



**Politechnika Poznańska**  
**Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu**



*mgr inż. Piotr Michalak*

# **Metoda doboru zespołu silnikowo-prądnicowego w celu modernizacji lokomotyw spalinowych**

**Rozprawa doktorska**

Promotor  
prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz

Promotor pomocniczy  
dr n. tech. Włodzimierz Stawecki, prof. nadzw.

**Poznań 2021**

## Spis treści

<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>4</b>
<b>SKRÓTY I OZNACZENIA .....</b>	<b>5</b>
<b>1. WPROWADZENIE .....</b>	<b>7</b>
<b>2. LOKOMOTYWY SPALINOWE W TRAKCJI SZYNOWEJ .....</b>	<b>10</b>
<b>3. DOTYCHCZASOWA METODYKA MODERNIZACJI LOKOMOTYW .....</b>	<b>15</b>
3.1. Wprowadzenie .....	15
3.2. Modernizacje lokomotyw typu ST44.....	17
3.2.1. Modernizacja lokomotywy ST44 (M62) – PESA-Cargo .....	17
3.2.2. Modernizacja lokomotywy ST44 – NEWAG .....	19
3.3. Modernizacje lokomotywy SM48 (TEM2).....	21
3.3.1. Modernizacja lokomotywy TEM2 – OLPP .....	21
3.3.2. Modernizacja lokomotywy spalinowej TEM2 (SM 48) – NEWAG .....	22
<b>4. CEL I ZAKRES PRACY .....</b>	<b>24</b>
<b>5. WSPÓLAUTORSKIE MODERNIZACJE LOKOMOTYW SPALINOWYCH.....</b>	<b>26</b>
5.1. Modernizacja lokomotyw ST44 – LHS .....	26
5.2. Modernizacja lokomotyw serii SM48 (TEM2) – Pol-Miedź Trans.....	32
<b>6. AUTORSKA METODA DOBORU ZESPOŁU SILNIKOWO-PRĄDNICOWEGO 37</b>	<b>37</b>
6.1. Wybór lokomotywy do doboru zespołu silnikowo-prądnicowego .....	37
6.2. Założenia metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego modernizowanych lokomotyw spalinowych .....	40
6.3. Opracowanie szczegółowych założeń projektu .....	42
6.4. Określenie wymagań normatywnych podczas homologacji modernizowanej lokomotywy .....	44
6.5. Analiza bilansu mocy modernizowanej lokomotywy spalinowej.....	47
6.6. Wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych lokomotywy.....	49
6.7. Analiza układów oczyszczania spalin.....	55
6.8. Opracowanie zintegrowanego sterownika silnika i prądnicy .....	60
6.9. Analiza zabudowy mechanicznej zespołu.....	65
6.10. Analizy symulacyjne zespołu.....	66
<b>7. PRZYKŁAD AUTORSKIEJ MODERNIZACJI LOKOMOTYWY.....</b>	<b>76</b>
7.1. Opis lokomotywy .....	76
7.2. Zespół silnikowo-prądnicowy .....	81
7.3. Układ paliwowy .....	84
7.4. Układy chłodzenia i podgrzewania wstępnego silnika spalinowego .....	85
7.5. Modernizacja ostoi lokomotywy i wózków trakcyjnych .....	88
7.6. Kabina maszynisty .....	90
7.7. Układy elektryczne lokomotywy .....	94
<b>8. BADANIA ZMODERNIZOWANEJ LOKOMOTYWY .....</b>	<b>99</b>
8.1. Analizy trakcyjne modernizowanej lokomotywy .....	99
8.2. Analiza emisji substancji szkodliwych silnika spalinowego .....	112

---

<b>9. WNIOSKI.....</b>	<b>117</b>
9.1. Wnioski ogólne .....	117
9.2. Wnioski metodyczne.....	117
9.3. Wnioski szczegółowe.....	118
9.4. Wnioski prognostyczne.....	118
<b>LITERATURA .....</b>	<b>119</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>126</b>

## STRESZCZENIE

W Polsce znaczną część przewozów towarowych, szczególnie prac manewrowych, realizowanych jest pociągami obsługiwanymi przez lokomotywy spalinowe, które stanowią około 60% lokomotyw eksploatowanych w kraju. Lokomotywy spalinowe eksploatowane przez przewoźników krajowych to zazwyczaj pojazdy dość wyeksploatowane, a ich średni wiek wynosi ponad 37 lat. Wymiana przestarzałych lokomotyw na nowoczesne jest w krótkim czasie (kilku lat) nieuzasadniona i ze względów finansowych często niemożliwa. W związku z powyższym pozostaje droga głębokiej modernizacji posiadanych lokomotyw.

Najważniejszymi celami modernizacji spalinowych lokomotyw, stawianymi przez przyszłego użytkownika jest m.in.: zwiększenie mocy układu napędowego, zwiększenie przebiegów eksploatacyjnych między przeglądami i naprawami oraz zwiększenie trwałości i niezawodności lokomotywy, poprawa komfortu pracy obsługi lokomotywy oraz ograniczenie szkodliwego oddziaływania na środowisko naturalne.

Z nakreślonych celów wynikała konieczność opracowania uniwersalnej metody doboru silnika spalinowego i prądnicy trakcyjnej do wykorzystania podczas modernizacji lokomotyw spalinowych niezależnie od ich przeznaczenia.

Celem pracy było opracowanie metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego w celu modernizacji lokomotyw spalinowych na podstawie doświadczenia w realizowanych projektach modernizacji lokomotyw oraz przeprowadzonej analizy dotychczasowych metod.

Opisana w niniejszej pracy nowatorska metoda opiera się na wieloletnim doświadczeniu w modernizacji lokomotyw spalinowych. Dotychczasowe podejście na rynku krajowym polegało na modernizacji lokomotyw przez zastąpienie istniejącego silnika spalinowego nowoczesną jednostką w celu zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne. Należy podkreślić, że często bez zmian pozostawiano przestarzałą technicznie prądnicę trakcyjną. Analizowana w pracy metoda pozwala na precyzyjny dobór nowoczesnego zespołu silnikowo-prądnicowego z prądnicą trakcyjną skonfigurowaną indywidualnie dla dowolnej modernizowanej lokomotywy. W pracy opisano efekt wykorzystania metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego w autorskiej modernizacji lokomotywy SM48/TEM2, która po modernizacji (typ 19D) uzyskała cechy pojazdu nowego. W wyniku zastosowania nowego zespołu napędowego i pełnego wykorzystania mocy silników trakcyjnych, poprawie uległy właściwości trakcyjne lokomotywy. Zauważalny jest także znaczny wzrost siły pociągowej na obwodzie kół napędnych w całym zakresie prędkości jazdy, co potwierdzono badaniami trakcyjnymi zmodernizowanej lokomotywy.

W wyniku zastosowania nowoczesnego silnika spalinowego, spełniającego obowiązujące wymogi dotyczące zanieczyszczenia spalin, znacznemu ograniczeniu uległa emisja szkodliwych substancji do otoczenia, co potwierdziły wyniki badań lokomotywy na oporniku wodnym. Uzyskane wyniki badań wykazały, że opracowana metoda doboru zespołu silnikowo-prądnicowego umożliwia wykonanie modernizacji lokomotywy spalinowej spełniającej najnowsze wymagania normatywne i techniczne.

## SKRÓTY I OZNACZENIA

<b>AC</b>	– Prąd przemienny ( <i>Alternating Current</i> )
<b>AdBlue</b>	– Nazwa handlowa 32,5% wysokiej czystości wodnego roztworu mocznika
<b>B'o B'o</b>	– Dwa niezależne wózki trakcyjne z dwoma indywidualnie napędzanymi zestawami kołowymi każdy, wg karty UIC 650
<b>CA</b>	– Czuwak aktywny
<b>CAN</b>	– Szeregowy magistrala komunikacyjna ( <i>Controller Area Network</i> )
<b>CO</b>	– Tlenek węgla
<b>CO<sub>2</sub></b>	– Dwutlenek węgla
<b>C'o C'o</b>	– Dwa niezależne wózki trakcyjne z trzema indywidualnie napędzanymi zestawami kołowymi każdy, wg karty UIC 650
<b>CRT</b>	– Zintegrowany układ łączący utleniający reaktor katalityczny z filtrem cząstek stałych ( <i>Continuous Regeneration Trap</i> )
<b>DC</b>	– Prąd stały ( <i>Direct Current</i> )
<b>DEF</b>	– Powszechnie znany jako AdBlue ( <i>Diesel Exhaust Fluid</i> )
<b>DPF</b>	– Filtr cząstek stałych ( <i>Diesel Particulate Filter</i> )
<b>DRP</b>	– Zespół reaktora dekompozycyjnego ( <i>Decomposition Reactor Pipe</i> )
<b>ECM</b>	– Sterownik silnika ( <i>Engine Control Module</i> )
<b>ECU</b>	– Sterownik silnika ( <i>Engine Control Unit</i> )
<b>EGR</b>	– Układ recyrkulacji spalin ( <i>Exhaust Gas Recirculation</i> )
<b>GPS</b>	– Światowy system określania współrzędnych ( <i>Global Positioning System</i> )
<b>Gt</b>	– Współczynnik gotowości technicznej
<b>HC</b>	– Węglowodory
<b>HT</b>	– Obieg wysokotemperaturowy ( <i>High Temperature</i> )
<b>IGBT</b>	– Tranzystor bipolarny z izolowaną bramką ( <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> )
<b>LHS</b>	– Linia Hutnicza Szerokotorowa
<b>LT</b>	– Obieg niskotemperaturowy ( <i>Low Temperature</i> )
<b>MES</b>	– Metoda elementów skończonych
<b>miT</b>	– Współczynnik przyczepności kół
<b>MVB</b>	– Magistrala komunikacyjna ( <i>Multiple Vehicle Bus</i> )
<b>N<sub>2</sub></b>	– Azot
<b>NN</b>	– Niskie napięcie
<b>NO<sub>x</sub></b>	– Tlenki azotu
<b>NRSC</b>	– Stacjonarny cykl do badań silników grupy pozadrogowych ( <i>Non-Road Stationary Cycle</i> )
<b>PAU</b>	– Zespół automatyki napędu ( <i>Power Automation Unit</i> )
<b>PKP</b>	– Polskie Koleje Państwowe
<b>PLK</b>	– Polskie Linie Kolejowe
<b>PM</b>	– Cząstki stałe ( <i>Particulate Matter</i> )
<b>RS</b>	– Radio-stop
<b>SCR</b>	– Selektowna redukcja katalityczna ( <i>Selective Catalytic Reduction</i> )
<b>SHP</b>	– Samoczynne hamowanie pociągu
<b>SN</b>	– Średnie napięcie
<b>TSI</b>	– Techniczne specyfikacje interoperacyjności ( <i>Technical Specifications for Interoperability</i> )

- 
- UE** – Unia Europejska
  - UIC** – Międzynarodowy Związek Kolei (*Union Internationale des Chemins de fer*)
  - UPZ** – Układ prędkości zadanej
  - UTK** – Urząd Transportu Kolejowego
  - WE** – Wspólnota Europejska
  - WN** – Wysokie napięcie
  - WTB** – Sieć trakcji wielokrotnej (*Wire Train Bus*)

# 1. WPROWADZENIE

W Polsce znaczną część przewozów towarowych, a szczególnie prac manewrowych, realizowanych jest pociągami obsługiwanymi przez lokomotywy spalinowe. Z danych statystycznych wynika, że około 40% to lokomotywy elektryczne, a około 60% to lokomotywy spalinowe. Lokomotywy spalinowe eksploatowane przez przewoźników krajowych to zazwyczaj pojazdy zaawansowane wiekowo, a ich średni wiek wynosi ponad 37 lat. Wymiana przestarzałych lokomotyw na nowoczesne jest w okresie kilku lat nieuzasadniona a dla większości przewoźników ze względów finansowych niemożliwa. W związku z powyższym pozostaje droga głębokiej modernizacji posiadanych lokomotyw, która jest ekonomicznie najbardziej uzasadniona. Modernizacja lokomotyw spalinowych w Polsce jest realizowana od ponad 20 lat [9, 34] i dotyczy zarówno lokomotyw manewrowych, jak i liniowych.

Najważniejszymi celami modernizacji spalinowych lokomotyw, stawianymi przez przyszłego użytkownika, jest:

- spełnienie wszystkich wymagań obowiązujących norm, przepisów i dyrektyw parlamentu europejskiego,
- zwiększenie mocy od 35% do ponad 100%,
- poprawa efektywności wykorzystania oraz zmniejszenie kosztów utrzymania dzięki wprowadzeniu diagnostyki oraz współpracy z informatycznym systemem wspomagającym zarządzanie eksploatacją i utrzymaniem lokomotyw,
- wydłużenie przebiegów międzyprzeglądowych i międzynaprawczych oraz zmniejszenie pracochłonności poszczególnych czynności przeglądowo-naprawczych,
- poprawa niezawodności lokomotyw i zwiększenie wskaźnika gotowości technicznej oraz zmniejszenie zużycia części i materiałów eksploatacyjnych,
- ograniczenie szkodliwego oddziaływania na środowisko naturalne, w tym zmniejszenie udziału emisji do atmosfery składników toksycznych spalin, takich jak CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM (spełnienie poziomu IIIB, a w przyszłości poziomu V), zmniejszenie wydzielania CO<sub>2</sub> [108].

Analiza efektywności modernizacji spalinowych lokomotyw wykazała, że pełna efektywność ekonomiczna i techniczna zostanie osiągnięta w przypadku modernizacji lokomotyw o wspólnych rozwiązaniach technicznych, jak ostoja i układy biegowe. W takim przypadku zakłada się, że modernizacja dotyczyć powinna wszystkich najważniejszych węzłów i układów, tzn. zmodernizowana lokomotywa powinna charakteryzować się następującymi rozwiązaniami:

- nowoczesnymi silnikami spalinowymi spełniającymi wymagania etapu IIIB lub V (zgodnie z wymogami dyrektywy 2004/26/WE Parlamentu Europejskiego) [23] w zakresie ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i cząstek stałych do atmosfery,
- nowoczesnym zespołem prądnic (główna, pomocnicza, wzbudnica) synchronicznych,
- układem elektrycznym spełniającym wymagania w zakresie zakłóceń i hałasu,
- napędami o zwiększonej mocy pozwalającymi na zwiększenie możliwości przewozowych oraz napędami pomocniczymi z wykorzystaniem silników prądu przemiennego i silników hydraulicznych,
- nowoczesnym układem hamulca w tym hamulca elektrodynamicznego,
- mikroprocesorowym układem sterowania i diagnostyki napędem i całą lokomotywą,
- nowoczesnymi kabinami sterowniczymi z niezależnymi układami pulpitu – fotel, z nowoczesną izolacją akustyczną i termiczną oraz wyłożeniami, wyposażoną w klimatyzator oraz inne urządzenia poprawiające komfort pracy maszynisty,
- zmodernizowanymi wózkami trakcyjnymi w zakresie prowadzenia zestawów kołowych poprawiających oddziaływanie na tor, zwiększeniem trwałości obręczy (w wyniku

wprowadzenia systemów smarowania obrzeży kół) oraz poprawą trwałości silników trakcyjnych,

- nowoczesnymi systemami wykrywania, sygnalizacji i gaszenia ewentualnego pożaru przedziałów maszynowych.

W Polsce najpopularniejszymi lokomotywami spalinowymi przeznaczonymi do modernizacji są:

- lokomotywa spalinowa czteroosiowa typu 6D, serii SM42 ~1040 szt. [112] (w tym zmodernizowane 186 szt.),
- lokomotywa spalinowa sześćoosiowa typu M62, serii ST44 (seria w przemyśle M62) ~257 szt. [112] (w tym zmodernizowane 163 szt.),
- lokomotywa spalinowa sześćoosiowa typu TEM2, serii SM48 (seria w przemyśle TEM2) ~264 szt. [112] (w tym zmodernizowane 87 szt.).

Lokomotywy wymienione powyżej przedstawiono na rys. 1.1–1.3.



Rys. 1.1. Lokomotywa manewrowa serii SM42 [51]



Rys. 1.2. Lokomotywa liniowa serii ST44



Rys. 1.3. Lokomotywa manewrowa serii SM48 [114]



Podczas modernizacji lokomotyw ważnym aspektem jest ekonomia tego procesu, czyli czy modernizacja danej lokomotywy będzie opłacalna? Poniżej postawiono warunek, że modernizacja lokomotyw spalinowych jest opłacalna, gdy:

- koszty jej przeprowadzenia są mniejsze o około 50% od zakupu nowej porównywalnej lokomotywy (podobne parametry techniczne i funkcjonalności),
- zwrot nakładów na modernizację następuje w ciągu 5 lat,
- eksploatacja zmodernizowanej lokomotywy będzie możliwa przez kolejne 25–30 lat,
- parametry trakcyjne, eksploatacyjne oraz ekologiczne są porównywalne z nowymi lokomotywami.

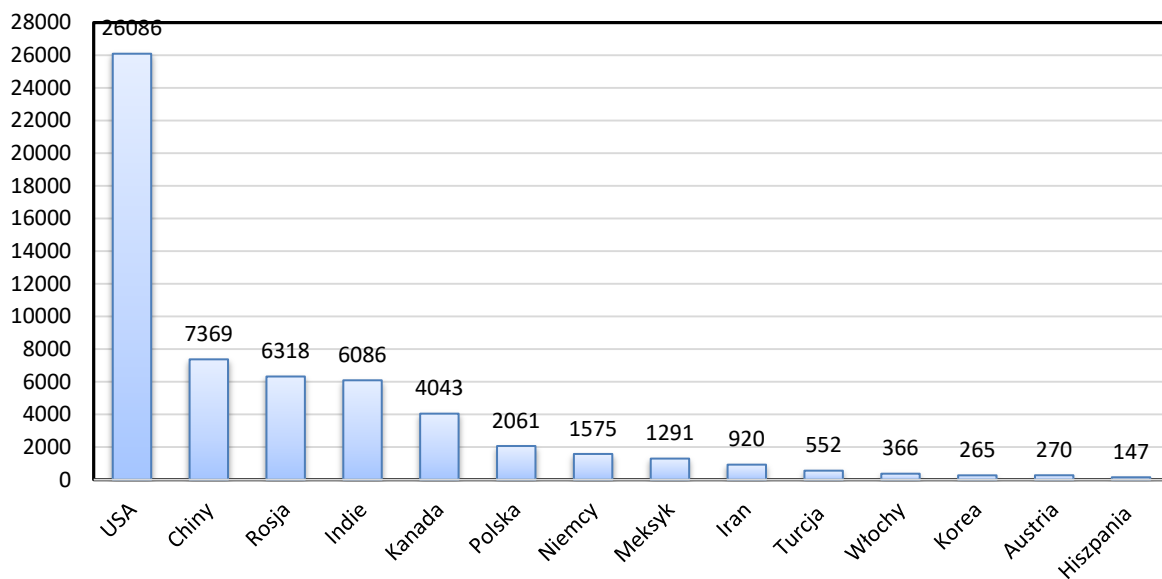
Podsumowując, najważniejszymi korzyściami procesu modernizacji lokomotyw spalinowych są:

- poprawa parametrów techniczno-eksploatacyjnych,
- zwiększenie gotowości do realizacji zadań trakcyjnych,
- zmniejszenie zużycia energii, paliwa i środków smarnych [37, 59],
- zwiększenie komfortu i bezpieczeństwa pracy maszynistów [36],
- zmniejszenie niekorzystnego oddziaływania na środowisko naturalne w zakresie hałasu, drgań i emisji składników toksycznych spalin do atmosfery [11, 106].

Z nakreślonych celów wynika konieczność opracowania uniwersalnej metody doboru silnika spalinowego i prądnicy trakcyjnej, celem jej wykorzystywania podczas modernizacji lokomotyw spalinowych niezależnie od ich przeznaczenia.

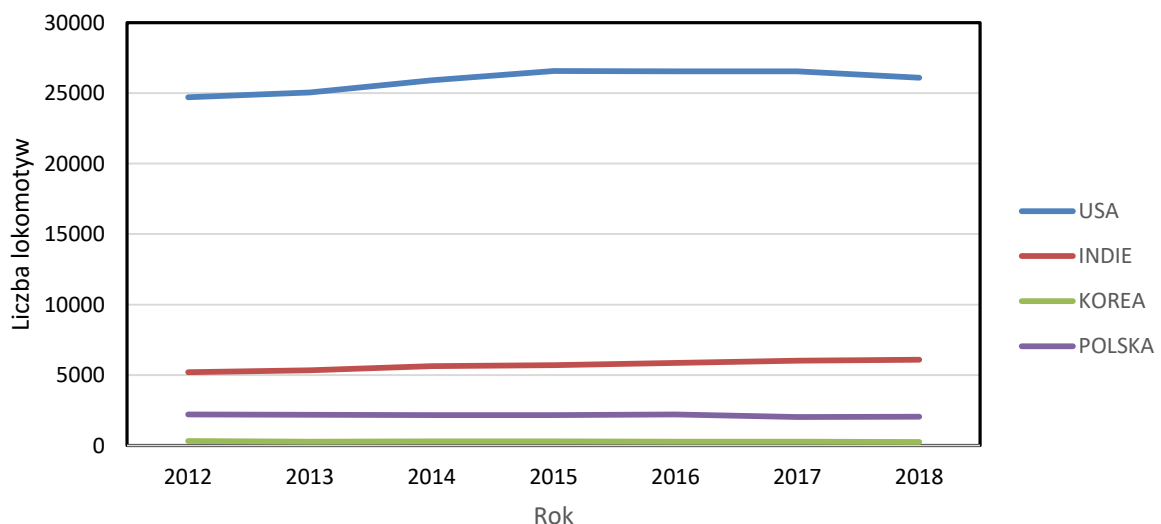
## 2. LOKOMOTYWY SPALINOWE W TRAKCJI SZYNOWEJ

Tabor trakcyjny na świecie jest bardzo zróżnicowany dlatego skupiono się na lokomotywach spalinowych w wybranych krajach. W Europie zauważalne jest ciągle ograniczenie liczby lokomotyw spalinowych eksploatowanych przez przewoźników poszczególnych krajów, mimo ich modernizacji [29, 38]. Wyjątkiem tutaj jest Polska, gdzie udział lokomotyw spalinowych w taborze krajowym jest większy niż elektrycznych, co opisano w dalszej części niniejszego rozdziału. Natomiast w Ameryce Południowej, Północnej i Korei lokomotywy spalinowe stanowią główny tabor operatorów kolejowych. Na rysunku 2.1 przedstawiono liczbę lokomotyw spalinowych według Railisa UIC Statistics [28] w wybranych krajach Europy, Azji i Ameryki.



Rys. 2.1. Liczba lokomotyw spalinowych w wybranych krajach w 2018 r. (opr. własne na podst. [28])

Analizując dane z poszczególnych krajów świata należy zauważyć, że kraje w których główny tabor stanowią lokomotywy spalinowe utrzymują liczbę lokomotyw na określonym poziomie (rys. 2.2), na przykładzie danych z USA, Indii, Korei oraz Polski.



Rys. 2.2. Liczba lokomotyw spalinowych w latach 2012–2018 (opr. własne na podst. [28])

W Polsce także liczba taboru trakcyjnego i wagonowego przewoźników krajowych zmienia się na przestrzeni lat. Lokomotywy elektryczne i spalinowe w największej ilości eksploatowane są przez przewoźników towarowych. Poprawa koniunktury w transporcie towarów wpłynęła również na zmiany w liczbie pojazdów znajdujących się w dyspozycji licencjonowanych przewoźników towarowych. Względem roku 2018 liczba lokomotyw elektrycznych oraz spalinowych zwiększyła się o 149 egzemplarzy w roku 2019. Wraz ze wzrostem liczby eksploatowanego przez przewoźników taboru, średni wiek lokomotyw u przewoźników towarowych na koniec 2019 r. wyniósł 37,7 lat (to o 0,1 roku więcej niż w 2018 r.) W tabeli 2.1 przedstawiono liczbę taboru trakcyjnego i wagonowego w latach 2012–2019.

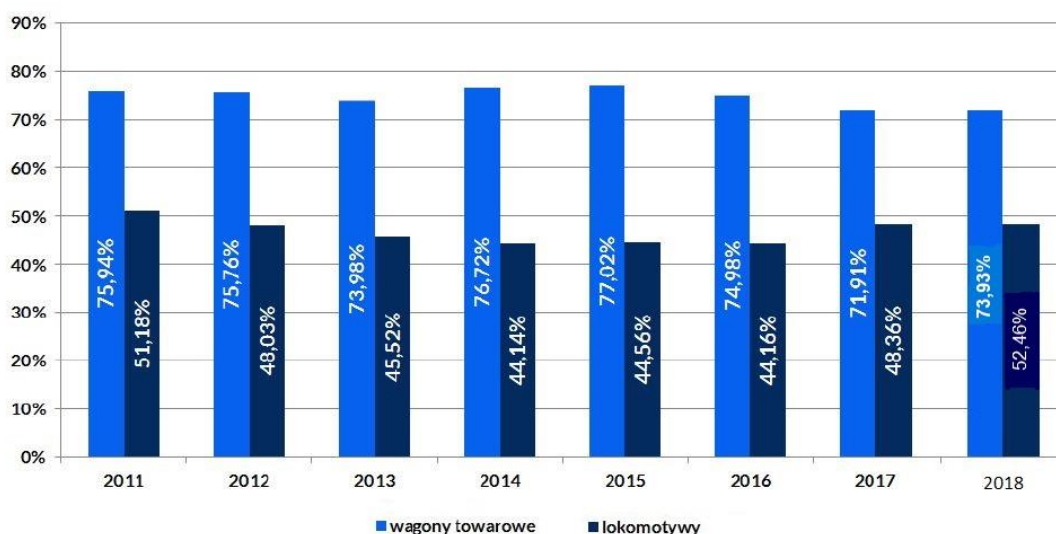
Tabela 2.1. Liczba taboru trakcyjnego i wagonowego przewoźników krajowych [21, 109,110,111]

Rodzaj taboru	Rok							
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Lokomotywy ogółem	3 657	3 686	3 643	3 638	3 733	3 449	3506	3655
Lokomotywy elektryczne 	1 445	1 501	1 478	1 484	1 517	1 419	1445	1509
Lokomotywy spalinowe 	2 212	2 185	2 165	2 154	2 216	2 030	2061	2146
Wagony towarowe ogółem	99133	98117	86629	90906	92338	91129	91349	91154
Kryte 	4659	4493	4160	4100	3976	3897	2075	2065
Węglarki 	60530	60234	59270	59641	61919	59432	61677	61477
Platformy 	11144	11190	11668	11603	11541	12551	12973	13453
Pozostałe 	22800	22200	11531	15562	14902	15249	14624	14159

W 2018 r. po raz kolejny wzrósł współczynnik wykorzystania lokomotyw, uzyskując wartość 52,5% (względem 48,4% w 2017 r.). Natomiast w 2019 r. pomimo znaczącego wzrostu liczby lokomotyw odnotowano nieznaczny spadek współczynnika wykorzystania lokomotyw (o 0,4 p.p.) do wartości 52,1%. Pomimo starzenia się tego rodzaju pojazdów poprawiła się efektywność ich wykorzystania i organizacja pracy. Rozwój towarowych przewozów kolejowych przekłada się na wzrost współczynnika wykorzystania taboru. Potwierdzają to także wyniki związane z liczbą pojazdów trwale lub czasowo wyłączonych z eksploatacji. Według deklaracji przewoźników na 31 grudnia 2018 r., 1238 lokomotyw było trwale lub czasowo wyłączonych z eksploatacji (35% ogółu – spadek o 1,8% względem 2017 r.). Na rysunku 2.3 przedstawiono porównanie wykorzystania lokomotyw oraz wagonów towarowych przez przewoźników towarowych.

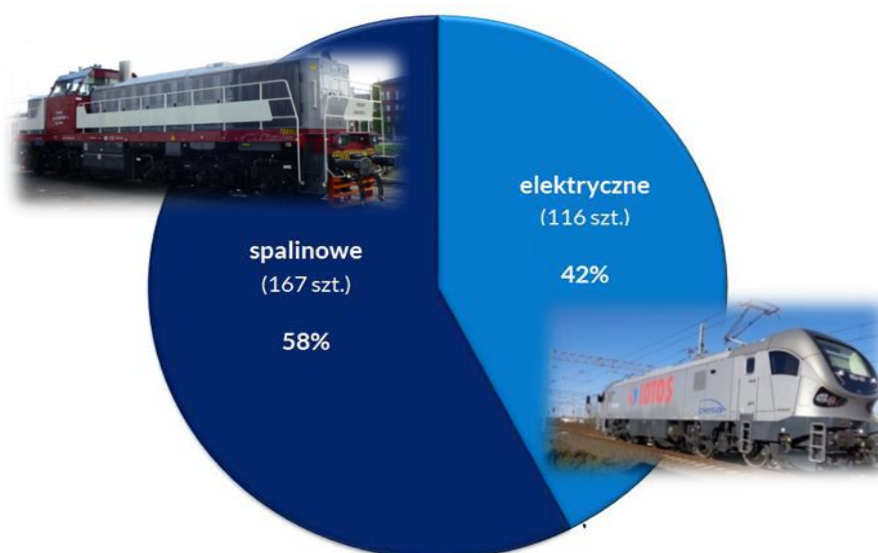
Urząd Transportu Kolejowego przeprowadził ankietę wśród ośmiu przewoźników (PKP Cargo S.A., Lotos Kolej Sp. z o.o., PKP LHS Sp. z o.o., DB Cargo Polska S.A., CTL Logistics Sp. z o.o., ORLEN KolTrans Sp. z o.o., Pol-Miedź Trans Sp. z o.o., PUK Kolprem Sp. z o.o.) dotyczącą planowanych do 2023 r. inwestycji w zakresie taboru trakcyjnego. Sześciu z ośmiu ankietowanych przewoźników planuje inwestycje w lokomotywy elektryczne obejmujące zarówno zakup, jak i inne formy pozyskania lokomotyw (np. leasing, dzierżawa czy od-

nowienie posiadanego taboru). Inwestycje dotyczą 116 lokomotyw elektrycznych. W przypadku trakcji spalinowej, sześciu z ośmiu ankietowanych przewoźników planuje zakup lokomotyw nowych bądź używanych, leasing, dzierżawę lub odnowienie. Inwestycje mają objąć 167 spalinowych lokomotyw za kwotę ok. 930 mln zł.



Rys. 2.3. Porównanie wykorzystania lokomotyw oraz wagonów towarowych przez przewoźników towarowych w latach 2011–2018 [109,110,111]

Biorąc pod uwagę planowany udział inwestycji taborowych wg nakładów na zakup lokomotyw do 2023 r., ankietowani przewoźnicy wykazali przewagę liczby lokomotyw spalinowych względem lokomotyw elektrycznych. Na rysunku 2.4 przedstawiono planowane do 2023 r. inwestycje w lokomotywy spalinowe i elektryczne dla opisanych wyżej przewoźników.



Rys. 2.4. Planowane do 2023 r. inwestycje w lokomotywy spalinowe i elektryczne (przewoźników krajowych) [111]

W Polsce blisko 40% linii kolejowych jest niezelektryfikowanych i zatem lokomotywy spalinowe mają dużo większy udział w taborze trakcyjnym przewoźników niż elektryczne,

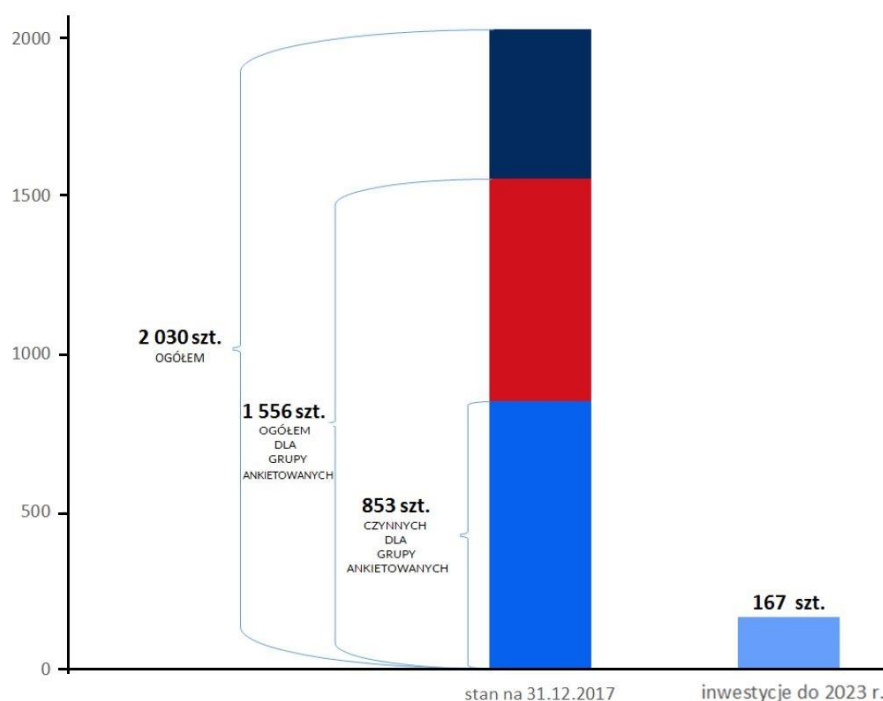
ponieważ zapewniają możliwość transportu towarów na całej sieci kolejowej. Inwestycje w tabor spalinowy powinny mieć na celu zwiększenie rentowności przewozów oraz zmniejszenie emisji szkodliwych dla środowiska spalin.

W przypadku lokomotyw spalinowych, ich odsetek dla ankietowanych w 2018 r. podmiotów w stosunku do liczby ogółem wynosi 77% (1556 szt.). Z tej liczby 853 szt. to lokomotywy nie wyłączone ani czasowo ani trwale z eksploatacji (55%).

Planowane do 2023 r. inwestycje obejmują 167 lokomotyw spalinowych, z czego:

- 99 szt. zostanie odnowione,
- 40 szt. zostanie zakupione jako używane,
- 17 szt. zostanie zmodernizowane,
- 6 szt. zostanie wydzierżawione,
- 5 szt. zostanie zakupione jako nowe.

W mniejszym stopniu niż w przypadku lokomotyw elektrycznych, inwestycje w tabor spalinowy będą opierać się na odnowieniu (w tym przypadku 59% z ogółu lokomotyw spalinowych objętego inwestycjami). 10% lokomotyw zostanie zmodernizowanych, co poprawi ich podstawowe parametry. Zakup lokomotyw nowych to tylko 3% z zaplanowanych inwestycji. Na rysunku 2.5 przedstawiono skalę inwestycji w porównaniu do obecnego ilostanu taboru w zakresie lokomotyw spalinowych.

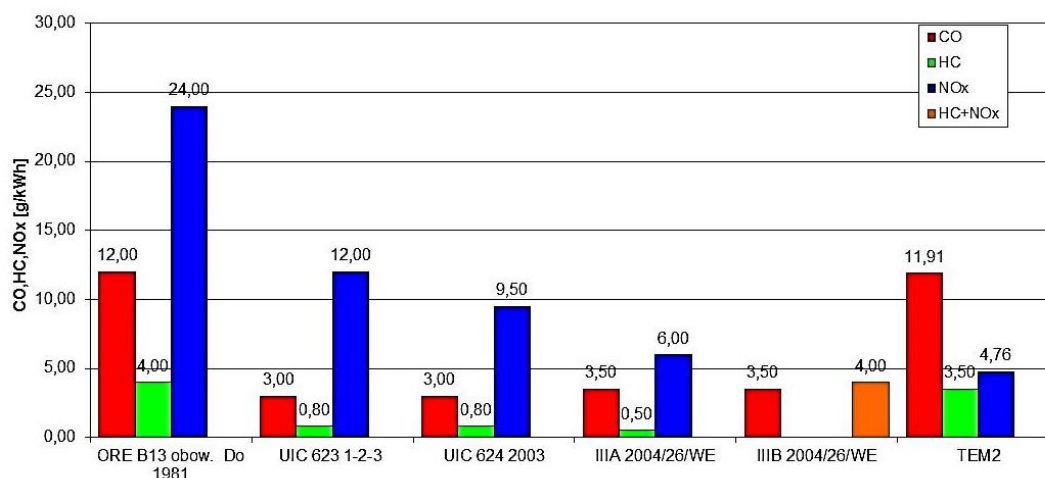


Rys. 2.5. Skala inwestycji w porównaniu do obecnego ilostanu taboru – lokomotywy spalinowe [111]

Wracając do średniego wieku eksploatowanych lokomotyw należy zauważyć, że większość silników spalinowych zabudowanych w pojazdach trakcyjnych lokomotyw eksploatowanych w kraju, nie spełnia wymagań w zakresie emisji składników toksycznych do atmosfery występujących w spalinach.

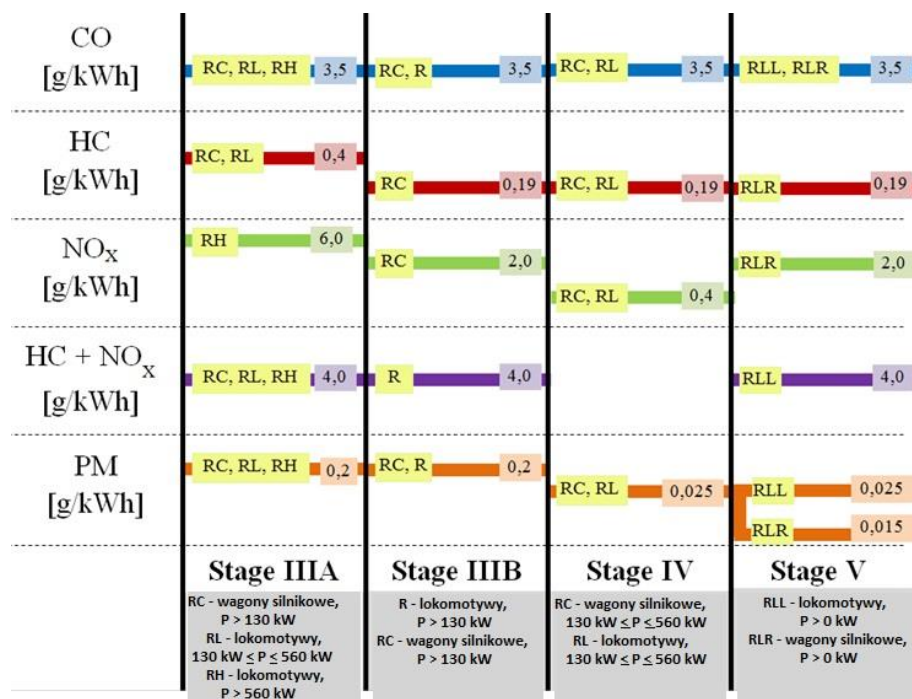
Przykładowy wynik emisji substancji szkodliwych w spalinach dla silnika spalinowego typu PD1M 820 kW zabudowanego w lokomotywie przeznaczonej do modernizacji tj. SM48 (TEM2) przedstawiono na rys. 2.6.

Jak można zauważyć silnik spalinowy typu PD1M lokomotywy SM48 (TEM2) spełnia limity emisji spalin substancji szkodliwych do atmosfery określonych w normie ORE B13 obowiązującej do roku 1981.



Rys. 2.6. Przykładowa emisja spalin dla silnika spalinowego lokomotywy SM48 (TEM2) [12, 15]

Silnik spalinowy (w naszym przypadku ok. 1800 kW) wykorzystywany do modernizacji lokomotywy spalinowej obecnie musi spełniać wymagania w zakresie emisji zanieczyszczeń etap IIIB dyrektywy 2004/26/WE [23], natomiast od roku 2021 wymagane jest spełnienie etapu V wg rozporządzenia (UE) 2016/1628 [96] (wartości emisji dla tych etapów określono na rys. 2.7).



Rys. 2.7. Normy emisji dla lokomotyw spalinowych [24]

W związku z powyższym, celowym wydaje się konieczność szerokiej modernizacji przestarzałego taboru lokomotyw spalinowych przez dobór nowoczesnego zespołu silnikowo-prądnicowego.

### 3. DOTYCHCZASOWA METODYKA MODERNIZACJI LOKOMOTYW

#### 3.1. Wprowadzenie

Wymagania stawiane nowym spalinowym pojazdom trakcyjnym określone obowiązującymi przepisami i normami wymuszają na przewoźnikach konieczność zakupu nowego taboru lub modernizację taboru istniejącego. Zakres modernizacji obecnie produkowanych lokomotyw jest bardzo różny: od polonizacji (doposażenie pojazdu w polskie układy bezpieczeństwa ruchu) przez remotoryzację [41] (wymianę silnika spalinowego) do pełnej modernizacji polegającej na zbudowaniu nowego pojazdu z wykorzystaniem ostoi czy też pudła i układów biegowych. Zestawienie wybranych lokomotyw spalinowych poddanych procesowi polonizacji przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Wykaz wybranych lokomotyw spalinowych (krajowych i zagranicznych) poddanych procesom polonizacji [43]

Lp.	Typ/seria lok.	Przeznaczenie*)	Układ osi	Moc [kW]	Prędkość maks. [km/h]	Typ silnika spal.	Producent
1	M62 M62Y ST44	T	C'o C'o	1470	100	14D40	ŁTZ (ZSRR)
2	LDE2100 ST43	T	C'o C'o	1544	100	12LDA28 12LDA28B	ELEKTROPUTERE (Rumunia)
3	BR231 BR232	T	C'o C'o	1975 2208	100	5D49	ŁTZ (ZSRR)
4	TEM2	T+M	C'o C'o	880	100	PD1M	BMZ/ŁTZ (ZSRR)
5	S200	M	C'o C'o	993	90	K6531DR	CKD (Czechosłowacja)
6	T448P	T+M	B'o B'o	883	70	K6S230DR	CKD (Czechosłowacja)
7	Class 66 J42CWRM	T	C'o C'o	2420	120	EMD 12N- 710G3B-T2	EMD (USA)
8	SM42	T+M	B'o B'o	590	90	a8C22	FABLOK (Polska)
9	401Da	M	C	257	60	12V1416A	FABLOK (Polska)
10	SP45 SU45	P P+T	C'o C'o	1250	120	211SSF	HCP-W3 (Polska)
11	SU46	P+T	C'o C'o	1654	120	W211SSF	HCP-W3 (Polska)

\*) T – ruch towarowy, M – ruch manewrowy, P – ruch pasażerski

Oprócz polonizacji i remotoryzacji w celu uzyskania nowoczesnej i oszczędnej lokomotywy można dokonać jej pełnej modernizacji. W ostatnich latach wykonano szereg takich modernizacji. W tabelach 3.2 oraz 3.3 przedstawiono wykaz wytypowanych zmodernizowanych lokomotyw oraz ich podstawowe parametry po modernizacji.

Tabela 3.2. Parametry techniczne wybranych zmodernizowanych lokomotyw spalinowych (zagranicznych) eksploatowanych w Polsce [40, 43]

Parametr	Typ/seria lokomotyw				
	TEM2/15M	15D/16D	ST44BF/ ST44PC	311D/ 311Da	313D/ ST44
Przeznaczenie*)	T+M	T+M	T	T	T
Układ osi	C'o C'o	C'o C'o	C'o C'o	C'o C'o	C'o C'o
Moc [kW]	1500	1480	2240	2133	2200
Prędkość max [km/h]	100	100	100	100	100
Siła pociągowa max [kN]	232	–	380	392	380
Typ silnika spalinowego	MTU 12V4000R41	CAT 3512C	CAT 3516 HD-SC	GE 7FDL12EFI	MTU 16V4000R74
Typ prądnicy gł. Moc [kW]	GST-F 990x400/8 1438	Ghp 500 L4 1400	LM 1980	GE5GTA11C9 –	SDY95.5- 12/130.04
Typ prąd. pomoc. Moc [kW]	GSTA 650x146/8 99	– 50	LM 100	– –	SDV60.26- 12/130.03.0256
Typ silnika trakt. Moc [kW]	EDA 118AYZ 230	EDA 118A	EDA 118A	ED 118GE	ED-118H
System sterowania	Mikroprocesorowy				
	Lockel	Moris	Lockel	Bright Star	Remore
System hamulca	Sab-Wabco	Sab-Wabco	Oerlikon	Knorr	Oerlikon
Rok wdrożenia			2004/2009	2007 / 2008	2008 / 2009

\*) T – ruch towarowy, M – ruch manewrowy, P – ruch pasażerski

Tabela 3.3. Parametry techniczne wybranych zmodernizowanych lokomotyw spalinowych (krajowych) eksploatowanych w Polsce [43]

Parametr	Typ/seria lokomotyw				
	301Dd ST45	303Da ST46	6Di SM42	6D1 SU42	18D SM42
Przeznaczenie *)	T	T	T+M	T+M	T+M
Układ osi	C'o C'o	C'o C'o	B'o B'o	B'o B'o	B'o B'o
Moc [kW]	1350	1800	671	2 × 563	563
Prędkość max [km/h]	120	120	90	90	90
Siła pociągowa [kN]	330	260	249	220	220
Typ silnika spalinowego	MTU 12V4000R43	MTU 12V4000R43L	CUMMINS QSK23 L-900	CAT 2x C18 Acert	CAT C18HCCRT
Typ prądnicy głównej Moc [kW]	GP846B1/B2 1450	SDV87.44-12 600	Ghp400 M4C-2 590	2xGhp400S6 –	Ghp4M4C 621
Typ prądnicy pomocn. Moc [kW]	LM-AC 100	SDV60.26-12 100	Ghp315S4K 50	2xGhp53 75	Ghp315S4-1 75
Typ silnika trakt. Moc [kW]	LSa-430 173	LSm/n-430 216	LSa430 173	LSa430 173	LSa430 173
System sterowania	Mikroprocesorowy				
	Lockel	Lockel	Medcom	Inteco	Inteco
System hamulca	Oerlikon	Oerlikon	Oerlikon	Knorr	Knorr
Rok wdrożenia	2008	2012	2016	2014	2014

\*) T – ruch towarowy, M – ruch manewrowy, P – ruch pasażerski



## 3.2. Modernizacje lokomotyw typu ST44

### 3.2.1. Modernizacja lokomotywy ST44 (M62) – PESA-Cargo

Brak lokomotyw dużej mocy wymusił na PKP powrót do lokomotyw tej serii. Jednocześnie ze względu na dużą moc i wysoką niezawodność lokomotywy te są chętnie wykorzystywane przez przewoźników prywatnych (import lokomotyw m.in. z Niemiec i Estonii).

W 2007 r. bydgoska PESA podpisała umowy z PKP Cargo i PKP LHS na modernizację łącznie 50 lokomotyw – główną zmianą było zainstalowanie bardziej ekonomicznych i mniej uciążliwych dla środowiska czterosurowych silników typu 12CzN26/26 [44] tego samego producenta o identycznej mocy i objętości skokowej 150,6 dm<sup>3</sup>. Modernizacja nie obejmowała silników trakcyjnych ED118A. Mimo to w 2011 roku PKP Cargo podpisało kolejną umowę na modernizację 26 lokomotyw w zakładach PESA Bydgoszcz.

W trakcie modernizacji lokomotywy typu ST44 (M62) (rys. 3.1) zabudowano następujące zespoły i układy:

1. czterosurowy silnik spalinowy typu 12CzN26/26 (12-cyl. w układzie V):
  - filtr powietrza silnika z kanałem dolotowym,
  - samooczyszczający się filtr oleju,
  - kolektor wylotowy silnik–tłumik wylotu,
  - układ automatycznej regulacji temperatury płynu chłodzącego,
  - zbiornik wyrównawczy ze wskaźnikiem poziomu płynu,
  - odcinki rurociągów układów paliwa, oleju, płynu chłodzącego do połączenia układów istniejących z nowymi,
2. sprężarka śrubowa,
3. układ automatyki bezpieczeństwa pociągu SHP + CA + RS,
4. radiotelefon pociągowy typu Koliber,
5. szybkościomierze,
6. zderzaki typu KX-ZC2,
7. reflektory halogenowe,
8. wycieraczki elektryczne,
9. układ sygnalizacji pożaru,
10. gazowy układ gaszenia pożaru,
11. układ podgrzewania płynu chłodzącego z agregatem grzewczym typu WEBASTO,
12. układ smarowania obrzeży kół,
13. urządzenie do pomiaru zużycia i poziomu paliwa,
14. elektrycznie podgrzewane lusterka,
15. ergonomiczny pulpit maszynisty,
16. ergonomiczne fotele dla maszynisty i pomocnika maszynisty,
17. klimatyzatory kabin,
18. nowe styczniki liniowe,
19. nowe styczniki rozruchowe.



Rys. 3.1. Widok ogólny lokomotywy zmodernizowanej dla PKP Cargo przez PESA Bydgoszcz [114]

W trakcie modernizacji wykorzystano istniejącą prądnicę główną oraz całość wyposażenia elektrycznego WN i NN. Sterowanie stycznikami i przekaźnikami pozostało bez zmian. W tabeli 3.4 przedstawiono dane techniczne silnika spalinowego.

Tabela 3.4. Dane techniczne silnika spalinowego [39, 114]

Typ	12CzN26/26
Moc znamionowa	1470 kW
Obroty znamionowe	750 obr/min
Układ cylindrów	12 V
Średnica cylindra/skok tłoka	260 mm/260 mm
Objętość skokowa silnika	165,6 dm <sup>3</sup>
Jednostkowe zużycie paliwa	202 g/kWh
Zużycie paliwa na biegu jałowym	10 kg/h
Zużycie oleju na mocy znamionowej	0,5% zużycia paliwa
Wymiary gabarytowe	4030 × 1665 × 3030 mm
Masa silnika razem z prądnicą	23300 kg
Temperatura płynu (otwarcie lewych żaluzji)	75±2°C
Temperatura oleju (otwarcie prawych żaluzji)	65±2°C
Praca wentylatora – maks. prędkość obrotowa	82±3°C – temp. płynu 70±1°C – temp. oleju
Minimalna temperatura do rozruchu silnika	15°C – temp. płynu, 8°C – temp. oleju
Maksymalna temperatura (zdjęcie obciążenia)	93±2°C – płyn, 75±2°C – olej

### 3.2.2. Modernizacja lokomotyw ST44 – NEWAG

Od roku 2007 zmodernizowane spalinowe lokomotywy ST44, typu 311D oraz 311Da (przystosowane do jazdy po szerokim torze 1520 mm) są efektem współpracy między Spółką NEWAG i amerykańskim koncernem General Electric (GE) [45].

NEWAG S.A. wykonał kilkadziesiąt modernizacji tego typu. Spalinowa lokomotywa towarowa typu 311D/311Da powstała w wyniku gruntownej modernizacji lokomotywy produkcji rosyjskiej typu M62, znanej na polskim rynku kolejowym pod oznaczeniem ST44.

Podstawowym zakresem modernizacji lokomotywy jest zabudowa zintegrowanego modułu napędowego (silnik, prądnica, sprężarka, układ chłodzenia), który w całości zmontowany dostarczany jest przez General Electric. Podwozie stanowi sprawdzona eksploatacyjnie konstrukcja lokomotyw ST44 poddana naprawie głównej. Wykorzystano oryginalne silniki trakcyjne ED118, po modernizacji i podniesieniu klasy izolacji do poziomu H. Lokomotywa posiada układ hamulca pneumatycznego typu Oerlikon. Wyposażono ją w nowe kabiny maszynisty spełniające warunki ergonomii i wysokiego komfortu pracy maszynisty. Nowoczesne mikroprocesorowe sterowanie lokomotywy umożliwia maksymalne wykorzystanie jej właściwości trakcyjnych.

Systemy elektryczne:

- prądnica główna i pomocnicza to maszyny synchroniczne prądu przemiennego,
- prostownik trakcyjny prądu przemiennego w technologii IGBT,
- mikroprocesorowy sterownik lokomotywy BrightStar™.

Podniesienie ergonomii pracy maszynisty w kabinie:

- nowe pulpity maszynisty,
- klimatyzacja kabiny maszynisty,
- ogrzewana szyba czołowa,
- szybkościomierz elektroniczny z rejestratorem zdarzeń,
- kuchenka i umywalka w kabinie maszynisty.

Podniesienie funkcjonalności:

- zwiększenie mocy trakcyjnej lokomotywy do 2133 kW,
- poprawa parametrów trakcyjnych dzięki sterowaniu mikroprocesorowemu i skutecznemu układowi przeciwpoślizgowemu,
- zmniejszenie zużycia paliwa i oleju silnikowego,
- zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery,
- nowoczesny wygląd lokomotywy.

W tabeli 3.5 przedstawiono główne dane techniczne zmodernizowanej lokomotywy, a na rysunku 3.2 przykładowy jej widok.

Tabela 3.5. Dane techniczne zmodernizowanej lokomotywy [114]

Dane ogólne	
Producent	NEWAG S.A.
Typ	311D/311Da
Układ osi	C'o C'o
Szerokość toru 311D/311Da	1435 mm/1520 mm
Całkowita długość ze zderzakami	~17550 mm
Rozstaw osi skrajnych	12800 mm
Rozstaw osi wózka	4200 mm

Tabela 3.5. cd

Średnica okręgu tocznego zestawów kołowych	1050 mm
Masa własna lokomotywy	118 t ±3%
Zbiornik paliwa	ok. 5000 dm <sup>3</sup>
Właściwości trakcyjne	
Prędkość maksymalna	100 km/h
Maksymalna siła pociągowa przy rozruchu	392 kN
Silniki trakcyjne	
Typ	ED 118A GE
Klasa izolacji	H
Masa	3240 kg
Silnik spalinowy	
Producent	GE
Typ	7FDL 12 EFI 45 V-12, 4-suwowy, turbodoładowany
Moc znamionowa	2133 kW (2900 KM)
Znamionowa prędkość obrotowa	1050 obr/min
Prędkość obrotowa biegu jałowego	450 obr/min
Liczba suwów	4
Liczba cylindrów	12
Wtrysk paliwa	Elektroniczny
Typ paliwa	Olej napędowy
Średnica cylindra/skok tłoka	229/267 mm
Masa	~15846 kg



Rys. 3.2. Widok ogólny zmodernizowanej lokomotywy ST44 – 311D-06 [114]

### 3.3. Modernizacje lokomotywy SM48 (TEM2)

#### 3.3.1. Modernizacja lokomotywy TEM2 – OLPP

Maszynę poddano naprawie głównej z modernizacją (rys. 3.3). Przystosowano ją do ruchu po torach PLK. Zmodernizowano hamulec zespolony Matrosov i zastosowano hamulec Oerlikon. Zamontowano także układy mające na celu poprawę bezpieczeństwa SHP, CA, CR oraz usprawniające obsługę.

Cechą charakterystyczną modernizacji było wprowadzenie sterowanie radiowego. Układ radiowego zdalnego sterowania pracą lokomotywy zapewnia sterowanie pracą lokomotywy przez maszynistę–operatora przebywającego poza kabiną maszynisty (z reguły obok składu). Układ ten realizuje m.in. następujące funkcje:

- start/stop silnika spalinowego,
- precyzyjny rozruch,
- jazda manewrowa – technologiczna (lub liniowa bez bocznikowania),
- przyspieszanie (zwiększenie/zmniejszenie mocy),
- hamowanie precyzyjne/luzowanie,
- hamowanie nagłe,
- hamowanie szybkie,
- stop awaryjny (hamowanie nagłe),
- zmiana kierunku jazdy,
- zaczepianie/rozczepianie składu (z wagonem buforowym),
- obsługa piasecznic,
- zdalne odblokowanie wyłączników nadmiarowych,
- sygnał dźwiękowy.



Rys. 3.3 Widok ogólny lokomotywy serii TEM2-206 [114]

W celu zapewnienia możliwości precyzyjnego sterowania zdalnego hamowaniem i zatrzymaniem lokomotywy (dojazd precyzyjny) w lokomotywie zastosowano moduł sterowania

hamulcem zespolonym. Umożliwia on uzyskanie na drodze elektrycznej następujących funkcji hamulca zespolonego:

- stan gotowości (jazda),
- jednego z siedmiu stopni hamowania służbowego
- hamowanie nagłe i szybkie.

W tabeli 3.6 przedstawiono główne parametry zmodernizowanej lokomotywy.

Tabela 3.6. Główne parametry techniczne zmodernizowanej lokomotywy [114]

Parametr	Wartość
Masa służbowa	116 000 kg
Długość ze zderzakami	17 029 mm
Średnica kół	1050 mm
Zapasy paliwa	5400 l
Typ silnika spalinowego	PD1M
Moc znamionowa	880 kW
Maksymalna siła pociągowa	38 000 kG
Rodzaj przekładni	Elektryczna
Prędkość konstrukcyjna	100 km/h
System hamulca	Pneumatyczny

### 3.3.2. Modernizacja lokomotywy spalinowej TEM2 (SM 48) – NEWAG

Zakres modernizacji lokomotywy TEM2 (SM 48) do wersji 15D/16D (rys. 3.4). W ramach przebudowy lokomotywy ze starej maszyny została jedynie konstrukcja ostoi, zbiornik paliwa i wózki. Pozostałe elementy, czyli nadwozie to całkowicie nowa konstrukcja. Na lokomotywie zastosowano nowoczesny agregat prądowórczy składający się z silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, spełniającego normy emisji spalin UIC IIIA o mocy 1550 kW wyposażony na jednej ramie z zespołem prądnic synchronicznych. Zabudowano nowoczesne podzespoły pomocnicze podnoszące znacząco niezawodność lokomotywy w tym napędy urządzeń pomocniczych w postaci silników asynchronicznych oraz hydrostatyczny napęd wentylatora układu chłodzenia.



Rys. 3.4. Widok ogólny zmodernizowanej lokomotywy TEM2 serii 15D nr 001 [114]

Zabudowano następujące nowoczesne systemy sterowania i zasilania:

- mikroprocesorowy system sterowania,
- diagnostyka pokładowa na panelu operatorskim,
- maszyny elektryczne – prądnica główna o mocy 1400 kW,
- przekładnia lokomotywy elektryczna, prąd przemienny–prąd stały (AC/DC),
- napęd urządzeń pomocniczych silnikami prądu przemiennego
- nowe aparaty elektryczne w przedziałach WN i NN,
- nowoczesny system hamulcowy.

Komfort pracy i bezpieczeństwo zapewniono przez zastosowanie następujących rozwiązań:

- ergonomiczna kabina maszynisty posadowiona na amortyzatorach metalowo-gumowych,
- dwa pulpity sterownicze, po jednym dla każdego kierunku jazdy,
- klimatyzacja i wydajne ogrzewanie kabiny, poprawa widoczności
- elektroniczny tachograf z rejestratorem zdarzeń,
- część socjalna wyposażona w lodówkę, umywalkę, kuchenkę oraz schowki,
- układ czuwaka aktywnego CA,
- układ samoczynnego hamowania pociągu SHP,
- układ wykrywania i gaszenia pożaru,
- system radio–stop,
- elektroniczny tachograf z rejestratorem zdarzeń,
- układ monitoringu z podglądem szlaku i rejestratorem cyfrowym.

W tabeli 3.7 przedstawiono główne dane techniczne lokomotywy 15D/16D po modernizacji.

Tabela 3.7. Główne parametry techniczne zmodernizowanej lokomotywy 15D/16D [114]

Parametr	Wartość
Układ osi:	C'o C'o
Szerokość toru	1435 mm/1520 mm
Rodzaj przekładni	Elektryczna AC-DC
Silniki trakcyjne	ED118A, klasa izolacji H
Prędkość max	100 km/h
Instalacja hamulcowa	Sab Wabco/Knorr-Bremse
Silnik spalinowy	CAT 3512 C
Moc znamionowa silnika	1550 kW
Układ cylindrów	V12
Znamionowa prędkość obrotowa silnika	1800 obr/min
Zużycie paliwa	213,1 g/kWh
Emisja spalin	UIC IIIA
Prądnica główna	Prądnica synchroniczna G1p 500 L4
Moc	1400 kW
Prądnica pomocnicza	Prądnica synchroniczna Ghp 315 M4K
Moc	63 kVA
System sterowania	Elektroniczny sterownik lokomotywy z diagnostyką pokładową
Rodzaj sprężarki	Śrubowa SK30/2×śrubowa SL20
Napędy pomocnicze	Elektryczne silniki asynchroniczne

## 4. CEL I ZAKRES PRACY

Dotychczasowa modernizacja lokomotyw spalinowych polegała głównie na zastąpieniu istniejącego silnika spalinowego nowoczesną jednostką napędową w celu ograniczenia emisji składników szkodliwych spalin do atmosfery. Takie podejście tylko częściowo eliminowało problemy modernizacji takich pojazdów. Nadal pozostawało w modernizowanej lokomotywie wiele układów i zespołów, które powinny podlegać wymianie. Konieczność takiej wymiany polega głównie na dopasowaniu takich układów do nowej konstrukcji silnika spalinowego (zmian jego np. zakresu prędkości obrotowych oraz zmian jego mocy).

Podjęte w pracy zagadnienie dotyczy właśnie kompleksowego podejścia do modernizacji lokomotyw spalinowych, w których wymianie podlega nie tylko silnik spalinowy, ale również wiele elementów technologicznie z nim powiązanych.

Celem pracy jest opracowanie metodyki konstrukcyjno-badawczej związanej z kompleksową modernizacją lokomotywy spalinowej ze szczególnym uwzględnieniem doboru zespołu silnikowo-prądnicowego na podstawie doświadczenia w realizowanych projektach modernizacji lokomotyw oraz przeprowadzonej analizy dotychczasowych metod.

Przedstawiony cel pracy umożliwia przedstawienie tezy pracy, która brzmi:

*wiele metod modernizacji lokomotyw oraz doświadczenie w realizacji projektów lokomotyw spalinowych umożliwi opracowanie uniwersalnej metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego lokomotywy spalinowej*

Realizację celu pracy przeprowadzono m.in. na podstawie dotychczasowego doświadczenia autora. Doświadczenie to przedstawiono w postaci współautorskich modernizacji lokomotyw ST44 oraz SM48.

Do realizacji celu pracy oraz postawionej tezy niezbędne było opracowanie następujących składowych:

- przedstawienie założeń do metodyki doboru zespołu prądnicowo-silnikowego,
- opracowanie szczegółowych założeń projektu,
- określenie wymagań normatywnych w zakresie homologacji lokomotywy,
- oszacowanie bilansu mocy modernizowanej lokomotywy,
- wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych lokomotywy,
- analizę układów oczyszczania spalin,
- opracowanie zintegrowanego sterownika silnika i prądnicy,
- analiz zabudowy mechanicznej
- i w końcowym etapie – analizy symulacyjne zespołu

Oprócz doboru zespołu prądnicowo-silnikowego, konieczne jest również opracowanie następujących systemów:

- układu paliwowego,
- chłodzenia i podgrzewania wstępnego silnika spalinowego,
- sterowania oraz diagnostyki.

Kompleksową modernizację lokomotywy zakończą następujące analizy:

- trakcyjne,
- emisji składników szkodliwych spalin.

Przedstawione powyżej, opisowe czynności dotyczące kompleksowego podejścia w zakresie modernizacji lokomotywy spalinowej przedstawiono w postaci schematu na rys.,4.1.



Funkcja rozdziału	Tytuł rozdziału i zawartość	Numer rozdziału
Wstęp	<p style="text-align: center;"><b>Wprowadzenie</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– geneza pracy w kontekście stanu taboru kolejowego</li> <li>– cele i efektywność modernizacji lokomotyw</li> <li>– opis procesu modernizacji lokomotyw</li> </ul>	1
Analiza stanu wiedzy i postawienie problemu	<p style="text-align: center;"><b>Lokomotywy spalinowe w trakcji szynowej</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– analiza lokomotyw spalinowych w Polsce i na świecie</li> <li>– analiza planów inwestycyjnych przewoźników kolejowych</li> <li>– analiza obowiązujących norm dotyczących emisji spalin</li> </ul>	2
	<p style="text-align: center;"><b>Dotychczasowa metodyka modernizacji lokomotyw</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– analiza projektów modernizacji lokomotyw spalinowych</li> <li>– wykonawcy modernizacji realizują projekty w podobny sposób, jednak brak metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego</li> </ul>	3
Cel i teza pracy	<p style="text-align: center;"><b>Cel i zakres pracy i wybór obiektu modyfikacji</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– opracowanie metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego w celu modernizacji lokomotyw spalinowych</li> </ul> <p><i>teza: wiele metod modernizacji lokomotyw oraz doświadczenie w realizacji projektów lokomotyw spalinowych umożliwi opracowanie uniwersalnej metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego</i></p>	4
Realizacja celu pracy	<p style="text-align: center;"><b>Współautorskie modernizacje lokomotyw spalinowych</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– analiza współautorskich, dotychczasowych modernizacji lokomotyw spalinowych</li> </ul>	5
	<p style="text-align: center;"><b>Opis autorskiej metodyki modernizacji lokomotywy</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– wybór lokomotywy do doboru zespołu silnikowo-prądnicowego</li> <li>– metoda doboru zespołu silnikowo-prądnicowego</li> <li>– opis lokomotywy zmodernizowanej z wykorzystaniem opracowanej metody zespołu silnikowo-prądnicowego</li> </ul>	6
Badania	<p style="text-align: center;"><b>Modernizacja lokomotywy spalinowej oraz jej badania</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– opis autorskiej modernizacji układów lokomotywy</li> <li>– opis badań trakcyjnych lokomotywy oraz silnika spalinowego w zakresie emisji substancji szkodliwych do atmosfery</li> </ul>	7, 8
Wnioski	<p style="text-align: center;"><b>Podsumowanie i wnioski</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– wnioski oraz kierunki dalszych prac badawczych</li> </ul>	9

Rys. 4.1. Kompleksowa technologia modernizacji lokomotywy spalinowej

## 5. WSPÓLAUTORSKIE MODERNIZACJE LOKOMOTYW SPALINOWYCH

### 5.1. Modernizacja lokomotyw ST44 – LHS

Przed rozpoczęciem prac nad modernizacją przyjęto następujące założenia techniczno-ekonomiczne (zdjęcia lokomotywy przed modernizacją pokazano na rys. 5.1 i 5.2):

- zwiększenie mocy lokomotywy z 2000 KM do 3000 KM,
- zmniejszenie zużycia paliwa do 202 g/kWh z 217 +15 g/kWh,
- zmniejszenie zużycia oleju smarnego poniżej 0,5% zużycia oleju napędowego,
- zwiększenie prędkości jazdy składu pociągu na pochyleniu 12‰ z prędkości 5 km/h do min. 24 km/h,
- możliwość ruszania pełnym składem pociągiem brutto 2000 t na wzniesieniu 9,5‰,
- zwiększenie objętości zbiornika paliwa z 3900 dm<sup>3</sup> do 6000 dm<sup>3</sup>,
- dostosowanie napięcia instalacji elektrycznej obwodów pomocniczych do 24 V,
- zastosowanie nowoczesnego silnika spalinowego spełniającego wymogi karty UIC 624 (UIC II) i dyrektywy 2004/26/WE,
- powiększenie kabin maszynisty,
- wyposażenie kabin maszynisty w układ klimatyzacji,
- zastosowanie układów podgrzewania silnika głównego przez zasilanie z zewnątrz (3×400 V) i z dodatkowego agregatu zainstalowanego na lokomotywie,
- wykorzystanie istniejącego układu biegowego oraz istniejących silników trakcyjnych.

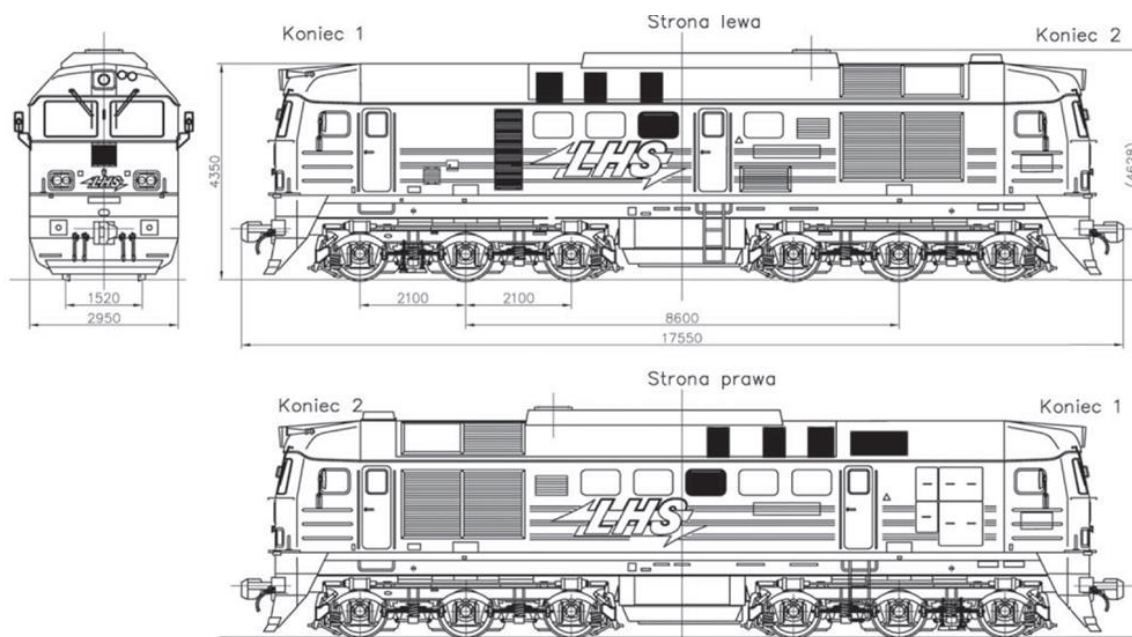


Rys. 5.1. Widok ogólny lokomotywy typu ST44, przed modernizacją [105]



Rys. 5.2. Widok kabiny maszynisty (wewnątrz) lokomotywy typu ST44, przed modernizacją [105]

Cały zakres prac związanych z modernizacją wykonano w BUMAR-FABLOK na podstawie dokumentacji opracowanej przez Instytut Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu, przy udziale głównych poddostawców, tj. systemu sterowania, agregatu trakcyjnego itp. Prace demontażowe, pomiarowe, odtworzeniowe i weryfikacyjne ostoi, pudła, dachów, ram wózków, przekładni osiowych, zestawów kołowych i innych elementów przewidzianych do dalszego zastosowania były prowadzone ze szczególną starannością, aby zapewnić dalszą niezawodną eksploatację zmodernizowanej lokomotywy. Urządzenia wykorzystywane w modernizowanej lokomotywie podlegały naprawie głównej lub modernizacji w celu poprawy funkcjonowania, zmniejszenia uciążliwości obsługi i zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Stan elementów nośnych weryfikowano przez pomiary, oględziny i badania defektoskopowe. Ostoję lokomotywy poddano obróbce w zakresie korekty wymiarowej, a także spełnienia istotnego wymogu płaskości posadowienia agregatu prądowłórczego. Koncepcja zmodernizowanej spalinowej lokomotywy serii ST44, przeznaczonej do prowadzenia pociągów towarowych na liniach szerokotorowych (1520 mm), opracowana została przez specjalistów BUMAR-FABLOK S.A., Instytutu Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu i PKP Linii Hutniczej Szerokotorowej Sp. z o.o. Ogólny widok lokomotywy wraz z charakterystykami lokomotywy po modernizacji przedstawiono na rys. 5.3 i 5.4.

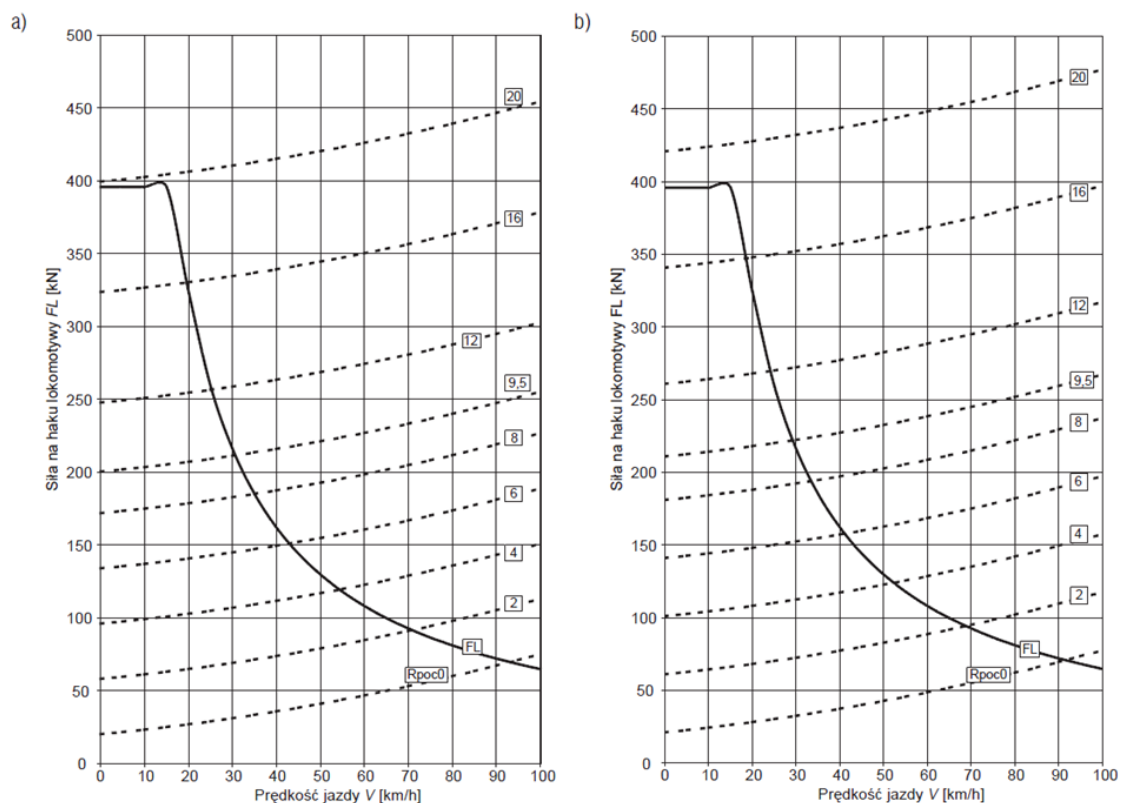


Rys. 5.3. Widok i podstawowe wymiary lokomotywy po modernizacji [114]

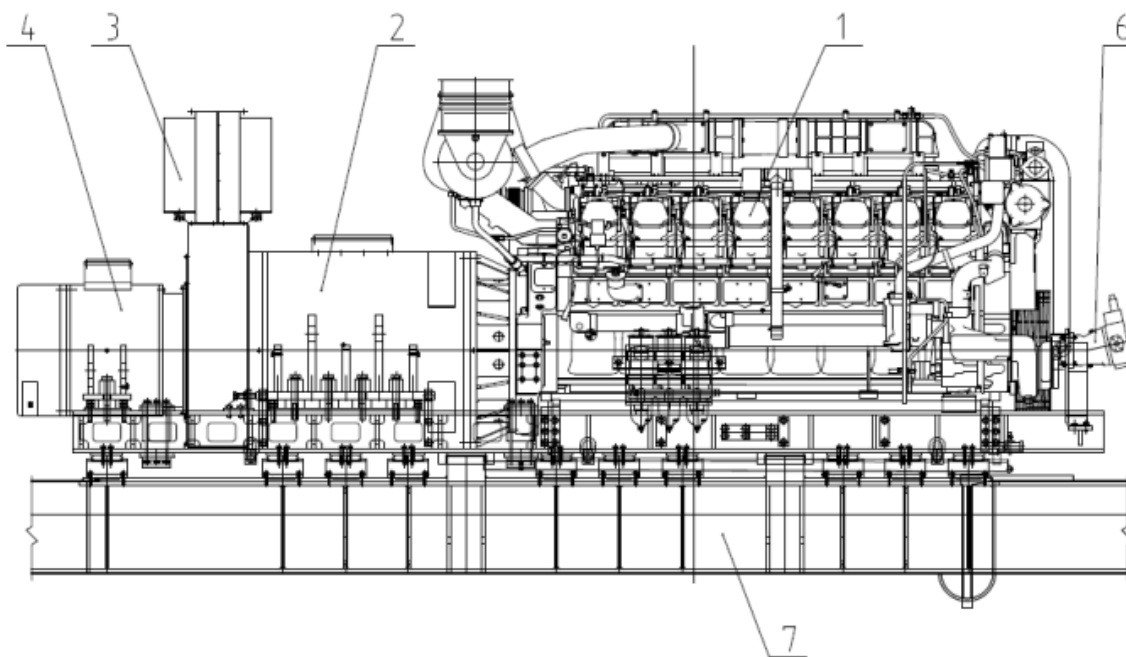
W ramach modernizacji w lokomotywie zastosowano nowoczesne zespoły i urządzenia:

- Zespół prądowłórczy (rys. 5.5) zmodernizowanej lokomotywy tworzy nowoczesny silnik spalinowy i zespół prądnic z prostownikiem. Silnik spalinowy wraz z zespołem prądnic z prostownikiem (zespół prądowłórczy) i prądnicą pomocniczą ustawiony jest na wspólnej ramie w sposób umożliwiający łatwy demontaż i wymianę urządzeń składowych. Zastosowanie nowoczesnych podzespołów agregatu i wibroizolatorów praktycznie wyeliminowało drgania.
- Mikroprocesorowy system sterowania i diagnozowania stanu lokomotywy (rys. 5.6) składa się z sterownika głównego zarządzającego sterownikami lokalnymi: zespołu silnik spalinowy – prądnic, panelu operatorskiego na pulpicie, układu wytwarzania sprężonego powietrza zawierającego diagnostykę hamulca oraz hydrostatycznego napędu

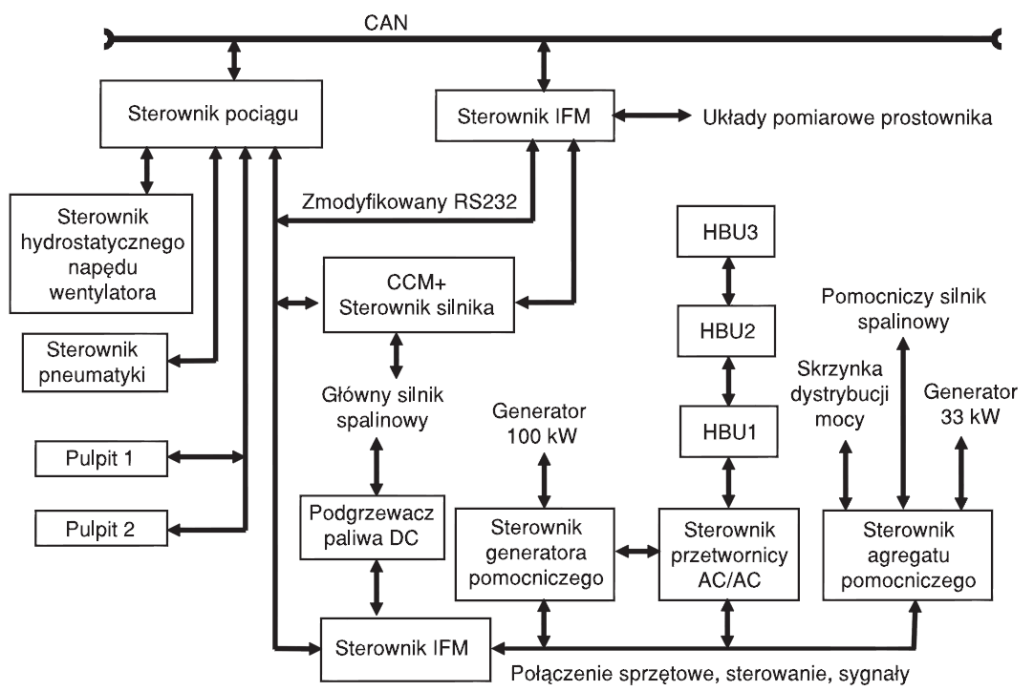
wentylatora. Umożliwia jazdę z zadaną prędkością (utrzymywanie określonej prędkości pociągu) lub zadaną siłą (określenie max siły rozwijanej przez lokomotywę).



Rys. 5.4. Obliczeniowe charakterystyki trakcyjne lokomotywy po modernizacji: a – na wzniesieniu z pociągiem o masie 1900 t, b – na wzniesieniu z pociągiem o masie 2000 t [114]



Rys. 5.5. Zespół prądowców: 1 – silnik spalinowy CAT 3516B- HD-SC, 2 – prądnicą główną, 3 – prostownik główny, 4 – prądnicą pomocniczą, 5 – podgrzewacz silnika spalinowego KIM Hotstart, 6 –pompa H1V108SL2SEM1, 7 – rama pośrednia zespołu prądowców [114]



Rys. 5.6. Schemat połączeń elementów systemu sterowania [114]

- Układ sterowania wielokrotnego umożliwia prowadzenie z jednej kabiny do trzech zmodernizowanych lokomotyw połączonych sprzęgiem sterowniczym. Sygnały sterowania wielokrotnego oraz dane diagnostyczne między komputerami pokładowymi lokomotyw przekazywane są w technice cyfrowej za pomocą fizycznych łącz. Zachowane są funkcje dozoru i diagnozowania sprzęgniętych lokomotyw. Zastosowanie tego układu pozwoli na zmniejszenie obsady załóg lokomotyw.
- Urządzenie przeciwpoślizgowe zawiera układ pomiaru prędkości obrotowych osi oraz wyznaczania prędkości referencyjnej. W przypadku wystąpienia różnicy, następuje wygenerowanie sygnału do układu likwidacji poślizgu w czasie rozruchu (sterowanie napięciem prądnicy i ewentualne włączenia podhamowania) i hamowania (przez sekwencję załączania odpowiednich zaworów) oraz piaskowania.
- Lokomotywa jest wyposażona w urządzenia samoczynnego hamowania pociągu (SHP) i czuwaka aktywnego (CA), zgodnie z wymaganiami karty UIC 641, i w radiotelefon z opcją zdalnego zatrzymania lokomotywy (radio-stop). Urządzenia wykonawcze zabudowane są na tablicy pneumatycznej lokomotywy.
- Układ chłodzenia silnika spalinowego składa się z panelowych sekcji chłodzących i dotychczasowego osiowego wentylatora. Wentylator osiowy jest napędzany silnikiem hydraulicznym działającym przy zmiennych prędkościach w zależności od temperatury cieczy chłodzącej i obciążenia silnika spalinowego. Umożliwia to bardziej ekonomiczne wykorzystanie mocy silnika głównego i zmniejszenie zużycia paliwa.
- Agregat prądotwórczy wykorzystywany jest do podgrzewania silnika głównego przed rozruchem, ładowania akumulatorów i podgrzewania kabin maszynistów przy nie pracującym silniku głównym. Zamiast agregatu można wykorzystywać zewnętrzne zasilanie 3×400 V AC co jest szczególnie korzystne przy obsłudze lokomotyw w lokomotywowni.
- W zmodernizowanej lokomotywie ST44 zastosowane są dotychczasowe silniki trakcyjne prądu stałego typu ED118A. Do napędu wentylatorów chłodzenia zastosowano silniki asynchroniczne zamiast napędu mechanicznego za pomocą wałów Cardana. Układ chłodzenia dostosowano do obciążenia znamionowego silnika (wykorzystanie pełnej mocy znamionowej silników).

- Kompletny agregat sprężarkowy (ze stopniem śrubowym) łącznie z chłodnicą zamiast przestarzałej sprężarki tłokowej i układu napędowego.
- Prędkościomierz elektroniczny pozwalający na rejestrację parametrów decydujących o bezpieczeństwie jazdy lokomotywy.
- Zespół przetwornic statycznych przeznaczonych do zasilania urządzeń pomocniczych i sterujących. Na lokomotywie zastosowano napięcia 24 V DC, 3×400 V AC i 230 V AC, wynikające z dostępności zastosowanych urządzeń.
- Nowoczesne i ergonomiczne kabiny maszynisty. Pulpity maszynisty i wyłożenia ścian wykonano z materiałów kompozytowych.
- Układ smarowania obrzeży na smar suchy pozwoli na zmniejszenie zużycia obrzeży kół.
- Tablica pneumatyczna zawierająca aparaty pneumatyczne i elektropneumatyczne wykorzystywane do sterowania hamulcami, piaskowaniem i urządzeniami sterowania ruchem kolejowym.
- Układ hamulcowy zawierający:
  - hamulec zespolony pneumatyczny przeznaczony do hamowania zarówno lokomotywy jak i prowadzonego pociągu,
  - hamulec dodatkowy (bezpośredni) do hamowania lokomotywy,
  - hamulec postojowy typu sprężynowego,
  - hamulec bezpieczeństwa.

W konstrukcji zmodernizowanej lokomotywy uwzględniono wymagania przeciwpożarowe ujęte w ustalonych przepisach krajowych i międzynarodowych. W zmodernizowanej lokomotywie w przedziale maszynowym (silnikowym), zabudowano stałą instalację gaśniczą z gazem gaszącym obojętnym zarówno dla obsługi, jak i dla urządzeń wewnętrznych. Gaz sprężony w butli o objętości 87 dm<sup>3</sup> zapewni ochronę całego przedziału maszynowego. Z butli gaz jest rozprowadzony rurami do dysz. Układ jest uruchamiany automatycznie, ręcznie lub awaryjnie za pośrednictwem siłownika ręcznego zabudowanego na zaworze butli. Wyzwalanie automatyczne następuje po wykryciu pożaru przez czujki i potwierdzeniu sygnału przez maszynistę. Wyzwalanie ręczne następuje po uruchomieniu przez maszynistę, a wyzwalanie awaryjne ma miejsce w sytuacjach krytycznych, gdy zawiedzie wyzwalanie automatyczne lub ręczne. Ponadto instalacja gaśnicza uruchamiana może być z każdej kabiny każdej lokomotywy przy eksploatacji w trakcji wielokrotnej.

### **Kabina maszynisty**

Zmodernizowana lokomotywa posiada nowoczesne ergonomiczne kabiny maszynisty. Dla poprawy bezpieczeństwa i komfortu pracy obsługi nastąpiło powiększenie objętości kabiny w wyniku przesunięcia ścian tylnych i rezygnacji z przedsionków pośrednich. Do każdej kabiny prowadzą jedne drzwi zewnętrzne, usytuowane po stronie pomocnika, drzwi wewnętrzne przejściowe w środku usytuowane na ścianie tylnej oraz drzwi zewnętrzne usytuowane na ścianach bocznych

W wyniku modernizacji każda kabina maszynisty uzyskała:

- nowoczesny pulpit sterujący o rozdzielonych płaszczyznach informacyjnych i wykonawczych,
- układ klimatyzacji z klimatyzatorem zabudowanym w pulpicie sterującym oraz dodatkowe nagrzewnice elektryczne zabudowane na ścianie tylnej,
- instalację radiotelefonu nadawczo-odbiorczego powiązanego z systemem radiostopu,
- dwa nowoczesne fotele spełniające wymagania ergonomii i zapewniające możliwość szybkiej ewakuacji,

- drzwi wewnętrzne usytuowane na ścianie tylnej zapewniające szybką ewakuację w przypadku zagrożenia,
- okna czołowe z elektrogrzewczymi szybami wielowarstwowymi i z wycieraczkami oraz spryskiwaczami z napędem elektrycznym,
- lusterka boczne podgrzewane elektrycznie z regulacją z wnętrza kabiny,
- izolację akustyczną i termiczną spełniającą wysokie wymagania dotyczące tłumienia dźwięku i zapewniające właściwy komfort cieplny,
- nowe wyłożenia płytami poliwęglowanymi i laminatami poliestrowo-szklanymi,
- podłogę pokrytą wykładziną antypoślizgową.

Poprawę widoczności w kabinie w różnych warunkach pogodowych uzyskano w wyniku zastosowania szyb elektrogrzewczych, wycieraczek i spryskiwaczy o napędzie elektrycznym oraz podgrzewanych lusterek. Układ pulpitu sterujący–fotel zapewnia możliwość realizacji jazdy i hamowania w pozycji siedzącej i stojącej.

Oświetlenie kabiny zapewniają świetlówki z możliwością regulacji natężenia oraz lampy oświetlenia awaryjnego i pulpitowego. Oświetlenie zewnętrzne lokomotywy tworzą małoga-barytowe lampy z żarówkami halogenowymi oraz lampy sygnałowe z filtrami czerwonymi. Nad kabinami, na dachu, zainstalowano syreny akustyczne, a pod ostoją od czoła elektryczne sygnały ostrzegawcze. Hałas emitowany przez lokomotywę na zewnątrz i wewnątrz zarówno na postoju, jak i podczas jazdy spełnia określone wymagania zawarte w polskich przepisach kolejowych. Na rysunkach 5.7 i 5.8 przedstawiono próby zmodernizowanej lokomotywy ST44 dla LHS.



Rys. 5.7. Próby zmodernizowanej lokomotywy ST44 3000 na oporniku wodnym w Bumar-Fablok S.A. [105]



Rys. 5.8. Próby trakcyjne na linii Hutniczo-Szerokotorowej [105]

Próby i badania lokomotywy przeprowadzono dwuetapowo w oparciu o program prób i badań. W zakresie podzespołów, regulacji charakterystyki zewnętrznej, wydolności układów, próby realizowano na oporniku wodnym w Bumar-Fablok S.A. Próby trakcyjne przeprowadzono na torach LHS.

W wyniku modernizacji otrzymano lokomotywy:

- o parametrach trakcyjnych porównywalnych z lokomotywami spalinowymi dostarczanymi przez czołowych europejskich producentów,
- nowoczesne, do prowadzenia transportu towarowego, o małych kosztach eksploatacji, których czas użytkowania wynosi następne 30 lat,
- spełniające wszystkie wymogi zarówno w zakresie ochrony środowiska, jak i wysokiego komfortu pracy maszynistów, których koszt zakupu wynosi około 40% wartości zakupu nowej lokomotywy o porównywalnych parametrach eksploatacyjnych.

Lokomotywa ST44 3000 uzyskała świadectwo typu Urzędu Transportu Kolejowego na tor szeroki 1520 mm i normalny 1435 mm i w 2005 roku na LHS dostarczono dwie przebudowane lokomotywy, wykorzystujące silnik Caterpillar 3516B HDSC o mocy 2240 kW [42].

## 5.2. Modernizacja lokomotyw serii SM48 (TEM2) – Pol-Miedź Trans

Projekty modernizacyjne dwóch lokomotyw powstały w latach 2003-2004. Oba projekty modernizacyjne realizowane były przez IPS Tabor wspólnie z ZNLS Piła, a w pierwszym wariantcie (ze względu na bardzo krótki okres realizacji) zaproponowano modernizację w oparciu o sprawdzony układ zastosowany w lokomotywie SP32 obejmował:

1) wymianę dotychczasowego silnika PDIM o mocy 882 kW (1200 KM) na nowoczesny silnik typu 12V396TC14 firmy MTU o mocy 1015 kW charakteryzujący się małym zużyciem oleju napędowego, wydłużoną żywotnością oraz spełniający aktualne wymaganie karty UIC 624 w zakresie toksyczności spalin,

2) wymianę dotychczasowych prądnic prądu stałego o niezależnym wzbudzeniu i własnej wentylacji zespołem nowoczesnych prądnic synchronicznych zabudowanych na wspólnym wale i w jednym korpusie,

3) wymianę dotychczasowych pomocniczych napędów za pośrednictwem wałów, przekładni i sprzęgieł na napędy hydrostatyczne sprężarki głównej i wentylatora chłodnicy oraz napęd elektryczny wentylatora silników trakcyjnych,

4) zastosowanie w miejsce trzycylindrowej sprężarki tłokowej nowoczesnego agregatu sprężarkowego ze sprężarką śrubową,

5) zastosowanie nowoczesnego systemu sterowania mikroprocesorowego nadzorującego pracę zespołu prądotwórczego, silników trakcyjnych, sprężarki i wentylatorów silników trakcyjnych,

6) rekonstrukcję kabiny maszynisty, w której stare rozwiązania zastąpiono:

- nowoczesnymi pulpitemi sterowniczymi z ergonomicznym rozmieszczeniem aparatów i urządzeń
- ergonomicznymi i bezpiecznymi fotelami,
- oknami czołowymi z szybami elektrogrzewczymi oraz wycieraczkami i spryskiwaczami z napędem elektrycznym,
- ogrzewaniem nawiewnym i wentylatorami dachowymi wyciągowo-tłoczącymi,
- nowoczesną izolacją akustyczną i termiczną, wyłożeniem ścian i dachów płytami poliwęglanowymi, matami przeciwpoślizgowymi na podłodze, ponadto w kabinie umieszczono centralkę stałego urządzenia gaszącego znajdującego się w przedziale maszynowym,



7) zastosowanie nowoczesnego układu hamulca, tj. zabudowa tablicy aparatów pneumatycznych i elektropneumatycznych oraz nowych manipulatorów zabudowanych na pulpitych sterowniczych.

W pierwszym wariantcie modernizacji w lokomotywach zastosowano:

- halogenowe oświetlenie zewnętrzne z układem monitoringu (kamery),
- nowe układy bezpieczeństwa ruchu (SHP, CA, niezależny kanał pneumatyczny – radio-stop),
- nową instalację radiołączności,
- nowe zmodyfikowane w zakresie konstrukcji i wyposażenia zespoły obwodów elektrycznych głównych, pomocniczych i sterowania.

Ogólny widok zmodernizowanej lokomotywy w pierwszym wariantcie przedstawiono na rysunku 5.9.



Rys. 5.9. Widok zmodernizowanej lokomotywy serii SM48 z silnikiem 12V396TC14 [114]

Pierwszy wariant modernizacji zrealizowano tylko na dwóch lokomotywach serii SM48. W drugim wariantcie (nowym zadaniem docelowym) dokonano modernizacji następujących zespołów i układów:

- 1) zastosowano nowoczesny silnik spalinowy typu 12V4000R41 firmy MTU o mocy 1500 kW, charakteryzujący się małym zużyciem oleju napędowego,
- 2) zastosowano nowy zespół prądnic synchronicznych (główna, pomocnicza, wzbudnica) o zwiększonych mocach,
- 3) do napędu wentylatorów silników trakcyjnych zastosowano silniki o zwiększonej mocy,
- 4) zmodyfikowano układ połączeń silników trakcyjnych (z  $2 \times 3$  na  $3 \times 2$ ).

Rozmieszczenie urządzeń i ogólny widok zmodernizowanej lokomotywy TEM2 z silnikiem 12V4000R41 przedstawiono na rys. 5.10, a jej główne parametry przedstawiono w tabeli 5.1.

W wariantcie z silnikiem 12V4000R41 zmodernizowano również dwie lokomotywy. W ramach modernizacji tych lokomotyw IPS Tabor Poznań proponował zastosowanie silników firmy CAT-Zeppelin z rodziny 3512 i 3516, zespołu prądnic synchronicznych firm niemieckich lub austriackich oraz układów napędów pomocniczych z wykorzystaniem silnika prądu

przemienne. Pozwoliłoby to na zbudowanie kilku sprawdzonych, w miarę uniwersalnych zespołów napędowych, możliwych do zastosowania w innych typach (seriach) modernizowanych spalinowych lokomotyw manewrowych i liniowych.



Rys. 5.10. Widok ogólny lokomotywy serii TEM2-035 z silnikiem 12V4000R41 [114]

Tabela 5.1. Główne parametry techniczne zmodernizowanej lokomotywy serii SM48 z silnikami 12V396TC14 i 12V4000R41 [114]

Podstawowe dane lokomotywy oraz jej zespołów		
Parametr	12V396TC14	12V4000R41
Przeznaczenie	ciężka praca manewrowa oraz prowadzenie pociągów towarowych	
Układ osi	C'o C'o	
Masa służbowa lokomotywy	118 Mg (t)	
Dopuszczalna prędkość max	100 km/h	
Sterowanie lokomotywy	Intelto Max 129	
Szerokość toru	1435 mm	
Całkowita długość lokomotywy ze zderzakami	17029 mm	
Największa szerokość lokomotywy	3120 mm	
Największa wysokość lokomotywy od główki szyny	4437 mm	
Siła pociągowa przy pracy ciągłej	232 kN	
Silnik spalinowy		
Typ	12 V 396 TC 14 MTU (Niemcy)	12 V 4000 R41 MTU (Niemcy)
Moc znamionowa wg UIC	1015 kW/1380 KM	1500 kW/2040 KM
Prędkość obrotowa znamionowa	1500 obr/min.	1800 obr/min
Najmniejsza prędkość obrotowa biegu jałowego	600 obr/min	
Jednostkowe zużycie paliwa	208 g/kWh	198 g/kWh
Masa silnika suchego	3510 kg	6190 kg

Tabela 5.1 cd

Układ chłodzenia silnika spalinowego		
Sposób chłodzenia	z regulacją termostatem /napęd hydrostatyczny wentylatora/	
Powierzchnia chłodząca jednej sekcji	21 m <sup>2</sup>	
Wentylator chłodnicy/wydatek	osiowy / 36 m <sup>3</sup> /s	
Napęd wentylatora	silnik hydrostatyczny	
Prądnicą główną		
Parametr	12V396TC14	12V4000R41
Typ:	GST-1-2-990X314/8	GST-F-990x400/8
Praca ciągła przy napięciu niższym	427 V, 1400 A/prąd przemienny	519 V, 1722 A/prąd przemienny
Moc pozorna	1015-1035 kVA	1425,5-1438 kVA
Prędkość obrotowa	1500 obr/min	1800 obr/min
Współczynnik mocy	0,96-0,94	0,925-0,93
Klasa izolacji	F	
Wzbudnica		
Typ:	GSTE-265x62/4	GSTE-265x66/4
Moc pozorna:	14,5 kVA	14,2 kVA
Napięcie:	91 V DC	164 V DC
Prąd:	160 A DC	86 A DC
Prędkość obrotowa:	1500 obr/min	1800 obr/min
Silnik trakcyjny		
Typ:	ED-118 AY2	
Moc przy pracy ciągłej przy napięciu niższym	110 kW, 168 V DC, 720 A, 199 obr/min	
Napięcie znamionowe	463 V DC	
Największa prędkość obrotowa	2290 obr/min	
Klasa izolacji	F	
Prostownik główny i pomocniczy		
Typ	MRT-LDE 900V/3000A i 110V/1500A	
Znamionowe napięcie zasilające	700 V prądu przemiennego	
Częstotliwość	40/110 Hz	
Teoretyczne napięcie przy biegu jałowym i największe przy obciążeniu:	950 V DC	
Znamionowy prąd wyprostowany:	2600 A DC	
Prądnicą pomocniczą		
Parametr	12V396TC14	12V4000R41
Typ	GSTA-650x126/8	GSTA-650x146/8
Rodzaj prądnicy	synchroniczna	synchroniczna (wspólna z prądnicą główną)

Tabela 5.1 cd

Napięcie	103–111,4 V prądu przemiennego	105,5–110,4 V prądu przemiennego
Prąd	440/580 A	428/558 A
Moc pozorna	78,5/112 kVA	78/99 kVA
Prędkość obrotowa	750/1500 obr/min.	600/1800 obr/min
Częstotliwość	50/100 Hz	120 Hz
Współczynnik mocy	0,94	0,935/0,932
Napięcie wzbudzenia	73/63 V	82,7/79 V
Prąd wzbudzenia	33,5/33 A	33,6/32 A
Klasa izolacji	F	
Sprężarka powietrza		
Typ	CT 12D	
Ciśnienie znamionowe	1 MPa	
Wydatek przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym	5 m <sup>3</sup> /min	
Rodzaj chłodzenia	powietrzem/chłodnica własna	
Napęd	silnik hydrostatyczny	
Silnik hydrostatyczny	A2FM-28 klasa F	

## 6. AUTORSKA METODA DOBORU ZESPOŁU SILNIKOWO-PRĄDNICOWEGO

### 6.1. Wybór lokomotywy do doboru zespołu silnikowo-prądnicowego

Wszystkie przewozy na niezelektryfikowanych liniach kolejowych oraz większość prac manewrowych realizują lokomotywy spalinowe. Spośród lokomotyw spalinowych znaczący udział w pracy przewozowej, przetokowej i manewrowej zajmują lokomotywy sześciosiowe.

Do znanych serii (typów) lokomotyw spalinowych sześciosiowych wykorzystywanych przez spółki PKP i prywatnych operatorów kolejowych zaliczyć należy:

- Lokomotywę SM31 jednokabinowa o mocy 880 kW z przekładnią elektryczną przeznaczoną zasadniczo do wykonywania ciężkich prac manewrowych na bocznicach i torach rozrządowych, w zakładach przemysłowych i portach. Ogółem (na bazie układu biegowego z lokomotyw serii SP45) Fabryka Lokomotyw w Chrzanowie wyprodukowała około 170 szt. tej serii lokomotyw.
- Lokomotywę SM48 (w przemyśle oznaczenie TEM2) jednokabinową o mocy 880 kW z przekładnią elektryczną, przeznaczoną do obsługi wschodnich rejonów przygranicznych w pracach przeładunkowych, ciężkich pracach manewrowych, oraz (po zabudowie polskich systemów bezpieczeństwa) również do prowadzenia liniowych pociągów towarowych. Lokomotywy były przygotowane do prac na torach o szerokości 1435 mm lub 1520 mm i były sprowadzane do Polski z byłego ZSRR od 1974 r. zarówno na potrzeby PKP jak i potrzeby kolei przemysłowych. Ogółem zakupiono 130 lokomotyw do PKP (na tor normalny i szeroki) oraz około 300 lokomotyw dla kopalni, hut, zakładów górniczych i przedsiębiorstw transportu kolejowego.
- Lokomotywę serii ST43 dwukabinową zakupioną przez PKP w latach 1965-1978 w Rumunii, o mocy 1540 kW z przekładnią elektryczną z przeznaczeniem do prowadzenia ciężkich pociągów towarowych, jak również pasażerskich pociągów dalekobieżnych z wagonami dysponującymi własnym źródłem ciepła. Ogółem sprowadzono do Polski ponad 400 szt. lokomotyw, które są kasowane lub złomowane z powodu zużycia technicznego, ponieważ proces modernizacji i remotyżacji tej serii jest skomplikowany i nieopłacalny.
- Lokomotywę serii ST44 (typu M62) dwukabinową o mocy 1470 kW z przekładnią elektryczną przeznaczoną do prowadzenia pociągów towarowych i eksploatowaną na torach o prześwicie 1435 i 1520 mm. Ogółem sprowadzono do Polski około 1200 sztuk i była to najliczniejsza grupa ciężkich lokomotyw spalinowych na PKP (również na LHS).  
Prywatni operatorzy w ostatnich latach zaczęli sprowadzać tę serię lokomotyw z krajów południowych, Niemiec i krajów nadbałtyckich modernizując i doposażając je we własnym zakresie w silniki GM, GE i Kołomy oraz wprowadzając polskie systemy bezpieczeństwa ruchu.
- Lokomotywę serii SP45 dwukabinową o mocy 1250 kW z przekładnią elektryczną przeznaczoną do prowadzenia pociągów pasażerskich. Ogółem w W3 HCP wyprodukowano w latach 1970–1976 ponad 260 sztuk tych lokomotyw, z których w latach 1988–1997 około 200 przystosowano do ogrzewania elektrycznego. W ostatnich latach kilkanaście sztuk tych lokomotyw zmodernizowano z przystosowaniem do prowadzenia tylko pociągów towarowych.

Pozostałe sześciosiowe lokomotywy spalinowe eksploatowane w Polsce to: S200 i 753.7 (produkcja czeska), Class 66 (produkcja amerykańska i angielska), BR231 i BR232 (produkcja ZSRR dla Niemiec i Bułgarii). Ich liczba jest nieznacząca, a ponadto sprowadzane przez

poszczególnych prywatnych operatorów kolejowych są rozproszone na obszarze całej Polski realizując często pracę przewozową w obrębie dwóch krajów.

Analizując rozwiązania techniczne w powyższych lokomotywach oraz biorąc pod uwagę liczbę lokomotyw zmodernizowanych w stosunku do bazowych eksploatowanych w kraju, celem przedstawienia doboru zespołu silnikowo-prądnicowego wytypowano lokomotywę TEM2 (SM48). Lokomotywa ta ma budowę zbliżoną pod względem ostoi i układów biegowych z lokomotywą M62 (ST44) co pozwoli na opracowanie platformy lokomotyw o wspólnych rozwiązaniach technicznych zwiększających efektywność modernizacji spalinowych.

Platforma lokomotyw sześciosiowych na bazie lokomotywy TEM2/SM48 obejmuje cztery podstawowe kombinacje lokomotyw. Dwie lokomotywy o mocy 1800 kW i 1500 kW, każda może występować w wersji normalnotorowej i szerokotorowej.

Projekt modernizacji platformy lokomotyw zakładał m.in. [49] (rys. 6.1):

- pozostawienie bez znaczących zmian ostoi lokomotywy, która poddana zostanie naprawie głównej i modyfikacjom pozwalającym na zabudowę nowego układu nadwozia i zespołu prądnicowego,
- zmianę układu dźwigniowego hamulca na wózku w celu poprawienia skuteczności hamowania oraz zabudowę hamulca sprężynowego,
- wymianę nadwozia lokomotywy na zupełnie nowe o budowie modułowej z autonomiczną kabiną maszynisty,
- wymianę kompletnego zespołu prądnicowego,
- zabudowę nowych zespołów SN i NN,
- zabudowę nowoczesnych układów pomocniczych (sprężarki, wentylatorów silników trakcyjnych, układu chłodzenia) napędzanych silnikami prądu przemiennego i hydrostatycznymi,
- zabudowę nowoczesnego systemu sterowania mikroprocesorowego lokomotywy z układem rozproszonych sterowników.



Rys. 6.1. Widok lokomotywy SM48 (TEM2) przed modernizacją [49, 114]

Wytypowana lokomotywa TEM2 (SM48) posiada przestarzały silnik dwusuwowy typu PD1M przedstawiony na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Widok na zespół prądnicowy z silnikiem typu PD1M (przed modernizacją) [53]

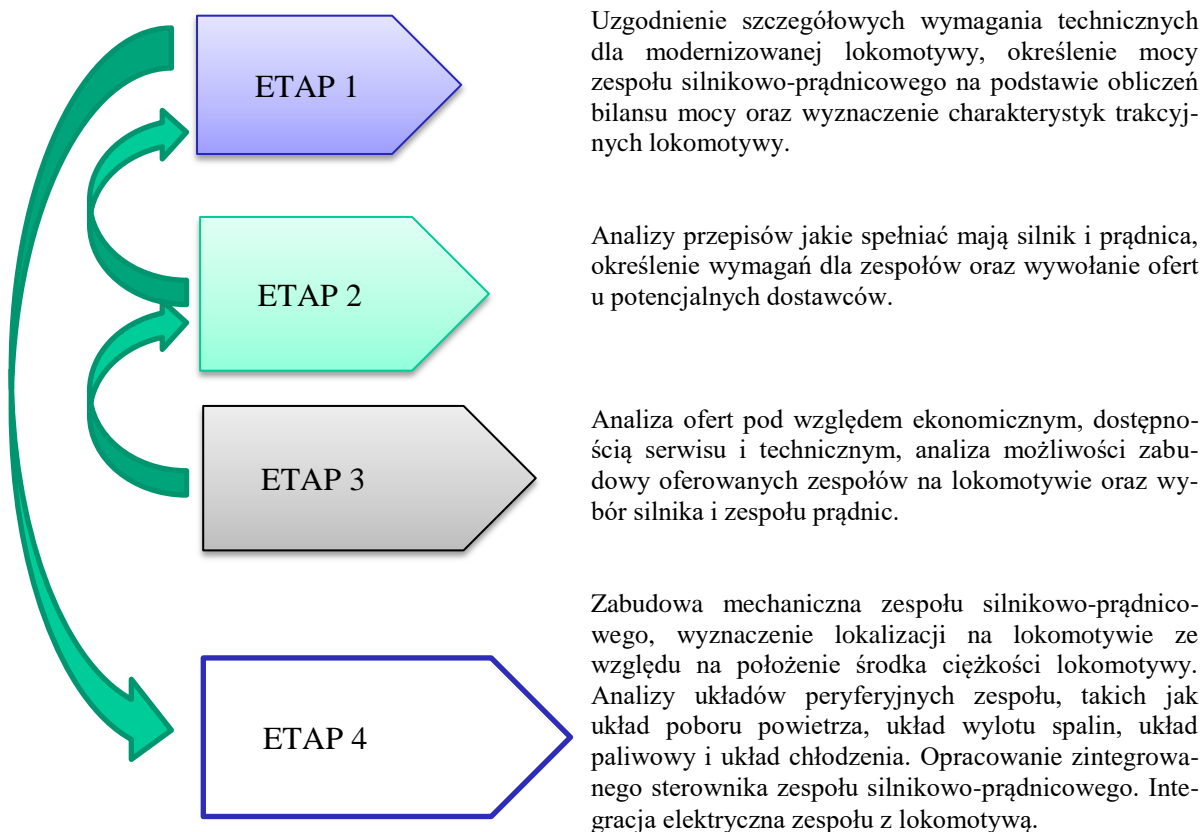
Zastosowane rozwiązania techniczne jak np. napędy układów pomocniczych przez wały Cardana także są mało efektywne i nie stosowane w nowoczesnych lokomotywach. Ponadto poziom komfortu w kabinie maszynisty lokomotywy bazowej TEM2 nie odpowiada obecnym standardom i wymaga zaprojektowania kabiny praktycznie od początku. Widok na pulpit sterowniczy w dotychczas eksploatowanej lokomotywie TEM2 (niezmodernizowanej) przedstawiono na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Widok na pulpit sterowniczy lokomotywy SM48/TEM2 [49]

## 6.2. Założenia metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego modernizowanych lokomotyw spalinowych

Procedurę doboru zespołu silnikowo-prądnicowego podzielono na kilka kluczowych etapów. Schemat blokowy etapów doboru zespołu silnikowo-prądnicowego przedstawiono na rys. 6.4.



Rys. 6.4. Schemat blokowy etapów doboru zespołu silnikowo-prądnicowego

W pierwszej kolejności przystępując do nowego projektu modernizacji lokomotywy należy uzgodnić z Zamawiającym szczegółowe wymagania techniczne zamówienia. Wymagania te w rzeczywistości opisują listę życzeń Zamawiającego interesując możliwości trakcyjnych lokomotywy, czyli długość oraz masy składów pociągów jakie lokomotywa będzie zdolna prowadzić. Ponadto we wspomnianych wymaganiach opisane są także prędkości maksymalne do osiągnięcia w różnych warunkach eksploatacji (tor suchy, mokry, różne pochylenia toru itd.). Podczas precyzowania warunków zamówienia, określane są także wszelkie wymagania dotyczące wyposażenia lokomotywy, które pomimo tego, że nie są przedmiotem niniejszej pracy, mają znaczący wpływ na pobór mocy z zespołu silnikowo-prądnicowego. W przypadku gdy projekt realizowany jest bez udziału Zamawiającego (dla hipotetycznego klienta) sytuacja wygląda podobnie, jednak wymagania określane są na podstawie doświadczenia zespołu projektującego i fabryki, która ma za zadanie zbudowanie prototypu. Podczas przygotowywania opisywanej metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego opracowano szczegółowe wymagania techniczne dla modernizowanej lokomotywy spalinowej na podstawie wymagań przetargowych różnych potencjalnych klientów oraz doświadczenia i uwag z innych projektów lokomotyw.

Po sprecyzowaniu wymagań, przystąpiono do opracowania wstępnego bilansu mocy lokomotywy. Bilans opracowano w oparciu o dostępne dane wstępnie wytypowanych urządzeń



do zabudowy w lokomotywie, które mają realizować różne funkcje określone w szczegółowych wymaganiach technicznych. Podczas opracowywania bilansu mocy analizowane jest zapotrzebowanie na moc poszczególnych układów niezbędnych do funkcjonowania lokomotywy oraz zespołu silnikowo-prądnicowego w zakresie dostępnej mocy trakcyjnej (mocy przenoszonej na koła w celu prowadzenia pociągu). Bilans mocy uwzględnia wszelki pobór mocy z silnika spalinowego w zakresie np. układu chłodzenia z napędem hydrostatycznym wentylatorów chłodnic, czy poboru mocy przez prądnicę pomocniczą do zasilania układów pomocniczych (zasilanie układów niezbędnych do funkcjonowania lokomotywy – tzw. potrzeby własne). Przy doborze poszczególnych zespołów uwzględnia się sprawność mechaniczna i elektryczna urządzeń, która generuje straty mocy. Oczywiście bilans mocy lokomotywy opracowano dla różnych scenariuszy zasilania układów, biorąc pod uwagę procedury rozruchowe silnika czy warunki atmosferyczne oraz długości składów wagonów. Uwzględniono jakie urządzenia muszą pracować przed uruchomieniem lokomotywy obniżając napięcie akumulatorów, jakie układy wymagają ciągłego zasilania od momentu uruchomienia zespołu silnikowo-prądnicowego oraz układy, które włączają się sporadycznie. Głównym celem opracowania takich scenariuszy jest zapewnienie, aby pobierana moc z silnika spalinowego była jak najmniejsza na potrzeby własne, celem osiągnięcia maksymalnej mocy na cele trakcyjne. Bilans mocy ulega ciągłej aktualizacji w trakcie procesu doboru zespołu silnikowo-prądnicowego i uwzględnia wyniki doboru poszczególnych zespołów peryferyjnych oraz wyniki obliczeń, takich jak m.in. obliczenia trakcyjne, które stanowią kolejny etap opisywanego procesu.

Obliczenia możliwości trakcyjnych lokomotywy mają na celu wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych lokomotywy, czyli określenie maksymalnej siły na haku lokomotywy dla różnych warunków pracy. Dane wejściowe do obliczeń stanowi bilans mocy dla najbardziej niekorzystnego układu poboru mocy, dla którego wszystkie odbiorniki prądu pracują jednocześnie na pełnej mocy. Oczywiście taka sytuacja praktycznie nie występuje w rzeczywistej eksploatacji, jednak tak przyjęte dane powodują niskie ryzyko niedoszacowania mocy zespołu silnikowo-prądnicowego. Charakterystyki trakcyjne wyznacza się dla szeregu współczynników, z których najważniejszymi są współczynnik tarcia, wartość pochylenia toru czy wartość wymaganej nadwyżki mocy dla wytypowanych punktów pracy zespołu silnikowo-prądnicowego. Charakterystyki trakcyjne przedstawiają możliwości trakcyjne lokomotywy, czyli opisują m. in. jakie możliwe prędkości maksymalne osiągnie lokomotywa z określonymi masami pociągów. Oczywiście obliczenia trakcyjne mają także za zadanie sprawdzenie poprawności doboru zespołu silnikowo-prądnicowego na wcześniejszych etapach i wskazanie ewentualnej konieczności korekty mocy silnika i prądnicy trakcyjnej. Etap wyznaczenia charakterystyk trakcyjnych i sprzężenie zwrotne z bilansem mocy, pozwala głównie na określenie zakresu mocy silnika i prądnicy.

Kolejnym etapem metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego jest szeroka, wielokierunkowa analiza obowiązujących przepisów i norm. Szczególną uwagę skupiono na normach dotyczących silników spalinowych i prądnic trakcyjnych. Wzięto także pod uwagę specyficzne kolejowe wymagania normatywne w zakresie zespołów silnikowo-prądnicowych i układów peryferyjnych. Analizy powyższe mają na celu opracowanie wymagań dla silnika i prądnicy oraz rozpoczęcie wywoływania ofert u potencjalnych dostawców tych zespołów.

Etap analizy ofert i rozmowy techniczne temu towarzyszące wymagają szerokiej wiedzy dotyczącej integracji silnika spalinowego z prądnicą i całego zespołu silnikowo-prądnicowego z lokomotywą. Na tym etapie konieczne jest przeprowadzenie szerokich i wnikliwych analiz pozwalających na precyzyjne określenie kompletacji silnika i prądnicy oraz urządzeń peryferyjnych, jak układu chłodzenia czy układu oczyszczania spalin. Podczas niniejszego etapu wykonano: analizy kosztów cyklu eksploatacji silnika i prądnicy uwzględniające program obciążeń silnika spalinowego, analizy metody oczyszczania spalin, analizy zabudowy mecha-

nicznej zespołu i określenie dopuszczalnych zmian w ramie lokomotywy, analizy masy, analizy dostępności serwisu oraz analizy ekonomicznej. W wyniku powyższych analiz wytypowano wstępnie, silnik spalinowy i zespół prądnic, które ponownie poddano analizom w ramach korekty bilansu mocy i charakterystyk trakcyjnych. Pozytywny wynik tych analiz pozwolił na podjęcie kolejnych prac mających na celu ostateczny dobór zespołu silnikowo-prądnicowego.

Ostatni etap polega na mechanicznej zabudowie wytypowanego zespołu silnikowo-prądnicowego. W związku z dużą masą zespołu ważnym jest wyznaczenie odpowiedniej lokalizacji na lokomotywie ze względu na konieczność równomiernego rozmieszczenia mas zespołów. W trakcie procesu zabudowy analizowane są zespoły i układy peryferyjne takie jak: układ poboru powietrza, układ wylotu spalin, układ chłodzenia silnika spalinowego. Równoległe prowadzone są analizy mające na celu elektryczne i elektroniczne zintegrowanie zespołu z lokomotywą. Etap ten ma także na celu opracowanie zintegrowanego sterownika zespołu silnikowo-prądnicowego dla wytypowanego silnika i zespołu prądnic.

Opisana metoda doboru zespołu silnikowo-prądnicowego opiera się na wieloletnim doświadczeniu autora w modernizacji lokomotyw spalinowych i jest nowatorska, ponieważ modernizacje lokomotyw na rynku krajowym opierały się do tej pory głównie na zastępowaniu istniejącego silnika spalinowego nowoczesną jednostką, w celu zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne. Należy zaznaczyć, że często bez zmian pozostawiano przestarzałą technicznie prądnicę trakcyjną. Powyżej opisana metoda pozwala na precyzyjny dobór nowoczesnego zespołu silnikowo-prądnicowego z prądnicą trakcyjną skonfigurowaną indywidualnie dla dowolnej modernizowanej lokomotywy.

### 6.3. Opracowanie szczegółowych założeń projektu

Podczas przygotowywania opisywanej metody doboru zespołu silnikowo-prądnicowego opracowano szczegółowe wymagania techniczne i zakres modernizacji lokomotywy spalinowej na podstawie wymagań różnych potencjalnych klientów użytkujących lokomotywy typu TEM2. Wymagania zaczerpnięto z postępowań przetargowych oraz uzupełniono na podstawie doświadczenia i uwag z innych projektów lokomotyw.

Zakres i wymagania techniczne do modernizacji lokomotywy spalinowej obejmują szereg punktów od oceny zgodności konstrukcji zmodernizowanej lokomotywy z wymaganiami prawnymi po wykaz dokumentacji konstrukcyjnej i technicznej oraz formę jej przekazania Zamawiającemu. Wymagania normatywne opisano w kolejnym punkcie pracy, natomiast w niniejszym opisano zakres szczegółowych założeń projektu.

Głównym punktem założeń projektu są wymagania eksploatacyjne lokomotywy po modernizacji i tutaj określane są główne parametry lokomotywy, jak np. przeznaczenie (towarowa do ciężkich prac manewrowych i ruchu liniowego), maksymalna prędkość eksploatacji oraz bardzo ważny parametr, czyli masa całkowita lokomotywy. Wymagania eksploatacyjne obejmują także określone warunki środowiskowe eksploatacji w tym temperatura otoczenia, największa wysokość nad poziomem morza, maksymalna wilgotność względna powietrza oraz zanieczyszczenie powietrza.

Eksploatacja to także wymagania dotyczące bezpieczeństwa i utrzymania lokomotywy po modernizacji w zakresie:

- bezpieczeństwo przeciw wykolejeniu – musi być zapewnione na poziomie nie mniejszym jak przed modernizacją,
- właściwości układu biegowego lokomotywy zmodernizowanej – muszą być zapewnione co najmniej na poziomie przed modernizacją,
- wymagania wynikające z przewidywanego zakresu obsługi i napraw – możliwość łatwej lokalizacji uszkodzeń zespołów i podzespołów, wykrywalność uszkodzeń i stanu osią-

gania wartości granicznych określonych parametrów technicznych, dzięki stosowaniu diagnostyki,

- wymagania wynikające z konieczności zapewnienia technologiczności naprawczej pojazdu szynowego – dobra dostępność do elementów i podzespołów lokomotywy, mała pracochłonność wymiany podzespołów (nie przekraczająca 3–5 roboczogodzin), budowa modułowa ułatwiająca demontaż i montaż poszczególnych bloków oraz unifikacja części dla ograniczenia niezbędnych narzędzi i oprzyrządowania,
- współczynnik gotowości technicznej  $G_t$  (przy uwzględnieniu przeglądów i napraw planowych):  $G_t \geq 0,9$  (gotowość techniczna jest zdefiniowana jako iloraz liczby dni lub godzin, w których maszyna była gotowa do pracy i liczby dni lub godzin, gdy zgodnie z planem pracy maszyna powinna być gotowa do jej wykonywania),
- system diagnostyki w procesie utrzymania – realizacja czynności obsługowych na podstawie danych z systemu diagnostycznego,
- minimalny okres eksploatacji lokomotywy po modernizacji – 30 lat.

Szczegółowe wymagania techniczne opisują także wymagania konstrukcyjne dla poszczególnych obszarów podlegających modernizacji:

- Rama i nadwozie – modyfikacja ramy lokomotywy i wózków, całkowicie nowa konstrukcja nadwozia lokomotywy. Lokomotywa jednokabinowa, dwupulpitowa, układ przedziałów maszynowych o maksymalnie obniżonej wysokości zdecydowanie poprawiających widoczność z kabiny maszynisty, sposób zabudowy podzespołów powinien zapewnić łatwy dostęp do nich i silnika spalinowego.
- Kabina maszynisty – kabina maszynisty musi spełniać wymagania bezpieczeństwa pracy i ergonomii określone normami kolejowymi i kartami UIC. Określono szczegółowe wymagania dotyczące m.in. widoczności, układu wnętrza, izolacji i wyłożeń, podłogi, ogrzewania i klimatyzacji, budowy pulpitu maszynisty, foteli maszynisty, ergonomii, funkcji kontroli czujności maszynisty oświetlenia wewnętrznego oraz wyposażenia socjalnego.
- Obwody elektryczne pomocnicze – zastosowanie rozwiązań w zakresie zabezpieczenia na lokomotywie następujących napięć zasilania:
  - $3 \times 400 \text{ V}$  – do napędów pomocniczych i innych urządzeń,
  - $230 \text{ V AC } 50 \text{ Hz}$  – zasilanie urządzeń oraz gniazdo zasilania w kabinie maszynisty,
  - $24 \text{ V DC}$  – zasilanie urządzeń sterowania, styczników o napędzie elektromagnetycznym, urządzeń zabezpieczenia ruchu pociągu i łączności, oświetlenia, wycieraczek i innych urządzeń elektrycznych.
- Instalacja pneumatyczna i hamulce lokomotywy – określono wymagania funkcjonalne, bezpieczeństwa, kontroli hamowania, skuteczności hamowania oraz zabezpieczenia przed poślizgiem kół.
- Wózki jezdne.
- Światła zewnętrzne oraz dźwiękowe i wizualne urządzenia ostrzegawcze.
- Radiołączność.
- System monitoringu wizyjnego zapewniających obserwację szlaku oraz obrazów wyświetlanych na sygnalizatorach z funkcją audio rozmów (głosu) prowadzonych w kabinie maszynisty.
- Zbiornik paliwa, układu pomiaru ilości i zużycia paliwa.
- Urządzenia bezpieczeństwa ruchu oraz system przeciwpożarowy.
- System sterowania i diagnostyki oraz wyposażenie elektryczne i elektroniczne – określono wymagania m.in. dla sterowania zespołem napędowym przez komputer pokładowy w czasie rzeczywistym, układ sterowania powinien zapewnić najlepszy przebieg zużycia paliwa i pełne wykorzystanie mocy silnika spalinowego w jego całym użytkowym

zakresie prędkości obrotowych, układy sterowania pracą zespołu napędowego powinny automatycznie ograniczyć wpływ umiejętności maszynisty na zużycie paliwa, układy te powinny zapewnić automatyczne sterowanie pracą pozostałych urządzeń lokomotywy z funkcjami dozoru i diagnostyki.

Ponadto określono wymagania dla głównych zespołów lokomotywy, w skład których wchodzi: silnik spalinowy, prądnica główna, prądnica pomocnicza, wentylatory silników trakcyjnych, sprężarka powietrza, napęd wentylatorów zespołów chłodziw, podgrzewacz cieczy chłodzącej.

Biorąc jednak pod uwagę przedmiot niniejszej pracy skupiono się na wymaganiach dotyczących silnika spalinowego i zespołu prądnic.

Wymagania dotyczące silnika spalinowego określono na poziomie ogólnym, czyli sprecyzowano, że silnik ma być czterosurowy o mocy co najmniej 1800 kW, określono maksymalną prędkość obrotową silnika na poziomie 1800 obr/min, elektroniczny regulator prędkości obrotowej, jednostkowe zużycie paliwa nie większe jak 212,5 g/kWh, zużycie oleju nie większe niż 0,5% zużycia paliwa oraz emisję substancji szkodliwych spalin na poziomie EURO IIIB. Powyższe wymagania pozwalają na pewną dowolność w doborze producenta silnika, jednak gama dostępnych jednostek z homologacją kolejową jest wąska i dlatego jak opisano w dalszej części pracy skupiono się głównie na dwóch producentach, mianowicie MTU i CUMMINS.

Wymagania dotyczące zespołu prądnic przedstawiono bardzo ogólnie, w zasadzie określono sposób połączenia prądnicy głównej z silnikiem za pomocą kołnierza i sprzęgła membranowego oraz napęd prądnicy pomocniczej bezpośrednio z wału korbowego silnika, kołnierzowo z prądnicą główną i sprzęgłem elastycznym z wirnikiem prądnicy głównej. Określono moce maksymalne: prądnica główna 1800 kW za prostownikiem, prądnica pomocnicza 120 kVA przy 1800 obr/min. Pozostałe parametry prądnic pozostawiono do określenia podczas uzgodnień z dostawcą.

W niniejszym rozdziale opisano szczegółowe założenia projektu modernizacji lokomotywy spalinowej dotyczące wybranego zakresu. W trakcie realizacji doboru zespołu silnikowo – prądnicowego należy kierować się uzgodnionymi wymaganiami a zmiany wymagają odstępowania Zamawiającego w przypadku stwierdzenia, że dane wymaganie jest nieosiągalne przy obecnym stanie techniki lub koszt wprowadzenia odpowiedniego rozwiązania będzie niewspółmiernie wysoki do uzyskanych efektów. W zakres opracowanych szczegółowych założeń projektu wchodzi także wymagania normatywne, które opisano w kolejnym rozdziale.

#### **6.4. Określenie wymagań normatywnych podczas homologacji modernizowanej lokomotywy**

Dla zmodernizowanego pojazdu kolejowego przeznaczonego do eksploatacji na krajowej sieci kolejowej o szerokości toru 1435 mm konieczne jest uzyskanie nowego zezwolenia na dopuszczenie do eksploatacji, o ile nie wydano przez Prezesa UTK zgody na odstępowanie od uzyskania zezwolenia dla pojazdu zmodernizowanego wg ustawy o transporcie kolejowym.

Należy przy tym podkreślić, że z punktu widzenia możliwości wydania zezwoleń na dopuszczenie do eksploatacji pojazdu zmodernizowanego, ocena takiego pojazdu w chwili obecnej odbywa się na podstawie Rozporządzenia Komisji (UE) NR 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej tzw. TSI LOC&PAS [98].

Dla pojazdów zmodernizowanych TSI LOC&PAS w pkt 7.1.2.3 [98] określa zasady stanowiące podstawę jej stosowania. Najważniejsze z tych zasad są następujące:

- części i podstawowe parametry podsystemu, na które prace modernizacyjne nie miały wpływu, są wyłączone z oceny zgodności z przepisami niniejszej TSI,
- nowa ocena pod kątem wymagań niniejszej TSI jest wymagana tylko dla tych parametrów podstawowych w niniejszej TSI, które ulegają zmianie w wyniku danej modyfikacji,
- w przypadku gdy w trakcie modernizacji nie można spełnić danego wymogu TSI ze względów ekonomicznych, modernizacja jest dopuszczalna, o ile oczywiste jest, że nastąpiła poprawa parametru podstawowego w kierunku określonym w TSI.

Nie ma to jednak wpływu na konieczność stosowania pozostałych TSI, które mają zastosowanie dla danego pojazdu i obejmują:

- TSI NOI – Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1304/2014 z dnia 26 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Tabor kolejowy — hałas”, zmieniające decyzję 2008/232/WE i uchylające decyzję 2011/229/UE [100],
- TSI CCS – Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/919 z dnia 27 maja 2016 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie podsystemów „Sterowanie” systemu kolei w Unii Europejskiej [97],
- TSI SRT – Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1303/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie aspektu „Bezpieczeństwo w tunelach kolejowych” systemu kolei w Unii Europejskiej [99],
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej [25],

W odniesieniu do niemodernizowanej części pojazdu, możliwe jest nadal ograniczenie zakresu parametrów koniecznych do sprawdzenia, zgodnie z § 13 rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 25 lutego 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei (Dz. U. z 2016 r., poz. 254) [102].

Prezes Urzędu Transportu Kolejowego (UTK) w przypadku przyznania odstępstwa od obowiązku stosowania Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności (TSI) lub też w przypadkach:

- sieci kolejowych albo ich części, nieobjętych obowiązkiem stosowania TSI lub
- typów urządzeń i typów budowli mających wpływ na poziom bezpieczeństwa ruchu kolejowego, nieujętych we właściwej TSI jako składniki interoperacyjności lub
- szczególnych i punktów otwartych dla których konieczne jest zastosowanie przepisów technicznych nie zawartych we właściwej TSI

ustala listę właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei.

W zakresie wyznaczenia krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych opublikowano Listę Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego, w sprawie właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań interoperacyjności systemu kolei.

Listę wydano na podstawie rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 27 grudnia 2012 r. w sprawie wykazu właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei (Dz. U. poz. 43) [104]. Lista Prezesa UTK obejmuje wszelkie wymagania normatywne obowiązujące w Polsce takie jak TSI, normy PN-EN oraz karty UIC.

W związku z powyższym, wszystkie zespoły i urządzenia przeznaczone do zabudowy na lokomotywie muszą spełniać wymagania odbiorcze wynikające z odpowiednich przedmiotowych norm obowiązujących dla taboru kolejowego.

Wyposażenie elektryczne lokomotywy powinno być tak zamontowane, aby był łatwy dostęp przy regulacji, konserwacji do aparatów i urządzeń. Wszystkie aparaty i urządzenia elektryczne winny być wykonane i zabudowane zgodnie z dokumentacją konstrukcyjną.

Poza tym całe wyposażenie elektryczne i elektroniczne lokomotywy, musi spełniać wymagania ogólnych norm obowiązujących dla taboru dotyczących przede wszystkim:

- warunków środowiskowych (PN-EN 50125-1 [80], PN-EN 50155 [83]),
- kompatybilności elektromagnetycznej (PN-EN 50121-1 [73], PN-EN 50121-2 [74], PN-EN 50121-3-1 [75], PN-EN 50121-3-2 [76], PN-EN 50121-4 [77]),
- budowy, wyposażenia i bezpieczeństwa użytkownika (PN-EN 50124-1 [78], PN-EN 50124-2 [79], PN-EN 50128 [81], PN-EN 50129 [82], PN-EN 50163 [84], PN-EN 60077-1 [85], PN-EN 60077-2 [86], PN-EN 60077-3 [87], PN-EN 60077-4 [88], PN-EN 60077-5 [89], PN-EN 60529 [90]).

Silnik spalinowy obecnie musi spełniać wymagania w zakresie emisji zanieczyszczeń wg etapu IIIB dyrektywy 2004/26/WE [23] (Rozporządzenie Ministra Gospodarki Dz.U. 2014 poz.588 z dnia 30 kwietnia 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań dla silników spalinowych w zakresie ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i cząstek stałych przez te silniki) [101]. Wymagana jest także deklaracja gotowości sprzedaży silnika od 01.01.2021 r. spełniającego etap V wg rozporządzenia (UE) 2016/1628 [96].

Układ sterowania napędu i układów pomocniczych modernizowanej lokomotywy powinien być realizowany za pośrednictwem systemu mikroprocesorowego. Poszczególne sterowniki mikroprocesorowe przewidziane do zabudowy i pracy powinny być w sieciach CAN w układzie rozproszonym.

Sieć komunikacyjna powinna składać się z magistrali pojazdu (dla pojedynczej lokomotywy) i magistrali pociągu (dla dwóch połączonych elektrycznie i mechanicznie lokomotyw). Magistrala pojazdu powinna umożliwiać komunikację między sterownikami lokomotywy, a dzięki magistrali pociągu umożliwić jazdę kilku lokomotyw.

Centralną częścią lokomotywy jest kabina maszynisty, z której wydawane powinny być dyspozycje do poszczególnych urządzeń wykonawczych. Przełączniki, manipulatory i panele operatorskie na pulpitych przednich, panelach pulpitych i w szafkach kabinowych powinny być podłączone do sterowników pulpitych. Sterowniki pulpitych powinny przysyłać informację do sterownika napędu (trakcji) lokomotywy.

Większość sygnałów sterujących przesyłana powinna być po sieci CAN, natomiast sygnały sprzętowe wejściowe i wyjściowe tzw. Sygnały binarne o napięciu na poziomie baterii akumulatorów, tzn. 24 V DC.

W modernizowanej lokomotywie układ sterowania powinien zapewniać:

- kontrolowany rozruch silnika spalinowego,
- pełne wykorzystanie mocy silnika,
- wymagany przebieg zużycia paliwa,
- odpowiednią moc prądnicy głównej i pomocniczej (w całym zakresie prędkości obrotowej silnika spalinowego), wystarczającą do zasilania wszystkich układów elektrycznych w lokomotywie,
- pewne i stabilne zasilanie oraz sterowanie i kontrolę układów pomocniczych,
- dozоровanie oraz diagnozowanie układów i urządzeń elektrycznych.

Parametry oświetlenia (równomierność, rozkład iluminacji, barwa światła, natężenie oświetlenia) powinny odpowiadać wymaganiom norm PN-EN 12464-1 [65], PN-EN 13272-1 [67] i ZN-01/PKP-3512-07 [61]. Zastosowane oprawy oświetleniowe powinny spełniać wymagania normy PN-EN-60598-1 [91].

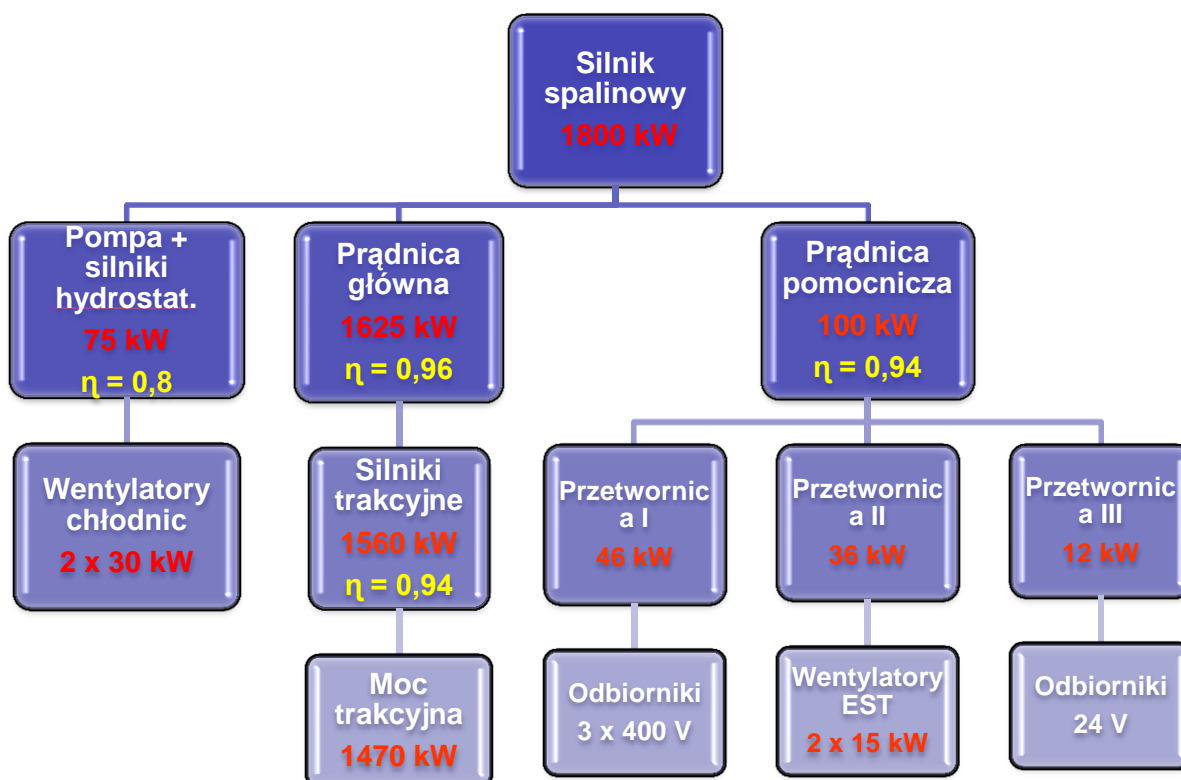
W ogólnym zakresie oświetlenie zewnętrzne powinno spełniać wymagania zawarte w specyfikacji LOC&PAS [98]. Oświetlenie zewnętrzne w sprawach dotyczących wyposażenia, rozmieszczenia, właściwości fotometrycznych, sterowania światłami oraz ich działania po-

winno odpowiadać wymaganiom podanym w normach: PN-EN 15153-1 [70], PN-K-88200 [93], kartach UIC 534 [30], UIC 651 [33] oraz Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 18 lipca 2005 r. w sprawie ogólnych warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji [103]. Instalacja zasilająca oświetlenie powinna spełniać wymagania norm ZN-01/PKP-3512-06 [60] i ZN-01/PKP-3512-07 [61].

Zastosowane w lokomotywie sygnały dźwiękowe w zakresie wymagań ogólnych, poziomu dźwięku, zabezpieczenia przed uszkodzeniem i sterowania powinny uwzględniać wymagania norm: PN-EN 15153-1 [70], PN-EN 15153-2 [71], PN-K-88100 [92], karty UIC 644 [32] oraz specyfikacji LOC&PAS pkt 4.2.7.2 [98]. Lokomotywę wyposażono w pokładowe komponenty polskich systemów łączności radiowej i bezpiecznej kontroli jazdy odpowiednio do specyfikacji TSI CCS [97]. Analizy norm i przepisów mają na celu opracowanie wymagań m.in. dla silnika i prądnicy oraz rozpoczęcie wywoływania ofert u potencjalnych dostawców tych zespołów.

### 6.5. Analiza bilansu mocy modernizowanej lokomotywy spalinowej

Wyznaczenie zapotrzebowania energetycznego obwodów trakcyjnych i pomocniczych lokomotywy spalinowej jest warunkiem koniecznym do opracowania charakterystyki trakcyjnej lokomotywy. Ponadto na jej podstawie możliwe jest opracowanie wymagań do zamówienia urządzeń, podzespołów i aparatów niezbędnych do zabudowy w modernizowanej lokomotywie. Analizowany układ lokomotywy typu 19D składa się z generatora prądowłórczego, wyposażonego w silnik spalinowy, prądnicę główną oraz pomocniczą, silniki trakcyjne, zespół przetwornic oraz układów pomocniczych. Na schemacie blokowym (rys. 6.5) przedstawiono strukturę zasilania obwodów trakcyjnych i pomocniczych analizowanej lokomotywy spalinowej.



Rys. 6.5. Schemat blokowy rozdziału mocy silnika spalinowego na modernizowanej lokomotywie typu 19D

Na podstawie schematu blokowego dokonano analizy poszczególnych poborów mocy.

### **Bilans mocy silnika spalinowego:**

Analizowany silnik spalinowy MTU 12V 4000 R84 ma moc 1800 kW. Moc silnika spalinowego zostaje podzielona na pompę hydrauliczną układ chłodzenia silnika, napęd prądnicy głównej oraz napęd prądnicy pomocniczej.

- Pompa hydrauliczna napędu wentylatorów zespołu chłodnic ma sprawność  $\eta = 0,8$  i pobiera z silnika moc 75 kW, natomiast moc dwóch wentylatorów układu chłodzenia wynosi  $2 \times 30$  kW,
- Prądnica główna połączona jest z silnikiem za pomocą sprzęgła membranowego i pobiera z silnika moc 1625 kW, a sprawność prądnicy wynosi  $\eta = 0,96$ ,
- Prądnica pomocnicza jest połączona przez sprzęgło elastyczne z prądnicą główną i wspólnie tworzy zespół prądnic. Sprawność prądnicy pomocniczej wynosi  $\eta = 0,94$ , moc pobierana z silnika wynosi 100 kW.

### **Bilans mocy obwodu wysokiego napięcia (trakcyjnego):**

Obwód wysokiego napięcia składa się z prądnicy głównej synchronicznej wyposażonej w prostownik oraz silników trakcyjnych prądu stałego.

- Prądnica główna + prostownik posiada łączną sprawność  $\eta = 0,98 \times 0,98 = 0,96$ , moc maksymalna prądnicy za prostownikiem wynosi 1625 kW przy prędkości obrotowej 1800 obr/min,
- Silniki trakcyjne prądu stałego ED118 A o mocy maksymalnej 305 kW [8] w analizowanym układzie wykorzystywane są do mocy 235 kW. Sprawność silników trakcyjnych wynosi  $\eta = 0,94$ , a moc całkowita sześciu silników trakcyjnych w układzie  $6 \times 1$  wynosi 1560 kW. Moc trakcyjna dostępna na kołach lokomotywy wynosi 1470 kW.

### **Bilans mocy obwodów pomocniczych**

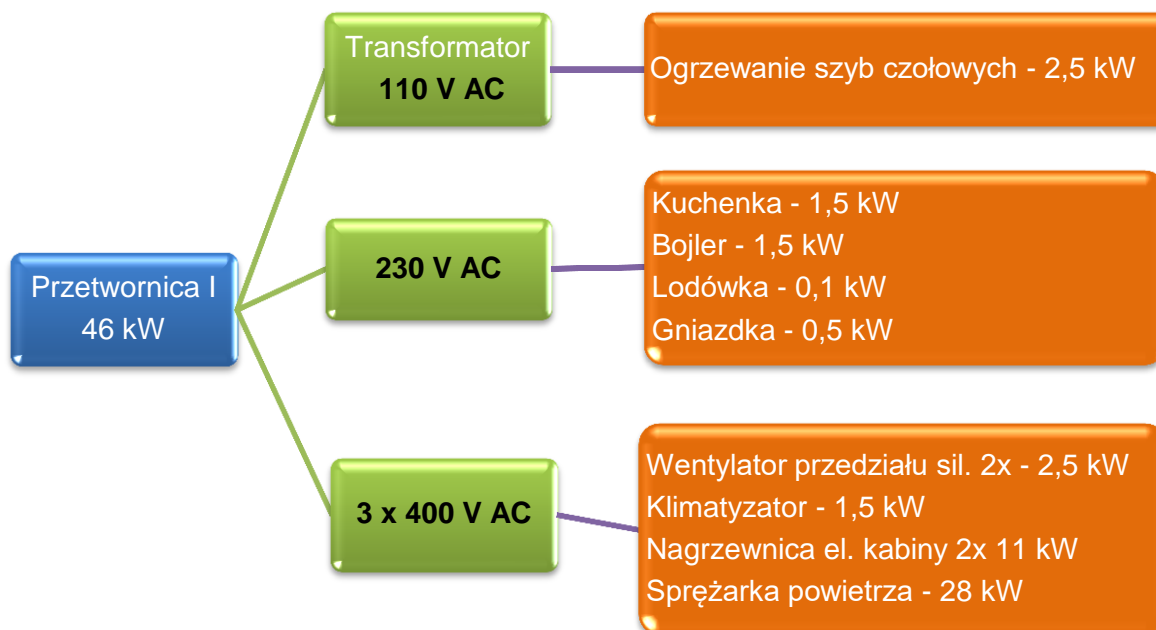
Zasilanie obwodów pomocniczych zapewnia prądnica pomocnicza oraz przetwornice statyczne.

- Prądnica pomocnicza synchroniczna  $3 \times 450$  V AC o mocy 100 kW przy sprawności  $\eta = 0,94$ ,
- Zespół przetwornic wyposażony jest w trzy przetwornice statyczne:
  - przetwornica I,  $3 \times 400$  V AC, częstotliwość  $f = 50$  Hz ma moc 46 kW i sprawność  $\eta = 0,94$ ,
  - przetwornica II,  $3 \times 0-400$  V AC, częstotliwość  $f = 0-50$  Hz ma moc 36 kW i sprawność  $\eta = 0,94$ ,
  - przetwornica III, 24 V DC ma moc 12 kW i sprawność  $\eta = 0,94$ .

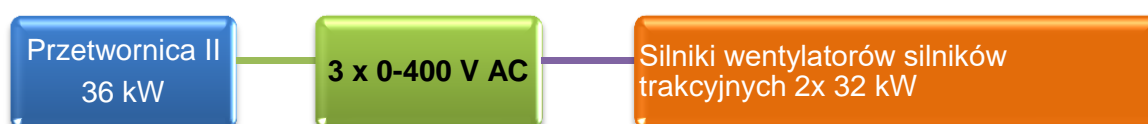
Przetwornice statyczne zasilają niezależne odbiorniki o różnych napięciach pracy. Na rysunkach 6.6–6.8 przedstawiono schematy blokowe z podziałem układów zasilanych przez poszczególne przetwornice.

Przedstawione obliczenia bilansu mocy dotyczą kompletacji urządzeń zabudowanych w lokomotywie 19D. Bilans mocy stanowi podstawę doboru mocy i prądów zespołów przekształtnikowych, aparatów łączeniowych i odbiorników. Na podstawie wyznaczonego bilansu mocy dokonano wyznaczenia charakterystyk trakcyjnych lokomotywy.

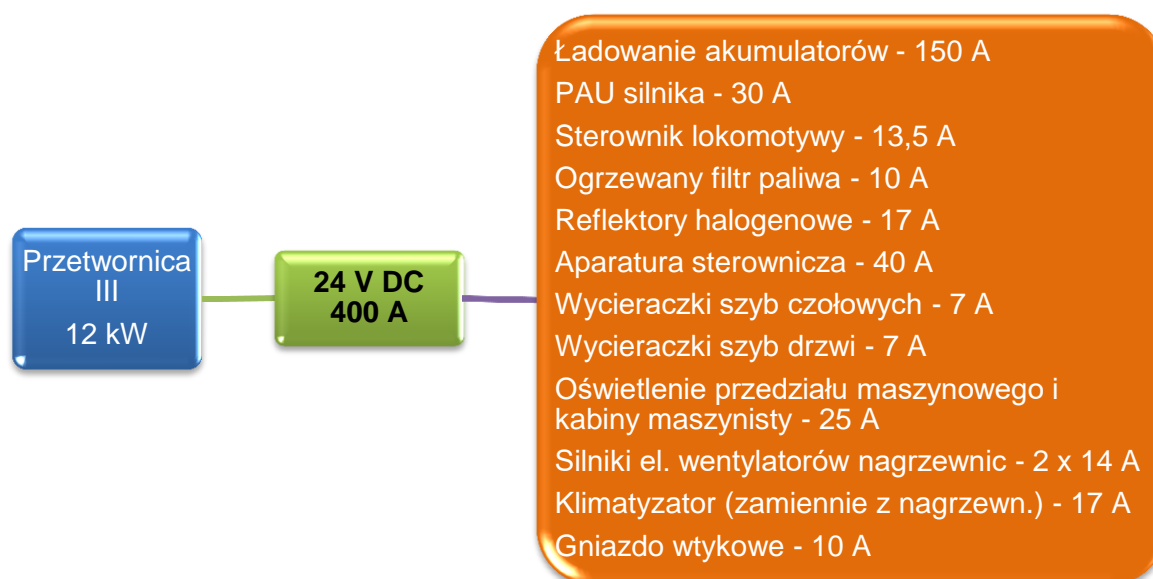




Rys. 6.6. Schemat blokowy rozdziału mocy dla przetwornicy I



Rys. 6.7. Schemat blokowy rozdziału mocy dla przetwornicy II



Rys. 6.8. Schemat blokowy rozdziału mocy dla przetwornicy III

## 6.6. Wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych lokomotywy

Wyznaczone zapotrzebowanie energetyczne obwodów trakcyjnych i pomocniczych lokomotywy spalinowej pozwoliło na określenie charakterystyki trakcyjnej lokomotywy. Oblicze-

nia trakcyjne wykonano dla zmodernizowanej lokomotywy manewrowej 19D bazującej na układach jezdnych i napędowych lokomotywy typu TEM2 z silnikami trakcyjnymi ED118A przygotowanymi do realizacji mocy ok. 245 kW (tabela 6.1).

Obliczenia te wykonano w fazie koncepcji w oparciu o następujące założenia i dane wejściowe:

- lokomotywa 19D wyposażona w silnik spalinowy o mocy 1800 kW,
- wyposażona w dwa napędne wózki trakcyjne, trójosiowe,
- wózki posiadają po trzy elektryczne silniki trakcyjne zainstalowane przy każdym zestawie kołowym,
- każdy z silników będzie zasilany prądem z prostownika w systemie równoległym.

Tabela 6.1. Dane wyjściowe do obliczeń [62]

Maksymalna prędkość eksploatacyjna	$V = 100 \text{ km/h}$
Masa lokomotywy przypadający na zestaw kołowy	$Mzk_2 = 19,3 \text{ t}$
Nacisk pionowy zestawu kołowego na szyny	$2Q = Mzk \cdot g = 190 \text{ kN}$
Baza lokomotywy	$2a^* = 8,6 \text{ m}$
Baza wózka	$2a^+ = 4,2 \text{ m}$
Średnica nominalna kół jezdnych	$Dk = 1,05 \text{ m}$
Zakładany maksymalny współczynnik przyczepności kół	$miT = 0,4$
Wsp. przełożenia przekładni trakcyjnej ( $z_2/z_1 = 75/17$ , $m = 10 \text{ mm}$ )	$ip = 4,41$
Wsp. maksymalnego osłabienie pola stojana silnika trakcyjnego	38%
Maksymalny prąd pracy długotrwałej silnika trakcyjnego	472 A
Maksymalne napięcie układu zasilania elektrycznego	750 V AC
Silnik spalinowy do napędu prądnicy głównej	MTU 12V4000R84
Przewidywana moc elektryczna dostępna do celów trakcyjnych	1470 kW

Na bazie charakterystyki prądowej elektrycznego silnika trakcyjnego ED118A i przy założeniu, że możliwości tego silnika są w pełni wykorzystane do 245 kW mocy elektrycznej, określono charakterystyki siły pociągowej całej lokomotywy w funkcji prędkości jazdy.

W tabeli 6.2 zaprezentowano parametry agregatu prądotwórczego i oporów ruchu wybranych pociągów. Parametry te pozwoliły na wyznaczenie charakterystyki pociągowej lokomotywy, którą przedstawiono na rys. 6.9. Na niniejszym rysunku wyznaczono także charakterystykę trakcyjną teoretyczną lokomotywy przy pełnym wykorzystaniu mocy silników trakcyjnych  $6 \times 245 \text{ kW}$ , którą przedstawiono linią FL6\*245kW. Następnie biorąc pod uwagę maksymalne napięcie dostępne w układzie zasilania silników trakcyjnych na poziomie 750V wyznaczono charakterystykę trakcyjną lokomotywy przy rzeczywistym wykorzystaniu mocy silników trakcyjnych co zobrazowano linią FLre\_750V. W kolejnym etapie obliczeń wyznaczono opory ruchu i zużycie energii przez lokomotywę dla wybranych pociągów co zaprezentowano na rys. 6.10–6.12.

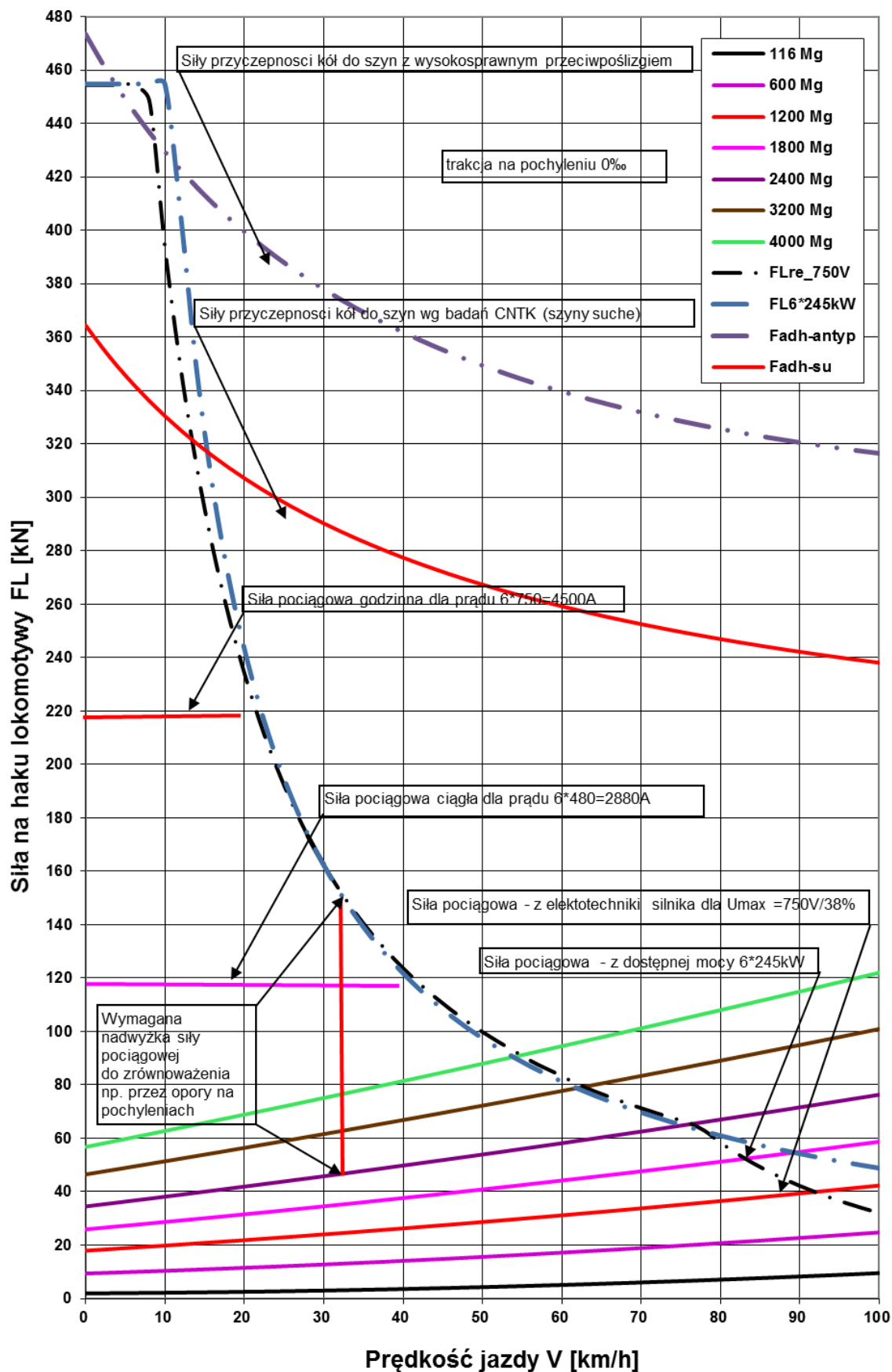
W dalszej części przedstawiono metodykę pozwalającą wyznaczyć maksymalną prędkość jazdy dla pociągu o masie 2400 Mg oraz pochyleniu linii kolejowej 4‰.

Maksymalną prędkość jazdy określa siła pociągowa równoważąca całkowite opory jazdy pociągu. Na całkowite opory pociągu składają się opory związane z pochyleniem linii kolejowej oraz jazdą. Opory pochylenia linii wyznacza się dla zadanego pochylenia oraz masy pociągu na wykresie oporów pociągów w funkcji pochylenia na liniach kolejowej (rys. 6.10). Dla przyjętego przykładu wartość siły oporu związana z pochyleniem linii wynosi ok. 100 kN.

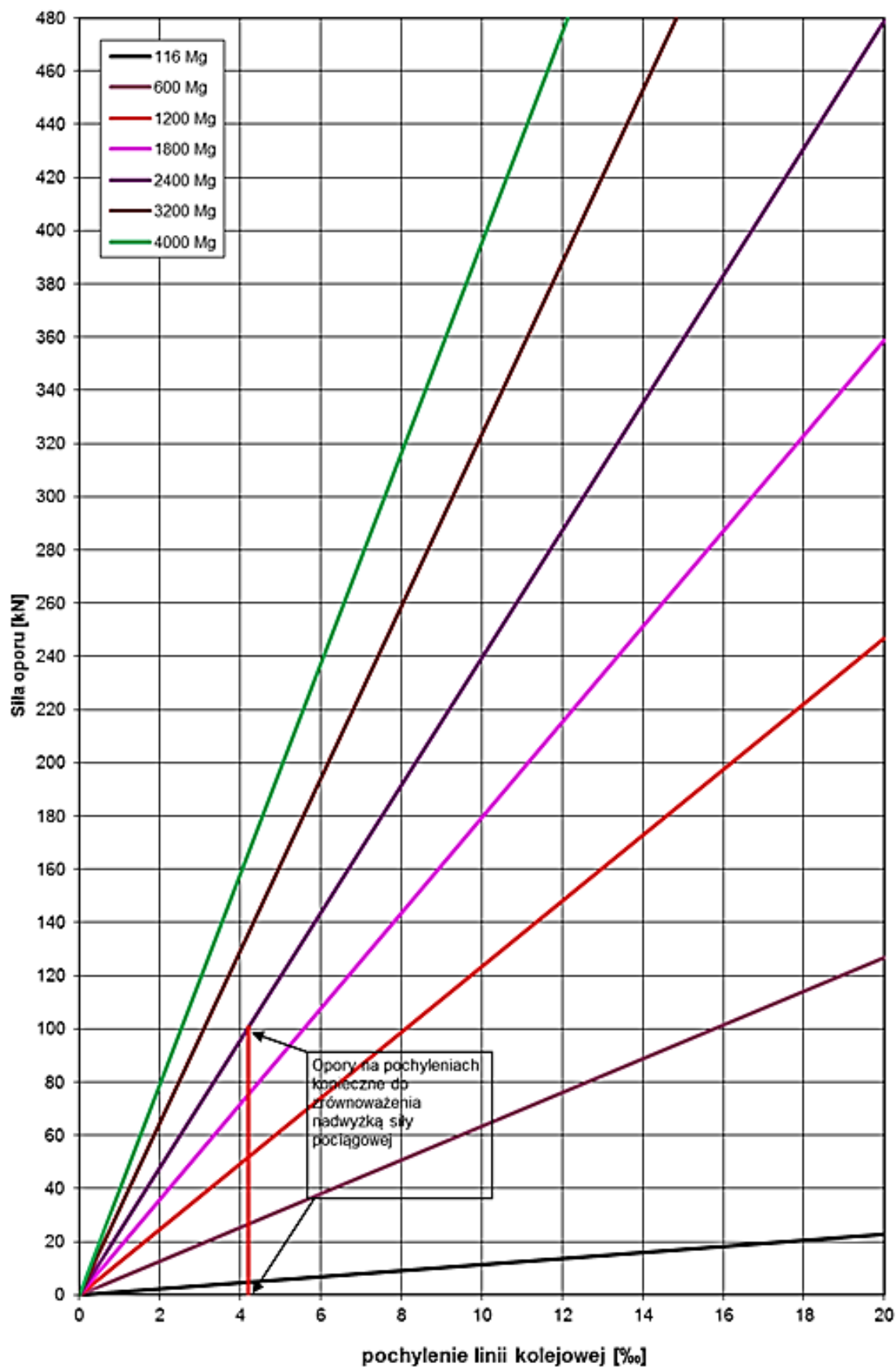
Na charakterystyce siły pociągowej na torze płaskim w funkcji prędkości jazdy (rys. 6.9) zamieszczono dla pociągów o danej masie wykresy oporów pociągów zależne od prędkości jazdy. Aby wyznaczyć całkowite opory należy na tym wykresie równolegle wzdłuż osi rzędnych odsunąć krzywą oporów jazdy o wartość siły oporu związaną z pochyleniem linii. Dla przyjętego przykładu wartość siły oporu całkowitego na osi rzędnej (dla prędkości jazdy  $V = 0$  km/h) będąca punktem początkowym krzywej wynosi ok. 135 kN. Punkt przecięcia krzywej oporów całkowitych z krzywą siły pociągowej odniesiony na osi odciętych określa maksymalną prędkość pociągu. Dla przyjętego przykładu prędkość ta wynosi około 33 km/h.

Tabela 6.2. Parametry agregatu prądotwórczego i oporów wybranych pociągów [62]

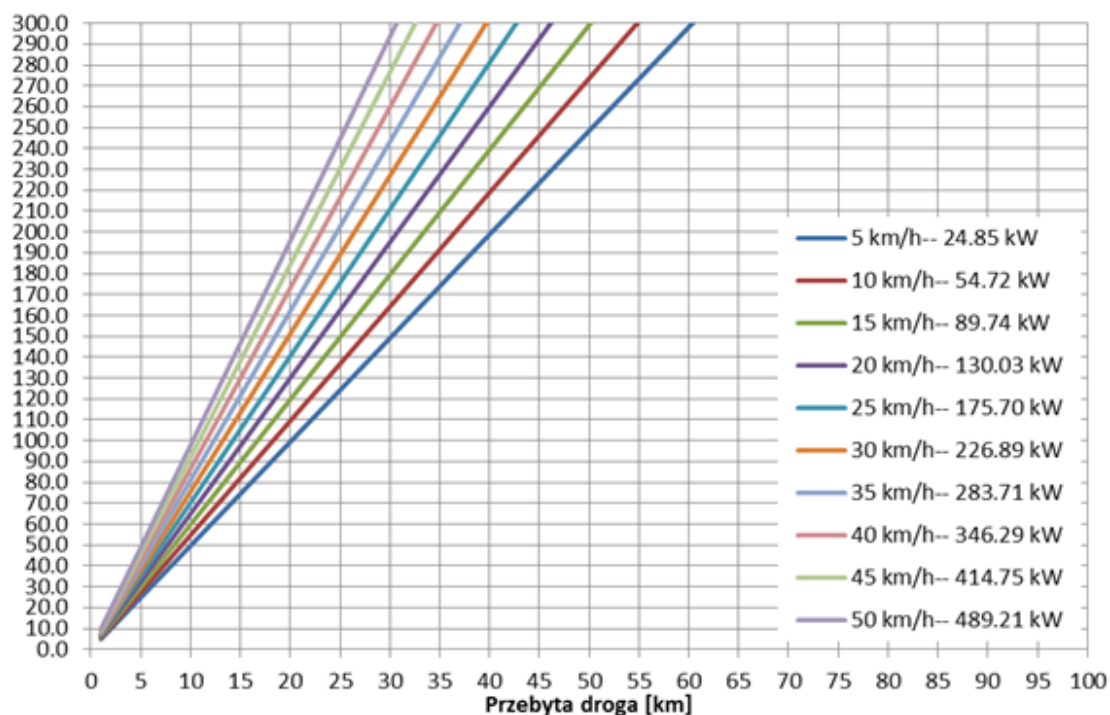
Charakterystyki trakcyjne lokomotywy 19D-1800kW o układzie osi Co-Co z pociągiem (do 4000 Mg)										
Określenie w wielkości	Symbol	Zależności - Formuły	Jedn.	MTU						
<b>Bilans mocy lokomotywy</b>										
Typ silnika	-	Zadane >>	-							
Moc silnika na wał w wyjściowym	Psw	Zadane >>	kW	1800						
Moc płaszczka w odnego	Pow p	Zadane >>	kW							
Moc ciepła wyprow. z turbodoładowania	Potd	Zadane >>	kW							
<b>Potrzeby własne lokomotywy</b>										
Moc w entylatora ukł. chłodzenia w ody	Pw uw	Zadane >>	kW	90						
Moc w entylatora ukł. chłodzenia siln. trakc.	Pw st	Zadane >>	kW	30						
Moc sprężarki powietrza	Pspr	Zadane >>	kW	30						
Moc w zbudnicy	Pw zb	Zadane >>	kW	3						
Moc ładowania akum.	Pładaku	Zadane >>	kW	5						
Moc oświetlenia i ogrz. elektr.	Pośw	Zadane >>	kW	8						
Moc na potrzeby własne	Pw l	Suma	kW	241						
Maksymalna moc elektr. silników trakcyjnych	Prrmax	Zadane >>	kW	1470						
Moc strat na prądnicę trakc.	Pstrat	Zadane >>	kW	58.8						
Moc strat na prostowniku trakc.	Pstrpro	Zadane >>	kW	30.9						
Dostępna maksymalna moc elektr. silników trakcyjnych	Ptrak	z bilansu >>	kW	1470						
<b>Charakterystyka siły pociągowej lokomotywy</b>										
Nacisk zestawu kołowego na tor	QoL	Zadane >>	kN	190						
Współczynnik przyczepności kół	ami	Zadane >>	-	0.399						
Ilość zestawów kołowych	nL	Zadane >>	szt	6						
Przełożenie przekładni trakcyjnej	ip	Zadane (75:17) >>	-	4.41						
Średnica koła jezdnego	Dk	Zadane >>	m	1.05						
Ciężar lokomotywy	QL	$nL \cdot QoL$	kN	1140						
Sprawność elektryczna silnika trakcyjnego	teta	Zadane >>	-	0.92						
Moc elektryczna silników trakcyjnych lokomotywy	Pmax	Zadane >>	kW	1470						
Moc lokomotywy netto (na kołach)	Pkmax	Zadane >>	kW	1352						
Maksymalna siła na haku	FLmax	$ami \cdot QL$	kN	454.9	454.8					
Maksymalna prędkość jazdy z siłą FLmax	vFL	$Pmax/FLmax$	m/s	3.0	10.7					
Maksymalna prędkość eksploatacyjna	vmax	Zadane >>	km/h	100						
Stała przyczepności w g CNTK/urz pposł	fo	Zadane >>	-	0.300	0.030					
<b>Charakterystyka oporów jazdy lokomotywy</b>										
Promień łuku torowego	R	Zadane >>	m	30000						
Współczynnik jednostkowego oporu	fRLR	$700 / (R-20)$	N/kN	0.0257						
Współczynnik oporu aerodynamicznego	faeL	$1.27 \cdot 3.5$	$Ns^2/m^2$	4.45						
Siła oporu ruszania zk	RLzk	$0.15 \cdot nL$	kN	0.90						
<b>Charakterystyka oporów jazdy wagonów</b>										
	mpoc	masa pociągu=QL+Qw	Mg	116	646	1258	1829	2440	3297	4031
Nacisk zestawu kołowego na tor	Qow	Zadane >>	kN	200	200	200	200	200	200	200
Ilość wagonów w składzie	n	Zadane >>	szt	0	6.5	14	21	28.5	39	48
Ilość zestawów kołowych w wagonie	nw	Zadane >>	szt	4	4	4	4	4	4	4
Ciężar wagonów	Qw	$n \cdot nw \cdot Qow$	kN	0	5200	11200	16800	22800	31200	38400
Promień łuku torowego	R	Zadane >>	m	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000
Współczynnik jednostkowego oporu	fRw R	$700 / (R-20)$	N/kN	0.0257	0.026	0.0257	0.026	0.026	0.026	0.026
Współczynnik oporu aerodynamicznego	fw ae	$1.27 \cdot (n+2.5)$	$Ns^2/m^2$	3.18	11.43	20.96	29.85	39.37	52.71	64.14
Siła oporu ruszania zk	Rw zk	$0.15 \cdot n \cdot nw$	kN	0.00	3.90	8.40	12.60	17.10	23.40	28.80
Opory pociągu na pochyleniu: p [%]	0	$DFL = p \cdot (QL + Qw) / 1000$	kN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3		kN	3.4	19.0	37.0	53.8	71.8	97.0	118.6
	6		kN	6.8	38.0	74.0	107.6	143.6	194.0	237.2
	8		kN	9.1	50.7	98.7	143.5	191.5	258.7	316.3
	10		kN	11.4	63.4	123.4	179.4	239.4	323.4	395.4
	12		kN	13.7	76.1	148.1	215.3	287.3	388.1	474.5
	14		kN	16.0	88.8	172.8	251.2	335.2	452.8	553.6
	16		kN	18.2	101.4	197.4	287.0	383.0	517.4	632.6
	18		kN	20.5	114.1	222.1	322.9	430.9	582.1	711.7
	20		kN	22.8	126.8	246.8	358.8	478.8	646.8	790.8



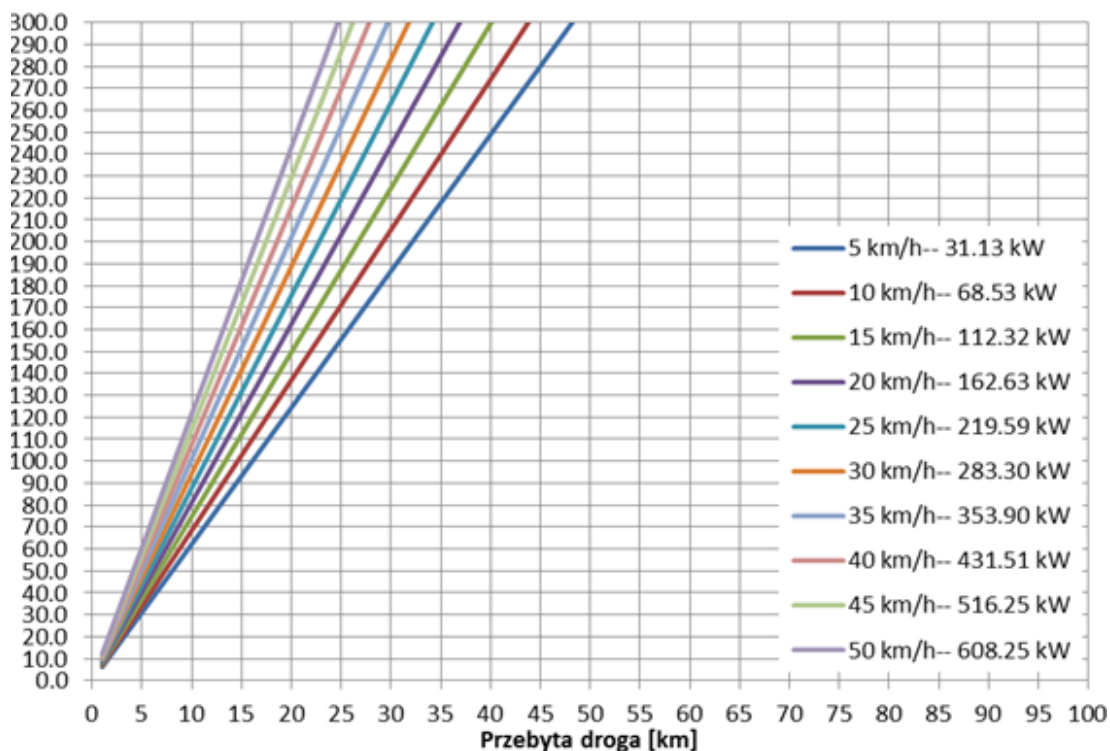
Rys. 6.9. Charakterystyka pociągowa lokomotywy typu 19D podczas trąkcy z pociągim o masie 0...4000 Mg na torze płaskim [13, 62]



Rys. 6.10. Opory wybranych pociągów wynikające z wznoszącego pochylenia linii kolejowej [62]



Rys. 6.11. Zużycie energii [kWh] na ciągnięcie pociągu o masie 2400 t [62]



Rys. 6.12. Zużycie energii [kWh] na ciągnięcie pociągu o masie 3000 t [62]

Podsumowując należy stwierdzić, że wykresy sił pociągowych lokomotywy na tle oporów ruchu standardowych pociągów towarowych przedstawione na rys. 6.9 i 6.10 wskazują na możliwości trakcyjne lokomotywy sześciosiowej 19D. Widać z nich, że dzięki zastosowaniu elektrycznych silników trakcyjnych typu ED118A do napędu zestawów kołowych jest możliwe uzyskanie siły na "haku" w zakresie do 455 kN dla zastosowanego przełożenia przekładni

trakcyjnej  $i = 4,41$  i uzyskanie prędkości jazdy rzędu 80–100 km/h nawet z ciężkimi pociągami towarowymi.

Dzięki zastosowaniu urządzeń przeciwpoślizgowych nowej generacji, możliwości przyczepne kół zabezpieczają trakcję bez poślizgów na poziomie 360–480 kN w zależności od prędkości jazdy we wszystkich standardowych warunkach powierzchni tocznej szyn (mokre i suche). Z użyciem piaskowania styku koło-szyna lub innych metod zwiększania adhezji jest możliwe wykorzystanie siły pociągowej nawet do 530 kN. Wtedy trzeba się jednak liczyć z innymi problemami, np. zużyciem ściernym i termicznym powierzchni tocznej kół i szyn oraz z częstym używaniem urządzeń poprawiających adhezję i obniżających poślizgi kół, które generują dodatkowe koszty eksploatacyjne.

Tak wysoki poziom sił trakcyjnych umożliwia ruszanie i ciągnięcie najcięższych spotykanych na liniach PLK składów pociągów (2500 i 4000 t) nawet na pochyleniach do 10‰. Natomiast sumaryczna moc napędu lokomotywy umożliwia bezproblemowe ciągnięcie składów pociągów towarowych maksymalnie ciężkich z prędkością co najwyżej rzędu 50–70 km/h.

Dzięki zastosowaniu nowoczesnego silnika o zapłonie samoczynnym firmy MTU typu 12V 4000 R84 o mocy 1800 kW można liczyć na niskie zużycie paliwa zarówno w lokalnym ruchu manewrowym jak i w pracy liniowej. Na rysunkach 6.11 i 6.12 przedstawiono szacunkowe zużycie energii na cele trakcyjne w ruchu manewrowym. Po uwzględnieniu działania systemów zarządzania pracą układów napędowych (w tym agregatu prądotwórczego) można określić sumaryczne zużycie paliwa.

Przedstawione charakterystyki trakcyjne potwierdziły możliwości trakcyjne lokomotywy z dobranym zespołem silnikowo-prądnicowym i pozwoliły na przystąpienie do kolejnych analiz.

## 6.7. Analiza układów oczyszczania spalin

Podczas doboru zespołu silnikowo-prądnicowego konieczna jest analiza układów oczyszczania spalin dla rozpatrywanych silników spalinowych. W związku z obowiązującymi przepisami, takimi jak TSI Loc&Pas [98], które wymagają aby silniki o zapłonie samoczynnym stosowane w lokomotywach spalinowych były zgodne z prawodawstwem Unii Europejskiej dotyczącym spalin obecnie możliwe jest rozpatrywanie następujących klas czystości spalin:

- **etap IIIB** (cykl F) wg dyrektywy 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1997 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach (Dz. Urz. WE L 59 z 27.02.1998, str. 1) [19], z późniejszymi zmianami wprowadzonymi dyrektywami: 2001/63/WE [20], 2002/88/WE [17], 2004/26/WE [18], 2010/26/UE [21], 2011/88/UE [24], 2012/46/UE [22],

- **etap V** (dla dostaw od 01.01.2021) wg Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 z dnia 14 września 2016 [96] w sprawie wymogów dotyczących wartości granicznych emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych oraz homologacji typu w odniesieniu do silników spalinowych wewnętrznego spalania przeznaczonych do maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach, zmieniające rozporządzenia (UE) nr 1024/2012 i (UE) nr 167/2013 oraz zmieniające i uchylające dyrektywę 97/68/WE [19].

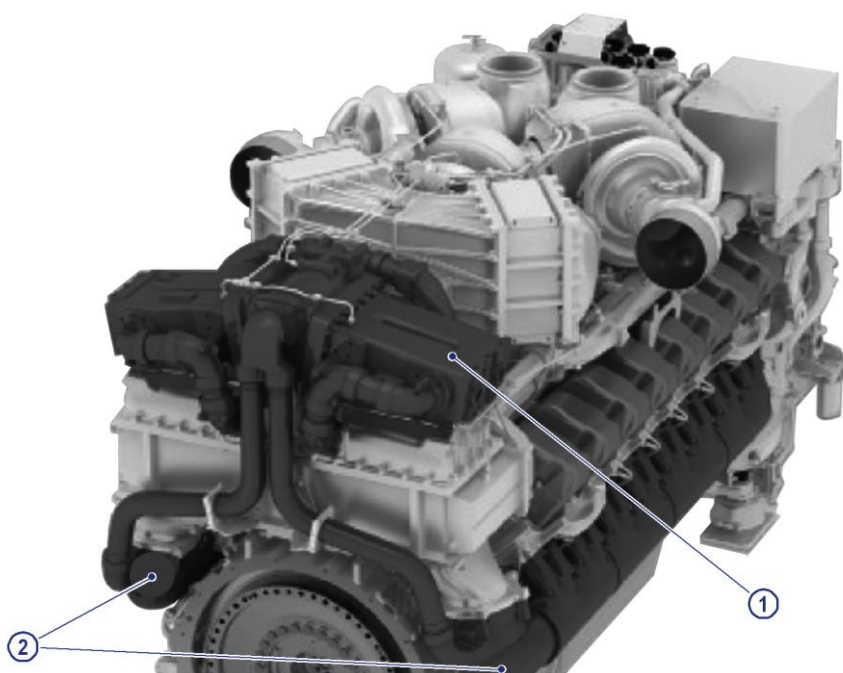
Biorąc pod uwagę powyższe wymagania w trakcie analizy dostępnych na rynku silników spalinowych ZS o mocy 1800 kW – 2100 kW wytypowano dwa typy: MTU 12V 4000 R84 i Cummins QSK60. W tabeli 6.3 przedstawiono podstawowe parametry dla powyższych silników.

Tabela 6.3. Podstawowe parametry wybranych silników spalinowych MTU i Cummins [107]

Podstawowe dane techniczne	MTU	CUMMINS
Typ	12V 4000 R84	QSK60
Moc silnika	1800 kW	2013 kW
Prędkość obrotowa silnika	1800 obr/min	
Liczba cylindrów	12 V	16 V
Masa całkowita suchego silnika	7 700 kg	9 219 kg
Okres do naprawy głównej	24 000 h	25 000 h
Termin dostawy	~32 tygodni	~24 tygodnie
Emisja substancji szkodliwych	etap III B wg dyrektywy 2004/26/WE [23]	
Technologia osiągnięcia emisji zanieczyszczeń – etap III B	EGR + DPF	EGR + SCR

Silnik MTU 12V 4000 R84 jest silnikiem czterosuwowym i posiada 12 cylindrów w układzie V, kąt  $90^\circ$ . Objętość skokowa całkowita to  $57,2 \text{ dm}^3$ . Jednostkowe zużycie paliwa kształtuje się na poziomie  $202 \text{ g/kWh}$  przy zużyciu oleju na poziomie min.  $0,3\%$  godzinowego zużycia paliwa. Silnik sterowany jest elektronicznie (sterownik ECU), posiada układ bezpośredniego wtrysku paliwa oraz układ oczyszczania spalin składający się z układu EGR i DPF.

Emisję tlenku azotu ( $\text{NO}_x$ ) można zmniejszyć za pomocą technologii wewnętrznej silnika przez chłodzenie części spalin, które są następnie kierowane z powrotem do kolektora powietrza doładowującego (rys. 6.13). Powoduje to zmniejszenie temperatury spalania i obniżenie emisji tlenku azotu. Proces ten nazywany jest recyrkulacją spalin (EGR) i jest jedną z głównych metod stosowanych do redukcji emisji tlenków azotu w silnikach o zapłonie samoczynnym. Niestety stosowanie układu EGR wymaga zastosowania układu chłodzenia o zwiększonej wydajności w stosunku do wcześniejszych rozwiązań silników.

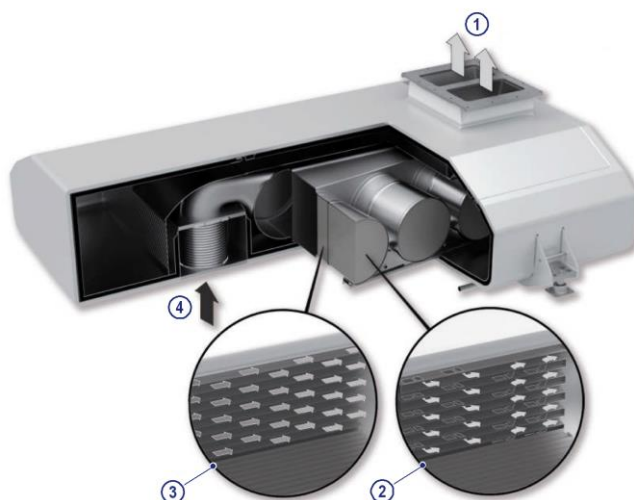


Rys. 6.13. Rozmieszczenie elementów układu recyrkulacji spalin w silniku MTU (1 – chłodnica EGR, 2 – miejsce powrotu schłodzonych spalin do kolektora ssącego) [58]



Konieczność zgodności silnika z normą UE Stage IIIB spowodowała, że MTU wyposaża silniki do zastosowań kolejowych w filtr cząstek stałych. MTU projektuje DPF pod kątem minimalnych wymagań przestrzennych i długich okresów międzyobsługowych. Takie podejście pozwala na łatwe integrowanie filtra cząstek stałych z silnikiem tworząc kompaktową i zwartą konstrukcję. Filtr DPF pracuje jednocześnie jako tłumik wylotu.

Filtr DPF usuwa cząstki stałe ze spalin, które powstają podczas procesu spalania zachodzącego w silniku (rys. 6.14). Odbywa się to przez skierowanie spalin na tak zwane podłoże filtracyjne, czyli drobno porowatą strukturę ceramiczną z porowatymi ścianami wewnątrz filtra. Cząsteczki sadzy osadzają się na ścianach kanałów, gdy spaliny przepływają przez układ. MTU stosuje biernie regenerujący się DPF, który wykorzystuje efekt CRT (*Continuous Regeneration Trap*) i w trybie ciągłym się regeneruje. Dzięki tej technologii w normalnych warunkach pracy, temperatura spalin jest wystarczająco wysoka do ciągłego wypalania cząstek stałych z filtra DPF. Tylko w ekstremalnych warunkach klimatycznych oraz w warunkach pracy ciągłej pod niskim obciążeniem, konieczne jest wspomaganie regeneracji przez sterowanie temperaturą spalin.



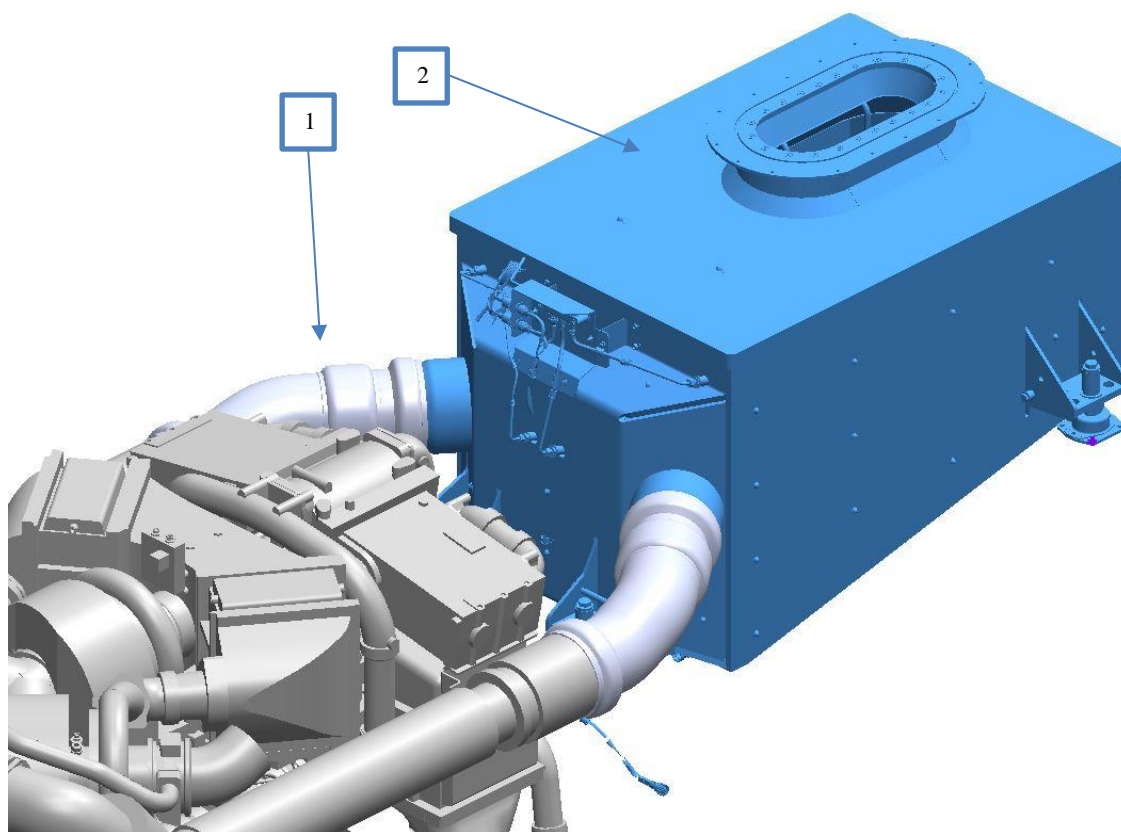
Rys. 6.14. Układ przepływu spalin w DPF (1 – wylot oczyszczonych spalin, 2 – filtr cząstek stałych, 3 – katalizator utleniania oleju napędowego, 4 – wlot spalin od strony silnika) [58]

System sterowania silnika MTU oblicza aktualny poziom przepustowości filtra cząstek stałych za pomocą czujników wykrywających różnicę ciśnień w układzie filtra cząstek stałych. W razie potrzeby stosowane są wprowadzane wewnętrzne procedury sterowania temperaturą silnika pozwalające znacznie podnieść temperaturę spalin, a tym samym czasowo zwiększyć szybkość wypalania cząstek stałych.

Podczas analizy układu DPF dla rozpatrywanej aplikacji w lokomotywie spalinowej manewrowej zdecydowano o zastosowaniu filtra cząstek stałych jak na rys. 6.15. Więcej na temat zabudowy DPF w kontekście montażu na lokomotywie opisano w rozdziale 6.9.

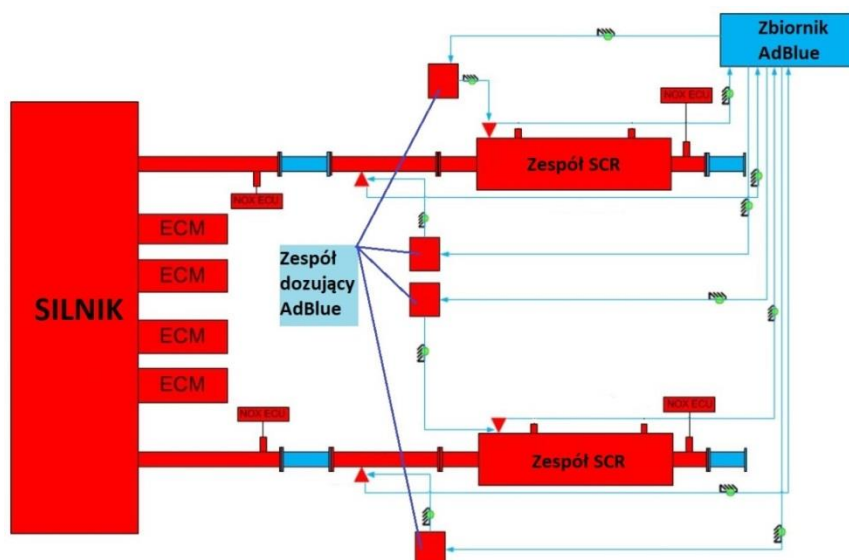
Silnik Cummins QSK60 jest silnikiem czterosuwowym i posiada 16 cylindrów w układzie V. Całkowita objętość skokowa wynosi  $60,4 \text{ dm}^3$ . Jednostkowe zużycie paliwa kształtuje się na poziomie  $204 \text{ g/kWh}$ . Silnik sterowany jest elektronicznie (cztery sterowniki ECM), posiada układ bezpośredniego wtrysku paliwa oraz układ oczyszczania spalin składający się z układu EGR i SCR.

Układ recyrkulacji spalin (EGR) w silniku Cummins działa na podobnej zasadzie jak w MTU dlatego pominięto w tej części jego opis. Natomiast układ SCR czyli selektywnej redukcji katalitycznej tlenków azotu jest alternatywnym układem oczyszczania spalin w stosunku do DPF i dalej przedstawiono jego opis.

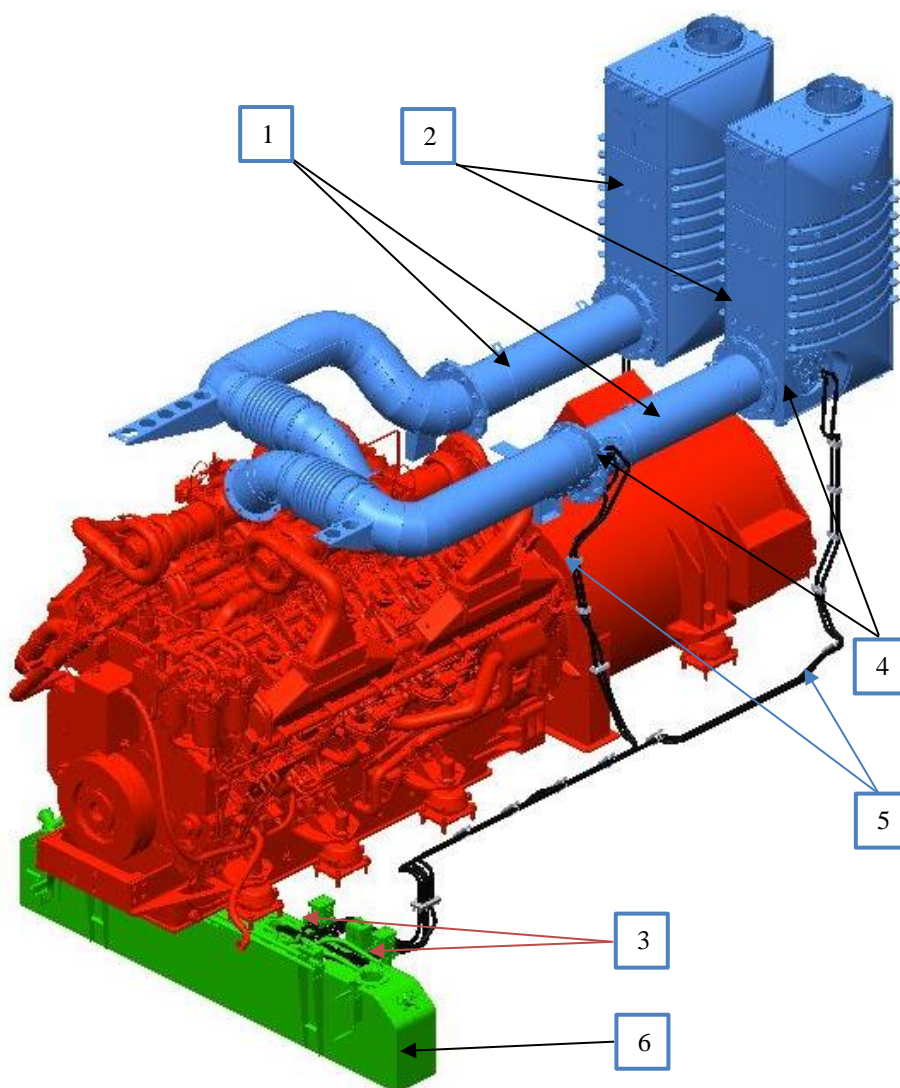


Rys. 6.15. Zabudowa DPF w silniku 12V 4000 R84 (1 – silnik spalinowy, 2 – filtr cząstek stałych)

Selektywna redukcja katalityczna (SCR) to technika kontroli  $\text{NO}_x$  służąca do regulacji emisji spalin z silników o zapłonie samoczynnym. Proces polega na wtryskiwaniu AdBlue (wodny rozwór mocznika) do strumienia spalin w reaktorze katalitycznym. Zastosowany system AdBlue (to bezpowietrzny system, który wykorzystuje takie komponenty jak: zbiornik AdBlue, podgrzewane przewody płynu AdBlue, moduł zasilający i moduł dozujący. AdBlue jest przechowywany w zbiorniku zamontowanym standardowo na podwoziu. Moduł zasilający jest sterowany elektronicznie przez sterowniki silnika (ECM). Moduł zasilający wykorzystuje dokładny system dozujący i pompujący do dostarczania AdBlue do modułu dozującego zamontowanego na zespole reaktora dekompozycyjnego (DRP) i zespole selektywnej redukcji katalitycznej (SCR). Ilość AdBlue wtryskiwanego do układu wylotowego jest kontrolowana przez ECM. Podczas procesu oczyszczania spalin w wysokiej temperaturze woda szybko wyparowuje, a mocznik w kontakcie z gorącymi spalinami rozkłada się na amoniak. Amoniak reaguje z  $\text{NO}_x$  w reaktorze katalitycznym i w wyniku tego procesu powstaje nieszkodliwy azot ( $\text{N}_2$ ) i woda ( $\text{H}_2\text{O}$ ), które są emitowane do atmosfery z rury wylotowej. System oczyszczania spalin Cummins składa się z zespołu reaktora dekompozycyjnego (DRP), zespołu selektywnej redukcji katalitycznej (SCR), dwóch modułów dozowania płynu DEF (*Diesel Exhaust Fluid*), dwa moduły zasilania DEF, jeden czujnik  $\text{NO}_x$  i elektroniczna jednostka sterująca (ECU), dwa czujniki temperatury spalin (EGTS) i ECU. Silnik QSK60 wymaga stosowania dwóch układów oczyszczania spalin, niezbędnych do spełnienia przepisów dotyczących emisji poziom IIIB. Na rysunku 6.16 przedstawiono schemat blokowy układu oczyszczania spalin dla silnika QSK60, a przykładowy układ SCR do montażu w lokomotywie przedstawiono na rysunku 6.17.



Rys. 6.16. Schemat blokowy układu SCR dla silnika Cummins QSK60 [46]



Rys. 6.17. Przykład układu SCR dla silnika Cummins QSK60 w lokomotywie spalinowej: 1 – zespół reaktora dekompozycyjnego DRP, 2 – zespół selektywnej redukcji katalitycznej SCR, 3 – moduł zasilający, 4 – moduł dozujący, 5 – linie AdBlue, 6 – zbiornik AdBlue

Układ SCR wymaga także podgrzewania płynu AdBlue ponieważ roztwór wodny mocznika w niskich temperaturach (poniżej  $-11^{\circ}\text{C}$ ) ulega krystalizacji. Podgrzewanie musi być realizowane w zakresie zbiornika płynem chłodzącym silnika spalinowego oraz elektryczne podgrzewanie przewodów i zespołów dozujących co komplikuje układ konieczny do zamontowania w ograniczonej przestrzeni na lokomotywie.

Podsumowując, powyższe układy oczyszczania spalin różnią się funkcją, ale przede wszystkim ilością elementów do zabudowy, komplikacją układu i oczywiście ilością wymaganej przestrzeni, co uwzględniono podczas analizy mechanicznej zabudowy zespołu silnikowo-prądnicowego w rozdziale 6.9.

## 6.8. Opracowanie zintegrowanego sterownika silnika i prądnicy

W ramach działań mających na celu analizę założeń i projektu wstępnego sterownika zespołu prądowórczego modernizowanej lokomotywy, zarządzającego jednocześnie magistralą pociągu umożliwiając sterowanie w trakcji wielokrotnej należy zrealizować następujące tematy:

- zestawienie założeń dla systemu sterowania i diagnostyki zespołu prądowórczego dla zmodernizowanej lokomotywy spalinowej oraz zestawienie możliwości realizacji systemu sterowania z wykorzystaniem modułów firmy Selectron oraz przedstawienie wstępnej koncepcji struktury sterowania,
- opis wybranej konfiguracji sprzętowej sterownika zespołu prądowórczego i węzła magistrali pociągu dla zmodernizowanej lokomotywy spalinowej oraz opis elementów sprzętowych wchodzących w skład systemu, co umożliwi zestawienie informacji niezbędnych do opracowania dokumentacji konstrukcyjnej lokomotywy oraz dokumentacji użytkownika:
  - modułów sterowników,
  - złącz zasilania i magistrali,
  - akcesoriów serwisowych,
- opis konfiguracji i wstępnego oprogramowania sterownika zespołu prądowórczego CPU 831-TG firmy Selectron dla zmodernizowanej lokomotywy TEM2,
- opis zastosowania standardu magistrali pociągu CAN Powerline firmy Selectron w projekcie zmodernizowanej lokomotywy:
  - wprowadzenie do magistrali pociągu,
  - opis sprzętowego rozwiązania magistrali pociągu CAN Powerline.

### Zestawienie założeń dla systemu sterowania i diagnostyki zespołu prądowórczego

Sieć komunikacyjna lokomotywy, składa się z magistrali pociągu (w tym wypadku lokomotywy oraz drugiej takiej samej lokomotywy) oraz magistrali pojazdu (w tym wypadku lokomotywy). Magistrala pociągu umożliwia komunikację lokomotyw w trakcji wielokrotnej (dwie jednakowe lokomotywy sprzęgnięte i sterowane z jednej z nich). Jedynymi sterownikami podłączonymi do magistrali pociągu są sprzęgi magistrali pociągu (węzły pojazdu). Magistrala pociągu będzie redundantna. Magistrala pojazdu umożliwia komunikację pomiędzy sterownikami w ramach pojazdu (w tym wypadku lokomotywy).

### Magistrala składu pociągu

W praktycznych zastosowaniach jako magistralę pociągu stosować można:

- WTB (Wire Train Bus), wg IEC 61375,
- Ethernet,
- CAN Powerline (rozwiązanie firmy Selectron).

Jeżeli wymagana jest interoperacyjność, jedynym rozwiązaniem stosowanym w obecnej chwili jest WTB. Sposób transmisji danych po magistrali WTB określony jest w karcie UIC 556. Jest to najdroższy interfejs. Jego stosowanie nie jest jednak uzasadnione w projekcie modernizacji lokomotywy 19D.

Ethernet zdobywa coraz większą popularność jako pojazdowy standard sieciowy ze względu na jego wysoką przepustowość. Ma jednak jedną zasadniczą wadę, która ogranicza jego zastosowanie jako magistrali pojazdu: brak rozwiązań umożliwiających tzw. „chrzest magistrali pociągu”. W związku z powyższym Ethernet jest już używany w charakterze magistrali pociągu, ale jedynie w składach zamkniętych, typu IEC.

Powyższej wady pozbawiony jest CAN Powerline, umożliwiający dynamiczne tworzenie składu wielu pojazdów wyposażonych w ten sam standard. Jest to rozwiązanie opracowane przez szwajcarską firmę Selectron, będącą członkiem organizacji CiA (*Can in Automation*) i biorącą czynny udział w opracowywaniu standardów. Można stosować go do pojazdów, które będą współpracować w trakcji wielokrotnej jedynie z innymi pojazdami wyposażonymi w ten interfejs. Do stosowania w projekcie modernizowanej lokomotywy 19D zaproponowano właśnie ten interfejs.

### ***Magistrala lokomotywy***

Ponieważ w ramach pojedynczego pojazdu nie występuje problem interoperacyjności, możliwe jest zastosowanie typu magistrali najbardziej odpowiedniego w przypadku danego projektu. Obecnie w charakterze magistrali pojazdu stosowane są:

- MVB (Multiple Vehicle Bus), wg normy IEC 61375,
- CANopen,
- Generic CAN,
- Ethernet.

O wyborze magistrali decydują dwa zasadnicze czynniki:

- ilość przesyłanych informacji,
- interfejsy sterowników podporządkowanych występujących na danym pojeździe.

Najbardziej popularnym standardem magistrali pojazdu jest CANopen. W zastosowaniach związanych z systemami wizyjnymi standardem jest już praktycznie Ethernet. Możliwe jest stosowanie kilku magistrali, również o różnych protokołach. Na przykład często jest stosowana magistrala CANopen lub MVB w połączeniu z magistralą Ethernet. Do zastosowania w niniejszym projekcie zaproponowano magistralę CANopen oraz Generic CAN. W razie potrzeby, zwłaszcza w przypadku konieczności przesyłania danych wideo, możliwe jest zastosowanie magistrali Ethernet.

### ***Propozycja rozwiązania sieci komunikacyjnej lokomotywy***

Ponieważ lokomotywa będzie współpracować jedynie z drugą lokomotywą tego samego typu, jako magistralę pociągu proponuje się zastosowanie standardu CAN Powerline. Jako podstawową magistralę pojazdu przyjęto magistralę CANopen, ponieważ jest to w obecnej chwili najbardziej popularny standard magistrali pojazdu, obsługiwany przez praktycznie wszystkich producentów wyposażenia kolejowego, również w Polsce. W celu komunikacji ze sterownikami nie obsługującymi standardu CANopen zaproponowano magistralę Generic CAN lub CANopen z uproszczoną obsługą sterowników.

Do celów komunikacji z panelami operatora może być zastosowany Ethernet albo CAN. Ethernet zapewnia dużą przepustowość, co jest istotne zwłaszcza w systemach wizyjnych. Minusem jest konieczność zastosowania dodatkowych modułów typu switch. Wstępnie przyjmuje się zastosowanie magistrali CAN.

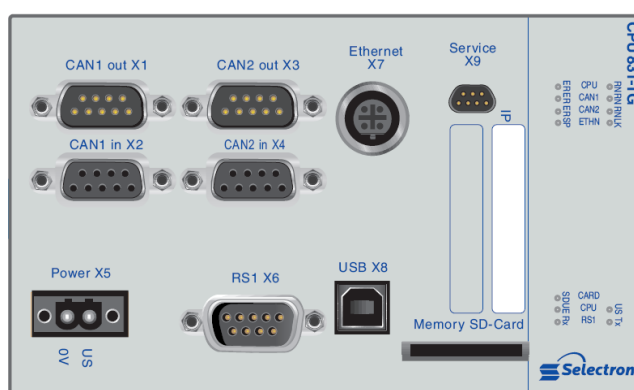
### Moduły kolejowe firmy Selectron

W rozdziale tym przedstawione zostanie krótkie zestawienie modułów kolejowych firmy Selectron, które zostaną zastosowane na projektowanej lokomotywie. Przedstawiono jedynie te urządzenia, które znajdą zastosowanie w niniejszym projekcie.

#### Sterownik CPU 831-TG

Sterownik CPU 831-TG jest sterownikiem o dużej mocy nadającym się do pełnienia funkcji sterownika lokomotywy (rys. 6.18). Jest to obecnie najsilniejszy sterownik w ofercie firmy Selectron.

Sterownik posiada dwie magistrale CAN oraz Ethernet i USB. Posiada również interfejs programu lub danych, który może pracować jako RS-232, RS-422 albo RS-485. Wybór interfejsu odbywa się programowo, przy pomocy oprogramowania narzędziowego TOP1131. Sterownik posiada slot na kartę pamięci SD (max. 2 GB). Dodatkowo posiada interfejs serwisowy.



Rys. 6.18. Sterownik CPU 831-TG [35]

Za lewej strony sterownika można dodatkowo dołączyć moduły CAN 831-TG, każdy zawierający trzy niezależne magistrale CAN (maksymalnie trzy moduły) oraz dodatkowy zasilacz PSM 831-TM albo PSM 831-TV. Z prawej strony można dołączyć moduły we/we rodziny 7xx. Bez dodatkowego zasilacza można dołączyć maksymalnie trzy moduły we/wy. Dołączenie modułu CAN 831-TG lub kolejnego modułu we/we wymaga zastosowania zasilacza.

#### Bramka CAN-Powerline/CANopen – TBC 702-T

Moduł TBC 702-T (sprzęg magistrali pociągu) stanowi interfejs pomiędzy magistralą pociągu a magistralą pojazdu. Widok modułu przedstawiony jest na rys. 6.19. Moduł TBC 702-T podłączony jest z jednej strony do magistrali pociągu przy pomocy podwójnej, redundantnej linii, z drugiej strony natomiast do lokalnej magistrali pojazdu. Do jednej magistrali pociągu podłączyć można maks. 12 modułów TBC 702-T. Zasadniczą funkcją modułów TBC 702-T jest zapewnianie komunikacji pomiędzy sterownikami podłączonymi do ich lokalnych magistrali pojazdu. Dzięki nim magistrala pociągu staje się „przezroczysta” z punktu widzenia użytkownika. Sposób przesyłania danych za pośrednictwem magistral pociągu określa norma UIC 556. Sprzęg magistrali pojazdu TBC 702-T jest zgodny z tą normą.

W lokomotywie występuje kilka typów sterowników. Najważniejszym jest sterownik lokomotywy CPU 831-TG, stanowi on centrum komunikacji w lokomotywie. Posiada dwa interfejsy CAN, które mogą być wykorzystywane do komunikacji Generic CAN albo CANopen. Kolejny typ stanowią sterowniki rozproszone systemu sterowania.

W systemie sterowania zastosowano rozproszone sterowniki służące do zbierania sygnałów z różnych części lokomotywy oraz wytwarzania sygnałów sterujących. Sterowniki te zre-

alizowane są w oparciu o moduły sterowników S32. Sterowniki posiadają możliwość komunikacji Generic CAN.



Rys. 6.19. Widok modułu sprzęgu magistrali pociągu TBC 702-T [35]

Główne sterowniki są następujące:

- sterownik umieszczony w pulpicie A,
- sterownik umieszczony w pulpicie B,
- sterownik umieszczony w szafce przypulpitowej,
- sterownik umieszczony w zespole SN,
- sterownik umieszczony w zespole NN.

Oprócz systemu sterowania lokomotywą w sieci komunikacyjnej znajdują się również sterowniki podzespołów napędowych, takie jak:

- sterownik silnika spalinowego, stanowiący interfejs pomiędzy sterownikiem silnika spalinowego a sterownikiem lokomotywy, komunikujący się po magistrali CANopen,
- układ diagnostyczny systemu prądnic.

Komunikacja ze sterownikiem lokomotywy odbywać się będzie po magistrali CANopen lub Generic CAN.

Ponadto, oprócz systemu sterowania lokomotywą i sterowników podzespołów napędowych w sieci komunikacyjnej znajdują się również inne sterowniki pomocnicze:

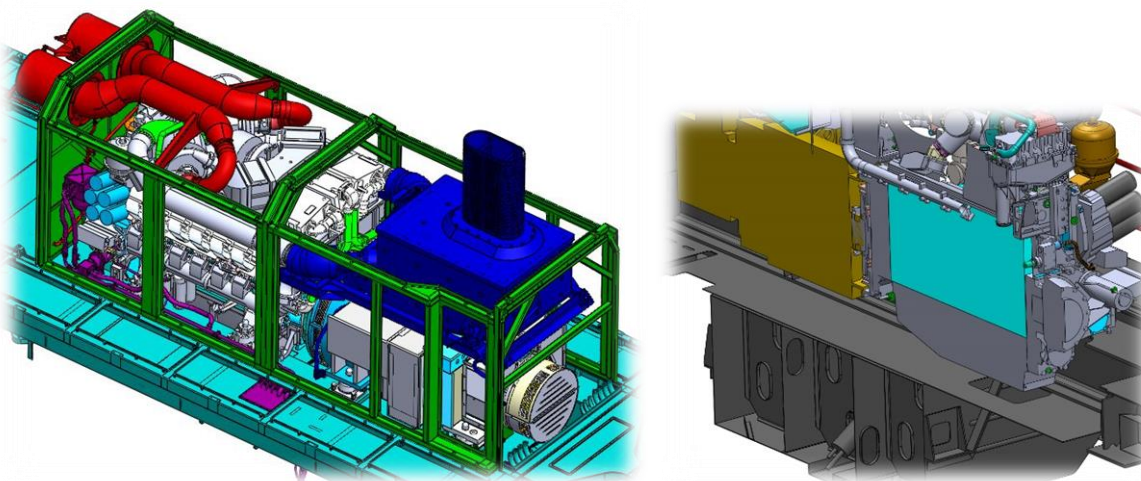
- moduł sterowania radiowego,
- prędkościomierz,
- moduł pomiaru zużycia paliwa,
- rejestrator magistrali CAN 136ZE,
- modem z interfejsem CAN/RS-232,
- urządzenie wykrywania i likwidacji poślizgu 88ZE-09,
- sprzęg magistrali pociągu,
- sterownik reflektorów 168ZE A,
- sterownik reflektorów 168ZE B,
- sterownik sprężarki oraz uzdatniania powietrza obwodu pneumatycznego,
- sterownik tablicy pneumatycznej,
- sterownik wykrywający pożar w przedziale prądotwórczym,
- sterownik układu chłodzenia silnika spalinowego.



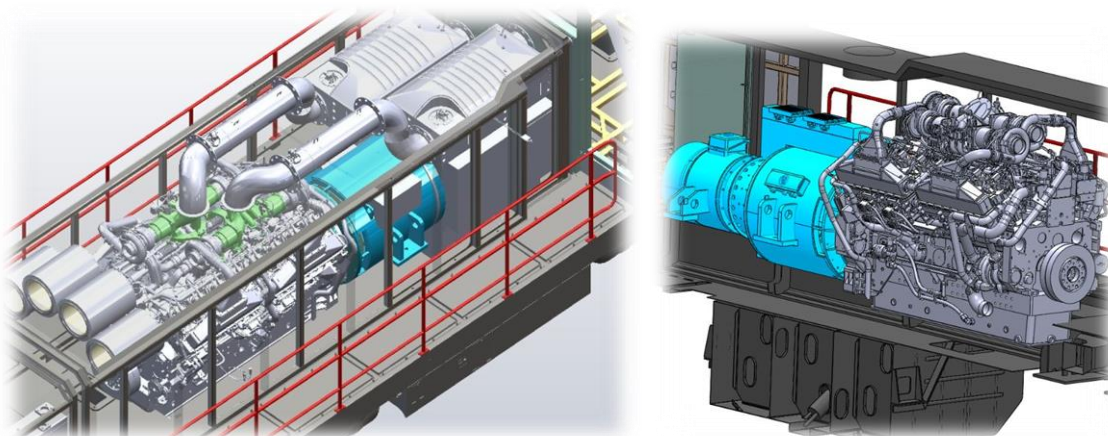


## 6.9. Analiza zabudowy mechanicznej zespołu

Zabudowa mechaniczna zespołu silnikowo-prądnicowego jest nieodzownym etapem doboru zespołu dla modernizowanej lokomotywy. W przypadku modernizacji zastajemy środowisko, którym w naszym przypadku jest ostoja lokomotywy i musimy dopasować do niego nowy zespół silnika z prądnicą. Oczywiście ostoja jako główny element nośny lokomotywy nie może podlegać głębokim modyfikacjom, ponieważ w takim przypadku konieczne byłyby badania wytrzymałościowe rzeczywistego obiektu. Podczas dopasowywania zespołu silnikowo-prądnicowego do ostoi nie są modyfikowane główne belki nośne ale oczywiście wykonywane są nowe wsporniki spawane do konstrukcji istniejącej. W związku z wymaganiami dotyczącymi widoczności z kabiny maszynisty w modernizacji przedziałów maszynowych dąży się do maksymalnego ich obniżenia, czego konsekwencją jest maksymalne obniżanie silnika w ostoi. Oczywiście taki zabieg ma dodatkowe zalety, ponieważ silnik z prądnicą jest największą masą skupioną w jednym miejscu jego obniżenie powoduje niższe położenie środka ciężkości lokomotywy co ma znaczenie w dynamice podczas jazdy, np. powoduje mniejsze kołysanie lokomotywy przy pokonywaniu łuków. Na rysunkach 6.21 i 6.22 przedstawiono przykładowe analizy zabudowy zespołów silnikowo-prądnicowych na dwóch typach silników.



Rys. 6.21. Analiza zabudowy zespołu silnikowo-prądnicowego z silnikiem MTU



Rys. 6.22. Analiza zabudowy zespołu silnikowo-prądnicowego z silnikiem CUMMINS

Jak wspomniano wcześniej ze względu na fakt, że zespół silnika z prądnicą ma praktycznie największą masę bardzo ważne jest wyznaczenie lokalizacji na lokomotywie ze względu na

położenie środka ciężkości lokomotywy. Oczywiście niedopuszczalne jest usytuowanie zespołu niesymetryczne w stosunku do osi wzdłużnej lokomotywy, natomiast w stosunku do osi poprzecznej położenie jest wyznaczone podczas analizy masy strategicznych zespołów. Ważne jest aby w wyniku analiz osiągnąć równomierne rozłożenie masy tak, aby naciski poszczególnych kół na tory były zbliżone do siebie lub prawie identyczne. Oczywiście analiza mechaniczna zespołu nie kończy się na samym silniku i prądnicy, ważne są także analizy układów peryferyjnych takich jak układ poboru powietrza, układ oczyszczania i wylotu spalin, układ paliwowy i układ chłodzenia. W analizowanych silnikach główną różnicą jest układ poboru powietrza wynikający z ilości cylindrów silników. Silnik 12 cylindrowy MTU posiada dwie turbosprężarki, natomiast silnik 16 cylindrowy Cummins ma ich cztery. Taki stan rzeczy wymaga zabudowy dwukrotnie większej ilości filtrów powietrza dla silnika Cummins. Kolejną różnicą są układy oczyszczania spalin, które opisano wcześniej. Podczas analizy mechanicznej dążymy do maksymalnego uproszczenia układu, jeżeli jest to dopuszczalne przez obowiązujące przepisy. Mając do wyboru dwa silniki z różnymi układami oczyszczania spalin (DPF lub SCR) spełniające poziom IIIB, w dalszej kolejności analizuje się czy dany układ nie zaburzy widoczności z kabiny przez zwiększenie wysokości przedziału maszynowego lub lokalizację komina wylotu spalin. W przedstawionej analizie mechanicznej korzystniejszy układ oczyszczania spalin pod względem zajmowanego miejsca zaproponowała firma MTU.

Etap analizy mechanicznej wymaga weryfikacji podczas analiz wytrzymałościowych konstrukcji ostoi, mocowania zespołu silnikowo-prądnicowego i pozostałych głównych układów oraz urządzeń co opisano w kolejnym rozdziale niniejszej pracy.

## 6.10. Analizy symulacyjne zespołu

W procesie projektowania nowych lokomotyw jak i modernizacji istniejących pojazdów niezwykle istotny jest etap obliczeń symulacyjnych i wytrzymałościowych. Pozwala to już w fazie założeń do projektu ocenić właściwości dynamiczne obiektu jak i wytrzymałość poszczególnych elementów nośnych konstrukcji. W obu przypadkach (projektowania nowych pojazdów i modernizowania istniejących) wymogi stawiane przez aktualne przepisy są podobne, a różnice w kryteriach dopuszczenia dotyczące wytrzymałości nadwozia, wózka, osi, kół, projektowania stref zgniotu, badań dynamicznych i obliczeń skrajni są niewielkie. Główne różnice w podejściu – odstępstwach można zauważyć w normie PN-EN 14363 (Badania i symulacje modelowe właściwości dynamicznych pojazdów szynowych) [69] oraz normie PN-EN 15227 (Kolejnictwo – Wymagania zderzeniowe dla pudeł pojazdów szynowych) [72]. Pierwsza z przytoczonych norm pozwala w przypadku modernizowanych pojazdów na odstępnie od obliczeń i badań, jeżeli zmiany dotyczące charakterystyki usprężynowania, masy pojazdu i prędkości są niewielkie i ściśle określone przez niniejszy przepis. Natomiast w normie PN-EN 15227 [72] można znaleźć zapis, który pozwala dla pojazdów odnowionych lub ulepszonych, w których dostosowanie do wprowadzanych norm wymaga naruszenia integralności strukturalnej pojazdu na zrezygnowanie ze strefy zgniotu.

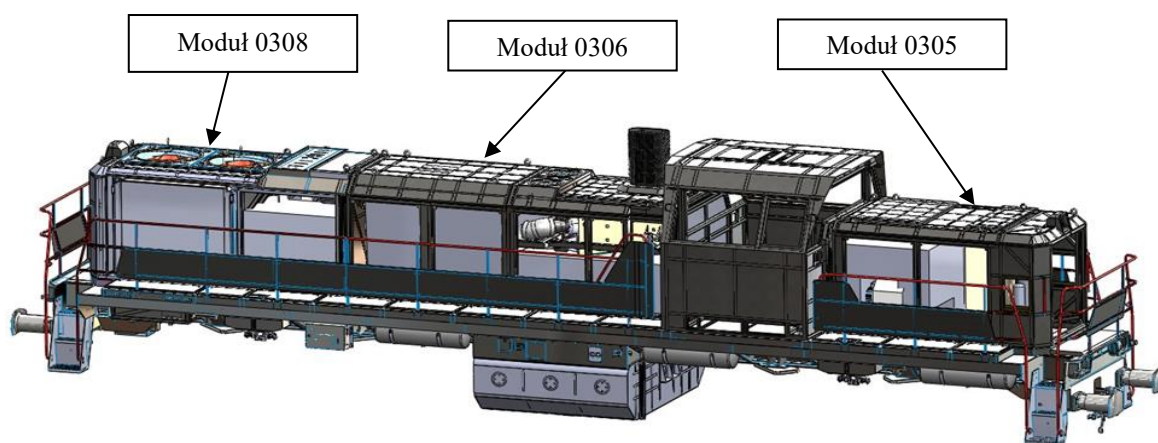
W przypadku projektowania (modernizacji) lokomotywy spalinowej 19D przeprowadzono szereg analiz numerycznych mających na celu sprawdzenie poprawności wykonania elementów istniejących jak i nowo projektowanych. Obliczenia wytrzymałościowe dotyczyły głównie nadwozia lokomotywy, gdyż zmianie ulega kabina maszynisty i poszczególne ramy nośne modułów przytwierdzonych do ostoi. Główna rama nośna ostoi wraz z czołownicami nie uległa zmianie. Jednak ze względu na zmianę układu części wsporników i podpór element ten również poddano wnikliwej analizie. Modernizacja nadwozia lokomotywy spowodowała konieczność wyznaczenia zarysu skrajni, w który będzie się wpisywała nowa geometria modernizowanej lokomotywy. Kolejną zmianą, która wymusiła dodatkowe analizy numeryczne, była przebudowa układu wentylacji silników trakcyjnych. Będąc w posiadaniu dokumentacji

takiego układu wentylacji w wersji przed i po modernizacji można na podstawie analiz przepływu ocenić, które rozwiązanie jest wydajniejsze. Bardziej szczegółowy opis niektórych analiz numerycznych wykonanych w projekcie modernizacji lokomotywy 19D zaprezentowano poniżej:

### Analiza wytrzymałości statycznej MES kontenera modułu 0305, 0306 i 0308.

Kontenery zaprojektowano jako konstrukcje spawane, wykonane głównie z profili zamkniętych. Kontener modułu 0305 zawiera zespół przetwornic, tablicę pneumatyczną oraz zespoły elektryczne średniego i niskiego napięcia. Kontener 0306 osłania zespół prądotwórczy a 0308 to przedział sprężarkowo-chłodniczy. Obliczenia konstrukcji nośnych kontenerów wykonano metodą elementów skończonych w programie SolidWorks Simulation 2012. Wymagania wytrzymałościowe dla kontenerów (modułów nadwozia) przyjęto zgodnie z normą PN-EN 12663-1 [66] dotyczącą wytrzymałości pudeł kolejowych.

Widok ogólny lokomotywy przedstawiono na rys. 6.23, a widoki poszczególnych kontenerów na rys. 6.24.



Rys. 6.23. Widok ogólny lokomotywy 19D z uwzględnieniem analizowanych modułów [5]



Rys. 6.24. Modele obliczeniowe kontenerów [3, 4, 5]

Na podstawie wymagań zawartych w normie PN-EN 12663-1 [66] określono rodzaje obciążeń nadzwyczajnych konieczne do przeprowadzenia oceny wytrzymałości statycznej konstrukcji kontenerów:

- przyspieszenie w momencie zderzenia w kierunku osi X (kierunek jazdy)  $\pm 3$  g
- przyspieszenie w kierunku osi Y  $\pm 1$  g
- przyspieszenie w kierunku osi Z  $+1,5$  g
- unoszenie (50% nadwyżki dynamicznej) przyspieszenie w kierunku osi Z  $+1,5$  g.

Rozpatrzono również wytrzymałość zmęczeniową kontenerów uwzględniając obciążenia dla normalnych warunków eksploatacji:

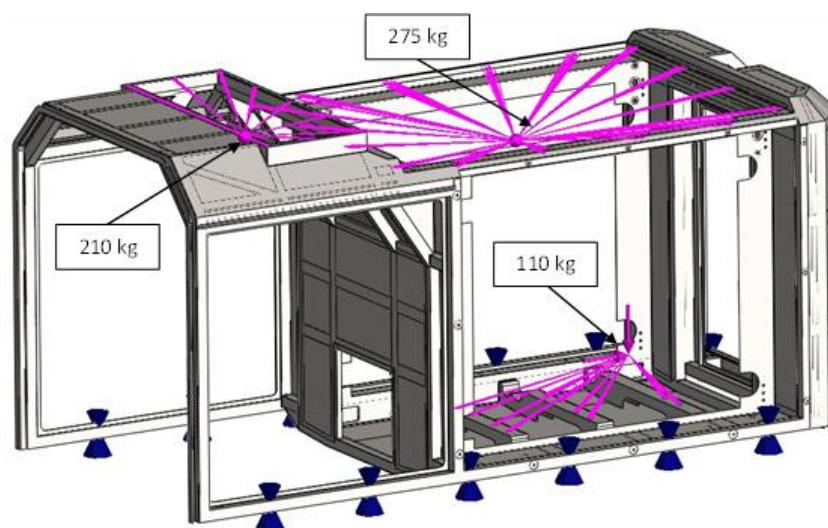
- a) przyspieszenie w kierunku osi X  $\pm 0,15 g$
- b) przyspieszenie w kierunku osi Y  $\pm 0,2 g$
- c) przyspieszenie w kierunku osi Z  $+0,75 g$  oraz  $+1,25 g$ .

Wartość naprężeń dopuszczalnych w [MPa] przyjęta dla statycznego kryterium wytrzymałości na podstawie normy PN-EN 12663-1 [66] uwzględniająca współczynnik bezpieczeństwa  $s_1 = 1,15$  wynosi  $\sigma_{dop} = 308$  MPa. W związku z tym, że analiza naprężeń wykonywana jest za pomocą MES dopuszcza się, aby naprężenia teoretyczne przekraczały wyżej wymienione wartości naprężeń dopuszczalnych. Obszary lokalnych plastycznych deformacji związanych z koncentracją naprężeń muszą być dostatecznie małe. Po zdjęciu obciążeń nie powinny pozostać trwałe deformacje, a obiekt nie może utracić swojej funkcjonalności. Dopuszczalne odkształcenie wynikające z zsumowania odkształcenia sprężystego dla stali S355 oraz dopuszczalnego odkształcenia plastycznego wynosi:

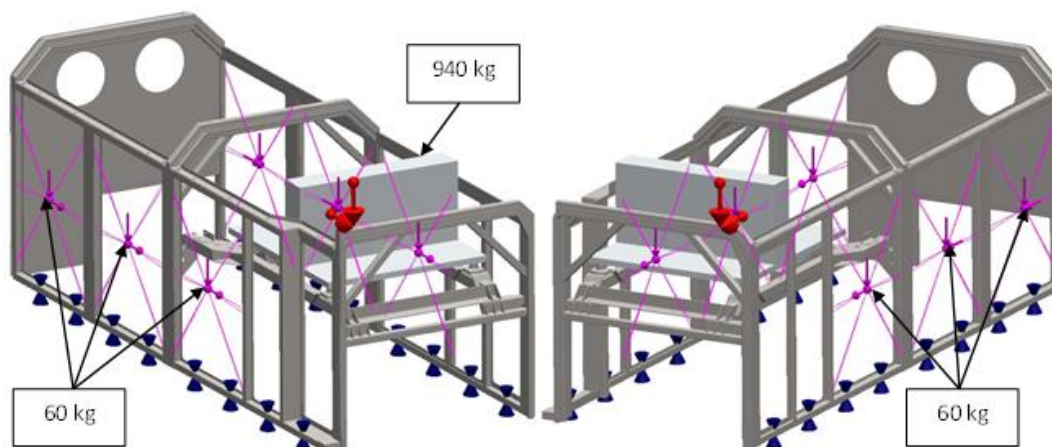
$$\varepsilon_{dop} = \varepsilon_{spr} + \varepsilon_{plast} = 0,00178 + 0,002 = 0,00378 \quad (6.1)$$

W modelach obliczeniowych kontenerów uwzględniono wszystkie elementy mające wpływ na pracę układu nośnego oraz właściwe wprowadzenie i odebranie analizowanych obciążeń. Schematy obciążeń i warunków brzegowych zaprezentowano na rys. 6.25-6.28.

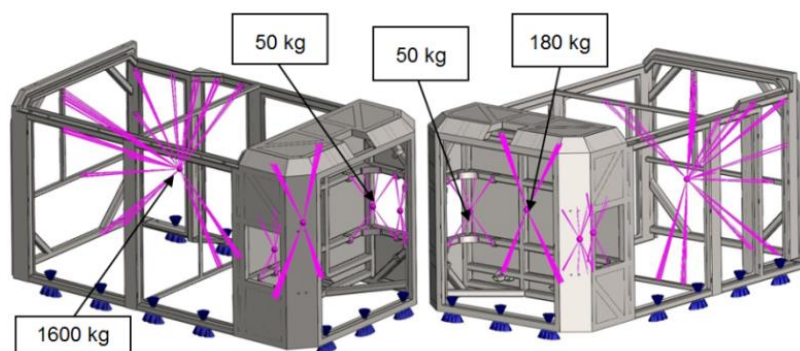
W modelach obliczeniowych kontenerów zastosowano czterowęzłową siatkę bryłową typu C3D10. Podział modelu na elementy skończone przedstawiono na rysunkach 6.29 i 6.30.



Rys. 6.25. Przykładowy schemat obciążenia modelu obliczeniowego kontenera 0308 [4]



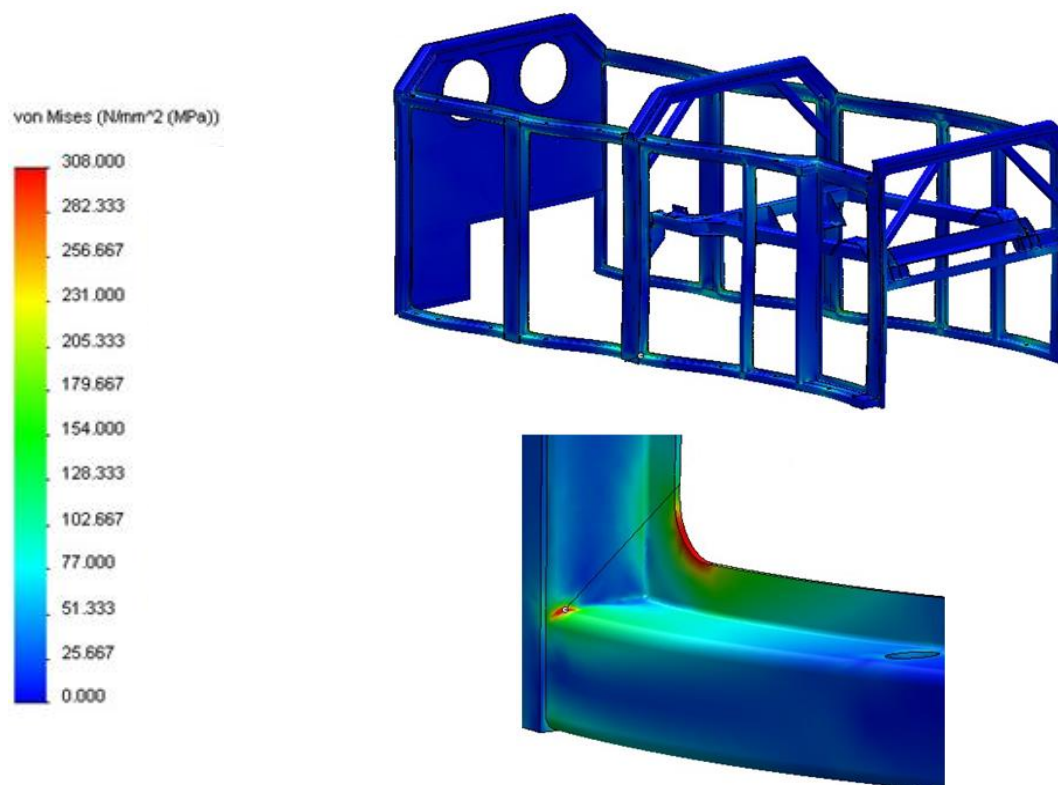
Rys. 6.26. Przykładowy schemat obciążenia modelu obliczeniowego kontenera 0306 [5]



Rys. 6.27. Przykładowy schemat obciążenia modelu obliczeniowego kontenera 0305 [3]

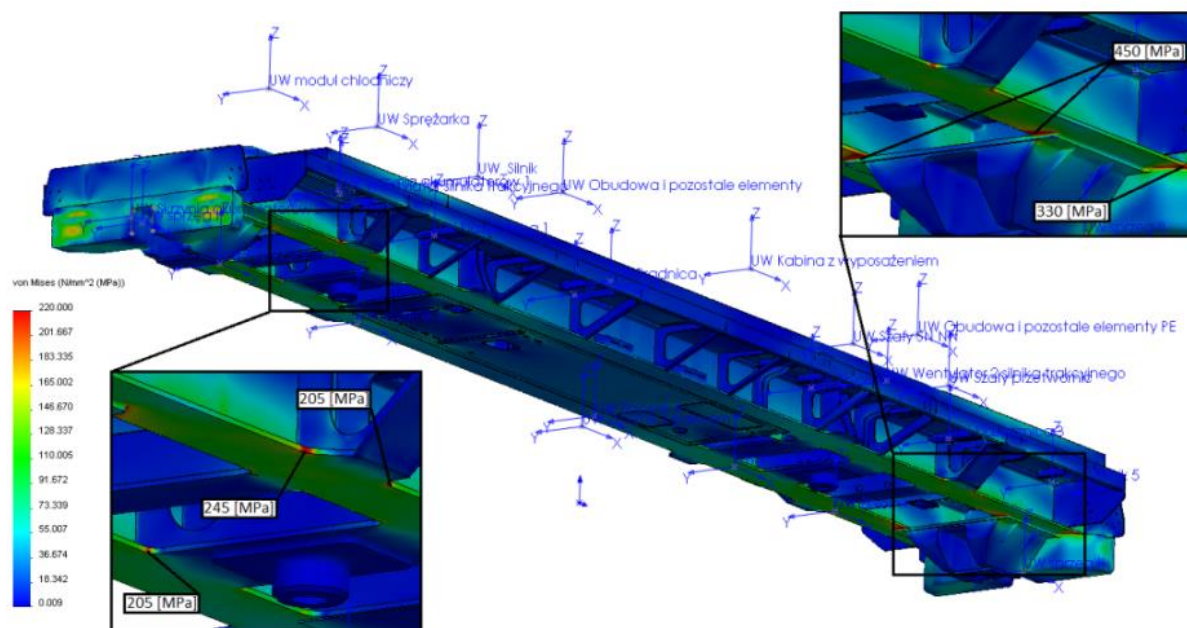


Rys. 6.28. Podział modelu obliczeniowego kontenera 0306 na elementy skończone [5]

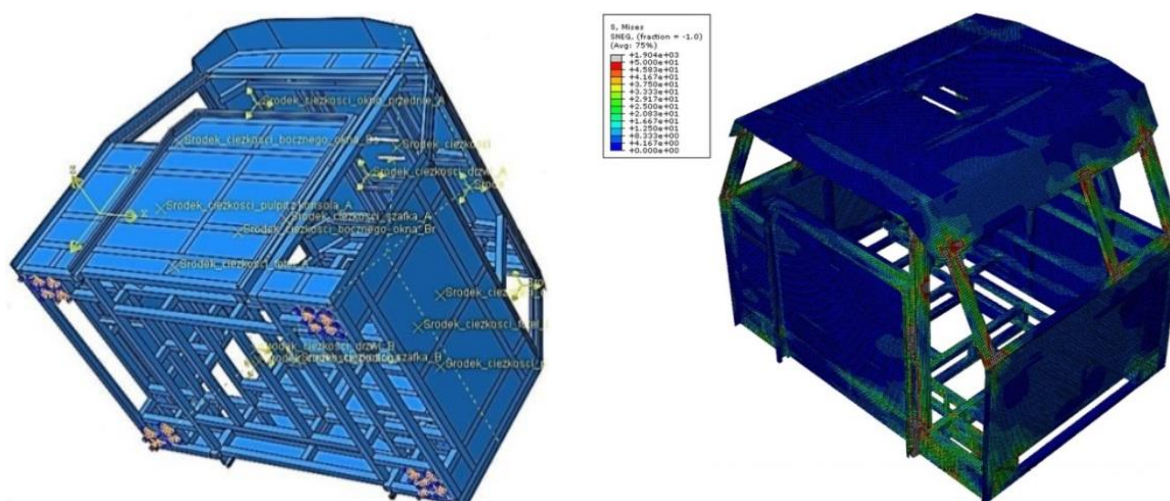


Rys. 6.29. Rozkład naprężeń zredukowanych wg Misesa w [MPa] w konstrukcji kontenera 0306 od nadzwyczajnych obciążeń pionowych i wzdłużnych [5]





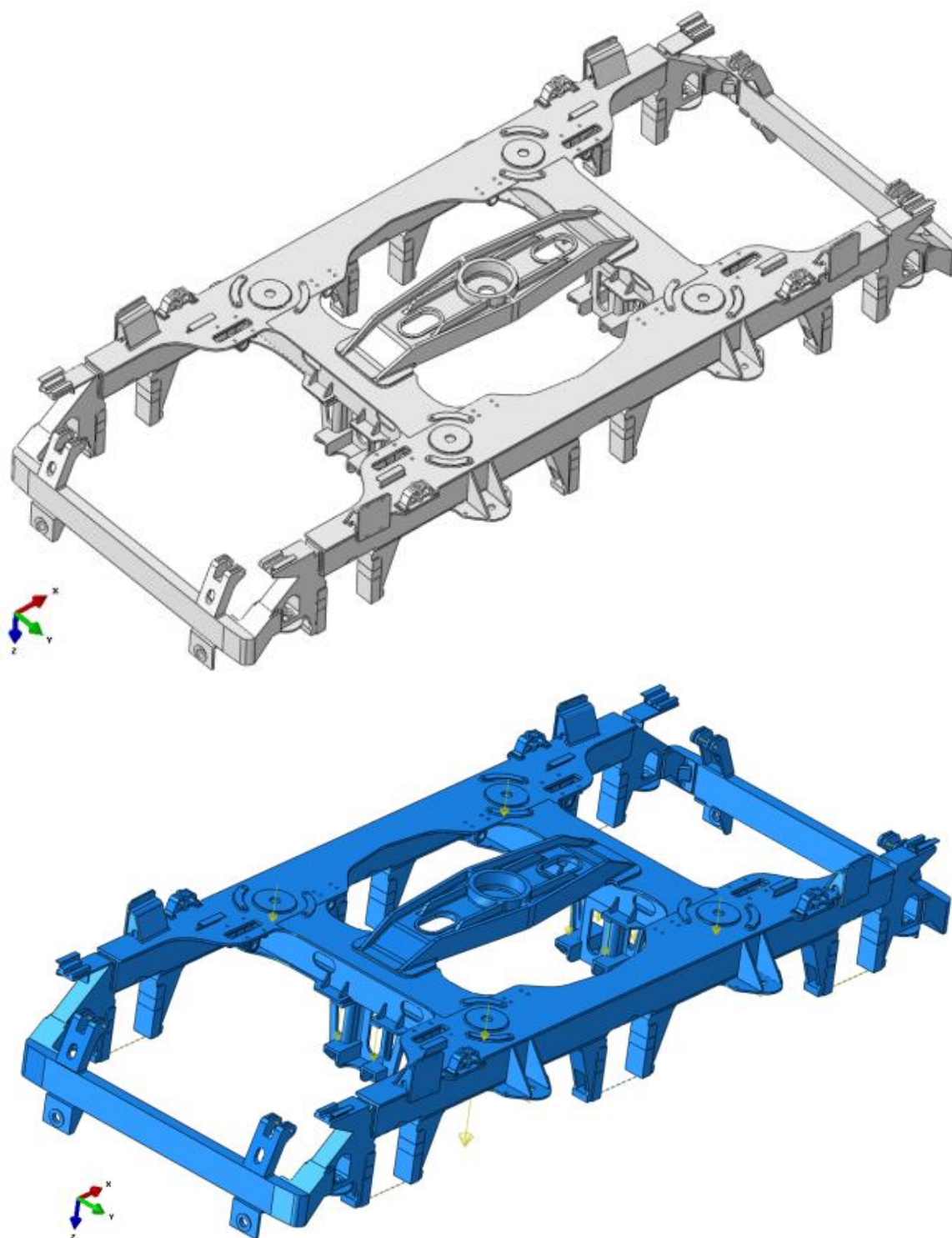
Rys. 6.32. Rozkład naprężeń zredukowanych wg Misesa w MPa dla obciążeń pionowych i wzdłużnych [6]



Rys. 6.33. Model obliczeniowy kabiny lokomotywy 19D i rozkład naprężeń od obciążeń nadzwyczajnych [56]

### Analiza wytrzymałości statycznej MES ramy wózka

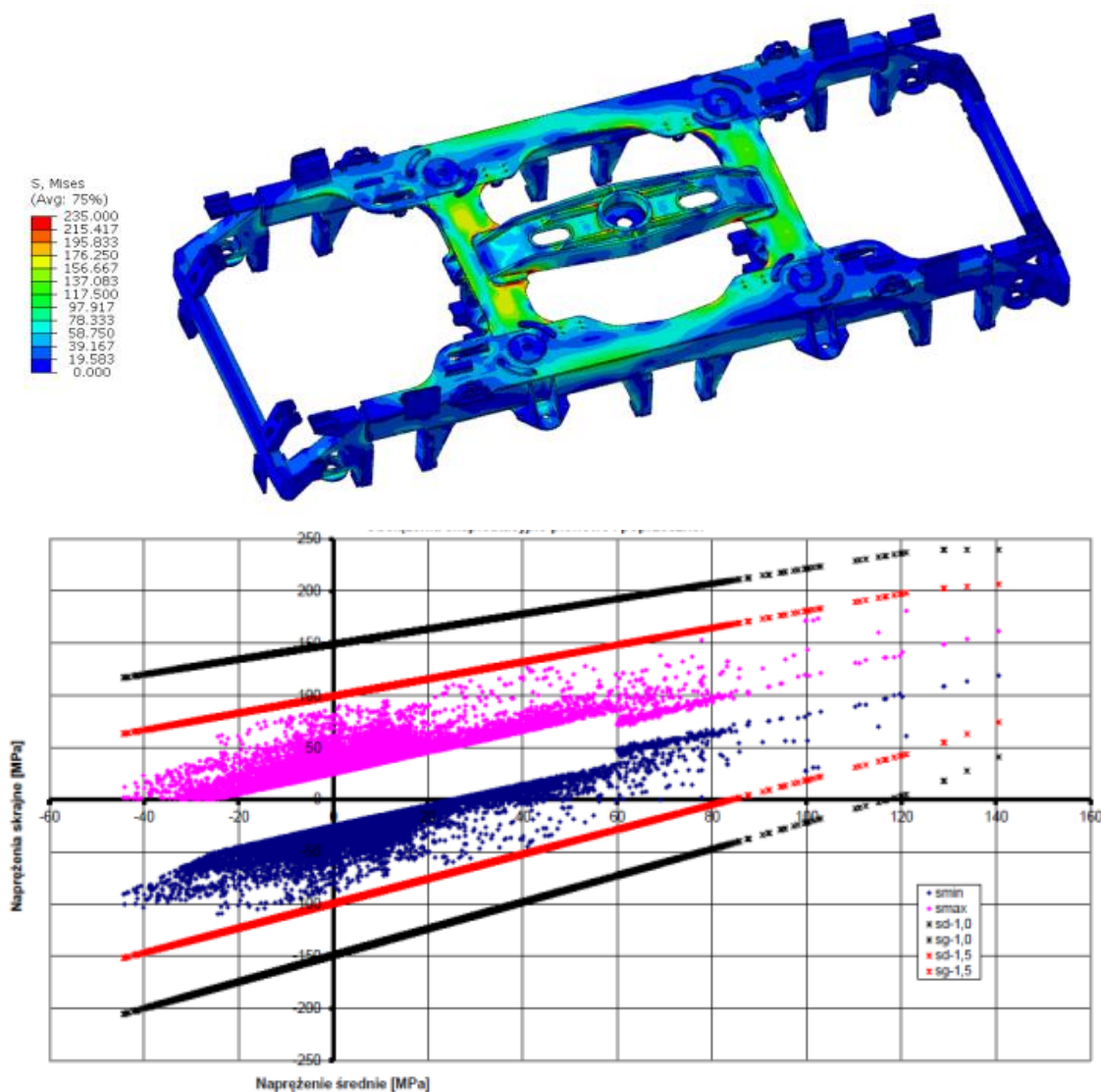
Ze względu na brak obliczeń wytrzymałościowych dla ramy wózka lokomotywy TEM2 niezbędne było przeprowadzenie oceny wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej ramy w oparciu o wymagania zawarte w normie PN-EN 13749 [68]. Takie postępowanie jest niezbędne nawet w przypadku, gdy dany element lokomotywy nie podlegał zmianom podczas modernizacji. W tym celu zbudowano model obliczeniowy ramy wózka i poddano obciążeniom pionowym, bocznym i wzdłużnym w zakresie obciążeń nadzwyczajnych i zmęczeniowych. Na rysunku 6.34 przedstawiono model obliczeniowy ramy wózka i schemat obciążeń pionowych, a na rys. 6.35 rozkład naprężeń od nabiegania wózka z przyspieszeniem 5 g i wykres wytrzymałości zmęczeniowej Goodmana.



Rys. 6.34. Model obliczeniowy ramy wózka lokomotywy 19D [57]

Przeprowadzone analizy wykazały, że poziom naprężeń powstających w ramie wózka dla kombinacji nadzwyczajnego obciążenia pionowego, poprzecznego, obciążenia pochodzącego od nadzwyczajnego hamowania, sił wzdłużnych diagonalnych oraz obciążenia powstającego podczas wykolejenia nie przekracza wartości dopuszczalnych określonych w normie PN-EN 13749 [68]. Ponadto wieloletnia eksploatacja wózka oraz pozytywny wynik analiz od obciążeń zmęczeniowych świadczą o tym, że konstrukcja ramy wózka zaprojektowana w latach 60-tych spełnia wymagania obowiązujących norm.



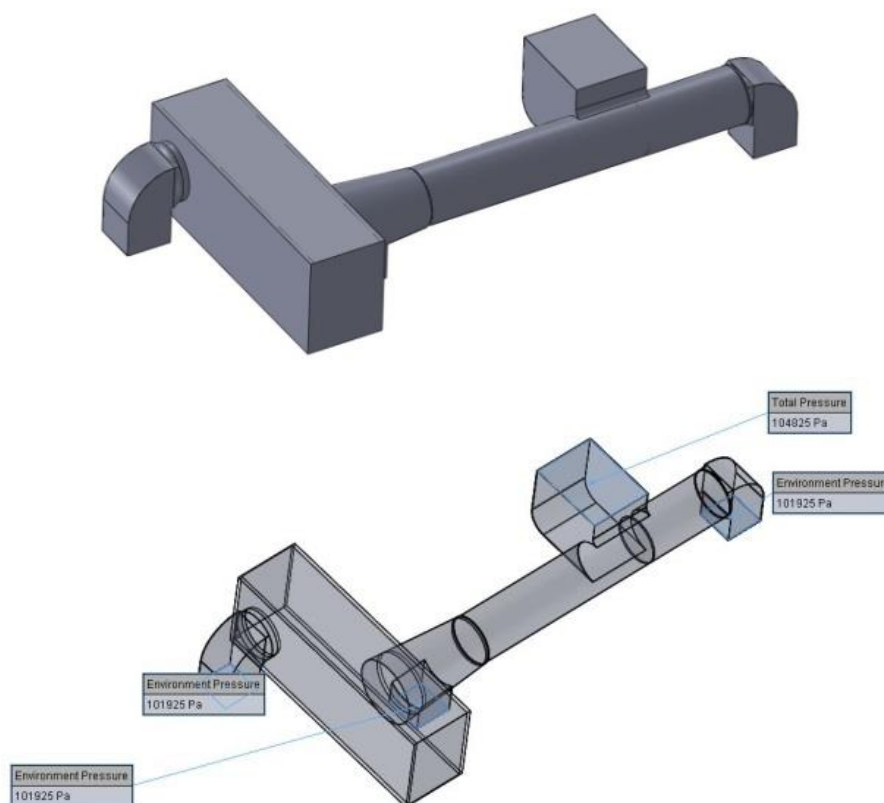


Rys. 6.35. Rozkład naprężeń zredukowanych wg Misesa w MPa i rozkład naprężeń głównych na tle wykresu Goodman'a dla ramy wózka lokomotywy 19D [13, 57]

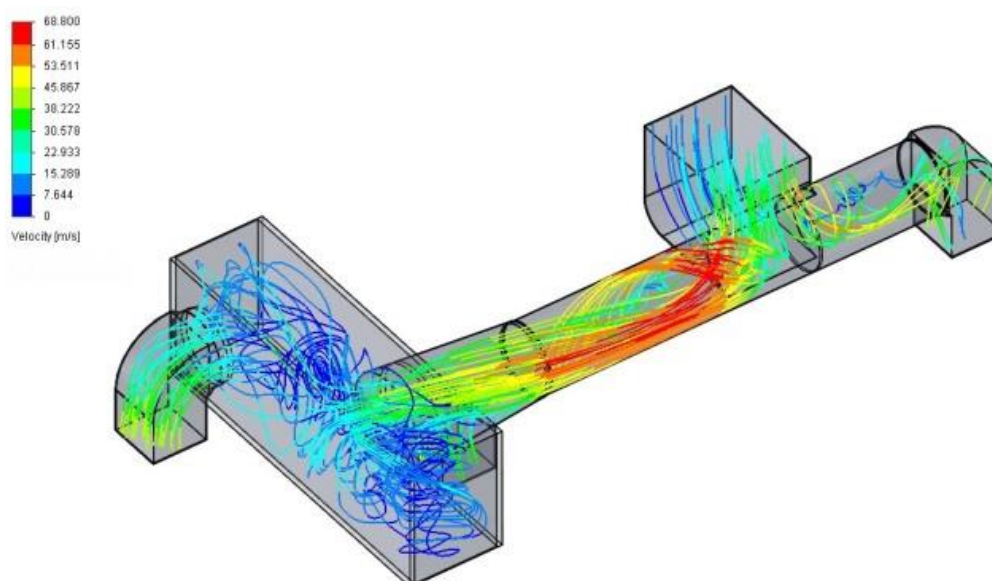
### Analiza przepływu powietrza w układzie wentylacji silników trakcyjnych

Celem analizy było zagwarantowanie jak najbardziej równomiernego rozkładu strumienia powietrza na silniki oraz jak najniższych strat ciśnienia w kanałach. Niezbędne obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych MES. Dla właściwego wentylowania każdego z silników trakcyjnych trzeba przepompować przez nie maksymalnie po  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  powietrza atmosferycznego. Spręż wentylatora na wlocie powietrza do układu musi zapewniać możliwość dostarczenia do każdego z silników właśnie takiej (wymaganej) ilości powietrza. Zatem spadek ciśnienia w układzie wentylator-kanały-silniki trakcyjne nie może być większy niż wynikałoby to z charakterystyki wentylatora. Na rysunku 6.36 przedstawiono model obliczeniowy jednego z kanałów i schemat warunków brzegowych a na rys. 6.37 zaprezentowano rozkład prędkości przepływu powietrza w kanale.

Dzięki analizom numerycznym przepływów możliwe było zaprojektowanie kanałów wentylacyjnych z nadwyżką ciśnienia. Pozwala to w przypadku konieczności dokonania regulacji układu wentylacji na gotowym pojeździe na zastosowanie kryzy lub zabudowanie w kanale wylotowym przepustnicy.



Rys. 6.36. Model obliczeniowy kanału wentylacyjnego i schemat warunków brzegowych [2]



Rys. 6.37. Rozkład prędkości przepływu powietrza w układzie wentylacyjnym [2]

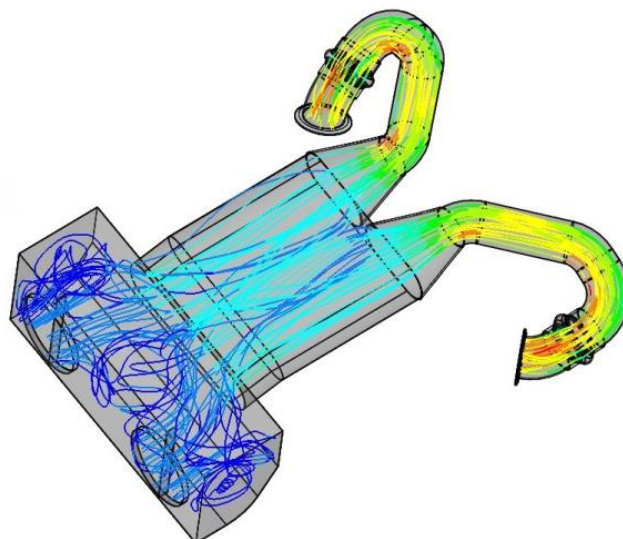
### Analiza symulacyjna przepływu powietrza w kolektorze dolotowym silnika spalinowego

Zabudowa nowego silnika spalinowego wymagała zaprojektowania kanału o najlepszym kształcie, który łączy turbosprężarkę silnika z filtrami powietrza. Kanał miał charakteryzować się odpowiednio niskim poziomem oporów przepływu, co miało przełożyć się na pokrycie zapotrzebowania na powietrze. Pobieranie przez turbosprężarkę wymaganej ilości powietrza do kanału dolotowego z zamontowanym nowym filtrem jest możliwe przy spadkach ciśnienia nie większych niż 2500 Pa. Nowy filtr powietrza dla przepływu  $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$  generuje spadek ciśnienia

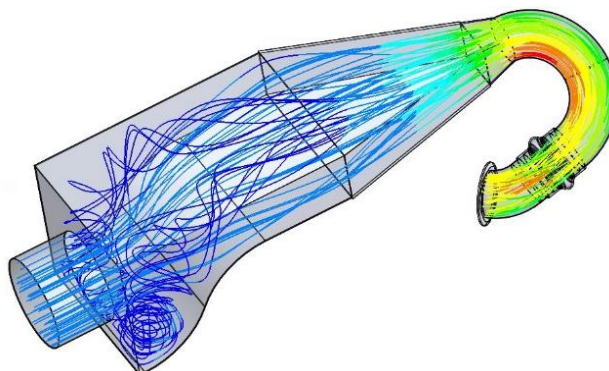
o 1000 Pa. Z tego względu przepływ powietrza przez kanał z nowym filtrem dopuszcza spadek ciśnienia w kanałach dolotowych o 1500 Pa. Opracowano trzy konfiguracje kanału dolotowego: A, B oraz C co przedstawiono na rys. 6.38.

Przeprowadzone analizy wykazały, że najkorzystniejszym rozwiązaniem jest konfiguracja kanału C, w którym straty przepływu są najmniejsze. Dodatkowo element C zajmuje znacznie mniej miejsca, co ułatwia czynności serwisowe silnika.

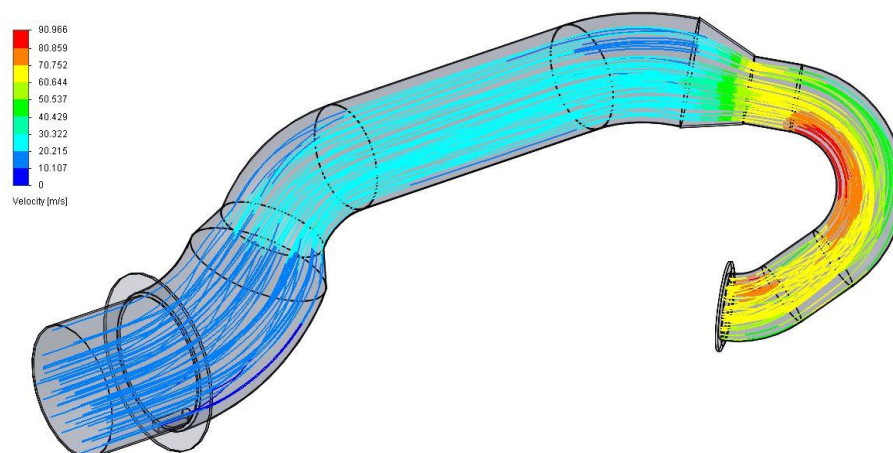
A



B



C



Rys. 6.38. Symulacje przepływu powietrza układów dolotowych w konfiguracjach A, B, C silnika spalinowego lokomotywy 19D [1, 13, 53]

## 7. PRZYKŁAD AUTORSKIEJ MODERNIZACJI LOKOMOTYWY

### 7.1. Opis lokomotywy

Modernizacja lokomotywy spalinowej powinna obejmować wiele etapów i dotyczy różnych jej elementów. W pracy główny nacisk położono na elementy związane z modernizacją układu silnikowo-prądnicowym. Modernizacja ta dotyczyła przede wszystkim metodyki doboru takiego zespołu. W celu zobrazowania skomplikowanego procesu modernizacji lokomotywy spalinowej na rys. 7.1 przedstawiono schemat blokowy obejmujący zakres takich czynności.

<b>ETAP I</b>	
	Lokomotywa bazowa
<b>ETAP II</b> (modernizacja ostoji i układów biegowych)	
	Ostoja + wózki <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ naprawa ostoji</li> <li>➤ naprawa wózków</li> <li>➤ przygotowanie ostoji do zabudowy nowego nadwozia</li> <li>➤ modyfikacja prowadzenia zestawów kołowych + modyfikacja hamulca</li> </ul>
<b>ETAP III</b> (modernizacja kabiny maszynisty)	
	Kabina maszynisty <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nowa konstrukcja kabiny w pełni wyposażonej jako niezależny moduł na podporach elastycznych</li> </ul>
<b>ETAP IV</b> (zabudowa nadwozia)	
	Przedziały maszynowe <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ nowe przedziały maszynowe jako moduły</li> <li>➤ wymiana zespołu prądotwórczego z układami peryferyjnymi</li> <li>➤ wymiana elektrotechniki</li> <li>➤ nowy układ pneumatycznego hamulca</li> </ul>
<b>ETAP V</b>	
	Lokomotywa po modernizacji

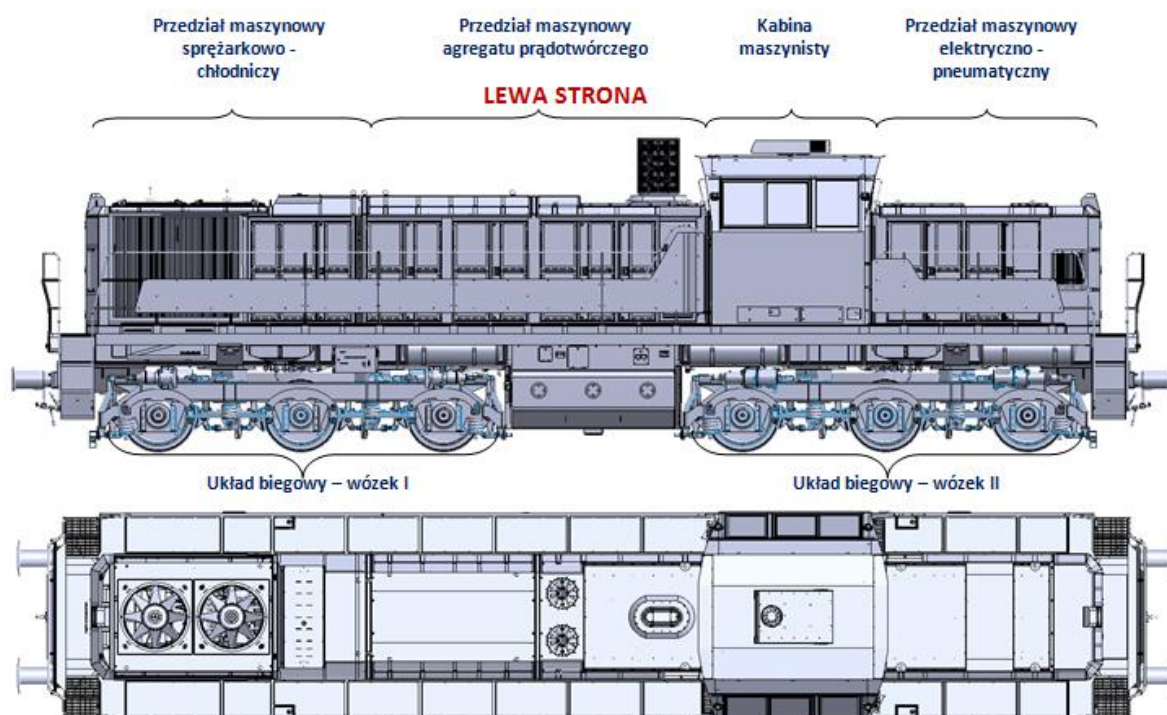
Rys. 7.1. Schemat blokowy modernizacji lokomotywy spalinowej

Zebrane doświadczenia w modernizacji lokomotyw spalinowych z ostatnich kilkunastu lat pozwoliły na opracowanie dokumentacji modernizacji lokomotywy 19D.

Lokomotywa spalinowa typu 19D o układzie Co-Co przeznaczona jest do ciężkich prac manewrowych oraz prowadzenia składów pociągów towarowych na liniach normalnotorowych o prześwicie toru 1435 mm. Lokomotywa opcjonalnie może pracować w trakcji wielokrotnej co oznacza, że możliwe jest prowadzenie z jednej kabiny do dwóch lokomotyw. Maksymalna prędkość lokomotywy wynosi 100 km/h.

Wymiary zewnętrzne lokomotywy spełniają wymagania karty UIC 505-1 (zarys podwyższony). Lokomotywa ma 2 wózki trzyosiowe.

Rozmieszczenia głównych przedziałów i urządzeń w zmodernizowanej lokomotywie typu 19D przedstawiono na rysunku 7.2 i 7.3.



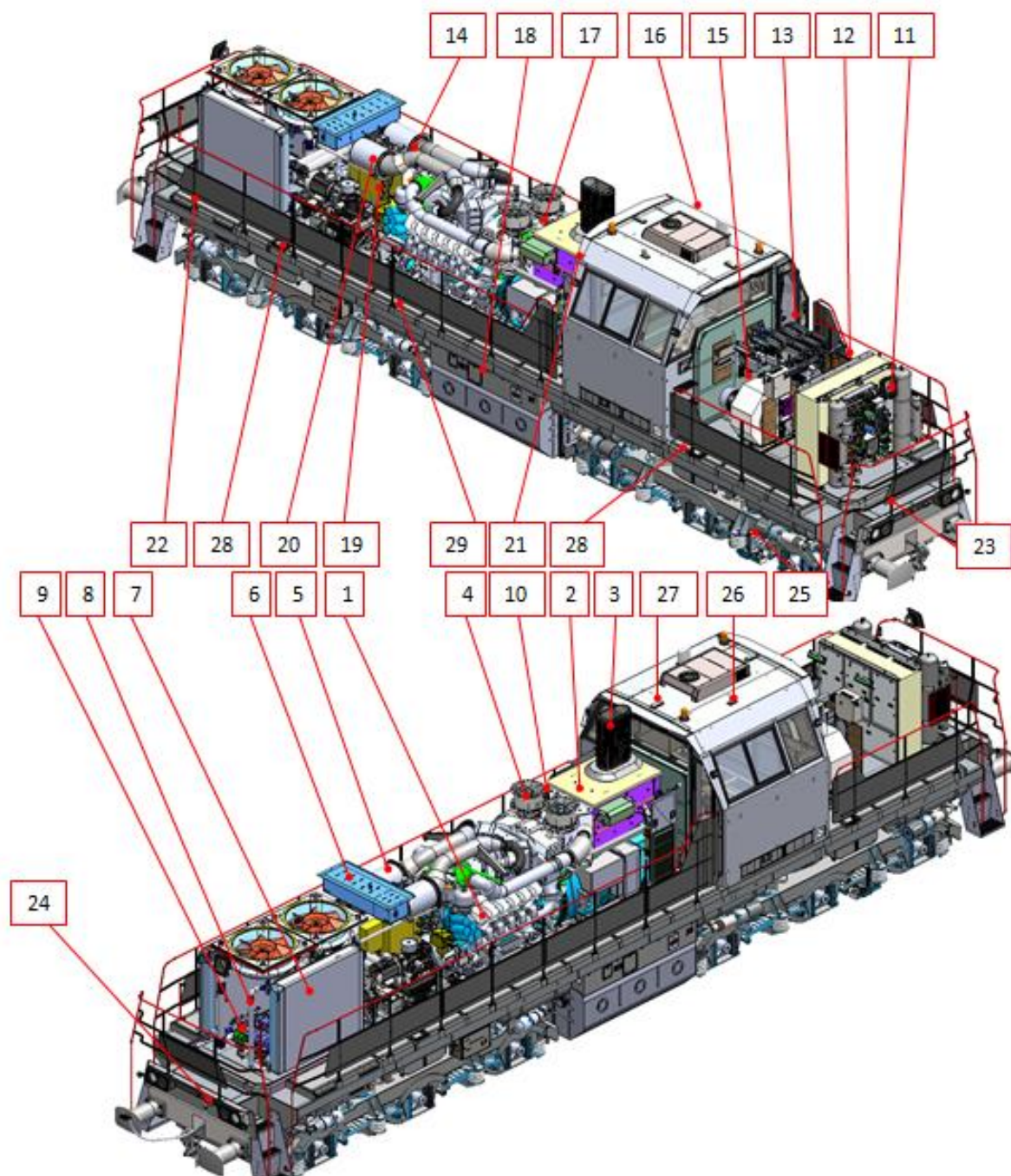
Rys. 7.2. Rozmieszczenia głównych przedziałów na lokomotywie 19D (widok z boku i z góry) [53, 95]

Składowe poszczególnych przedziałów opisano w dalszej części pracy.

### **Przedział maszynowy sprężarkowo-chłodniczy**

W przedziale sprężarkowo-chłodniczym między innymi zabudowano:

- moduł wytwarzania i wstępnego uzdatniania sprężonego powietrza 66ZL 01-1 w skład którego wchodzi: agregat sprężarkowy wraz z układem chłodzenia, separator cyklonowy, filtr wstępny, filtr dokładny i zbiornik skroplin,
- osuszacz adsorpcyjny 200 15ZH 15-1,
- filtr odpylający G1 12ZH 68-2,
- sterownik wytwarzania i uzdatniania sprężonego powietrza 172ZE,
- wentylator silników trakcyjnych,
- dwa filtry powietrza MANN-HUMMEL,
- dwie chłodnice płynu chłodzącego (sekcja HT i LT),
- zbiornik wyrównawczy płynu chłodzącego,
- wentylator chłodnic płynu chłodzącego z silnikiem hydraulicznym nieregulowanym,



Rys. 7.3. Rozmieszczenia głównych urządzeń w lokomotywie 19D: 1 – agregat prądowórczy z silnikiem spalinowym MTU, 2 – tłumik wylotu spalin z filtrem cząstek stałych, 3 – komin wylotu spalin, 4 – wentylatory przedziału maszynowego – agregatu prądowórczego, 5 – układ wlotu powietrza do silnika spalinowego z filtrami powietrza, 6 – zbiornik wyrównawczy układu chłodzenia silnika spalinowego, 7 – zespół chłodnic, 8 – wentylatory układu chłodzenia silnika spalinowego, 9 – podgrzewacze wody WEBASTO, 10 – układ REBS do smarowania obrzeży kół, 11 – tablica pneumatyczna i zbiorniki pomocnicze powietrza, 12 – zespół przetwornic JENOPTIK, 13 – urządzenia SN i NN, 14 – wentylator silników trakcyjnych – wózek I, 15 – wentylator silników trakcyjnych – wózek II, 16 – klimatyzator kabiny maszynisty – schładzacz, 17 – zbiornik wody umywalki, 18 – zbiornik paliwa, 19 – wstępny filtr paliwa, 20 – sprężarka powietrza z układem uzdatniania powietrza, układ sterowania sprężarką, 21 – układ kamer zewnętrznych, 22 – akumulatory, 23 – reflektory halogenowe i diodowe, 24 – gniazda sterowania wielokrotnego, 25 – elektromagnesy SHP, 26 – antena GPS, 27 – antena sterowania radiowego, 28 – piasecznice, 29 – główne zbiorniki powietrza [50, 53, 63]

- wentylator chłodnic płynu chłodzącego z silnikiem hydraulicznym regulowanym,
- zbiornik oleju hydraulicznego,
- chłodnicę oleju hydraulicznego,
- zespół podgrzewaczy płynu chłodzącego obiegu HT,
- zespół podgrzewacza płynu chłodzącego obiegu LT,
- reflektor górny,
- sterownik kontroli reflektorów,
- konwerter światłowodowy,
- czujniki wykrywania pożaru,
- dwie lampy oświetlenia.

### **Przedział maszynowy agregatu prądotwórczego**

W przedziale agregatu prądotwórczego między innymi zabudowano:

- silnik spalinowy MTU 124000R84,
- zespół prądnic,
- tłumik wylotu spalin z silnika z filtrem cząstek stałych,
- filtr i pompę paliwa,
- pompę hydrauliczną,
- zespół wentylatorów agregatu prądotwórczego,
- zbiornik wody do celów sanitarnych,
- zbiornik smaru z pompą układu smarowania obrzeży kół REBS,
- sześć generatorów aerozolu stałej instalacji gaszącej,
- czujniki wykrywania pożaru,
- cztery lampy oświetlenia.

### **Przedział maszynowy elektryczno-pneumatyczny**

W przedziale elektryczno-pneumatycznym między innymi zabudowano:

- zespół aparatów SN w której zabudowano m.in.: nawrotnik, rezystory, styczniki liniowe, styczniki osłabienia wzbudzenia. Wejście do przedziału SN jest zabezpieczone za pomocą elektrycznego systemu blokady dostępu, przy pracującym silniku napędowym i zasilaniu elektrycznym z zespołu prądotwórczego,
- zespół aparatów NN w którym głównie zabudowano: przekaźniki, sterowniki, styczniki i listwy zaciskowe,
- zespół przetwornic,
- wentylator silników trakcyjnych,
- tablicę pneumatyczną 200ZH 99-1,
- zbiornik rozrządu,
- dwa zbiorniki sterujące,
- dwa zbiorniki pomocnicze,
- zasilacze tablicy pneumatycznej,
- reflektor górny,
- sterownik kontroli reflektorów,
- konwerter światłowodowy,
- czujniki wykrywania pożaru,
- lampy oświetlenia,
- wyłączniki krańcowe.

Podstawowe parametry lokomotywy przed i po modernizacji zestawiono w tabeli 7.1.

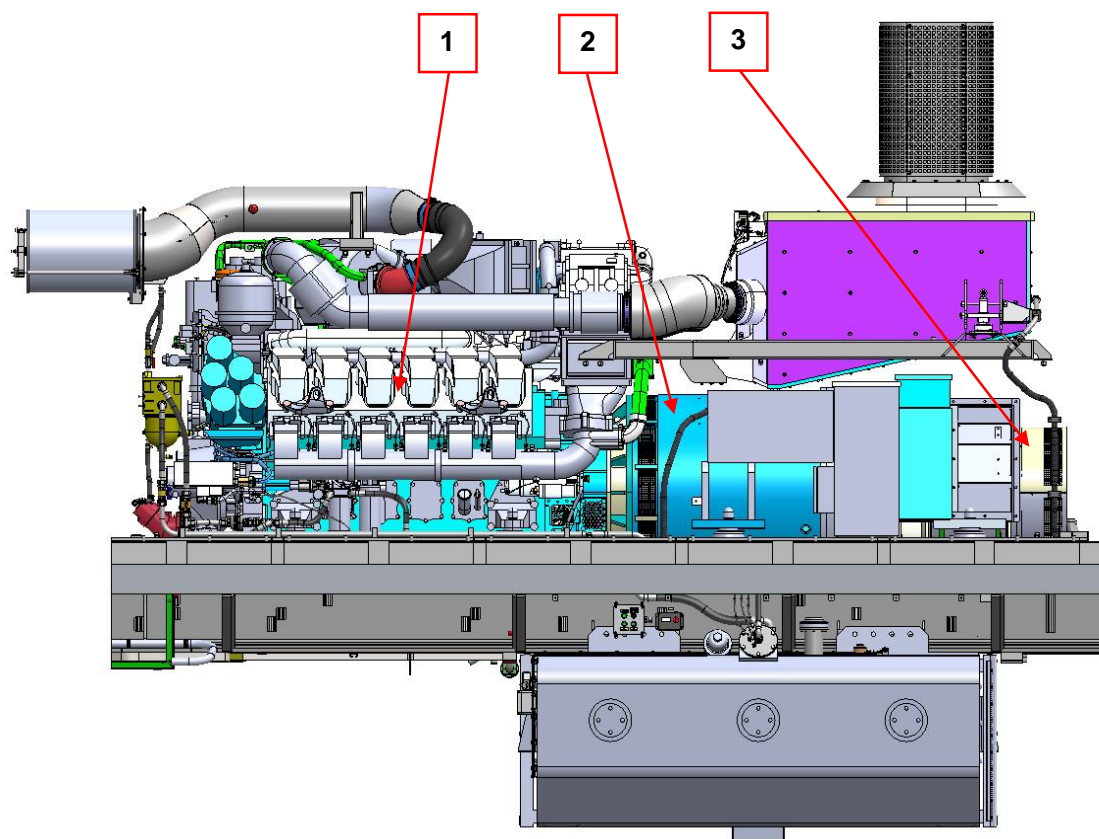
Tabela 7.1. Podstawowe parametry lokomotywy 19D [13, 63]

Wielkość, parametr		Jedn.	Wartość	
			Przed modern.	Po modernizacji
Producent lokomotywy bazowej		–	ZSRR BMZ Briańsk	
Typ		–	TEM2	19D
Masa służbowa lokomotywy		Mg	118 <sup>-3%</sup>	
Prędkość maksymalna		km/h	100	
Rodzaj przekładni		–	elektryczna	elektryczna
			DC-DC	AC-DC
Hamulec	zasadniczy	–	Matrosow	MH
	postojowy			sprężynowy
Urządzenia bezpieczeństwa ruchu		–	brak	SHP, CA, RS
Silnik spalinowy	–	–	ZSRR	MTU
	–	–	PD1M	12V 4000 R84
	moc znamionowa	kW	883	1800
	prędkość obrotowa	min <sup>-1</sup>	750	1800
	emisja zanieczyszczeń	–	Brak danych	EU 26/2004 etap III B
	zużycie paliwa	g/kWh	229	202 <sup>+5%</sup>
	zużycie oleju	g/kWh	Brak danych	0,2% zużycia paliwa
Prądnica główna	wytwórnia	kW	ZSRR	JENOPTIK
	typ		GP-300BU2	SDV 95.50-12
	moc znamionowa ciągła		780	1800
Prądnica pomocnicza	wytwórnia	kW	ZSRR	JENOPTIK
	moc znamionowa ciągła		MWG-25/IIU2 5,75	SDV 60.26-12  120
Silniki trakcyjne	typ	–	ED 118 AU2	
	moc znamionowa ciągła	kW	105	~ 245
Napięcie obwodów sterowania		V	75	24
System sterowania		–	elektryczny	mikroprocesorowy
Sprężarka powietrza	rodzaj, napęd	–	tłokowa, od wału korb.	śrubowa, silnik elektryczny, 3×400 V AC, 22 kW
	wydajność	m <sup>3</sup> /min	4,6	2,9
Napęd wentylatora chłodnicy		–	wał Cardana	hydrostatyczny – płynna regulacja prędkości obrotowej
Napęd wentylatorów silników trakcyjnych		–	przekładnia pasowa	silnik elektryczny 3×400 V AC
Kabina maszynisty		–		nowe wyposażenie spełniające aktualne wymagania w zakresie ergonomii i bezpie- czeństwa pracy
Stałe urządzenie gaśnicze przedziału silnika		–	brak	generator aerozolu



## 7.2. Zespół silnikowo-prądnicowy

Zespół silnikowo-prądnicowy zmodernizowanej lokomotywy tworzą silnik spalinowy (MTU), zespół prądnicy głównej z prostownikiem i prądnicy pomocniczej (JENOPTIK). Silnik spalinowy z zespołem prądnic posadowiono na ostoi za pomocą elastycznych podpór. Prądnica główna wraz z pomocniczą sprzężone są przez kołnierz (na sztywno) oraz sprzęgło główne z wałem silnika napędowego. Widok zespołu napędowego lokomotywy typu 19D zamieszczono na rys. 7.4.



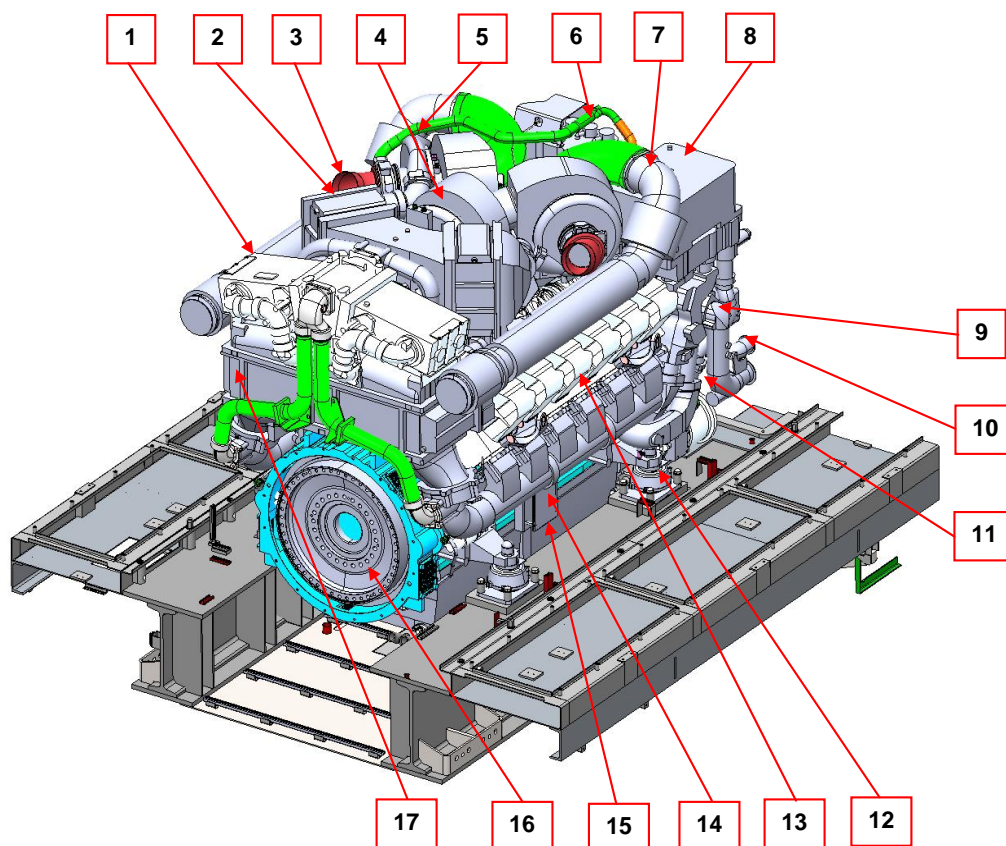
Rys. 7.4. Zespół silnikowo-prądnicowy lokomotywy typu 19D: 1 – silnik spalinowy, 2 – prądnica główna z zespołem prostowniczym, 3 – prądnica pomocnicza

### Silnik spalinowy

Podstawowe cechy konstrukcji silnika spalinowego MTU 124000R84:

- czterosuwowy, 12-cylindrowy o kącie rozwidlenia V 90°,
- chłodzenie cieczą dwuobiegowe (HT i LT),
- wtrysk bezpośredni,
- turbodoładowanie z zewnętrznym chłodzeniem,
- 2 zawory dolotowe i 2 wylotowe na każdy cylinder,
- niechłodzony przewód kolektora wylotowego,
- system wtryskowy „Common-Rail”, sterowany elektronicznie,
- elektroniczne sterowanie silnikiem, sterownik ECU (Engine Control Unit),
- układ rozruchowy składający się z dwóch rozruszników elektrycznych,
- obudowa koła zamachowego – kołnierz SAE 00,
- technologia ograniczenia emisji zanieczyszczeń – EGR (recyrkulacja gazów spalinowych) oraz DPF (filtr cząstek stałych).

Widok silnika spalinowego zamieszczono na rys. 7.5.



Rys. 7.5. Silnik spalinowy MTU 124000R84: 1 – chłodnica recyrkulacji spalin (chłodnica EGR), 2 – chłodnica powietrza doładowującego (wysoka temperatura), 3 – wlot powietrza, 4 – turbosprężarka napędzana spalinami (wysokie ciśnienie), 5 – turbosprężarka napędzana spalinami (niskie ciśnienie), 6 – odpowietrzenie skrzyni korbowej, 7 – wylot spalin, 8 – wymiennik ciepła oleju, 9 – wlot płynu chłodzącego silnik, 10 – wylot płynu chłodzącego powietrze doładowujące, 11 – pompy płynu chłodzącego (LT/HT), 12 – podpora elastyczna, 13 – głowica cylindrowa, 14 – moduł sterowania rozrusznikiem (POM), 15 – miska olejowa, 16 – układ odbioru mocy po stronie napędu, 17 – chłodnica powietrza doładowującego (niska temperatura) [53]

Na rysunku 7.6 przedstawiono kompletny zespół silnikowo-prądnicowy lokomotywy typu 19D po zmontowaniu w fabryce JENOPTIK, natomiast w tabeli 7.2 zaprezentowano podstawowe dane konstrukcyjne i eksploatacyjne silnika spalinowego.



Rys. 7.6. Widok na zespół prądnicowy z silnikiem typu MTU 12V4000R84 (dla modernizowanej lokomotywy 19D) [53]

Tabela 7.2. Parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne silnika MTU [63]

Parametr	Jednostka	Wartości parametru/wielkość
Typ silnika	–	MTU 12V4000R84
Moc silnika	kW	1800
Prędkość obrotowa silnika	obr/min	1800
Dopuszczalna wysokość eksploatacji	m (npm)	800
Minimalna temperatura płynu chłodzącego przy rozruchu silnika	°C	> +25 dla obiegu HT > +5 dla obiegu LT
Masa całkowita suchego silnika	kg	7700
Wymiary/długość/szerokość/wysokość	mm	2675/1700/2005
Emisja substancji szkodliwych	–	etap IIIB wg dyrektywy 2004/26/WE
Technologia osiągnięcia emisji zanieczyszczeń – etap IIIB	–	EGR+DPF
Zużycia paliwa przy mocy znamionowej	g/kWh	202+5%
Zużycie oleju silnikowego (po 100 mth pracy)	%	0,2 % jednostkowego zużycia paliwa

Zabudowa nowego silnika spalinowego firmy MTU o zwiększonej mocy wymagała wykonania na lokomotywie zabudowy szeregu nowych układów takich jak:

- posadowienie zespołu prądotwórczego,
- układu poboru powietrza z filtrami powietrza,
- układu wylotu spalin (tłumik z filtrem cząstek stałych, komin z osłoną termiczną),
- układu paliwowego (modyfikacja zbiornika paliwa, nowa pompa paliwa, układ przewodów z filtrem wstępnym),
- układu chłodzenia (zespół chłodnic HT i LT, zbiornik kompensacyjny płynu chłodzącego, wentylatory chłodnic),
- układu napędu hydrostatycznego wentylatorów chłodnic (pompa hydrauliczna, silniki hydrauliczne, chłodnica oleju, zbiornik oleju),
- nowoczesnym zespołem prądnic synchronicznych (główna, pomocnicza) firmy JENOPTIK.

W zmodernizowanej lokomotywie zabudowana jest prądnica główna typu SDV 95.50-12. Jest sprzężona z silnikiem spalinowym i stanowi źródło prądu dla zasilania silników trakcyjnych. Jest to bezszczotkowa prądnica obcowzbudna, trójfazowa, synchroniczna, o własnym chłodzeniu, z zabudowaną wzbudnicą i wirującym prostownikiem do zasilania własnych obwodów wzbudzenia. Podstawowe dane techniczne maszyny z uwzględnieniem wymienionego zespołu prostowniczego na wyjściu, to:

- maksymalne napięcie  $U_{\max} = 750 \text{ V DC}$ ,
- maksymalne natężenie prądu  $I_{\max} = 6600 \text{ A}$ ,
- moc znamionowa  $P = 1800 \text{ kW}$  przy 1800 obr/min.

Prądnica zasilana po 3 silniki na każdym wózku przez zespół prostowniczy 6-pulsowy. Zasilanie głównego uzwojenia wzbudzenia następuje bezszczotkowo przez wirujący prostownik. Prądnica chłodzona jest przelotowo w układzie chłodzenia własnego przez uzależniony od prędkości obrotowej wentylator. Zasysanie powietrza chłodzącego odbywa się przez kanał powietrza dopływowego, co zapewnia również najwłaściwsze chłodzenie prostowników. W

celu uniknięcia zbyt wysokiej temperatury w uzwojeniu, prądnicę wyposażono w zabezpieczenie temperaturowe, które powoduje odłączenie wzbudzenia.

Prądnicę pomocniczą typu SDV 60.26-12 sprzężoną z prądnicą główną i silnikiem spalinowym przewidziano do zasilania obwodów sterowania, rozrządu, pomocniczych, jak również do ładowania zespołu akumulatorów. Jest to maszyna bezszczotkowa, trójfazowa, synchroniczna z zabudowaną wzbudnicą i wirującym prostownikiem. Prądnica bezpośrednio zasila zespół przetwornic zabudowanych w przedziale elektryczno-pneumatycznym lokomotywy napięciem  $U_n = 3 \times 450 \text{ V AC}$ . Moc znamionowa prądnicy pomocniczej  $P_n = 120 \text{ kW}$ , przy 1800 obr/min. Podobnie jak prądnica główna jest chłodzona przelotowo i również jest wyposażona w zabezpieczenie temperaturowe, które powoduje odłączenie wzbudzenia, w chwili wystąpienia zbyt wysokiej temperatury w uzwojeniu.

Zespół przetwornic zasilających obwody niskiego napięcia służy do przetwarzania napięcia z prądnicy pomocniczej, na odpowiednie napięcie zasilania poszczególnych obwodów AC i obwodu DC:

- przetwornica (falownik) zasilania wentylatorów silników trakcyjnych,
- przetwornica (falownik) zasilania sprężarki i urządzenia pomocnicze,
- konwerter (ładowarka) do ładowania baterii akumulatorów.

W skład zespołu przetwornic wchodzi również prostowniki zasilania układów pomocniczych oraz transformator do zasilania obwodów 230 V AC. Na zespole przetwornic są następujące wyjścia napięciowe do zasilania obwodów pomocniczych, sterowania i rozrządu:

- wyjście  $3 \times 400 \text{ V AC}$ , 50 Hz (HBU1),
- wyjście 230 V AC, 50 Hz (HBU1),
- wyjście  $3 \times 0\text{--}400 \text{ V AC}$ , 0,5–50 Hz (HBU2),
- wyjście 24–28 V DC (HBU4).

Zespół przetwornic zabudowano w układzie elektryczno-pneumatycznym od strony tablicy pneumatycznej.

### 7.3. Układ paliwowy

W lokomotywie zabudowano układ paliwowy zasilający następujące zespoły:

- silnik spalinowy MTU 124000R84,
- dwa ogrzewacze wstępne układu HT typu WEBASTO THERMO 350,
- podgrzewacz wstępny układu LT typu WEBASTO DBW 2016.

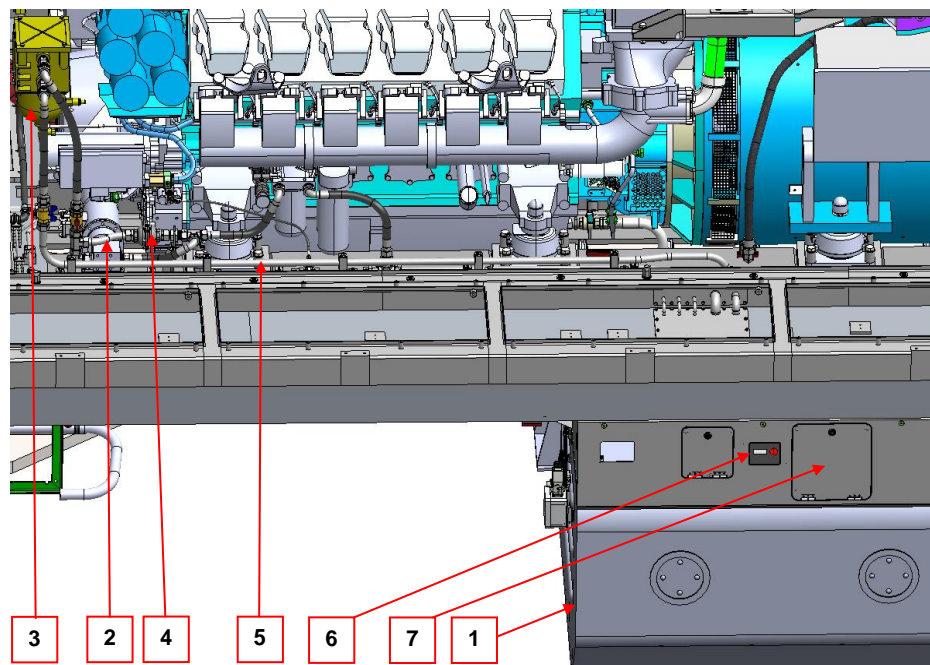
Do każdego z urządzeń paliwo ze zbiornika dostarczane jest niezależnym przewodem paliwowym. Nadmiar paliwa powraca z urządzeń do zbiornika wspólnym przewodem przelewowym. Na przewodzie zasilającym silnik spalinowy zabudowano filtr paliwa, pompę paliwa oraz zawór zwrotny zapewniający odpowiedni kierunek przepływu.

W zbiorniku paliwa zamontowano dwie hydrostatyczne sondy paliwa oraz dwa zawory odpowietrzające typu B 40.20 BE pełniące również funkcje zaworów bezpieczeństwa w przypadku wykolejenia lokomotywy. Napełnianie zbiornika odbywa się grawitacyjnie przez króćce do napełniania umieszczone po obu stronach lokomotywy za osłonami zbiornika.

Lokomotywę wyposażono w system monitorowania zużycia paliwa METRONIX. System ten oblicza ilość paliwa w zbiorniku oraz zużycie paliwa przez pojazd na podstawie danych rejestrowanych przez hydrostatyczne sondy paliwowe. Sygnały z sond paliwowych są rejestrowane przez moduł pomiarowy centralki systemu. Dane przekazywane są do modułu lokalizacji i transmisji danych, skąd dalej przesyłane są do wskaźników bocznych poziomu paliwa oraz przez sieć GSM do aplikacji dyspozytorskiej. Dalsza ich analiza następuje w aplikacji serwerowej dostępnej z poziomu przeglądarki internetowej dla wybranych użytkowników.

Na pulpicie maszynisty zamontowany jest terminal. Na terminalu widoczne są podstawowe parametry mierzone przez system, takie jak poziom i temperatura paliwa, czy wytwarzana moc prądnicy głównej. Terminal jest urządzeniem skupiającym funkcje terminala znakowego i stanowi urządzenie operatorskie systemu METRONIX.

Widok zabudowy urządzeń układu paliwowego zamieszczono na rys. 7.7.



Rys. 7.7. Zabudowa urządzeń układu paliwowego: 1 – zbiornik paliwa, 2 – pompa paliwa, 3 – filtra paliwa, 4 – zawór zwrotny, 5 – przewody paliwa, 6 – wskaźnik bocznych poziomu paliwa system monitorowania zużycia paliwa METRONIX, 7 – wlew paliwa [16]

#### 7.4. Układy chłodzenia i podgrzewania wstępnego silnika spalinowego

Układ chłodzenia silnika spalinowego składa się z dwóch oddzielnych obiegów płynu chłodzącego: wysokotemperaturowego HT i niskotemperaturowego LT.

W obu obiegach czynnikiem chłodzącym jest środek na bazie wody. Obiegi chłodzące są podłączone do wspólnego zbiornika wyrównawczego płynu chłodzącego który pełni następujące funkcje:

- magazynowanie płynu chłodzącego,
- kompensacja zależnych od temperatury wahań objętości i ciśnienia w obiegach płynu chłodzącego,
- odpowietrzenie obiegów płynu chłodzącego,
- kontrola wzrokowa poziomu płynu chłodzącego przez wziernik,
- nadzorowanie poziomu płynu chłodzącego przez wyłącznik pływakowy.

Chłodzone są następujące układy:

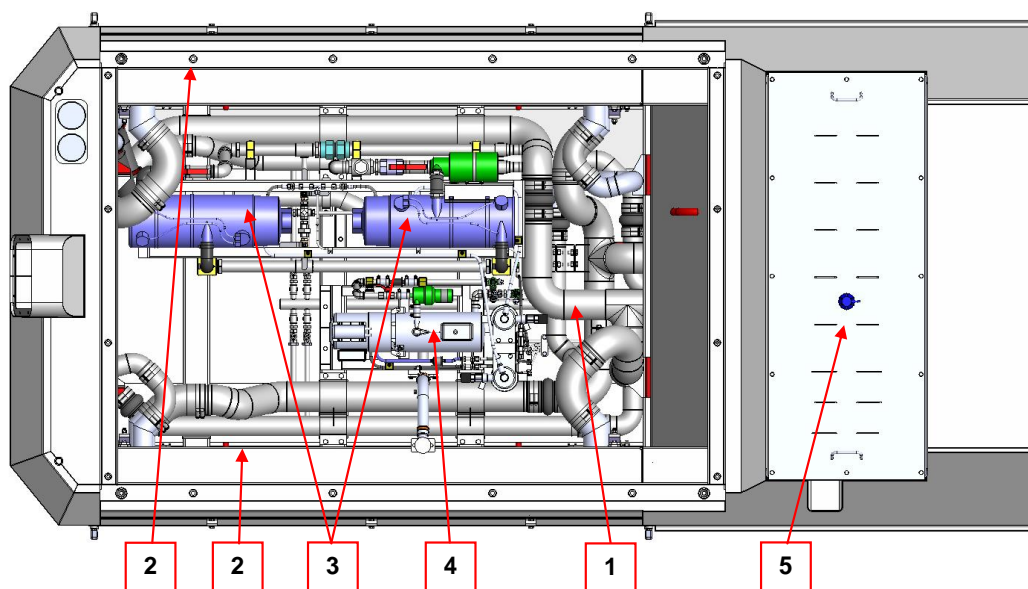
- obieg wysokotemperaturowy płynu chłodzącego HT odpowiada za chłodzenie silnika spalinowego,
- obieg niskotemperaturowy płynu chłodzącego LT odpowiada za chłodzenie układu doładowania powietrza do cylindrów silnika spalinowego,
- obieg HT bierze udział w chłodzeniu oleju hydraulicznego układu hydrostatycznego napędu wentylatorów.

Obieg wysokotemperaturowy HT chłodzi bezpośrednio silnik spalinowy. Zabudowana na silniku spalinowym pompa płynu tłoczy płyn do silnika. Ogrzany płyn chłodzący przepływa następnie do chłodnicy płynu w obiegu wysokotemperaturowym, gdzie ulega schłodzeniu przez zimne powietrze.

Obieg niskotemperaturowy LT schładza powietrze doładowujące w chłodnicy powietrza doładowującego do wymaganej temperatury wyjściowej. Zabudowana na silniku spalinowym pompa płynu tłoczy płyn do chłodnicy powietrza doładowującego silnika. Ogrzany płyn chłodzący przepływa następnie do chłodnicy płynu w obiegu niskotemperaturowym, gdzie ulega schłodzeniu przez zimne powietrze.

Powietrze chłodzące zasysane jest z zewnątrz lokomotywy przez dwa wentylatory: regulowany i nieregulowany. Zimne powietrze przepływa przez chłodnice płynu chłodzącego, gdzie odbiera ciepło od płynu, po czym następuje jego wypływ z układu.

Na lokomotywie zabudowano dwie chłodnice płynu chłodzącego. Na każdą chłodnicę składają się zabudowane jedna za drugą dwie sekcje chłodzące przeznaczone odpowiednio do obiegów HT i LT. Widok zabudowy urządzeń układu chłodzenia silnika spalinowego zamieszczono na rys. 7.8.



Rys. 7.8. Zabudowa urządzeń układu chłodzenia silnika spalinowego (bez układu hydrostatycznego napędu wentylatorów chłodnic) 1 – przewody układu chłodzenia, 2 – chłodnica płynu chłodzącego (sekcja HT i LT), 3 – zespół podgrzewaczy płynu chłodzącego obiegu HT, 4 – zespół podgrzewacza płynu chłodzącego obiegu LT, 5 – zbiornik wyrównawczy płynu chłodzącego [16]

Wentylatory napędzane są hydrostatycznie silnikami hydraulicznymi odpowiednio: regulowanym i nieregulowanym. Wymagane ciśnienie dla obu silników hydraulicznych wytwarza pompa hydrauliczna napędzana silnikiem spalinowym. Wydajność pompy hydraulicznej jest proporcjonalna do prędkości obrotowej napędu.

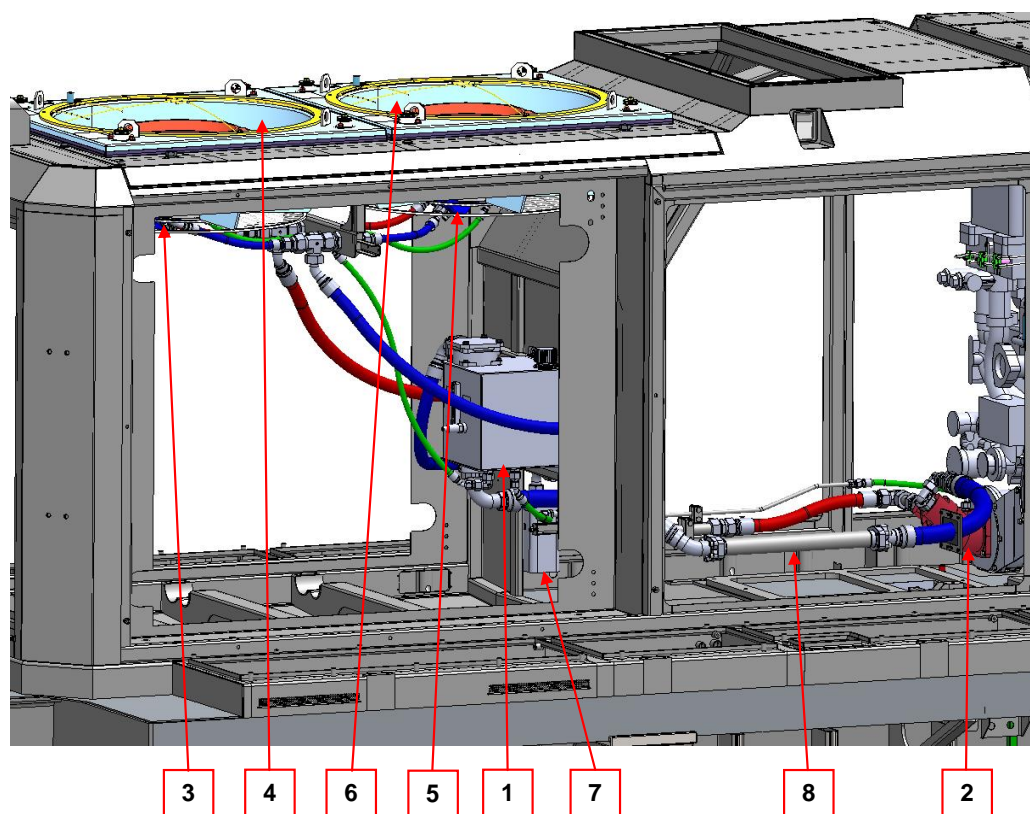
Prędkość obrotowa silnika hydraulicznego nieregulowanego jest proporcjonalna do prędkości wału korbowego silnika spalinowego. Prędkość obrotowa silnika hydraulicznego regulowanego jest kontrolowana i sterowana przez moduł sterowniczy w zależności od temperatury płynu chłodzącego. Gdy zmierzona temperatura jest niska (wysoka), przez silnik przepływa mniejsza (większa) ilość oleju a prędkość obrotowa silnika hydraulicznego zmniejsza (zwiększa) się bezstopniowo. Gdy temperatura spadnie poniżej określonej wartości, silnik hydrauliczny wyłącza się.

Ciepło wytwarzane w układzie hydrostatycznym napędu wentylatorów jest odbierane od oleju przez płyn chłodzący w chłodnicy oleju hydraulicznego. Chłodnica ta jest wbudowana równolegle w obieg wysokotemperaturowy płynu chłodzącego HT.

Zabudowany w układzie hydrostatycznym zbiornik oleju hydraulicznego pełni następujące funkcje:

- magazynowanie oleju hydraulicznego,
- kompensacja zależnych od temperatury wahań objętości i ciśnienia w obiegu oleju hydraulicznego przez filtr napowietrzania,
- kontrola poziomu oleju hydraulicznego przez sondę poziomą,
- kontrola wzrokowa poziomu oleju hydraulicznego przez wziernik,
- filtrowanie oleju hydraulicznego,
- wytwarzanie nadciśnienia w celu zapobieżenia uszkodzenia pompy hydraulicznej przez kawitację,
- powrót wyciekającego oleju do obiegu hydraulicznego.

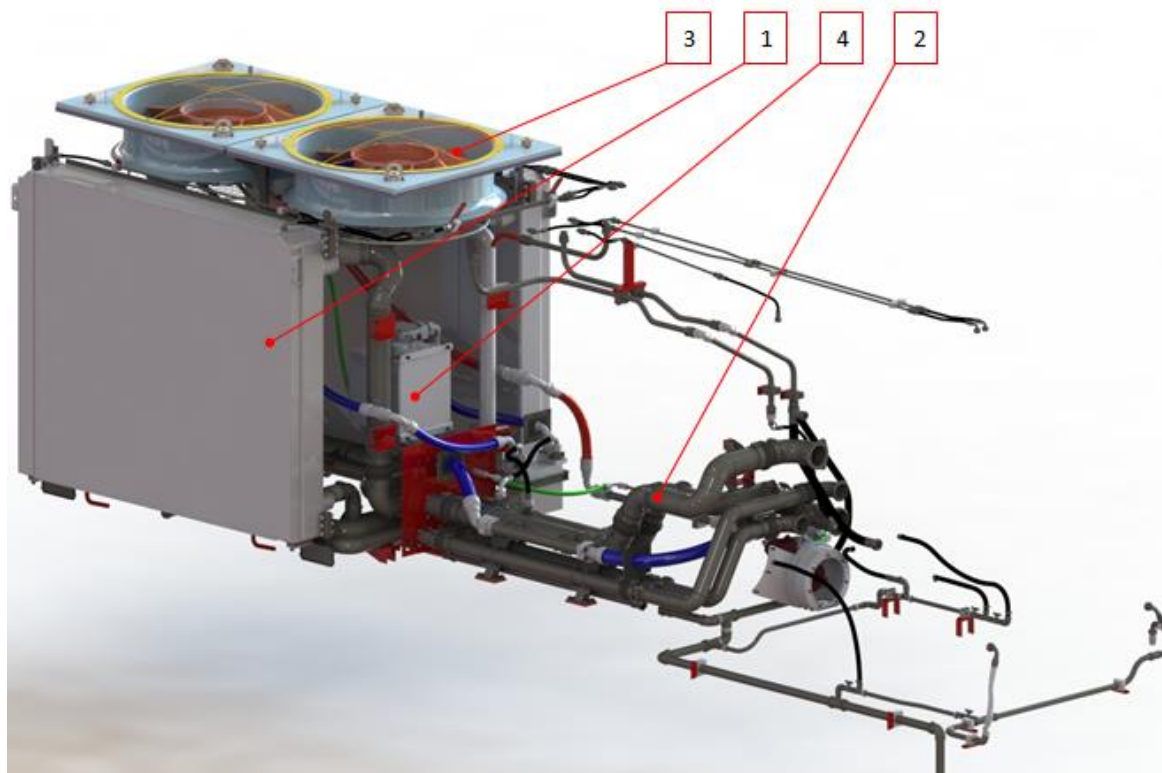
Zabudowę urządzeń układu hydrostatycznego napędu wentylatorów chłodnic przedstawiono na rys. 7.9.



Rys. 7.9. Zabudowa urządzeń układu hydrostatycznego napędu wentylatorów chłodnic: 1 – zbiornik oleju hydraulicznego, 2 – pompa hydrauliczna, 3 – silnik hydrauliczny nieregulowany, 4 – wentylator nieregulowany, 5 – silnik hydrauliczny regulowany, 6 – wentylator regulowany, 7 – chłodnica oleju hydraulicznego, 8 – przewody układu hydrostatycznego [16]

Do podgrzewania wstępnego płynu chłodzącego w obiegu HT zastosowano dwa połączone szeregowo podgrzewacze WEBASTO THERMO 350 o łącznej mocy 70 kW. Podgrzewacze z pompą obiegową składają się na zespół podgrzewaczy płynu chłodzącego obiegu HT. W obiegu LT zabudowano podgrzewacz WEBASTO DBW 2016 o mocy 16 kW, który z pompą

obiegową tworzy zespół podgrzewacza płynu chłodzącego obiegu LT (rys. 7.8). Na rysunku 6.10 pokazano kompletny układ chłodzenia silnika spalinowego.



Rys. 7.10. Widok na kompletny układ chłodzenia silnika spalinowego: 1 – zespół chłodziń, 2 – układ chłodzenia silnika spalinowego (orurowanie), 3 – wentylatory układu chłodzenia silnika spalinowego, 4 – układ hydrauliczny napędu wentylatorów [16]

## 7.5. Modernizacja ostoi lokomotywy i wózków trakcyjnych

Ostoję w części nie podlegającej modernizacji poddano naprawie głównej. Modernizacji między innymi nie podlegały: podparcia wózków, urządzenia pociągowe oraz odgarniacze czołowe.

W ramach modernizacji ostoi przeprowadzono równoległe z naprawą główną modyfikacje wynikające z zabudowy: nowego zespołu napędowego, nowej kabiny oraz przedziałów maszynowych, zawiązanego z tym nowego rozmieszczenia maszyn i urządzeń oraz dostosowanej do tego instalacji powietrznej, paliwowej, olejowej i elektrycznej.

W przypadku wózków trakcyjnych dokonano naprawy głównej zespołów, które nie ulegają modyfikacji oraz wykonano szereg prac modernizacyjnych. Głównymi, zmodernizowanymi zespołami wózka są:

- rama z układem wsporników,
- prowadzenie zestawu kołowego,
- układ hamulcowy,
- układ przewodów powietrznych,
- układ smarowania obrzeży kół [55],
- układ czujników na maźnicach wraz z przewodami,
- układ piaskowania kół,
- system samoczynnego hamowania pociągu (zabudowa elektromagnesu SHP),
- szeregowe połączenia silników trakcyjnych.



Rama wózka, stanowi konstrukcję spawaną złożoną z elementów skrzynkowych. Składa się z dwóch podłużnic – połączonych między sobą dwiema czołownicami i dwiema poprzecznkami. Dwie środkowe poprzeczki stanowią zasadniczą część nośną ramy. Czołownice stanowią elementy usztywniające ramę oraz służą do podwieszenia dźwigni klocków hamulcowych.

Do dwóch środkowych poprzeczek jest przyspawana belka gniazda czopa skrzętu. W gnieździe znajduje się tuleja przyspawana do belki. Do podłużnic są przyspawane widły maźniczne stanowiące jednolitą konstrukcję. Widły maźniczne są ściągane zworami. Do ramy wózka przyspawano wsporniki do mocowania m.in.: silników trakcyjnych, cylindrów hamulcowych, dysz piasecznic, dysz smarujących, przewodów elektrycznych i przewodów pneumatycznych.

Siły pociągowe są przenoszone przez czop skrzętu i gniazdo czopa skrzętu. Gniazdo to ma ciągłe smarowanie olejem. Siły pionowe pudła są przenoszone przez cztery urządzenia podparcia, przymocowane do specjalnych płyt na ramie każdego wózka.

Zestaw kołowy prowadzony jest w ramie wózka za pośrednictwem ślizgów bezobsługowych wykonanych z poliamidu z dodatkiem dwusiarczku molibdenu umożliwiającego wyeliminowanie konieczności smarowania [54, 55].

Układ hamulcowy na wózku przednim stanowią cztery cylindry hamulcowe 9" bez hamulca sprężynowego montowane do wspornika przyspawanego do podłużnicy. Na wózku tylnym zamontowano 2 cylindry 9" bez hamulca postojowego oraz dwa cylindry z hamulcem postojowym. Siły hamujące są przenoszone z cylindra za pośrednictwem układu dźwigniowego na każde z kół, przy czym, przednie cylindry hamują przednie koła oraz jedną stronę koła środkowego, natomiast tylne cylindry hamują tylne koła i drugą stronę koła środkowego. Wszystkie koła są hamowane dwustronnie.

Cylindry hamulcowe posiadają nastawiacz skoku, który odtwarza prawidłowy luz niezależnie od elastyczności przekładni mechanicznej i precyzyjnie nastawia relatywnie mały luz pomiędzy elementami pary ciernej. Instalację pneumatyczną dla układu hamulca wykonano z rur i połączono za pomocą złązek.

Wózki wyposażone są w system smarowania obrzeży kół. Urządzenia do smarowania obrzeży kół mają za zadanie znacznie zmniejszyć zużycie wynikające z kontaktu pomiędzy szyną a kołem. System smarowania obrzeży kół pracuje na tzw. hydraulicznych dyszach rozpyłowych wg systemu turbinowego.

W lokomotywie zastosowano sześć silników trakcyjnych prądu stałego typu ED118A, ze wzbudzeniem szeregowym i wymuszoną wentylacją, o mocy 305 kW każdy. Kadłub silnika trakcyjnego wyposażony jest w ślizgowe łożyska za pomocą których opiera się na osi zestawu kołowego, a przez elementy sprężyste podwieszony jest do ramy wózka. Każdy z wózków trakcyjnych wyposażony jest w trzy silniki trakcyjne.

Silniki trakcyjne są chłodzone powietrzem dostarczonym kanałami wentylacyjnymi od strony komutatora przedmuchiwanym wzdłuż osi maszyny przez wirnik i stojan. Zabudowane silniki trakcyjne poddano naprawie głównej (nie były modernizowane).

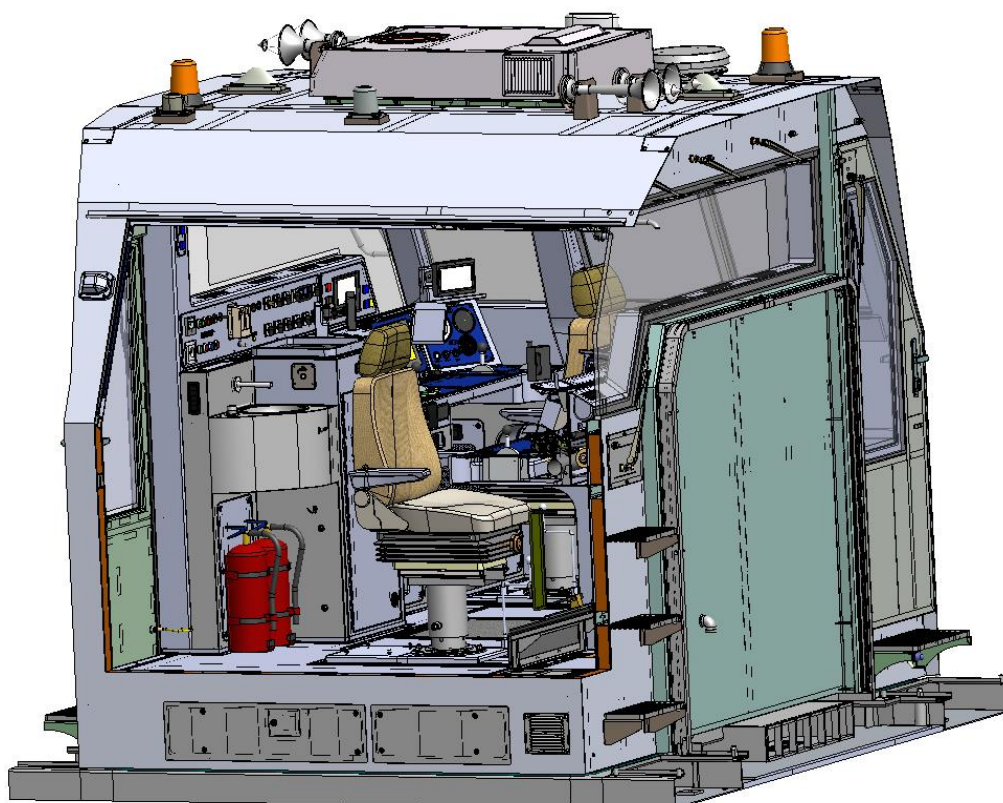
Natomiast w związku ze zmianą mocy zabudowanego zespołu silnikowo-prądnicowego wykorzystanie mocy silnika trakcyjnego z dotychczasowej mocy 105 kW zwiększono do możliwej po naprawie silnika trakcyjnego mocy 245 kW. Następnie w celu zapewnienia wyższej siły pociągowej przy pracy liniowej lokomotywy dla średnich prędkości jazdy zmieniono połączenia silników trakcyjnych z dotychczasowego układu  $2 \times 3$  silniki na układ  $6 \times 1$  silnik.

Silniki trakcyjne chłodzone są dwoma wentylatorami napędzanymi silnikami elektrycznymi prądu przemiennego  $3 \times 400$  V AC. Każdy z dwóch wentylatorów chłodzi silniki przynależne do jednego wózka. Wentylatory zabudowano w przedziale sprężarkowo-chłodniczym (część sprężarkowa) oraz elektryczno-pneumatycznym (część elektryczna). Powietrze zasysa-

ne jest z wnętrza przedziałów lokomotywy przez żaluzje w drzwiach i dalej tłoczone do silników trakcyjnych przez kanały wentylacyjne i miechy skórzanane.

## 7.6. Kabina maszynisty

Lokomotywę typu 19D zaprojektowano jako konstrukcję modułową [14]. Na ostoi zabudowano kabinę maszynisty oraz przedziały maszynowe (sprężarkowo-chłodniczy, agregatu prądotwórczego, elektryczno-pneumatyczny). Uszczelnienie między elastycznie posadowioną kabiną a przedziałami agregatu prądotwórczego i elektryczno-pneumatycznym zrealizowano za pomocą odkształcalnej wargowej uszczelki gumowej. Widok kabiny maszynisty lokomotywy typu 19D zamieszczono na rys. 7.11.



Rys. 7.11. Kabina maszynisty lokomotywy typu 19D [16]

Kabina maszynisty odpowiada wymaganiom karty UIC 651 [33]. Konstrukcja nośna kabiny to szkielet zbudowany z kształtowników zamkniętych pospawanych ze sobą, charakteryzujący się wysoką sztywnością. Szkielet kabiny pokryto blachą poszyciową. Kabina posadowiona jest na ostoi lokomotywy przy pomocy czterech elastycznych amortyzatorów. Dzięki izolacji od drgań generowanych przez urządzenia zabudowane w przedziałach maszynowych znacząco poprawił się komfort pracy maszynisty.

Kabina posiada izolację cieplną i akustyczną. Kabina jest szczelna. Wymianę powietrza w kabinie zapewnia układ kanałów wentylacyjnych zabudowany pod podłogą. Podłoga kabiny pokryta jest specjalną wykładziną podłogową o powierzchni antypoślizgowej. Wejście do kabiny z pomostów zapewnione jest przez drzwi, umieszczone po przekątnej kabiny. Droga z kabiny na pomosty przewidziana została jednocześnie jako wyjście awaryjne w przypadku

zaistnienia niebezpieczeństwa. Drzwi wejściowe do kabiny maszynisty zamykane są ujednoliconym kluczem.

Kabinę wyposażono w okna panoramiczne, szyby w oknach i drzwiach wykonane ze szkła bezpiecznego klejonego, ponadto szyba czołowa i szyba drzwi jest ogrzewana elektrycznie. Kabina charakteryzuje się dobrą widocznością ze stanowiska maszynisty do przodu (duże okno czołowe) i do tyłu (duża szyba w drzwiach). Okna czołowe oraz szyby w drzwiach wyposażone są w elektryczne wycieraczki ze spryskiwaczami. W bocznych ścianach kabiny zamontowano po dwa okna w tym po jednym odskokowo-przesuwным. Okna czołowe i boczne stałe wyposażono w rolety przeciwsłoneczne sterowane ręcznie.

Wszystkie ściany i drzwi kabiny posiadają estetyczne wyłożenia z laminatów poliestrowo-szkłanych.

Poza tym kabinę wyposażono w następujące elementy:

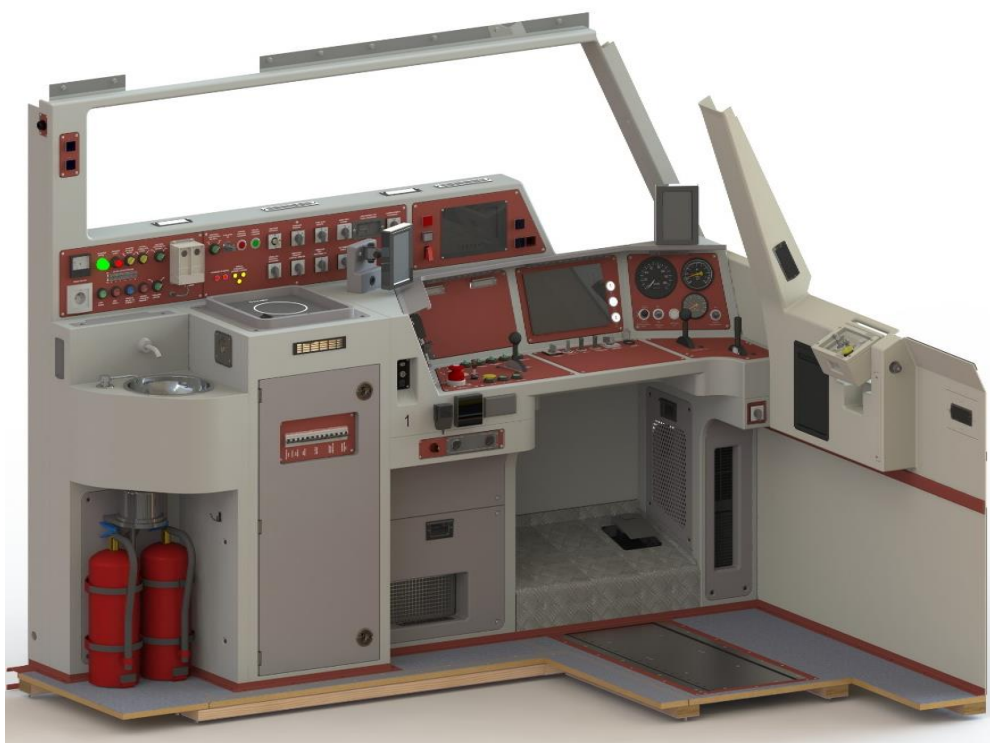
- dwa pulpity maszynisty (po prawej stronie kabiny patrząc w kierunku jazdy), z wyposażeniem zgodnym z kartami UIC 651 [33] i UIC 612-0 [31],
- dodatkowe panele nad pulpitami z aparatami do sterowania, sygnalizacji i kontroli stanu lokomotywy oraz zabezpieczenia jej obwodów elektrycznych,
- panele manewrowe boczne,
- czuwaki nożne (pod pulpitami),
- dwa fotele maszynisty,
- pojemnik na odpady,
- popielniczkę,
- szafkę odzieżową,
- wieszaki ubraniowe,
- apteczkę,
- dwie gaśnice ręczne,
- umywalkę z przyciskiem poboru wody i dozownikiem mydła,
- przestrzeń na torbę lub walizkę,
- ogrzewane szyby czołowe i boczne (drzwiowe),
- wycieraczki z regulowaną prędkością i spryskiwacze szyb czołowych (4 sztuki na każdej szybie czołowej),
- wycieraczki (bez regulacji prędkości) i spryskiwacze szyb bocznych-drzwiowych (opcja),
- szafkę z nagrzewnicą wodną,
- dwie szafki z nagrzewnicami elektrycznymi oraz panelami sterującymi,
- dwa komplety kamer bocznych (spełniających rolę lusterek bocznych), zapewniających maszyniście widoczność z tyłu i z boku pojazdu (opcja),
- dwa monitory pełniące rolę lusterek bocznych (obraz z kamer bocznych) (opcja),
- dwa monitory środkowe zapewniający maszyniście widoczność szlaku i sprzęgów,
- szafkę po stronie przedziału agregatu prądotwórczego, z kompletem sterowników pulpitowych, zespołem radiotelefonu, zespołami przekaźników, listew zaciskowych, zabezpieczeń nadprądowych i rejestratorem,
- szafkę po stronie przeciwnej przedziału agregatu prądotwórczego z lodówką, kompletem sterowników pulpitowych, zespołami przekaźników, listew zaciskowych, zabezpieczeń nadprądowych,
- szafkę dodatkową z aparatem głównym SHP,
- oprawy oświetlenia ogólnego kabiny i lampy LED oświetlenia paneli pulpitowych,
- kuchenkę elektryczną,
- buczek sygnalizacyjny SHP/CA,
- zespoły listew zaciskowych.

Na dachu zabudowano zespół schładzania powietrza w kabinie. Ogrzewanie kabiny zapewniają nagrzewnica wodna oraz dwie nagrzewnice elektryczne zamontowane w szafkach pod pulpitemi, których wentylatory mogą wspomagać wentylację kabiny. Zastosowany w lokomotywie schładzacz powietrza i nagrzewnice zapewniają komfort pracy w okresie letnim i zimowym. Kabinę wyposażono w system kontroli czujności ze zdublowanym kompletem lampek sygnalizacyjnych czuwaka i SHP, dla jazdy tyłem z obydwu stanowisk maszynisty.

Kabina posiada dwa ergonomiczne pulpity sterownicze wykonane w większości z elementów z tworzyw sztucznych, umieszczone po przekątnej. Przy pulpitemi zabudowano ergonomiczne fotele zapewniające szybką i bezpieczną ewakuację w warunkach zagrożenia. Wszystkie aparaty i urządzenia na pulpitemi umieszczone są w sposób umożliwiający prostą i wygodną ich obsługę lub obserwację wskazań. Konsole pulpitemi, wyposażone w elementy kompleksowego sterowania lokomotywą, podzielone są na panele. Poza tym na pulpitemi zabudowano popielniczkę, mikrofon, płytę montażową złącza radiotelefonu oraz podstawkę pod napoje. Poszczególne panele pulpitemi mają wbudowane następujące urządzenia i aparaty:

- panel czołowy prawy,
- panel z wyświetlaczem diagnostycznym,
- panel rozkładu jazdy,
- panel radiotelefonu,
- panel z manipulatorem hamulca zespolonego,
- panel z manipulatorem hamulca dodatkowego,
- panel sterujący dolny,
- panel nastawnika jazdy,
- panel z zaworem bezpieczeństwa,
- panel sterowania nagrzewnicą elektryczną.

Na rysunku 7.12 przedstawiono widok pulpitemi i paneli nad pulpitemi od strony przedziału agregatu prądotwórczego.



Rys. 7.12. Pulpit i panele nad pulpitemi od strony przedziału agregatu prądotwórczego [16]

Na dodatkowych panelach nad pulpitem (panele: bezpieczników, wyświetlacza kamery dojazdowej oraz sygnałów SHP/CA) od strony przedziału elektryczno-pneumatycznego umieszczono:

- panel wskaźnika zużycia paliwa (opcja),
- lampki sygnalizacji: czuwaka i SHP (po dwa komplety), przepływu powietrza, zero jazdy (jazda zabroniona),
- zabezpieczenia nadprądowe obwodów 24 V DC,
- wyłącznik awaryjny silnika napędowego,
- przycisk bezpieczeństwa (stop awaryjny silnika),
- łącznik mostkowania zabezpieczeń silnika,
- łącznik załączenia i sygnalizacji gaszenia pożaru,
- monitor obserwacji szlaku i sprzęgu,
- łącznik lodówki,
- gniazdo serwisowe sieci CAN,
- gniazdo 24 V DC lampy przenośnej.

Na rysunku 7.13 przedstawiono widok pulpitu i paneli nad pulpitem od strony przedziału elektryczno-pneumatycznego.



Rys. 7.13. Pulpit i panele nad pulpitem od strony przedziału elektryczno-pneumatycznego [16]

Panele manewrowe boczne wyposażono w następujące aparaty sterownicze:

- przełącznik jazdy i hamowania,
- przełącznik wyboru kierunku jazdy,
- przycisk czujności,
- przycisk sygnału dźwiękowego (syreny).

Podsumowując nowa konstrukcja kabiny maszynisty wpłynęła na poprawienie widoczności ze stanowiska maszynisty. Znaczej poprawie uległy także warunki pracy obsługi dzięki zastosowaniu nowoczesnych i ergonomicznych pulpitu maszynisty. Praktycznie całkowicie wyeliminowano problem drgań w kabinie maszynisty przez zastosowanie wibroizolatorów przy posadowieniu kabiny na ostoi lokomotywy.

## 7.7. Układy elektryczne lokomotywy

Źródłem zasilania dla silników trakcyjnych jest prądnica główna tworząca układ zasilania wraz z zespołem prostowników.

W obu gałęziach zasilania silników na wózkach zastosowano układ kontroli prądu i napięcia, a informacja o wielkości tych parametrów jest przekazywana do zespołu przetwornic, która jest również częścią obwodu głównego. Poza tym w zespole przetwornic, w części obejmującej obwód główny znajdują się urządzenia, do których są również przekazywane informacje niezbędne do:

- regulacji (zadawania i kontroli) wzbudzenia prądnicy głównej,
- kontroli temperatury pracy prądnicy głównej,
- kontroli stanu bezpieczników poszczególnych prostowników trakcyjnych.

Każda gałąź zasilania silnika trakcyjnego zawiera:

- stycznik liniowy,
- przetwornik pomiaru prądu,
- listwę do podłączenia opornika wodnego,
- styczniki i rezystory osłabienia wzbudzenia silnika trakcyjnego,
- nawrotnik.

W układzie zasilania zastosowano dwa stopnie osłabienia wzbudzenia silników trakcyjnych, co umożliwi wykorzystanie pełnego zakresu charakterystyki prądnicy głównej oraz pełną moc tych silników. Zabezpieczenia w obwodach silników trakcyjnych są realizowane przez układ kontroli izolacji, a informacja o uziemieniu jest wyświetlana na panelu operatorskim.

Źródłem zasilania dla obwodów pomocniczych, sterowania i rozrządu jest prądnica pomocnicza sprzężona z prądnicą główną i silnikiem spalinowym. Wzbudzenie prądnicy jest regulowane przez zabudowaną na niej wzbudnicę, (wytwarza napięcie o zmiennej częstotliwości w uzależnieniu od prędkości obrotowej) i wirujący prostownik. Prądnica zasilą zespół przetwornic napięciem  $3 \times 450 \text{ V AC}$ , gdzie następuje przetwarzanie i rozdział zasilania na poszczególne obwody elektryczne AC i DC. Na zespole przetwornic są następujące wyjścia napięciowe:

- wyjście  $3 \times 400 \text{ V AC}$ , 50 Hz, 45 kVA (HBU1 – do zasilania sprężarki),
- wyjście 230 V AC, 50 Hz, 10 kVA (HBU1 – do zasilania obwodów pomocniczych),
- wyjście  $3 \times 0\text{--}400 \text{ V AC}$ , 0,5–50 Hz, 40 kVA (HBU2 – do zasilania wentylatorów silników trakcyjnych),
- wyjście 24–28 V DC, 400 A (HBU4 – do sterowania, rozrządu i ładowania baterii akumulatorów).

W lokomotywie zastosowano zespół akumulatorów typu ołowiowego o napięciu znamionowym 24 V DC oraz znamionowej pojemności elektrycznej – 450 Ah. Zabudowano go w dwóch skrzyniach pod ostoją.

W czasie jazdy zespół akumulatorów jest ładowany z prądnicy pomocniczej, przez zespół przetwornic (konwerter DC/DC) napięciem 28 V DC, a zasila obwody pomocnicze, sterowania i rozrządu. Proces ładowania jest kontrolowany przez układ pomiarowy składający się z modułów pomiaru prądu ładowania i napięcia na akumulatorze. Zespół akumulatorów jest połączony bezpośrednio z rozrusznikiem silnika spalinowego i ma wyprowadzone zaciski do ładowania z zewnątrz. Układ akumulatorów jest przystosowany do ładowania zewnętrznego napięciem  $3 \times 400 \text{ V AC}$  lub 28 V DC. Ładowanie ich jest sygnalizowane za pomocą lampek usytuowanych na zewnątrz lokomotywy, na skrzynkach ładowania zewnętrznego.

Z chwilą zamknięcia się styczników akumulatorów napięcie zostaje podane na obwody 24 V DC lokomotywy. Pewna wydzielona część tych obwodów jest zasilana bezpośrednio z akumulatorów, w tym:

- układ pomiaru prądu i napięcia akumulatorów,
- rozrusznik silnika spalinowego,
- obwody zasilania układu sterowania mikroprocesorowego (konwertery światłowodowe),
- część obwodów hamowania,
- obwód ładowania zewnętrznego akumulatorów,
- obwód radiołączności,
- oświetlenia zewnętrznego (światła sygnałowe),
- obwody załączania, wyłączania i sygnalizacji pracy baterii akumulatorów.

Zasilanie części obwodów elektrycznych 24 V DC odbywa się w uzależnieniu od wyznaczonych progów napięciowych oraz aktualnego napięcia na akumulatorach, a proces wyłączenia poszczególnych obwodów jest inicjowany przez przekaźnik podnapięciowy.

W lokomotywie zastosowano akumulatory o odpowiedniej i wystarczającej (w przypadku awarii zespołu napędowego) pojemności elektrycznej dla zapewnienia:

- elektrycznego zasilania rozrusznika podczas dziesięciokrotnej próby załączenia silnika napędowego,
- elektrycznego zasilania urządzeń i układów zapewniających bezpieczeństwo na torach w przypadku awarii zespołu napędowego, w tym:
  - oświetlenia zewnętrznego (światła sygnałowe),
  - oświetlenia wewnętrznego kabiny,
  - obwodów sterowania pracą baterii akumulatorów oraz układu pomiaru prądu i napięcia baterii,
  - układu sterowania i diagnostyki,
  - rejestratora prędkościomierza,
  - układu kontroli uziemienia,
  - sygnalizacji akustycznej,
  - układów hamulcowych,
  - układu wytwarzania i uzdatniania sprężonego powietrza,
  - monitoringu i rejestratora rozmów w kabinie,
  - urządzeń bezpieczeństwa ruchu,
  - przeciwpożarowej instalacji alarmowej,
  - radiołączności,
  - układu pomiaru i kontroli zużycia paliwa.

Obwody zasilane bezpośrednio z baterii akumulatorów są zawsze pod napięciem, nawet przy wyłączonym styczniku zasilania obwodów 24 V DC oraz wyłączonym głównym wyłączniku samoczynnym obwodów 24 V DC.

Układ sterowania napędu i układów pomocniczych modernizowanej lokomotywy jest realizowany za pośrednictwem systemu mikroprocesorowego, w oparciu o sterowniki rodziny S32. Poszczególne sterowniki mikroprocesorowe są przewidziane do zabudowy i pracy w sieciach CAN w układzie rozproszonym. Ogólnie sieć komunikacyjna lokomotywy składa się z magistrali pojazdu (dla pojedynczej lokomotywy) i magistrali pociągu (dla dwóch połączonych elektrycznie i mechanicznie lokomotyw). Magistrala pojazdu umożliwia komunikację między sterownikami lokomotywy, a dzięki magistrali pociągu możliwa jest jazda wielokrotna.

Centralną część lokomotywy jest kabina maszynisty i tam wydawane są dyspozycje do poszczególnych urządzeń wykonawczych. Przełączniki, manipulatory, przyciski i panele operatorskie na pulpitych przednich, panelach nadpulpitowych oraz manewrowych bocznych i w

szafkach kabinowych są podłączone do sterowników pulpitu. Sterowniki pulpitu przesyłają informację do sterownika napędu (trakcji) lokomotywy, który jest zabudowany w przedziale aparatomym (zespół NN). Sterownik napędu lokomotywy wysyła informacje do sterownika silnika spalinowego, sterownika trakcji wielokrotnej oraz niektórym sterownikom układów i urządzeń pomocniczych.

Sterownik napędu lokomotywy realizuje podstawowo następujące funkcje:

- regulacja wzbudzeniem prądnicy głównej i pomocniczej,
- sterowanie układem rozrządu lokomotywy, w zależności od zadanych i aktualnych warunków eksploatacji,
- sterowanie sprężarką,
- współpraca z tablicą pneumatyczną,
- sterowanie układem bocznikowania,
- współpraca z siecią CAN lokomotywy,
- współpraca z sterownikiem silnika spalinowego.

Układy sterowania mikroprocesorowego napędu i układów pomocniczych tworzą następujące sterowniki:

- panele operatorskie (pulpity),
- sterownik napędu (zespół NN),
- sterownik rozrządu i napędów pomocniczych (zespół SN),
- sterownik trakcji wielokrotnej (zespół SN),
- zespół automatyki napędu PAU (zespół NN),
- sterownik silnika napędowego (na silniku),
- sterownik pulpitu 1 (strona silnika napędowego),
- sterownik pulpitu 2 (strona przedziału elektryczno-pneumatycznego),
- zespół przetwornic ze sterownikiem JENOPTIK (zespół SN),
- sterowniki reflektorów (czoła lokomotywy),
- konwertery CAN/OPTO (czoła lokomotywy, zespoły aparatów, kabina),
- sterowniki tablicy pneumatycznej (czoło lokomotywy od strony przedziału elektryczno-pneumatycznego),
- sterownik i falowniki zespołu wytwarzania i uzdatniania powietrza (przedział sprężarkowo-chłodniczy),
- sterownik wykrywania i likwidacji poślizgu (zespół NN),
- sterownik urządzeń pomocniczych (przedział sprężarkowo-chłodniczy).

Poza tym w system sterowania po sieci CAN są włączone również: prawny rejestrator prędkościomierza, odbiornik sterowania radiowego, centralka systemu monitorowania zużycia paliwa, moduły pomiaru napięcia i prądu baterii, modem GSM/GPRS, zasilacze.

Większość sygnałów sterujących lokomotywą jest przesyłana w formie cyfrowej po magistrali pojazdu, natomiast tzw. sygnały sprzętowe (wejściowe i wyjściowe) będą sygnałami binarnymi, o napięciu na poziomie baterii akumulatorów, tzn. 24 V DC. Ze względu na zakłócenia elektromagnetyczne część sygnałów sterujących, szczególnie na dłuższych odcinkach jest przesyłana przez sieć CAN/OPTO (światłowodami).

Magistralę pojazdu tworzą: magistrala CAN, magistrala CANopen, magistrala CAN światłowod. Realizacja trakcji wielokrotnej będzie się odbywała przez wykorzystanie łącza magistrali pociągu, w oparciu o CAN Powerline.

Zastosowany w opisywanej lokomotywie układ sterowania zapewnia przede wszystkim:

- kontrolowany rozruch silnika spalinowego,
- pełne wykorzystanie mocy silnika,
- minimalny przebieg zużycia paliwa,



- odpowiednią moc prądnicy głównej i pomocniczej (w całym zakresie prędkości obrotowej silnika spalinowego), wystarczającą do zasilania wszystkich układów elektrycznych w lokomotywie,
- pewne i stabilne zasilanie oraz sterowanie i kontrolę układów pomocniczych,
- dozorowanie oraz diagnozowanie układów i urządzeń elektrycznych.

Obwód sterowania mikroprocesorowego napędu i układów pomocniczych jest zabezpieczony przed nadmiernym wzrostem prądu za pomocą wyłączników samoczynnych. Zasilanie sterowników mikroprocesorowych oraz konwerterów CAN/OPTO odbywa się przez dodatkowe przetwornice obwodów sterowania lokomotywy, stabilizujące napięcie na poziomie 24 V DC.

W lokomotywie na obu stanowiskach pracy maszynisty, przewidziano zastosowanie paneli operatorskich. Panel operatorski spełnia funkcje informacyjne (diagnostyczne) i sterownicze.

W zakres układu diagnostycznego wchodzi diagnostyka pokładowa i obsługowa (warsztatowa). W ramach diagnostyki pokładowej panel operatorski załącza się w trybie automatycznym (w przypadku wystąpienia zdarzenia mającego istotne znaczenie dla maszynisty) oraz ręcznym, umożliwiającym dotarcie do informacji o wybranym systemie lub parametrze lokomotywy. System diagnostyczny obejmuje diagnozowanie wszystkich parametrów istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa, dzięki czemu zapewnia bardzo wysoką niezawodność lokomotywy i jej poszczególnych podzespołów.

Diagnostyka pokładowa i obsługowa obejmuje następujące układy, zespoły i urządzenia:

- zespół napędowy,
- agregat prądotwórczy z prostownikami trakcyjnymi i zespołem wentylatorów chłodzących,
- zespół przetwornic,
- obwody silników trakcyjnych wraz z zespołem wentylatorów chłodzących,
- obwody rozrządu,
- bateria akumulatorów,
- układ hamulcowy (w tym układ przeciwpoślizgowy i tablica pneumatyczna),
- układ wytwarzania i uzdatniania sprężonego powietrza,
- urządzenia i układy pomocnicze (system wykrywania i sygnalizacji pożaru, światła czołowe, układy kontroli temperatur diagnozowanych urządzeń, układ ogrzewania i schładzania powietrza w kabinie maszynisty, zespoły piasecznic i smarowania obrzeży kół, zespół rejestratora, urządzenia bezpieczeństwa ruchu, spryskiwacze szyb).

W zakres diagnostyki lokomotywy wchodzi również układ monitorowania zużycia paliwa, z systemem lokalizacji pojazdu oraz transmisją danych do operatora systemu. Poza tym w kabinie, na panelach nad pulpitem lokomotywy zabudowano lampki i łączniki podświetlane pełniące również funkcje diagnostyczne, informujące o stanie niektórych urządzeń i układów elektrycznych. Systemy pomiarowe i diagnostyczne lokomotywy dostosowano do możliwości stacji diagnostycznej producenta lokomotywy.

Lokomotywę przystosowano do pracy w zespole dwóch sprzęgniętych mechanicznie i elektrycznie pojazdów, umożliwiając bezosobową pracę lokomotywy sterowanej.

Do sterowania wykorzystano system cyfrowego przekazywania danych między sterownikami trakcji wielokrotnej obu pojazdów, z zachowaniem funkcji ich dozorowania i diagnozowania. Przesyłanie sygnałów niezbędnych do sterowania wielokrotnego będzie się odbywało przez wykorzystanie łącza magistrali pociągu, a realizowane w oparciu o CAN Powerline (rozwiązanie firmy Selectron). Poza tym, do sterowania wielokrotnego będą również wykorzystywane tzw. sygnały sprzętowe, w postaci sygnałów binarnych o napięciu na poziomie baterii akumulatorów, tzn. 24 V DC. W ramach tych sygnałów będzie możliwe załączanie i wyłączanie stycznika zasilania obwodów 24 V DC (na panelu nad pulpitem od

strony przedziału agregatu prądowłórczego) oraz redundantny układ wyłączania awaryjnego silnika spalinowego w lokomotywie sterowanej (na panelu nad pulpitem od strony przedziału elektryczno-pneumatycznego i obu pulpitach).

Obwód sterowania wielokrotnego jest zabezpieczony przed nadmiernym wzrostem prądu za pomocą wyłącznika samoczynnego. Zasilanie obwodu (przez dodatkową przetwornicę obwodów sterowania lokomotywy) jest uzależnione od stanu stycznika baterii akumulatorów.

Lokomotywa posiada także funkcję „UPZ”, która polega na utrzymywaniu stałej prędkości zadanej przez maszynistę. Sterownik trakcji realizuje w niektórych przypadkach regulację siły trakcji, hamulcem zespolonym (HZ) tak, aby utrzymać prędkość lokomotywy jak najbliższej prędkości zadanej, przekazanej mu przez sterownik pulpitu. Do działania UPZ konieczny jest sprawny układ przeciwpoślizgowy.

Zastosowany UPZ może być załączony i wdrożony w czasie jazdy (również w czasie jazdy manewrowej z pulpitu głównego) lub przed ruszaniem lokomotywą, przy czym manipulatory jazdy i manipulatory hamowania (HD) oraz (HZ) muszą być przestawione w odpowiednią pozycję dla wymienionych wyżej stanów.

Wartość prędkości i ograniczenia siły można zmieniać w dowolnym momencie przy czym wielkość ograniczenia siły jest zmieniana przy pomocy manipulatora jazdy, a wartość prędkości jest zmieniana przy pomocy dźwigni nastawiania prędkości zadanej.

Działanie zastosowanego UPZ objęto diagnostyką pokładową, a informacje dotyczące jego pracy wyświetlane są na panelu operatorskim.

Należy stwierdzić że zmodernizowana lokomotywa 19D (SM48) posiada cechy pojazdu nowego (rys. 7.14). Większość urządzeń zabudowanych na lokomotywie są urządzeniami sprawdzonymi w dotychczasowej eksploatacji na zmodernizowanych lokomotywach eksploatowanych w kraju oraz podobnych lokomotywach za granicą. W wyniku zastosowania nowego zespołu napędowego i pełnego wykorzystania mocy silników trakcyjnych polepszyły się właściwości trakcyjne lokomotywy. Zauważalny jest znaczny wzrost siły pociągowej na obwodzie kół napędnych w całym zakresie prędkości jazdy.



Rys. 7.14. Widok lokomotywy 19D (SM48) po modernizacji

Dzięki zastosowaniu nowoczesnego silnika spalinowego, spełniającego wymogi dotyczące zanieczyszczenia spalin, znacznemu ograniczeniu uległa emisja szkodliwych substancji do otoczenia. Lokomotywa 19D jest pojazdem przyjaznym użytkownikowi, ponieważ posiada szereg rozwiązań poprawiających komfort pracy w kabinie maszynisty.

Obecnie na rynku polskim lokomotywa 19D jest najsilniejszą tego typu lokomotywą i jednocześnie najnowocześnieszą pozwalającą wykonywać najcięższe prace manewrowe oraz prowadzić ciężkie składy towarowe.

## 8. BADANIA ZMODERNIZOWANEJ LOKOMOTYWY

### 8.1. Analizy trakcyjne modernizowanej lokomotywy

#### Program i procedury badawcze

Źródłem zasilania dla silników trakcyjnych jest prądnica główna tworząca układ zasilania wraz z zespołem prostowników. Prądnica główna jest prądnicą bezszczotkową, obcowzbudną, trójfazową, synchroniczną prądu przemiennego, z zabudowaną na korpusie wzbudnicą i wirującym prostownikiem do zasilania własnych obwodów wzbudzenia. Prądnica zasilą po 3 silniki trakcyjne na obu wózkach przez zespół prostowniczy 6-pulsowy.

W obu gałęziach zasilania silników na wózkach zastosowano układ kontroli prądu i napięcia, a informacja o wielkości tych parametrów jest przekazywana do zespołu przetwornic, która jest również częścią obwodu głównego. Każda gałąź zasilania silnika trakcyjnego zawiera:

- stycznik liniowy,
- styczniki i rezystory osłabienia wzbudzenia silnika trakcyjnego,
- nawrotnik.

W układzie zasilania zastosowano dwa stopnie osłabienia wzbudzenia silników trakcyjnych, co umożliwi wykorzystanie pełnego zakresu charakterystyki prądnicy głównej oraz pełną moc tych silników. Sterownik napędu lokomotywy reguluje wzbudzeniem prądnicy głównej i pomocniczej. Wydawanie poleceń sterujących do układu napędowego odbywa się bezstopniowo. Manipulator jazdy ma do dyspozycji 100 stanów roboczych. Sterowanie siłą napędu odbywa się sposób płynny, proporcjonalnie do kąta obrotu manipulatora, z rozdzielczością około 1%.

Badania, pozwalające określić możliwości trakcyjne oraz warunki przyczepności lokomotywy prowadzono w czasie jazd próbnych z pociągiem towarowym o masie 1051 t i długości 613 m na torach PKP PLK S.A. na linii 131 pomiędzy stacjami Bydgoszcz–Warlubie.

Podczas pomiarów warunki pogodowe kształtowały się następująco:

- temperatura otoczenia: 25°C,
- wilgotność: 45%,
- ciśnienie atmosferyczne: 1016 hPa,
- prędkość wiatru: 8 m/s z kierunku południowo-zachodniego,
- opady atmosferyczne: brak.

Badania służące ocenie właściwości trakcyjnych wykonano w oparciu o wskazania punktu 2.12 programu badań OB-560 [94].

Do pomiarów użyto niżej wymienionej aparatury pomiarowej:

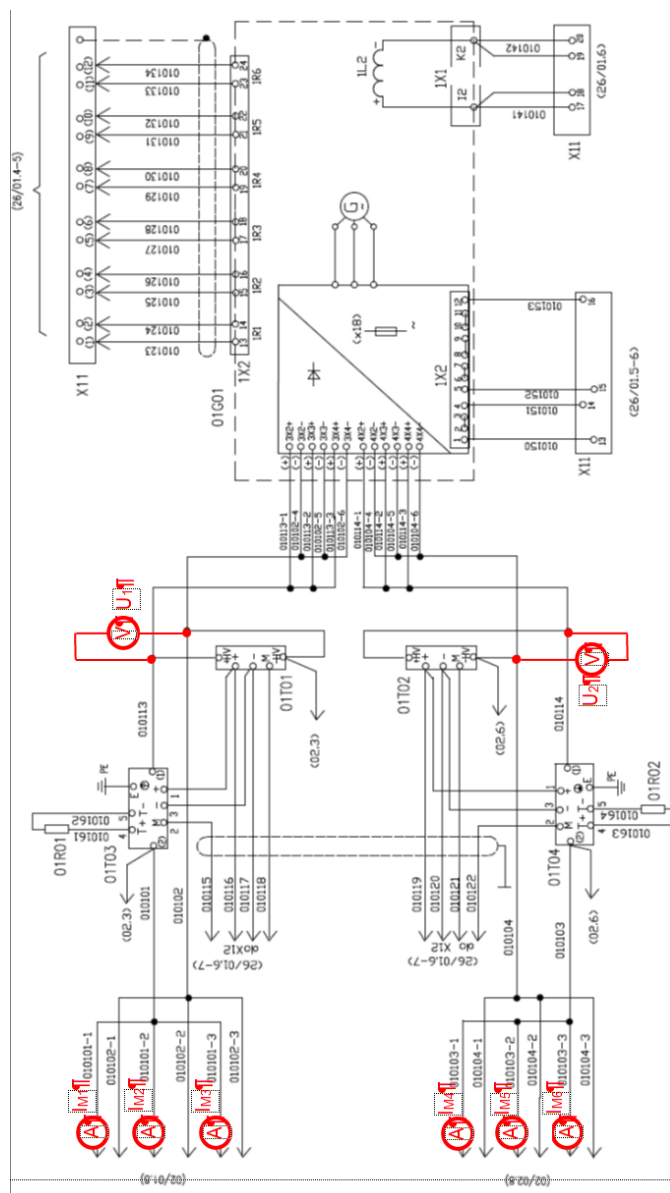
- a) natężenie prądu  $I_{M1}$  pobieranego przez silnik 02M01 – przetwornik prądowo-napięciowy typu HOP 800-SB nr 713190/1 prod. LEM,
- b) natężenie prądu  $I_{M2}$  pobieranego przez silnik 02M02 – przetwornik prądowo-napięciowy typu HOP 800-SB nr 713190/2 prod. LEM,
- c) natężenie prądu  $I_{M3}$  pobieranego przez silnik 02M03 – przetwornik prądowo-napięciowy typu HOP 800-SB nr 713190/3 prod. LEM,
- d) natężenie prądu  $I_{M4}$  pobieranego przez silnik 02M04 – przetwornik prądowo-napięciowy typu HOP 800-SB nr 713190/4 prod. LEM,
- e) natężenie prądu  $I_{M5}$  pobieranego przez silnik 02M05 – przetwornik prądowo-napięciowy typu HOP 800-SB nr 713190/5 prod. LEM,
- f) natężenie prądu  $I_{M6}$  pobieranego przez silnik 02M06 – przetwornik prądowo-napięciowy typu HOP 800-SB nr 713190/6 prod. LEM,
- g) napięcie  $U_1$  silników 02M01–02M03 – przetwornik napięciowy typu CV3-1500 nr 9915/513267 prod. LEM,

- h) napięcie  $U_2$  silników 02M04–02M06 – przetwornik napięciowy typu CV3-1500 nr 9915/513272 prod. LEM,
- i) pomiar prędkości i drogi lokomotywy  $v$  i  $s$  – urządzenie typu VBOX3i-V4G nr fabryczny 047637 prod. RACELOGIC LTD,
- j) siła pociągowa  $F_L$  na haku lokomotywy – sprzęg tensometryczny pełnomostkowy typu RB-78 nr 1, prod. IPS „TABOR” (układ Z).

Do rejestracji i przetwarzania parametrów wymienionych w pkt. a–j wykorzystano cyfrowy rejestrator typu DEWE2-M7s prod. DEWETRON GmbH. Rejestrację danych wykonano z częstotliwością próbkowania 100 Hz. Zarejestrowane przebiegi poddano analizie przy pomocy programu komputerowego DEWESoft v.7.1.1.

Pomiary napięć wykonano w oparciu o procedurę pomiarową PP-28, pomiary natężenia prądu w oparciu o procedurę PP-29, a pomiar siły w oparciu o procedurę PP-01.

Fragment schematu obwodu głównego lokomotywy ze wskazaniem miejsc podłączenia przetworników pomiarowych napięcia i prądów zamieszczono na rys. 8.1, a widok sprzęgu pomiarowego, łączącego badaną lokomotywę ze składem wagonów na rys. 8.2.



Rys. 8.1. Sposoby podłączenia przetworników pomiarowych przy badaniach właściwości trakcyjnych lokomotywy [7]



Rys. 8.2. Widok sprzęgu pomiarowego na połączeniu lokomotywy z pociągiem towarowym [7]

### Badania właściwości trakcyjnych

Badania wykonywano podczas jazd próbnych lokomotywy z pociągiem towarowym o masie 1051 t, składającym się z 45 węglarek oraz 1 lokomotywy typu JT42M na torach PKP PLK na linii nr 131 na trasie Bydgoszcz–Warlubie–Bydgoszcz z prędkością do 80 km/h.

Widok pociągu towarowego, prowadzonego przez lokomotywę pokazano na rys. 8.3.



Rys. 8.3. Widok zmodernizowanej lokomotywy typu 19D z pociągiem towarowym [7]

Rozruch lokomotywy w I fazie odbywa się według charakterystyki stałej siły  $F = \text{const}$ , a w II fazie według charakterystyki stałej mocy  $P = \text{const}$ .

Wykonano łącznie 9 prób rozruchu od prędkości  $v = 0$  do prędkości maksymalnej, możliwej do uzyskania dla danego składu wagonów, będącego obciążeniem lokomotywy oraz sytuacji ruchowej na szlaku kolejowym.

Wszystkie próby realizowano w identyczny sposób, ustawiając manetkę manipulatora jazdy na 100% (po wybraniu luzów w składzie wagonów) i pozwalając układowi sterowania lokomotywy najlepiej wykorzystać moc zespołu napędowego.

Próby z konieczności realizowano na odcinkach trasy o zmiennym nachyleniu. Dla scharakteryzowania tych odcinków obliczono dla nich tzw. profil zastępczy (ekwiwalentny) z zależności:

$$\lambda_z = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad (8.1)$$

gdzie:  $\lambda_z$  – profil zastępczy [%],  $\lambda_i$  – profil i-tego odcinka trasy [%],  $s_i$  – długość i-tego odcinka trasy [m].

Profil zastępczy obliczano dla całkowitej drogi rozruchu  $s$  z wyodrębnieniem drogi potrzebnej do uzyskania wybranych prędkości eksploatacyjnych.

Wyniki prób w formie tabelarycznej, zamieszczone w tabeli 8.1 przedstawiają:

- czas i drogę potrzebną do uzyskania wybranych prędkości (40 km/h i 70 km/h),
  - maksymalne wartości całkowitej siły pociągowej  $F_{PCmax}$  na haku lokomotywy w czasie rozruchu,
  - maksymalne wartości sumy prądów silników trakcyjnych na wózkach w czasie rozruchu:  $I_1 = I_{M1} + I_{M2} + I_{M3}$  i  $I_2 = I_{M4} + I_{M5} + I_{M6}$
  - maksymalne napięcia  $U_1$  i  $U_2$  silników trakcyjnych,
  - ustaloną wartość mocy całkowitej pobieranej przez silniki trakcyjne  $P_T$ , w zakresie prędkości od 15 do 70 km/h,
  - prędkości lokomotywy  $v_b$  przy załączaniu osłabienia wzbudzenia silników trakcyjnych.
- Całkowitą moc pobieraną przez silniki trakcyjne obliczono z zależności:

$$P_T = [(U_1 \cdot (I_{M1} + I_{M2} + I_{M3})) + (U_2 \cdot (I_{M4} + I_{M5} + I_{M6}))] \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (8.2)$$

gdzie:  $I_{M1}$ – $I_{M6}$  – wartości prądów pobieranych przez silniki trakcyjne,  $U_1$  i  $U_2$  – napięcia zasilania silników trakcyjnych na pierwszym i drugim wózku.

Wartości siły pociągowej lokomotywy przedstawione na wykresach zamieszczonych w niniejszym raporcie, są sumą siły pomierzonej na haku lokomotywy i oporów ruchu lokomotywy.

Oporo ruchu lokomotywy obliczano ze wzoru opracowanego przez COBiRTK (m.in. publikacja książkowa [64]), mającego postać:

$$W = 0,001 \cdot [(K + 0,53 \cdot v) \cdot m + 174 \cdot M + f \cdot (2,5 + n) \cdot v^2] \text{ [kN]} \quad (8.3)$$

gdzie:  $W$  – opory ruchu lokomotywy [kN],  $K$  – współczynnik rodzaju łożysk, dla lokomotyw  $K = 8,8$ ,  $v$  – prędkość lokomotywy [m/s],  $m$  – masa lokomotywy [t],  $m = 115,821$  Mg,  $M$  – liczba osi lokomotywy,  $M = 6$ ,  $f$  – współczynnik rodzaju pociągu, dla lokomotyw  $f = 1,27$ ,  $n$  – liczba wagonów w pociągu, dla lokomotyw  $n = 1$ .

Po wprowadzeniu parametrów właściwych dla zmodernizowanej lokomotywy spalinowej typu 19D zależność do wyznaczenia oporów ruchu lokomotywy przybiera postać:

$$W = 0,001 \cdot (2063,22 + 17,05 \cdot v + 0,343 \cdot v^2) \text{ [kN]} \quad (8.4)$$

gdzie:  $v$  – prędkość lokomotywy [km/h].

Dla prędkości lokomotywy wynoszącej 70 km/h opory ruchu wynoszą 4,94 kN.

Przykładowe przebiegi parametrów trakcyjnych lokomotywy (napięcia  $U_1$  i  $U_2$ , prądy silników trakcyjnych  $I_{M1}$ – $I_{M6}$ , całkowita moc trakcyjna pobierana przez silniki trakcyjne  $P_T$ , prędkość lokomotywy  $v$ , całkowita siła pociągowa lokomotywy  $F_{pc}$  z uwzględnieniem oporów ruchu) w funkcji czasu rozruchu z pociągiem towarowym przedstawiono na rys. 8.4.

Charakterystyki trakcyjne, czyli zależność parametrów trakcyjnych (w szczególności siły pociągowej) lokomotywy w funkcji prędkości zamieszczono na rys. 8.5.

Na rysunku 8.5 poza rzeczywistymi (pomierzonymi) charakterystykami zamieszczono teoretyczną charakterystykę siły pociągowej  $F_T$  w funkcji prędkości lokomotywy. Charakterystyka teoretyczna, zamieszczona w niniejszym raporcie pochodzi z opracowania [16]. Na rysunkach 8.4 i 8.5 naniesiono bieżące położenie lokomotywy względem poziomu morza, oznaczone na wykresach pionowych jako  $h$  położenie toru, będące odwzorowaniem profilu pionowego linii kolejowej.

Przedstawione wyniki badań (w formie tabelarycznej i przebiegów podstawowych parametrów trakcyjnych w funkcji czasu rozruchu oraz charakterystyk trakcyjnych w funkcji prędkości lokomotywy) pozwalają sformułować następujące tezy i wnioski:

a) badana lokomotywa pracuje na charakterystyce stałego momentu w zakresie prędkości 0–14 km/h osiągając moc maksymalną 1580 kW na wyjściu z prądnicy trakcyjnej, pobieraną przez silniki trakcyjne. Moc użyteczna lokomotywy (moc zredukowana do układu kołosznego), z uwzględnieniem sprawności silnika trakcyjnego (0,92) i przekładni trakcyjnej (0,98) (łącznie około 0,902) przy mocy znamionowej silnika trakcyjnego 305 kW jest na poziomie 1650 kW. Uzyskiwana przez lokomotywę moc jest niższa od poziomu mocy ciągłej prądnicy głównej i od mocy wynikającej z mocy znamionowej silników trakcyjnych wynoszących 1830 kW.

b) w zakresie prędkości 14–20 km/h następuje osiągnięcie przez układ napędowy maksymalnej mocy i przejście na charakterystykę quasi stałej mocy. Średnia wartość mocy trakcyjnej w stanie quasi ustalonym (na charakterystyce stałej mocy) wynosi 1465 kW. Regulacja poziomu mocy trakcyjnej jest bardzo precyzyjna w całym zakresie prędkości od 14 do 70 km/h z wyłączeniem momentu załączenia osłabienia wzbudzenia.

c) załączenie osłabienia wzbudzenia odbywa się automatycznie przy średnich prędkościach lokomotywy 42,6 km/h dla I stopnia i 69,8 km/h dla II stopnia. Załączenie I stopnia osłabienia wzbudzenia nie powoduje zmniejszenia siły trakcyjnej. Natomiast załączenie II stopnia skutkuje chwilowym zmniejszeniem mocy lokomotywy o 1/4 i nieznacznym spadkiem siły pociągowej. Po upływie około 8 s od załączenia II stopnia osłabienia wzbudzenia układ napędowy powraca na charakterystykę stałej mocy.

d) przebieg parametrów elektrycznych (prądy, napięcia, moc) i mechanicznych (siła pociągowa, prędkość) lokomotywy jest regularny w całym okresie rozruchu i wykazuje dużą powtarzalność w wielu próbach, realizowanych w dobrych warunkach pogodowych.

e) charakterystyka trakcyjna rzeczywista z pociągiem towarowym co do charakteru przebiegu jest bardzo zbliżona do charakterystyki teoretycznej. Rzeczywiste wartości siły pociągowej w zakresie prędkości 20–70 km/h sytuują się nieznacznie poniżej charakterystyki teoretycznej. Przybliżenie charakterystyki trakcyjnej rzeczywistej do charakterystyki teoretycznej jest dobre. Maksymalna średnia wartość siły pociągowej przy ruszaniu z pociągiem towarowym o masie 1051 Mg jest na poziomie 320 kN.

f) w początkowej fazie rozruchu (szczególnie z pociągiem towarowym) nie jest fizycznie możliwe uzyskanie podobieństwa charakterystyki rzeczywistej i obliczeniowej, gdyż jest to faza wybierania luzów składu wagonów, realizowana z konieczności z mniejszą siłą pociągową.

g) zestawienie średnich parametrów eksploatacyjnych lokomotywy dla pociągu o masie 1051 Mg zamieszczono w tabeli 8.2. Maksymalna siła pociągowa na haku lokomotywy z pociągiem towarowym o masie 1051 Mg wyniosła 327,6 kN.

Tabela 8.1. Zestawienie charakterystycznych wartości parametrów trakcyjnych zmodernizowanej lokomotywy spalinowej typu 19D podczas prób na trasie Bydgoszcz–Wartubie–Bydgoszcz z pociągiem towarowym [7]

Lp.	Nazwa pliku z danymi	Masa pociągu i kierunek jazdy	Kilometr trasy startowy	Profil zastępczy i odcinka dla drogi <sup>1)</sup> :		Parametry charakterystyczne						Czas (t) i droga (s) potrzebne do uzyskania prędkości:				
				s <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	wartości maksymalne		wartości ustalone		Oslabienie wzbudzenia		40 km/h		70 km/h		
						l <sup>2)</sup>	l <sup>2)</sup>	F <sub>pc</sub> <sup>3)</sup>	U <sub>r</sub> <sup>4)</sup>	U <sub>r</sub> <sup>4)</sup>	P <sub>r</sub> <sup>5)</sup>	v <sub>01</sub> <sup>6)</sup>	v <sub>02</sub> <sup>6)</sup>	t <sub>1</sub>	s <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>
				A	A	A	kN	V	V	kW	km/h	km/h	s	m	s	m
1	T20		387,2	+2,51	+1,11	2 736	322,0	681,5	687,4	1 470	42,5	69,7	103,3	595	362	4 582
2	T21	1 051 Mg	389,0	+2,50	+1,52	2 739	321,1	680,1	685,3	1 458	42,8	69,8	95,3	540	404	5 802
3	T22	Bydgoszcz - Wartubie	399,6	-3,08	-1,90	2 737	325,7	679,8	685,6	1 447	42,8	70,9	87,1	407	213	2 381
4	T24		413,4	+4,14	+3,59	2 739	319,5	674,7	680,2	1 465	42,6	62,5 <sup>7)</sup>	104,9	622	621	8 540
5	T25		427,0	-0,98	-3,71	2 744	325,2	673,5	679,2	1 464	42,8	70,0	110,2	549	209	2 028
6	T27		422,8	+0,00	-1,12	2 747	327,6	691,0	696,8	1 459	42,8	69,4	95,7	517	245	2 843
7	T28	1 051 Mg	410,4	+2,74	+3,56	2 747	325,8	685,2	690,9	1 476	42,3	69,3	101,4	571	982	10 399
8	T29	Wartubie - Bydgoszcz	395,5	+2,47	-1,12	2 624	303,0	686,6	692,6	1 469	42,1	70,0	98,2	606	244	2 753
9	T30		389,0	-0,02	+0,87	2 764	317,8	653,7	644,4	1 476	42,5	69,2	80,5	443	316	4 346
<b>Średnia:</b>				<b>+1,14</b>	<b>+0,31</b>	<b>2 731</b>	<b>320,8</b>	<b>678,5</b>	<b>682,5</b>	<b>1 465</b>	<b>42,6</b>	<b>69,8</b>	<b>97,4</b>	<b>539</b>	<b>400</b>	<b>4 853</b>

1) „+” wzniesienie; „-” spadek;

3) maksymalna wartość siły pociągowej w okresie rozruchu (na haku lok.);

5) moc całkowita pobierana przez silniki trakcyjne w stanie ustalonym;

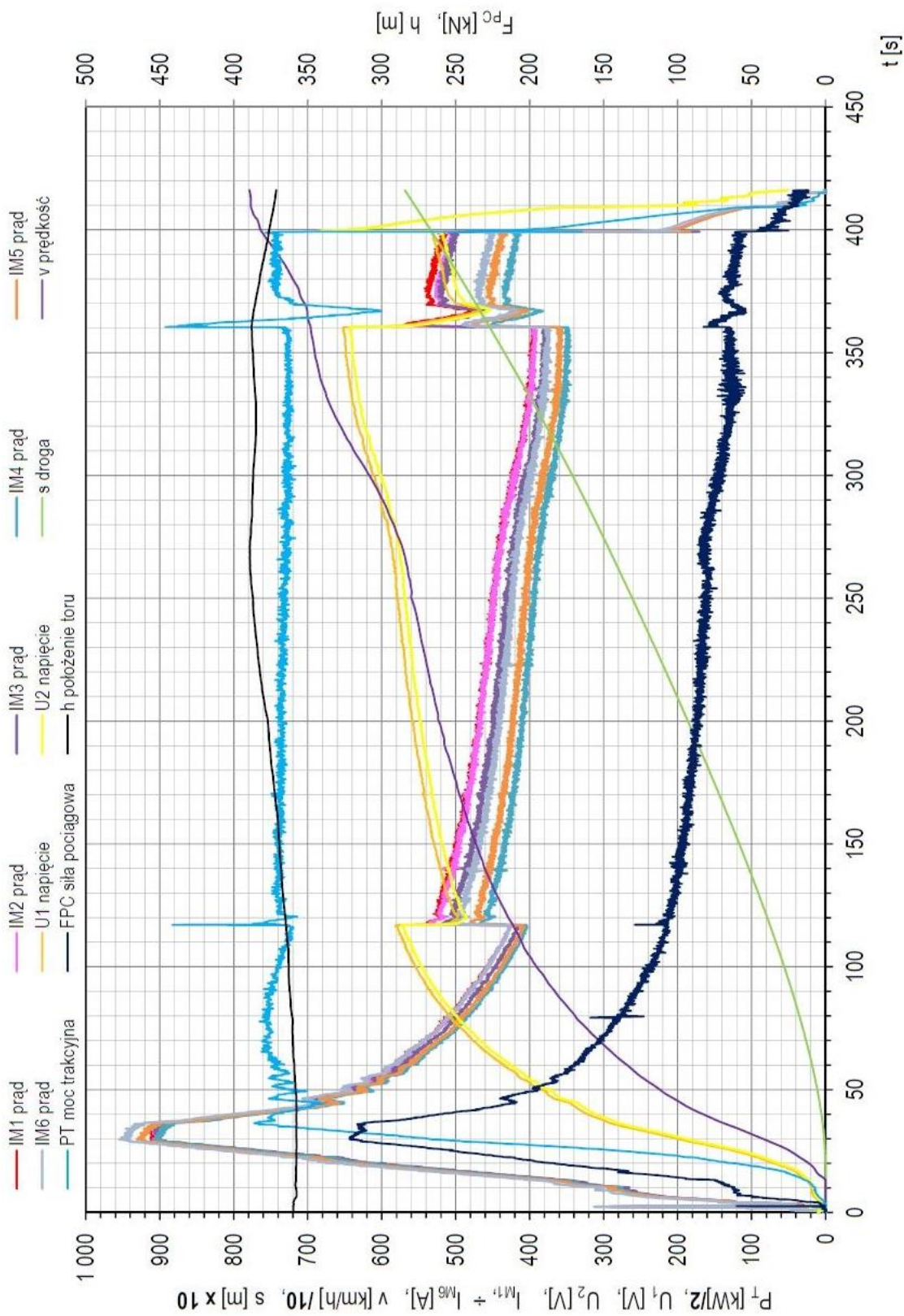
7) nie uwzględniono w wyznaczeniu średniej.

2) maks. wartość prądów silników trakcyjnych w trakcie rozruchu, wózek 1 i 2;

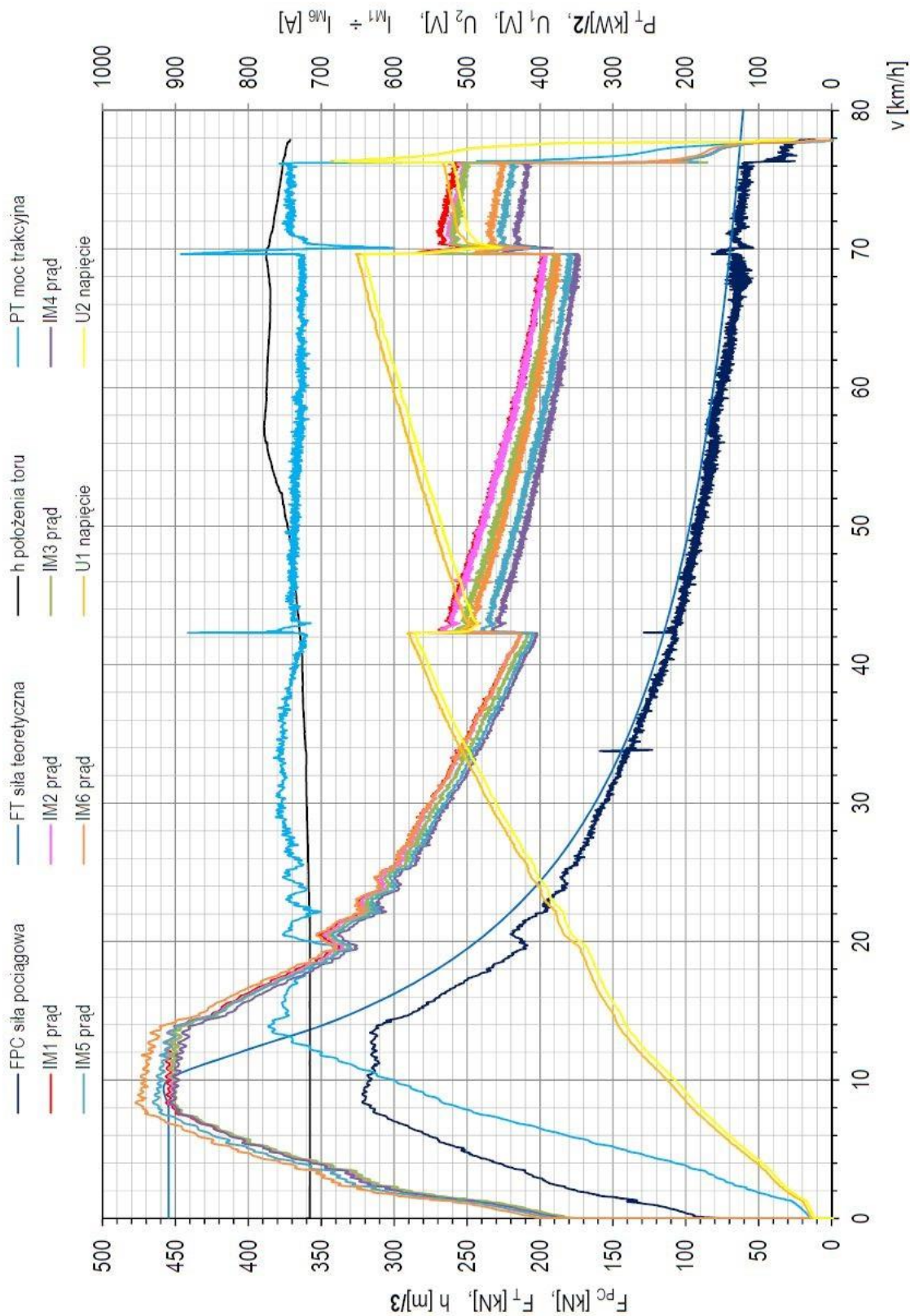
4) maks. wartości napięcia silników trakcyjnych (przed załączeniem 2 bocznika), wózek 1 i 2;

6) prędkości lokomotywy przy załączeniu osłabienia wzbudzenia silników trakcyjnych;





Rys. 8.4. Przebiegi parametrów trakcyjnych w funkcji czasu zmodernizowanej lokomotywy spalinowej typu 19D z pociągiem towarowym o masie 1051 Mg, próba nr T20 [7]



Rys. 8.5. Charakterystyka trakcyjna zmodernizowanej lokomotywy spalinowej typu 19D z pociągiem towarowym o masie 1051 Mg, próba nr T20 [7]

Tabela 8.2. Średnie parametry trakcyjne lokomotywy [7]

Parametr/wartość		
Prędkość [km/h]	40	70
Droga [m]	539	4853
Czas [s]	97,4	400
Profil zastępczy [%]	+1,14	+0,31

h) lokomotywa z pociągiem o masie 1051 Mg umożliwiła w sposób płynny i stabilny rozruch na wzniesieniu o nachyleniu +4,14%.

i) załączenie rezystorów osłabienia wzbudzenia powoduje asymetrię prądów pobieranych przez silniki trakcyjne wyraźnie widoczną po załączeniu II stopnia, dochodzącą do 15%. Z uwagi na próg załączania II stopnia osłabienia wzbudzenia silników trakcyjnych wynoszący ok. 70 km/h, pełne wykorzystanie możliwości trakcyjnych lokomotywy będzie możliwe dla składów wagonów na wyższe prędkości.

Uzyskane wyniki mają przede wszystkim charakter informacyjny i poznawczy. Ocena ilościowa możliwości trakcyjnych lokomotywy może dotyczyć uzyskiwanych wartości siły pociągowej i poziomu regulacji mocy trakcyjnej w odniesieniu do założonych w DTR parametrów elektrycznych oraz opracowanej teoretycznej charakterystyki trakcyjnej. Wyniki badań pozwalają ocenić możliwości prowadzenia pociągu towarowego o przeciętnym brutto dla tego typu lokomotywy z prędkością 70 km/h.

Badana lokomotywa wykazuje dobre właściwości dynamiki układu napędowego w zakresie małych prędkości (do 18 km/h). W stanie ustalonym (na charakterystyce stałej mocy), moc prądnicy głównej i silników trakcyjnych wykorzystana jest w ok. 80%.

### Wyznaczenie przyczepności na obwodzie kół lokomotywy

W lokomotywie zastosowano zabezpieczenie przeciwpoślizgowe typu 88ZE-09. Na podstawie sygnałów z czujników prędkości obrotowej sterownik kontroluje różnice prędkości obrotowej sześciu osi lokomotywy i na tej podstawie wykrywa poślizg poszczególnych zestawów kołowych. Przy likwidacji poślizgu współpracuje on ze sterownikiem napędu lokomotywy. Sterownik napędu zmniejsza wartość zadaną momentu, a układ sterowania napędem zmniejsza wartość napięcia wzbudzenia prądnicy głównej, co powoduje zmniejszenie siły trakcyjnej na wszystkich silnikach. Jednocześnie sterownik przesyła informację do tablicy pneumatycznej, która rozpoczyna podhamowanie. Dodatkowo, w zależności od prędkości pojazdu, tablica pneumatyczna może wdrożyć piaskowanie.

W celu sprawdzenia działania układu wykrywania i likwidacji poślizgu wykonano próbę wywołania poślizgu zestawów kołowych na szynach suchych i szynach mokrych, polanych roztworem detergentu. Przy maksymalnej, możliwej do uzyskania w czasie prób mocy układu napędowego na szynach suchych, nie uzyskiwano poślizgów. Na szynach mokrych, polanych roztworem detergentu przy maksymalnej mocy rozruchowej wystąpiła seria kilku po sobie następujących poślizgów dla stosunkowo niewielkiego zakresu prędkości (2–16 km/h) z obniżaniem mocy prądnicy głównej.

Wyjście lokomotywy z kolejnych krótko trwających poślizgów następowało samoczynnie bez obniżania przez maszynistę wartości zadanego momentu. Przebiegi parametrów trakcyjnych lokomotywy w czasie poślizgu w funkcji czasu przedstawiono na rys. 8.6.

Do wyznaczenia charakterystyki przyczepności kół lokomotywy w zakresie prędkości od 0 do 28 km/h z pociągiem towarowym wykorzystano zarejestrowane przebiegi parametrów trakcyjnych w funkcji czasu przy badaniu właściwości trakcyjnych.

W obliczeniach siły przyczepności na obwodzie kół korzystano z wyników ważenia lokomotywy w stanie służbowym, wykonanego przez IPS „TABOR”. W tabeli 8.3 zestawiono wyniki pomiarów nacisków poszczególnych kół.

Wyznaczona z pomiarów masa lokomotywy wynosiła 115,821 Mg a przyjęty do dalszych obliczeń minimalny nacisk koła wynosi 91,9 kN.

Tabela 8.3. Zestawienie wyników pomiarów nacisków kół lokomotywy [7]

Oznaczenie koła	1L	1P	2L	2P	3L	3P	4L	4P	5L	5P	6L	6P
Nacisk [kN]	94,2	96,1	94,0	95,6	92,2	96,9	92,5	96,8	91,9	96,1	94,1	95,7

Teoretyczne (obliczeniowe) charakterystyki przyczepności wyznaczono dla koła z minimalnym naciskiem określonym podczas ważenia lokomotywy.

W dalszych obliczeniach wykorzystano wzory i zależności stosowane powszechnie w obliczeniach trakcyjnych oraz opisane w publikacji [27].

Siłę przyczepności  $F_p$  na obwodzie koła, zwaną też siłą adhezji obliczano z zależności:

$$F_p = Q_{i,j} \cdot \psi_v \text{ [kN]} \quad (8.5)$$

gdzie:  $Q_{ij}$  – nacisk j-tego koła i-tego zestawu kołowego w kN,  $\psi_v$  – współczynnik przyczepności kół lokomotywy przy określonej prędkości

Współczynnik  $\psi_v$  obliczono oddzielnie dla szyn suchych i mokrych oraz dla warunków przeciętnych z zależności podanej w publikacji [27], wykorzystującej wzór Curtiusa i Knifflera i uwzględniającej różne współczynniki przyczepności dla szyn suchych i mokrych. Zależność ta ma postać:

$$\psi_v = \frac{7,5}{v_p + 44} \cdot \frac{\psi_o}{0,331} + 0,161 \quad (8.6)$$

gdzie:  $v_p$  – prędkość pojazdu w km/h,  $\psi_o$  – statyczny współczynnik przyczepności związany ze stanem szyn:

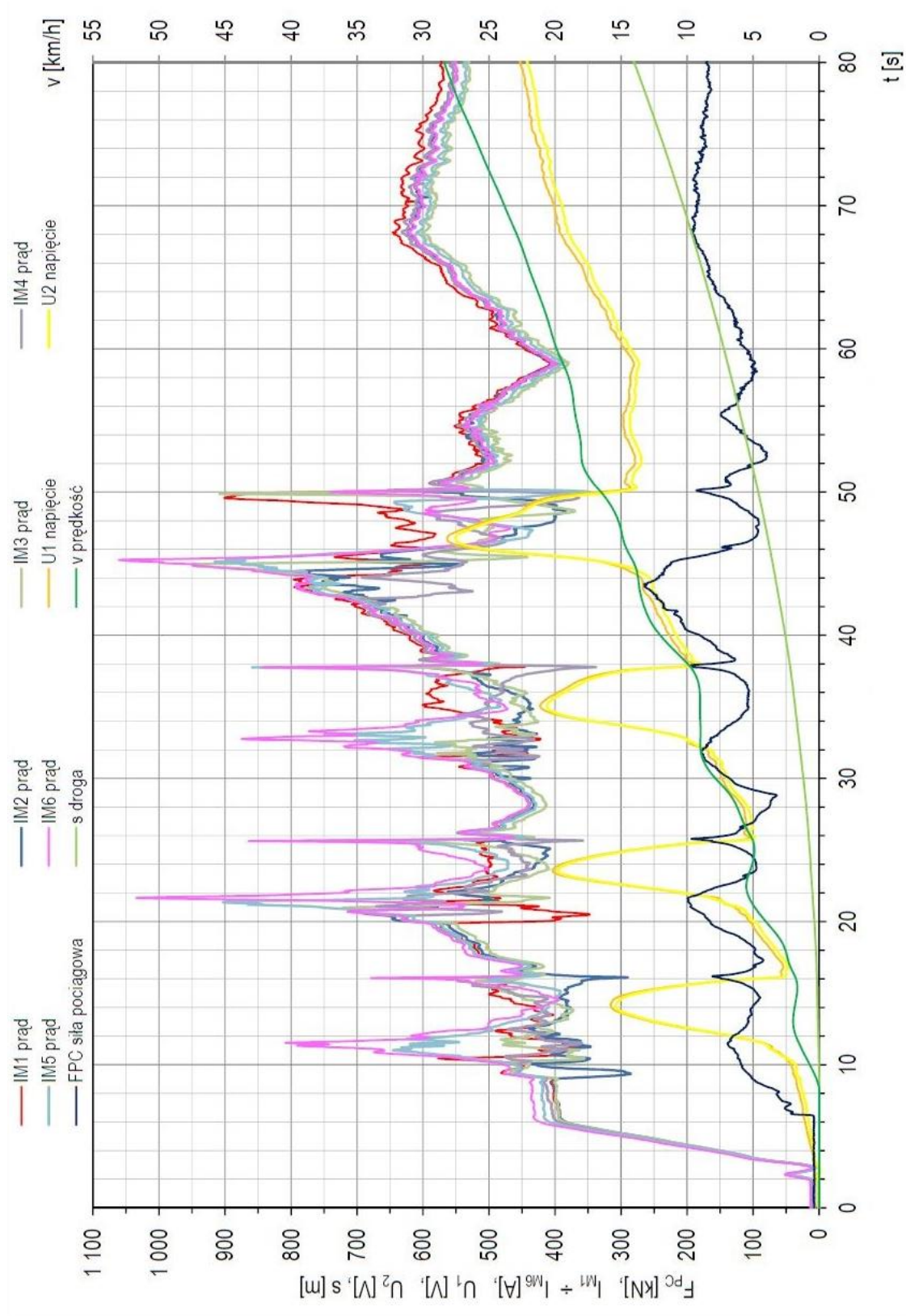
- dla szyn suchych  $\psi_o = 0,33$ ,
- dla warunków przeciętnych  $\psi_o = 0,30$ ,
- dla szyn mokrych  $\psi_o = 0,23$ .

Obliczone wartości siły przyczepności  $F_p$  porównano z pomierzoną w czasie jazd testowych siłą pociągową  $F_{PC}$  lokomotywy, zredukowaną do siły na obwodzie jednego koła napędnego (1/12 zmierzonej całkowitej siły pociągowej lokomotywy).

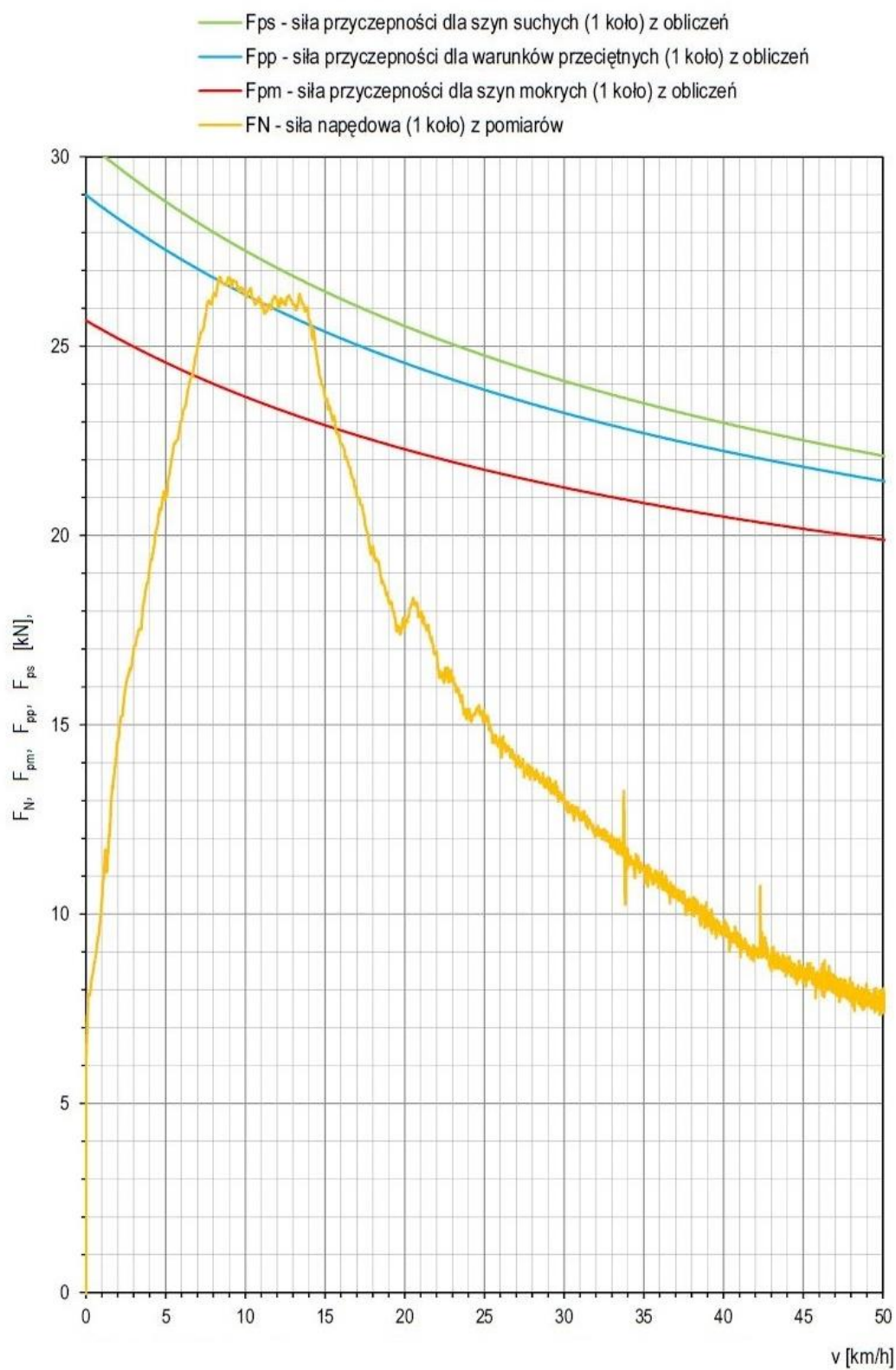
Na rysunku 8.7 zamieszczono przebiegi siły przyczepności  $F_p$  i siły pociągowej  $F_{PC}$  w funkcji prędkości lokomotywy  $v$  dla lokomotywy z pociągiem towarowym, którego brutto wynosiło 1051 Mg.

Analizując przebiegi zamieszczone na rys. 8.6 i 8.7, służące do oceny układu przeciwoślizgowego i przyczepności na obwodzie kół napędnych lokomotywy uzyskano następujące wnioski.

- W trakcie prób trakcyjnych na szynach suchych przy maksymalnym wykorzystaniu dysponowanej mocy zespołu napędowego w czasie rozruchu nie dochodziło do utraty przyczepności.
- Przy obniżonej przyczepności kół napędnych (szyny mokre od roztworu detergentu) wystąpiła seria paru poślizgów o stosunkowo krótkim czasie trwania (3–6 s) z samoczynną ich likwidacją.



Rys. 8.6. Przebiegi parametrów trakcyjnych jako funkcja czasu zmodernizowanej lokomotywy spalinowej typu 19D podczas poślizgów – próba nr T13 [7]



Rys. 8.7. Charakterystyka siły napędowej i siły przyczepności w obwodzie kół zmodernizowanej lokomotywy spalinowej typu 19D w stanie służbowym – próba nr T20 [7]

- Z oceny charakterystyk siły pociągowej i siły przyczepności na obwodzie kół przy prowadzeniu pociągu towarowego, zamieszczonych na rys. 8.7 wynika, że lokomotywa posiada wyraźną nadwyżkę siły pociągowej nad siłą przyczepności dla szyn mokrych. Przy współczynniku przyczepności dla warunków przeciętnych nadwyżka siły pociągowej jest minimalna. Może to przy znacznym pogorszeniu stanu szyn wywoływać poślizgi przy rozruchach lokomotywy z pociągami z zadaniem maksymalnym momentem. Nadwyżka siły pociągowej dla szyn mokrych występuje w zakresie prędkości od 7 km/h do około 16 km/h.
- Układ wykrywania i likwidacji poślizgu posiada krótki czas reakcji i działa zgodnie z przyjętym algorytmem, zmniejszając moment napędowy i nie dopuszczając do nadmiernego rozwinięcia poślizgu. Czułość układu wykrywania poślizgu i skuteczność zabiegów przeciwoślizgowych umożliwia rozruch lokomotywy z pociągami przy niekorzystnych warunkach przyczepności kół.

Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań są następujące:

1. Zmodernizowana lokomotywa spalinowa typu 19D pracuje na charakterystyce stałego momentu w zakresie prędkości 0–14 km/h osiągając moc maksymalną 1580 kW na wyjściu z prądnicy trakcyjnej, pobieraną przez silniki trakcyjne. Moc użyteczna lokomotywy (moc zredukowana do układu koło-szyna), z uwzględnieniem sprawności silnika trakcyjnego (0,92) i przekładni trakcyjnej (0,98) (łącznie ok. 0,902) przy mocy znamionowej silnika trakcyjnego 305 kW jest na poziomie 1650 kW. Uzyskiwana przez lokomotywę moc jest niższa od poziomu mocy ciągłej prądnicy głównej i od mocy wynikającej z mocy znamionowej silników trakcyjnych wynoszących 1830 kW.
2. W zakresie prędkości 14–20 km/h następuje osiągnięcie przez układ napędowy maksymalnej mocy i przejście na charakterystykę quasi stałej mocy. Średnia wartość mocy trakcyjnej w stanie quasi ustalonym (na charakterystyce stałej mocy) wynosi 1465 kW. Regulacja poziomu mocy trakcyjnej jest bardzo precyzyjna w całym zakresie prędkości od 14 km/h do 70 km/h z wyłączeniem momentu załączenia osłabienia wzbudzenia.
3. Załączenie osłabienia wzbudzenia odbywa się automatycznie przy średnich prędkościach lokomotywy 42,6 km/h dla I stopnia i 69,8 km/h dla II stopnia. Załączenie I stopnia osłabienia wzbudzenia nie powoduje zmniejszenia siły trakcyjnej. Natomiast załączenie II stopnia skutkuje chwilowym zmniejszeniem mocy lokomotywy o 1/4 i nieznacznym spadkiem siły pociągowej. Po upływie ok 8 sek. od załączenia II stopnia wzbudzenia układ napędowy powraca na charakterystykę stałej mocy.
4. Charakterystyka trakcyjna rzeczywista z pociągami towarowymi co do charakteru przebiegu jest bardzo zbliżona do charakterystyki teoretycznej. Rzeczywiste wartości siły pociągowej w zakresie prędkości 20–70 km/h sytuują się nieznacznie poniżej charakterystyki teoretycznej. Przybliżenie charakterystyki trakcyjnej rzeczywistej do charakterystyki teoretycznej jest dobre. Maksymalna średnia wartość siły pociągowej przy ruszaniu z pociągami towarowymi o masie 1051 Mg jest na poziomie 320 kN.
5. W trakcie prób trakcyjnych na szynach suchych przy maksymalnym wykorzystaniu dysponowanej mocy zespołu napędowego w czasie rozruchu nie dochodziło do utraty przyczepności.
6. Z oceny charakterystyk siły pociągowej i siły przyczepności na obwodzie kół przy prowadzeniu pociągu towarowego, zamieszczonych na rys. 8.7 wynika, że lokomotywa posiada wyraźną nadwyżkę siły pociągowej nad siłą przyczepności dla szyn mokrych. Przy współczynniku przyczepności dla warunków przeciętnych nadwyżka siły pociągowej jest minimalna. Może to przy znacznym pogorszeniu stanu szyn wywoływać poślizgi przy rozruchach lokomotywy z pociągami z zadaniem maksymalnym momentem. Nadwyżka siły pociągowej dla szyn mokrych występuje w zakresie prędkości od 7 km/h do około 16 km/h.

7. Układ wykrywania i likwidacji poślizgu posiada krótki czas reakcji i działa zgodnie z przyjętym algorytmem, zmniejszając moment napędowy i nie dopuszczając do nadmiernego rozwinięcia poślizgu. Czułość układu wykrywania poślizgu i skuteczność zabiegów przeciwpoślizgowych umożliwia rozruch lokomotywy z pociągiem przy niekorzystnych warunkach przyczepności kół.

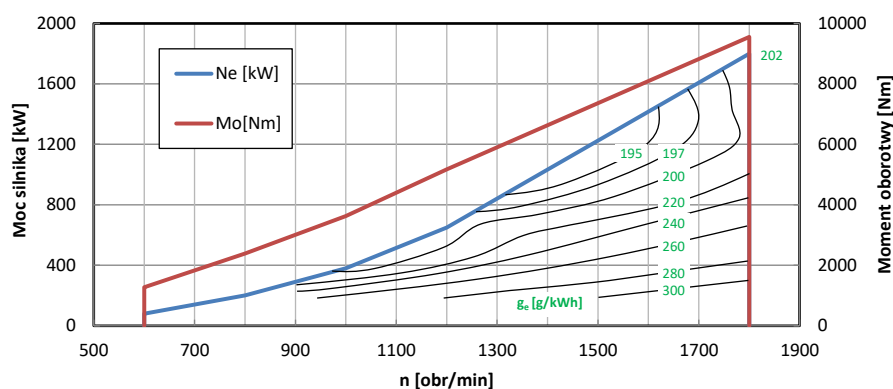
## 8.2. Analiza emisji substancji szkodliwych silnika spalinowego

Zmodernizowaną lokomotywę wyposażono w silnik MTU 12 V 4000 R84, którego szczegółowy opis przedstawiono w rozdziale 7.4. Ze względu na pomiary emisji spalin, najważniejsze dane tego silnika przedstawiono w tabeli 8.3.

Tabela 8.3. Dane techniczne silnika 12 V 4000 R84 dotyczące pomiarów emisji spalin [63]

Wielkość	Jednostka	Wartość
Średnica × skok	mm/mm	170/210
Objętość cylindra	dm <sup>3</sup>	4,77
Objętość skokowa silnika	dm <sup>3</sup>	57,2
Moc maksymalna @ prędkości obrotowej	Ne/obr/min	1800/1800
Moment maksymalny @ prędkości obrotowej	Mo/obr/min	9822/1750
Zużycie paliwa przy mocy: średniej/minimalne	g/kWh	202/193
Norma emisji spalin		EURO Stage IIIB

Badanie emisji składników spalin wymaga znajomości pełnej charakterystyki silnika (rys. 8.8). Wskazuje ona na uzyskiwanie maksymalnej wartości mocy silnika przy prędkości  $n = 1800$  obr/min. Jednocześnie przy tej prędkości obrotowej występuje także maksymalna wartość momentu obrotowego. W tym punkcie pracy jednostkowe zużycie paliwa wynosi  $g_e = 202$  g/kWh.



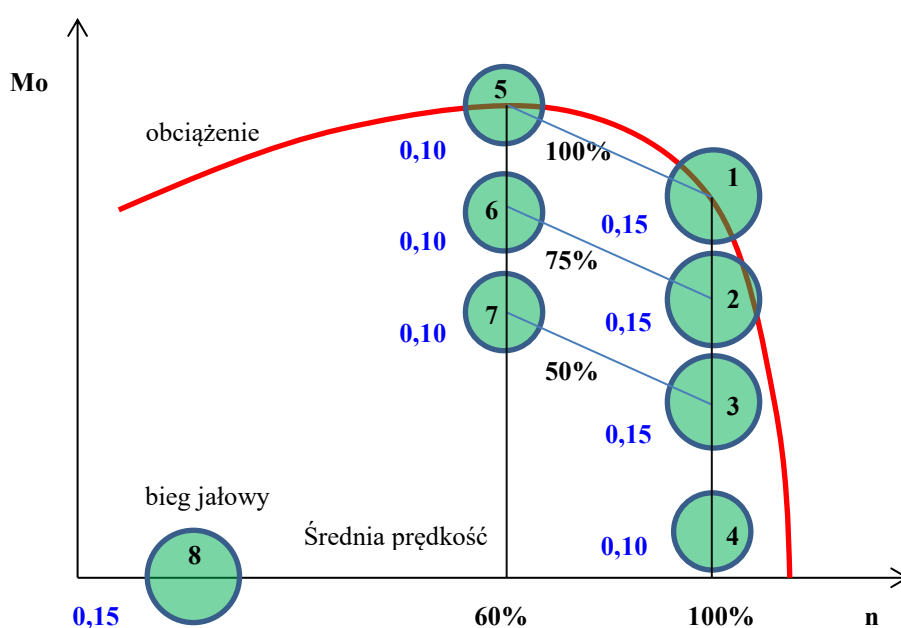
Rys. 8.8. Charakterystyka silnika 12V 4000 R84

Badania emisji spalin wykonano zgodnie z procedurą ISO 8178 cykl C1 (obecnie interpretowany jako test NRSC – *Non Road Stationary Cycle*). Wartości obciążenia i prędkości obrotowe wraz z udziałami faz testu przedstawiono na rys. 8.9. Test badawczy składa się z 8 faz; fazy biegu jałowego, częściowej prędkości obrotowej i prędkości maksymalnej. Przy każdej z tych prędkości określono kilka faz obciążenia.

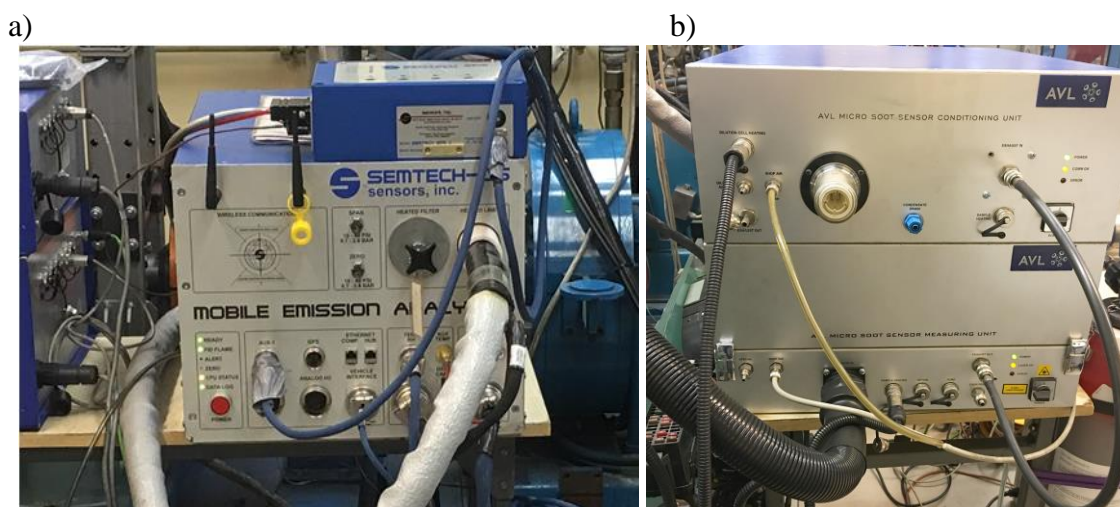
Do badań wykorzystano mobilne analizatory spalin. Do pomiarów składników gazowych użyto analizatora Semtech DS, natomiast do pomiarów cząstek stałych – AVL MSS (*Micro Soot Sensor*).



W analizatorze Semtech DS próbka spalin pobierana jest za przepływomierzem spalin, umożliwiającym masowy pomiar ich natężenia. Pomiar zawartości węglowodorów dokonywany jest metodą płomieniowo-jonizacyjną – FID (*Flame Ionizator Detector*). Następnie próbka jest schładzana do temperatury 4°C w celu pomiaru tlenków azotu oraz tlenku węgla. Odbywa się to w analizatorach odpowiednio: NDUV (*Nondispersive Ultra Violet*) oraz NDIR (*Nondispersive Infrared*) – rys. 8.10a. Pomiar masowy cząstek stałych realizowano z użyciem analizatora AVL MSS (rys. 8.10b). Pobrana próbka spalin (rozcieńczona) trafia do komory pomiarowej, w której jest poddana szybkozmiennemu promieniowaniu powodującemu przemienne ogrzewanie/chłodzenie zawartych tam cząstek. Miarą stężenia PM są generowane w procesie drgania. Dźwięk jest odczytywany przez mikrofony w określonym zakresie amplitudy i częstotliwości, a natężenie uzyskanej fali akustycznej – jest miarą stężenia cząstek stałych. Po uwzględnieniu przepływu spalin oraz stopnia rozcieńczenia obliczana jest masy cząstek stałych. Dane techniczne obu analizatorów wykorzystanych w badaniach przedstawiono w tabeli 8.4 oraz 8.5.



Rys. 8.9. Cykl badawczy ISO 8178 C1 [26]



Rys. 8.10. Analizatory spalin: a) Semtech DS, b) Micro Soot Sensor [47]

Tabela 8.4. Charakterystyka przyrządu SEMTECH DS [47]

Jednostka centralna			
Mierzony związek	Analizator/czujnik	Zakres	Dokładność [%]
THC [ppm]	FID	0–40 000	±2
CO [%]	NDIR	0–8	±3
CO <sub>2</sub> [%]		0–20	
HC [ppm]		0–4000	
NO [ppm]	NDUV	0–3000	±2
NO <sub>2</sub> [ppm]		0–500	
Czujnik do pomiaru warunków atmosferycznych			
Mierzony parametr	Zakres	Dokładność [%]	Czas odpowiedzi [s]
Temperatura [°C]	–39–60	±0,2	–
Wilgotność względna	0,8–100%	±2 dla 0,8–90% ±3 dla 90–100%	T <sub>90</sub> < 10
Ciśnienie atmosferyczne	0,015–0,115 MPa	±1,5	T <sub>90</sub> < 4

Tabela 8.5. Podstawowe dane techniczne analizatora MSS [47]

Parametr	Wartość
Rozmiar mierzonych cząstek [mg/m <sup>3</sup> ]	0,005–50
Szybkość transmisji danych [Hz]	5
Zakres temperatury pracy [°C]	5–43
Przepływ próbki spalin [dm <sup>3</sup> /min]	~ 2±2
Temperatura gazów wylotowych [°C]	<1000
Ciśnienie pośrednie gazów wylotowych [mbar]	do 2000
Pulsacje ciśnienia [mbar]	±1000 (maks. 50% ciśnienia wstecznego)

Pomiary emisji spalin prowadzono na oporniku wodnym w firmie PESA Bydgoszcz. Analizowano składniki gazowe (CO, HC, NO<sub>x</sub> – analizator Semtech DS) oraz masę cząstek stałych (analizator AVL MSS). Sposób prowadzenia badań przedstawiono na rys. 8.10.



Rys. 8.10. Widok obiektu badawczego podczas pomiarów emisji spalin

Pomiarów stężeń składników toksycznych dokonano z jednego rzędu cylindrów. Sprawdzono, że stężenia drugiego rzędu cylindrów silnika zawierają się w granicach do 10% różnicy. Przyjęto więc, że warunki pracy obu rzędów cylindrów są jednakowe. Wyznaczenie emisji sekundowej wymagało wykorzystania przepływomierza spalin. Emisję poszczególnych składników spalin obliczono na podstawie:

$$e_{i,j} = c_{i,j} \cdot a_i \cdot G_{sp} \left[ \frac{g}{h} \right] \quad (8.7)$$

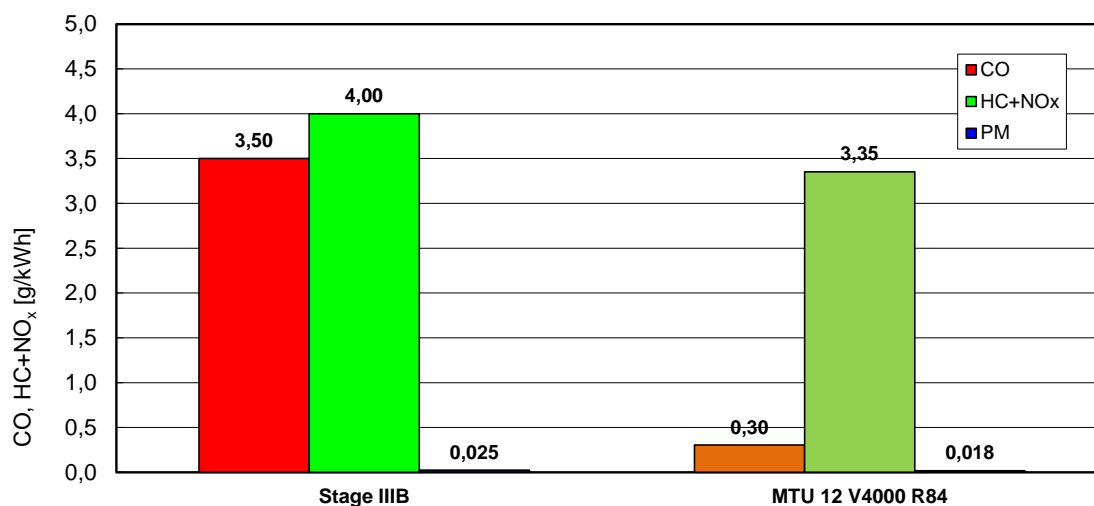
gdzie:  $i$  – składnik spalin,  $j$  – oznacza fazę testu,  $a$  – współczynnik dla danego składnika spalin,  $G_{sp}$  – natężenie przepływu spalin w danej fazie testu

Całkowitą emisję poszczególnych składników spalin wyznaczono jako:

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^8 e_{i,j} \cdot u_j}{\sum_{j=1}^8 N e_j \cdot u_j} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right] \quad (8.8)$$

gdzie  $u_j$  oznacza udział wagowy danej fazy w teście (na podst. rys. 8.9).

Wykorzystując powyższe zależności wyznaczono wartości emisji składników spalin w odniesieniu do normy Stage IIIB. Wyniki badań zaprezentowano na rys. 8.11.

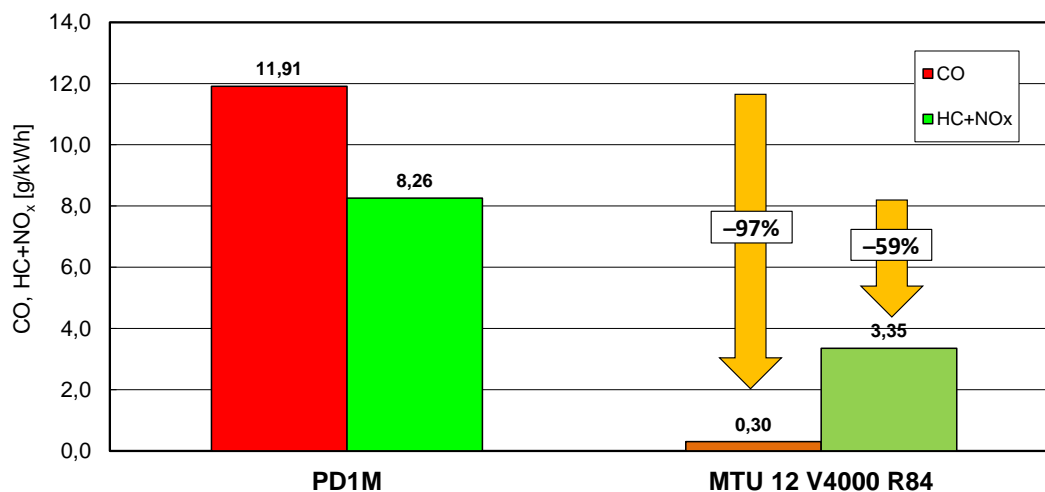


Rys. 8.11. Wyniki pomiarów emisji spalin w odniesieniu do wymagań normy

Przedstawione rezultaty badań świadczą o tym, że emisja składników toksycznych nie przekracza limitów normy Stage IIIB. Emisja tlenku węgla jest kilkukrotnie mniejsza niż wymagają tego limity. Wynika to z dużego nadmiaru powietrza badanego silnika, w którym zastosowano układ podwójnego doładowania. Łączna emisja HC + NO<sub>x</sub> jest również niższa niż wartości graniczne. Biorąc pod uwagę, że norma Stage IIIA [48] zawierała osobne limity dla HC oraz NO<sub>x</sub> (odpowiednio: 0,5 g/kWh oraz 6 g/kWh) to w powyższych badaniach uzyskano te wartości odpowiednio: HC – 0,27 g/kWh oraz NO<sub>x</sub> – 3,08 g/kWh. Emisja cząstek stałych zawiera się w limicie wynoszącym 0,025 g/kWh. Jej wartość badawcza jest o około 30% mniejsza od wartości limitu.

Zastosowanie nowoczesnego silnika spalinowego w modernizowanej lokomotywie powoduje wymierne korzyści środowiskowe, emitując do atmosfery ograniczone ilości składników toksycznych, spełniając normę emisji spalin Stage IIIB (poprzednio w takiej lokomotywie montowano silnik PD1M). Silnik PD1M miał 3-krotnie większą objętość skokową, o 50% mniejszą liczbę cylindrów i o 50% mniejszą moc silnika. Wynika z tego, że dobór zespołu silnikowo-prądnicowego do modernizowanej lokomotywy jest niezwykle istotnym aspektem także z punktu widzenia ochrony środowiska.

Oceny ograniczenia emisji spalin dokonano na podstawie badań lokomotywy spalinowej przedstawionej na rys. 2.6. Wykorzystując wielkości emisji z silnika PD1M dokonano analiz związanych z wyznaczeniem korzyści środowiskowych wymiany takiego silnika (rys. 8.12).



Rys. 8.12. Korzyści z zamiany silnika PD1M na 12V 4000 R84

Analiza wyników wskazuje na znaczne ograniczenie emisji tlenku węgla z silnika nowej generacji. Dodatkowo, stwierdzono ograniczenie emisji HC oraz NO<sub>x</sub> o prawie 60%. Należy zauważyć, że w badaniach lokomotywy z silnikiem PD1M oddzielnie wyznaczano HC oraz NO<sub>x</sub>. W powyższych wynikach ujęto jako sumę. Nie analizowano zmian emisji cząstek stałych, gdyż lokomotywy z silnikiem PD1M nie badano w aspekcie pomiarów tego składnika spalin.

## 9. WNIOSKI

### 9.1. Wnioski ogólne

Dobór zespołu silnikowo-prądnicowego lokomotywy spalinowej jest zagadnieniem podlegającym ciągłej ewaluacji. Ewaluacja ta wynika pośrednio z wprowadzanych przepisów legislacyjnych dotyczących konstrukcji całej lokomotywy z uwzględnieniem także wymagań szczegółowych, np. w zakresie limitów emisji spalin. Ostatnie wytyczne są ściśle związane z układami oczyszczania spalin, co limituje możliwości doboru układu silnikowo-prądnicowego.

Mimo określonych ograniczeń dotyczących doboru zespołu silnikowo-prądnicowego w pracy dokonano modernizacji lokomotywy spalinowej ze szczególnym uwzględnieniem tego układu. Na podstawie prowadzonych analiz i prac projektowych oraz prac badawczych przedstawiono następujące wnioski ogólne.

- Dotychczasową metodykę modernizacji spalinowych pojazdów szynowych polegającą na zastąpieniu silnika spalinowego nowszą konstrukcją zastąpiono autorską metodyką która uwzględnia także m.in. precyzyjny dobór nowoczesnego zespołu silnikowo-prądnicowego z prądnicą trakcyjną skonfigurowaną indywidualnie dla dowolnej modernizowanej lokomotywy. Metodykę tę charakteryzuje odmienne podejście do modernizacji lokomotyw spalinowych oraz całkowicie odmienny sposób doboru zespołu napędowego. W pracach tych wykorzystano własne doświadczenie konstrukcyjne i projektowe w zakresie lokomotyw spalinowych.
- Opracowana metodyka doboru zespołu silnikowo-prądnicowego jest możliwa do wykorzystania w kilku podobnych konstrukcyjnie lokomotywach, co stanowi platformę wyjściową do wspólnych rozwiązań technicznych i unifikacji rozwiązań.
- Opracowano uniwersalną metodę doboru zespołu silnikowo-prądnicowego na podstawie wielu metod modernizacji lokomotyw oraz doświadczeń w realizacji projektów, co potwierdza postawioną w pracy tezę główną.
- Dokonano autorskiej modernizacji lokomotywy, w tym: zespołu silnikowo-prądnicowego, układów paliwowego oraz chłodzenia, modernizacji ostoi lokomotywy i wózków trakcyjnych, kabiny maszynisty oraz układów elektrycznych.
- Przeprowadzono badania trakcyjne modernizowanej lokomotywy wraz z analizą emisji składników szkodliwych zamontowanego w lokomotywie silnika spalinowego.

### 9.2. Wnioski metodyczne

Przedstawiona rozprawa obejmuje swoim zakresem prace projektowe oraz konstrukcyjne. Z tego powodu celowe jest wskazanie dokonań w zakresie metodycznym:

- opracowana metodyka doboru zespołu prądnicowo-silnikowego do modernizacji lokomotyw spalinowych oparta jest na kilkuetapowym działaniu, co stanowi o nowym podejściu do projektowania takich układów,
  - docelowe określenie bilansu mocy oraz charakterystyk trakcyjnych,
  - analiza przepisów dotyczących wymagań dla zespołów silnikowo-prądnicowych,
  - ekonomiczna, techniczna oraz serwisowa analiza ofert silników i prądnic,
  - zabudowa mechaniczna zespołu i układów peryferyjnych wraz z opracowaniem zintegrowanego sterownika zespołu,
- opracowanie metodyki analizy zabudowy mechanicznej zespołu napędowego,
- symulacyjne analizy zespołu silnikowo-prądnicowego.

### 9.3. Wnioski szczegółowe

Wykorzystanie nowoczesnej metodyki doboru zespołu silnikowo-prądnicowego lokomotywy spalinowej było przyczyną do prowadzenia prac badawczych nowej konstrukcji lokomotywy. W wyniku dokonanych badań i ich analiz stwierdzono, że:

1. Energochłonność nowej konstrukcji zmniejszyła się o ok. 25%, co wynika z następujących modyfikacji:
  - zmniejszonego jednostkowego zużycia paliwa o ok. 12%
  - zmniejszenie zużycia paliwa na biegu jałowym o ok. 40%
  - zmian w układach: chłodzenia silnika spalinowego, wentylacji silników trakcyjnych, napędu sprężarki oraz sterowania zespołem silnikowo – prądnicowym.
2. Zastosowanie nowoczesnego silnika MTU 12 V 4000 R84 (spełniającego normę emisji Stage IIIB) w układzie silnikowo-prądnicowym skutkuje:
  - 3-krotnym zmniejszeniem objętości skokowej silnika,
  - 2-krotnym zmniejszeniem liczby cylindrów,
  - 2-krotnym zwiększeniem mocy silnika,
  - 97-procentowym ograniczeniem tlenku węgla w teście ISO 8178 C1 w odniesieniu do silnika PD1M (konstrukcja dwusuwowa),
  - 60-procentowym ograniczeniem łącznej emisji HC oraz NO<sub>x</sub>.

### 9.4. Wnioski prognostyczne

Prowadzone prace projektowe, konstrukcyjne i badawcze nie wyczerpują całości zagadnienia jakim jest kompleksowa modernizacja taboru lokomotyw spalinowych. Dalsze prace związane z tym zagadnieniem mogą być ukierunkowane na następujące aspekty działań:

1. Pełna unifikacja metodyki prowadzonych prac dotycząca szerokiej gamy lokomotyw spalinowych o zróżnicowanych mocach silników spalinowych oraz różnych zastosowaniach lokomotyw (liniowych, manewrowych, towarowych i innych).
2. Dostosowanie metodyki doboru układu silnikowo-prądnicowego do nowych wymagań w zakresie przepisów dotyczących sposobów badań tych silników: nowe testy badawcze oraz pomiary emisji cząstek stałych w zakresie liczby i ich masy.
3. Opracowanie metodyki dotyczącej doboru zespołu silnikowego do lokomotyw hybrydowych spalinowo-elektrycznych.

## LITERATURA

- [1] Analiza układu dolotowego silnika spalinowego lokomotywy 19D, OR-10722, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [2] Analiza układu wentylacji silników trakcyjnych lokomotywy 19D, OR-10721, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [3] Analiza wytrzymałościowa konstrukcji przedziału maszynowego elektryczno-pneumatycznego, OR-10863, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [4] Analiza wytrzymałościowa konstrukcji przedziału maszynowego sprężarkowo-chłodniczego, OR-11000, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [5] Analiza wytrzymałościowa konstrukcji stalowej przedziału maszynowego agregatu prądotwórczego, OR-10909, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [6] Analiza wytrzymałościowa ostoi zmodernizowanej lokomotywy 19D, OR-10819, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [7] Badania właściwości trakcyjnych zmodernizowanej lokomotywy spalinowej typu 19D, Raport z badań, RP-1321, IPS „TABOR” Poznań, 2017, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [8] Barna G., Simulation model of a series DC motor for traction rail vehicles, 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje 2016.
- [9] Bartosik M., Wiak S., Multi-annual Program “By Railway to the 21st Century” as Key Factor in the Development of Rail Transport in Poland. *Transportation Research Procedia*, 14, 518-527, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.107>.
- [10] Better Every™ Track. QSK60 For EPA Tier 3/Stage IIIA and Tier 4/Stage IIIB for locomotive applications. 4087308-0913, <https://www.cummins.com/engines/qsk60>.
- [11] Carvalhaes B.B., de Alvarenga Rosa R., de Almeida D'Agosto M., Mattos Ribeiro G., A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 2017, 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.031>.
- [12] Czerwiński J., Dobrowolski P., Jakuszko W., Michalak P., Możliwości zmiany istotnych dla środowiska parametrów eksploatacyjnych spalinowych lokomotyw 6-osioowych przez modernizację zespołów. Konferencja Naukowo-Techniczna „Ochrona Środowiska i Oszczędność Energii w Transporcie Szynowym”, Trzebow k. Poznania 20-22.05.2015.
- [13] Czerwiński J., Jakuszko W., Michalak P., Proces projektowania zmodernizowanej lokomotywy 19D, *Pojazdy Szynowe*, 3, 2016.
- [14] Czerwiński J., Marciniak Z. Modułowe konstrukcje jednokabinowych spalinowych lokomotyw manewrowych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, z. 98 Warszawa 2013.
- [15] Czerwiński J., Michalak P., Jakuszko W., Dobrowolski P., Możliwości zmiany istotnych dla środowiska parametrów eksploatacyjnych spalinowych lokomotyw 6-osioowych przez modernizację zespołów. *Pojazdy Szynowe*, 4, 2015.
- [16] Dokumentacja Techniczno-Ruchowa zmodernizowanej lokomotywy spalinowej typu 19D z przekładnią elektryczną, Opis techniczny, 19D 0159-1/1, IPS „TABOR” Poznań, 2017, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [17] Dyrektywa 2002/88/WE Parlamentu Europejskiego z dnia 9 grudnia 2002 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń

- gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach (Dz. U. UE L 35/28 z dnia 11.2.2003).
- [18] Dyrektywa 2004/26/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 kwietnia 2004 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach (Dz. U. UE L 146/1 z dnia 25.06.2004).
- [19] Dyrektywa 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1997 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach (Dz. U. WE L 59 z 27.02.1998 str. 1).
- [20] Dyrektywa Komisji 2001/63/WE z dnia 17 sierpnia 2001 r. dostosowująca do postępu technicznego dyrektywę 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach. (Dz. U. WE L. 227/41 z dnia 23.08.2001).
- [21] Dyrektywa Komisji 2010/26/UE z dnia 31 marca 2010 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach (Dz. U. UE L86/29 z dnia 1.4.2010).
- [22] Dyrektywa Komisji 2012/46/UE z dnia 6 grudnia 2012 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach (Dz. U. UE L 353/80 z dnia 21.12.2012).
- [23] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/26/WE z dnia 21 kwietnia 2004 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach (Dz. O. UE L. 146/1 z 25.06.2004).
- [24] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2011/88/UE z dnia 16 listopada 2011 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE w odniesieniu do przepisów dotyczących silników wprowadzanych do obrotu według formuły elastycznej (Dz. U. UE L305/1 z dnia 23.11.2011).
- [25] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei Unii Europejskiej (Dz. O. UE L. 138 z 26.05.2016).
- [26] Emission Test Cycles: ISO 8178 – DieselNet.  
<https://dieselnet.com/standards/cycles/iso8178.php>
- [27] Gąsowski W., Sobaś J., Pohl K., Układy mechaniczne elektrycznych pojazdów trakcyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
- [28] <https://uic-stats.uic.org/list/> (dostęp z 20.12.2020).
- [29] Ilončiak J., Struharnanský L., Kuchta J., Modular concept of auxiliary converters for diesel electric locomotives. *Procedia Engineering*, 192, 2017, 359-364.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>.



- [30] International Union of Railways, Karta UIC 534, Sygnały i wsporniki sygnałowe lokomotywy, wagonów towarowych i zespołów trakcyjnych.
- [31] International Union of Railways, Karta UIC 612-0, Interfejsy Maszynista – Pojazd dla EMU/DMU, lokomotyw i napędnych wagonów pasażerskich. Funkcjonalne i systemowe wymagania związane ze współpracującymi interfejsami Maszynista – Pojazd.
- [32] International Union of Railways, Karta UIC 644, Sygnały ostrzegawcze dźwiękowe na pojazdach trakcyjnych w komunikacji międzynarodowej.
- [33] International Union of Railways, Karta UIC 651, Ukształtowanie kabin maszynisty lokomotyw, wagonów jednostek trakcyjnych i pojazdach sterujących.
- [34] Kałuża A., Kucharski R., Locomotive diesel engine idle time distributions: Case studies from Poland, 2009–2013. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 2018, 524-535. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.019>.
- [35] Koncepcja układu sterowania zespołu prądowórczego platformy lokomotyw sześciosiowych, OR-10720, IPS „TABOR”, Poznań, 2015, Opracowanie niepublikowane.
- [36] Kossov V.S., Krasnyukov N.F., Oganyan E.S., Ovechnikov M.N., Volokhov G.M., Methodological support for the analysis of the stress-strain state of the driver’s cab during an emergency collision of a locomotive with an obstacle. *Procedia Structural Integrity*, 20, 2019, 212-217, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.141>.
- [37] Lebedevas S., Dailydka S., Jastremskas V., Rapalis P., The influence of locomotive diesel engine transient operating modes on energy usage. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 2015, 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.011>.
- [38] Liudvinavičius L., Jastremskas V., Modernization of diesel-electric locomotive 2M62 and TEP-70 locomotives with respect to electrical subsystem. *Procedia Engineering*, 187, 2017, 272-280. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.375>.
- [39] Marciniak Z., Doposażenie, remotoryzacja oraz modernizacja liniowych i manewrowych lokomotyw spalinowych w Pesa Bydgoszcz S.A., *Technika Transportu Szynowego*, 4–5, 2009.
- [40] Marciniak Z., Dotychczasowe projekty modernizacji lokomotyw spalinowych w Polsce. *Technika Transportu Szynowego*, 9, 2005.
- [41] Marciniak Z., Polonizacja, remotoryzacja i modernizacja lokomotyw spalinowych eksploatowanych w kraju. *Pojazdy Szynowe*, 1, 2010.
- [42] Marciniak Z., Projekty modernizacyjne spalinowych lokomotyw liniowych i manewrowych wykonanych w Instytucie Pojazdów Szynowych. *Logistyka*, 2010 nr 4.
- [43] Marciniak Z., Przegląd modernizacji lokomotyw spalinowych wykonanych w Polsce, IPS „TABOR”, Poznań, 2016.
- [44] Marciniak Z., Stawecki W., Merkisz J., Pielecha I., Pielecha J., Możliwości modyfikacji taboru spalinowego w celu zmniejszenia jego oddziaływania na środowisko naturalne. *Technika Transportu Szynowego*, 3, 2011.
- [45] Marciniak Z., Zmodernizowane w ostatnich latach lokomotywy elektryczne i spalinowe w Polsce. *Technika Transportu Szynowego*, 4, 2011.
- [46] Materiały Cummins dotyczące projektu lokomotywy 19D. Opracowania niepublikowane. 2015.
- [47] Materiały firm AVL, Sensors Inc.
- [48] Merkisz J., Pielecha J., Nanoparticle emissions from combustion engines. *Springer Tracts on Transportation and Traffic*, 8, 2015.
- [49] Michalak P., Jakuszko W., Czerwiński J., Projekt lokomotywy 19D jako podstawowa wersja platformy zmodernizowanych lokomotyw serii SM48 i ST44. IV Międzyna-

- rodowa Konferencja Naukowa „Najnowsze technologie w transporcie szynowym”, Józefów k. Warszawy 18–19.11.2015.
- [50] Michalak P., Jakuszko W., Far M., Nowoczesne układy i zespoły w modernizowanych lokomotywach typu 6Di i 19D. XXIII Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe 2018”
- [51] Michalak P., Jakuszko W., Kruś M., Projekty modernizacji lokomotyw z wykorzystaniem środowiska 3D oraz symulacji komputerowych. Technika Transportu Szynowego 12, 2017.
- [52] Michalak P., Jakuszko W., Nowe rozwiązania i układy w modernizowanej lokomotywie spalinowej typu 19D serii SM48 zwiększające niezawodność i bezpieczeństwo w eksploatacji. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, „Systemy Logistyczne Teoria i Praktyka”, Warszawa 30.08-02.09.2015.
- [53] Michalak P., Merkisz J., Stawecki W., The selection of the engine unit – main engine generator during the modernization of the 19D/TEM2 locomotive. Combustion Engines. 182(3), 38-46, 2020. <https://doi.org/10.19206/CE-2020-307>.
- [54] Miklasz R., Antkowiak T., Michalak P., Modernizacja wózków lokomotywy 19D w kierunku zmniejszenia częstości obsługi eksploatacyjnej. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Najnowsze technologie w transporcie szynowym”, Józefów k. Warszawy 18-19.11.2015.
- [55] Milecki S., Miklasz R., Modernizacja wózków lokomotywy TEM2 w kierunku zmniejszenia zanieczyszczenia eksploatacyjnego środowiska. Konferencja Naukowo-Techniczna „Ochrona Środowiska i Oszczędność Energii w Transporcie Szynowym”, Trzebaw k. Poznania 20-22.05.2015.
- [56] Model kabiny maszynisty lokomotywy 19D – obliczenia wytrzymałościowe, OR-10734, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie niepublikowane.
- [57] Model wózka trakcyjnego lokomotywy 19D – obliczenia wytrzymałościowe, OR-10800, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie niepublikowane.
- [58] MS65012/01E Application Guidebook, MTU, 2014. Opracowanie niepublikowane.
- [59] Murta A.L.M., De Freitas M.A.V., Ferreira C.G., Da Costa Lima Peixoto M.M., The use of palm oil biodiesel blends in locomotives: An economic, social and environmental analysis. Renewable Energy, 164, 2021, 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.094>.
- [60] Norma Zakładowa ZN-01/PKP-3512-06, Tabor kolejowy. Elektryczna instalacja oświetlenia wagonów osobowych oraz pomieszczeń pasażerskich pojazdów trakcyjnych. Wymagania i badania.
- [61] Norma Zakładowa ZN-01/PKP-3512-07, Pojazdy trakcyjne. Elektryczna instalacja oświetlenia. Wymagania i badania.
- [62] Obliczenia trakcyjne z diagramem charakterystyk możliwości trakcyjnych lokomotywy o mocy 1800 kW, 19D 0115-2, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [63] Opis lokomotywy typu 19D, Modernizacja lokomotywy spalinowej TEM2, OR-11026, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [64] Podoski J., Kacprzak J., Mysiek J., Zasady trakcji spalinowej, WKiŁ, Warszawa 1980.
- [65] Polska Norma PN-EN 12464-1, Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy – Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach.
- [66] Polska Norma PN-EN 12663-1, Kolejnictwo – Wymagania konstrukcyjno-wytrzymałościowe dotyczące pudeł kolejowych pojazdów szynowych – Część 1: Lokomotywy i tabor pasażerski (i metoda alternatywna dla wagonów towarowych).
- [67] Polska Norma PN-EN 13272-1, Kolejnictwo – Oświetlenie elektryczne pojazdów

- szynowych w systemach transportu publicznego – Część 1: Kolej.
- [68] Polska Norma PN-EN 13749, Kolejnictwo – Zestawy kołowe i wózki – Metody określania wymagań konstrukcyjnych dla ram wózków.
- [69] Polska Norma PN-EN 14363, Kolejnictwo – Badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu – Badanie właściwości biegowych i próby stacjonarne.
- [70] Polska Norma PN-EN 15153-1, Kolejnictwo – Ostrzegawcze urządzenia zewnętrzne sygnalizacji optycznej i dźwiękowej – Część 1: Sygnalizacja świetlna czoła i końca pociągu dla kolei.
- [71] Polska Norma PN-EN 15153-2, Kolejnictwo – Ostrzegawcze urządzenia zewnętrzne sygnalizacji optycznej i dźwiękowej – Część 2: Dźwiękowe urządzenia ostrzegawcze dla kolei.
- [72] Polska Norma PN-EN 15227, Kolejnictwo – Wymagania zderzeniowe dla pudeł pojazdów szynowych.
- [73] Polska Norma PN-EN 50121-1, Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 1: Postanowienia ogólne.
- [74] Polska Norma PN-EN 50121-2, Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 2: Oddziaływanie systemu kolejowego na otoczenie.
- [75] Polska Norma PN-EN 50121-3-1, Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 3-1: Tabor. Pociąg i kompletny pojazd.
- [76] Polska Norma PN-EN 50121-3-2, Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 3 – 2: Tabor. Aparatura.
- [77] Polska Norma PN-EN 50121-4, Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 4: Emisja i odporność urządzeń sterowania ruchem kolejowym oraz telekomunikacji.
- [78] Polska Norma PN-EN 50124-1, Zastosowania kolejowe – Koordynacja izolacji – Część 1: Wymagania podstawowe – Odstępy izolacyjne powietrzne i powierzchniowe dla całego wyposażenia elektrycznego i elektronicznego.
- [79] Polska Norma PN-EN 50124-2, Zastosowania kolejowe – Koordynacja izolacji – Część 2: Przepięcia i ochrona przeciwprzepięciowa.
- [80] Polska Norma PN-EN 50125-1, Zastosowania kolejowe – Warunki środowiskowe stawiane urządzeniom – Część 1: Tabor i wyposażenie pokładowe.
- [81] Polska Norma PN-EN 50128, Zastosowania kolejowe – Systemy łączności, przetwarzania danych i sterowania ruchem – Oprogramowanie kolejowych systemów sterowania i zabezpieczenia.
- [82] Polska Norma PN-EN 50129, Zastosowania kolejowe – Systemy łączności, przetwarzania danych i sterowania ruchem – Elektroniczne systemy sterowania ruchem związane z bezpieczeństwem.
- [83] Polska Norma PN-EN 50155, Zastosowania kolejowe – Tabor – Wyposażenie elektroniczne
- [84] Polska Norma PN-EN 50163, Zastosowania kolejowe – Napięcia zasilania systemów trakcyjnych.
- [85] Polska Norma PN-EN 60077-1, Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 1: Podstawowe warunki eksploatacji i zasady ogólne.
- [86] Polska Norma PN-EN 60077-2, Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 2: Podzespoły elektrotechniczne – Zasady ogólne.
- [87] Polska Norma PN-EN 60077-3, Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 3: Elementy elektrotechniczne – Zasady dotyczące wyłączników napięcia stałego.
- [88] Polska Norma PN-EN 60077-4, Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne

- taboru kolejowego – Część 4: Elementy elektrotechniczne – Zasady dotyczące wyłączników napięcia przemiennego.
- [89] Polska Norma PN-EN 60077-5, Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 5: Elementy elektrotechniczne – Zasady dotyczące bezpieczników wysokiego napięcia.
- [90] Polska Norma PN-EN 60529, Stopnie ochrony zapewnianej przez obudowy (Kod IP).
- [91] Polska Norma PN-EN 60598-1, Oprawy oświetleniowe – Część 1: Wymagania ogólne i badania.
- [92] Polska Norma PN-K-88100, Pojazdy trakcyjne – Syreny i gwizdawki.
- [93] Polska Norma PN-K-88200, Tabor kolejowy – Sygnały końca pociągu i inne sygnały – Wymagania.
- [94] Program prób i badań zmodernizowanej spalinowej lokomotywy typu 19D, OB-560, IPS „TABOR” Poznań, 2017 r., Opracowanie niepublikowane.
- [95] Rozmieszczenie ważniejszych maszyn i urządzeń mechanicznych i elektrycznych w przedziałach maszynowych na ostoji – projekt 3D, 19D 0084-2, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [96] Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 z dnia 14 września 2016 w sprawie wymogów dotyczących wartości granicznych emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych oraz homologacji typu w odniesieniu do silników spalinowych wewnętrznego spalania przeznaczonych do maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach, zmieniające rozporządzenia (UE) nr 1024/2012 i (UE) nr 167/2013 oraz zmieniające i uchylające dyrektywę 97/68/WE.
- [97] Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/919 z dnia 27 maja 2016 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie podsystemów „Sterowanie” systemu kolei w Unii Europejskiej (OJ L 158, 15.6.2016, p. 1-79), TSI CCS.
- [98] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej (Dz. U. UE L. 356 z 12.12.2014), TSI LOC&PAS.
- [99] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1303/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie aspektu „Bezpieczeństwo w tunelach kolejowych” systemu kolei w Unii Europejskiej (OJ L 356, 12.12.2014, p. 394–420 z późn. zm.), TSI SRT.
- [100] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1304/2014 z dnia 26 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Tabor kolejowy — hałas”, zmieniające decyzję 2008/232/WE i uchylające decyzję 2011/229/UE (OJ L 356, 12.12.2014, p. 421–437 z późn. zm.), TSI NOI.
- [101] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 kwietnia 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań dla silników spalinowych w zakresie ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i cząstek stałych przez te silniki (Dz.U. 2014 poz. 588).
- [102] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 25 lutego 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei, (Dz. U. z 2016 r., poz. 254).
- [103] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 18 lipca 2005 r. w sprawie ogólnych warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji (Dz. U. Nr 172 poz.144).
- [104] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 27 grudnia 2012 r. w sprawie wykazu właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei (Dz. U. 2013 Nr 0 poz. 43).

- [105] Smolana A., Dyląg W., Koncepcja i realizacja modernizacji lokomotywy ST-44. *Technika Transportu Szynowego*, 9, 2005.
- [106] Tang N.W., Apte J.S., Martien P.T., Kirchstetter T.W., Measurement of black carbon emissions from in-use diesel-electric passenger locomotives in California. *Atmospheric Environment*, 115, 2015, 295-303.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.001>.
- [107] Technical Sales Document, Product Data, Product\_12V4000R84\_EN\_150225, MTU. Opracowanie wewnętrzne IPS.
- [108] Tułeczki A., Szkoda M., Ecology, energy efficiency and resource efficiency as the objectives of rail vehicles renewal. *Transportation Research Procedia*, 25, 2017, 386-406. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.416>.
- [109] Urząd Transportu Kolejowego, Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego w 2018 r., Warszawa 2019.
- [110] Urząd Transportu Kolejowego, Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego 2019, Warszawa 2020.
- [111] Urząd Transportu Kolejowego, Tabor kolejowy przewoźników towarowych – stan obecny i plany do 2023 r., Warszawa 2018.
- [112] Urząd Transportu Kolejowego, Wykaz pojazdów kolejowych zarejestrowanych w Polsce – aktualizacja. Wyciąg z NVR IX 2019.
- [113] Wisłocki K., Metodologia i redakcja prac naukowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
- [114] Wymagania, wytyczne oraz parametry głównych zespołów i urządzeń w modernizowanej platformie lokomotyw, OR-10723, IPS „TABOR”, Poznań 2015, Opracowanie wewnętrzne IPS.

Piotr Michalak

## **The method of selecting a motor-generator set for the modernization of diesel locomotives**

### **ABSTRACT**

A significant portion of freight transport in Poland, especially of shunting operations, is carried out by trains driven by diesel locomotives, which account for about 60% of the locomotives operated in the country as a whole. Diesel locomotives operated by domestic carriers are usually quite worn-out and dated vehicles, and their average age is over 37 years. Replacing outdated locomotives with modern ones is not justified in a short time perspective (of several years) and often impossible due to the high financial costs. Therefore, the alternatives that still exist are the various methods of deep modernization of the existing locomotives.

The most important objectives of the diesel locomotives modernization process, set by the future operator of these vehicles, include: increasing the power of the drive system, increasing the operational mileage between inspections and repairs, increasing the durability and reliability of the locomotive, improving the levels of comfort for the locomotive working staff and reducing its harmful impact on the natural environment.

From the objectives outlined, it was clearly necessary to develop a universal selection method of combustion engine and a traction generator to be used during as replacements in the modernization of diesel locomotives, regardless of their intended use.

The main aim of the performed work was to develop a method of selecting a motor-generator set for the modernization of diesel locomotives based on experience in the implemented projects of locomotives modernization as well as the analysis of existing methods.

The innovative method described in this paper is based on many years of modernization experience of diesel locomotives. The approach on the domestic market to date consisted of locomotives modernization by replacing the existing internal combustion engine with a modern engine unit in order to reduce the negative impact on the natural environment. It should also be emphasized that the technically outdated traction generator was often left unchanged. The method analyzed in the study allows for the precise selection of a modern motor-generator set with a traction generator individually configured for any modernized locomotive. The paper describes the effect of using the selection method for a motor generator set in the innovative modernization procedure of the SM48/TEM2 locomotive, which after modernization (type 19D) acquired some features of a new vehicle. The traction properties of the locomotive have been observed to improve as a result of having a new engine unit and the full use of the power of the traction motors. There was also a noticeable increase in the tractive force on the circumference of the driving wheels in the entire driving speed range, which was confirmed by traction tests of the locomotive after modernization.

As a result of using a modern internal combustion engine that meets the applicable engine exhaust emission requirements, the emission of harmful substances to the environment has been significantly reduced, which was confirmed by the results of the locomotive tests using a water resistor. The obtained test results showed that the developed method of a motor-generator set selection enables the modernization of a diesel locomotive to meet the latest normative and technical requirements.