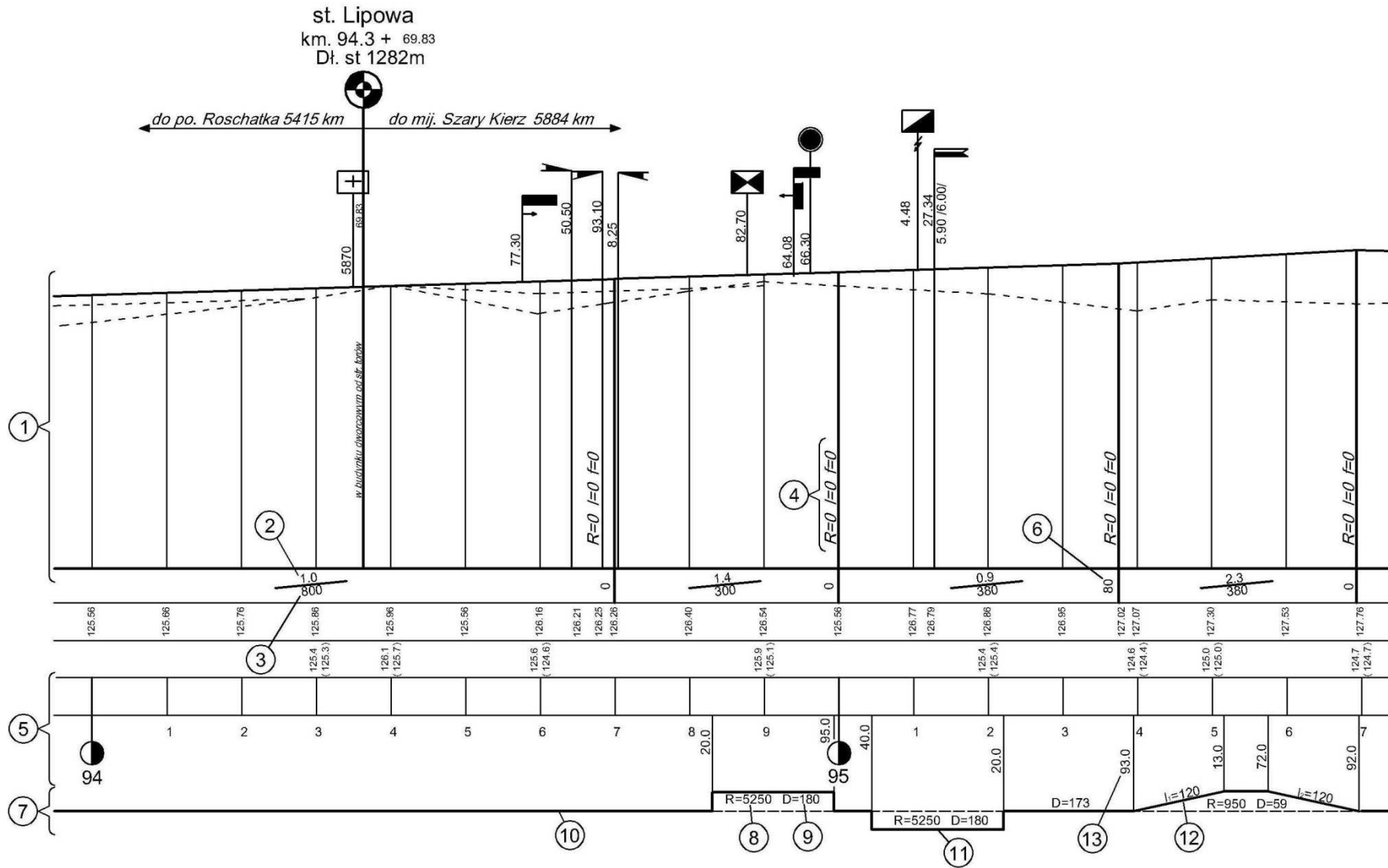
gdzie:

H_p – wysokość czoła pociągu [m],

H_k – wysokość końca pociągu [m],

L_p – długość pociągu [m].

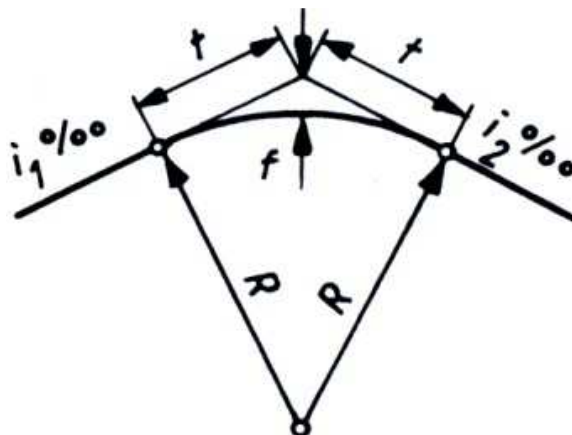
Źródłem danych, dotyczących parametrów drogi kolejowej jest dokumentacja, znajdująca się w posiadaniu zarządcy linii kolejowych, w tym przypadku spółki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Na rys. 4.26 przedstawiono przykładowy fragment wspomnianej dokumentacji.



Rys. 4.26. Przykład fragmentu dokumentacji drogi kolejowej {dzięki uprzejmości PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.}:

- 1 - profil pionowy, 2 - pochylenie fragmentu trasy, 3 - długość fragmentu trasy, 4 - parametry zaokrąglenia załomu, 5 - pikietaż, 6 - położenie w drodze kolejowej granicy fragmentów o różnym pochyleniu, 7 - parametry elementów w palnie drogi kolejowej, 8 - promień łuku, 9 - długość łuku, 10 - oznaczenie prostego odcinka trasy, 11 - oznaczenie łuku, 12 - oznaczenie krzywej przejściowej, 13 - położenie granic poszczególnych elementów w planie drogi

Parametry profilu poprzecznego przedstawione są w części 1, gdzie wartość 2 określa pochylenie odcinka trasy wyrażone w promilach [‰], a wartość 3 długość odcinka. W przypadku dużej różnicy pochyłeń odcinków niezbędne jest zastosowanie zaokrąglenia załomu profilu podłużnego łukiem pionowym (rys. 4.27), którego parametry określają wartości 4.

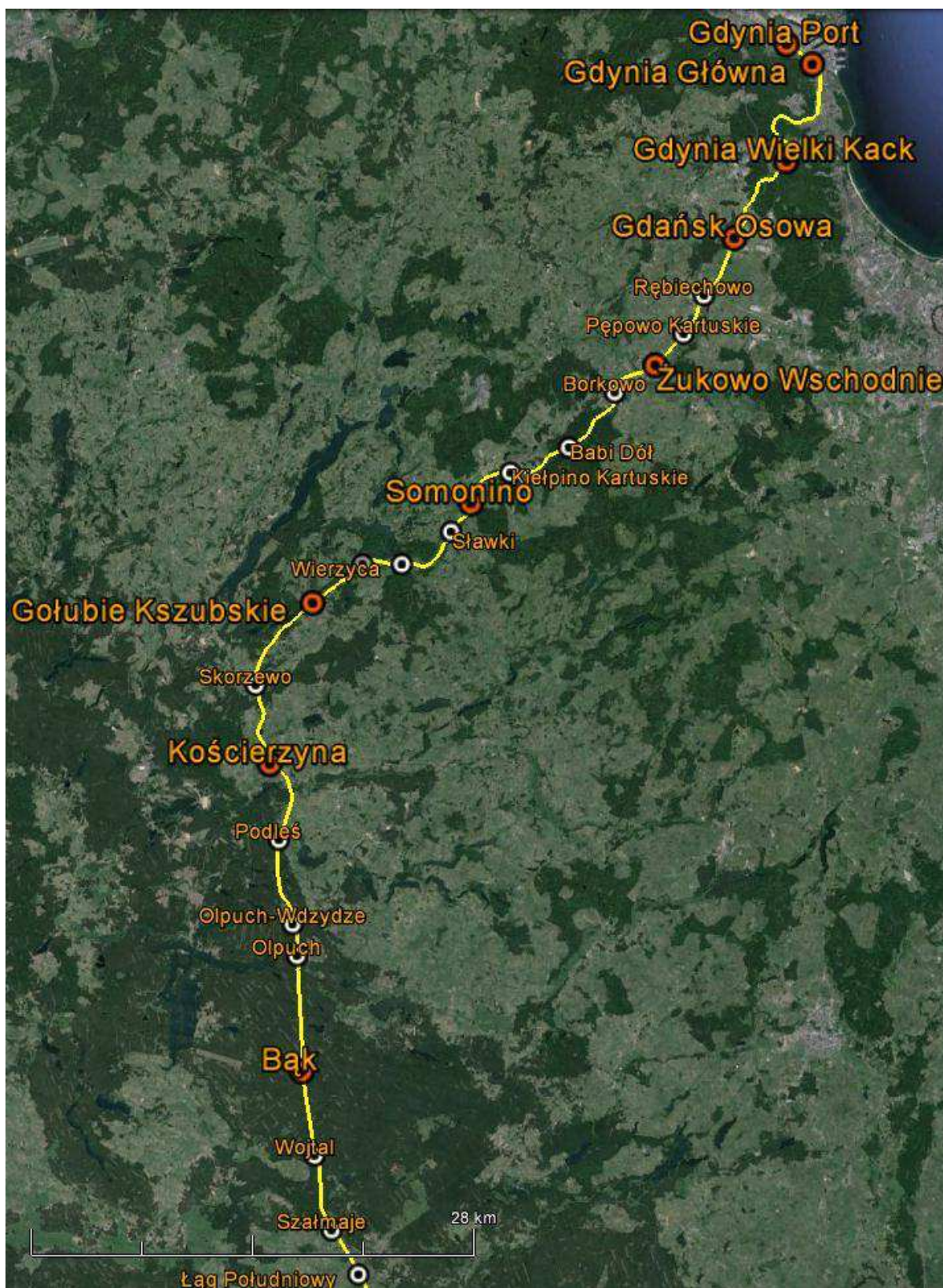


Rys. 4.27. Zaokrąglenia załomu profilu podłużnego łukiem pionowym [7]

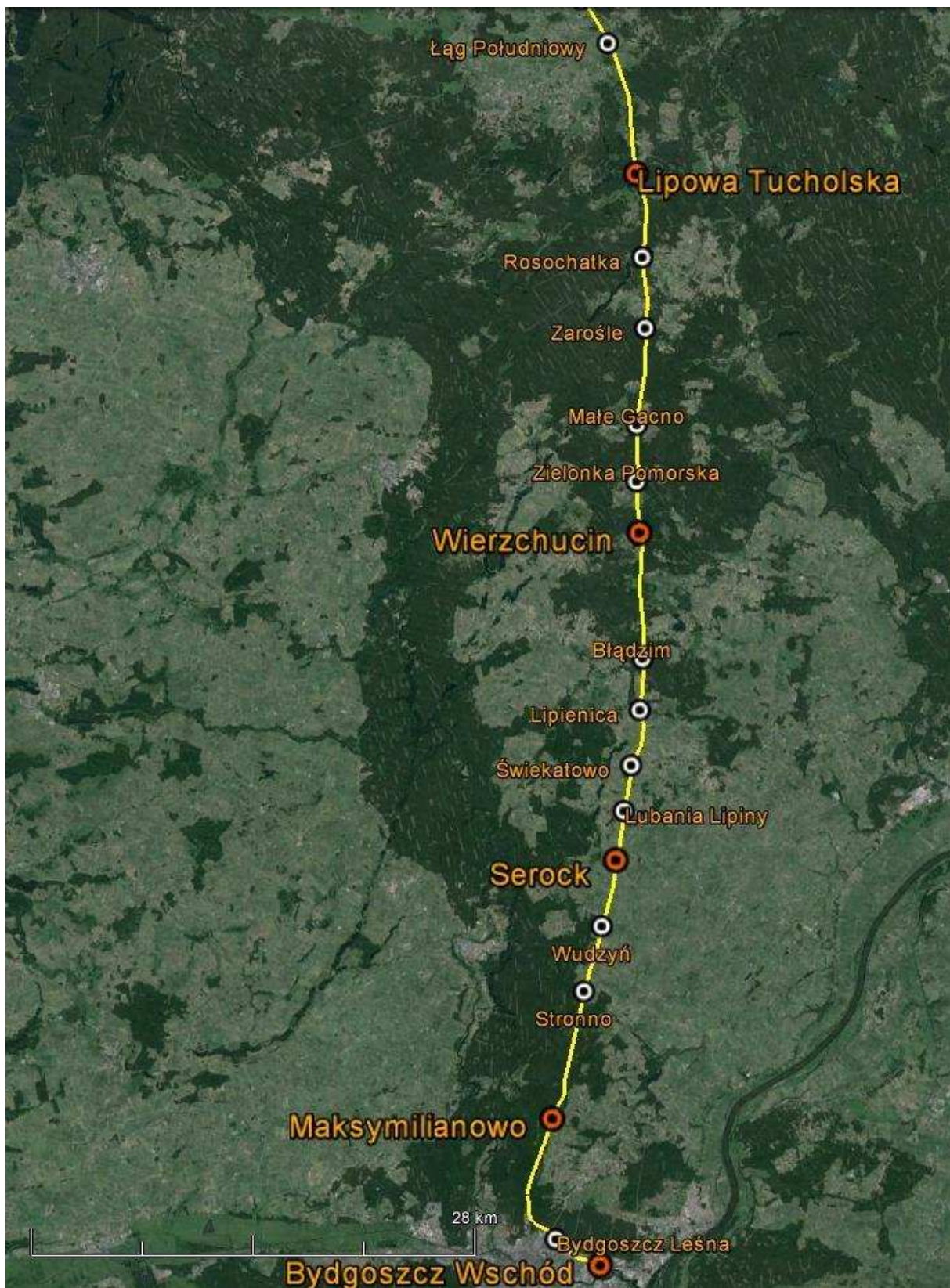
Do ustalenia położenia granic poszczególnych fragmentów trasy o danym pochyleniu służy pikietaż przedstawiony w części 5, którego podziałka wynosi 100m. Dalszemu doprecyzowaniu położenia służą wartości 6.

Dane dotyczące parametrów elementów w planie linii kolejowej zostały przedstawione w części 7. Ta część zawiera główne parametry łuków jak promień 8 oraz ich długości 9. Określony jest również w sposób graficzny kierunek łuku. Gdy linia 11, oznaczająca łuk, znajduje się poniżej linii 10, oznaczającej odcinek prosty, łuk skierowany jest w lewo. Natomiast, gdy linia 11, znajduje się powyżej linii 10, łuk skierowany jest w prawo. Przy projektowaniu linii kolejowej, dąży się do tego, by podczas wjeżdżania i wyjeżdżania z obszaru łuku, siła odśrodkowa działająca na pojazd szynowy nie zmieniała się skokowo. W tym celu stosuje się tzw. krzywą przejściową, na długości której następuje płynne przejście z toru prostego w łuk lub z łuku w tor prosty. Geometria krzywej przejściowej jest dobrana w sposób zapewniający liniową zmianę wartości siły odśrodkowej, działającej na pojazd podczas przejazdu przez łuk. Łuk przejściowy na dokumentacji oznaczony jest za pomocą linii pochyłej 12. Podobnie jak w przypadku profilu poprzecznego, dalszemu doprecyzowaniu położenia łuków służą wartości 13.

Analizę energochłonności transportu kolejowego przeprowadzono w oparciu o badania, przeprowadzone na linii kolejowej 201, pomiędzy stacjami Bydgoszcz Wschód – Gdynia Port w obu kierunkach (rys. 4.28 i 4.29).



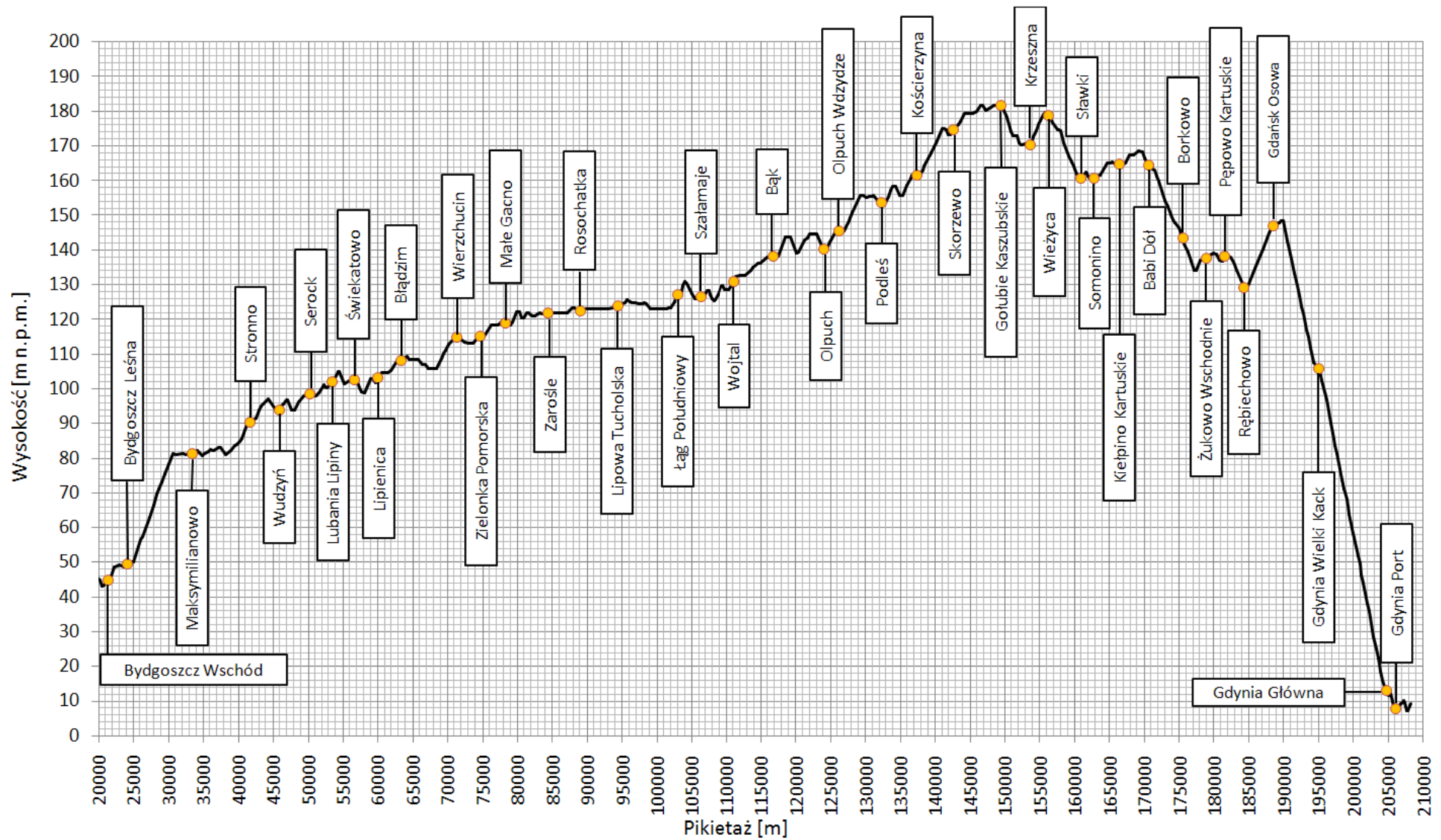
Rys. 4.28. Przebieg linii kolejowej 201 - fragment linii kolejowej pomiędzy stacją Gdynia Port a przystankiem Łąg Południowy



Rys. 4.29. Przebieg linii kolejowej 201 - fragment linii kolejowej pomiędzy przystankiem Łąg Południowy a stacją Bydgoszcz Wschód

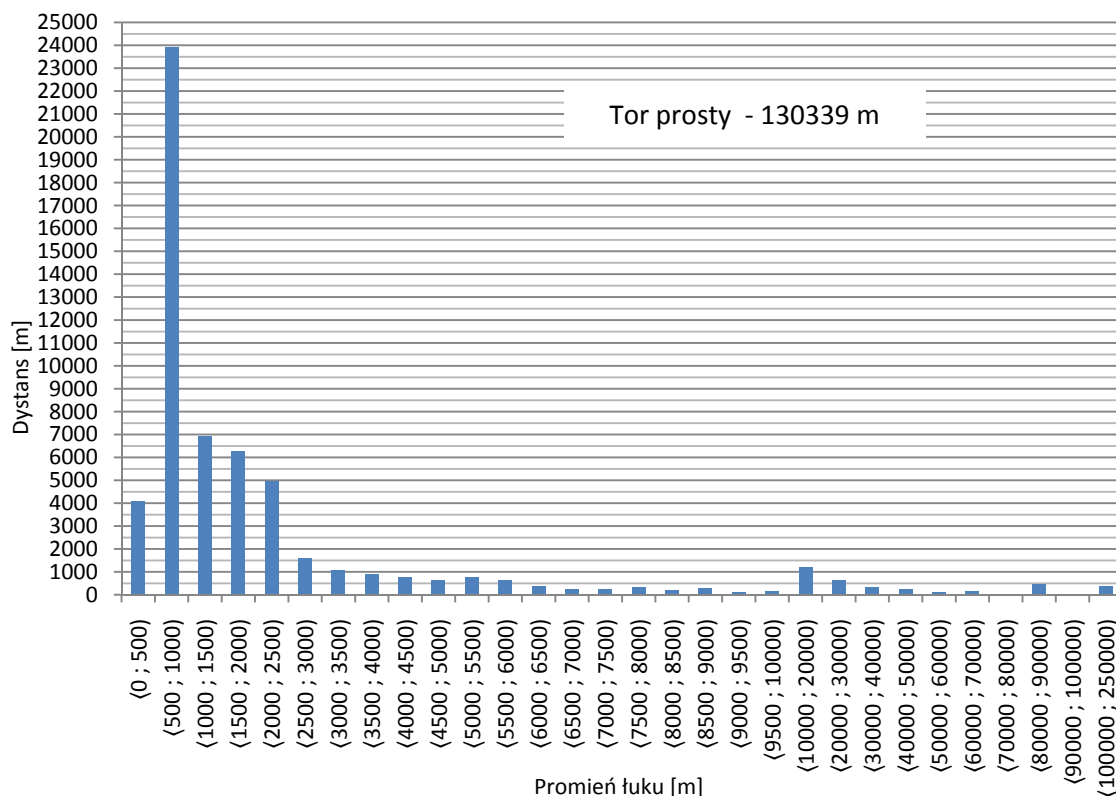
Odległość pomiędzy wspomnianymi stacjami wynosi 185 km. W celu zwiększenia liczby pomiarów, badaniami eksploatacyjnymi objęto nie tylko pociągi kursujące pomiędzy stacjami Bydgoszcz Wschód – Gdynia Port, ale uwzględniono także przejazdy pomiędzy stacjami węzłowymi jak: Bydgoszcz – Kościerzyna, Bąk - Gdynia Port, Bydgoszcz – Somonino, na których pociągi wjeżdżały lub zjeżdżały z linii kolejowej 201.

Profil linii kolejowej, w formie przebiegu wysokości bezwzględnej w funkcji dystansu przedstawiono na rys. 4.30. Wartości wysokości uzyskano w wyniku obliczeń, z uwzględnieniem danych o pochyłościach drogi kolejowej.



Rys. 4.30. Profil linii kolejowej 201 na odcinku Bydgoszcz Wschód - Gdynia Port

Na rys. 4.31 przedstawiono rozkład wartości promieni łuków, które stanowią około 30% całej długości drogi kolejowej pomiędzy stacjami Bydgoszcz Wschód – Gdynia Port. Z rozkładu widać, że na odcinku linii kolejowej 201, na której przeprowadzano badania dominują łuki o promieniu, mieszczącym się w przedziale od 500 do 1000 m.



Rys. 4.31. Rozkład promieni łuków na linii kolejowej 201

Linie 201 pod względem profilu jak i występowaniem łuków można podzielić na dwa odcinki o różnej charakterystyce. Na odcinku od stacji Maksymilianowo do stacji Gołubie Kaszubskie linia charakteryzuje się łagodnymi wzniesieniami, długimi odcinkami prostymi, a także dużymi promieniami łuków. Na odcinku od stacji Gołubie Kaszubskie do stacji Gdynia Port na linii pojawia się duża liczba wzniesień oraz łuków. W szczególności na odcinku Gdańsk Osowa – Gdynia Port droga charakteryzuje się dużymi pochyleniami, osiągającymi nawet 11,8%. Uwzględniając przy tym liczbę występujących łuków, a także ich małe promienie, ten fragment linii kolejowej posiada charakterystykę linii podgórskiej [7].

4.7. Określanie pozycji pociągu na linii kolejowej

Powszechną metodą określania położenia pojazdu na drodze jest wykorzystywanie systemów wyposażonych w moduł GPS. Ponieważ w przypadku badanych lokomotyw nie zastosowano powyższego systemu, do określenia pozycji wykorzystano dane o przebytych dystansie, zmierzone i zapisane przez rejestrator Teloc 1500. Oprócz informacji o przebytych dystansie, lokalizacja lokomotywy na linii kolejowej wymaga określenia punktów odniesienia. W tym celu wykorzystano system Samoczynnego Hamowania Pociągu (SHP), wchodzący

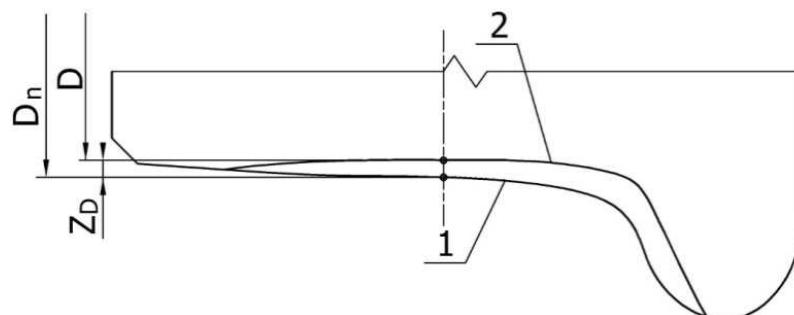
w skład automatyki bezpieczeństwa pociągu, w który wyposażona jest lokomotywa. Urządzenie to wykorzystywane jest do kontroli czujności maszynisty, a jego działanie polega na informowaniu maszynisty za pomocą sygnału optycznego, a potem dźwiękowego o najechaniu elektromagnesem zamontowanym na podwoziu lokomotywy nad elektromagnes torowy (rys. 4.32).



Rys. 4.32. Przejazd lokomotywy nad elektromagnesem torowym

Ta informacja musi być zatwierdzona przez maszynistę wciśnięciem przycisku na pulpicie sterowniczym. W przypadku braku zatwierdzenia, pociągu samoczynnie wykona hamowanie. Każdy przejazd nad elektromagnesem torowym jest rejestrowany przez system Teloc. Podczas badań na linii 201 pod uwagę wzięto przejazd nad szesnastoma elektromagnesami torowymi. Informacje o rozmieszczeniu elektromagnesów, podobnie jak w przypadku parametrów drogi kolejowej zostały udostępnione przez zarządcę linii kolejowej.

Przebyty przez lokomotywę dystans obliczany jest przez rejestrator Teloc na podstawie pomiaru liczby obrotów zestawów kołowych z uwzględnieniem średnicy kół. Domyślnie do pamięci rejestratora wprowadzona jest wartość średnicy, wynosząca 1050 mm, będąca w przypadku lokomotywy serii ST44 średnicą koła nowego. Trzeba mieć jednak na uwadze, że w trakcie eksploatacji średnica kół ulega zmniejszeniu na skutek zużycia eksploatacyjnego (rys 4.33) [46].

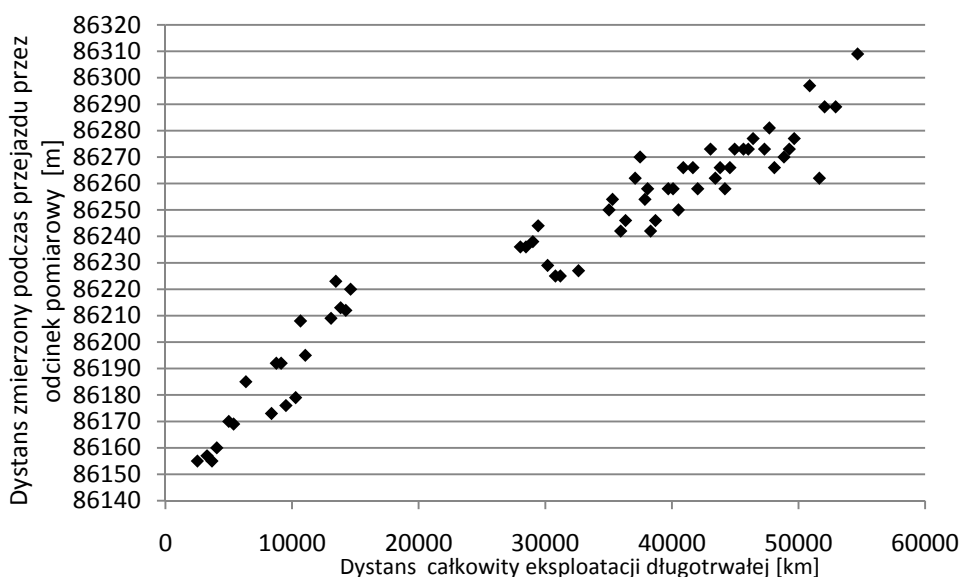


Rys. 4.33. Zużycie wieńca koła w płaszczyźnie średnicy toczonej D_0 : 1- profil wieńca koła przed eksploatacją; 2- profil wieńca koła zużytego (D_n – średnica koła nowego, D – średnica koła zużytego, Z_D – zużycie koła kolejowego w płaszczyźnie toczonej) [46]

Ponadto średnica ulega zmniejszeniu podczas procesu reprofilacji, polegającym na odtworzeniu wymaganego kształtu wieńca koła za pomocą obróbki skrawaniem. Jednak w przypadku zestawów kołowych badanych lokomotyw w okresie przeprowadzanych pomiarów reprofilacja nie była wykonywana.

System Teloc umożliwia wprowadzenie zmiany wartości średnicy kół, w celu zminimalizowania wpływu zużycia kół na pomiar przebytego dystansu i prędkości. Jednak w przypadku lokomotyw spalinowych, eksploatowanych w ruchu towarowym aktualizowanie wartości średnic nie jest praktykowane. Mała wartość prędkości eksploatacyjnej lokomotywy, wynosząca maksymalnie 100 km/h powoduje, że stopień zaniżenia wskazań prędkości na skutek zużycia kół nie ma istotnego wpływu na utrzymanie czasu przejazdów określonego w rozkładzie jazdy.

Na rys. 4.34 przedstawiono wpływ zużycia eksploatacyjnego kół lokomotywy na zamianę wartości mierzonego dystansu uzyskanego podczas badań na odcinku pomiarowym o długości 86 355 m.



Rys. 4.34. Wpływ zużycia eksploatacyjnego kół lokomotywy na zamianę wartości mierzonego dystansu uzyskanego podczas badań na odcinku pomiarowym

Ponieważ zużycie eksploatacyjne jest ściśle powiązane z przebytem przez lokomotywę dystansem całkowitym pracy długotrwałej, wartości pomiarów drogi na odcinku pomiarowym zostały przedstawione w funkcji wspomnianego dystansu. Z rys. 4.34 można odczytać, że zużycie eksploatacyjne zestawów kołowych po przebytem przez lokomotywę dystansie, wynoszącym 50000 km powoduje, że droga przebyta na odcinku pomiarowym wg wskazań rejestratora jest przeszacowana o około 140m. Jak widać proces zużycia kół ma istotny wpływ na dokładność pomiaru, przez co nie może być pominięte w dalszej analizie.

Znając wartość dystansu przebytego na odcinku pomiarowym zmierzoną przez rejestrator oraz rzeczywistą wartość tego odcinka możliwe jest obliczenie rzeczywistej średnicy tocznej koła kolejowego wg zależności:

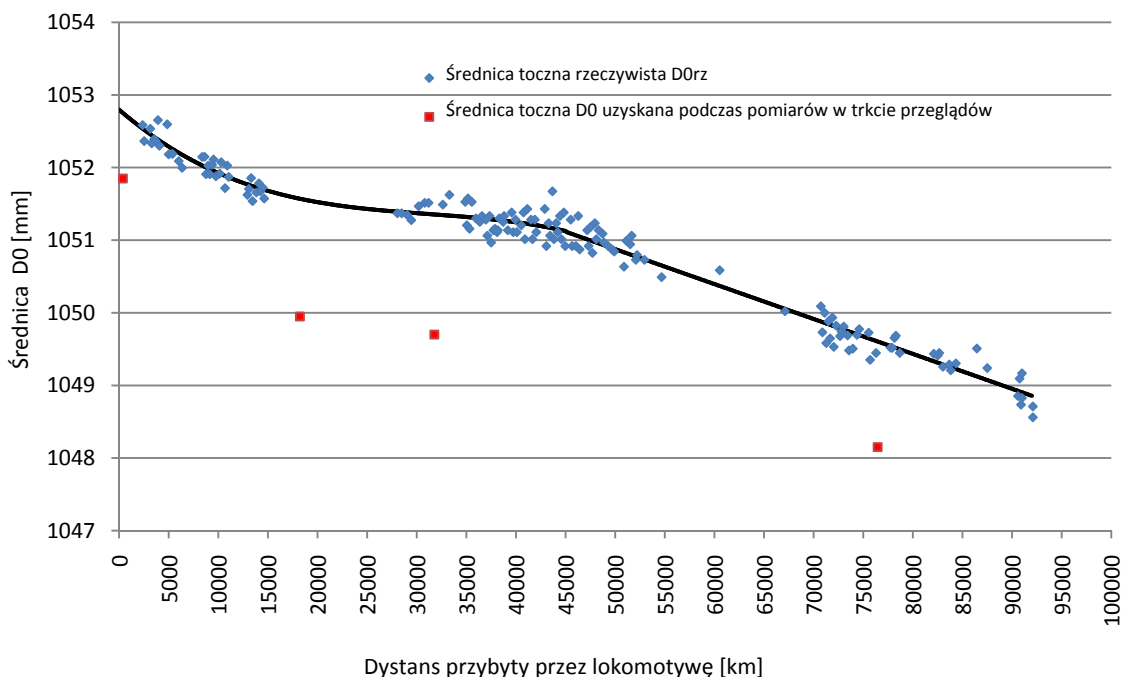
$$D0_{rz} = \frac{S_{OP}}{S_{OPteloc}} \cdot D0_{teloc} \quad (4.10)$$

gdzie:

- S_{OP} - długość odcinka pomiarowego wg dokumentacji drogi kolejowej [m],
- $S_{OPteloc}$ - długość odcinka pomiarowego zmierzona przez rejestrator [m],
- $D0_{rz}$ - rzeczywista średnica toczna koła kolejowego [mm],
- $D0_{teloc}$ - średnica toczna koła wpisana do rejestratora [mm].

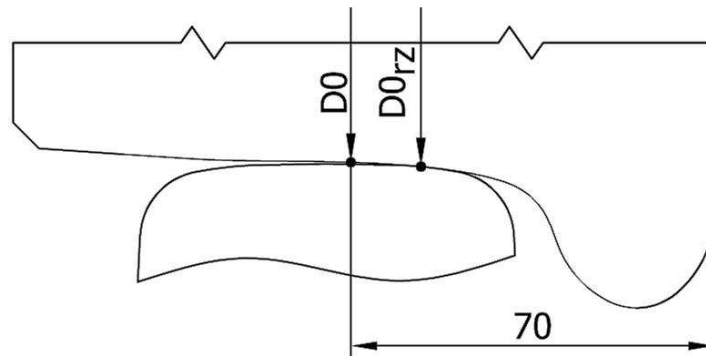
Pojawiająca się w zależności wartość $D0_{teloc}$ jest wartością domyślnie wpisaną do pamięci rejestratora i wynosi 1050 mm.

Na rys.4.35 przedstawiono przebieg wartości rzeczywistej średnicy koła kolejowego obliczonej przy wykorzystaniu zależności (4.10), jak również wartości średnic tocznych, uzyskanych podczas pomiarów wykonywanych w trakcie przeglądów okresowych.



Rys. 4.35. Przebieg zmiany wartości średnicy koła kolejowego

Pomiędzy wartościami średnicy rzeczywistej uzyskanymi na podstawie obliczeń, a wartościami uzyskanymi na podstawie pomiarów podczas przeglądów okresowych pojawia się różnica, wynosząca około 1,5 mm. Różnica ta wynika z faktu, że punkt pomiaru średnicy tocznej, który wg Instrukcji pomiarów i oceny technicznej zestawów kołowych znajduje się na płaszczyźnie oddalonej o 70 mm od wewnętrznej powierzchni wieńca koła [74] leży poza obszarem współpracy koła z szyną (rys. 4.36).



Rys. 4.36. Współpraca koła kolejowego z szyną

Obliczenia rzeczywistej średnicy tocznej wykonano w oparciu o dane z pomiarów, uzyskanych podczas 85 przejazdów na odcinku pomiarowym o długości 86355 m oraz 75 przejazdów na odcinku pomiarowym o długości 84353 m. Na potrzeby dalszej analizy, związanej z określaniem przebiegu i lokalizacji przyjęto, że zmiana średnicy, wynikająca ze zużycia eksploatacyjnego przebiega dwufazowo. W pierwszej fazie trwającej przez pierwsze 45 000 km eksploatacji lokomotywy przebieg rzeczywistej wartości średnicy został aproksymowany za pomocą wielomianu 3-go stopnia:

$$D0_{rz} = -3,698 \cdot 10^{-17} s_{teloc}^3 + 3,465 \cdot 10^{-12} s_{teloc}^2 - 1,182 \cdot 10^{-7} s_{teloc} + 1052,8 \quad (4.11)$$

gdzie:

s_{teloc} - droga przebyta przez lokomotywę, zmierzona przez rejestrator [m],

$D0_{rz}$ - rzeczywista średnica toczna koła kolejowego [mm].

W drugiej fazie zmiana wartości rzeczywistej średnicy tocznej ma charakter liniowy, a jej przebieg aproksymowano następującą zależnością:

$$D0_{rz} = -4,8076 \cdot 10^{-7} s_{teloc} + 1053,3 \quad (4.12)$$

Wartość chwilowego przyrostu rzeczywistej drogi przebytej przez pojazd ds równa jest wartości chwilowego przyrostu dystansu ds_{teloc} zmierzonego przez rejestrator Teloc pomnożonej przez iloraz rzeczywistej średnicy tocznej i średnicy tocznej koła nowego wpisanej do pamięci rejestratora:

$$ds_{rz} = \frac{D_{rz}(s_{teloc})}{D0_{teloc}} ds_{teloc} \quad (4.13)$$

gdzie:

- s_{rz} - rzeczywista droga przebyta przez pojazd
- s_{teloc} - droga przebyta przez lokomotywę, zmierzona przez rejestrator [m],
- $D0_{rz}$ - Rzeczywista średnica toczna koła kolejowego [m],
- $D0_{teloc}$ - Średnica toczna koła wpisana do rejestratora [m].

Całkując obie strony równania (4.14) otrzymano zależność, umożliwiającą obliczenie rzeczywistej drogi przebytej przez lokomotywę:

$$s_{rz} = \int_0^{s_{teloc}} \frac{D_{rz}(s_{teloc})}{D0_{teloc}} ds_{teloc} \quad (4.14)$$

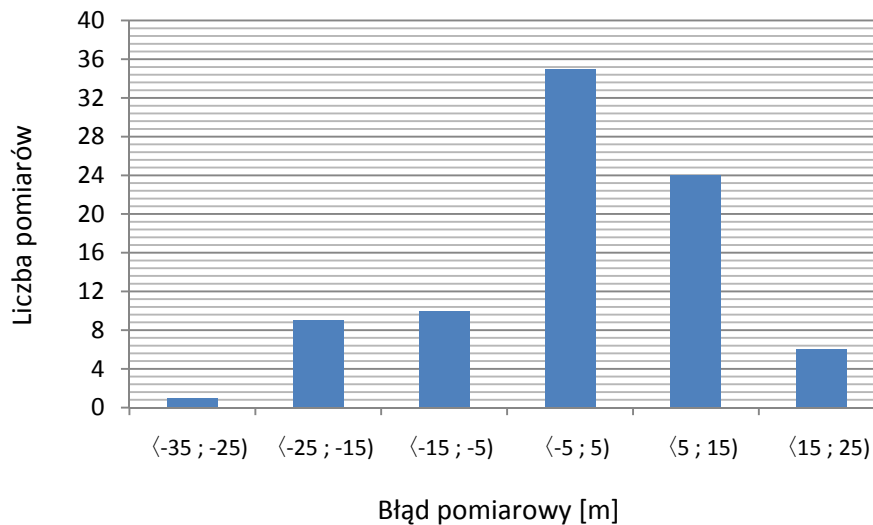
Uwzględniając zależności (4.11), (4.12) oraz (4.14), rzeczywista droga przebyta przez lokomotywę w przedziale do 45000 km wynosi:

$$s = -9,2451 \cdot 10^{-15} s_{teloc}^4 + 1,1552 \cdot 10^{-9} s_{teloc}^3 - 5,9102 \cdot 10^{-5} s_{teloc}^2 + 1052,8 s_{teloc} \quad (4.15)$$

Powyżej 45 000 km wartość rzeczywistego przebiegu określana jest wg zależności:

$$s = -2,4038 \cdot 10^{-5} s_{teloc}^2 + 1053,3 s_{teloc} \quad (4.16)$$

Na rysunku 4.37 przedstawiono rozkład błędów wartości dystansu, będących wynikiem obliczeń wg zależności (4.15) i (4.16) z wykorzystaniem pomiarów za pomocą rejestratora Teloc podczas 85 przejazdów lokomotywy na odcinku o długości 86355 m.



Rys. 4.37. Rozkład błędów wartości dystansu

Średni błąd kwadratowy zdefiniowany jest zależnością:

$$\sigma_{srz} = \frac{\sigma_{srz}}{\sqrt{n}} \quad (4.17)$$

gdzie:

σ_{srz} - odchylenie standardowe wyników przebytej drogi [m]

n - liczba wykonanych pomiarów.

Przy uwzględnieniu, że odchylenie standardowe dla uzyskanych wyników przebytej drogi wyniosło 10,204 m, błąd kwadratowy dla 85 pomiarów przyjął wartość równą 1,1 m. Wynika z tego, że rejestrator Teloc jest narzędziem, które może zostać wykorzystane w procesie określania pozycji pociągu na linii kolejowej.

4.8. Wpływ zużycia zestawów kołowych na parametry ruchu lokomotywy

Przedstawiona w rozdz. 4.4.2 metoda obliczania prędkości i przyspieszenia przy wykorzystaniu zależności (4.6) i (4.8) nie uwzględnia modelu zużycia kół. Dlatego też w celu określenia rzeczywistej wartości prędkości oraz przyspieszenia należy skorzystać z poniższych zależności:

$$V_{rz} = \frac{D_{rz}(S_{teloc})}{D0_{teloc}} dV_{teloc} \quad (4.18)$$

$$a_{rz} = \frac{D_{rz}(S_{teloc})}{D0_{teloc}} a_{teloc} \quad (4.19)$$

gdzie:

V_{teloc} - prędkość obliczona na podstawie danych z systemu Teloc [m/s],

V_{rz} - prędkość rzeczywista [m/s],

a_{teloc} - przyspieszenie obliczone na podstawie danych z systemu Teloc [m/s²],

a_{rz} - przyspieszenie rzeczywiste pociągu [m/s²],

$D0_{rz}$ - Rzeczywista średnica toczna koła kolejowego [mm],

$D0_{teloc}$ - Średnica toczna koła wpisana do rejestratora [mm].

5. MODEL UKŁADU NAPĘDOWEGO LOKOMOTYWY

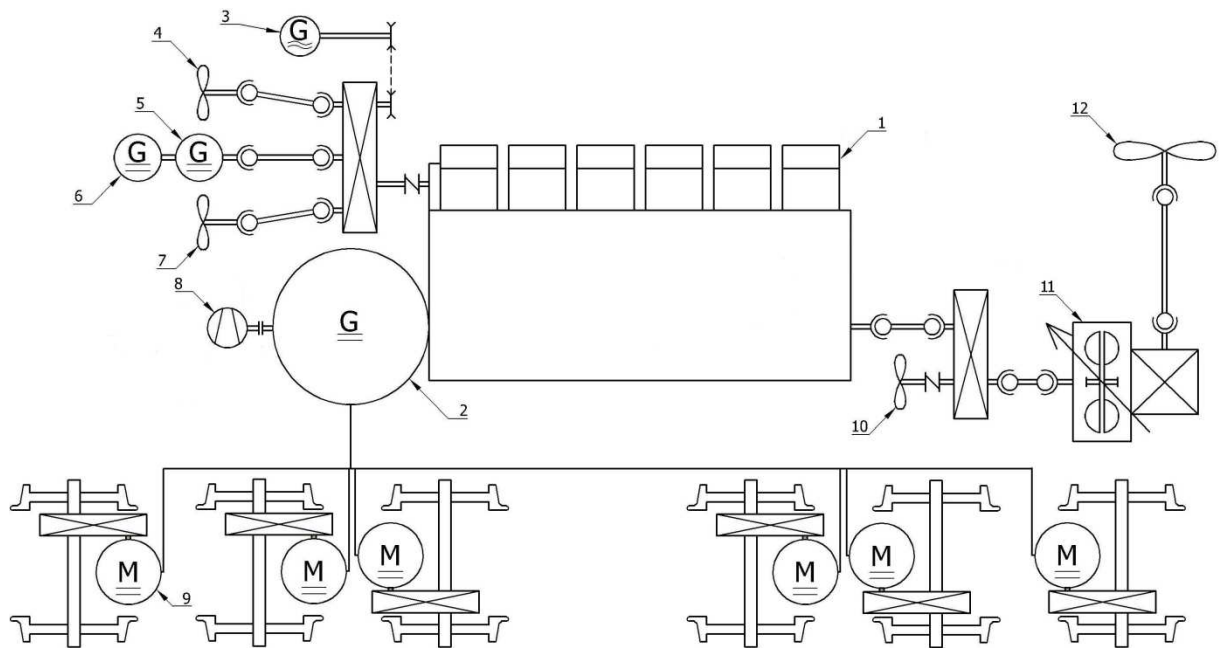
5.1. Struktura układu napędowego lokomotywy

Metoda Grafów Wiązań (GW) i Równań Stanów (RS) [11, 12, 13, 42, 86] ze względu na swoją podstawową cechę, jaką jest jednolite podejście do modelowania elementów o różnej naturze fizycznej, jest chętnie wykorzystywana do modelowania systemów o złożonej strukturze energetycznej, jak silniki spalinowe, pojazdy samochodowe, siłownie okrętowe, a nawet całe statki, dlatego też Metoda Wiązań i Równań Stanów została wykorzystana do zamodelowania układu napędowego lokomotywy spalinowej.

Do stworzenia modelu układu napędowego lokomotywy niezbędna jest znajomość wielu parametrów poszczególnych urządzeń, wchodzących w skład wspomnianego układu. Podstawowym źródłem informacji jest literatura, w szczególności dotycząca budowy i eksploatacji lokomotyw danej serii [18]. Należy jednak mieć na uwadze, że informacje, dotyczące poszczególnych parametrów nie są wystarczające, gdyż dotyczą one zazwyczaj pracy urządzeń układu napędowego przy maksymalnej mocy. Dlatego też niezbędne jest uzupełnienie tych informacji o przetworzone w trakcie analizy dane, uzyskane podczas badań własnych, przeprowadzonych w trakcie eksploatacji lokomotywy.

Poniżej omówiony został układ napędowy badanej lokomotywy. Na rysunku 5.1 przedstawiono schemat układu napędowego lokomotywy ST44 wyposażonej w dwunastocylindrowy czterosurowy silnik o zapłonie samoczynnym typu 12 CzN26/26 o mocy 1470 kW osiąganey przy prędkości obrotowej 750 obr/min [18].

Na rys. 5.1 oprócz podstawowych elementów układu napędowego takich jak silnik spalinowy 1, prądnica główna 2, tworząca wraz z silnikami trakcyjnymi 9 przekładnię elektryczną przedstawiono urządzenia pomocnicze niezbędne do prawidłowego działania lokomotywy. Do wspomnianych urządzeń pomocniczych należy wentylator układu chłodzącego silnik spalinowy 12. W przypadku lokomotywy ST44 jest on napędzany od silnika spalinowego za pośrednictwem sprzęgła hydrokinetycznego 11 o zmiennym napełnieniu, umożliwiającym regulację jego prędkości obrotowej. Oprócz silnika spalinowego źródłem ciepła są również maszyny elektryczne, jak prądnica główna i silniki trakcyjne.



Rys. 5.1. Schemat układu napędowego lokomotywy spalinowej serii ST44: 1 - silnik spalinowy, 2- prądnica główna, 3- generator jednofazowy, 4- wentylator prądnicy głównej, 5- wzbudnica, 6- prądnica, 7- wentylator silników trakcyjnych wózka A, 8- sprężarka powietrza, 9- silnik trakcyjny, 10- wentylator silników trakcyjnych wózka B, 11- sprzęgło hydrokinetyczne napędu wentylatora układu chłodzenia silnika spalinowego, 12- wentylator układu chłodzenia silnika spalinowego

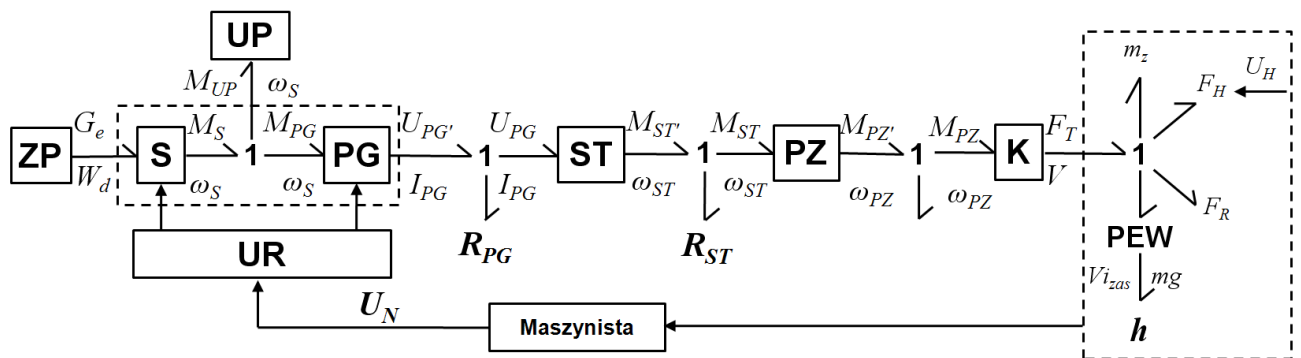
Ciepło generowane na skutek przepływu prądu przez uzwojenia maszyn elektrycznych jest odbierane przez odpowiednio wymuszony strumień powietrza. Przepływ powietrza wytwarzany jest przez wentylatory 4, 7 i 10, które napędzane są od silnika spalinowego poprzez układ przekładni zębatych i wałów napędowych. Za pomocą przekładni zębatej napędzany jest również zespół prądnicy pomocniczej 6, służącej do zasilania pokładowej instalacji elektrycznej oraz wzbudnicy 5 zasilającej uzwojenie wzbudzenia w stanie prądnicy głównej. Do urządzeń pomocniczych należy również zaliczyć jednofazowy generator zasilający amplistat, który służy do sterowania natężeniem prądu zasilającego uzwojenie wzbudzające wzbudnicy. Układ napędowy lokomotywy oprócz wytwarzania niezbędnej siły pociągowej ma za zadanie również zasilanie innych urządzeń znajdujących się zarówno w samej lokomotywie jak i poza nią. Przykładem są urządzenia układu hamulcowego, które w przypadku pojazdów kolejowych zasilane są sprężonym powietrzem. Do utrzymania odpowiedniego ciśnienia powietrza w instalacji pneumatycznej, z której wspomniane urządzenia są zasilane, służy sprężarka powietrza. W przypadku lokomotywy ST44 jest to sprężarka tłokowa, która napędzana jest za pomocą półsztywnego sprzęgła, połączonego z wałem prądnicy głównej. Ze względu na brak możliwości rozłączenia napędu jest ona napędzana przez cały czas pracy silnika spalinowego. Układ pneumatyczny lokomotywy nie wymaga jednak ciągłego zasilania sprężonym powietrzem, dlatego proces sprężania powietrza jest okresowo przerywany za pomocą układu, umożliwiającego podwieszenie zaworów ssawnych sprężarki w pozycji otwartej. W tym momencie sprężarka pracuje w stanie biegu luzem. Układ sterujący zaworami ssawnymi

sprężarki współpracuje z regulatorem, mającym na celu utrzymanie ciśnienia w instalacji w zakresie od 0,7 do 0,85 MPa.

5.2. Model układu napędowego lokomotywy w formie GW

Bazowym modelem, wykorzystanym przy opracowaniu modelu układu napędowego lokomotywy spalinowej był model układu napędowego pojazdu [50].

Pierwszym elementem modelu układu napędowego lokomotywy spalinowej (rys. 5.2) jest zbiornik paliwa **ZP**, z którego strumień paliwa G_e o wartości opałowej W_d jest dostarczany do zespołu silnika spalinowego **S**, stąd strumień energii dostarczany jest do prądnicy głównej **PG**. Należy zaznaczyć, że prądnica główna **PG** nie jest jedynym odbiornikiem energii mechanicznej wytwarzanej przez silnik spalinowy **S**. Ten silnik wykorzystywany jest do napędu wielu urządzeń pomocniczych **UP**. Zespół silnika spalinowego **S** i prądnicy głównej **PG** sterowany jest poprzez układ regulacji mocy **UR**, który przy uwzględnieniu nastawy mocy U_N , dokonuje regulacji mocy silnika spalinowego **S** oraz prądnicy głównej **PG**. W przypadku lokomotywy spalinowej powiązanie modelu zespołu silnika spalinowego oraz prądnicy z modelem oporów ruchu odbywa się za pomocą silników trakcyjnych **ST** oraz przekładni zębatej **PZ**, która przekazuje moment obrotowy M_{PZ} na koła **K**.



Rys. 5.2. Model układu napędowego lokomotywy spalinowej w formie GW

Na lokomotywę spalinową działają siły o charakterze dyssypacyjnym, do których należą siły oporu ruchu pociągu F_R i siły hamowania F_H , zależne nastawy siły hamowania U_H oraz siły zachowawcze związane z energią kinetyczną kumulowaną w zredukowanej masie m_z i energii potencjalnej kumulowanej w masie pociągu.

Wprowadzenie pojęcia masy zredukowanej m_z wynika z faktu, że energia kinetyczna akumulowana jest nie tylko w elementach poruszających się postępowo, ale także we wszystkich elementach wirujących, wchodzących w skład pociągu. Do elementów tych należą zestawy kołowe lokomotywy i wagonów oraz wirniki silników trakcyjnych. Wartość masy zredukowanej m_z przyjmuje wartość określoną zależnością 5.1.

$$m_z = m_{lok} + \sum_{j=1}^J \frac{4 \cdot J_{jzklok}}{10^{-6} \cdot D0_{lok}^2} + \sum_{k=1}^K \frac{4 \cdot J_{kwir}}{10^{-6} \cdot D0_{lok}^2} \cdot \left(\frac{Z_{st}}{Z_{zk}} \right)^2 + \sum_{l=1}^L m_{lwag} + \sum_{m=1}^M \frac{4 \cdot J_{mzkwag}}{10^{-6} \cdot D0_{wag}^2} \quad (5.1)$$

gdzie:

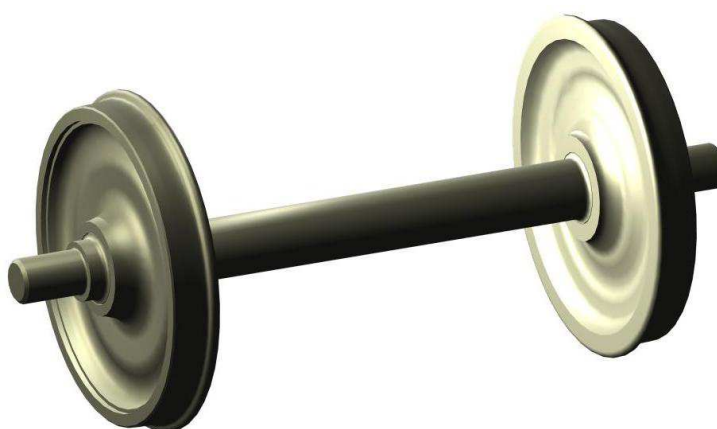
- j, k, l, m - liczba odpowiednio: zestawów kołowych lokomotywy, silników trakcyjnych, wagonów, zestawów kołowych wagonów [-],
- m_z - masa zredukowana [kg],
- m_{lok} - masa lokomotywy [kg],
- J_{izklok} - moment bezwładności i-tego zestawu kołowego lokomotywy [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],
- $D0_{lok}$ - średnica toczna zestawu kołowego lokomotywy [mm],
- J_{jwir} - moment bezwładności j-tego wirnika silnika trakcyjnego [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],
- Z_{st} - liczba zębów koła zębatego silnika trakcyjnego [-],
- Z_{zk} - liczba zębów koła zębatego zestawu kołowego [-],
- m_{kwag} - masa k-tego wagonu [kg],
- J_{lzkwag} - moment bezwładności l-tego zestawu kołowego wagonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],
- $D0_{wag}$ - średnica toczna zestawów kołowych wagonu kolejowego [mm].

Należy zaznaczyć, że przytoczony wzór dotyczy jedynie lokomotyw, w których moment obrotowy z silników trakcyjnych przekazywany jest na zestawy kołowe za pomocą jednostopniowej przekładni zębatej. Dla lokomotywy serii ST44 liczba zębów koła zębatego Z_{st} silnika trakcyjnego wynosi 15, a koła zębatego liczba zębów Z_{zk} równa jest 68. Średnica toczna kół wynosi 1050 mm [18]. Dla wagonów towarowych przyjęto, że średnica koła wynosi 920 mm [60].

W celu określenia wartości momentu bezwładności elementów wirujących układu napędowego lokomotywy (rys. 5.3) jak i momentu bezwładności zestawów kołowych wagonów (rys. 5.4) użyto programu komputerowego typu CAD. Wartości obliczonych momentów bezwładności przedstawiono w tab. 5.1.



Rys. 5.3. Elementy wirujące układu napędowego lokomotywy

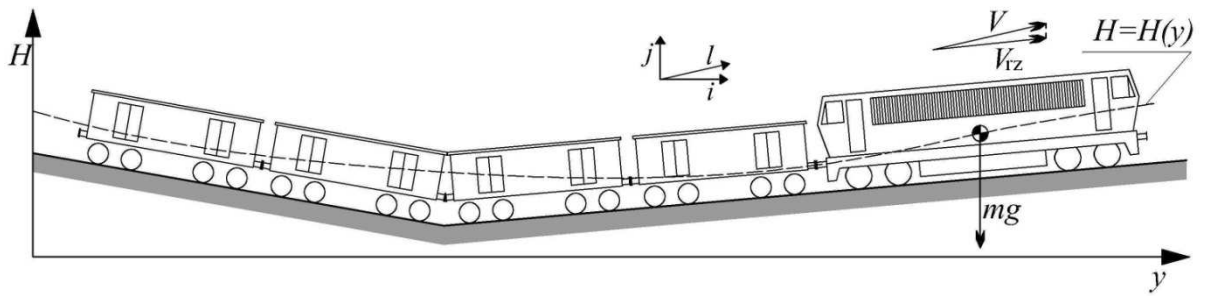


Rys. 5.4. Zestaw kołowy wagonu towarowego

Tab. 5.1. Wartości momentów bezwładności

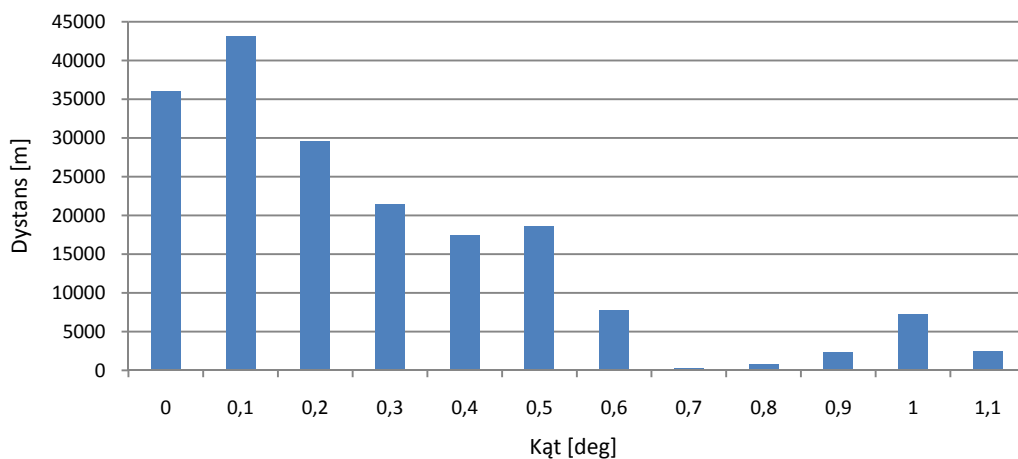
Nazwa elementu	Moment bezwładności [kg·m ²]
Zestaw kołowy lokomotywy	236,4
Wirnik silnika trakcyjnego	27,1
Zestaw kołowy wagonu towarowego	91,74

Na rys. 5.5 przedstawiono przykład poprzecznego profilu drogi, po której porusza się pociąg. Założono, że siła ciężenia wynikająca z masy całego składu pociągu przyłożona jest do punktu P_{MP} , leżącego na tej samej płaszczyźnie poprzecznej lokomotywy, na której znajduje się środek ciężkości samej lokomotywy. Założenie to wynika z faktu, że wszystkie urządzenia pomiarowe znajdują się w lokomotywie.



Rys. 5.5. Przykład poprzecznego profilu drogi

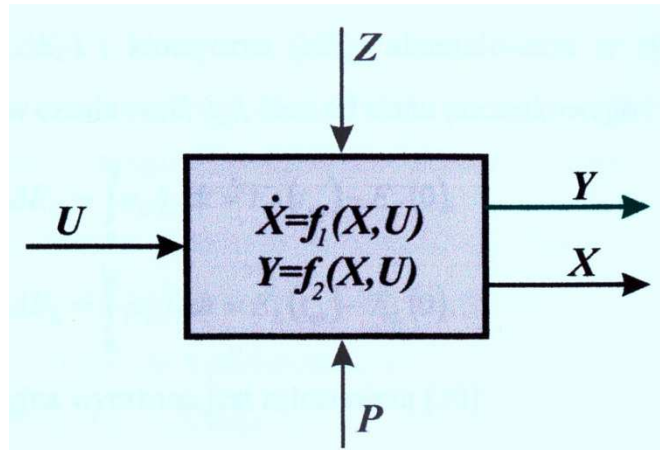
Należy zaznaczyć, że wektor prędkości punktu PMP, oznaczony jako V jest równoległy do pochylenia zastępczego, obliczonego dla składu pociągu, przez co nie pokrywa się z wektorem prędkości samej lokomotywy V_{rz} . W konsekwencji również moduły wspomnianych wektorów różnią się od siebie. Na rys. 5.6 przedstawiono rozkład wartości bezwzględnych kąta pomiędzy wektorami V i V_{rz} podczas jazdy pociągu o długości 800 m od stacji Bydgoszcz Wschód do stacji Gdynia Port. Ze względu na wartości kąta, która maksymalnie wynoszą $1,1^\circ$ założono, że wartości prędkości V i V_{rz} są sobie równe.



Rys. 5.6. Rozkład wartości bezwzględnych kątów pomiędzy wektorami V i V_{rz}

Wprowadzenie modularnego przetwornika energii, oznaczonego na rysunku 5.2 jako **PEW**, wynikało z przyjęcia różnych osi dla sił równoległych do drogi i sił grawitacji określających energię potencjalną.

Przedstawiony na rys. 5.2 model w formie GW odzwierciedla w sposób przejrzysty dynamiczną strukturę i może być w prosty sposób modyfikowany, lecz nie pozwala na bezpośrednie prowadzenie eksperymentów symulacyjnych [11]. Model GW umożliwia natomiast w sposób „ręczny” lub automatyczny generowanie równań stanu, co oznacza tworzenie modelu przyczynowo-skutkowego (rys. 5.7).



Rys. 5.7. Model przyczynowo-skutkowy opisany równaniami stanu: U – wektor wymuszeń (wejść), X – wektor stanu, Y – wektor wyjść, Z – wektor zakłóceń, P – wektor nastaw i parametrów konstrukcyjnych

Przyjmując, że zmienną stanu dla energii kinetycznej jest uogólniony pęd ($X_1 = m_z \cdot V$), natomiast dla energii potencjalnej uogólnione przemieszczenie ($H_2 = h$), można ułożyć na podstawie modelu GW pociągu następujące równania stanu:

$$\dot{X}_1 = -F_R \left(\frac{X_1}{m_z} \right) - m_p \cdot g \cdot i_{zas} - F_H(U_H(t)) + F_T(X_1, U_N(t)) \quad (5.2)$$

$$\dot{X}_2 = X_1 \cdot \frac{i_{zas}}{m_z} \quad (5.3)$$

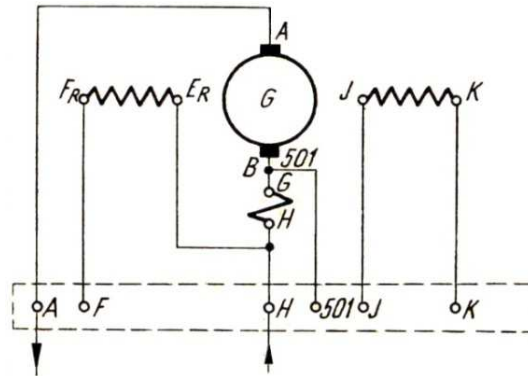
gdzie:

- F_R – siła oporów ruchu [N],
- m_p – masa pociągu [kg],
- i_{zas} – pochylenie zastępcze [%],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
- F_H – siła oporu układu hamulcowego [N],
- F_T – siła trakcyjna [N],
- m_z – masa zredukowana [kg].

5.3. Zespół silnika spalinowego i prądnicy

W zaprezentowanym modelu założono, iż silnik spalinowy i prądnica jest jednym zespołem, nazywanym agregatem prądotwórczym. Założenie to znacznie upraszcza analizę obciążenia układu napędowego. Możliwe jest bowiem precyzyjne określenie mocy zespołu silnika spalinowego i prądnicy na podstawie pomiaru napięcia i natężenia prądu w przewodach elektrycznych łączących prądnicę z silnikami trakcyjnymi. W przypadku silnika spalinowego określenie mocy, będącej iloczynem prędkości kątowej wału korbowego oraz jego momentu obrotowego, jest niewykonalne ze względu na brak możliwości pomiaru momentu obrotowego.

W przypadku lokomotywy ST44 prądnica jest dziesięciobiegunową maszyną prądu o wzbudzeniu obcym. Schemat elektryczny prądnicy przedstawiono na rys.5.8.



Rys. 5.8. Schemat elektryczny prądnicy głównej [18]:

AB – uzwojenie wirnika, $E_R F_R$ uzwojenie rozruchowe, GH – uzwojenie biegunów komutacyjnych, JK – uzwojenie wzbudzenia biegunów głównych

Prądnica oprócz zamiany energii mechanicznej na energię elektryczną, pełni również funkcję rozrusznika silnika spalinowego. Realizację pracy silnikowej przez prądnicę umożliwiają dodatkowe uzwojenia $E_R F_R$, które w momencie rozruchu są połączone szeregowo z uzwojeniami wirnika i zasilane są z akumulatorów lokomotywy. Jak każda maszyna komutatorowa prądu stałego, prądnica posiada dodatkowe uzwojenia komutacyjne, oznaczone na rysunku jako GH. Uzwojenia te mają na celu zapobieganie iskrzenia na styku komutator-szczotka.

W przypadku maszyn prądu stałego, moc określana jest na podstawie wzoru:

$$P_{el} = U_{PG} \cdot I_{PG} \quad (5.4)$$

gdzie:

P_{el} – moc elektryczna [W],

U_{PG} – napięcie na zaciskach prądnicy głównej [V],

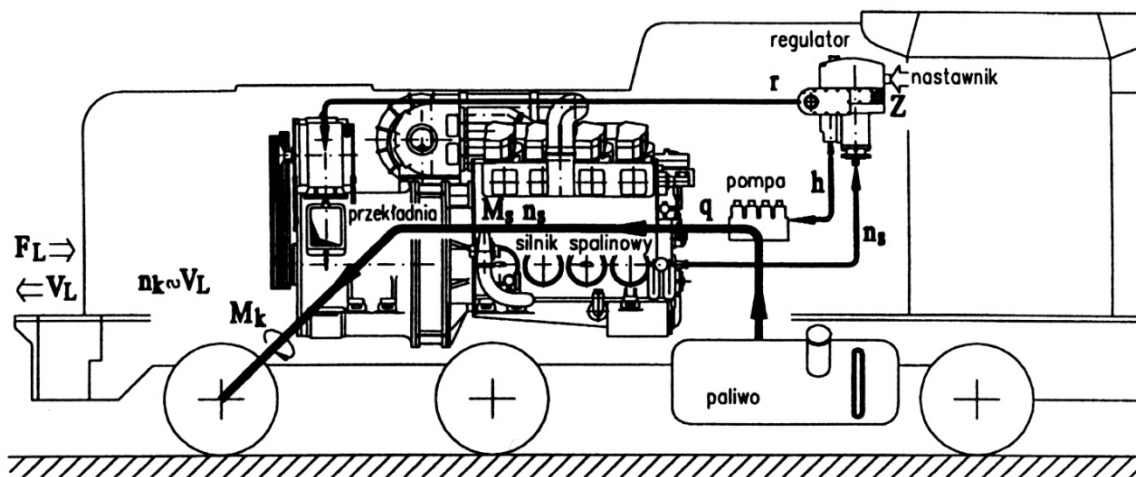
I_{PG} – natężenie prądu w przewodach łączących prądnicę i silniki trakcyjne [A].

Moc ta zależy zarówno od prędkości obrotowej jej wirnika jak i wartości prądu w uzwojeniach wzbudzających JK.

Ze względu na fakt, że pomiar dokonywany jest w przewodach elektrycznych za prądnicą główną, obliczona moc uwzględnia wszystkie straty elektryczne i mechaniczne, mające miejsce w prądnicę.

5.4. Regulator mocy

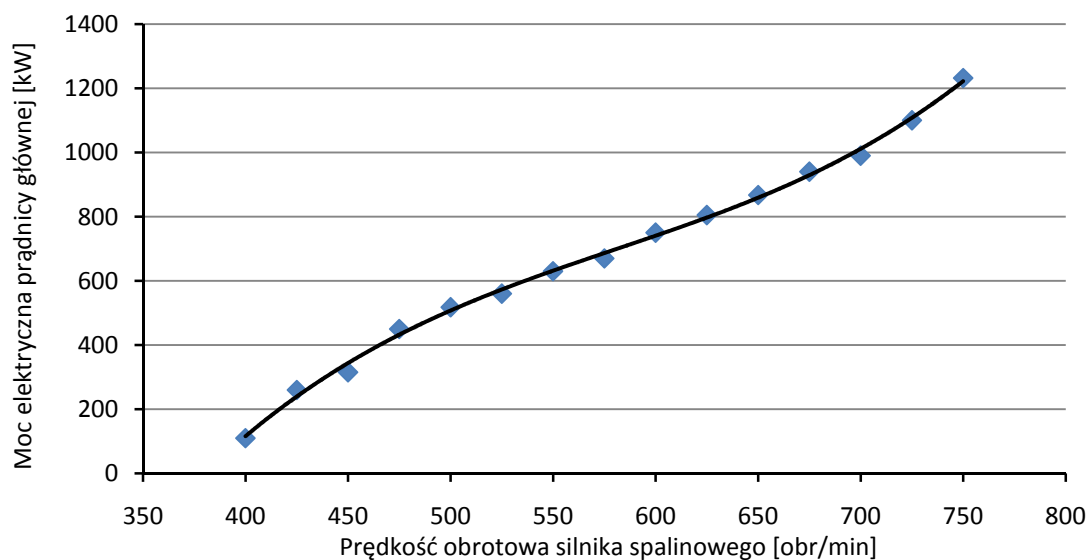
Zespół silnika i prądnicy głównej sterowany jest wspólnym wielozakresowym regulatorem prędkości obrotowej i obciążenia. Schemat układu regulacji przedstawiono na rys. 5.9.



Rys. 5.9. Schemat układu regulacji mocy zespołu silnika spalinowego i prądnicy głównej [28]

Regulator utrzymuje określoną dla danej nastawy Z prędkość obrotową wału korbowego silnika spalinowego n_s , oraz jego moment obrotowy M_s , niezależnie od warunków pracy lokomotywy. Proces regulacji prędkości obrotowej realizowany jest za pomocą zmiany wartości dawki paliwa q poprzez zmianę nastawy pompy paliwa h . Moc generowana przez silnik spalinowy wynika z obciążenia prądnicy głównej, natomiast moc elektryczna prądnicy głównej zależy od natężenia prądu w uzwojeniach biegunów wzbudnych (sterowanych sygnałem r). Należy jednak nadmienić, że rys. 3.9 przedstawia schemat układu regulacji mocy lokomotywy SM42. Jest on jednak, co do zasady działania taki sam jak przypadku lokomotywy ST44.

W rozważanym układzie napędowym lokomotywy prędkość obrotowa silnika spalinowego i mocy elektrycznej prądnicy głównej są ściśle ze sobą powiązane (rys. 5.10).

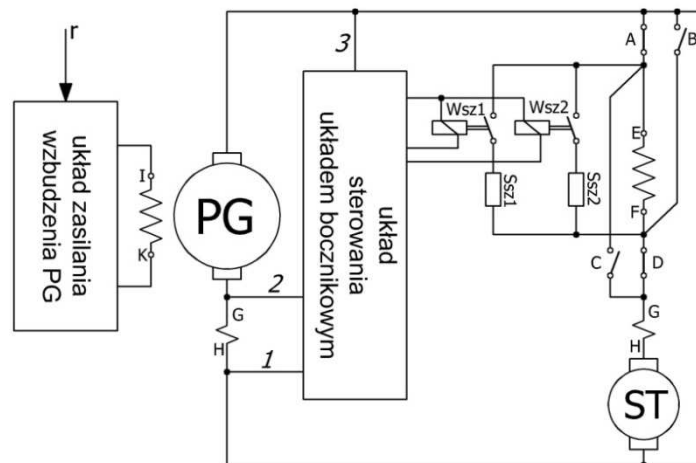


Rys. 5.10. Związek mocy elektrycznej prądnicy głównej z prędkością obrotową silnika spalinowego

5.5. Silniki trakcyjne

Lokomotywa ST44 posiada sześć silników trakcyjnych prądu stałego. Są to czterobiegunowe silniki szeregowe, w których uzwojenia cewek biegunów głównych są połączone z wirnikiem szeregowo. Na rys. 5.11 przedstawiono uproszczony schemat obwodu elektrycznego silników trakcyjnych. Obwód ten umożliwia zmianę kierunku obrotów silników, a także regulację ich prędkości obrotowej. Zmiana kierunku obrotów odbywa się przy udziale czterech styczników oznaczonych jako A, B, C i D, wchodzących w skład tak zwanego nawrotnika. Kombinacja ich załączenia (AD lub BC) wpływa na kierunek przepływu prądu przez uzwojenia biegunów głównych przy niezmiennym kierunku przepływu prądu przez uzwojenia wirnika.

Regulacja prędkości obrotowej realizowana jest na dwa sposoby: poprzez zmianę napięcia zasilającego oraz zmianę wartości strumienia magnetycznego biegunów głównych E-F.



Rys. 5.11. Schemat obwodu elektrycznego silników trakcyjnych (ST – silnik trakcyjny, PG – prądnica)

Wartość napięcia zasilającego silniki trakcyjne jest równe napięciu na zaciskach prądnicy głównej i jest zależne od prędkości prądnicy oraz wartości sygnału sterującego r , zadanego przez regulator mocy.

Zmianę strumienia magnetycznego biegunów głównych uzyskuje się poprzez załączenie lub rozłączenie dwóch rezystorów $Ssz1$ i $Ssz2$ za pomocą styczników $Wsz1$ i $Wsz2$. Te rezystory są połączone równolegle do uzwojenia biegunów głównych. Wzrost prędkości obrotowej silnika wymaga osłabienia strumienia pola poprzez załączenie rezystorów. Proces ten powszechnie nazywany jest bocznikowaniem, które w przypadku lokomotywy ST44 jest dwustopniowe.

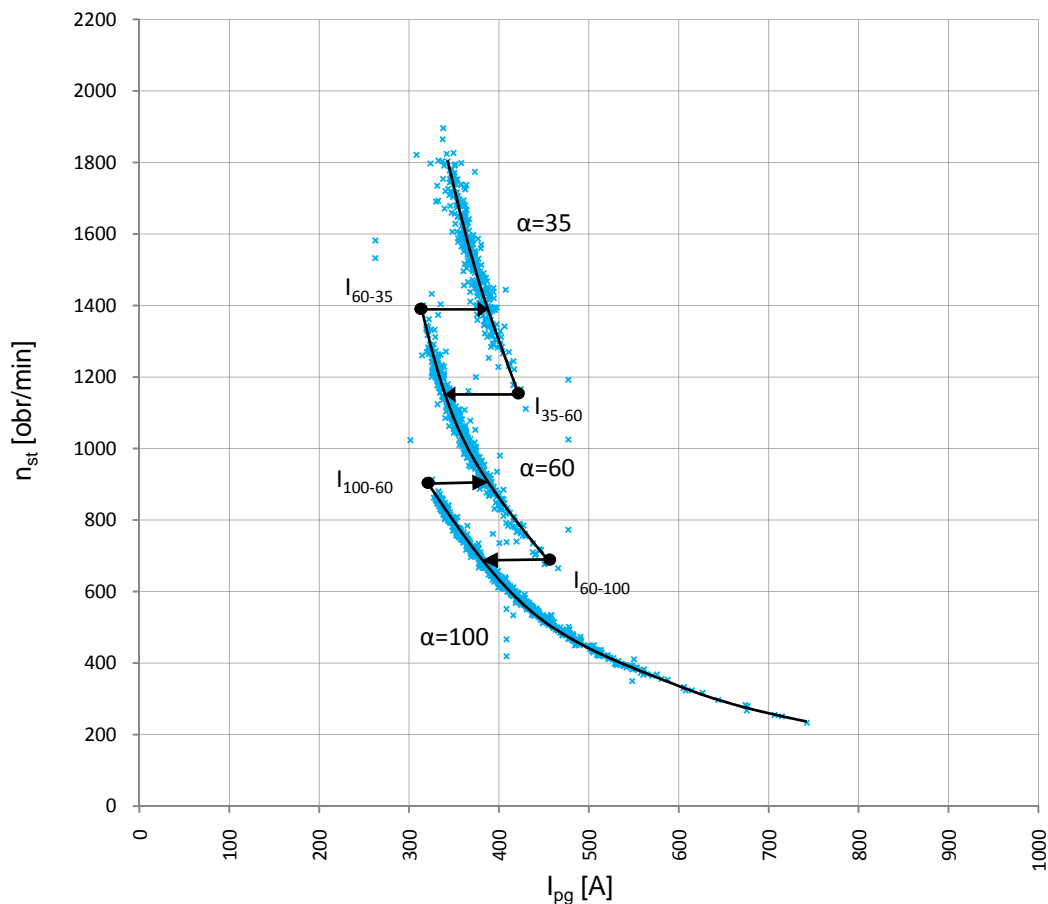
Pierwszy stopień bocznikowania oznaczony jako $\alpha=60$ realizowany jest za pomocą załączenia rezystora $Ssz1$. Rezystancja rezystora jest dobrana w sposób powodujący, że wartości prądu przepływającego przez uzwojenie wzbudzenia silnika trakcyjnego wynosi 60% prądu przepływającego przez silnik elektryczny. Drugi stopień bocznikowania $\alpha=35$ wymaga

załączenia obu rezystorów $Ssz1$ i $Ssz2$. W tym przypadku wartość prądu w przepływającego przez uzwojenia wzbudzające wynosi 35% wartości prądu przepływającego przez silnik.

Stan, w którym bocznikowanie nie jest realizowane, a tym samym silnik pracuje przy pełnym wzbudzeniu oznaczony został jako $\alpha=100$.

Styczniki $Wsz1$ i $Wsz2$ sterowane są za pomocą automatycznego układu sterowania bocznikowaniem. Wybór stopnia bocznikowania dokonywany jest na podstawie pomiarów napięcia i prądu w przewodach obwodu silników trakcyjnych. Pomiar napięcia dokonywany jest pomiędzy przewodami 1 i 3. Natężenie prądu obliczana natomiast jest na podstawie pomiaru spadku napięcia na uzwojeniach komutacyjnych prądnicy głównej G-H (przewody 1 i 2).

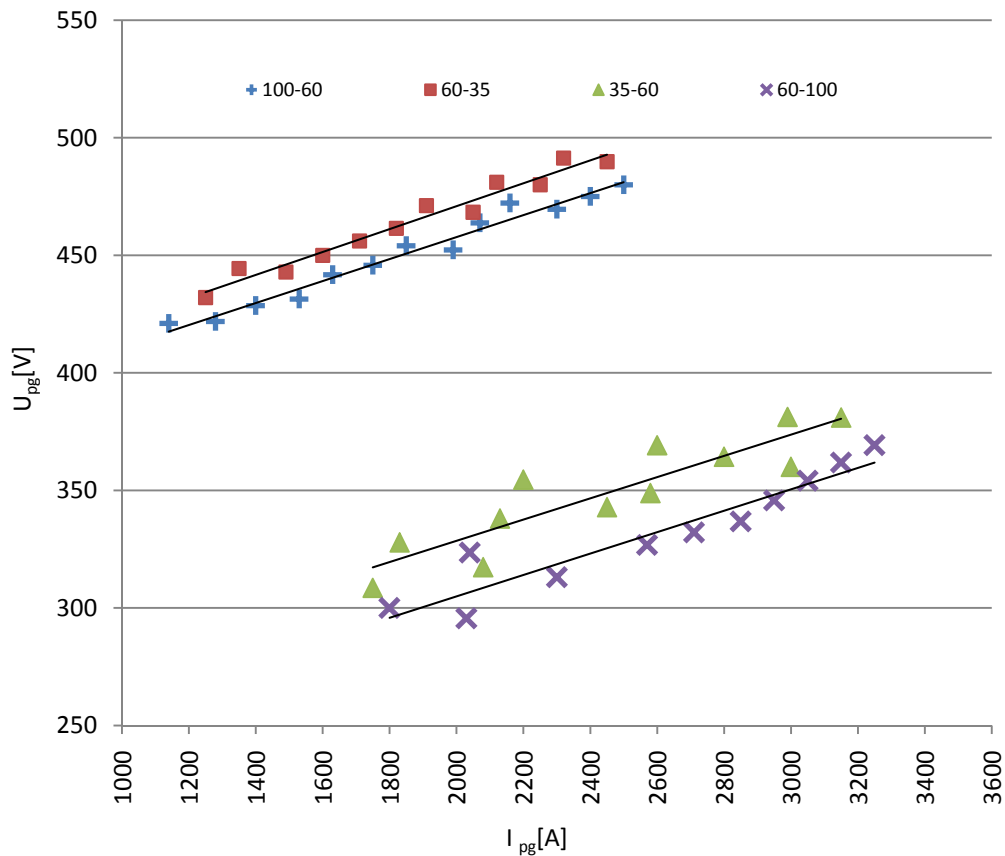
Na rys. 5.12. przedstawiono charakterystykę silnika trakcyjnego przy mocy elektrycznej 150kW (moc elektryczna prądnicy głównej 900 kW). Charakterystykę wykreślono przy wykorzystaniu danych obejmujących prędkość lokomotywy, napięcie oraz natężenie prądu w obwodzie silników trakcyjnych, które to parametry zostały zapisane w pamięci urządzenia rejestrującego parametry pracy lokomotywy.



Rys. 5.12. Charakterystyka silnika trakcyjnego

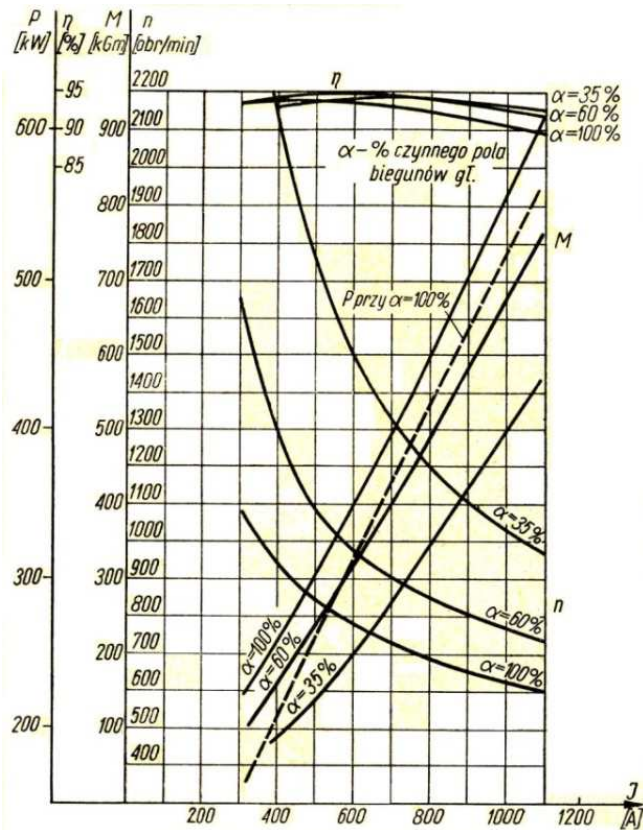
Na rys. 5.12 zaznaczono punkty I_{100-60} , I_{60-35} , I_{35-60} , I_{60-100} , będące wartościami natężenia prądu, przy których następuje zmiana pomiędzy poszczególnymi stopniami wzbudzenia $\alpha=100$, $\alpha=60$, $\alpha=35$. Znając wartość mocy elektrycznej silnika możliwe jest obliczenie napięcia, przy którym ta zmiana zachodzi.

Na rys. 5.13. przedstawiono charakterystykę napięciowo-prądową automatycznego układu sterowania bocznikowaniem. Charakterystykę tą stworzono w oparciu o charakterystyki silnika trakcyjnego dla poszczególnych wartości mocy elektrycznej, podczas badań eksploracyjnych, z których następnie odczytano wartości prądu I_{100-60} , I_{60-35} , I_{35-60} i I_{60-100} .



Rys. 5.13. Charakterystyka silnika trakcyjnego

Znajomość wspomnianej charakterystyki umożliwia określenie stopnia wzbudzenia silnika w trakcie jego pracy. Jest to istotne, ponieważ stopień wzbudzenia ma wpływ między innymi na sprawność ogólną, znajomość której jest niezbędna w dalszej analizie. Na rys. 5.14 przedstawiono charakterystykę silnika lokomotywy ST44.



Rys. 5.14. Charakterystyka silnika trakcyjnego [18]

Przedstawione na wykresie krzywe sprawności zostały aproksymowane wielomianami:

$$\eta_{st \alpha=100\%} = 6,4208 \cdot 10^{-11} \cdot I_{ST}^3 - 2,3245 \cdot 10^{-7} \cdot I_{ST}^2 + 1,715 \cdot 10^{-4} \cdot I_{ST} + 0,90215 \quad (5.5)$$

$$\eta_{st \alpha=60\%} = 1,0588 \cdot 10^{-11} \cdot I_{ST}^3 - 3,434 \cdot 10^{-7} \cdot I_{ST}^2 + 2,8802 \cdot 10^{-4} \cdot I_{ST} + 0,87551 \quad (5.6)$$

$$\eta_{st \alpha=35\%} = 1,0275 \cdot 10^{-11} \cdot I_{ST}^3 - 3,5122 \cdot 10^{-7} \cdot I_{ST}^2 + 3,3602 \cdot 10^{-4} \cdot I_{ST} + 0,84429 \quad (5.7)$$

gdzie:

I_{ST} – prąd w silniku trakcyjnym [A]

Założono przy tym, że sprawność zależy jedynie od wartości prądu bez względu na moc elektryczną silnika trakcyjnego.

Wartość momentu obrotowego silnika trakcyjnego można wyznaczyć przy użyciu następującej zależności:

$$M_{st} = \frac{30 \cdot P_{el}}{\pi \cdot n_{st}} \cdot \eta_{st} \quad (5.8)$$

gdzie:

P_{el} – moc elektryczna silnika trakcyjnego [W]

n_{st} – prędkość obrotowa silnika trakcyjnego [obr/min]

η_{pz} - sprawność przekładni zębatej [-].

5.6. Przekładnia zębata

Moc mechaniczna z silnika trakcyjnego na zestaw kołowy przekazywana jest za pomocą walcowej przekładni redukcyjnej o zębach prostych, o przełożeniu 15:68. Praca przekładni wiąże się z pewnymi stratami energii, które można oszacować na podstawie sprawności mechanicznej η_{PZ} . Wg [68] sprawność przekładni w takich zastosowaniach osiąga 0,99. Jednak w przypadku przekładni, zastosowanej w układzie napędowym założono, że sprawność η_{PZ} wynosi 0,96. Niższa sprawność wynika między innymi z zastosowania smaru, charakteryzującego znacznie większą lepkością niż olej przekładniowy. Zastosowanie smaru jest niezbędne ze względu na konstrukcję obudowy przekładni oraz uszczelnień wałów, która w przypadku oleju nie byłaby w stanie zapewnić odpowiedniej szczelności

Zależności pomiędzy parametrami na wejściu i wyjściu przekładni określają następujące wzory:

$$n_{st} = \frac{z_{zk}}{z_{st}} \cdot n_{zk} \quad (5.9)$$

$$M_{zk} = \frac{z_{zk}}{z_{st}} \cdot \eta_{PZ} \cdot M_{st} \quad (5.10)$$

gdzie:

n_{st} - prędkość obrotowa silnika trakcyjnego [obr/min],

n_{zk} - prędkość obrotowa zestawu kołowego [obr /min],

M_{st} - moment obrotowy silnika trakcyjnego [Nm],

M_{zk} - moment obrotowy zestawu kołowego [Nm],

z_{st} - liczba zębów koła zębatego silnika trakcyjnego [-],

z_{zk} - liczba zębów koła zębatego zestawu kołowego [-],

η_{PZ} - sprawność przekładni zębatej [-].

Prędkość obrotowa silnika trakcyjnego określana jest zależnością:

$$n_{st} = \frac{60000 \cdot z_{zk} \cdot V_{teloc}}{\pi \cdot z_{st} \cdot D_{0teloc}} \quad (5.11)$$

gdzie:

V_{teloc} - prędkość lokomotywy [m/s],

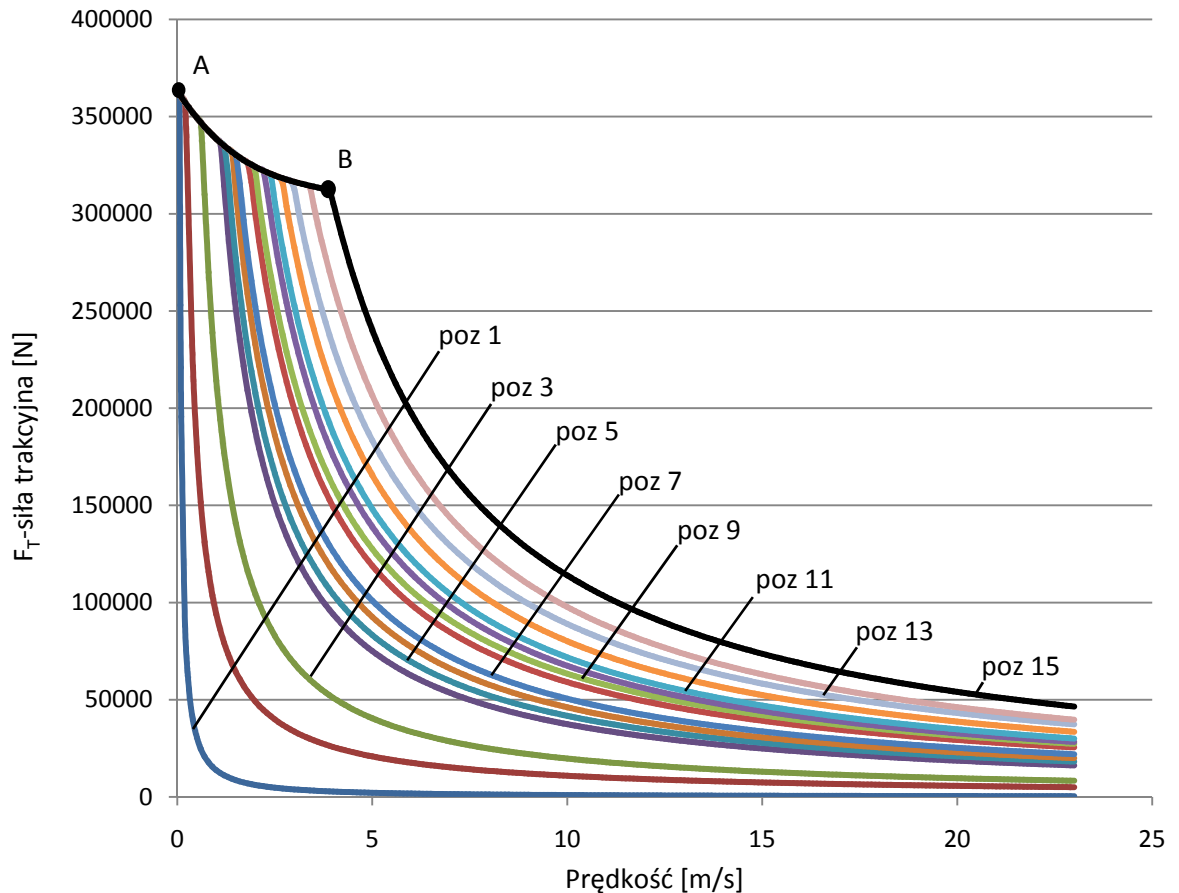
D_{0teloc} - średnica toczna koła [mm] (dla lokomotywy ST44 $D_0=1050$ mm).

5.7. Charakterystyka trakcyjna lokomotywy

W przypadku, gdy na zestaw kołowy działa moment obrotowy pochodzący od silnika trakcyjnego, na styku kół i szyn pojawia się siła trakcyjna F_T . Przy uwzględnieniu wzorów (5.2-5.7). wartość siły trakcyjnej wynosi:

$$F_T = \frac{P_{el}}{V_{teloc}} \cdot \eta_{st} \cdot \eta_{pz} \quad (5.12)$$

Na rys. 5.15 przedstawiono charakterystykę trakcyjną lokomotywy ST44, uwzględniającą położenie nastawnika jazdy i wynikająca stąd moc na zestawach kołowych. Wartość siły trakcyjnej w zakresie niskiej prędkości jest ograniczona jest przyczepnością pomiędzy kołami a szynami (krzywa A-B).



Rys. 5.15. Charakterystyka trakcyjna lokomotywy ST44

5.8. Urządzenia pomocnicze

Jak wcześniej wspomniano układ napędowy lokomotywy oprócz zasadniczych elementów jak prądnica główna, silniki trakcyjne, przekładnie zębate i zestawy kołowe posiada również szereg innych urządzeń energochłonnych zwanych urządzeniami pomocniczymi.

W tab. 5.2 [18] przedstawiono wartości mocy poszczególnych urządzeń pomocniczych. W celu uzyskania wartości mocy obciążających silnik spalinowy należy uwzględnić sprawności poszczególnych elementów układów przeniesienia napędu z silnika spalinowego na rozważane urządzenie. Założono przy tym, że sprawność przekładni zębatej, wykorzystanej do napędu wentylatorów silników trakcyjnych, wentylatora prądnicy głównej oraz prądnicy i wzbudnicy, a także wentylatora układu chłodzenia silnika spalinowego wynosi 0,98. Sprawność przekładni pasowej, poprzez którą napędzany jest generator jednofazowy wynosi 0,95. W układzie napędowym wentylatora układu chłodzenia silnika spalinowego oprócz przekładni zębatej znajduje się sprzęgło hydrokinetyczne o regulowanym poślizgu, którego maksymalna sprawność wynosi 0,96.

Tab. 5.2. Moce i prędkości obrotowe urządzeń pomocniczych osiągnięte przy maksymalnej prędkości obrotowej silnika spalinowego [18]

Urządzenie pomocnicze	Prędkość obrotowa	Moc urządzenia	Całkowita sprawność układu napędowego	Moc obc. silnik spalinowy
	[obr/min]	[kW]	[-]	[kW]
Wentylator silników trakcyjnych wózka A	2603	11	0,98	11,2
Wentylator silników trakcyjnych wózka B	2652	11,8	0,96	12,3
Wentylator prądnicy głównej	2213	11	0,94	11,7
Generator jednofazowy	4000	1,1	0,89	1,2
Wentylator chłodnicy	1395	40,5	0,92	46,9
Prądnica pomocnicza	1806	12,2	0,98	12,4
Wzbudnica	1806	22,6	0,98	23,1
Sprężarka powietrza	750	40,5	1	40,5

Przedstawione w tabeli parametry urządzeń pomocniczych dotyczą pracy silnika spalinowego przy maksymalnej prędkości obrotowej wału korbowego wynoszącego w przypadku silnika typu 12 CzN26/26 750 obr/min.

Wentylatory silników trakcyjnych i prądnicy głównej, jak i prądnice są napędzane od silnika spalinowego przez przekładnie mechaniczne o stałym przełożeniu. Powoduje to, że ich prędkość obrotowa jest proporcjonalna do prędkości obrotowej silnika spalinowego. Moc niezbędną do napędu można wyrazić za pomocą następującej zależności [41]:

$$P_{went1} = \left(\frac{n_{went1}}{n_{went}}\right)^3 \cdot P_{went} \quad (5.13)$$

gdzie:

n_{went} – maksymalna prędkość obrotowa wentylatora (przy prędkości obrotowej silnika spalinowego równej 750 obr/min) [obr/min],

n_{went1} – prędkość obrotowa wentylatora (przy prędkości obrotowej silnika spalinowego mniejszej niż 750 obr/min) [obr/min],

P_{went} – moc znamionowa wentylatora przy prędkości n_{went} [kW],

P_{went1} – moc znamionowa wentylatora przy prędkości n_{went1} [kW].

Zależność (5.13) może zostać użyta również do opisu pracy wentylatora układu chłodzącego. Należy jednak zauważyć, że prędkość wspomnianego wentylatora nie jest proporcjonalna do prędkości silnika spalinowego z powodu zastosowania w jego układzie napędowym sprzęgła hydrokinetycznego o regulowanym poślizgu. W obliczenia przyjęto, że poślizg oraz sprawność sprzęgła hydrokinetycznego wynosi 0,96.

Prędkość obrotowa wału korbowego silnika spalinowego ma również wpływ na moc sprężarki powietrza. Wartość mocy sprężarki można obliczyć przy użyciu przytoczonych poniżej zależności[87]:

$$P_{sopr} = \frac{\lambda_{dst} \cdot P_t}{\eta_{sopr}} \quad (5.14)$$

$$\lambda_{dst} = \lambda_v \lambda_d \lambda_p \lambda_{sz} \quad (5.15)$$

$$P_{sopr} = \frac{\dot{V}_{sk} \cdot p_{it}}{36,72} \quad (5.16)$$

$$p_{it} = \frac{k_{pol}}{k_{pol} - 1} \cdot p_0 \cdot \left[\left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{k_{pol}-1}{k_{pol}}} - 1 \right] \quad (5.17)$$

$$\dot{V}_{sk} = V_{sk} \cdot n_{sopr} \cdot 60 \quad (5.18)$$

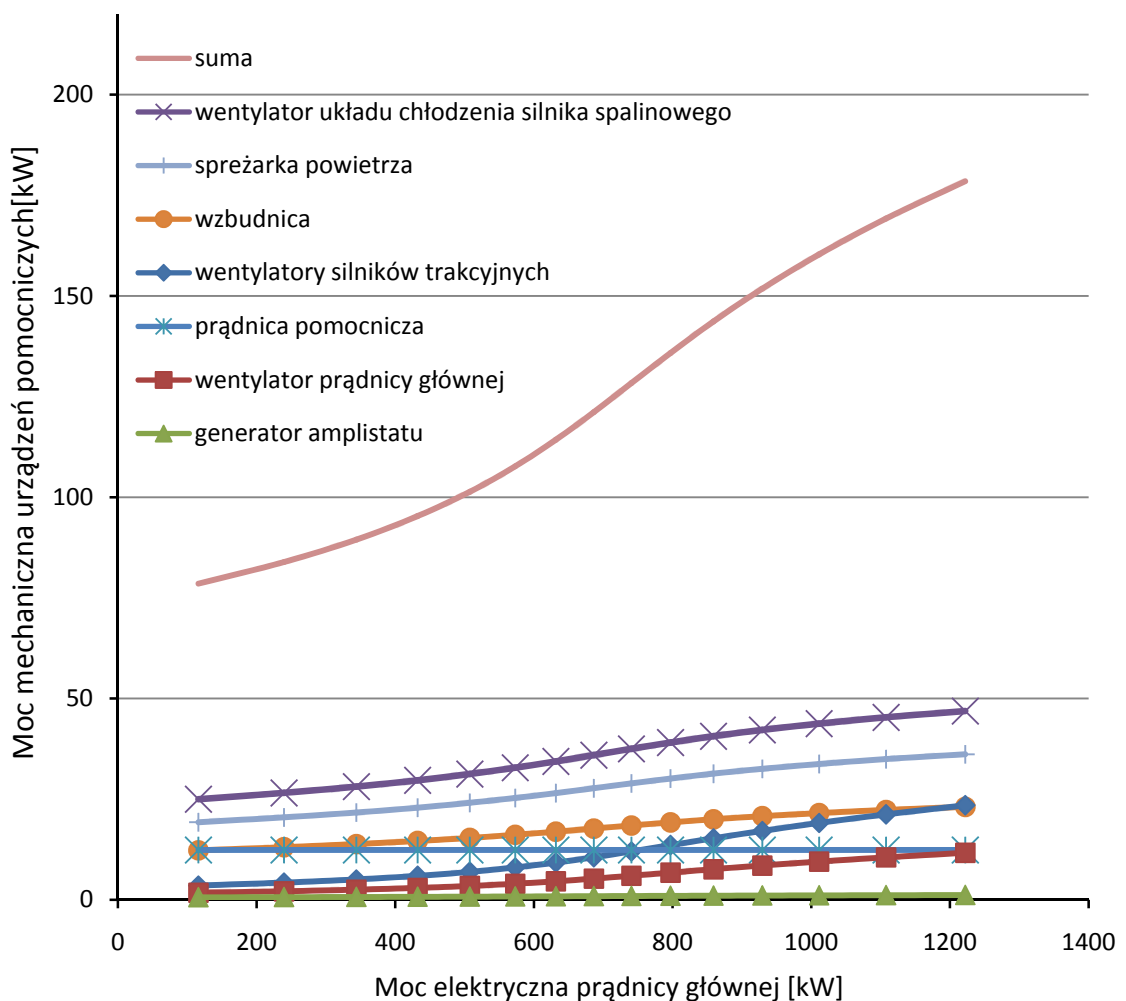
gdzie:

- P_{sopr} – moc sprężarki [kW]
- η_{sopr} – sprawność całkowita [-],
- λ_{dst} – stopień dostarczenia [-],
- λ_v – wskaźnik przestrzeni szkodliwej [-],
- λ_d – wskaźnik dławienia [-],
- λ_p – współczynnik podgrzania [-],
- λ_{sz} – wskaźnik szczelności [-],
- P_{sopr} – moc sprężarki teoretyczna [kW],
- p_{it} – średnie ciśnienie indykowane [MPa],
- k_{pol} – współczynnik politropy [-],
- p_0 – ciśnienie w króćcu ssawnym [MPa],
- p_k – ciśnienie w króćcu tłocznym [MPa],
- \dot{V}_{sk} – wydajność skokowa sprężarki [m³/h],
- n_{sopr} – prędkość obrotowa wału korbowego sprężarki [obr/min].

Przy założeniu upraszczającym, że wartości λ_{dst} i η_{sopr} są stałe w całym zakresie prędkości obrotowej sprężarki powietrza można przyjąć, że objętościowy strumień powietrza w króćcu ssawnym oraz moc maksymalna dostarczana do sprężarki jest proporcjonalna do prędkości obrotowej. W przypadku gdy sprężarka nie realizuje sprężania powietrza, czyli realizuje stan biegu luzem, ze względu na opory mechaniczne jak również opory powietrza

w zaworach ssących, jej moc stanowi około 50% maksymalnej mocy sprężarki podczas sprężania [26].

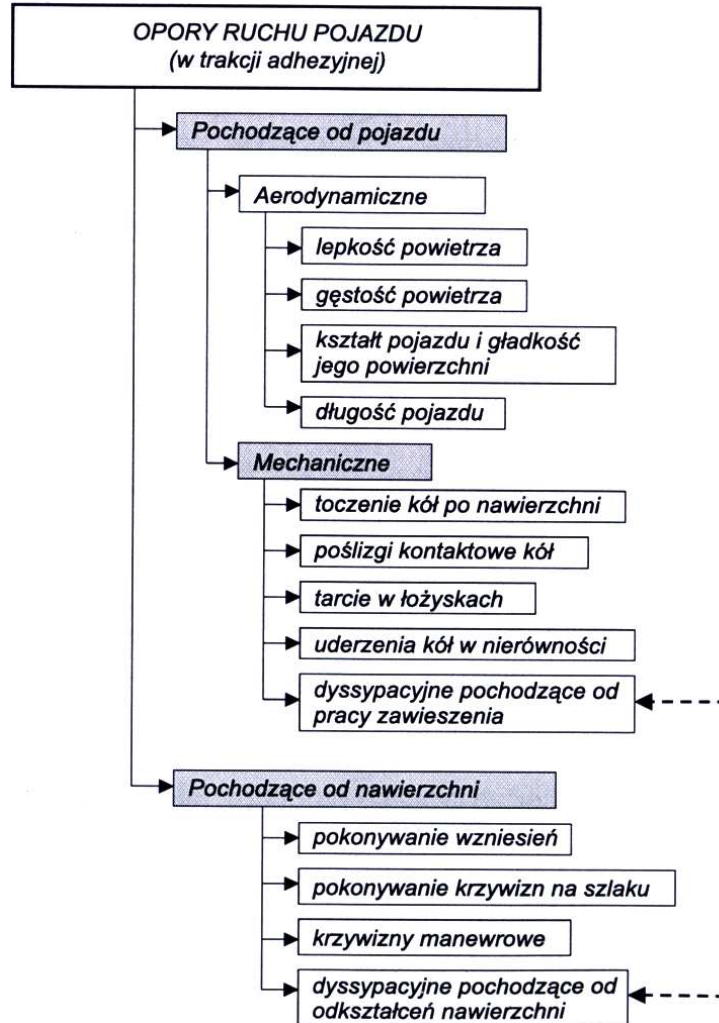
Prędkość obrotowa silnika spalinowego nie ma natomiast jednoznacznego wpływu na moc mechaniczną dostarczaną prądnicy pomocniczej. Wynika to z faktu, że moc elektryczna utrzymuje się na stałym poziomie wynoszącym 12,2 kW. Moc prądnicy wzbudnej jak i generatora jednofazowego sterowana jest za pomocą regulatora mocy silnika spalinowego i prądnicy głównej. W przypadku pracy silnika w stanie biegu jałowego, w którym jak wspomniano wcześniej brak jest przekazywania mocy na zestawy kołowe, moce zarówno prądnicy wzbudnej jak i generatora prądu przemiennego wynoszą 0 kW. W przypadku realizacji jazdy pod obciążeniem moce prądnicy wzbudnej i generatora jednofazowego są proporcjonalne do mocy prądnicy głównej. Na rys. 5.16 przedstawiono pobór mocy mechanicznej urządzeń pomocniczych w funkcji mocy elektrycznej generowanej w prądnicy głównej. Przy obliczaniu mocy mechanicznej wszystkich wentylatorów maszyn elektrycznych oraz sprężarki uwzględniono zależność mocy prądnicy głównej od prędkości obrotowej silnika spalinowego (rys. 5.10).



Rys. 5.16. Pobór mocy mechanicznej urządzeń pomocniczych w funkcji mocy elektrycznej generowanej w prądnicy głównej

5.9. Opory ruchu

Podczas ruchu pociągu na lokomotywę jak również na poszczególne wagony w składzie pociągu działają siły oporu ruchu. Przykład ogólnego podziału oporów ruchu pojazdów przedstawiono na rys. 5.17 [59].



Rys 5.17 Podział oporów ruchu pojazdu [59]

Jak widać na rys. 5.17 opory ruchu pociągu zostały podzielone na dwie zasadnicze grupy tj. na opory ruchu pochodzące od pojazdu nazywane również oporami własnymi oraz opory pochodzące od nawierzchni nazywane oporami dodatkowymi.

Opory zasadnicze odnoszą się do ruchu pojazdu po torze poziomym i prostym. Wartość oporów zasadniczych ma ścisły związek z cechami konstrukcyjnymi pojazdu kolejowego i zależy między innymi od masy, współczynnika oporu powietrza, liczby zestawów kołowych. Wartość oporów zależy również od dyssypacji sił podczas pracy zawieszenia i jest zależna od parametrów poszczególnych elementów wchodzących w skład układu biegowego, takich jak współczynniki sprężystości sprężyn i tłumienia tłumików hydraulicznych bądź mechanicznych.

Opory pochodzące od nawierzchni są powiązane z geometrią torowiska, jak na przykład promienie łuków. Należy jednak zaznaczyć, że w niniejszej pracy pokonywanie wzniesień nie potraktowano jako elementu oporów ruchu. Założono bowiem, że siła działająca na pociąg podczas pokonywania wzniesienia jest siłą zachowawczą, związaną z energią potencjalną, która akumulowana jest w masie pociągu.

W literaturze [24, 54, 59] przytaczane są wzory, umożliwiające obliczanie wartości poszczególnych składowych oporu ruchu. Jednak sam proces obliczeniowy wymaga znajomości wielu współczynników, powiązanych z poszczególnymi parametrami konstrukcyjnymi zarówno pojazdów kolejowych, jak i drogi kolejowej. Dlatego też wspomniana metoda analityczna nie jest wykorzystywana.

W praktyce zasadnicze opory ruchu wyznacza się eksperymentalnie, przy użyciu tzw. metody „wybiegu” [57, 59, 81]. Ta metoda polega na pomiarze przyspieszenia pociągu podczas pracy lokomotywy w stanie jazdy wybiegiem, gdy siła trakcyjna F_T oraz siła pochodząca od układu hamulcowego F_H równa jest zeru. Jak wspomniano, zasadnicze opory ruchu odnoszą się jedynie do ruchu pociągu po torze poziomym. W rzeczywistości sytuacja ta występuje sporadycznie. W przypadku analizowanej trasy pomiędzy stacjami Bydgoszcz Wschód – Gdynia Port o długości 187,6 km, dla pociągu o długości 700 m sumaryczna długość toru poziomego wynosi jedynie 6,8 km. Dla tak krótkiego dystansu pomiarowego nie jest możliwe uzyskanie dużej liczby pomiarów, co przekłada się na dokładność uzyskanych wyników. Dlatego też w celu zwiększenia liczby pomiarów, w analizie uwzględniono odcinki, dla których pochylenie zastępcze $i_{zas} \in \langle -0,5; 0,5 \rangle \%$. Spowodowało to wydłużenie dystansu pomiarowego do 37,2 km.

Przy powyższych założeniach oraz przy uwzględnieniu wzoru (5.2), wartość oporu ruchu wynosi:

$$F_R(V_{rz}) = m \cdot g \cdot i_{zas} + m_z \cdot a \quad (5.19)$$

gdzie:

- F_R – siła oporów ruchu [N],
- m – masa pociągu [kg],
- i_{zas} – pochylenie zastępcze [‰],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
- F_H – siła oporów układu hamulcowego [N],
- F_T – siła trakcyjna [N],
- m_z – masa zredukowana [kg],
- V_{rz} – prędkość pociągu [m/s].

Występująca we wzorze (5.19) wartość oporu ruchu wyrażona jest w funkcji prędkości pociągu. W najogólniejszym przypadku funkcja ta przyjmuje postać wielomianu 2-go stopnia:

$$F_R(V_{rz}) = A_{FR} + B_{FR}V_{rz} + C_{FR}V_{rz}^2 \quad (5.20)$$

gdzie:

A_{FR}, B_{FR}, C_{FR} – współczynniki oporu ruchu.

Praktyką jest wyrażane oporów ruchu w ujęciu jednostkowym [59]:

$$f_R(V_{rz}) = \frac{F_R(V_{rz})}{Q} \quad (5.21)$$

czyli:

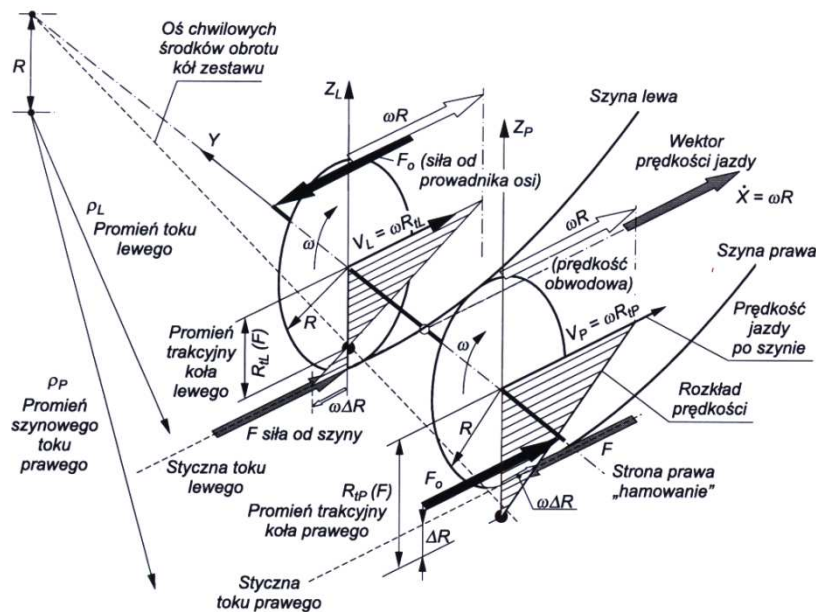
$$f_R = a_{fR} + b_{fR}V + c_{fR}V^2 \quad (5.22)$$

gdzie:

a_{fR}, b_{fR}, c_{fR} – współczynniki jednostkowego oporu ruchu [-].

Wartość oporów ruchu uzyskana przy użyciu tzw. metody „wybiegu” uwzględnia również opory aerodynamiczne. Jest to istotne ponieważ metody analityczne w przypadku pociągów towarowych praktycznie nie są stosowane, ze względu na wysoki poziom złożoność zjawisk aerodynamicznych.

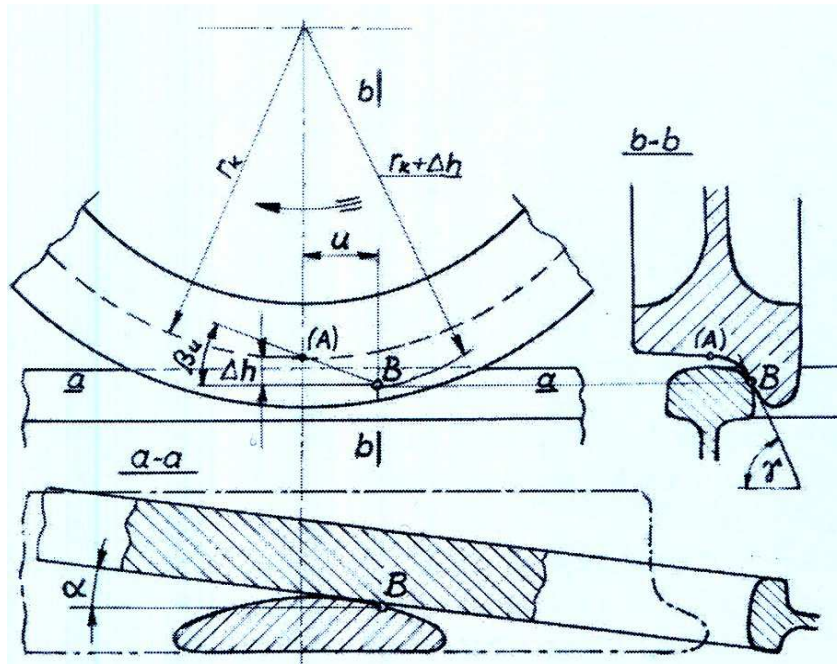
Zasadnicze opory ruchu w teorii odnoszą się do jazdy po torze prostym. Jazda po łuku powoduje pojawienie się dodatkowych oporów ruchu. Źródłem wspomnianego oporu są poślizgi występujące na styku koło kolejowe-szyna, które powstają na skutek różnej odległości pomiędzy osią chwilowych środków obrotu kół zestawu kołowego a powierzchniami tocznymi szyny zewnętrznej i wewnętrznej (rys 5.18).



Rys. 5.18 Rozkład prędkości i poślizgów kół kolejowych [58]

Ponadto podczas jazdy pojazdu kolejowego po łuku, w szczególności gdy pojazd ten posiada prowadniki osi zestawów kołowych o dużej sztywności podłużnej względem ramy,

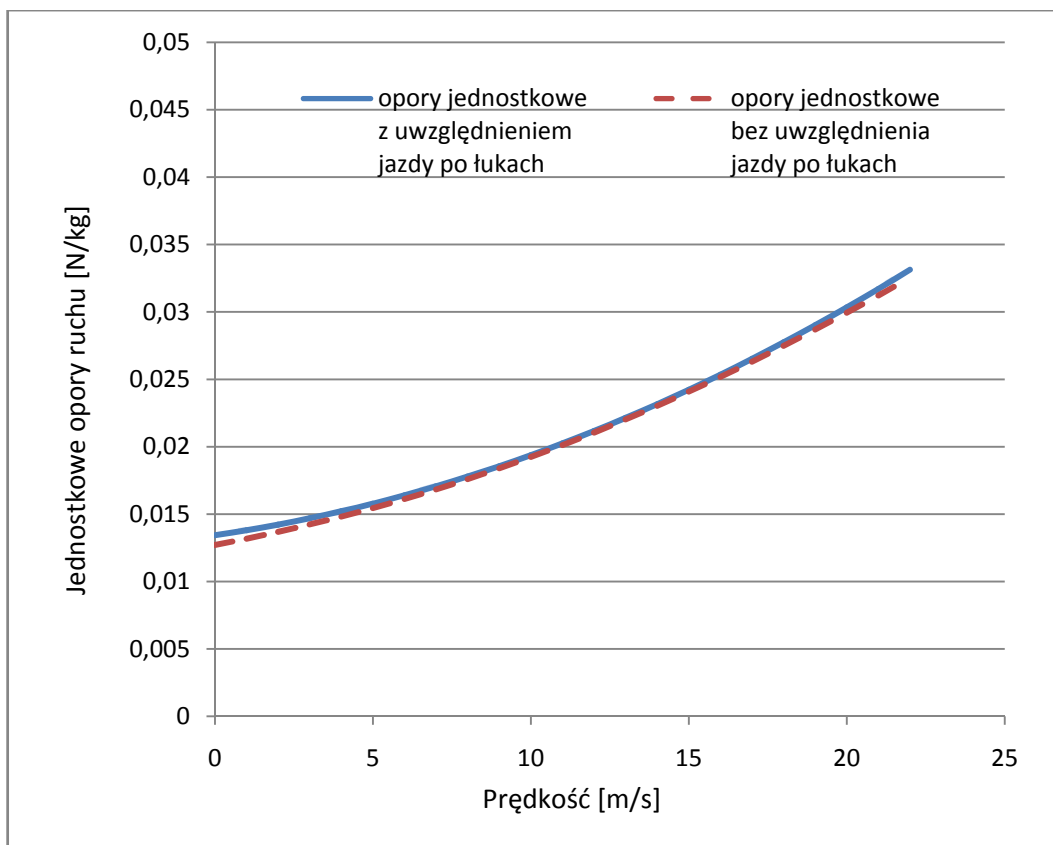
następuje zjawisko nabiegania kół na szyny. Skutkuje to pojawieniem się dodatkowych poślizgów wierzchnich w rejonie obrzeży kół (punkt B rys. 5.19).



Rys. 5.19 Nabieganie koła zestawu kołowego na szynę w łuku torowym [79]

Pomimo, że w literaturze przytaczane są wzory, umożliwiające określenie wartości oporu ruchu podczas jazdy po torze zakrzywionym, na potrzeby przeprowadzanej analizy opory te uwzględniono w ogólnym wzorze na opór jednostkowy ruchu pociągu. Osiągnięto to poprzez wykonanie pomiarów przy użyciu metody „wybiegu” zarówno na odcinkach prostych drogi kolejowej, jak i łukach.

Na rys. 5.20 przedstawiono wykres jednostkowego oporu ruchu, uzyskanych po uprzedniej aproksymacji wartości jednostkowego oporu ruchu, uzyskanych na podstawie przeprowadzony na potrzeby pracy pomiarów.



Rys. 5.20 Przebieg jednostkowego oporu ruchu

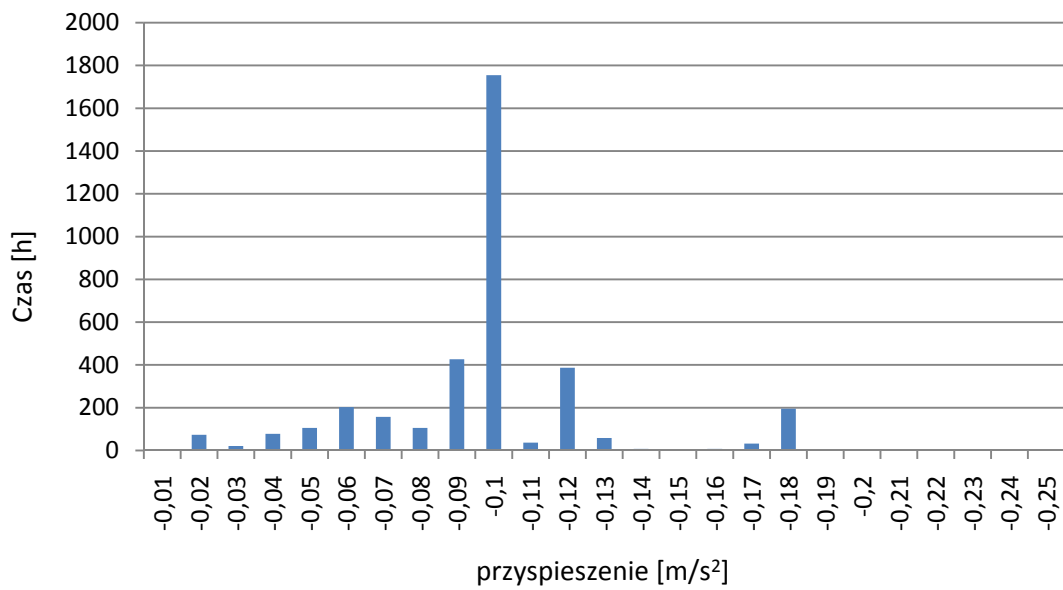
W opracowywanym modelu pracy lokomotywy zostanie wykorzystany wyłącznie przebieg jednostkowego oporu ruchu, uwzględniający jazdę po krzywiźnie, opisany następującym równaniem:

$$f_R = 13,65 \cdot 10^{-3} + -1,23254 \cdot 10^{-4}V_{rz} + 4,98988 \cdot 10^{-5}V_{rz}^2 \quad (5.23)$$

5.10. Hamowanie pociągu

Jak wspomniano w rozdziale 5.2 podczas jazdy na lokomotywę działają siły o charakterze dyssypacyjnym, do których należą siły hamowania F_H . Dla opisywanego modelu układu napędowego lokomotywy założono istnienie dwóch stopni hamowania.

Na rys. 5.21 przedstawiono rozkład wartości przyspieszenia a_{rz} w trakcie hamowania pociągu. Wartości przyspieszenia zostały obliczone na podstawie danych zarejestrowanych przez system Teloc podczas całorocznej eksploatacji lokomotywy.



Rys. 5.21 Rozkład wartości przyspieszenia w trakcie hamowania pociągu

Z rys. 5.21 wynika, że hamowanie najczęściej było realizowane z nastawą U_H , dla której przyspieszenie pociągu osiągało wartość $-0,1 \frac{m}{s^2}$. Przyjęto, że ta wartość przyspieszenia jest charakterystyczna dla 1-go stopnia hamowania.

W przypadku hamowania 2-go stopnia założono, że przyspieszenie pociągu osiąga wartość $-0,18 \frac{m}{s^2}$. Założenie to wynikało z faktu, że ta wartość jest najmniejszą, jaką zarejestrowano podczas badań eksploatacyjnych.

6. MODEL AUTOMASZYNISTY

6.1. Informacje wstępne

Opisany w niniejszym rozdziale model automaszynisty wykorzystuje równania stanu utworzone na podstawie układu napędowego lokomotywy spalinowej (rys. 5.2).

Przyjęte w modelu automaszynisty rozwiązania bazują na wieloletnim doświadczeniu autora pracy w zakresie zarządzania taborem kolejowym oraz informacjach zebranych wśród maszynistów z wieloletnim doświadczeniem. W modelu odwołano się również do zasad postępowania w obsłudze lokomotyw spalinowych zawartych w Instrukcji o zasadach gospodarki paliwowej w PKP CARGO S.A. [73]. Do najważniejszych zasad należą:

- utrzymywanie możliwie stałego natężenia prądu w silnikach trakcyjnych podczas rozruchu pociągu,
 - jak najszybsze osiągnięcie ostatniej pozycji nastawnika jazdy,
 - przeprowadzanie rozruchu pociągu wyłącznie przy całkowitym wyluzowaniu hamulców,
 - zmianę pozycji nastawnika jazdy należy przeprowadzać dopiero wówczas, gdy silnik spalinowy uzyska prędkość obrotową poprzednio zadaną, przy czym czas utrzymywania nastawnika jazdy przy danej pozycji nie powinien być krótszy niż 3÷4s,
- po przeprowadzonym rozruchu i osiągnięciu prędkości rozkładowej pociągu nastawnik jazdy należy ustawić w pozycji „0” i kontynuować dalszą jazdę wybiegiem,
- przed hamowaniem pociągu (za wyjątkiem hamowania w sytuacjach awaryjnych) należy stasować jazdę wybiegiem na jak najdłuższej drodze,
- podczas jazdy należy wykorzystywać profil drogi kolejowej – w przypadku konieczności zmniejszenia prędkości pociągu przewidzianego rozkładem jazdy lub innymi sygnalizowanymi ograniczeniami, należy z odpowiednim wyprzedzeniem przestawić nastawnik jazdy na niższą pozycję, aby w miejscu początku ograniczenia uzyskać przewidzianą prędkość jazdy.

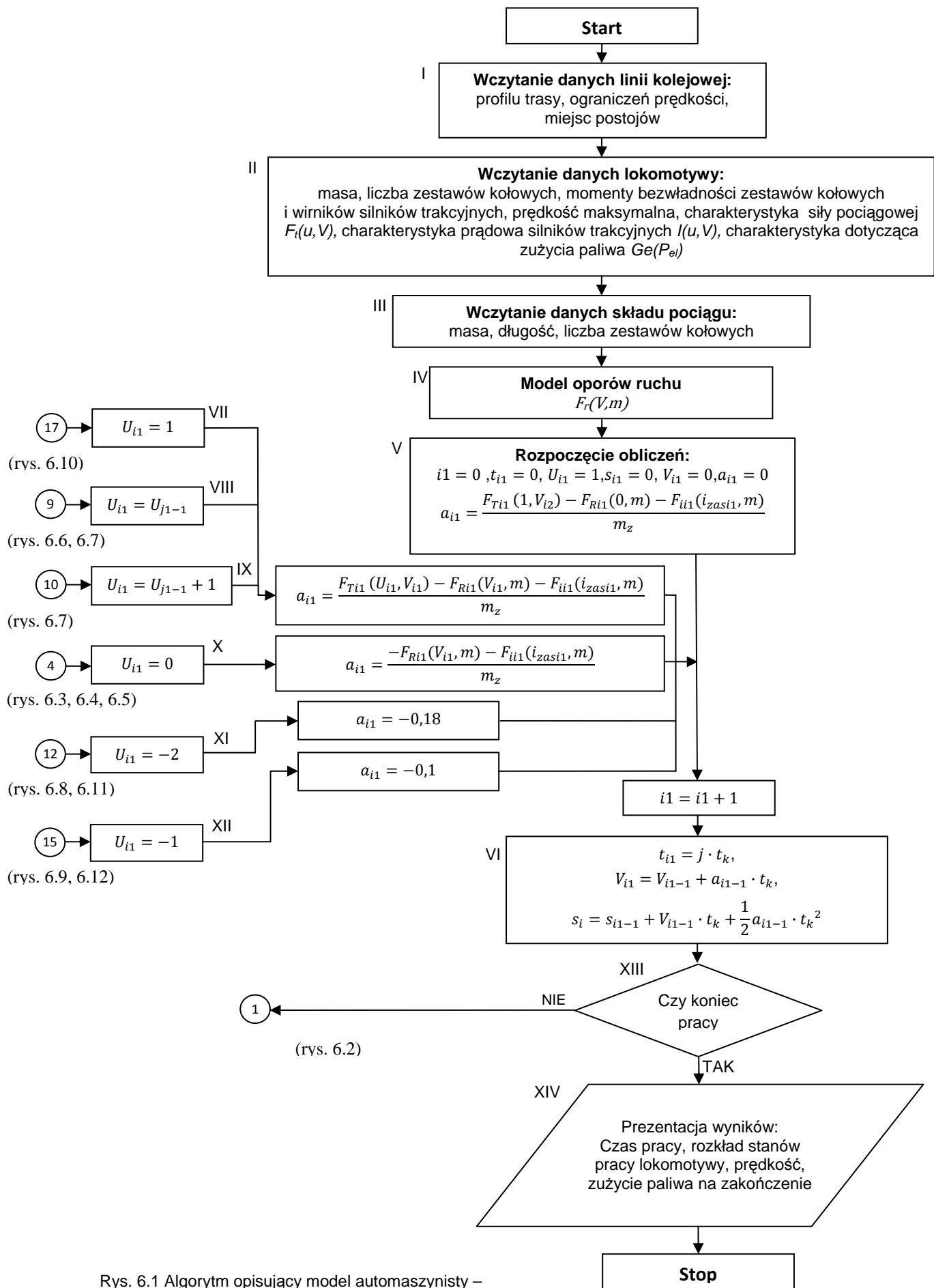
Przy tworzeniu algorytmu wykorzystano również informacje zawarte w instrukcji Ie-4 [76], dotyczące odległości z jakich dane urządzenia sterowania ruchem kolejowym takie jak semafony i tarcze ostrzegawcze muszą być widoczne. Wiedza na temat wspomnianych odległości jest istotna, gdyż umożliwia między innymi ustalenie miejsca, w którym maszynista zostanie poinformowany o konieczności zredukowania prędkości lub zatrzymania pociągu.

Model zakłada konieczność wprowadzania dwóch nastaw: nastawy U_N mającej wpływ na moc zespołu silnika spalinowego, a tym samym na siłę trakcyjną $F_T(X_1, U_N(t))$ oraz nastawy U_H , od której zależy wartość siły hamowania $F_H(U_H(t))$. Choć w przypadku lokomotywy ST44 istnieje pewne powiązanie układu regulacji mocy i układu hamulcowego, uniemożliwiające między innymi realizację jazdy pod obciążeniem przy jednoczesnej realizacji hamowania, co chroni układ napędowy przed przeciążeniem, oba układy należy traktować jako autonomiczne.

W przypadku lokomotywy ST44 nastawa mocy $U_N(t)$ zawiera się w przedziale $\langle 0, 15 \rangle$. W przypadku układu hamulcowego wyodrębniono natomiast dwa stopnie hamowania $U_H(t)$, o czym wspomniano w rozdziale 3.11. Jednak w celu uproszczenia systemu kodowania stanu pracy lokomotywy, pomimo wspomnianej autonomiczności układów regulacji mocy i hamowania wprowadzono wspólną dla obu układów nastawę $U_{NH}(t)$, zawierającą się w przedziale $\langle -2, 15 \rangle$, przy czym wartości nastawy należą do zbioru liczb całkowitych. Wartość $U_{NH}(t) = -2$ należy interpretować jako „2-gi stopień hamowania pełnego”, wartość $U_{NH}(t) = -1$ jako „1-szy stopień hamowania pełnego” natomiast $U_{NH}(t) = 0$ oznacza jazdę wybiegiem. Wartości $U_{NH}(t) \in \langle 1, 15 \rangle$ oznaczają realizację jazdy pod obciążeniem.

6.2. Model automaszynisty - algorytm

W modelu automaszynisty wyodrębniono dwie zasadnicze grupy bloków. Pierwszą grupę stanowią bloki decyzyjne i obliczeniowe wykorzystywane do obliczania bieżących parametrów jazdy dla danego stanu pracy lokomotywy (rys. 6.1). Drugą grupę stanowią bloki decyzyjne i obliczeniowe, wykorzystywane w procesie wyboru odpowiedniego stanu pracy lokomotywy po uwzględnieniu bieżących warunków eksploatacji.



Rys. 6.1 Algorytm opisujący model automaszynisty –
obliczanie bieżących parametrów jazdy

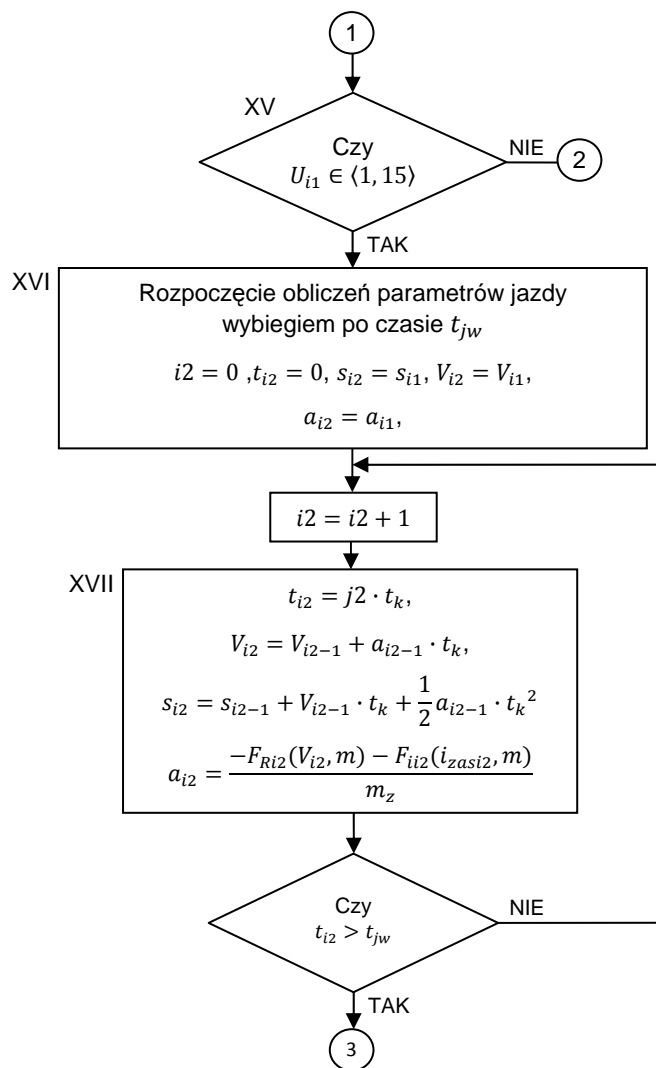
Proces obliczeniowy rozpoczyna się wczytania danych parametrów linii kolejowej (blok I), po której poruszać się będzie pociąg. Parametry te obejmują profil drogi kolejowej, informacje dotyczące dopuszczalnych prędkości, a także miejsca postoju. Wczytanie danych technicznych lokomotywy następuje w bloku II. Dane te zawierają informacje o masie lokomotywy, liczbie zestawów kołowych, momentów bezwładności zestawów kołowych i wirników silników trakcyjnych. Ponadto wczytywane są dane, dotyczące prędkość maksymalnej lokomotywy, charakterystyki siły pociągowej $F_T(U, V)$, charakterystyki prądowej silników trakcyjnych $I(U, V)$, oraz charakterystyki zużycia paliwa $Ge(Pel)$. Ponadto oprócz danych lokomotywy niezbędne jest wczytanie danych składu pociągu, które obejmują sumaryczną masę wagonów i liczbę zestawów z uwzględnieniem ich momentów bezwładności (blok III). W bloku IV następuje wczytanie modelu oporów ruchu $F_R(V, m)$, który dotyczy zarówno lokomotywy jak i wagonów.

Parametry pracy lokomotywy, obejmujące czas t_{i1} , przebytą drogę s_{i1} , prędkość jazdy V_{i1} oraz przyspieszenie a_{i1} obliczane są w blokach V i VI. Do parametrów pracy zaliczono również nastawę U_{i1} , opisującą stan pracy lokomotywy, ponieważ ma ona wpływ na wartość przyspieszenia a_{j1} . Założono przy tym, że dla kroku $i1 = 0$ wartość nastawy U_{i1} równa się 1 (blok V). Natomiast dla dalszych kroków wartość nastawy U_{i1} (blok VII÷XII) określana jest za pomocą części decyzyjnej algorytmu, która to łączy się z częścią obliczeniową parametrów pracy za pomocą łączników stronicowych 4, 8, 9, 12, 14, 16.

Za pomocą bloku decyzyjnego XIII sprawdza się czy poddana analizie praca lokomotywy została zakończona. W przypadku zakończenia pracy, prezentowane są wyniki (blok odczytu i zapisu danych XIV), zawierające przebieg stanów pracy lokomotywy, prędkość oraz ilość zużytego paliwa.

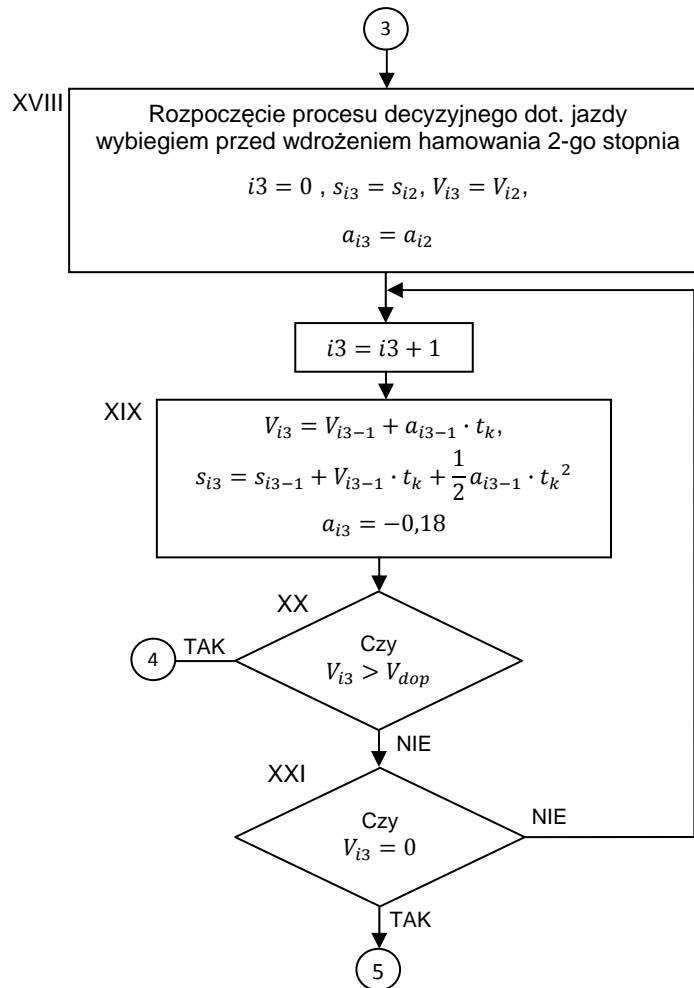
W przypadku gdy analiza pracy lokomotywy nie jest zakończona, proces obliczeniowy kontynuowany jest w części decyzyjnej, mającej na celu, co wcześniej wspomniano wybór odpowiedniej nastawy.

Dla jazdy pod obciążeniem, gdy nastawa $U_{i1} \in \langle 1, 15 \rangle$ (blok XV, rys. 6.2) możliwe jest podjęcie następujących działań: rozpoczęcie jazdy wybiegiem, kontynuowanie dalszej jazdy pod obciążeniem przy niezmienionej nastawie lub zwiększenie nastawy o 1. Nie możliwe jest natomiast bezpośrednio wdrożenie hamowania zarówno 2-go jak i 1-go stopnia. Hamowanie pociągu musi być poprzedzone jazdą wybiegiem przez okres czasu t_{jw} . Bezpośrednie wdrożenie hamowania po jeździe pod obciążeniem skutkuje gwałtowną zmianą kierunku sił działających w elementach układów zderzakowo-cięgłowych, łączących poszczególne pojazdy w składzie pociągu. Wspomniana zmiana kierunku sił powoduje postanie drgań wzdłużnych wagonów, które w niekorzystnych warunkach mogą doprowadzić do uszkodzeń sprzęgów śrubowych, łączących wagony, a w konsekwencji do rozerwania składu pociągu.



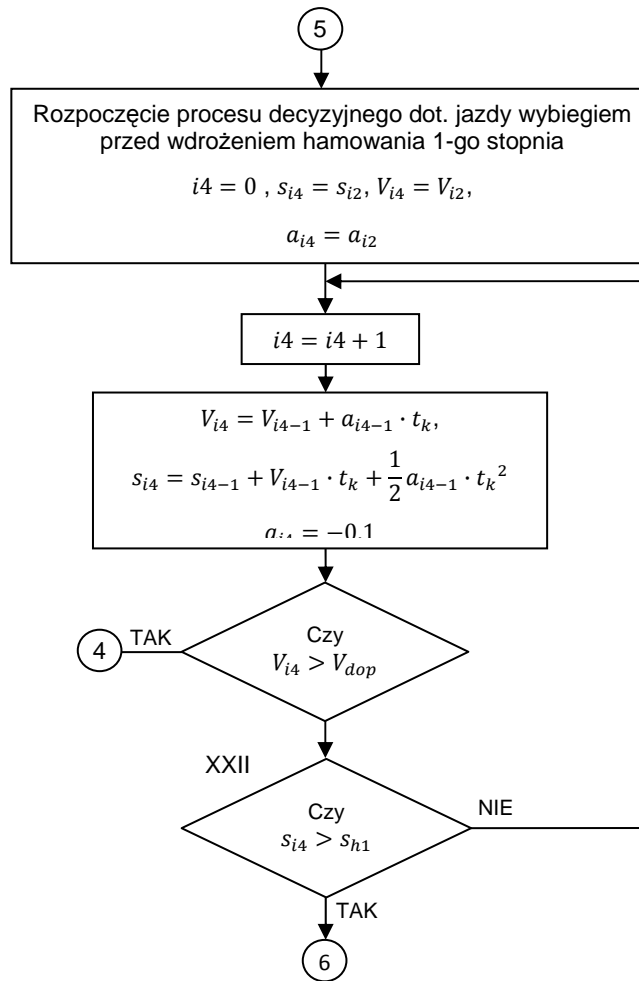
Rys. 6.2 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – obliczanie parametrów jazdy wybiegiem w czasie t_{jw}

Parametry pracy lokomotywy po czasie t_{jw} jazdy wybiegiem, są obliczane w blokach XVI i XVII. Uzyskane parametry traktowane są jako dane wejściowe w procesie decyzyjnym, dotyczącym rozpoczęcia jazdy wybiegiem przed wdrożeniem hamowania 2-go stopnia (blok XVIII, rys. 6.3).



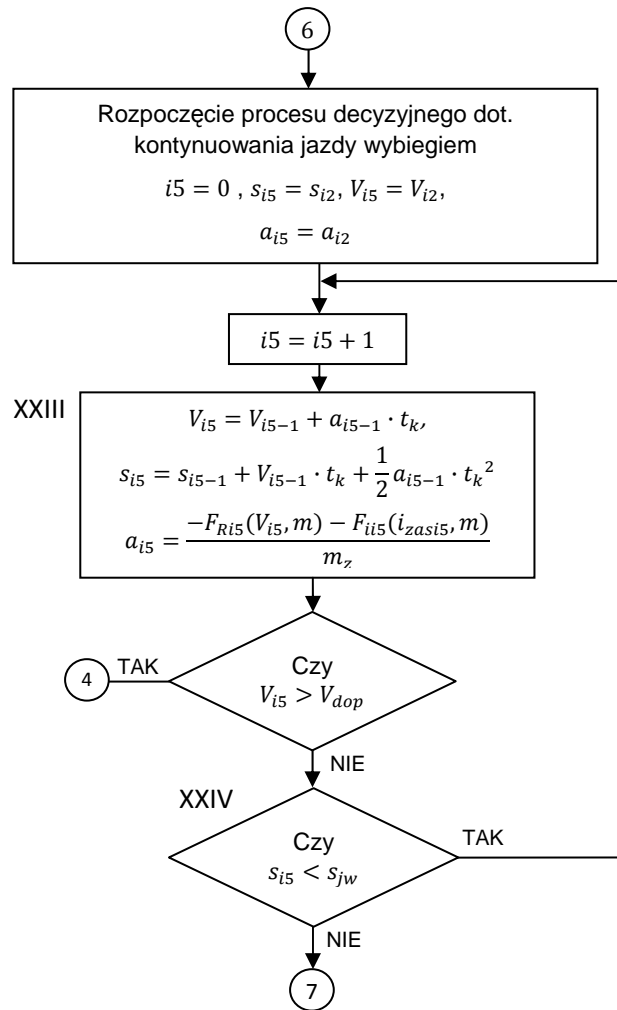
Rys. 6.3 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. jazdy wybiegiem przed wdrożeniem hamowania 2-go stopnia

Wybór nastawy $U_{i1} = 0$ (łącznik stronicowy 4), oznaczający jazdę wybiegiem, następuje po spełnieniu warunku (blok decyzyjny XX), dla którego prędkość V_{i3} , wynikająca z wdrożenia hamowania 2-go stopnia uzyskuje wartość większą od prędkości dopuszczalnej V_{dop} . Wartość prędkości V_{i3} obliczana jest w bloku obliczeniowym XIX przy założeniu, że przyspieszenie hamowania 2-go wynosi $-0,18 \frac{m}{s^2}$. W przypadku nie spełnienia opisanego powyżej warunku proces decyzyjny jest przerywany gdy prędkość V_{i3} osiągnie wartość równą 0 (blok XXI). W tym samym momencie nastąpi rozpoczęcie procesu decyzyjnego dotyczącego jazdy wybiegiem przed wdrożeniem hamowania 1-go stopnia (rys 6.4).



Rys. 6.4 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. jazdy wybiegania przed wdrożeniem hamowania 1-go stopnia

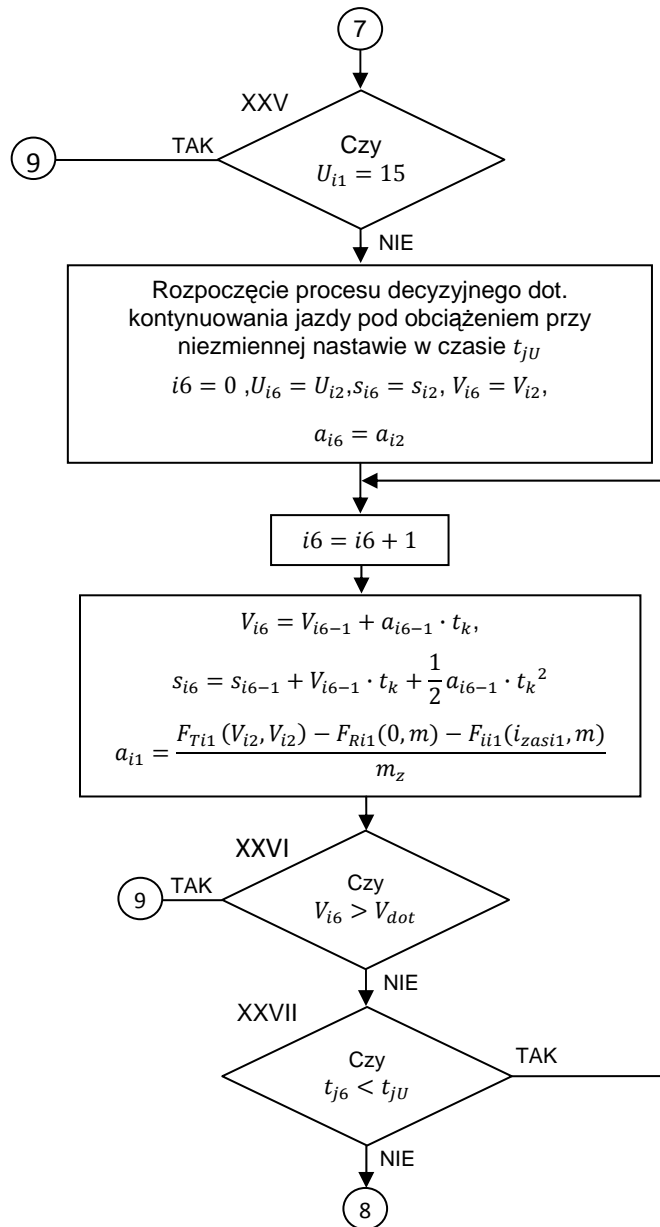
Proces decyzyjny przebiega w identyczny sposób jak w przypadku procesu decyzyjnego dotyczącego jazdy wybiegiem przez wdrożeniem hamowania 2-go stopnia. Jedyną różnicą polega w sposobie przerywania procesu decyzyjnego. W tym przypadku proces jest przerywany gdy dystans przebyty w trakcie hamowania 1-go stopnia hamowania s_{i4} przekroczy wartość graniczną dystansu hamowania s_{h1} (blok XXII). Wartość graniczna s_{h1} dobrana jest w sposób uwzględniający między innymi rozmieszczenie i widoczność semaforów oraz tarcz sygnałowych, informujących o konieczności hamowania lub redukcji prędkości pociągu. Zakończenie procesu decyzyjnego związanego z jazdą wybiegiem poprzedzającego hamowanie 1-go stopnia wiąże się z rozpoczęciem następnego procesu dotyczącego kontynuowania jazdy wybiegiem. Przebieg powyższego procesu został zobrazowany na rys. 6.5.



Rys. 6.5 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. kontynuowania jazdy wybiegiem

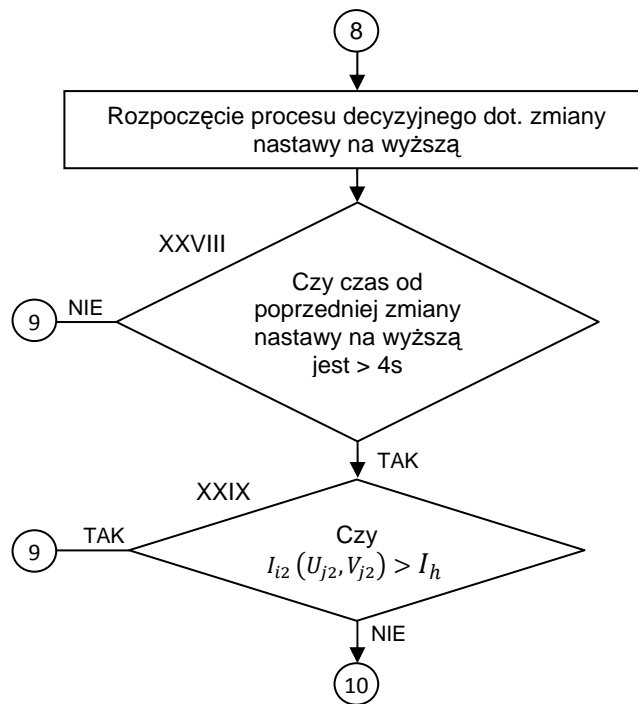
W przeciwieństwie do dwóch poprzednich procesów decyzyjnych, w których przyspieszenie a_{i_3} i a_{i_4} było z góry narzucone, w przypadku procesu decyzyjnego związanego z kontynuowaniem jazdy wybiegiem przyspieszenie a_{i_5} jest obliczane z uwzględnieniem oporów ruchu, pochylenia zastępczego oraz masy zredukowanej składu pociągu (blok XXIII). Przerwanie procesu decyzyjnego wiąże się ze spełnieniem warunku, dla którego droga przebyta podczas jazdy wybiegiem przekroczy wartość graniczną s_{jw} (blok XXIV). Wartość graniczna ustalona jest z uwzględnieniem techniki prowadzenia pociągu przez maszynistę.

Na rys. 6.6 przedstawiono część decyzyjną algorytmu, dotyczącą kontynuowania jazdy pod obciążeniem przy niezmienionej nastawie U_{i_2} .



Rys. 6.6 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. pracy pod obciążeniem przy nieziennej nastawie

Zastosowanie bloku XXV ma za zadanie przerwanie procesu decyzyjnego gdy wartość nastawy U_{i1} z jaką realizowana jest praca lokomotywy wynosi 15. W przypadku lokomotywy serii ST44 przytoczona wartość nastawy jest wartością maksymalną, więc przeprowadzanie procesu, mającego na celu pojęcie decyzji o utrzymaniu wspomnianej wartości nastawy lub jej zwiększeniu jest zbyteczne. Maksymalny czas pracy przy nieziennej nastawie wynosi t_{jU} (blok XXVII). Przekroczenie czasu t_{jU} przy jednoczesnym braku decyzji o kontynuowaniu pracy przy nieziennej nastawie (blok XXVI) rozpoczyna proces decyzyjny związany ze zwiększeniem nastawy (rys 6.7).

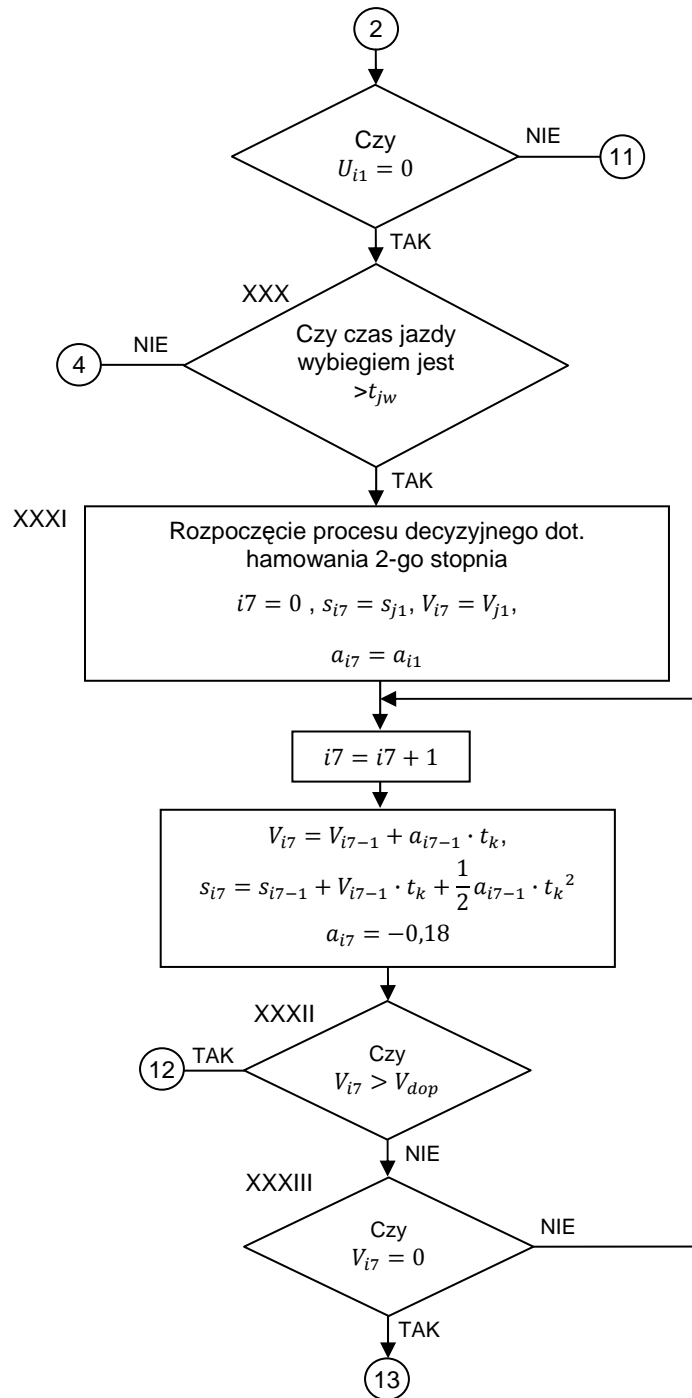


Rys. 6.7 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. zwiększenia nastawy

Założono, że zwiększenie nastawy może być zrealizowane dopiero, gdy czas od ostatniej zmiany nastawy jest krótszy niż 4s (blok XXVIII), a sumaryczny natężenie prądu w silnikach trakcyjnych osiąga wartość mniejszą niż I_h (blok XXIX). Niespełnienie powyższych warunków wiąże się z realizacją pracy przy niezmienionej nastawie.

W przypadku gdy realizowana jest jazda wybiegiem możliwe jest podjęcie następujących działań: wdrożenie hamowanie 2-go stopnia, wdrożenie hamowanie 1-go stopnia oraz rozpoczęcie jazdy pod obciążeniem.

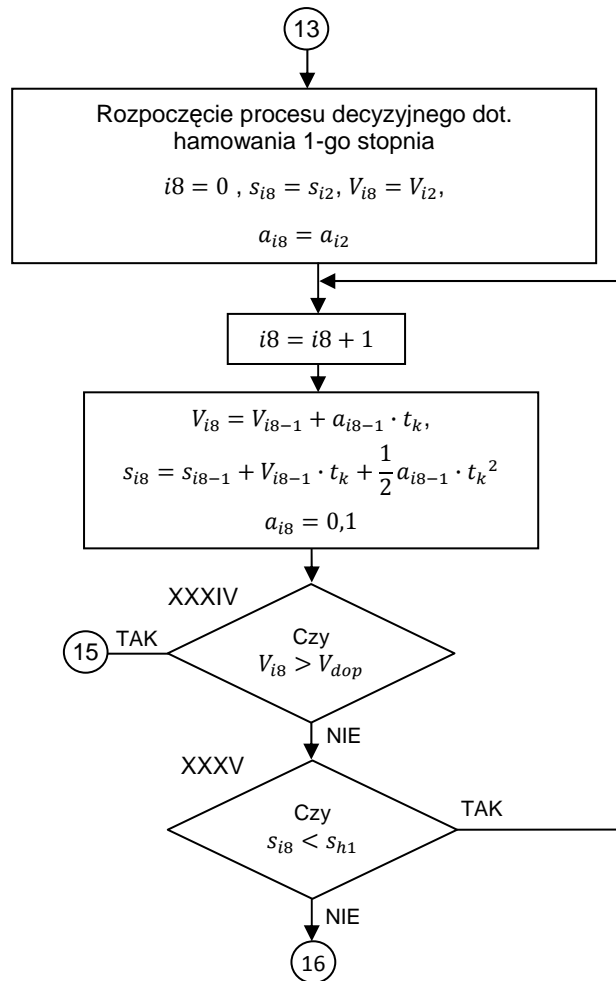
Na rys. 6.8 przedstawiono proces decyzyjny dotyczący wdrożenia hamowania 2-go stopnia.



Rys. 6.8 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. wdrożenia hamowania 2-go stopnia

Jak wspomniano hamowanie musi być poprzedzone jazdą wybiegiem przez okres czasu t_{jw} (blok XXX). W proces decyzyjnym dotyczący wdrożenia hamowania 2-go stopnia danymi wejściowymi są dane z części obliczeniowej algorytmu (blok XXXI). Warunkiem wdrożenia hamowania 2-go stopnia (łącznik stronicowy 12) jest osiągnięcie wartości prędkości V_{i7} wartości większej niż prędkość dopuszczalna V_{dop} (blok XXXII). Opisany proces decyzyjny jest zakończony w przypadku spełnienia warunku, dla którego prędkość V_{i7} osiągnie wartość 0

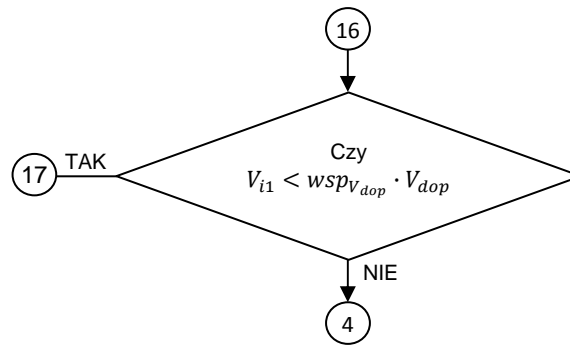
(blok XXXIII). Ten sam warunek rozpoczyna następną proces decyzyjny związany z wdrożeniem hamowania 2-go stopnia (rys. 6.9)



Rys. 6.9 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. wdrożenia hamowania 1-go stopnia

Hamowanie 1-go stopnia (łącznik stronicowy 15) realizowane jest po spełnieniu warunku, gdy wartość prędkości V_{i_8} osiągnie wartość większą od prędkości dopuszczalnej V_{dop} . Proces decyzyjny jest przerywany gdy dystans przebyty w trakcie hamowania 1-go stopnia hamowania s_{i_4} przekroczy wartość graniczną dystansu hamowania s_{i_1} .

Kolejną czynnością poddawaną procesowi decyzyjnemu jest rozpoczęcie jazdy pod obciążeniem (rys. 6.10).

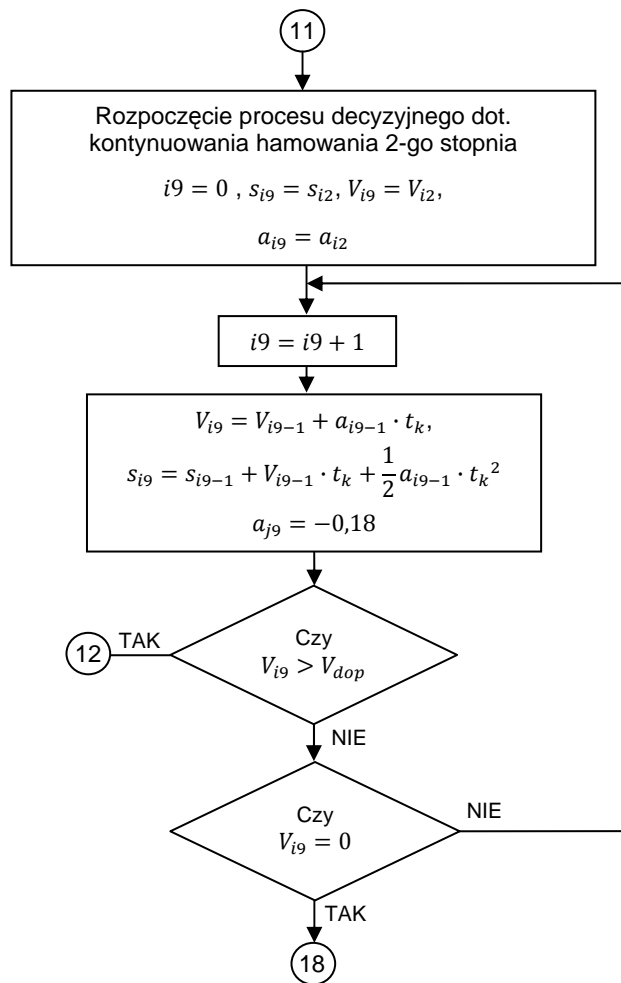


Rys. 6.10 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. rozpoczęcia jazdy pod obciążeniem

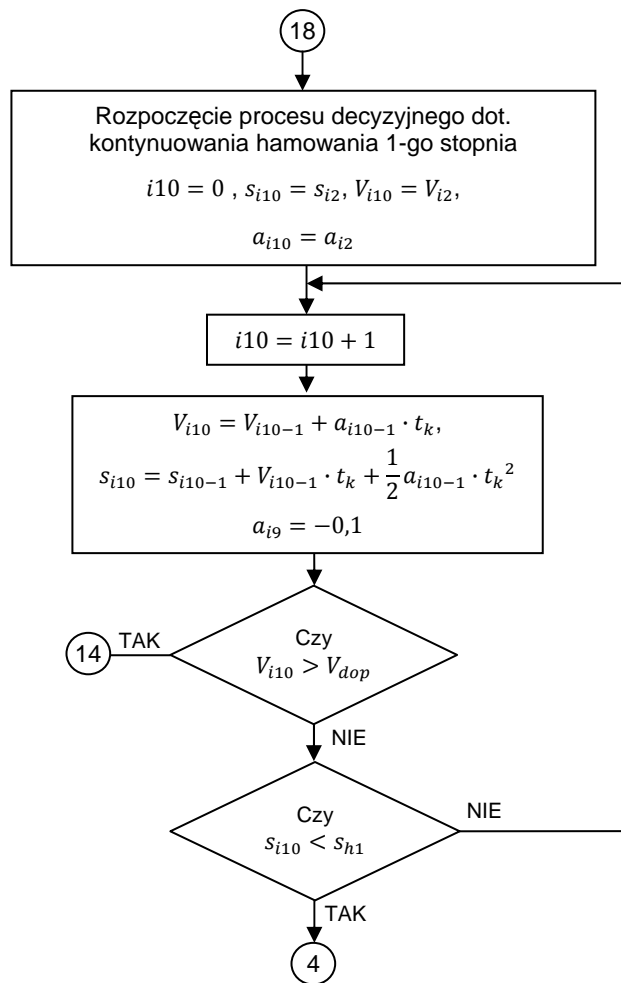
Jazdę pod obciążeniem należy rozpocząć w przypadku gdy prędkość jazdy pociągu osiągnie wartość poniżej prędkości minimalnej wyrażonej iloczynem $wsp_{V_{dop}}$ i prędkości dopuszczalnej V_{dop} . Wartość współczynnika jest dobrana w sposób maksymalnie wydłużający czas jazdy wybiegiem. Należy jednak pamiętać, że wartość ta nie może powodować zbyt dużego obniżenia prędkości średniej, gdyż powoduje to ryzyko nie dotrzymania czasów przejazdu, ustalonego przez rozkład jazdy.

W przypadku gdy brak jest konieczności rozpoczynania jazdy pod obciążeniem kontynuowana jest jazda wybiegiem (łącznik stronicowy 4).

Na rysunkach 6.11 i 6.12 przedstawiono część decyzyjną algorytmu związaną z dalszym kontynuowaniem hamowania. Ponieważ procesy decyzyjne dotyczące hamowania są analogiczne jak w przypadku wdrażania hamowania.



Rys. 6.11 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. kontynuowania hamowania 2-go stopnia



Rys. 6.12 Część decyzyjna algorytmu opisującego pracę lokomotywy – proces decyzyjny dot. kontynuowania hamowania 1-go stopnia

7. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU NAPĘDOWEGO LOKOMOTYWY

7.1. Informacje wstępne

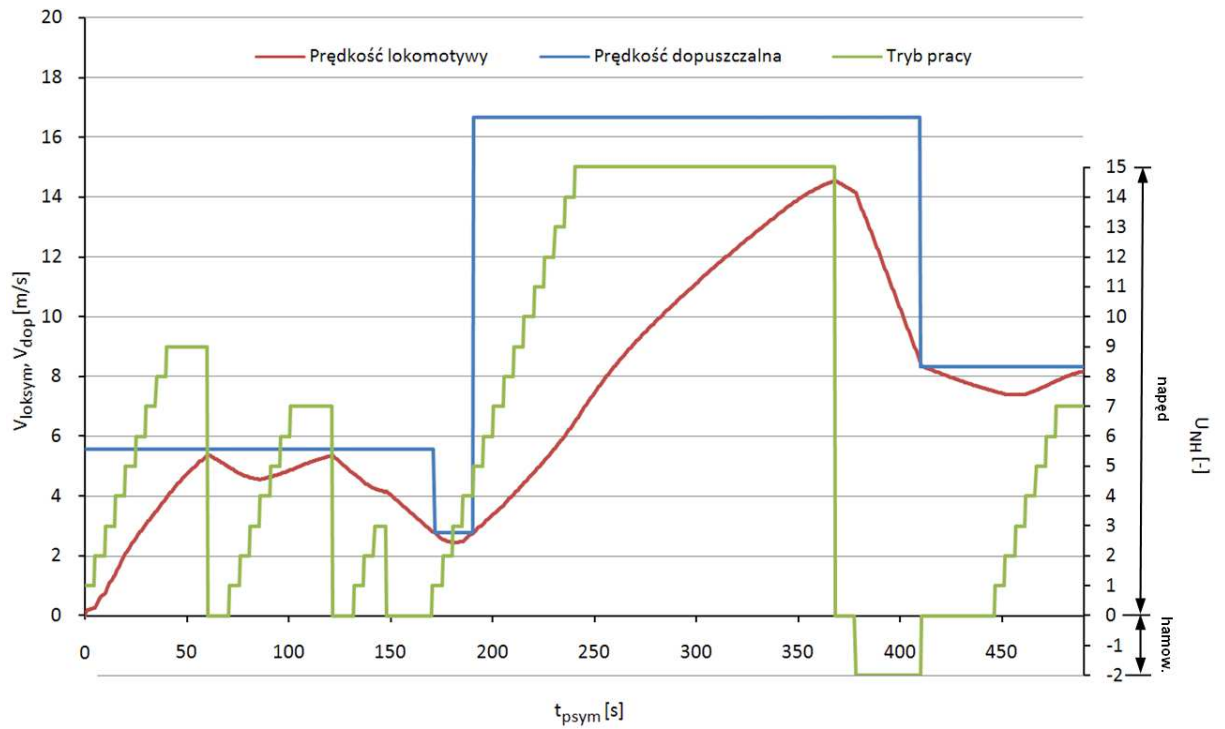
Przedstawiony w rozdz. 6 model automaszynisty został wykorzystany do stworzenia programu do badań symulacyjnych pracy lokomotywy. Program został napisany w języku Visual Basic for Applications, przez co możliwe jest przeprowadzanie symulacji jazdy na każdym komputerze, posiadającym program Excel. Ponieważ wyniki symulacji prezentowane są bezpośrednio w arkuszu kalkulacyjnym, możliwa jest ich dalsza obróbka, polegająca na tworzeniu raportów w formie zestawień i wykresów, podsumowujących analizowany przejazd.

7.2. Wyniki symulacji

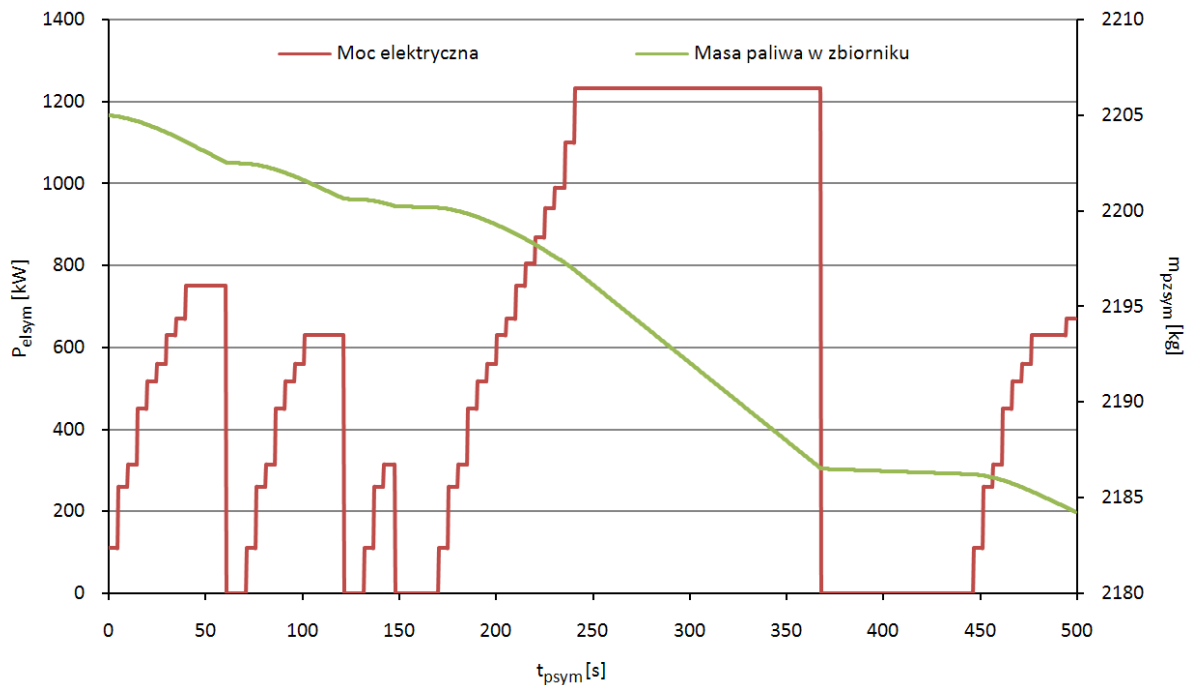
Wyniki symulacji prezentowane są w formie zbioru wyników jazdy dla każdego kroku obliczeniowego. Zbiór wyników zawiera następujące parametry:

- przyrost czasu, nazywanym również czasem pracy t_{prac} , (0,5 s dla każdego korku obliczeniowego),
- tryb pracy lokomotywy U_{NH} , prezentowanego w przypadku lokomotywy serii ST44 w formie liczb całkowitych, zawierających się w przedziale $\langle -2, 15 \rangle$ (rozdz. 6.1),
- prędkość lokomotywy V_{sym} ,
- prędkość dopuszczalna V_{dop} ,
- przebyty podczas analizowanej pracy dystans s_{sym} ,
- pikietaż s_{piksym} ,
- moc elektryczna zmierzona na zaciskach prądnicy głównej P_{elsym} ,
- masa paliwa w zbiorniku lokomotywy m_{pzsym} .

Na rys 7.1 i 7.2 przedstawiono przykładowy przebieg parametrów jazdy w funkcji czasu, uzyskanych podczas symulacji pracy lokomotywy, prowadzącej pociąg o masie 1123 t i długości 397 m.



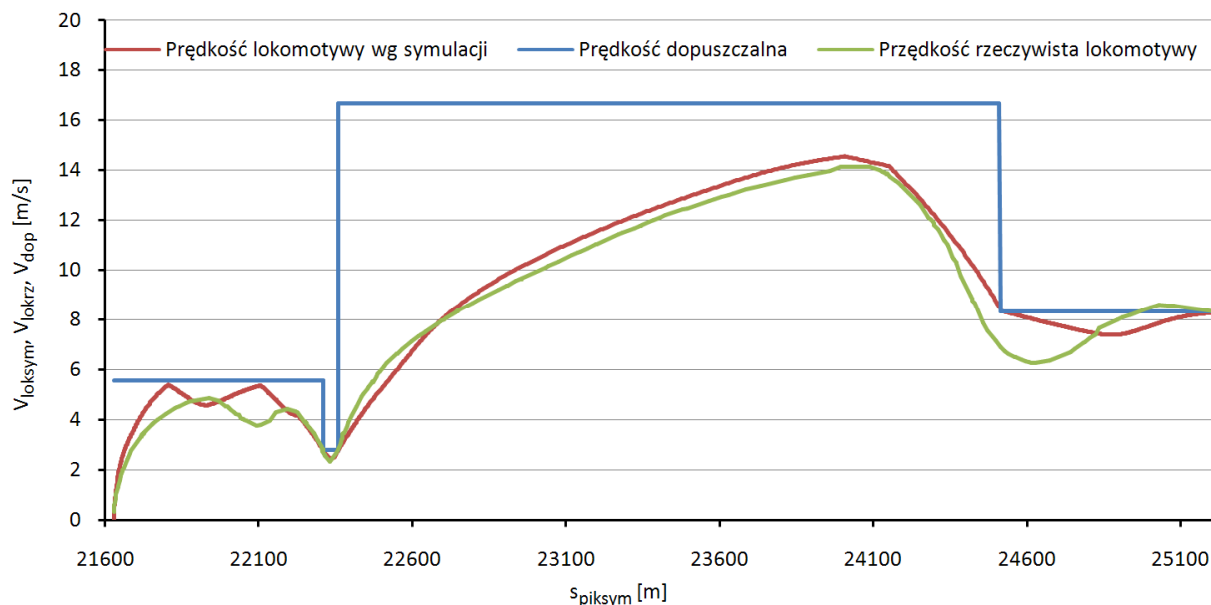
Rys 7.1. Przebieg prędkości lokomotywy, prędkości dopuszczalnej i trybu pracy w funkcji czasu



Rys 7.2. Przebieg mocy elektrycznej i masą paliwa w zbiorniku

Należy zaznaczyć, że w wielu przypadkach korzystniejsze jest przedstawienie wyników symulacji w funkcji przebytej drogi lub pikietażu. Przykładowo w procesie oceny pracy maszynisty, porównanie rzeczywistych parametrów jazdy pociągu i decyzji maszynisty

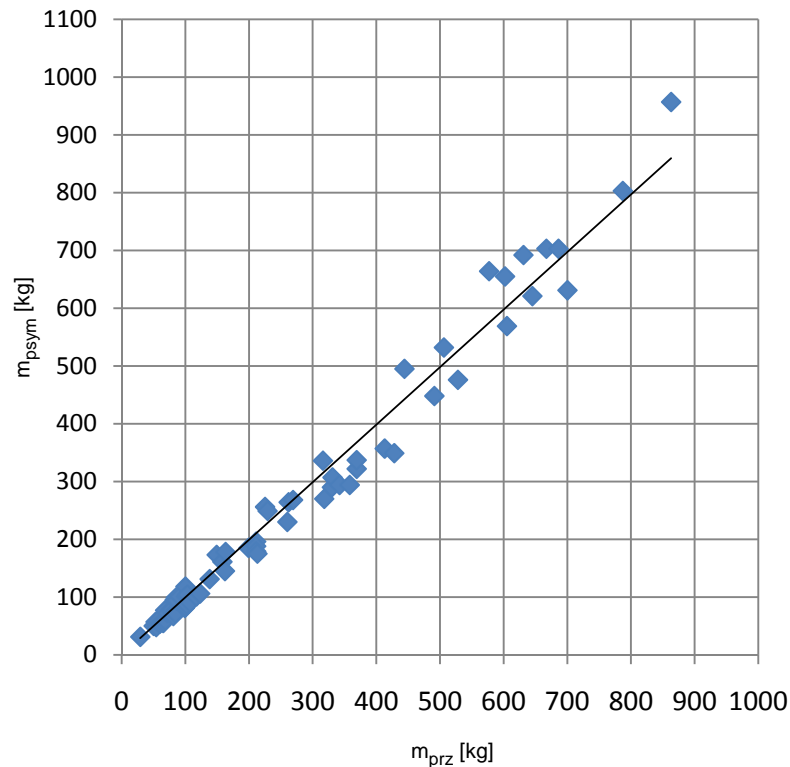
z wynikami uzyskanymi podczas symulacji jest możliwe jedynie w odniesieniu do punktu na linii kolejowej. Na rys. 7.3 przedstawiono porównanie prędkości rzeczywistej z prędkością, będącą wynikiem symulacji.



Rys 7.3. Porównanie prędkości symulowanej z prędkością rzeczywistą

7.3. Weryfikacja modelu automaszynisty

Weryfikację modelu automaszynisty przeprowadzono na podstawie porównania masy paliwa określonego za pomocą badań symulacyjnych z rzeczywistą masą zużytego paliwa, określoną na podstawie pomiarów przy wykorzystaniu systemu monitoringu parametrów pracy lokomotywy, zarejestrowanych podczas 70 przejazdów. Wynik wspomnianego porównania przedstawiono na rys. 7.4.



Rys 7.4. Porównanie zużycia paliwa rzeczywistego z zużyciem określonym za pomocą symulacji

Uzyskane wyniki (rys. 7.4) pozwalają stwierdzić wysoki stopień zgodności danych rzeczywistych z danymi, uzyskanych za pomocą symulacji wg modelu automaszynisty. Średni błąd kwadratowy odwzorowania rzeczywistej ilości zużytego paliwa obliczono na podstawie zależności:

$$\sigma_{\bar{m}_{prz}} = \frac{\sigma_{m_{prz}}}{\sqrt{n}} \quad (7.1)$$

gdzie:

- $\sigma_{m_{prz}}$ - odchylenie standardowe różnicy rzeczywistej ilości zużytego paliwa i ilości zużytego paliwa wg symulacji [kg],
- n - liczba wykonanych pomiarów [-].

Natomiast do obliczenia błędu względnego posłużono się zależnością:

$$\delta_{m_{prz}} = \frac{\sigma_{\bar{m}_{prz}}}{\bar{m}_{prz}} \quad (7.2)$$

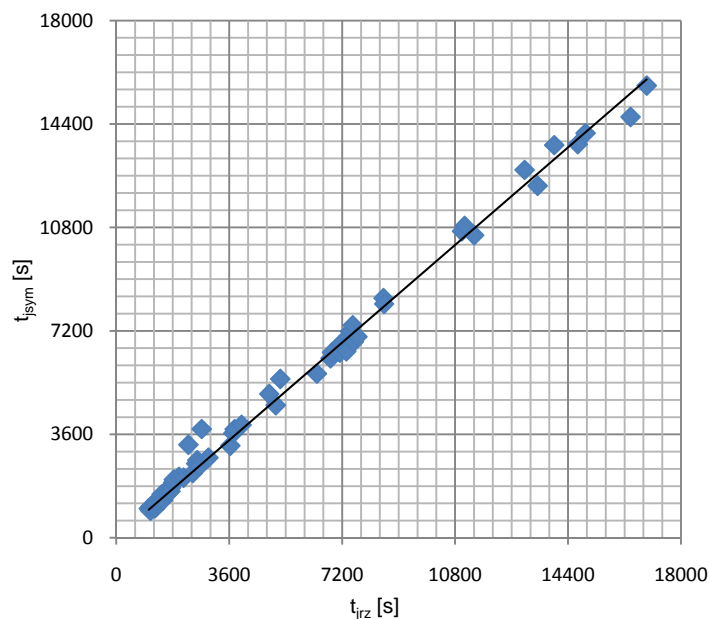
gdzie:

- $\sigma_{\bar{m}_{prz}}$ - średni błąd kwadratowy odwzorowania rzeczywistej ilości zużytego paliwa [kg],
- \bar{m}_{prz} - średnia wartość rzeczywistej ilości zużytego paliwa [kg].

Dla wyników badań symulacyjnych średni błąd kwadratowy odwzorowania rzeczywistej ilości zużytego paliwa wyniósł 2,7 kg, co w odniesieniu do wartości średniej rzeczywistej ilości zużytego paliwa, wynoszącej 260 kg powoduje, że wartość błędu względnego wynosi 1,03%.

Ponieważ prędkość lokomotywy ma istotny wpływ na masę zużytego paliwa, ważne jest, by przebieg symulowanej prędkości był zbliżony z rzeczywistym przebiegiem prędkości określonym za pomocą urządzenia rejestrującego Teloc z jednoczesnym uwzględnieniem modelu zużycia kół. Przy obliczeniach symulacyjnych należało więc uwzględnić prędkości dopuszczalne, obowiązujące stale na danych odcinakach linii kolejowej, jak również ograniczenia prędkości wprowadzane tymczasowo za pomocą odpowiednich wskazań semaforów [75]. Uwzględniono również wszelkie postoje podczas realizowanej pracy.

Na rys. 7.5 przedstawiono porównanie rzeczywistego czasu jazdy (z wyłączeniem postojów) z czasem jazdy, ustalonym podczas badań symulacyjnych.



Rys 7.5. Porównanie rzeczywistego czasu jazdy z czasem ustalonym podczas badań symulacyjnych

Stosując regresję liniową wyznaczono zależność pomiędzy rzeczywistym i symulowanym czasem jazdy:

$$t_{jsym} = 0,943 \cdot t_{jrz} \quad (7.3)$$

gdzie:

t_{jsym} - czas jazdy symulowany [s],

t_{jrz} - czas jazdy rzeczywisty [s].

Z powyższego równania wynika, że istnieje pewien błąd systematyczny, w wyniku którego wartość symulowanego czasu jazdy jest średnio o 5,7% niższa od rzeczywistego czasu jazdy. Powodem tego jest opisany w rozdz. 4.2.6 wpływ zużycia kół na dokładność pomiaru prędkości. Zużycie kół powoduje, że wartość prędkości, którą maszynista odczytuje za pomocą jednostki obrazowania i komunikacji (rys. 4.18) jest zawyżona w stosunku do prędkości rzeczywistej. Ponadto podczas prowadzenia pociągu maszynista realizuje jazdę z prędkością niższą od dopuszczalnej, w celu zminimalizowania ryzyka jej przekroczenia.

8. Podsumowanie i wnioski końcowe

W niniejszej pracy przedstawiono model układu napędowego lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną, opisany za pomocą metody Grafów Wiązań (GW) i Równań Stanu (RS). Metoda Grafów Wiązań i Równań Stanu ze względu na prostotę modyfikacji i możliwość rozbudowania o nowe elementy, umożliwia odwzorowanie pracy lokomotywy spalinowej wyposażonej w dowolny układ napędowy. Przy tworzeniu powyższego modelu wykorzystano charakterystyki poszczególnych urządzeń i podzespołów wchodzących w skład układu napędowego zawarte w literaturze, jak również charakterystyki stworzone na podstawie wyników badań eksploatacyjnych lokomotywy serii ST44. Badania eksploatacyjne były wykonane podczas prowadzenia pociągów towarowych na linii kolejowej 201 na odcinku Bydgoszcz Wschód – Gdynia Port.

W pracy zaprezentowano model automaszynisty, który odwzorowuje procesy decyzyjne podejmowane przez maszynistę podczas prowadzenia pociągu. W modelu automaszynisty położono szczególny nacisk na odwzorowanie specyfiki regulacji mocy układu napędowego lokomotywy spalinowej przez doświadczonych maszynistów.

Weryfikacja jakości modelu wykazała wysoką zgodność wyników badań eksploatacyjnych z wynikami obliczeń przeprowadzonych za pomocą stworzonego przez autora pracy programu symulacyjnego, wykorzystującego model układu napędowego. Błąd względny odwzorowania wyniósł 1,01%.

Efektom końcowym opisanych powyżej prac są następujące wnioski:

1. Opracowane metody pomiarowe umożliwiły kalibrację modelu układu napędowego lokomotywy przy wykorzystaniu charakterystyk elementów energochłonnych układu.
2. Opracowana nowa struktura podziału warunków eksploatacji lokomotywy spalinowej umożliwia w większym stopniu niż dotychczas stosowane struktury odwzorowanie rzeczywistych warunków eksploatacji oraz przeprowadzenie analizy stanów pracy zgodnej z powszechną praktyką w przedsiębiorstwach kolejowych.
3. Model układu napędowego lokomotywy umożliwia przeprowadzenie badań symulacyjnych, w wyniku których otrzymuje się rozkład czasowy poszczególnych stanów eksploatacji. Umożliwia to w pierwszej kolejności prognozowanie i normowanie zużycia paliwa.
4. Model układu napędowego lokomotywy daje możliwość porównywania energochłonności układów napędowych lokomotyw, charakteryzujących się odmiennymi charakterystykami trakcyjnymi i zużycia paliwa. Umożliwia to dobór optymalnego dla danej pracy typu lokomotywy.
5. Model układu napędowego lokomotywy umożliwia przeprowadzanie badań symulacyjnych, mających na celu wybór optymalnego, ze względu na zużycie paliwa, układu napędowego dla nowo projektowanych lokomotyw lub lokomotyw poddawanych gruntownej modernizacji.

6. Model automaszynisty lokomotywy może stanowić podstawę „inteligentnego tempomatu”, mającego na celu regulację prędkości z uwzględnieniem masy pociągu, profilu drogi kolejowej oraz oporów ruchu. Regulacja prędkości za pomocą „inteligentnego tempomatu” miałaby głównie na celu ograniczenie ilości energii mechanicznej, traconej podczas hamowania, przez co pozytywnie wpływałaby na ogólny bilans energetyczny pracy lokomotywy.
7. Model automaszynisty lokomotywy może być wykorzystany w procesie tworzenia rozkładu jazdy, w którym dobór czasów przejazdów przez dane odcinki byłby przeprowadzany w sposób maksymalizujący efektywność energetyczną lokomotywy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamczyk M., Smolik M.: *Zawansowania telemetria dla taboru szynowego. Na przykładzie systemu telemetrii i pomiaru zużycia paliwa dla lokomotyw SM42.* Konferencja nowoczesne rozwiązania dla taboru szynowego. Radiokomunikacja kolejowa. Gdańsk 2008.
- [2] APLISENS S.A.: *Dokumentacja techniczno-ruchowa sondy poziomu paliwa typu CS-25.* Warszawa 2009.
- [3] APLISENS S.A.: *Fuel level probe type CS-26/RS/U.* <http://www.english1.aplisens.eu>, data dostępu 25.11.2014.
- [4] Bai Y., Mao B., Zhou F., Ding Y., Dong C.: *Energy-Efficient Driving Strategy for Freight Trains Based on Power Consumption Analysis.* J Transpn Sys Eng& IT, 2009, 9(3), s. 43-50.
- [5] Balcerski A.: *Modele probabilistyczne w teorii projektowania i eksploatacji spalinowych siłowni okrętowych.* Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2007.
- [6] Balcerski A., Kneba Z., Kropiwnicki J., Makowski S.: *The conception of exploitation efficiency of autonomic energy systems of land vehicles and ships.* Combustion Engines R. 48, nr SC2, Mixture Formation, Ignition and Combustion, 2009, s. 70-76.
- [7] Basiewicz T., Rudziński L., Jacyna M.: *Linie kolejowe.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
- [8] Bernardinis A., Butterbach S., Lallemand R., Jeunesse A., Coquery G., Aubin P.: *Double resonant isolated converter for battery charger with fast switching semiconductors used in hybrid electric shunting locomotive.* Electric Power Systems Research, 2012, 92, s. 43–49.
- [9] Boguś P., Grzeszczyk R.: *Wykrywanie i detekcja stanu pojazdu szynowego z użyciem GPS oraz innych pokładowych urządzeń rejestrujących.* Pojazdy Szynowe 2010, 2, s. 13-23.
- [10] Bosch Informator Techniczny: *Adaptacyjna regulacja prędkości jazdy ACC.* WKiŁ, Warszawa 2005.
- [11] Cichy M. i In. *Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej nt.: Zastosowanie numerycznych metod modelowania, symulacji i optymalizacji do sterowania systemem robocza-silnik.* Politechnika Gdańska, Gdańsk 1987.
- [12] Cichy M.: *Parametry energetyczne silników spalinowych w konwencji Grafów Wiązań.* Materiały konferencji Modes, Gdańsk 2001.
- [13] Cichy M.: *Modelowanie systemów energetycznych.* Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
- [14] Ćwikła M., Terczyński P.: *Lokomotywy spalinowe produkcji HCP serii: SP45, SU46, SP47.* Kolpress, Poznań 2004.
- [15] Czerwiński J., Marciniak Z.: *Modułowe konstrukcje jednokabinowych spalinowych lokomotyw manewrowych.* Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 2013, 98, s. 101-118.
- [16] Destraz B., Barrade P., Rufer A.: *Power Assistance for Diesel-Electric Locomotives with Supercapacitive Energy Storage.* The 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004, s. 677-682.
- [17] Ding Y., Bai. Y., Zhou F., Mao B.: *Energy-efficient freight train operation guide system for diesel locomotives.* Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI), 2011 IEEE International Conference, 2011, Beijing, China

- [18] Domański E., Ożóg Z.: *Lokomotywy spalinowe serii ST44*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1984.
- [19] ELTE GPS Sp. z o.o., <http://www.eltegps.pl>, data dostępu 04.05.2013.
- [20] ENTE Sp. z o.o. METRONIX: *System monitorowania zużycia paliwa i wspierania procesów logistycznych przewoźnika kolejowego*. Konferencja nowoczesne rozwiązania dla taboru szynowego. Radiokomunikacja kolejowa, Gdańsk 2008.
- [21] Erd A., Pęsik W., Rzepiejewski H., Sikorski J., Tomczykowski S.: *Stacja diagnostyczna lokomotyw spalinowych w Zakładzie Taboru w Warszawie*. Technika Transportu Szynowego 2000, 10, s. 49-56.
- [22] Fröberg A., Nielsen L.: *Efficient Drive Cycle Simulation*. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, 2008, 57(3), s. 1442-1453.
- [23] Gautam A, Agarwal AK. *Determination of important biodiesel properties based on fuel temperature correlations for application in a locomotive engine*. Fuel, 2015, 142, s. 289–302.
- [24] Gąsowski W.: *Aerodynamika Pociągu*. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Pojazdów Szynowych, Poznań 1998.
- [25] Golovitcher I.M.: *Energy efficient control of rail vehicles*. Systems, Man, and Cybernetics, 2001 IEEE International Conference, 2011, Tucson Az, USA, s. 658 – 663 vol. 1.
- [26] Gronowicz J., Kasprzak B.: *Lokomotywy spalinowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1989.
- [27] Gronowicz J.: *Energochłonność transport kolejowego*. Trakcja spalinowa. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
- [28] Grzesikiewicz W., Rzepiejewski H.: *Model regulatora kolejowego silnika spalinowego ZS*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport, z. 33, Gliwice 1998, s 77-84.
- [29] Guan T., Frey C.W.: *Model adaptive driver assistance system to increase fuel savings*. 2012 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Istanbul, Turkey, 2012.
- [30] Flickr, www.flickr.com, data dostępu 10.02.2015.
- [31] Fuć P., Merksiz J.: *Konieczność i możliwości oczyszczania spalin silnika o zapłonie samoczynnym*. Pojazdy Szynowe, 1999, 2, s.35-44.
- [32] Fuć P. Merksiz J., Bajerlein M., Lijewski P., Ziółkowski A., Rymaniak Ł., Dobrzyński M.: *Możliwości odzysku energii z gazów wylotowych z nowoczesnych silników spalinowych*. Logistyka, 2014, 3, s. 1829-1835.
- [33] HaslerRail AG.: *Teloc 1500*. <http://www.haslerrail.com>. Data dostępu 06.09.2013.
- [34] HaslerRailAG.: *Speed acquisition*. <http://www.haslerrail.com/>. Data dostępu 06.09.2013.
- [35] Hedrick J., Fritz S., Plunkett K.: *Diesel Particulate Filter Retrofit of a 1500 kW Multi-Engine Genset Locomotive*. ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, Vancouver, Canada 2012.
- [36] Hõimoja H., Roasto I., Kesküla A.: *Design concepts for a hybrid diesel electric shunting locomotive powertrain*. 12th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2010), Estonia 2010, s 293-296.
- [37] International Energy Agency – UIC, *Railway Handbook 2012, Energy Consumption and CO2 Emissions*, Paris, 2012.
- [38] Jacyna M.: *Wybrane zagadnienia modelowania systemów transportowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.

- [39] Jacyna M.: *Modelowanie i ocena systemów transportowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [40] Jacyna M.: *System Logistyczny Polski. Uwarunkowania techniczno-technologiczne ko modalności transportu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
- [41] Janiak M., Krzyżaniak G., *Urządzenia Mechaniczne w inżynierii środowiska*, Część II. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [42] Karnopp D.C., Rosenberg R.C.: *System Dynamic: A Unified Aproch*. Wiley, New York 1975.
- [43] Knorr Bremse AG. Leader Driver Assistant. http://www.knorr-bremse.com/media/documents/railvehicles/en/p_1220_en_01_leader.pdf. Data dostępu 15.12.2014.
- [44] Kortas P., Kropiwnicki J.: *A proposal of a description of the operating conditions of diesel-electric locomotives*. Combustion Engines. 2013, 155(4), s. 56-65.
- [45] Kortas P., Kropiwnicki J.: *Analysis of locomotive engine operating conditions during idling*. Combustion Engines. 2013, 154(3), s. 275-282
- [46] Kortas P.: *Zużycie i reprofilacja kół pojazdów kolejowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport, 2013, 79, s. 61-69.
- [47] Kortas P., Kropiwnicki J.: *Możliwości redukcji przebiegowego zużycia paliwa przy zastosowaniu elektronicznych systemów wspomagających kierowców*. Combustion Engines /Silniki Spalinowe, 2013, 3, s. 250-256.
- [48] Kortas P.: *Methods of Determination of the Fuel Consumption of the Locomotive Diesel-electric Propulsion System for Regular Operating Conditions*. Progress in Mechanical Engineering and Technology Key Engineering Materials 2014, 597, s. 76-86.
- [49] Kowalik L., Chmielewski W., Szastok A.: *Wykorzystanie systemu Metronix do pomiaru zużycia paliwa oraz detekcji pozaeksploatacyjnych ubytków paliwa w lokomotywach spalinowych*. Technika Transportu Szybowego, 2008, 9, s 43-47.
- [50] Kropiwnicki J.: *Ocena efektywności energetycznej pojazdów samochodowych z silnikami spalinowymi*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011
- [51] Kwaśnikowski J.: *Elementy teorii ruchu i racjonalizacja prowadzenia pociągu*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2013.
- [52] Kwaśnikowski J.: *Modelowanie i symulacja komputerowa procesu ruchu pociągu*, Rozprawa habilitacyjna, Rozprawy Politechniki Poznańskiej nr 264, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1992.
- [53] Lange, B.: *Die neue Multi-Engine-Lokomotive für den Regional- und Güterverkehr der DB AG*. In: ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 2011, 9, 24–27.
- [54] Lindgreen E., Sorenson S.C.: *Driving resistance from railroad train*. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark 2005.
- [55] Lu S., Hillmansen S., Ho T. K., Roberts C.: *Single-Train Trajectory Optimization*. IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, 2013, 14(2), 743-750.
- [56] Lukaszewicz, P.: *Driving techniques and strategies for freight trains*. Computers in Railways VII: Seventh International Conference on Computers in Railways, 2000, Bologna, Italy.
- [57] Lukaszewicz P.: *Energy Consumption and Running Time for Trains*, KTH Stockholm, Dissertation, 2001.
- [58] Madej J.: *Mechanika transmisji momentu trakcyjnego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.

- [59] Madej J.: *Teoria ruchu pojazdów szynowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [60] Marczewski R., Podemski J.: *Wózki wagonowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
- [61] Merkisz J., Mazurek S., Pielecha J.: *Pokładowe urządzenia rejestrujące w samochodach*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.
- [62] Merkisz J., Fuć P., Lijewski P.: *Diesel particulate filters regeneration*. Logistyka, 2009, 50(3).
- [63] Merkisz J., Pielecha J., Przybyła T., Kamiński T., Sosnowski R.: *The remote monitoring and diagnostics of the combustion engines using the OBD II/EODB technology*. Combustion Engines, 2009-SC1, Powertrain, Design, Ecology&Diagnostics, 2009, s. 54-61.
- [64] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski S.: *New Trends in Emission Control in the European Union*. Springer Tracts on Transportation and Traffic, 2013.
- [65] Michnej M., Szkoła M.: *Współczesne rozwiązania hybrydowych układów napędowych spalinowych pojazdów trakcyjnych*. Technika Transportu Szynowego 2007, 10, s. 38-40.
- [66] Mohsin R., Majid Z.A., Shihnan A.H., Nasri N.S., Sharer Z.: *Effect of biodiesel blends on engine performance and exhaust emission for diesel dual fuel engine*. Energy Conversion and Management, 2014, 88, s. 821–828.
- [67] NewagGrup, <http://www.newag.pl>. data dostępu 10.02.2015.
- [68] Ochędruzko. K.: *Koła zębate, tom 1*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
- [69] Ogawa T., Kanno H., Soeda T., Sugiyama Y.: *Environmental evaluation of a diesel hybrid shunting locomotive*. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2012, s. 1-6.
- [70] Orofino L., Cilimingras L., Morello E.: *Ecodrivo: Driver behavior evaluation system to reduce CO2 emissions*. FISITA 2010 World Automotive Congress, Budapest 2010, F2010-E-052.
- [71] Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz S.A.: *Dokumentacja techniczno-ruchowa modernizacji lokomotywy typu M-62*. Bydgoszcz 2011.
- [72] PKP Cargo S.A.: *Instrukcja o gospodarce pojazdami i drużynami trakcyjnymi Ct-9*. Warszawa 2008.
- [73] PKP Cargo S.A.: *Ct14 - Instrukcja o zasadach gospodarki paliwowej*. Warszawa 2012.
- [74] PKP Intercity S.A.: *Instrukcja pomiarów i oceny technicznej zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych Bt-11*. Warszawa 2010.
- [75] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.: *le-1 – Instrukcja sygnalizacji*. Warszawa 2007.
- [76] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.: *le-4 – Wytyczne techniczne budowy urządzeń sterowania ruchem kolejowym*. Warszawa 2014.
- [77] RAIL TECH PAPLA Sp. z o.o.: *Jednostka obrazowania i komunikacji A 302H – Dokumentacja Techniczno-Ruchowa*. Bielsko Biała 2011.
- [78] Reducha W.: *Niektóre aspekty gospodarki paliwowej w eksploatacji lokomotyw spalinowych*. Technika Transportu Szynowego, 2005, 9, s 55-62.
- [79] Romaniszyn Z.: *Podwozia wózkowe pojazdów szynowych*. Wydawnictwo Instytutu Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010.
- [80] Rzepiejewski H.: *Diagnostyka agregatów prądotwórczych – zużycie paliwa i właściwości trakcyjne lokomotyw spalinowych*. Technika Transportu Szynowego, 2005, 9, s 63-68.

- [81] Schimke, R.: *Optimierung des Betriebsverhaltens und der Konfiguration von dieselelektrischen Lokomotiven*. Jörg Vogt Verlag, Dresden 2013.
- [82] Schäffner G., Rusch K., Chatterjee D., Zitzler G.: *Diesel Particulate Filter: Exhaust aftertreatment for the reduction of soot emissions*. Materiały informacyjne MTU Friedrichshafen GmbH, <http://www.mtu-online.com>, data dostępu 20.12.2014.
- [83] Sicre C., Cucala P., Fernández A., Jiménez J. A., Ribera I., Serrano A.: *A method to optimise train energy consumption combining manual energy efficient driving and scheduling*. Computers in Railways XII: Twelfth International Conference on Computer System Design and Operation in Railways and Other Transit Systems, Beijing, China, 2010.
- [84] Voith Ag: *Waste heat recuperation*. Berger-athi, 09.01.2008.
- [85] Voith AG, www.voith.pl, data dostępu 10.02.2015.
- [86] Wellstead P.E.: *Introduction to System Modeling*. Academic Press, London, UK, 1979.
- [87] Wianek E., Wszyński R.: *Sprężarki i wentylatory*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1982.
- [88] Wikipedia, <http://www.pl.wikipedia.org>, data dostępu 10.02.2015.
- [89] Yin J., Chen D.: *An intelligent train operation algorithm via gradient descent method and driver's experience*. Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2013 IEEE International Conference, 2013, Beijing, China, s. 54 – 59.
- [90] ZEPWN Jerzy Czerwiński i wspólnicy – Spółka Jawna: *Wybrane zagadnienia związane z cechami metrologicznymi systemu kontroli zużycia paliwa*. Technika Transportu Szybowego, 2005, 9, s. 32-35.
- [91] ZEPWN Jerzy Czerwiński i wspólnicy – Spółka Jawna: *System CL400 do kontroli zużycia paliwa w lokomotywach spalinowych z przekładnią elektryczną*. <http://www.zepwn.com.pl>, data dostępu 05.07.2012.
- [92] Zhang Y., Wu Y., Xia G., Ma C., Ji W., Liu W., Yang K., Yang F.: *Development and experimental study on organic Rankine cycle system with single-screw expander for waste heat recovery from exhaust of diesel engine*. Energy 2014, 77, s. 499-508.
- [93] Zhu X., Changchun Li C., Xu Z., and Li J.: *Study on Modeling Simulation of Locomotive Dynamics for Urban Rail Transit*. Proceedings of 2011 International Conference on Modelling, Identification and Control, 2011, Shanghai, China.