

**ZESZYTY  
NAUKOWE  
POLITECHNIKI  
ŚLĄSKIEJ**

**EUGENIUSZ KAŁUŻA**

**HYBRYDOWE LOKOMOTYWY MANEWROWE  
W ŚWIETLE EFEKTYWNOŚCI EKSPLOATACYJNEJ**



05 455.1 / 90

**ELEKTRYKA**

**Z. 118  
GLIWICE  
1990**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1062



P. 3347 / 90

**HYBRYDOWE  
LOKOMOTYWY MANEWROWE  
W ŚWIETLE EFEKTYWNOŚCI  
EKSPLOATACYJNEJ**

GLIWICE

1990

## OPINIODAWCY

Doc. dr hab. inż. Stanisław Szpilka

Doc. dr inż. Jan Nasitowski

## KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY — Prof. dr hab. inż. Jan Węgrzyn

REDAKTOR DZIAŁU — Doc. dr inż. Zofia Cichowska

SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta Leško

## OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0072-4688

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej  
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 150+85 Ark. wyd. 5 Ark. druk. 6 Papier offset, kl. III 70x100, 70g  
Oddano do druku 4.01.90 Podpis. do druku 12.03.90 Druk ukończ. w kwietniu 1990  
Zam. 3/90 Cena zł 3.250,-

Skład, fotokopie, druk i oprawa  
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

PA21/90

## SPIS TREŚCI

	Str.
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	9
1. WPROWADZENIE .....	13
1.1. Informacje wstępne .....	13
1.2. Tezy pracy .....	14
1.3. Cel i zakres pracy .....	14
1.4. Przegląd rozwiązań i metod obliczeń pojazdów hybrydowych spalinowo-zasobnikowych .....	15
1.4.1. Przegląd rozwiązań pojazdów spalinowo-zasobnikowych .....	15
1.4.2. Przegląd metod obliczeń układów zasilania silników trakcyjnych pojazdów spalinowo-zasobnikowych .....	16
2. ANALIZA I BADANIA OBCIĘŻEŃ LOKOMOTYW MANEWROWYCH I PRZEMYSŁO- WYCH .....	17
2.1. Wprowadzenie .....	17
2.2. Moce jednostkowe lokomotyw spalinowych .....	19
2.3. Eksploatacyjne badania obciążeń lokomotyw spalinowych serii SM42 i SM31 .....	22
2.3.1. Pomiar obciążeń lokomotyw .....	22
2.3.2. Wyniki pomiarów obciążeń lokomotyw .....	25
2.3.3. Opracowanie wyników pomiarów obciążeń lokomotyw ...	27
2.4. Wnioski .....	37
3. PARAMETRY I CHARAKTERYSTYKI ŹRÓDEŁ ZASILANIA SILNIKÓW TRAKCYJ- NYCH LOKOMOTYW HYBRYDOWYCH .....	40
3.1. Wprowadzenie .....	40
3.2. Zasobnikowe elektrochemiczne źródła energii .....	41
3.2.1. Jednostkowe moce wyładowania i ładowania ogniw aku- mulatorowych .....	41
3.2.2. Jednostkowa pojemność energetyczna ogniw akumulato- rowych .....	42
3.2.3. Sprawność energetyczna ogniw akumulatorowych .....	42
3.2.4. Stopień wykorzystania energii znamionowej ogniw akumulatorowych .....	46
3.3. Zespoły prądotwórcze .....	47
3.3.1. Moce jednostkowe zespołów prądotwórczych .....	47

Str.

3.3.2. Charakterystyki zużycia paliwa w funkcji obciążenia pewnej klasy wysokoprężnych silników spalinowych .....	49
4. ZASADY WYRÓWNYWANIA OBCIĄŻEŃ SILNIKA SPALINOWEGO LOKOMOTYWY HYBRYDOWEJ .....	53
4.1. Wyznaczenie przedziałów mocy znamionowych silnika spalinowego oraz masy zasobnika energii .....	53
4.2. Energia ładowania zasobnika .....	58
4.3. Stopień wykorzystania energii znamionowej zasobnika ....	59
4.4. Zużycie paliwa przez lokomotywę hybrydową i spalinową ..	60
5. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI ROZWIĄZANIA UKŁADU ZASILANIA SILNIKÓW TRAKCYJNYCH LOKOMOTYWY HYBRYDOWEJ .....	63
5.1. Wprowadzenie .....	63
5.2. Wyznaczenie masy zasobnika energii zapewniającej minimalne zużycie paliwa przez silnik lokomotywy hybrydowej .....	63
5.3. Analiza przyrostu korzyści wynikających z wprowadzenia do eksploatacji lokomotyw hybrydowych .....	66
5.3.1. Wyznaczenie różnicy kosztów eksploatacji lokomotywy spalinowej i hybrydowej .....	66
5.3.2. Analiza przyrostu korzyści wynikających z zastąpienia lokomotywy spalinowej lokomotywą hybrydową .....	71
5.4. Wnioski .....	82
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE .....	84
LITERATURA .....	86
STRESZCZENIA .....	90

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ПЕРЕЧЕНЬ ВАЖНЕЙШИХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	9
1. ВВЕДЕНИЕ .....	13
1.1. Вступительные информации .....	13
1.2. Тезисы работы .....	14
1.3. Цель и объём работы .....	14
1.4. Обзор решений и методов расчёта дизель-аккумуляторных гибридных средств транспорта .....	15
1.4.1. Обзор решений дизель-аккумуляторных средств транспорта .....	15
1.4.2. Обзор методов расчёта систем питания тяговых двигателей дизель-аккумуляторных средств транспорта .....	16
2. АНАЛИЗ И ИСПЫТАНИЕ НАГРУЗОК МАНЕВРОВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЛОКОМОТИВОВ .....	17
2.1. Введение .....	17
2.2. Удельные мощности тепловозов .....	19
2.3. Эксплуатационные испытания нагрузок дизель-локомотивов серии SM41 и SM31 .....	22
2.3.1. Измерения нагрузок локомотивов .....	22
2.3.2. Результаты измерений нагрузок локомотивов .....	25
2.3.3. Разработка результатов измерений нагрузок локомотивов .....	27
2.4. Выводы .....	37
3. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ГИБРИДНЫХ ЛОКОМОТИВОВ .....	40
3.1. Введение .....	40
3.2. Аккумуляторные электрохимические источники энергии .....	41
3.2.1. Удельные мощности разряда и зарядки аккумуляторных элементов .....	41
3.2.2. Удельная энергетическая ёмкость аккумуляторных элементов .....	42
3.2.3. Энергетическая надёжность аккумуляторных элементов .....	42
3.2.4. Степень использования номинальной энергии аккумуляторных элементов .....	46
3.3. Генераторные агрегаты .....	47
3.3.1. Удельные мощности генераторных агрегатов .....	47

Стр.

3.3.2. Характеристика расхода топлива в функции нагрузки определённого класса дизельных двигателей внутреннего сгорания .....	49
4. ПРИНЦИПЫ ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗОК ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ГИБРИДНОГО ЛОКОМОТИВА .....	53
4.1. Определение интервалов номинальных мощностей двигателей внутреннего сгорания и массы источника энергии .....	53
4.2. Энергия разрядки источника .....	58
4.3. Степень использования номинальной энергии источника .....	59
4.4. Расход топлива гибридным локомотивом и тепловозом .....	60
5. АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ГИБРИДНОГО ЛОКОМОТИВА .....	63
5.1. Введение .....	63
5.2. Определение массы источника энергии обеспечивающей минимальный расход топлива двигателем гибридного локомотива .....	63
5.3. Анализ прироста выгод вытекающих с введения в эксплуатацию гибридных локомотивов .....	66
5.3.1. Определения разницы расходов на эксплуатацию тепловозов и гибридных локомотивов .....	66
5.3.2. Анализ увеличения выгод вытекающих замещением тепловоза гибридным локомотивом .....	71
5.4. Заключение .....	82
6. ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ И КОНЕЧНЫЕ ВЫВОДЫ .....	86
ЛИТЕРАТУРА .....	90

CONTENTS

Page

1. INTRODUCTION .....	13
1.1. Introductory data .....	13
1.2. The research thesis .....	14
1.3. The aim and scope of the research .....	14
1.4. A review of solutions and calculation methods of hybrid accumulator diesel engine carriages .....	15
1.4.1. A review of solutions of accumulator diesel engine carriages .....	15
1.4.2. A review of computing methods of supply systems of traction accumulator diesel engine carriages ..	16
2. ANALYSIS AND TESTING OF SHUNTING AND FACTORY LOCOMOTIVES LOAD .....	17
2.1. Introduction .....	17
2.2. Unit power of diesel locomotive .....	19
2.3. Exploitational testing of SM42 and SM31 diesel locomotives load .....	22
2.3.1. Measurements of locomotives' load .....	22
2.3.2. The measurements results of locomotives' load ....	25
2.3.3. Working out the results of locomotives' load .....	27
2.4. Conclusions .....	37
3. PARAMETERS AND CHARACTERISTIC CURVES OF THE SUPPLY SOURCES OF HYBRID TRACTION LOCOMOTIVES' ENGINES .....	40
3.1. Introduction .....	40
3.2. Accumulator electrochemical energy sources .....	41
3.2.1. Unit power of unloading and loading of secondary cells .....	41
3.2.2. Unit watt-hour capacity of secondary cells .....	42
3.2.3. Efficiency of a energy of secondary cells .....	42
3.2.4. Rated power utilization percentage of secondary cells .....	46
3.3. Diesel generators .....	47
3.3.1. Unit power of current generating units .....	47
3.3.2. Characteristic curves of fuel consumption in load function diesel engine of a certain class .....	49

Page

4. PRINCIPLES OF LOAD ADJUSTMENT OF HYBRID LOCOMOTIVE DIESEL ENGINE ..... 53

4.1. Determining rated power interval of diesel engine and energy accumulator mass ..... 53

4.2. Loading energy of energy accumulator ..... 58

4.3. Rated power utilization of energy accumulator ..... 59

4.4. Fuel consumption in hybrid and diesel locomotive ..... 60

5. AN ANALYSIS OF SUPPLY EFFECTIVENESS IN ENGINES OF TRACTION HYBRID LOCOMOTIVE ..... 63

5.1. Introduction ..... 63

5.2. Determining the mass of energy accumulator in hybrid locomotive engine with low fuel consumption ..... 63

5.3. An analysis of advantages in using hybrid locomotives ... 66

5.3.1. Determining the exploitation costs difference in diesel and hybrid locomotive ..... 66

5.3.2. An analysis of advantages in using hybrid in place of diesel locomotives ..... 71

5.4. Conclusions ..... 82

6. SUMMING UP THE RESEARCH AND FINAL CONCLUSIONS ..... 84

LITERATURE ..... 86

SUMMARY ..... 90

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- $A_z$  - energia ładowania zasobnika energii - równania (4.18), (4.19)
- $a_{DGI}, b_{DGI}$  - współczynniki określające cenę zespołu prądotwórczego - równanie (5.13)
- $a_{DGm}, b_{DGm}$  - współczynniki określające koszt napraw zespołu prądotwórczego - równanie (5.17)
- $a_{en}, b_{en}$  - składowe określające współczynnik  $k_{enz}$
- $a_g, b_g$  - współczynniki określające składową zużycia paliwa  $G_1$  - równanie (4.32)
- $a_q, b_q$  - współczynniki określające stopień wykorzystania energii znamionowej ogniw  $k_q$  - równanie (3.10)
- $a_z, b_z$  - składowe określające współczynnik  $k_{pz}$  - równanie (4.10)
- $c$  - współczynnik równania (2.12) aproksymującego przebieg obciążenia silnika spalinowego
- $c_{jpal}$  - cena jednostkowa paliwa
- $c_{jz}$  - cena jednostkowa zasobnika energii
- $d$  - współczynnik równania (3.15) określającego zużycie paliwa
- $e$  - współczynnik równania (3.16) określającego zużycie paliwa
- $f$  - współczynnik równania (3.17) określającego zużycie paliwa
- $f_{ad}$  - współczynnik przyczepności
- $F_{ad}$  - siła przyczepności lokomotywy
- $F_{max}$  - siła maksymalna odniesiona do obwodu kół lokomotywy
- $F_c$  - siła ciągną odniesiona do obwodu kół lokomotywy
- $G_f$  - współczynnik równania (3.17) określającego zużycie paliwa
- $G_o$  - współczynnik równania (3.15) określającego zużycie paliwa
- $G_{LD}$  - zużycie paliwa przez lokomotywę spalinową w 30-min przedziale pracy
- $G_{LDr}$  - zużycie paliwa przez lokomotywę spalinową w ciągu roku
- $G_{LH}$  - zużycie paliwa przez lokomotywę hybrydową w 30-min przedziale pracy

$G_{LHR}$	- zużycie paliwa przez lokomotywę hybrydową w ciągu roku
$\Delta G_r$	- różnica w zużyciu paliwa pomiędzy lokomotywą spalinową i hybrydową w ciągu roku - równanie (5.36)
$\Delta G_{rp}$	- przyrost korzyści wyrażony w postaci ilości uzyskanego paliwa - równanie (5.38)
$I_w$	- prąd wyładowania ogniów
$i_w, i$	- względna wartość prądu wyładowania, ładowania ogniów - równanie (3.2)
$\Delta K$	- przyrost korzyści wyrażony w jednostkach pieniężnych - równanie (5.29)
$K_o-K_4$	- współczynniki funkcji przyrostu korzyści wyrażonej w jednostkach pieniężnych - równania (5.30)-(5.35)
$K_{op}-K_{4p}$	- współczynniki funkcji przyrostu korzyści wyrażonej w jednostkach towarowych (paliwie) - równanie (5.39)
$k_{enz}$	- współczynniki krotności energii ładowania do energii wyładowania - równanie (3.8)
$k_{pz}$	- współczynnik uwzględniający wzrost zapotrzebowanej mocy lokomotywy hybrydowej - równanie (4.8)
$k_q$	- stopień wykorzystania energii znamionowej ogniwa, z którego wyładowano jednostkę energii
$K_q$	- stopień wykorzystania energii znamionowej ogniów włączonych do układu zasilania silników trakcyjnych lokomotywy hybrydowej (dla 30-min przedziału pracy)
$k_{ol}$	- współczynnik uwzględniający koszt zużywanego oleju silnikowego - równanie (5.18)
$K_{LD}$	- całkowity roczny koszt eksploatacji lokomotywy spalinowej
$K_{LH}$	- całkowity roczny koszt eksploatacji lokomotywy hybrydowej
$K_{dzam}, K_{dzrem}$	- koszt amortyzacji i napraw urządzeń dodatkowych zasobnika energii
$m_{DG}$	- masa zespołu prądotwórczego (diesel - generatora)
$m_L$	- masa lokomotywy
$m_w$	- masa wagonów
$m_t$	- masa tendra
$m_z$	- masa zasobnika energii

$n$	- liczność próby
$P_{wz}$	- moc wyładowania zasobnika
$P_{wz}$	- jednostkowa moc wyładowania zasobnika
$P_{Dn}, P_{DnH}$	- moc znamionowa silnika wysokoprężnego lokomotywy spalinowej, hybrydowej
$q_{en}$	- jednostkowa pojemność energetyczna ogniów
$s$	- odchylenie standardowe z próby
$t_{i-n}$	- łączny czas pracy lokomotywy na pozycji od 1 do n na uporządkowanym uśrednionym przebiegu obciążenia (rys. 2.6-2.9)
$t$	- wartość krytyczna rozkładu t-Studenta
$v_c$	- prędkość ciągnia lokomotywy
$\eta_G$	- sprawność prądnicy głównej
$\eta_{pw}$	- sprawność przekształtnika włączonego na wyjściu z zasobnika energii
$\mu_g$	- górny koniec przedziału ufności wartości oczekiwanej.

## 1. WPROWADZENIE

### 1.1. Informacje wstępne

Tematyka pracy obejmuje zagadnienia budowy i eksploatacji hybrydowych lokomotyw manewrowych przeznaczonych do pracy na niezelektryfikowanych torach stacji rozrządowych PKP oraz na torach stacji zakładowych. Powszechnie stosowane spalinowe lokomotywy manewrowe i przemysłowe zaliczane są do autonomicznych szynowych pojazdów trakcyjnych.

W obecnej dobie występuje szereg czynników, które powinny stymulować poszukiwanie nowych rozwiązań pojazdów trakcyjnych.

Czynnikami tymi są:

- a) ciągły wzrost cen paliw płynnych,
- b) szkodliwe oddziaływanie pojazdów spalinowych na środowisko w pobliżu stacji i szlaków komunikacyjnych,
- c) uciążliwe oddziaływanie pracujących silników spalinowych na obsługę lokomotyw oraz na obsługę pociągów roboczych pracujących w zamkniętych przestrzeniach.

Biorąc pod uwagę powyższe czynniki oraz uwzględniając ciągły postęp w budowie zasobnikowych źródeł energii i przekształtników energii można przyjąć, że jednym z możliwych nowych rozwiązań pojazdów trakcyjnych są pojazdy hybrydowe. Pojazdy hybrydowe są to pojazdy trakcyjne czerpiące energię z co najmniej dwóch źródeł energii. Pojazdy hybrydowe można podzielić na pojazdy autonomiczne, nie związane z zewnętrznym źródłem zasilania i pojazdy nieautonomiczne związane z zewnętrznym źródłem zasilania poprzez sieć trakcyjną. Autonomiczne pojazdy hybrydowe wyposażone są w zasadnicze źródło energii - silnik spalinowy oraz zasobnik energii. Zasobnik ten wspomaga silnik spalinowy w momentach szczytowego obciążenia pojazdu trakcyjnego, a uzupełniany jest w energię w czasie pracy silnika spalinowego z małą mocą lub w czasie hamowania pojazdu.

Jako zasobniki energii stosuje się najczęściej zasobnikowe elektrochemiczne źródła energii elektrycznej, czyli baterie akumulatorów lub zasobnikowe mechaniczne źródła energii jak np. zespoły żyroskopowe. Pojazdy hybrydowe nieautonomiczne wyposażone są w silniki trakcyjne, zasilane z sieci trakcyjnej w czasie pracy na trasach zelektryfikowanych lub z dodatkowego źródła energii, którym może być zasobnik energii lub silnik spalinowy z prądnicą. Energia zasobnika może być uzupełniana w czasie jazdy pod siecią trakcyjną oraz w czasie hamowania.



W niniejszej pracy jest analizowana efektywność zastąpienia części manewrowych i przemysłowych lokomotyw spalinowych lokomotywami hybrydowymi spalinowo-zasobnikowymi. Zapotrzebowanie na tego typu lokomotywy w Polsce szacuje się na około 1500 szt.

## 1.2. Tezy pracy

Efektywność ekonomiczna hybrydowej lokomotywy spalinowo-zasobnikowej jest wyższa od efektywności porównywalnej lokomotywy spalinowej w pracach manewrowych charakteryzujących się niskim wykorzystaniem mocy silnika spalinowego. Wprowadzenie do układu zasilania silników trakcyjnych lokomotywy spalinowo-elektrycznej zasobnika energii, celem wyrównywania obciążeń silnika spalinowego, umożliwia ograniczenie mocy znamionowej silnika spalinowego.

Rozwiązanie takie prowadzi do obniżenia zużycia paliwa oraz kosztów eksploatacji lokomotywy.

Efektywność lokomotywy hybrydowej determinowana jest:

- charakterystyką obciążenia lokomotywy,
- charakterystykami energetycznymi źródeł zasilania silników trakcyjnych,
- poziomem kosztów eksploatacji i amortyzacji zespołów prądowców oraz zasobników energii.

## 1.3. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest wykazanie słuszności tezy (pkt. 1.2) o wyższej efektywności ekonomicznej hybrydowych lokomotyw manewrowych spalinowo-zasobnikowych od dotychczas eksploatowanych lokomotyw spalinowych w określonych rejonach pracy manewrowej oraz opracowanie metody optymalnego doboru układu zasilania silników trakcyjnych lokomotyw hybrydowych.

W ramach niniejszej pracy wykonano analizę i badania eksploatacyjne obciążeń silników lokomotyw spalinowych (rozd. 2) pracujących na wybranych stacjach rozrządowych, na stacji osobowej PKP oraz na stacjach i bocznicach zakładów przemysłowych. Wyniki badań obciążeń przedstawiono w postaci uporządkowanych i uśrednionych przebiegów obciążeń spalinowych lokomotyw realizujących pracę miejscową na stacjach rozrządowych, na stacji osobowej i zakładowej, pracę manewrową w rejonie górki rozrządowej i pracę manewrową na torze wyciągowym płaskim. Wyszczególnione wyżej przebiegi wyznaczono dla obciążeń pomierzonych, z uwzględnieniem wszystkich przerw w pracy lokomotyw oraz dla górnego końca przedziału ufności wartości oczekiwanych obciążeń. Dalej wyznaczono (rozd. 3) parametry i charakterystyki wybranych źródeł zasilania silników trakcyjnych lokomotyw hybrydowych:

trakcyjnych ogniw akumulatorowych kwasowych i zasadowych produkcji krajowej oraz zespołów prądowców. Charakterystyki energetyczne ogniw akumulatorowych wyznaczone w funkcji jednostkowej mocy wyładowania umożliwiły wyprowadzenie zależności (rozd. 4) na obliczanie energii ładowania ogniw oraz stopnia wykorzystania ich energii znamionowej w układzie zasilania silników trakcyjnych lokomotywy hybrydowej. W cytowanym rozdziale wykazano w jakim stopniu powyższe parametry zależą od charakteru obciążenia lokomotywy, mocy znamionowej silnika spalinowego i charakterystyk energetycznych zasobników energii, czyli ogniw akumulatorowych. W ramach analizy efektywności rozwiązania układu zasilania silników trakcyjnych lokomotywy (rozd. 5) wyznaczono m.in. funkcję przyrostu korzyści wynikających z wprowadzenia do eksploatacji lokomotyw hybrydowych, spalinowo-zasobnikowych w miejsce lokomotyw spalinowych.

Spośród możliwych do zastosowania w lokomotywach hybrydowych zasobników energii, przedstawioną w rozdz. 3 analizę parametrów energetycznych ograniczono do zasobników złożonych z ogniw akumulatorowych, pomijając stosowane w szeregu rozwiązaniach eksperymentalnych pojazdów hybrydowych zasobniki mechaniczne złożone z bezwładnika połączonego z maszyną elektryczną. W pracy [72] wykazano, że zasobniki takie w wykonaniu krajowym będą cechowały się niskimi wartościami jednostkowej pojemności i sprawności energetycznej w porównaniu z ogniwami akumulatorowymi.

## 1.4. Przegląd rozwiązań i metod obliczeń pojazdów hybrydowych spalinowo-zasobnikowych

### 1.4.1. Przegląd rozwiązań pojazdów spalinowo-zasobnikowych

a) Większość przykładów eksperymentalnych rozwiązań pojazdów hybrydowych spalinowo-zasobnikowych cytowanych w pracy [28] dotyczy samochodów osobowych lub dostawczych opracowanych w USA. Pierwszym rozwiązaniem pojazdu hybrydowego [9, 28] zrealizowanym na szerszą skalę było wyprodukowanie przez firmę Daimler - Benz 20 autobusów spalinowo-zasobnikowych przeznaczonych do obsługi linii komunikacyjnych Stuttgartu i Wesel w RFN. Autobus ten wyposażono w:

- zespół prądowców złożony z silnika wysokoprężnego (Diesla) o mocy 74 kW i prądnicy prądu stałego,
- zasobnik energii złożony z kwasowych ogniw akumulatorowych o łącznej masie 3500 kg, pojemności 230 Ah i napięciu 360 V,
- silnik trakcyjny prądu stałego o mocy ciągłej 115 kW.

Masa autobusu wynosi 18800 kg, pojemność - 83 pasażerów.

W centrum miasta elektryczny silnik trakcyjny zasilany jest z baterii akumulatorów, natomiast na terenach podmiejskich z prądnicy napędzanej silnikiem Diesla pracującym ze stałą mocą i optymalną sprawnością, co

jednocześnie ma zapewnić maksymalne ograniczenie wydzielanych do atmosfery toksycznych składników spalin.

Doładowanie baterii akumulatorów realizowane jest:

- w czasie hamowania i jazdy na spadkach, poprzez elektryczny silnik trakcyjny,
- w czasie jazdy poza centrum miasta z silnikiem spalinowym pracującym ze stałą mocą,
- w czasie nocnych postojów na terenie zajezdni.

Badania eksploatacyjne wykazały, że ok. 50% energii pobieranej z baterii w czasie rozruchu autobusu uzupełniane jest w czasie hamowania oraz jazdy na spadkach.

b) Do przykładów rozwiązań projektowanych pojazdów szynowych spalinowo-zasobnikowych włączyć można lokomotywę opisaną w pracy [3] wyposażoną w 4 silniki trakcyjne prądu stałego, zespół prądotwórczy oraz baterię akumulatorów. Lokomotywa ta wyposażona została dodatkowo w niezbędną aparaturę oraz pantograf umożliwiający zasilanie silników z sieci trakcyjnej. W pracy [3] przedstawione zostały także schematy ideowe obwodów głównych lokomotyw spalinowo-zasobnikowych, w których jako zasobniki energii zastosowano baterie akumulatorów oraz zespoły żyroskopowe, bez wyszczególnienia danych znamionowych ww. urządzeń lokomotywy.

#### 1.4.2. Przegląd metod obliczeń układów zasilania silników trakcyjnych pojazdów spalinowo-zasobnikowych

Zagadnienia doboru pojemności znamionowej i liczby ogniw określonego elektrochemicznego zasobnika energii, literatura przedmiotu [8, 15, 17, 25, 28] ogranicza do sprawdzenia, czy dobrany zasobnik zapewni możliwość osiągnięcia założonych parametrów pracy pojazdu.

Dobór pojemności znamionowej i liczby ogniw baterii równoznacznej dla określonego typu ogniw z napięciem znamionowym baterii zastępuje się w szeregu zależnościach masą baterii lub stosunkiem masy baterii do masy pojazdu trakcyjnego. W ramach obliczeń trakcyjnych przeprowadzonych dla pracy pojazdu zasilanego wyłącznie z baterii akumulatorów sprawdza się takie parametry pracy pojazdu jak przyspieszenie rozruchu, prędkość maksymalną oraz zasięg. W analizie zagadnień energetycznych oraz efektywności ekonomicznej przyjmuje się bardzo przybliżone wartości sprawności energetycznej oraz trwałości baterii akumulatorów, nie wiążąc tych wartości z przebiegiem obciążenia baterii.

## 2. ANALIZA I BADANIA OBCIĄŻEŃ LOKOMOTYW MANEWROWYCH I PRZEMYSŁOWYCH

### 2.1. Wprowadzenie

Praca manewrowa lokomotyw na stacjach rozrządowych PKP oraz na torach zakładów przemysłowych składa się z dużej liczby kolejno wykonywanych ruchów manewrowych (półkursów manewrowych).

Na półkursy manewrowe wykonywane na jednej grupie torów składają się: rozruch i hamowanie (RH) lub rozruch i jazda pod wpływem siły bezwładności, czyli wybieg (RB), lub rozruch, wybieg i hamowanie (RBH) [6]. Jeżeli półkurs manewrowy wykonywany jest na znacznej odległości oraz podczas manewrów między różnymi grupami torów, to na ww. składowe nakłada się jeszcze jazda z prędkością ustaloną (U).

Otrzymamy wtedy półkurs złożony: z rozruchu, jazdy ustalonej i hamowania (RUH), lub (RUBH) lub (RUB).

Przebiegi ww. typów ruchów manewrowych przedstawiono na rys. 2.1. W czasie wykonywania rozruchu lub hamowania siły na obwodzie kół napędowych lokomotywy oraz opory ruchu zmieniają się w pewnych przedziałach w funkcji narastania prędkości, wobec czego rzeczywiste przebiegi  $v(t)$  wykazują zaokrąglenia (rys. 2.2).

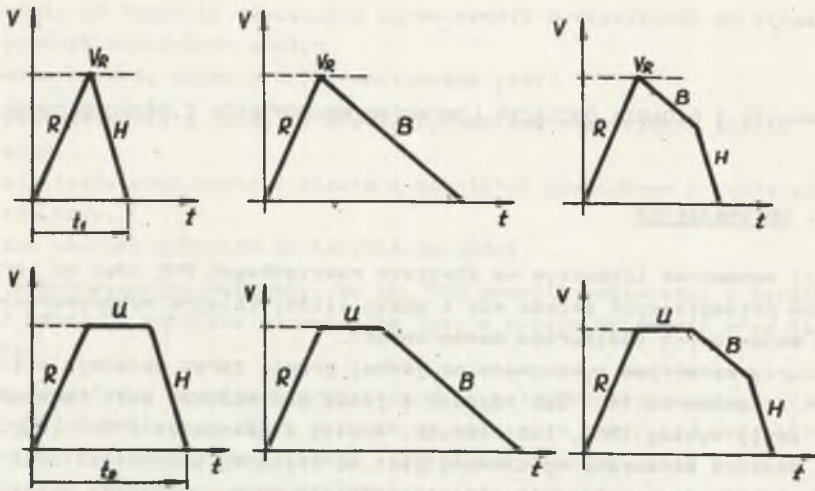
Czasy trwania ruchów manewrowych mieszczą się najczęściej w granicach od kilkunastu sekund do kilku minut.

Pomiędzy kolejnymi ruchami występują przerwy - postoje lokomotywy o czasie zmieniającym się w bardzo szerokich granicach; od kilku sekund do kilkudziesięciu minut, z silnikiem pracującym na biegu jałowym.

W czasie kolejnych rozruchów moc silnika spalinowego zmienia się od mocy  $P_0$  pobieranej przez urządzenia pomocnicze lokomotywy do mocy końcowej rozruchu  $P_R$ . Moc  $P_R$  zmienia się w zależności od końcowej prędkości rozruchu i wymaganej siły rozruchowej w całym przedziale mocy rozwijanej przez silnik spalinowy lokomotywy.

$$P_0 < P_R \leq P_{Dn} \quad (2.1)$$

W czasie jazdy z prędkością ustaloną silnik spalinowy lokomotywy pracuje z mocą  $P_U < P_R$  lub z mocami zmieniającymi się w przedziale obciążenia od  $P_0$  do  $P_R$ . Dla optymalnie dobranej lokomotywy do pracy w określonym rejonie manewrowym moc znamionowa  $P_{Dn}$  silnika spalinowego powinna być zbliżona do maksymalnej wartości mocy rozruchowej  $P_{max}$ .

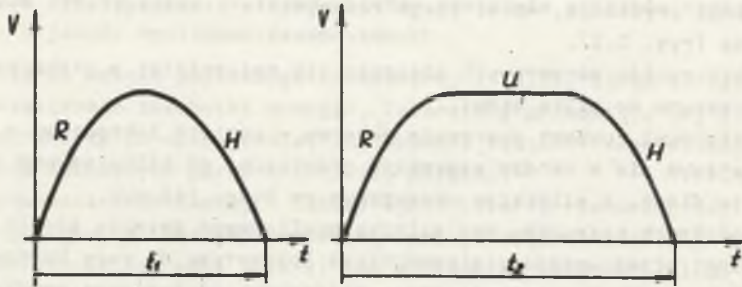


Rys. 2.1. Typowe przebiegi ruchów manewrowych

R - rozruch, U - jazda z prędkością ustaloną, H - hamowanie, B - wybieg

Fig. 2.1. Typical courses of shunting

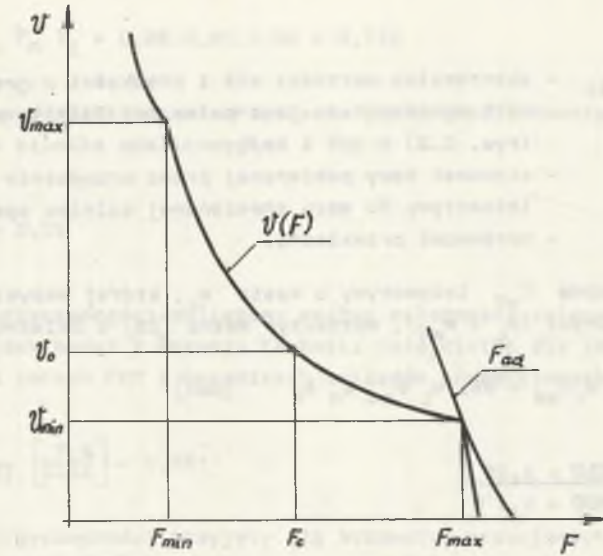
R - starting, U - running at a fixed speed, H - braking, B - coasting



Rys. 2.2. Przebiegi rzeczywiste ruchów manewrowych

Fig. 2.2. Real course of shunting motion

Współczynnikiem wiążącym parametry trakcyjne lokomotywy jest jej moc jednostkowa wyrażona jako stosunek mocy znamionowej silnika spalinowego  $P_{Dn}$  do masy służbowej lokomotywy  $m_L$ . Na podstawie mocy jednostkowej, masy oraz prędkości maksymalnej lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną można wyznaczyć przybliżony przebieg jej charakterystyki trakcyjnej (rys. 2.3). Analiza porównawcza mocy jednostkowych eksploatowanych lokomotyw manewrowych z wynikami obliczeń mocy jednostkowych oraz wyni-



Rys. 2.3. Charakterystyka trakcyjna lokomotywy spalinowo-elektrycznej  
Fig. 2.3. Traction characteristic of diesel-electrical supply locomotive

kami badań obciążeń przedstawionych w niniejszym rozdziale pozwoli ukierunkować poszukiwanie nowych rozwiązań lokomotyw manewrowych i przemysłowych.

## 2.2. Moce jednostkowe lokomotyw spalinowych

Prawidłowo zaprojektowana lokomotywa manewrowa lub przemysłowa [27] powinna umożliwiać wykorzystanie pełnej mocy silnika spalinowego przy osiągnięciu końcowej prędkości rozruchu  $v_R$ , rozwijając siłę na obwodzie kół napędnych równą sile przyczepności  $F_{ad}$ . Dla  $F_{max} = F_{ad}$  i  $v_{min} = v_R$  moc na obwodzie kół napędnych będzie równa:

$$P_k = \frac{F_{max} v_{min}}{360} = \frac{F_{ad} v_R}{360} \quad [kw] \quad (2.2)$$

zaś moc silnika spalinowego

$$P_D = P_{max} = \frac{P_k}{(1-\beta_p) \eta_{przek}} \quad [kw] \quad (2.3)$$

gdzie:

- $F_{max}, F_{min}$  - ekstremalne wartości sił i prędkości w granicach, których wykorzystana jest pełna moc silnika spalinowego (rys. 2.2) w daN i km/h,  
 $\beta_p$  - stosunek mocy pobieranej przez urządzenia pomocnicze lokomotywy do mocy znamionowej silnika spalinowego,  
 $\eta_{przek}$  - sprawność przekładni.

Siłę przyczepną  $F_{ad}$  lokomotywy o masie  $m_L$ , której wszystkie osie są osiami napędzonymi ( $m_L = m_{ad}$ ), wyznaczyć można [26] z zależności:

$$F_{ad} = m_L f_{ad} = 981 m_L \varphi_{ad} k_n k_R \quad [\text{daN}] \quad (2.4)$$

$$k_R = \frac{250 + 1,55 R}{500 + 1,1 R} \quad (2.5)$$

gdzie:

- $\varphi_{ad}$  - współczynnik przyczepności lokomotywy z szynami na prostym poziomym odcinku toru przy grupowym napędzie osi zestawów kołowych ( $k_n = 1$ ) w N/N,  
 $f_{ad}$  - współczynnik przyczepności lokomotywy z uwzględnieniem poprawek  $k_R$  i  $k_n$  w daN/t,  
 $k_n$  - poprawka uwzględniająca zmniejszenie współczynnika przyczepności w zależności od rozwiązania układu napędowego lokomotywy [26]  
 $k_n = 1 - 0,7$   
 $k_R$  - poprawka uwzględniająca zmniejszenie współczynnika przyczepności na łuku o promieniu  $R < 500$  m.

Podstawiając równanie (2.2) i (2.4) do (2.3), oraz dzieląc obie strony równania przez masę lokomotywy otrzymamy zależność wyznaczającą moc jednostkową lokomotywy w funkcji prędkości minimalnej, przy której można wykorzystać moc znamionową silnika spalinowego:

$$P_L = \frac{P_D}{m_L} = \frac{981 \varphi_{ad} k_n k_R v_{min}}{360(1-\beta_p) \eta_{przek}} \quad \left[ \frac{\text{kW}}{\text{t}} \right] \quad (2.6)$$

W zależności (2.6) można przyjąć dla lokomotyw spalinowo-elektrycznych:

- współczynnik sprawności przekładni elektrycznej lokomotywy o mocy znamionowej nie przekraczającej kilkuset kW, pracującej przy prądzie maksymalnym, równy iloczynowi sprawności prądnicy głównej  $\eta_G$ , silników trakcyjnych  $\eta_M$  i przekładni zębatej  $\eta_Z$  łączącej wał silnika trakcyjnego z osią zestawu kołowego

$$\eta_{przek} = \eta_G \eta_M \eta_Z = 0,88 \cdot 0,85 \cdot 0,96 = 0,718 \quad (2.7)$$

- stosunek mocy pobieranej przez urządzenia pomocnicze lokomotywy do mocy znamionowej silnika spalinowego

$$\beta_p = \frac{P_p}{P_{Dn}} = 0,11 \quad (2.8)$$

- współczynnik przyczepności obliczony według zależności zalecanej przez Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa dla lokomotyw pracujących na torach PKP i bocznicach zakładów przemysłowych:

$$\varphi_{ad} = \frac{\varphi_0}{0,331} \left[ \frac{7,5}{v+44} \right] + 0,161 \quad (2.9)$$

- współczynnik przyczepności przyjęty dla lokomotyw pracujących na torach zakładów hutniczych [26]

$$f_{ad} = 981 \varphi_{ad} k_n k_R = 147 \text{ daN/t} \quad (2.10)$$

- poprawkę  $k_n$  dla lokomotyw o układzie osi  $B_0B_0$   $k_n = 0,9$ .

Z zależności (2.6) wynika jednoznacznie, że czynnikami decydującymi o mocy jednostkowej lokomotyw manewrowych i przemysłowych są: prędkość  $v_{min}$  (rys. 2.3) oraz współczynnik przyczepności lokomotywy  $f_{ad}$  (2.4).

Dla lokomotyw manewrowych uniwersalnych przewidzianych do prac na torze wyciągowym płaskim dopuszczalne prędkości jazdy wynoszą:

$$v_{max \text{ od}} = (10-15) \text{ km/h} \quad (\text{odrzucanie})$$

$$v_{max \text{ p}} = 25 \text{ km/h} \quad (\text{przestawienie}).$$

Dla zachowania wymaganej dynamiki ruchu zespołu manewrowego należy przyjąć, że prędkość ciąгла lokomotywy  $v_c$  powinna być równa prędkości odzucania lub połowie prędkości maksymalnej przy przestawianiu składu wagonów. Korzystając z zależności (2.2) dla pracy lokomotywy z pełną mocą:

$$F_{max} v_{min} \cong F_c v_c \quad (2.11)$$

oraz przyjmując [15], że  $F_{max}/F_c = 1,6$ ; otrzymano dla  $v_c = 12,5$  km/h prędkość minimalną  $v_{min} = 7,8$  km/h.

Wyniki obliczeń mocy jednostkowych oraz ich odwrotności dla trzech różnych przykładów zastosowań lokomotyw zestawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1

Przykłady obliczeń mocy jednostkowych lokomotyw manewrowych

Lp.	Rodzaj lokomotywy	$v_{min}$ km/h	$k_n$	$k_R$	$\varphi_{ad}$ N/N	$f_{ad}$ daN/t	$P_L$ kW/t	$1/P_L$ kg/kW	$P_{Dn}^x$ kW
1	Uniwersalna lokomotywa manewrowa	7,8	0,88	1	0,292	253	8,8	114	651
2	Lokomotywa manewrowa przeznaczona do pracy w rejonie górki rozrządowej	5	0,88	0,82	0,3	212	4,6	217	340
3	Lokomotywa przemysłowa przeznaczona do pracy na torach zakładów hutniczych	5	-	-	-	147	3,2	313	237

$P_{Dn}^x$  - moc znamionowa silnika spalinowego lokomotywy o masie 74 ton

Większość produkowanych i eksploatowanych lokomotyw manewrowych i przemysłowych ma cechy lokomotyw manewrowych uniwersalnych, dysponujących wysoką mocą jednostkową oraz wysoką prędkością maksymalną. Parametry trakcyjne oraz moce jednostkowe wybranych typów lokomotyw manewrowych i przemysłowych przedstawiono w tabeli 2.2.

### 2.3. Eksploatacyjne badania obciążeń lokomotyw spalinowych serii SM42 i SM31

#### 2.3.1. Pomiary obciążeń lokomotyw

W celu uzyskania danych dotyczących przebiegów obciążeń lokomotyw manewrowych i przemysłowych przeprowadzono badania eksploatacyjne lokomotyw serii SM42 i SM31 pracujących na wybranych dużych stacjach rozrządowych PKP, na stacji osobowej, oraz na stacjach zakładowych. Do badań obciążeń lokomotyw manewrowych wybrano lokomotywy spalinowe serii SM42 i SM31 stanowiących około 80% wszystkich lokomotyw manewrowych pracujących na stacjach PKP oraz ok. 40% lokomotyw na stacjach zakładowych, obsługujące tereny przemysłowe.

Badania obciążeń lokomotyw wykonywano w czasie:

- pracy lokomotywy na górcie rozrządowej,
- pracy manewrowej na torze wyciągowym płaskim polegającej na przestawianiu składów wagonów i odrzucaniu,
- wykonywania przez lokomotywę pracy miejscowej, jak obsługa bocznic i punktów ładunkowych oraz pracy na stacji osobowej PKP,

Tabela 2.2

Zestawienie parametrów znamionowych i mocy jednostkowych wybranych lokomotyw manewrowych

Lp.	Rodzaj lokomotywy	Seria typ	Producent	Przekład.	$P_D$ kW	$m_L$ t	Układ osi	$v_{max}$ km/h	$v_c$ km/h	$P_L$ kW/t
1	manewrowa uniwers.	SM42	Fablok	elektr.	589	74,0	B' B'	90	12,5	7,96
2	"	SM31	"	"	883	120	C' C'	80	12,8	7,36
3	manewrowa uniwers.	T458 1,5	ČKD	"	552	74	B' B'	80	11,8	7,46
4	"	T669 0,1	ČKD	"	994	114	C' C'	90	12,5	8,72
5	przemysłowa manewrowa uniwers.	T419.0	ČKD	"	600	84	B' B'	40/(80)	12,8	7,14
6	manewrowa uniwers.	T457.0	ČKD	"	600	63,5	B' B'	80	15	9,45
7	przemysł.-hutnicza		RFN	hydrodyn.	265	80	B' B'			3,3
8	przemysł.-hutnicza	Van-guard	RFN	"	2x 260	76,4	C	24		6,80
9	przemysłowa	CEM-FG		elektr.	335	46	B			7,28
10	"	"	Francja	"	232	56	B' B'			4,14
11	manewr.-przemysł.		Alsthom Francja	"	442	72	B' B'	50	7,8	6,14
12	manewr.-	T3M1	ZSRR	"	736	120	C' C'			6,13

Tabela 2.3

Parametry techniczne lokomotyw spalinowych SM42 i SM31

Lokomotywa serii	SM42		SM31	
Układ osi	B' <sub>0</sub>	B' <sub>0</sub>	C' <sub>0</sub>	C' <sub>0</sub>
Masa lokomotywy	74 tony		120 ton	
Moc znamionowa silnika spalinowego	589 kW		883 kW	
Pozycja nast. jazdy	stopień regulacji	$n_D$	$P_D$	$P_D$
0	I	496	35	41
1	I	496	44	44
2	I	496	79	79
3	I	496	103	103
4	I	496	147	147
5	II	568	199	232
6	III	640	254	330
7	IV	712	313	431
8	V	784	379	537
9	VI	856	445	647
10	VII	928	515	765
11	VIII	1000	589	883

- realizacji pracy na stacji zakładowej Huty Batory,
- realizacji przewozów gorących na terenie Huty Katowice oraz HIL.

Badania obejmowały pomiary przebiegów obciążeń silnika spalinowego lokomotywy, prędkości jazdy, przebiegów obciążeń prądnicy głównej oraz obserwacje zmian masy składu manewrowego. Pomiar obciążenia silnika spalinowego dokonano drogą pośrednią, rejestrując kolejne pozycje nastawnika jazdy lokomotywy łącznie z czasem pracy lokomotywy na danej pozycji nastawnika jazdy. Obciążenie silnika spalinowego odpowiadające pozycjom nastawnika jazdy od 0 do 3 określono na podstawie bilansu obciążenia urządzeń pomocniczych lokomotywy oraz pomierzonych parametrów obciążenia prądnicy głównej [72]. Obciążenie silnika dla pozycji nastawnika jazdy od 4 do 11 określono na podstawie danych zawartych w dokumentacji lokomotyw. Wartości mocy przypisanych kolejnym pozycjom nastawnika jazdy oraz stopniom regulacji prędkości obrotowej silnika spalinowego zestawiono w tabeli 2.3.

Moce zestawione w tab. 2.3 może rozwinąć silnik spalinowy pod warunkiem, że lokomotywa będzie jechała z prędkościami większymi od ok. 3 km/h dla II stopnia, do ok. 7 km/h dla VIII stopnia regulacji, co wynika z cha-

rakterystyk trakcyjnych lokomotyw SM42 i SM31. Przy prędkościach niższych, stopniom regulacji silnika od II do VIII będą odpowiadały niższe moce. Pomiary wykazały, że w czasie pracy silnika spalinowego powyżej II stopnia regulacji, prędkość lokomotywy osiągała kilkanaście km/h. Sporadyczne sytuacje, kiedy pomierzone czasy pracy lokomotywy na pozycjach nastawnika jazdy od 5 do 11 (II do VIII stopień regulacji) związane były z bardzo małymi prędkościami jazdy, spowodować mogły, że wyniki pomiarów obciążeń silnika mogą być lekko zawyżone. W czasie pomiarów przełącznik rodzaju pracy w lokomotywie SM42 nastawiony był na "pracę liniową". Czas wykonywania nieprzerwanych pomiarów obciążeń mieścił się w granicach od 0,5 do 5 godzin pracy lokomotywy z uwzględnieniem wszystkich czasów postoju, kiedy silnik pracował na biegu jałowym.

### 2.3.2. Wyniki pomiarów obciążeń lokomotyw

#### a) obciążenia lokomotyw na stacjach PKP

Szczegółowe wyniki pomiarów obciążeń lokomotyw załączone zostały w pracy [72]. Na podstawie powyższych wyników pomiarów sporządzono histogramy obciążeń silników spalinowych lokomotyw manewrowych serii SM41 i SM31 pracujących na stacjach PKP (rys. 2.4). Masy rozrządzanych składów wagonów zawierały się w przedziałach od 1000 do 2500 t przy pracach manewrowych na górcie rozrządowej i na torze płaskim. Przy pracy miejscowej masa wagonów mieściła się w granicach od kilkudziesięciu do 1800 ton. Prądy obciążenia silników trakcyjnych pracujących na stacjach PKP nie przekraczały 300 A (110% prądu ciągłego  $I_c$ ), a odpowiadające im wartości sił na obwodzie kół napędnych nie przekraczały 115% siły ciągłej  $F_c$  lokomotywy SM42 i SM31.

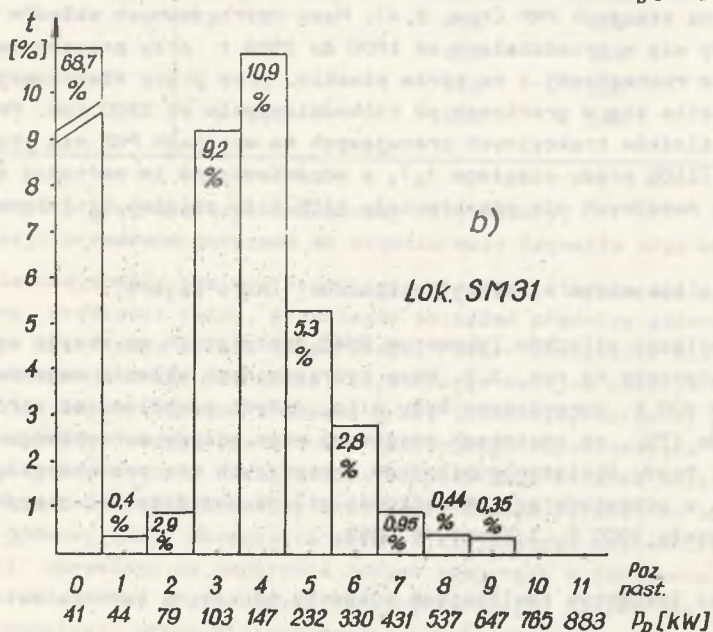
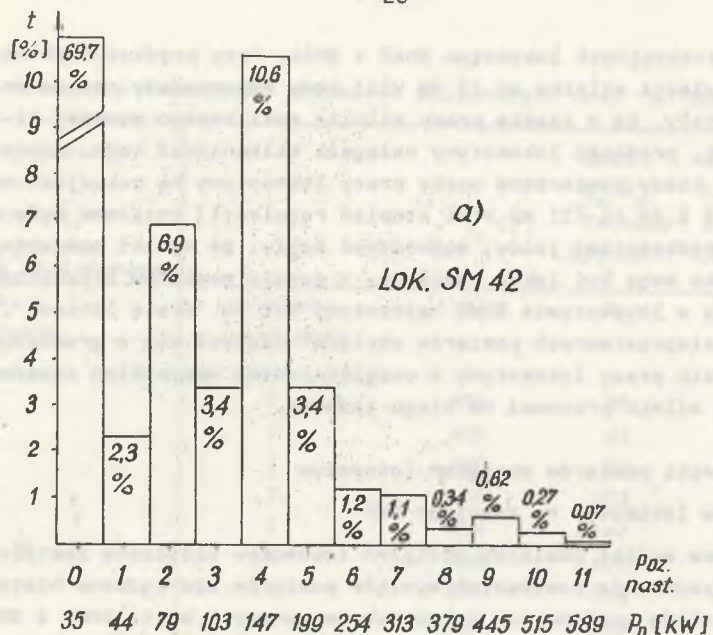
#### b) obciążenia lokomotyw na stacji zakładowej (Huta Batory)

Histogram obciążeń silników lokomotyw SM42 pracujących na stacji zakładowej przedstawiono na rys. 2.5. Masy rozrządzanych składów wagonów nie przekraczały 400 t, ograniczane były m.in. dużymi pochyleniami torów dochodzących do 17%. Na odcinkach poziomych masa składu manewrowego osiągała 1100 t. Prądy obciążenia silników trakcyjnych nie przekraczały 275 A ( $I_{max} = I_c$ ), a odpowiadające im wartości sił na obwodzie kół napędnych nie przekraczały 100%  $F_c$  lokomotywy SM42.

#### c) Obciążenia lokomotyw realizujące przewozy gorące na terenie hut

Przewozy gorące obejmowały obsługę tras:

- hala lejnicza - hala strippera,
- hala strippera - hala walcowni - hala osprzętu,
- hala osprzętu - hala wlewnic,
- dowóz koksu do wywrotnicy.

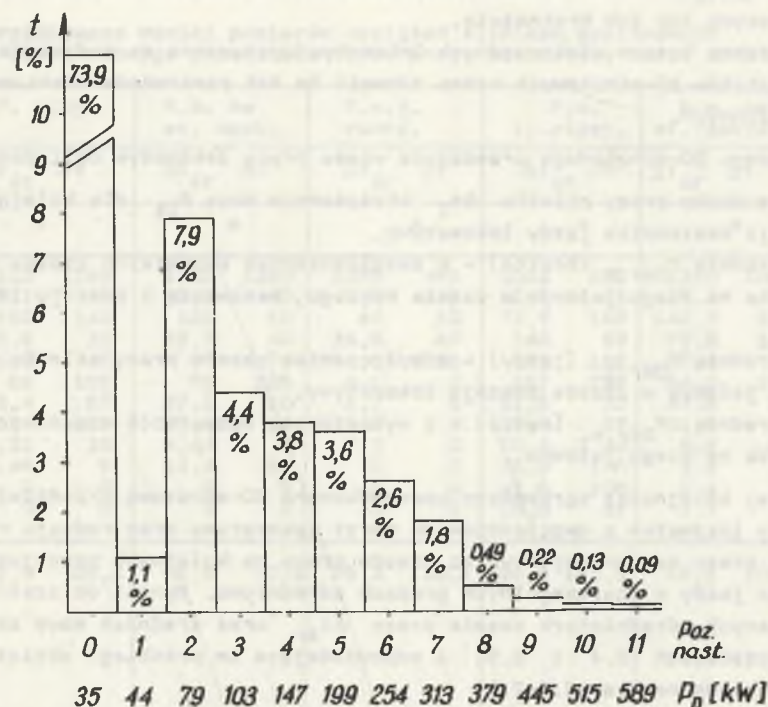


Rys. 2.4. Histogramy obciążeń silnika spalinowego lokomotywy manewrowej pracującej na stacjach PKP

a) serii SM42; b) serii SM31

Fig. 2.4. Load histograms of diesel engine of shunting locomotives running at Polish Railways (PKP)

a) series SM42; b) series SM31



Rys. 2.5. Histogram obciążeń silnika spalinowego lokomotywy manewrowej serii SM42 pracującej na stacji zakładowej Huty Batory

Fig. 2.5. Load histograms of shunting locomotive SM42 diesel engine running at a factory railway at Steel Plant Batory

Maksymalne parametry obciążeń lokomotyw wynosiły:

- prędkości jazdy pomiędzy ww. halami  $V_{max} = 6 \text{ km/h,}$
- prędkości jazdy do wyrotnicy koksu  $V_{max} = 8 \text{ km/h,}$
- moc silnika spalinowego  $P_{max} = 147 \text{ kW,}$
- prąd obciążenia silników trakcyjnych  $I_{max} = 275 \text{ A} \approx I_C,$
- masa składu manewrowego  $m_w = (550-1330)t.$

### 2.3.3. Opracowanie wyników pomiarów obciążeń lokomotyw

Wyniki pomiarów obciążeń lokomotywy opracowano w celu uzyskania danych wyjściowych umożliwiających przeprowadzenie optymalnego doboru źródeł zasilania silników trakcyjnych specjalizowanej lokomotywy hybrydowej spalinowo-zasobnikowej. Zestawione w tabelach [72] chronologicznie wpisane wyniki pomiarów podzielone zostały na 30-minutowe przedziały pracy. Podział ten wynikał z następujących przesłanek:

- 30-minutowy przedział czasu pracy pokrywał się często z cyklami pracy lokomotywy lub ich krotnością,
- obciążenia maszyn elektrycznych lokomotyw wyznaczone na podstawie dwóch przedziałów 30-minutowych można odnosić do ich parametrów znamionowych 1-godzinnych.

Dla każdego 30-minutowego przedziału czasu pracy lokomotyw obliczono:

- łączne czasy pracy silnika  $\Delta t_1$  obciążonego mocą  $P_{D1}$  dla kolejnych pozycji nastawnika jazdy lokomotywy,
- moc średnią  $P_{Dsr.b}$  (brutto) - z uwzględnieniem wszystkich czasów pracy silnika na biegu jałowym w czasie wybiegu, hamowania i postoju lokomotywy,
- moc średnią  $P_{Dsr.j}$  (jazdy) - z wyłączeniem czasów pracy silnika na biegu jałowym w czasie postoju lokomotywy,
- moc średnią  $P_{Dsr.n}$  (netto) - z wyłączeniem wszystkich czasów pracy silnika na biegu jałowym.

W dalszej kolejności zgrupowano uporządkowane 30-minutowe przedziały czasu pracy lokomotyw z uwzględnieniem serii lokomotywy oraz rodzaju realizowanej pracy manewrowej; wyniki czasów pracy na kolejnych pozycjach nastawnika jazdy w poszczególnych grupach uśredniono. Wyniki obliczeń uporządkowanych uśrednionych czasów pracy  $\Delta t_{sr}$  oraz średnich mocy zestawiono w tabelach 2.4 i 2.5, a odpowiadające im przebiegi obciążeń przedstawiono na rys. 2.6-2.9.

W tabelach 2.4 i 2.5 zestawiono dodatkowe czasy pracy  $\Delta t_1$  na kolejnych pozycjach nastawnika jazdy oraz wartości średnich mocy dla przedziałów charakteryzujących się najwyższą wartością mocy  $P_{Dsr.b}$  (brutto).

a) Aproksymacja uporządkowanego uśrednionego przebiegu obciążenia silnika silnika spalinowego lokomotywy

Przedstawione na rys. 2.6 do 2.9 uporządkowane uśrednione przebiegi obciążeń silnika spalinowego aproksymowano w zakresie szczytowych obciążeń liniowo za pomocą równania:

$$P_D(t) = P_{max} - ct \quad (2.12)$$

Wartości  $P_{max}$  oraz współczynnika  $c$  wyznaczono z warunku (rys. 2.9):

$$\int_0^k P_D(t)dt = \sum_k^n P_i \Delta t_i \quad (2.13)$$

Tabela 2.4

Uporządkowane wyniki pomiarów obciążeń silników spalinowych dla 30-minutowego przedziału czasu pracy lokomotywy serii SM42

Rodzaj pracy	P. miej.		P.m. na st. osob.		P.m.g. rozrz.		P.m. t. płask.		P.m. na st. zakład.	
	$\Delta t_{sr}$	$\Delta t$	$\Delta t_{sr}$	$\Delta t$	$\Delta t_{sr}$	$\Delta t$	$\Delta t_{sr}$	$\Delta t$	$\Delta t_{sr}$	$\Delta t$
kW	s		s		s		s		s	
35	1310	1165	1382	1390	1098	465	1024	655	1330	1068
44	77,1	15	30,2	40	1,4	5	12,8	25	19,4	10
79	182	140	125	10	49	10	77,5	168	142,2	155
103	65,6	30	36,7	40	36,8	40	146	58	79,8	146
147	55,6	45	85	75	584,5	1280	121	156	68,4	55
199	66	155	65	125	9,1	0	167	282	64,2	122
254	23,4	57	27,8	20	2,7	0	51,2	10	47,6	29
313	16,4	155	29,4	10	11,4	0	36,4	67	31,5	70
379	3,33	35	4,44	0	7,3	0	20,4	40	8,8	85
445	0,48	5	14,4	90	0	0	76,8	100	3,9	15
515	0	0	0	0	0	0	45,6	208	2,4	45
589	0	0	0	0	0	0	18,6	31	1,7	0
$P_{Dsr.b}$ [kW]	57,9	95,2	62,8	77,5	78,3	116,4	116,6	183,8	66,1	104,9
$P_{Dsr.j}$ [kW]									94,7	136,0
$P_{Dsr.n}$ [kW]									154,1	208,9

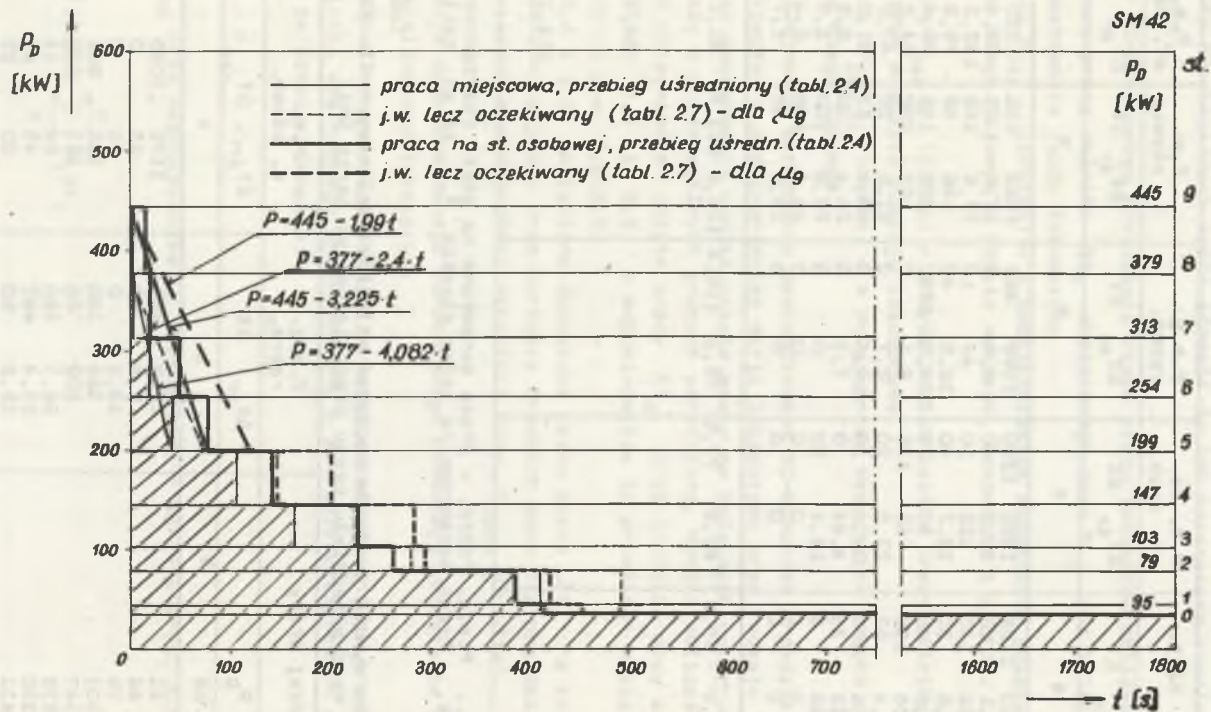
Praca miejs. - P.m.g. rozrz. - Praca manewrowa na górcie rozrządowej, P.m.t. płask. - Praca manewrowa na torze płaskim, P.m. na st. zakł.

Tabela 2.5

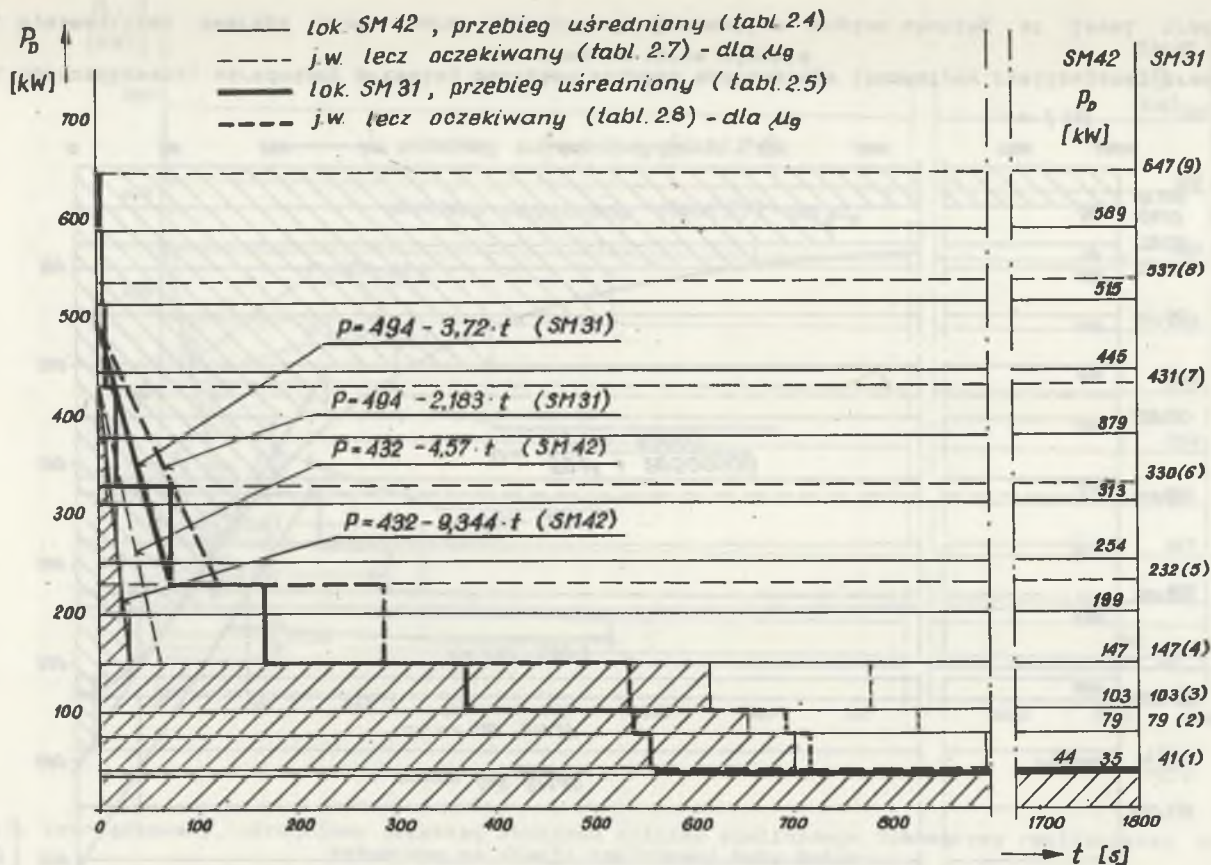
Uporządkowane wyniki pomiarów obciążeń silników spalinowych dla 30-minutowego przedziału czasu pracy lokomotyw serii SM31

Rodzaj pracy	P.m.g. rozrz.		P.m. t. płask.	
	$\Delta t_{sr}$	$\Delta t$	$\Delta t_{sr}$	$\Delta t$
kW	s		s	
41	1242	965	1176	1085
44	2,8	0	65	0
79	18,2	0	0	0
103	168	100	125	204
147	202	60	113	120
232	96,7	180	84	11
330	51,4	445	45	45
431	16,8	50	20	29
537	0,85	0	103	100
647	1,46	0	69	206
765	0	0	0	0
883	0	0	0	0
$P_{Dsr.b}$ [kW]	82	149,4	124	166,7

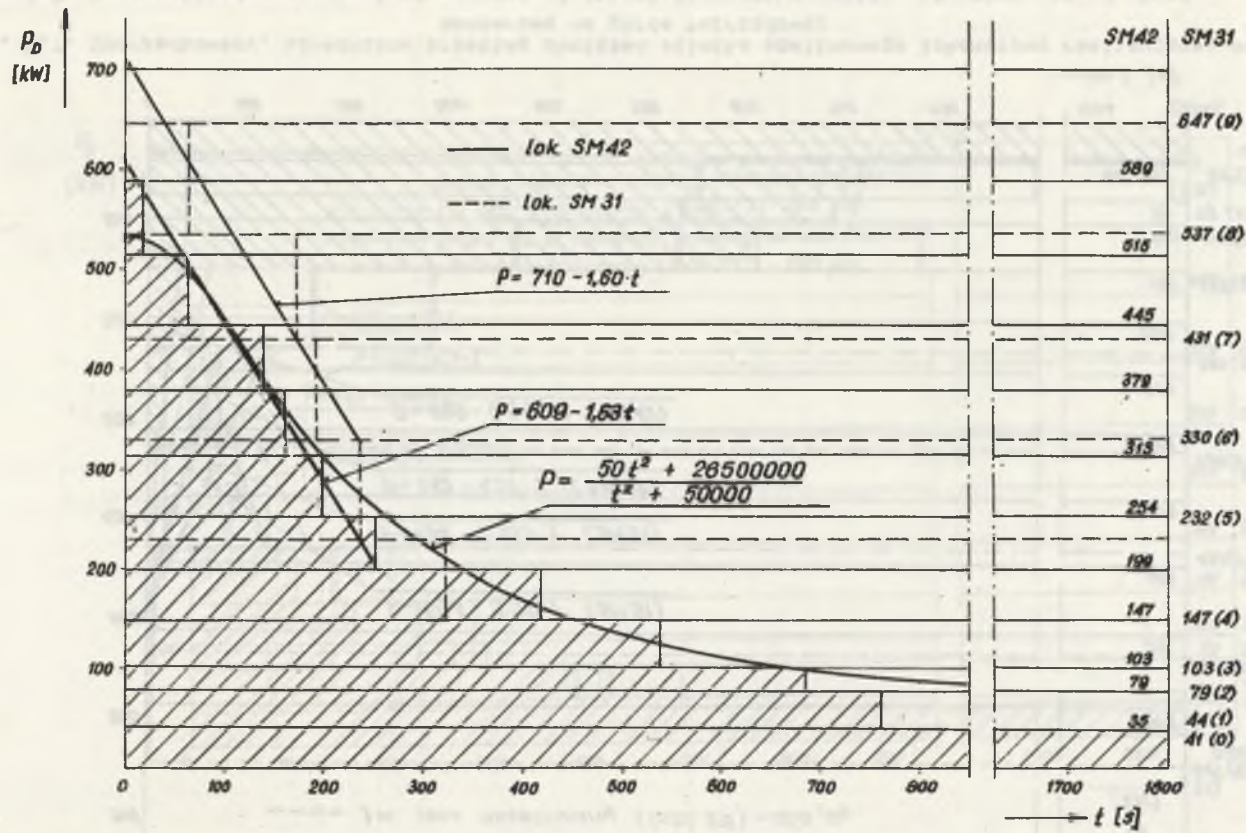




Rys. 2.6. Uporządkowany, uśredniony przebieg obciążeń silnika spalinowego lokomotywy realizującej pracę miejscową  
 Fig. 2.6. Systematized average load course of diesel locomotive engine running locally

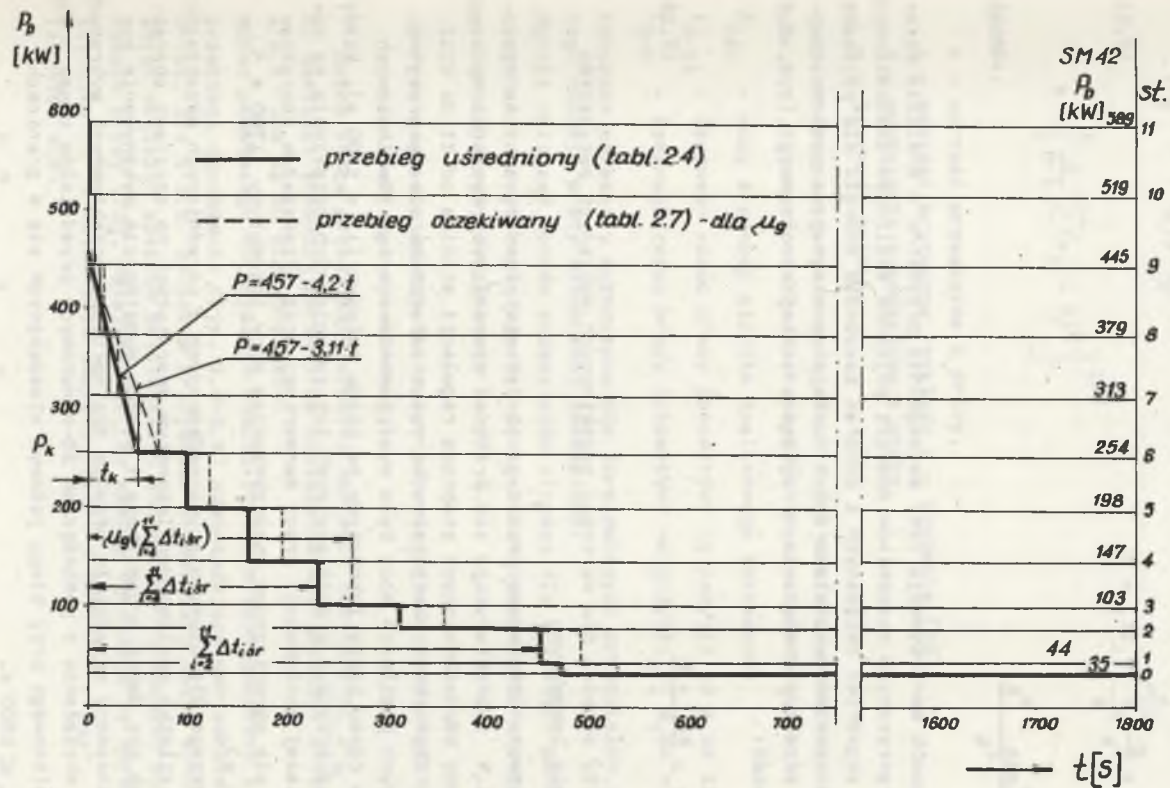


Rys. 2.7. Uporządkowany, uśredniony przebieg obciążeń silnika spalinowego lokomotywy realizującej pracę manewrową na górze rozrządowej  
 Fig. 2.7. Systematized average load course of diesel locomotive engine shunting at a hump



Rys. 2.8. Uporządkowany, uśredniony przebieg obciążeń silnika spalinowego lokomotywy realizującej pracę manewrową na torze płaskim

Fig. 2.8. Systematized average load course of diesel locomotive engine shunting at level track



Rys. 2.9. Uporządkowany, uśredniony przebieg obciążeń silnika spalinowego lokomotywy realizującej pracę manewrową na stacji zakładowej Huty Batory

Fig. 2.9. Systematized average load course of diesel locomotive engine shunting at Steel Plant Batory

stąd:

$$P_{\max} = \frac{2}{t_k} \sum_k^n P_i \Delta t_i - P_k \quad (2.14)$$

$$c = \frac{P_{\max} - P_k}{t_k} \quad (2.15)$$

Powyższy sposób aproksymacji jest szczególnie przydatny w analizie parametrów energetycznych zasobników energii pojazdów spalinowo-zasobnikowych. Do analizy zagadnień związanych z doбором zasobnika energii dla pojazdów hybrydowych sieciowo-akumulatorowych funkcja aproksymująca powinna obejmować cały przebieg obciążenia. Przykładem takiej aproksymacji (rys. 2.8) jest zależność:

$$P_D(t) = \frac{at^2 + b}{t^2 + h} \quad (2.16)$$

b) Przedziały ufności dla wartości oczekiwanych wybranych parametrów obciążenia lokomotywy

Uporządkowane uśrednione przebiegi obciążenia przedstawione na rysunku 2.6 do 2.9 charakteryzują się krótkimi czasami wykorzystania wyższych wartości mocy odpowiadających stopniom regulacji silnika od II do VIII (tab. 2.3). Czynnikiem obniżającym wartości uśrednione czasów pracy na poszczególnych poziomach mocy było występowanie szeregu 30-minutowych przedziałów czasu pracy lokomotywy na biegu jałowym ( $t_0 = 1800$  s), kiedy lokomotywa z przyczyn organizacyjnych lub technicznych oczekiwała na możliwość dalszej kontynuacji pracy manewrowej oraz przedziałów charakteryzujących się ograniczonym wykorzystaniem mocy lokomotywy ( $1700$  s  $<$   $t_0$   $<$   $1800$  s).

Wobec powyższego dla uzyskania uporządkowanych i uśrednionych przebiegów obciążenia silnika spalinowego lokomotyw pracujących na stacjach charakteryzujących się dobrą organizacją i wysoką wydajnością wykonywania manewrów, wyznaczono przedziały ufności dla wartości oczekiwanych wybranych parametrów obciążenia z pominięciem 30-minutowych przedziałów czasu pracy silnika spalinowego przy biegu jałowym mieszczących się w granicach  $1700$  s  $\leq$   $t_0$   $\leq$   $1800$  s.

Końce przedziału ufności dla wartości oczekiwanej  $\mu$  [1] wyznaczono z zależności:

$$\text{dolny } \mu_d = \bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.17)$$

górny

$$\mu_g = \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.18)$$

$$s = \left[ \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

gdzie:

- x - wartość przeciętna z próby,
- t - wartość krytyczna rozkładu t - Studenta [30],
- s - odchylenie standardowe z próby,
- n - licznosc próbek.

Końce 90-procentowego przedziału ufności wartości oczekiwanej  $\mu$  ( $1 - \alpha$ ;  $\alpha = 0,1$ ), wyznaczono dla następujących parametrów obciążenia lokomotywy:

$P_{Dsr}$  - mocy średniej silnika spalinowego lokomotywy,

$t_{4-11}$  - łącznego czasu pracy lokomotywy na pozycji od 4 do 11,

$t_{i-n}$  - łącznego czasu pracy lokomotywy na pozycji od i do n.

Powyższe parametry wyznaczono dla 30-minutowych przedziałów czasu określonego rodzaju pracy manewrowej lokomotywy.

Wyniki obliczeń końców przedziałów ufności dla wybranych parametrów obciążenia lokomotyw realizujących pracę manewrową na górcie rozrządowej oraz pracę miejscową zestawiono w tabeli 2.6.

c) Przebiegi obciążenia lokomotyw odpowiadające górnym końcom przedziałów ufności wartości oczekiwanej

Dolne końce przedziałów ufności wartości oczekiwanej  $\mu_d$  zbliżone są do wartości średnich parametrów obciążenia zestawionych w tabelach 2.4 i 2.5 lub są od nich mniejsze.

Wobec powyższego do dalszych analiz przyjęto uporządkowane i uśrednione przebiegi obciążenia (rys. 2.6-2.9) odpowiadające wartościom zestawionym w tab. 2.4 i 2.5. Za takim przyjęciem przemawiają także wyniki wcześniejszych obliczeń kosztów eksploatacji lokomotyw hybrydowych wykonanych w ramach pracy [72], wskazujących, że koszty te maleją ze wzrostem współczynnika c z zależności (2.12), (2.15) i spadkiem  $P_{Dsr}$ .

Tak więc dla:

$$\mu_d \left[ \sum_i^n \Delta t_{i\text{sr}} \right] < \sum_i^n \Delta t_{i\text{sr}}^* \quad (2.20)$$

efektywność zastosowania lokomotywy hybrydowej będzie wyższa, niż w przypadku wystąpienia znaku równości w zależności (2.20) (tab. 2.6).

Tabela 2.6

Wyniki obliczeń końców przedziału ufności dla wartości oczekiwanej wybranych parametrów obciążenia lokomotywy

Lokomotywa serii		SM42				SM31
Rodzaj pracy		P. miejs.	P.m. na st. osob.	P.m.g. rozrz.	P.m. na st. zakł.	P.m.g. rozrz.
Parametr						
n		20	9	11	29	31
$t_{\Sigma}/2$		1,729	1,86	1,81	1,70	1,697
$\alpha$		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$P_{D\acute{s}r}$ [kW]	$\bar{x}$	58,8	62,8	78,3	66,1	92
	s	14,5	12,8	23,3	14,4	28,2
	$\mu_g$	64,4	70,7	91	70,9	100,6
	$\mu_d$	53,2	54,9	65,6	61,3	83,4
	$P_{D\acute{s}rb}^*$	57,9	62,8	78,3	66,1	82
$\sum_{i=4}^{11} \Delta t_{i\acute{s}r}$ [s]	$\bar{x}$	174	226	615	228	451
	s	133	106	426	106,2	267
	$\mu_g$	225	285	847	262	532
	$\mu_d$	123	167	383	194	370
$\sum_{i=1}^{11} \Delta t_{i\acute{s}r}^*$		165,2	226	615	228	369
$\sum_{i=1}^{11} \Delta t_{i\acute{s}r}$ [s]	i	6	6	5	7	6
	$\bar{x}$	44,3	76	21,4	48	88,9
	s	76,5	76,6	54	54,4	102
	$\mu_g$	73,9	123	51	65	120
	$\mu_d$	14,7	28,5	0	31	57,8
	$\sum_{i=1}^{11} \Delta t_{i\acute{s}r}^*$		43,6	76	21,4	48

\* - wartości przeniesione z tab. 2.4 i 2.5

Wyznaczając uporządkowany przebieg obciążenia  $P_D(t)$  na podstawie wyników obliczeń  $\mu_g$  oraz uśrednionych wyników pomiarów obciążeń (tab. 2.4 i 2.5) dla określonego rodzaju pracy manewrowej realizowanej przez lokomotywę serii SM42 lub SM31 spełniono następujące uwarunkowania:

1)

$$\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} P_D(t) dt = \mu_g(P_{D\acute{s}r}) \quad (2.21)$$

gdzie:  $t_p = 30 \text{ min} = 1800 \text{ s}$

2)

$$t'_k = \mu_g \left[ \sum_{k+1}^n \Delta t_{i\acute{s}r} \right] \quad (2.22)$$

gdzie:  $t'_k$  z zależności (2.13), (2.15) - rys. 2.9.

3) łączny czas pracy lokomotywy na pozycjach nastawnika jazdy od 4 do 11 (rys. 2.9) można powiększyć do wartości  $\mu_g \left[ \sum \Delta t_{i\acute{s}r} \right]$ , jeżeli nie koliduje to z warunkiem określonym zależnością (2.21). W przypadku przekroczenia wartości  $\mu_g(P_{D\acute{s}r})$  z zależności (2.21) łączne czasy pracy lokomotyw liczone od pozycji 1 do 4 powiększono proporcjonalnie do wartości zapewniającej spełnienie warunku 1). (2.21).

4) Ukształtowane w ten sposób uporządkowane i uśrednione przebiegi obciążenia  $P_D(t)$  - (rys. 2.6 do 2.9, tab. 2.7 i 2.8, spełniające zależności (2.21) pozwolą wyznaczyć efektywność rozwiązania lokomotywy hybrydowej dla skrajnie niekorzystnych średnich przebiegów obciążenia.

#### 2.4. Wnioski

Moce znamionowe lokomotyw obliczone na podstawie mocy jednostkowych lokomotyw (tab. 2.1) są zbliżone do wyników pomiarów maksymalnych obciążeń silników spalinowych porównywalnych lokomotyw manewrowych (tab. 2.4). Dla lokomotyw manewrowych uniwersalnych przeznaczonych między innymi do pracy manewrowej na torze płaskim oraz dla lokomotyw specjalizowanych, przeznaczonych do pracy manewrowej w rejonie górkii rozrządowej różnice pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów mocy lokomotyw nie przekraczają  $\pm 10\%$ . Zastosowanie w lokomotywach przemysłowych silników spalinowych o mocy znamionowej równej mocy obliczonej w tab. 2.1 wiąże się z możliwością wystąpienia deficytu mocy w czasie nie przekraczającym 3% całkowitego czasu pracy lokomotyw.

Tabela 2.7

Górne końce przedziałów ufności wartości oczekiwanych przebiegów obciążeń silników spalinowych dla 30-minutowego przedziału czasu pracy lokomotywy serii SM42

Rodzaj pracy		P. miejs.		P.m. na st. osob.		P.m. na górze rozrządowej		p.m. na st. zakładowej	
st.	P <sub>D</sub>	(Δt <sub>śr</sub> ) <sub>g</sub>	μ <sub>g</sub> (Σ)*	(Δt <sub>śr</sub> ) <sub>g</sub>	μ <sub>g</sub> (Σ)*	(Δt <sub>śr</sub> ) <sub>g</sub>	μ <sub>g</sub> (Σ)*	(Δt <sub>śr</sub> ) <sub>g</sub>	μ <sub>g</sub> (Σ)*
(i)	kW	s		s		s		s	
0	35	1216	1800	1347	1800	908	1800	1274	1800
1	44	91	584	33	453	2	892	35,9	525,9
2	79	241	493	106	420	62	890	137,3	490,0
3	103	54	279	29	314	47	828	90,6	352,7
4	147	79	225	89	285	719	781	71,3	262,1
5	199	72,1	146	79	199	11	62	72,5	190,8
6	254	43	73,9	48	123	16	51	53,1	118,3
7	313	26,9	30,9	35	75	23,8	35	36,8	65,2
8	379	4	4	20	40	11,2	11,2	14,8	28,4
9	445	0	0	20	20	0	0	13,6	13,6
10	515	0	0	0	0	0	0	0	0
11	589	0	0	0	0	0	0	0	0
μ <sub>g</sub> (P <sub>D</sub> śrb)		64,4 kW		70,7 kW		91,0 kW		70,9 kW	

$$\mu_g(\Sigma)^* = \mu_g \left[ \sum_{i=1}^{11} \Delta t_{i\acute{s}r} \right]$$

Analizując przedstawione wyniki pomiarów obciążeń lokomotyw pracujących na stacjach PKP oraz na stacjach zakładów przemysłowych można sformułować następujące wnioski:

- obciążenie silników spalinowych lokomotyw manewrowych charakteryzuje się dużą zmiennością,
- zmiany obciążenia mieszczą się w całym zakresie dopuszczalnych obciążeń silników, lecz często obciążenia zbliżone do mocy znamionowej silników nie są w określonych rejonach pracy lokomotywy wykorzystywane,
- łączny czas pracy silnika spalinowego z mocą większą od 50% jego mocy znamionowej mieści się w granicach od 3 do 11% czasu pracy lokomotywy,
- średnia wartość czasu pracy silników spalinowych na biegu jałowym dochodzi do ok. 78% łącznego czasu pracy i postoju (praca lok. SM42 na stacji osobowej),
- decydującym czynnikiem mającym wpływ na przebiegi obciążeń ma rodzaj pracy manewrowej realizowanej przez lokomotywę,

Tabela 2.8

Górne końce przedziałów ufności wartości oczekiwanych przebiegów obciążeń silników spalinowych dla 30-minutowego przedziału czasu pracy lokomotywy serii SM31

Rodzaj pracy	P <sub>D</sub>	P. manewr. na górze rozrz.	
st.	P <sub>D</sub>	(Δt <sub>śr</sub> )	μ <sub>g</sub> (Σ)
(i)	kW	s	
0	41	1078	1800
1	44	4	722
2	79	23	718
3	103	163	695
4	147	248	532
5	232	164	284
6	330	90	120
7	431	21,2	30
8	537	8,8	8,8
9	647	0	0
10	765	0	0
11	883	0	0
μ <sub>g</sub> (P <sub>D</sub> śrb)		83,4 kW	

$$\mu_g(\Sigma)^* = \mu_g \left[ \sum_{i=1}^{11} \Delta t_{i\acute{s}r} \right]$$

- największe obciążenie występuje w czasie pracy manewrowej na torze płaskim (przestawianie pełnych składów wagonów oraz odrzucanie wagonów)
- czynnikiem decydującym o średniej wartości czasu pracy silnika spalinowego na biegu jałowym było występowanie długich postojów, kiedy lokomotywa z przyczyn organizacyjnych lub technicznych oczekiwała na możliwość dalszej kontynuacji pracy manewrowej.

W związku z tym, że szczytowe obciążenia lokomotyw manewrowych i przemysłowych występują sporadycznie, celowe jest przeprowadzenie analizy efektywności rozwiązania lokomotywy, w której obciążenia szczytowe będą pokrywane nie tylko przez silnik spalinowy lecz także przez zasobnik energii.

### 3. PARAMETRY I CHARAKTERYSTYKI ŹRÓDEŁ ZASILANIA SILNIKÓW TRAKCYJNYCH LOKOMOTYW HYBRYDOWYCH

#### 3.1. Wprowadzenie

Przedmiotem analizy w niniejszym rozdziale są zasobnikowe elektrochemiczne źródła energii oraz zespoły prądowórcze zestawione z wysokoprężnego silnika spalinowego, prądnicy głównej, pomocniczej oraz wzbudnicy.

Parametrami oraz charakterystykami decydującymi o doborze zasobnikowych elektrochemicznych źródeł energii przeznaczonych do zastosowania w pojazdach hybrydowych są:

- a) dopuszczalna jednostkowa moc wyładowania i ładowania,
- b) jednostkowa pojemność energetyczna,
- c) zależność sprawności energetycznej zasobnika od jednostkowej mocy wyładowania,
- d) zależność zmian stanu naładowania zasobnika od jednostkowej mocy wyładowania i czasu wyładowania,
- e) trwałość zasobnika (akumulatora),
- f) cena jednostkowa zasobnika.

W prezentowanych metodach obliczeń pominięto wpływ zmian temperatury elektrolitu zasobnika na jego parametry elektryczne, ponieważ pojazdy hybrydowe poza zasobnikiem energii wyposażone są w podstawowe źródło zasilania energią, dzięki któremu można zapewnić pracę zasobnika w optymalnym przedziale temperatur. W przypadku pojazdów spalinowo-zasobnikowych można do tego celu wykorzystać ciepło z układu chłodzenia silnika.

Wyniki obliczeń parametrów oraz charakterystyk przedstawionych w niniejszej pracy odniesiono do wybranych typów ogniw akumulatorowych produkcji krajowej, które zestawione w baterię będą pełniły rolę elektrochemicznego zasobnika energii, a mianowicie do:

- ogniw akumulatorowych kwasowych trakcyjnych z dodatnimi płytami pancernymi, z podwójnymi końcówkami biegunowymi o symbolu 6A570(TS6u),
- ogniw akumulatorowych zasadowych, niklowo-kadmowych o obniżonej rezy-stancji wewnętrznej typu SN375.

Parametrami technicznymi oraz charakterystykami decydującymi o doborze zespołów prądowórczych do zastosowania w pojazdach hybrydowych są:

- a) jednostkowe moce zespołów prądowórczych,

- b) charakterystyki zużycia paliwa w funkcji obciążenia silników spalinowych.

Charakterystyki zużycia paliwa wyznaczono dla pewnej klasy silników spalinowych, o mocach zawartych w przedziale od 221 do 589 kW.

#### 3.2. Zasobnikowe elektrochemiczne źródła energii

##### 3.2.1. Jednostkowe moce wyładowania i ładowania ogniw akumulatorowych

Jednostkową moc wyładowania ogniw akumulatorowych  $P_w$  w funkcji wartości względnej prądu  $i_w$  można wyznaczyć z zależności:

$$P_w = \frac{I_w U_w}{m_{og}} \quad (3.1)$$

$$i_w = \frac{I_w T_n}{Q_{5h}} \quad (3.2)$$

gdzie:

- $Q_{5h}$  - pojemność znamionowa odpowiadająca 5-godzinnemu prądowi wyładowania w Ah,
- $I_w$  - prąd wyładowania w A odpowiadający określonemu czasowi wyładowania,
- $U_w$  - napięcie wyładowania odpowiadające prądowi wyładowania  $I_w$  oraz określonemu stanowi naładowania ogniwa,
- $m_{og}$  - masa ogniwa napełnionego elektrolitem w kg,
- $T_n$  - 1h - znamionowy czas.

Dopuszczalne wartości jednostkowych mocy wyładowania ogniw w akumulatorach wynikają jednoznacznie z dopuszczalnych wartości prądów wyładowania. Nieprzerwany długotrwały prąd wyładowania ogniw trakcyjnych kwasowych i zasadowych odpowiada 3-godzinnemu prądowi wyładowania. Jednostkowe moce wyładowania odpowiadające 3-godzinnemu prądowi wyładowania ( $i_w \approx 0,3$ ) mieszczą się w granicach od około 7 W/kg dla ogniw zasadowych, do około 9 W/kg dla ogniw kwasowych o największych pojemnościach. Ekstremalne parametry wyładowania ogniw kwasowych ograniczone są dopuszczalnymi temperaturami złącza zestawionego z końcówki biegunowej i łącznika międzyogniwowego.

Stosowane maksymalne wartości prądów wyładowania ogniw kwasowych trakcyjnych podawane w prospektach firmowych [63, 67] zawierają się w granicach  $i_{wmax} = 0,65 - 1,7$ , a odpowiadające im jednostkowe moce wyładowania  $P_{wmax} = (18 - 48,5)$  W/kg.

Ogniwa akumulatorowe zasadowe o obniżonej rezystancji wewnętrznej można wyładowywać prądami  $i_{wmax} = 3-5$  [64].

Uwzględniając zalecenia literatury [8, 17] oraz wyniki badań pracy [72] przyjęto dla analizowanych ogniw przeznaczonych do zastosowania w hybrydowych lokomotywach manewrowych następujące maksymalne parametry wyładowania:

- dla ogniw 6A570 (TS6u) przy 0,5 Q

$$i_{wmax} = 1,06; \quad p_{wmax} = 26,3 \text{ W/kg}$$

- dla ogniw SN375 przy 0,5 Q

$$i_{wmax} = 3,0; \quad p_{wmax} = 47,7 \text{ W/kg.}$$

Wyniki obliczeń jednostkowych mocy wyładowania dla analizowanych ogniw przedstawiono w tabeli 3.1, a przebiegi charakterystyk  $p_w = f(i_w)$  na rys. 3.1a.

Jednostkowe moce ładowania obliczyć można z zależności (3.1), zastępując indeksy "w" indeksami "ł". Wartości napięć ładowania określić można z charakterystyk firmowych ogniw dla określonego prądu ładowania, stanu naładowania ogniwa oraz temperatury elektrolitu. Dla zalecanych przez katalogi [60, 62], oraz instrukcję obsługi [63] wartości prądu ładowania normalnego wyznaczono (tabela 3.2) odpowiadające im jednostkowe moce ładowania.

### 3.2.2. Jednostkowa pojemność energetyczna ogniw akumulatorowych

Jednostkową pojemność energetyczną ogniw wyznacza się z zależności:

$$q_{en} = \frac{Q U_{\acute{s}r}}{m_{og}} \quad (3.3)$$

gdzie:

- Q - pojemność elektryczna ogniwa w Ah odpowiadająca określonemu prądowi wyładowania,
- $U_{\acute{s}r}$  - średnia wartość napięcia wyładowania w V odpowiadająca określonemu prądowi wyładowania,
- $m_{og}$  - masa ogniwa z elektrolitem w kg.

Wyniki obliczeń jednostkowej pojemności dla analizowanych ogniw zestawiono w tabeli 3.1.

### 3.2.3. Sprawność energetyczna ogniw akumulatorowych

Pomiary obciążeń silników spalinowych lokomotyw manewrowych wykazały, że łączny czas pracy silnika z mocą większą od 50% jego mocy znamionowej mieści się w granicach od około 3 do 11% czasu pracy lokomotywy. W loko-

Tabela 3.1

Parametry energetyczne ogniw akumulatorowych w czasie wyładowania

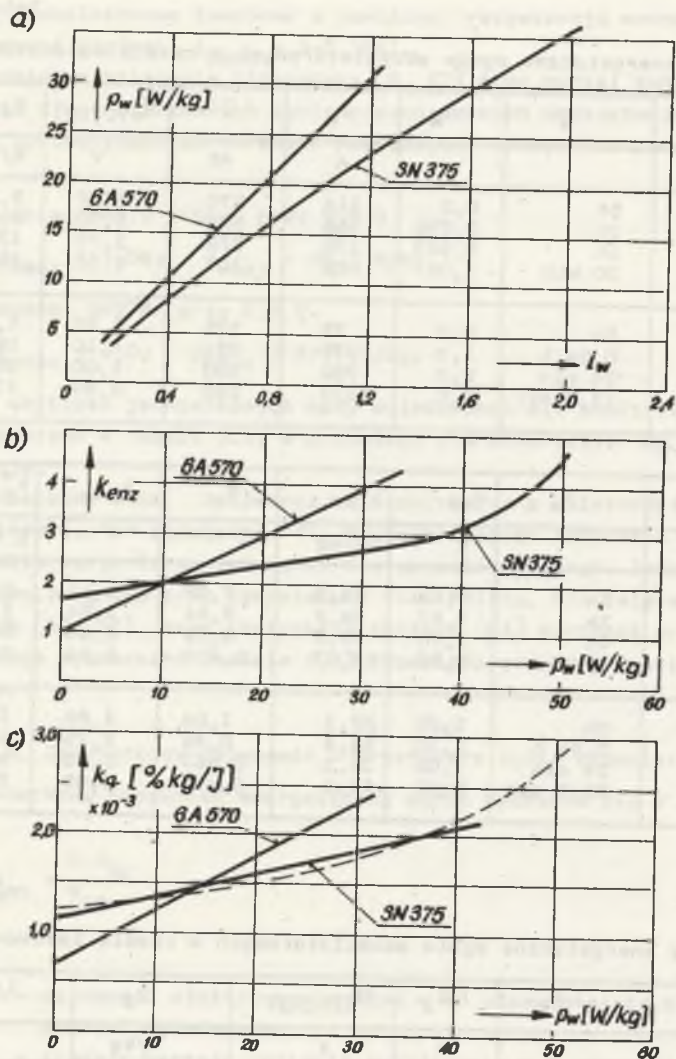
Ogniwo	$t_w$	$i_w$	$I_w$	Q	$U_w(0,5Q)$	$P_w(0,5Q)$
			A	Ah	V	W/kg
6A570 (TS6u) $m_{og} = 38 \text{ kg}$	5h	0,2	114	570	1,92	5,76
	3h	0,295	168	504	1,90	8,40
	1h	0,663	378	378	1,78	17,7
	30 min	1,06	602	301	1,66	26,3
SN375 $m_{og} = 21 \text{ kg}$	5h	0,2	75	375	1,25	4,46
	0,94 h	1,0	375	352	1,10	19,6
	24 min	2,0	750	300	1,00	35,7
	13,3 min	3,0	1125	250	0,89	47,7

Ogniwo	$t_w$	$U_{w\acute{s}r}$	$q_{en}$	$a_w$	$k_{enz}$	$k_q^* 10^{-3}$
		V	Wh/kg			% kg/J
6A570 (TS6u) $m_{og} = 38 \text{ kg}$	5h	1,90	28,5	0,96	1,61	0,97
	3h	1,87	24,8	0,84	1,84	1,12
	1h	1,76	17,5	0,59	2,63	1,59
	30 min	1,65	13,07	0,438	3,54	2,12
SN375 $m_{og} = 21 \text{ kg}$	5h	1,25	22,3	1,04	1,86	1,25
	0,94 h	1,10	18,4	0,86	2,25	1,51
	24 min	1,00	14,3	0,667	2,90	1,94
	13,3 min	0,89	10,6	0,478	4,05	2,62

Tabela 3.2

Parametry energetyczne ogniw akumulatorowych w czasie ładowania

Ogniwo	$i_{\acute{l}}$	$I_{\acute{l}}$	$U_{\acute{l}}(0,5Q)$	$P_{\acute{l}}$	$1/a_{\acute{l}}$
		A	V	W/kg	
6A570	0,05	28,5	2,15	1,61	0,775
	0,08	45,6	1,61	2,63	0,759
	0,167	95,0	2,26	5,65	0,737
SN375	0,2	75	1,41	5,03	0,608



Rys. 3.1. Charakterystyki energetyczne ogniw akumulatorowych

a - charakterystyki jednostkowej mocy wyładowania ogniw od prądu wyładowania dla 50% wybranej pojemności, b - krotność energii ładowania do energii wyładowania ogniw akumulatorowych pracujących w stanach quasi-ustalonych, c - stopień wykorzystania energii znamionowej ogniw akumulatorowych

Fig. 3.1. Energy characteristic curves of secondary cells

a - characteristic curves of unit load power depending on unload current for 50% chosen capacity, b - multiplication load energy factor to unload energy of secondary cells working under quasi-fixed conditions, c - rate of utilization of rated energy of secondary cells

motywie hybrydowej zasobnik energii przeznaczony do wspomaganie silnika spalinowego mniejszej mocy obciążony będzie mocą szczytową krótkotrwałe, zaś pomiędzy szczytami obciążeń doładowywany. W związku z powyższym wielkością istotną jest sprawność zasobnika, czyli baterii ogniw akumulatorowych wyznaczona dla małych porcji energii ładowanej i wyładowywanej przy określonym stanie naładowania ogniw. W związku z tym, że kolejne procesy ładowania i wyładowania nie są ze sobą skorelowane żadnymi wspólnymi parametrami, celowe jest wyznaczenie sprawności ogniw akumulatorowych za pomocą ilorazu względnych energii wyładowania  $a_w$  i ładowania  $a_z$ . Sprawność energetyczną ogniw akumulatorowych wyznaczono z zależności:

$$\eta_{en} = \frac{a_w}{a_z} \quad (3.4)$$

$$a_w = \frac{A_w}{A_o} = \frac{Q_w U_w}{Q_{wn} U_n} \quad (3.5)$$

$$a_z = \frac{A_z}{A_o} = \frac{Q_z U_z}{Q_{zn} U_n} \quad (3.6)$$

gdzie:

- $A_w$  - energia pobrana z akumulatora,
- $A_o$  - energia odniesienia akumulatora w pełni naładowanego,
- $A_z$  - energia przekazana do akumulatora,
- $Q_{wn}, Q_w, Q_t$  - pojemność znamionowa, wyładowania i ładowania ogniwa,
- $U_w$  - napięcie wyładowania odpowiadające określonej pojemności wybranej i prądowi wyładowania,
- $U_z$  - napięcie ładowania odpowiadające określonemu stanowi naładowania i prądowi ładowania.

Pojemność ładowania ogniw określa zależność:

$$Q_z = k_z Q_5 = k_z Q_{wn} \quad (3.7)$$

gdzie:

- $k_z$  - współczynnik ładowania: dla ogniw 6A570  $k_z = 1,2$  dla ogniw SN375  $k_z = 1,4$ .

Uwzględniając sprawność urządzeń przetwarzających energię w czasie ładowania i wyładowania zasobnika  $\eta_p$ , wyznaczono współczynnik krotności energii ładowania do energii wyładowania zasobnika w postaci funkcji

$$k_{enz} = f(p_w):$$



$$k_{enz} = \frac{a_z}{a_w \eta_p} = a_{en} + b_{en} p_w \quad (3.8)$$

Przyjmując stałą wartość współczynnika sprawności urządzeń przetwarzających  $\eta_p = 0,85$  oraz stałe wartości współczynników sprawności ładowania równe 0,759 dla ogniw 6A570 i 0,608 dla ogniw SN375 (tab. 3.2) wyznaczono następujące wartości współczynników:

$$a_{en} = 1; \quad b_{en} = 0,1 \text{ kg/W} \quad - \text{ dla ogniw 6A570,}$$

$$a_{en} = 1,65; \quad b_{en} = 0,033 \text{ kg/W} \quad - \text{ dla ogniw SN375.}$$

Pominięcie w obliczeniach zmiany wartości współczynnika sprawności ładowania w funkcji mocy ładowania w zakresie od 1,61 do 5,65 W/kg wiąże się z dopuszczeniem błędu nie przekraczającego 3%.

Współczynniki równania (3.8), (rys. 3.1b) odnoszą się do procesów wyładowywania i ładowania przebiegających w stanach quasi-ustalonych, co ma miejsce w pojazdach hybrydowych sieciowo-akumulatorowych. W pojazdach spalinowo-akumulatorowych, gdzie zasobnik pokrywając jedynie niedobory mocy szczytowej pracuje w stanach przejściowych, wartości współczynników  $k_{enz}$  są niższe.

### 3.2.4. Stopień wykorzystania energii znamionowej ogniw akumulatorowych

Stopień wykorzystania energii znamionowej ogniw przy wyładowaniu energii odpowiadającej 1J/kg obliczono z zależności:

$$k_q = \frac{100\%}{q_{en} \cdot 3600} \left[ \frac{\% \cdot \text{kg}}{\text{J}} \right] \quad (3.9)$$

gdzie:

$q_{en}$  - jednostkowa pojemność energetyczna zasobnika w Wh/kg odpowiadająca określonej jednostkowej mocy wyładowania.

Wyniki obliczeń  $k_q$  dla ogniw 6A570 oraz SN375 przedstawiono w postaci charakterystyki  $k_q = f(p_w)$  na rys. 3.1c. Otrzymane charakterystyki  $k_q = f(p_w)$  można przedstawić z wystarczającą dokładnością w granicach dopuszczalnych obciążeń ogniw akumulatorowych za pomocą równania:

$$k_q = a_q + b_q p_w \left[ \frac{\% \cdot \text{kg}}{\text{J}} \right] \quad (3.10)$$

gdzie:

$p_w$  - moc jednostkowa wyładowania w W/kg.

Obliczone wartości współczynników równania (3.10) dla wyładowań quasi-ustalonych wynoszą:

- ogniwo 6A570:  $a_q = 0,66 \cdot 10^{-3} \% \cdot \text{kg/J}$ ;  $b_q = 0,054 \cdot 10^{-3} \% \cdot \text{kg}^2/\text{W}^2 \text{s}$
- ogniwo SN375:  $a_q = 1,10 \cdot 10^{-3} \% \cdot \text{kg/J}$ ;  $b_q = 0,0275 \cdot 10^{-3} \% \cdot \text{kg}^2/\text{W}^2 \text{s}$ .

### 3.3. Zespoły prądotwórcze

#### 3.3.1. Moce jednostkowe zespołów prądotwórczych

Podstawowym źródłem zasilania silników trakcyjnych autonomicznej lokomotywy hybrydowej jest zespół prądotwórczy. Ze względu na ograniczone dopuszczalne naciski na osi lokomotywy oraz ograniczone gabaryty, moce jednostkowe zespołów prądotwórczych powinny cechować się wysokimi wartościami.

Powyższy wymóg jest sprzeczny z następnym wymogiem dotyczącym uzyskania długiego przebiegu międzynaprawczego. Jednym z ważniejszych czynników decydujących o powyższym jest znamionowa prędkość obrotowa (średnia prędkość tłoka) silnika spalinowego. Silniki wolnoobrotowe ( $n_n < 1000$  obr/min) cechują się długimi przebiegami międzynaprawczymi oraz niskimi mocami jednostkowymi. O wartości mocy jednostkowej zespołu prądotwórczego decydują: moc znamionowa silnika spalinowego oraz masy: silnika, prądnicy głównej, wzbudnicy i prądnicy pomocniczej.

Na podstawie analizy parametrów kilkudziesięciu rozwiązań silników spalinowych o mocach rzędu kilkuset kW (rys. 3.2) wyznaczono następujące zależności umożliwiające określenie przybliżonej masy silnika:

- dla silników o prędkości znamionowej  $n_D = 1000$  obr./min

$$m_D = 2100 + 7,83 \cdot P_{Dn} \quad [\text{kg}] \quad (3.11)$$

- dla silników o prędkości znamionowej  $n_D = 1500$  obr./min

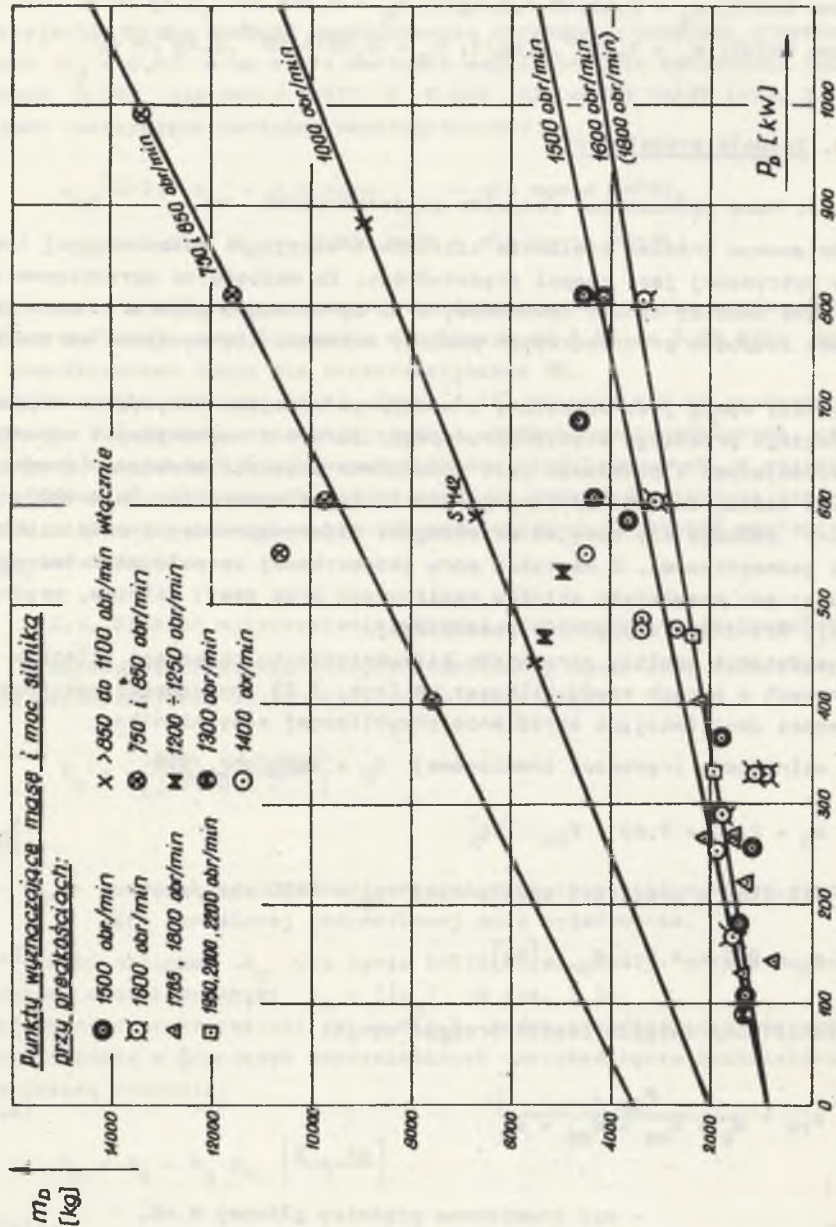
$$m_D = 900 + 4,2 \cdot P_{Dn} \quad [\text{kg}] \quad (3.12)$$

Moc jednostkowa zespołu prądotwórczego wynosi:

$$P_{zp} = \frac{P_{Gn}}{m_G + m_{wz} + m_{pp} + m_D} \quad (3.13)$$

gdzie:

- $P_{Gn}$  - moc znamionowa prądnicy głównej w kW,
- $m_G, m_{wz}, m_{pp}, m_D$  - masy prądnicy głównej, wzbudnicy, prądnicy pomocniczej i silnika spalinowego w kg.



Rys. 3.2. Przebiegi zależności pomiędzy masą i mocą znamionową wysokoprężnych silników spalinowych  
 Fig. 3.2. Courses of dependences between mass and rated power of diesel engines

Wstawiając w miejsce  $m_D$  - masę silnika spalinowego wyznaczoną zgodnie z zależnościami (3.11), (3.12) dla założonej mocy silnika, a w miejsce  $P_{Gn}$ ,  $m_G$ ,  $m_{wz}$ ,  $m_{pp}$  parametry maszyn stosowanych w lokomotywach PKP o mocy 589 kW i 257 kW otrzymamy następujące wartości mocy jednostkowych zespołów prądowców:

$$\begin{aligned} n_D = 1500 \text{ obr./min} & \text{ moce (200-300) kW, } p_{zp} = 0,052 \text{ kW/kg,} \\ n_D = 1000 \text{ obr./min} & \text{ moce (400-600) kW, } p_{zp} = 0,045 \text{ kW/kg.} \end{aligned}$$

Wartości obliczonych mocy jednostkowych odpowiadają pracy ciągłej zespołu prądowcowego.

### 3.3.2. Charakterystyki zużycia paliwa w funkcji obciążenia pewnej klasy wysokoprężnych silników spalinowych

Na podstawie analizy charakterystyk ogólnych kolejowych wysokoprężnych silników spalinowych o zbliżonych wielkościach konstrukcyjnych cylindrów i zbliżonych parametrach pracy, wyznaczono [72] charakterystykę względnego jednostkowego zużycia paliwa  $g$  w funkcji obciążenia  $p$  (rys. 3.3) przyjętą do dalszych rozważań jako krzywą wzorcową. Zakładając, że zastosowane w lokomotywach hybrydowych silniki spalinowe będą cechowały się podobnym przebiegiem jednostkowego zużycia  $g = f(p)$ , obliczono dla przyjętego szeregu mocy znamionowych zużycie paliwa w funkcji obciążenia wg zależności:

$$G = g g_{en} p P_{Dn} \quad (3.14)$$

gdzie:

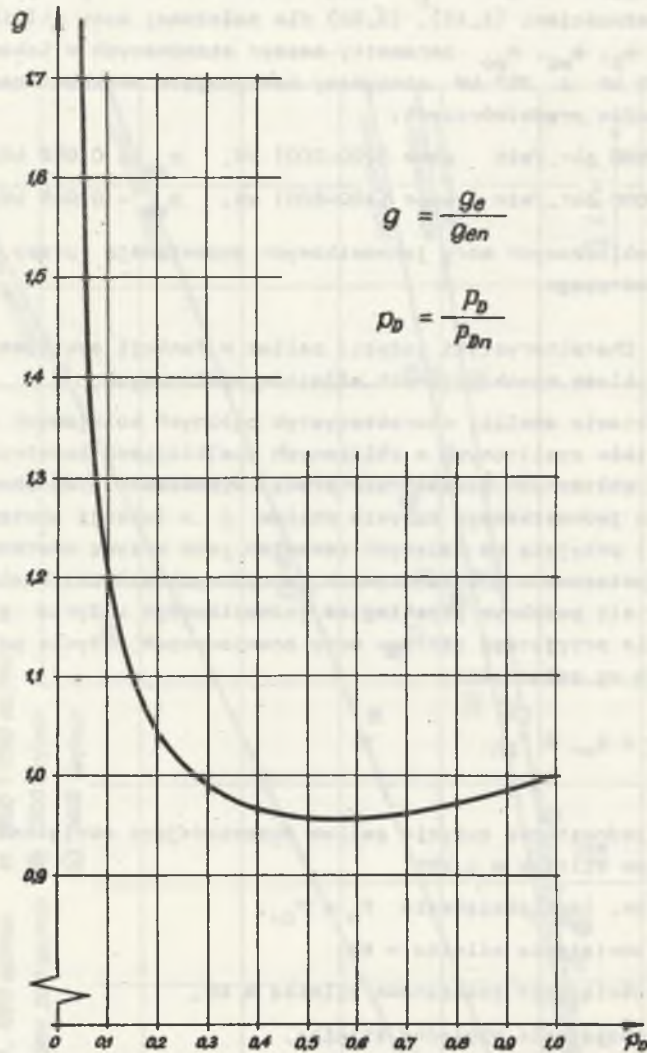
- $g_{en}$  - jednostkowe zużycie paliwa odpowiadające obciążeniu znamionowemu silnika w g/kWh,
- $g_e$  - jw. lecz obciążeniu  $P_D \neq P_{Dn}$ ,
- $P_D$  - obciążenie silnika w kW,
- $P_{Dn}$  - obciążenie znamionowe silnika w kW,
- $p$  - obciążenie względne silnika.

Wyniki obliczeń zużycia paliwa silnika pracującego w stanach ustalonych przedstawiono w postaci charakterystyk  $G_U = f(P_D)$  na rys. 3.4. Otrzymane charakterystyki aproksymowano liniowo odcinkowo dla trzech przedziałów obciążeń silników i opisano następującymi równaniami:

$$G(P_D) = G_0 + dP_D \quad \text{dla} \quad 0 \leq P_D \leq 0,25 P_{Dn}, \quad (3.15)$$

$$G(P_D) = eP_D \quad \text{dla} \quad 0,25 P_{Dn} < P_D \leq 0,7 P_{Dn}, \quad (3.16)$$

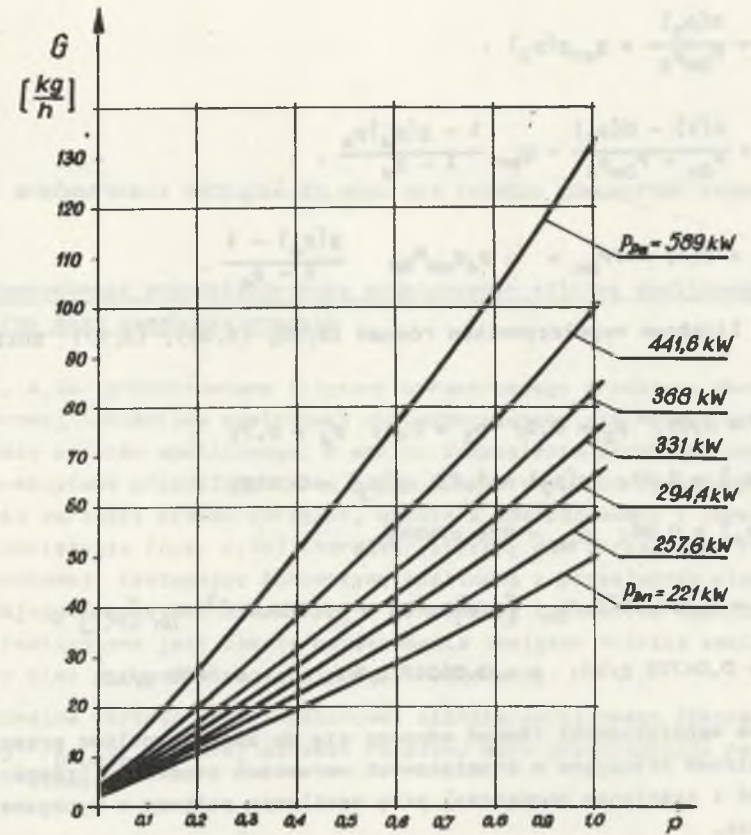
$$G(P_D) = fP_D + G_f \quad \text{dla} \quad 0,7 P_{Dn} < P_D \leq P_{Dn}. \quad (3.17)$$



$$g = \frac{g_e}{g_{en}}$$

$$p_D = \frac{P_D}{P_{Dn}}$$

Rys. 3.3. Charakterystyka względnego jednostkowego zużycia paliwa w funkcji obciążenia dla pewnej klasy wysokoprężnych silników spalinowych  
 Fig. 3.3. Characteristic curves of relative unit power consumption in load function for a certain class of diesel engines



Rys. 3.4. Charakterystyki zużycia paliwa w funkcji obciążenia dla pewnej klasy wysokoprężnych silników spalinowych  
 Fig. 3.4. Characteristic curves of fuel consumption load function for a certain class of diesel engines

Współczynniki równań (3.15), (3.16), (3.17) wyznaczyć można na podstawie charakterystyk  $g = f(p)$  - rys. 3.3 i  $G = f(p)$  - rys. 3.4 oraz zależności (3.14).

Jeżeli  $p_2 = 2p_1$ , to

$$G_0 = G(p_1) - [G(p_2) - G(p_1)] =$$

$$= P_{Dn} g_{en} [2g(p_1)p_1 - g(p_2)p_2] \quad (3.18)$$

$$d = \frac{G(p_2) - G_0}{P_{Dn} p_2} = g_{en} [2g(p_2) - g(p_1)] \quad (3.19)$$

$$e = \frac{G(p_3)}{P_{Dn} p_3} = g_{en} g(p_3) \quad (3.20)$$

$$f = \frac{G(1) - G(p_4)}{P_{Dn} - P_{Dn} p_4} = g_{en} \frac{1 - g(p_4) p_4}{1 - p_4} \quad (3.21)$$

$$G_f = G(1) - f P_{Dn} = P_{Dn} g_{en} p_4 \frac{g(p_4) - 1}{1 - p_4} \quad (3.22)$$

Wartości liczbowe współczynników równań (3.15), (3.16), (3.17) obliczono dla:

$$p_1 = 0,05; \quad p_2 = 0,1; \quad p_3 = 0,4; \quad p_4 = 0,7;$$

$$g(p_1) = 1,64; \quad g(p_2) = 1,2; \quad g(p_3) = 0,965;$$

$$g(p_4) = 0,96; \quad g_{en} = 224 \text{ g/kWh};$$

$$G_o = 2,739 \cdot 10^{-3} P_{Dn} \text{ [g/s]} \quad G_f = -5,555 \cdot 10^{-3} P_{Dn} \text{ [g/s]} ;$$

$$d = 0,04729 \text{ g/kJ}; \quad e = 0,06017 \text{ g/kJ}; \quad f = 0,0803 \text{ g/kJ}.$$

Wyznaczone współczynniki równań odnoszą się do zużycia paliwa przez silniki spalinowe pracujące w znamionowych warunkach otoczenia (temperatura, wilgotność i ciśnienia powietrza) przy zasilaniu paliwem o wymaganej kaloryczności.

#### 4. ZASADY WYRÓWNYWANIA OBCIĄŻEŃ SILNIKA SPALINOWEGO LOKOMOTYWY HYBRYDOWEJ

##### 4.1. Wyznaczenie przedziałów mocy znamionowych silnika spalinowego oraz masy zasobnika energii

Na rys. 4.1a przedstawiono fragment uproszczonego przebiegu obciążenia manewrowej lokomotywy spalinowej charakteryzujący się niskim wykorzystaniem mocy silnika spalinowego. W wyniku podzielenia przebiegu obciążenia na 30-minutowe przedziały czasu pracy lokomotywy, uporządkowania i uśrednienia wartości czasów obciążeń, uzyskano uporządkowany i uśredniony przebieg obciążenia (rys. 4.1b) charakterystyczny dla określonego rejonu pracy manewrowej. Zastępując lokomotywę spalinową z przekładnią elektryczną rozwijającą maksymalną moc  $P_{max}$  równoważną lokomotywą hybrydową, w której realizowana jest zasada wyrównywania obciążeń silnika spalinowego, należy mieć na uwadze następujące uwarunkowania:

a) Minimalna wartość mocy znamionowej silnika spalinowego lokomotywy hybrydowej  $P_{Dnmin}$ , której schemat rozplýwu mocy przedstawiono na rysunku 4.2, wynosi:

$$P_{Dnmin} = \frac{P_o \Delta t_o + \sum_{i=1}^n P_i \Delta t_i k_{enzi}^2 G_i k_{pz}}{\Delta t_o + \sum_{i=1}^n \Delta t_i k_{enzi}^2 G_i} \quad (4.1)$$

gdzie:

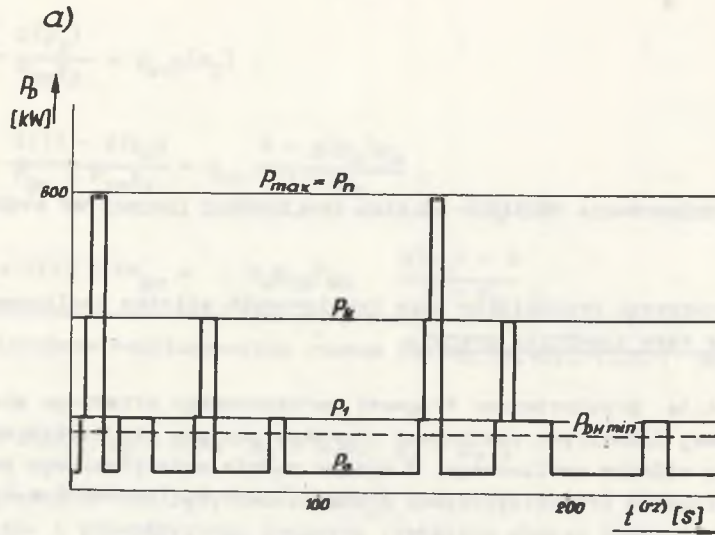
$P_o \Delta t_o$  - moc i czas pracy silnika lokomotywy przy biegu jałowym w 30-minutowym przedziale czasu pracy (rys. 4.1b),

$P_i \Delta t_i$  - moce i czasy pracy na kolejnych pozycjach jazdy w 30-min. przedziale czasu pracy lokomotywy,

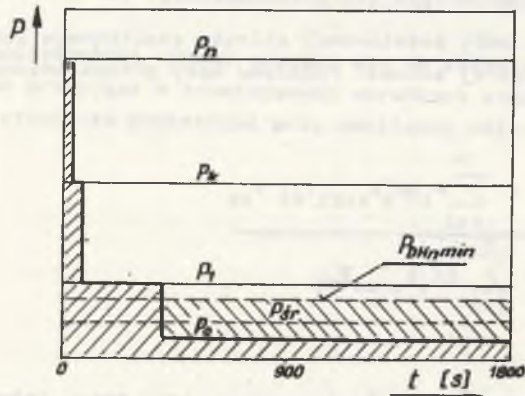
$k_{enzi}$  - współczynniki krotności energii ładowania do energii wyładowania (3.8) gałęzi zasobnika energii lokomotywy hybrydowej (rys. 4.2),

$\eta_{Gi}$  - współczynniki sprawności prądnicy głównej lokomotywy,

$k_{pz}$  - współczynnik uwzględniający wzrost zapotrzebowanej mocy lokomotywy hybrydowej (4.10) proporcjonalny do zwiększonej masy składu manewrowego wynikającej z dołączenia tendra bez osi napędnych do lokomotywy.



b)

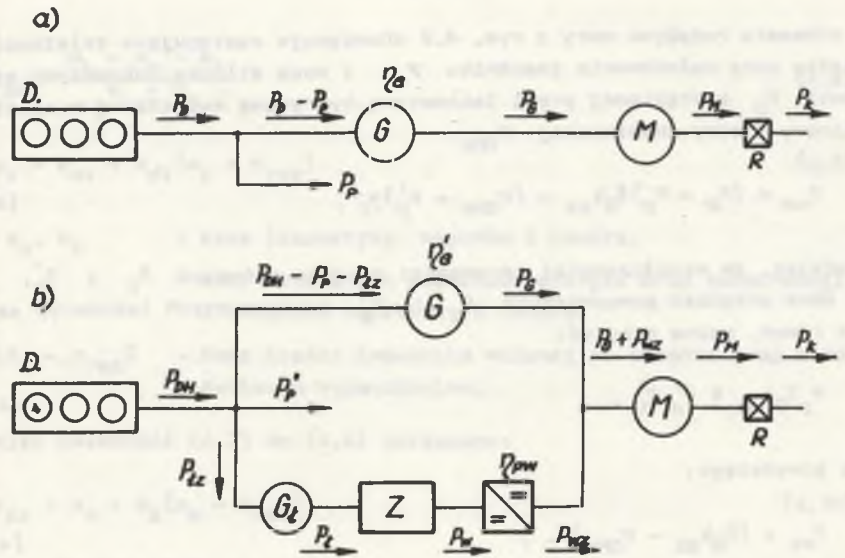


Rys. 4.1. Przebiegi obciążenia silnika spalinowego lokomotywy manewrowej

a) Przebieg obciążenia w funkcji czasu, b) uporządkowany i uśredniony przebieg obciążenia

Fig. 4.1. Load diagram of shunting locomotive diesel engine

a) load diagram in time function, b) systematized and average load diagram



Rys. 4.2. Schemat rozpiływu mocy

a) lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną, b) lokomotywy hybrydowej

Fig. 4.2. A scheme of power propagation of

a) diesel locomotive with electrical transmission, b) hybrid locomotive

b) Maksymalna wartość mocy znamionowej silnika spalinowego lokomotywy hybrydowej  $P_{DHnmax}$  powinna być mniejsza od maksymalnego obciążenia silnika lokomotywy spalinowej realizującej określony rodzaj pracy manewrowej

$$P_{DHnmax} < P_{max} \quad (4.2)$$

Niespełnienie warunku (4.2) będzie wiązało się ze wzrostem kosztów eksploatacji lokomotywy hybrydowej ponad koszty eksploatacji dotychczas stosowanych lokomotyw spalinowych, co wynika z analizy przedstawionej w rozdziale 5 niniejszej pracy.

c) Minimalna masa zasobnika energii wynika bezpośrednio z maksymalnej mocy wyładowania zasobnika  $P_{wzmax}$  oraz dopuszczalnej jednostkowej mocy wyładowania zasobnika  $P_{wzmax}$ :

$$m_z = \frac{P_{wzmax}}{P_{wzmax}} \quad (4.3)$$

Dla schematu rozpięty mocy z rys. 4.2 obowiązuje następująca zależność pomiędzy mocą wyładowania zasobnika  $P_{wz}$  i mocą silnika lokomotywy spalinowej  $P_D$  zastąpionej przez lokomotywę hybrydową wyposażoną w silnik spalinowy o mocy znamionowej  $P_{DHn}$ :

$$P_{wz} = (P_D - P_p) \eta_G k_{pz} - (P_{DHn} - P_p') \eta_G' \quad (4.4)$$

Zakładając, że współczynniki sprawności prądnic głównych  $\eta_G$  i  $\eta_G'$ , oraz moce urządzeń pomocniczych  $P_p$  i  $P_p'$  analizowanych lokomotyw są sobie równe, można przyjąć:

$$P_p \eta_G k_{pz} \cong P_p' \eta_G' \quad (4.5)$$

Wobec powyższego:

$$P_{wz} = (P_D k_{pz} - P_{DHn}) \eta_G \quad (4.6)$$

Maksymalną moc wyładowania zasobnika  $P_{wzmax}$  obliczyć można z zależności (4.4) dla  $P_D = P_{max}$  (rys. 4.1), oraz  $k_{pz} = 1$ , gdy zasobnik o masie  $m_z$  wyznaczonej z zależności (4.3) nie spowoduje przekroczenia założonego nacisku zestawu kołowego lokomotywy na tor. W przypadku przekroczenia ww. nacisku, część zasobnika musi być wożona na tendrze:  $k_{pz} > 1$ .

d) Maksymalna masa zasobnika mieszcząca się w lokomotywie bez tendra wynika z różnicy pomiędzy masą zespołu prądotwórczego  $m_{DG}$  wraz z urządzeniami pomocniczymi  $m_{DGpom}$  lokomotywy spalinowej i masę ww. urządzeń ( $m_{DGH} + m_{DGHpom}$ ) lokomotywy hybrydowej.

$$m_{rez} = (m_{DG} + m_{DGpom}) - (m_{DGH} + m_{DGHpom}) \quad (4.7)$$

Spełnienie warunku (4.5) zapewnia utrzymanie nacisku zestawów kołowych lokomotywy na tor w dopuszczalnych granicach. Większą masę zasobnika można zainstalować jedynie na lokomotywie z tendrem. Rozwiązanie takie, jak wykazała praca [72] jest wtedy tylko korzystne, gdy tender wyposażony w osie napędne uzupełnia masę lokomotywy do wielkości wymaganej przy realizacji prac manewrowych z ciężkimi składami wagonów.

e) Wzrost mocy zapotrzebowanej przez lokomotywę zapewniający zachowanie niezmięnionej dynamiki ruchu zespołu manewrowego powiększonego o tender lokomotywy uwzględniono w zależnościach (4.1) i (4.4) za pomocą współczynnika  $k_{pz}$

$$k_{pz} = \frac{m_L + m_W + m_t}{m_L + m_W} \quad (4.8)$$

$$m_t = m_{ot} + k_{dt}(m_z - m_{rez}) \quad (4.9)$$

gdzie:

$m_L, m_W, m_t$  - masa lokomotywy, wagonów i tendra,

$m_{ot}$  - masa tendra bez zasobnika energii oraz konstrukcji i urządzeń dodatkowych tendra,

$k_{dt}(m_z - m_{rez})$  - masa części zasobnika wożonej na tendrze wraz z dodatkowym wyposażeniem.

Wstawiając zależność (4.7) do (4.6) otrzymano:

$$k_{pz} = a_z + b_z(m_z - m_{rez}) \quad (4.10)$$

$$a_z = \frac{m_L + m_W + m_{ot}}{m_L + m_W} \quad (4.11)$$

$$b_z = \frac{k_{dt}}{m_L + m_W} \quad (4.12)$$

Tabela 4.1

Wartość współczynników  $a_z$  i  $b_z$

Rodzaj pracy manewrowej	$m_L + m_W$	$a_z$	$b_z$
Praca miejscowa	250 t	1,04	0,0048
Praca manewrowa na górcie rozrządowej	1000 t	1,01	0,0012
Praca manewrowa na torze płaskim - - odrzuty	400 t	1,025	0,003
jw., lecz przestawianie	1500 t	1,0067	0,0008

Obliczenia wartości liczbowych współczynników  $a_z$  i  $b_z$  zestawionych w tabeli 4.1 wykonano przy założeniu, że masa lokomotywy  $m_L$  o układzie osi  $B_0B_0$  wynosi 80 t, a masa tendra bez zasobnika 10 t. Jako masę zespołu manewrowego  $m_L + m_W$  przyjęto jego średnią wartość występującą w procesie rozrządu wagonów odpowiadającą poszczególnym rodzajom pracy manewrowej.

#### 4.2. Energia ładowania zasobnika

Energję ładowania zasobnika związaną z realizowaną przez lokomotywę hybrydową pracą manewrową w 30-minutowym przedziale czasu pracy wyznaczono na podstawie uporządkowanych uśrednionych przebiegów obciążenia przedstawionych na rys. 2.6-2.9. W zakresie szczytowych obciążeń przebiegi mocy rozwijanej przez silnik spalinowy w funkcji czasu sprokcyowano liniowo za pomocą równania (2.12):

$$P_D(t) = P_{max} - ct \quad (4.13)$$

Dla założonej mocy znamionowej silnika spalinowego  $P_{DHn}$  lokomotywy hybrydowej, łączny czas pracy zasobnika (4.13) w przedziale 30 min. (rysunek 2.6-2.9) wynosi:

$$t_1 = \frac{P_{max} - P_{DHn}}{c} \quad (4.14)$$

Energję ładowania zasobnika odpowiadającą czasowi pracy zasobnika (0-t<sub>1</sub>) można obliczyć z zależności:

$$A_z = \int_0^{t_1} P_{wz}(t) k_{enz}(p_w) dt \quad (4.15)$$

Moc jednostkową wyładowania zasobnika stanowiącą zmienną współczynnika  $k_{enz}$  (3.8) obliczono z uwzględnieniem sprawności przekształtnika  $\eta_{pw}$  (rys. 4.2) włączonego na wyjściu zasobnika z zależności:

$$p_w = \frac{P_{wz}}{\eta_{pw}^m} \quad (4.16)$$

Korzystając z zależności (3.8), (4.6), (4.13-4.16) otrzymano:

$$A_z = \int_0^{t_1} \eta_G [P_D k_{pz} - P_{DHn}] \left[ a_{en} + b_{en} \eta_G \frac{P_D k_{pz} - P_{DHn}}{m_z \eta_{pw}} \right] dt \quad (4.17)$$

Po podstawieniu w miejsce  $P_D$  zależności (4.13), wyliczeniu całki (4.17) i wprowadzeniu w miejsce  $t_1$  zależności (4.14) otrzymano wzór na obliczenie energii ładowania zasobnika w 30-min. przedziale czasu pracy lokomotywy

$$A_z = \frac{a_{en} \eta_G}{2c} \left[ (P_{max}^2 - P_{DHn}^2) k_{pz} - 2P_{DHn} (P_{max} - P_{DHn}) \right] + \frac{b_{en} \eta_G^2}{3c m_z^2 \eta_{pw}} \left[ (P_{max}^3 - P_{DHn}^3) k_{pz}^2 - 3P_{DHn} (P_{max}^2 - P_{DHn}^2) k_{pz} + 3P_{DHn}^2 (P_{max} - P_{DHn}) \right] \quad (4.18)$$

Dla  $k_{pz} = 1$

$$A_z = \frac{a_{en} \eta_G}{2c} (P_{max} - P_{DHn})^2 + \frac{b_{en} \eta_G^2}{3c m_z^2 \eta_{pw}} (P_{max} - P_{DHn})^3 \quad (4.19)$$

#### 4.3. Stopień wykorzystania energii znamionowej zasobnika

Stopień wykorzystania energii znamionowej zasobnika obciążonego mocą jednostkową  $p_w(t)$  wynikającą z uporządkowanego uśrednionego przebiegu obciążenia (rys. 2.6-2.9) w przedziale czasu od 0-t<sub>1</sub> można obliczyć z zależności:

$$K_q = \int_0^{t_1} k_q(p_w) p_w(t) dt \quad [\%] \quad (4.20)$$

Podstawiając zależności (3.10) i (4.16) do (4.20) otrzymano:

$$K_q = \frac{a_q}{m_z \eta_{pw}} \int_0^{t_1} P_{wz}(t) dt + \frac{b_q}{m_z^2 \eta_{pw}} \int_0^{t_1} P_{wz}^2(t) dt \quad (4.21)$$

Korzystając z zależności (4.6), (4.13), (4.14) i (4.21) otrzymano równanie na obliczenie stopnia wykorzystania energii znamionowej zasobnika (baterii ogniwo akumulatorowych) w 30-minutowym przedziale czasu pracy lokomotywy:

$$K_q = \frac{a_q \eta_G}{2c m_z \eta_{pw}} \left[ (P_{max}^2 - P_{DHn}^2) k_{pz} - 2P_{DHn} (P_{max} - P_{DHn}) \right] + \frac{b_q \eta_G^2}{3c m_z^2 \eta_{pw}} \left[ (P_{max}^3 - P_{DHn}^3) k_{pz}^2 - 3P_{DHn} (P_{max}^2 - P_{DHn}^2) + 3P_{DHn}^2 (P_{max} - P_{DHn}) \right] \quad (4.22)$$

Dla  $k_{pz} = 1$

$$K_q = \frac{a}{2c_m z^2 p_w} \frac{G}{P_{Dn}} (P_{max} - P_{Dn})^2 + \frac{b}{3c_m z^2 p_w} \frac{G}{P_{Dn}} (P_{max} - P_{Dn})^3 \quad (4.23)$$

#### 4.4. Zużycie paliwa przez lokomotywę hybrydową i spalinową

Przedstawione zależności umożliwiające obliczenie zużycia paliwa przez silniki spalinowe lokomotyw hybrydowych zostały wyprowadzone przy założeniu, że ładowanie zasobnika energii będzie realizowane w czasie pracy silnika na biegu jałowym. W tym stanie pracy silnik lokomotywy spalinowej obciążony jest jedynie mocą  $P_0$ , na którą składają się obciążenie prądnicy pomocniczej, sprężarki oraz straty mechaniczne prądnicy głównej i wzbudnicy. W lokomotywie hybrydowej obciążenie silnika na zerowej pozycji nastawnika jazdy jest zwiększane okresowo o moc ładowania  $P_c$  zasobnika. Obliczenie zużycia paliwa obejmuje 30-minutowy przedział czasu pracy lokomotywy. Uporządkowane i uśrednione przebiegi obciążenia lokomotyw (rys. 2.6-2.9) w zakresie szczytowych obciążeń aproksymowano liniowo za pomocą równania (4.13), w którym czas  $t$  równa się łącznemu czasowi pracy silnika  $t_1$  z mocą znamionową  $P_{Dn}$ .

Zużycie paliwa przez silnik spalinowy lokomotywy hybrydowej na zerowej pozycji nastawnika jazdy obliczone z równania (3.15) dla czasu ładowania  $\Delta t_1$  mniejszego od czasu pracy silnika na biegu jałowym  $\Delta t_0$  w 30-minutowym przedziale czasu pracy lokomotywy wynosi:

$$G^{(o)} = (G_0 + dP_0)(\Delta t_0 - \Delta t_1) + [G_0 + d(P_0 + P_1)]\Delta t = G_0\Delta t_0 + dP_0\Delta t_0 + dP_1\Delta t_1 \quad (4.24)$$

Zużycie paliwa związane z realizacją pracy trakcyjnej przez silnik spalinowy:

$$G^{(tr)} = G_0(\sum \Delta t)^I + dA^I k_{pz} + eA^{II} k_{pz} + fA^{III} k_{pz} + G_f(\sum \Delta t)^{III} + \int_0^{t_1} (P_{Dn} f + G_f) dt \quad (4.25)$$

gdzie:

$P_1 \Delta t_1 = A_1$  - energia pobrana przez zasobnik energii w czasie ładowania,

$A^I, A^{II}, A^{III}$  - praca, jaką wykona silnik spalinowy w przedziałach wyznaczonych zależnościami (3.15), (3.16), (3.17) z wyłączeniem pracy przy biegu jałowym lokomotywy,  
 $(\sum \Delta t)^I, (\sum \Delta t)^{II}, (\sum \Delta t)^{III}$  - suma czasów pracy silnika (rys. 2.6-2.9) w przedziale 30-minutowym odpowiadających obciążeniom wyznaczonym zależnościami (3.15), (3.16), (3.17) z wyłączeniem czasu pracy przy biegu jałowym.

Dla  $P_0 < P_1 \leq 0,25P_{Dn}$ ;  $A^I = \sum P_1 \Delta t_1 \Rightarrow (\sum \Delta t_1)^I, \Delta t_0 \notin \Delta t_1^I$   
 Dla  $0,25P_{Dn} < P_1 \leq 0,7P_{Dn}$ ;  $A^{II} = \sum P_1 \Delta t_1 \Rightarrow (\sum \Delta t_1)^{II},$   
 Dla  $0,7P_{Dn} < P_1 \leq P_{Dn}$ ;  $A^{III} = \sum P_1 \Delta t_1 \Rightarrow (\sum \Delta t_1)^{III},$   
 $t_1 \notin \Delta t_1^{III}.$  (4.26)

Zużycie paliwa dla całego 30-minutowego przedziału czasu pracy lokomotywy hybrydowej wynosi:

$$G_{LH} = G^{(o)} + G^{(tr)} = (G_0 + dP_0)\Delta t_0 + dA_1 + G_0(\sum \Delta t)^I + k_{pz}(dA^I + eA^{II} + fA^{III}) + G_f(\sum \Delta t)^{III} + (P_{Dn} f + G_f)t_1$$

$$t_1 = 1800 - (\sum \Delta t)^I - (\sum \Delta t)^{II} - (\sum \Delta t)^{III} - \Delta t_0 \quad [s]. \quad (4.27)$$

W lokomotywie hybrydowej istnieje możliwość pokrywania części energii ładowania  $A_1$  z energii  $A_{1H}$  odzyskiwanej w czasie hamowania lokomotywy. Pozostała część energii  $A_{1D}$  pokrywana przez silnik spalinowy jest równa:

$$A_{1D} = A_1 - A_{1H} \quad (4.28)$$

Obliczając zużycie paliwa przez lokomotywę hybrydową wyposażoną w układ hamowania odzyskowego należy w zależności (4.27) w miejsce  $A_1$  wstawić  $A_{1D}$  z zależności (4.28).



Zużycie paliwa przez lokomotywę spalinową  $G_{LD}$  dla 30-minutowego przedziału czasu pracy obliczyć można z zależności (4.27) przyjmując  $A_1 = 0$ ,  $t_1 = 0$  oraz  $k_{pz} = 1$ .

$$G_{LD} = (G_0 + dP_0)\Delta t_0 + G_0(\sum \Delta t)^I + dA^I + eA^{II} + fA^{III} + G_f(\sum \Delta t)^{III} \quad (4.29)$$

Obliczając zużycie paliwa przez lokomotywę hybrydową i spalinową z zależności (4.27) i (4.29) należy prawidłowo wyznaczyć przedziały obciążeń silników spalinowych określone zależnościami (3.15), (3.16) i (3.17) oraz (4.26). Wartości liczbowe pracy wykonanej przez silniki w kolejnych przedziałach obciążeń  $A^I \div A^{III}$  oraz odpowiadające im czasy pracy  $(\sum \Delta t)^I \div (\sum \Delta t)^{III}$  porównywanych lokomotyw są różne; zależą one bowiem od wartości mocy znamionowych silników  $P_{Dhn}$  i  $P_{Dn}$ .

Zużycie paliwa przez lokomotywę hybrydową dla 30-minutowego przedziału czasu pracy można przedstawić w postaci sumy dwóch składowych:

- składowej zasadniczej zużycia paliwa (4.27)

$$G_1 = G_{LH} - dA_1 \quad (4.30)$$

- składowej związanej z ładowaniem zasobnika energii

$$G_2 = dA_1 \quad (4.31)$$

Na podstawie obliczeń numerycznych [72] zużycia paliwa przez lokomotywy hybrydowe i spalinowe realizujące określony rodzaj pracy manewrowej wyznaczono charakterystyki składowej zasadniczej zużycia paliwa  $G_1$  w funkcji mocy znamionowej silnika spalinowego  $P_{Dhn}$ . Otrzymane charakterystyki aproksymowano liniowo za pomocą równania:

$$G_1 = a_g + b_g P_{Dhn} \quad (4.32)$$

Współczynniki równania (4.31) wyznaczone dla lokomotyw hybrydowych o układzie osi  $B_0B_0$ , realizujących prace manewrowe w rejonie górkę rozrządowej (rys. 2.7), wyposażonych w silniki spalinowe o mocy znamionowej od 220 kW do 368 kW wynoszą:

$$a_g = 7,681 \text{ kg}; \quad b_g = 0,00387 \text{ kg/kW.}$$

Wartości współczynników równania (4.32) odnoszą się do pewnej klasy silników spalinowych analizowanych w pkt. 3.3.2.

## 5. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI ROZWIĄZANIA UKŁADU ZASILANIA SILNIKÓW TRAKCYJNYCH LOKOMOTYWY HYBRYDOWEJ

### 5.1. Wprowadzenie

Przedstawiona w niniejszym rozdziale analiza efektywności rozwiązania lokomotywy hybrydowej obejmuje zagadnienia efektywności ekonomicznej oraz elementy efektów, które dotychczas nie są uwzględniane w rachunku ekonomicznym. Do efektów tych należą między innymi:

- ograniczenie substancji toksycznych emitowanych do atmosfery w wyniku ograniczenia zużycia paliwa przez lokomotywę hybrydową,
- poprawa warunków pracy maszynistów w wyniku ograniczenia wibracji i hałasu wywołanych pracą silnika spalinowego. Wibracje i hałas wzrastają z mocą znamionową silnika spalinowego.

Wskaźnik ekonomicznej efektywności [16] można wyznaczyć jako stosunek rocznych kosztów eksploatacyjnych wraz z odpisami amortyzacyjnymi oraz oprocentowaniem nakładów inwestycyjnych do wielkości efektu użytkowego. Dla prawidłowo zaprojektowanej lokomotywy wskaźnik ten powinien osiągnąć wartość minimalną.

W odniesieniu do lokomotyw manewrowych jako wielkość efektu użytkowego przyjęto średnią liczbę godzin pracy lokomotywy w ciągu roku. W niniejszej pracy analizę efektywności ekonomicznej sprowadzono do analizy przyrostu korzyści wynikających z wprowadzenia lokomotywy hybrydowej w miejsce lokomotywy spalinowej.

### 5.2. Wyznaczenie masy zasobnika energii zapewniającej minimalne zużycie paliwa przez silnik lokomotywy hybrydowej

Niniejsza analiza dotyczy doboru zasobnika energii dla lokomotywy hybrydowej, przeznaczonej do określonej pracy manewrowej. Określenie rodzaju pracy jest istotne, albowiem decyduje ono o charakterze obciążeń lokomotywy, a tym samym rzutuje na obciążenie zasobnika energii. Analizę przeprowadzono na podstawie uporządkowanego uśrednionego przebiegu obciążenia lokomotywy manewrowej.

Dla założonej mocy znamionowej  $P_{Dhn}$  silnika spalinowego lokomotywy hybrydowej z tendrem oraz na podstawie danych konstrukcyjnych projektowanej lokomotywy można określić:

- a)  $m_{rez}$  - masę rezerwową na lokomotywie przeznaczoną na wstawienie części zasobnika energii (4.7),
- b)  $A^I, A^{II}, A^{III}$  - pracę, jaką wykona silnik spalinowy w przedziałach obciążeń wyznaczonych zależnościami (3.15), (3.16), (3.17) z wyłączeniem pracy przy biegu jałowym lokomotywy,
- c)  $(\sum \Delta t)^I, (\sum \Delta t)^{II}, (\sum \Delta t)^{III}$  - sumę czasów pracy silnika w przedziale 30-minutowym odpowiadających obciążeniom wyznaczonym zależnościami (3.15), (3.16), (3.17) z wyłączeniem czasu pracy przy biegu jałowym.

Poszukiwaną masę zasobnika energii wyznaczono z zależności:

$$\frac{d(G_{LH})}{d(m_z)} = 0 \quad (5.1)$$

Z wyliczonej pochodnej zużycia paliwa (4.27) względem masy zasobnika otrzymano następującą zależność:

$$m_z = \left\{ \frac{db_{en} \zeta_G^2 (A_1 C_1 + P_{DHn}^2 t_1 - 2A_2 C_2 P_{DHn})}{b_z [(dA^I + eA^{II} + fA^{III}) + d\zeta_G (a_{en} A_2 + \zeta_G b_z b_{en} A_1)]} \right\}^{1/2} \quad (5.2)$$

$$A_1 = \frac{P_{max}^3 - P_{DHn}^3}{3c} \quad (5.3)$$

$$A_2 = \frac{P_{max}^2 - P_{DHn}^2}{2c} \quad (5.4)$$

$$C_1 = a_z^2 - 2a_z b_z m_{rez} + b_z^2 m_{rez}^2 \quad (5.5)$$

$$C_2 = a_z - b_z m_{rez} \quad (5.6)$$

gdzie:

- $t_1$  - górna granica łącznego czasu pracy silnika (na aproksymowanej liniowo części wykresu obciążenia - rys. 2.6-2.9) wyznaczona z zależności (4.14) poziomem mocy znamionowej  $P_{DHn}$ ,
- $a_{en}, b_{en}$  - współczynniki równania (3.8),
- $d, e, f$  - współczynniki równań (3.15-3.17) określone z zależności (3.19-3.21),

- $a_z, b_z$  - współczynniki określone z zależności (4.11) i (4.12),
- $\zeta_G$  - sprawność prądnicy głównej lokomotywy,
- $m_{rez}$  - masa rezerwowa (4.7).

Dla  $a_z = 1$  i  $m_{rez} = 0$  wyrażenie w nawiasie licznika równania (5.2) przybiera postać:

$$A_1 C_1 + P_{DHn}^2 t_1 - 2A_2 C_2 P_{DHn} = \frac{[P_{max} - P_{DHn}]^3}{3c} \quad (5.7)$$

Wybrane wyniki obliczeń na podstawie zależności (5.2) masy zasobnika energii [72] złożonego z ogniw akumulatorowych typu 6A570 zainstalowanych na tendrze ( $m_{rez} = 0$ ) lub na tendrze i lokomotywie ( $m_{rez} > 0$ ), przeznaczonej do pracy manewrowej na górcie rozrządowej, dla przebiegów obciążeń pomierzonych na lokomotywach SM42 (tab. 2.4) i SM31 (tab. 2.5) zestawiono w tabeli 5.1. W powyższej tabeli zestawiono dodatkowo masy lokomotywy wraz z tendrem ( $m_L + m_t$ ) dla założonych wartości:  $m_L = 80$  t,  $m_{ot} = 10$  t,  $k_{dt} = 1,2$ ; obliczone z zależności (4.9).

Tabela 5.1

Wybrane wyniki obliczeń masy zasobnika energii zapewniającej minimalne zużycie paliwa przez silnik lokomotywy hybrydowej z tendrem

Rodzaj pracy manewrowej: Praca manewrowa na górcie rozrządowej.

Seria lok. spalinowej	SM42	SM31
Wyniki pomiarów obciążeń	Tab. 2.4	Tab. 2.5
Ogniwa typu	6A570	6A570

		$P_{DHn}$ [kW]:			
		200	257,6	257,6	331
$m_{rez}$ [kg]	$m_z$ [kg] :				
0		12980	8900	16040	8160
6000		12770	8700	15720	7900
$m_{rez}$ [kg]	$m_L + m_t$ [kg]				
0		105580	100680	109250	99790
6000		98120	93240	101660	92280

Dla hybrydowej lokomotywy manewrowej bez tendra, o założonej masie służbowej  $m_L$ , masa zasobnika energii złożonego z ogniw akumulatorowych, zapewniająca minimalne zużycie paliwa będzie zawsze równa masie rezerwowej  $m_{rez}$  (4.7), czyli maksymalnej masie ogniw, jaką można zbudować w lokomotywie. Powyższe wynika bezpośrednio z zależności (4.19), w której masa zasobnika energii  $m_z$  znajduje się w mianowniku drugiego członu ww. zależności wyznaczającej energię ładowania zasobnika  $A_z$ , stanowiącą składową równania (4.27) na obliczenie zużycia paliwa lokomotywy hybrydowej.

### 5.3. Analiza przyrostu korzyści wynikających z wprowadzenia do eksploatacji lokomotyw hybrydowych

#### 5.3.1. Wyznaczenie różnicy kosztów eksploatacji lokomotywy spalinowej i hybrydowej

Niniejsza analiza przyrostu korzyści z wprowadzenia do eksploatacji manewrowych i przemysłowych lokomotyw hybrydowych w miejsce dotychczas eksploatowanych lokomotyw spalinowych odniesiona została do różnicy całkowitych rocznych kosztów eksploatacji lokomotyw spalinowych i hybrydowych. Różnica kosztów eksploatacji wynika z zastąpienia w spalinowej lokomotywie manewrowej zespołu prądowłórczego dużej mocy zespołem o mniejszej mocy wspomaganym przez zasobnik energii.

Całkowite roczne koszty eksploatacji lokomotywy spalinowej bez uwzględnienia zysku z włożonego kapitału wynoszą:

$$K_{LD} = (I_{LD} + I_{LDlok}) P_{am} + K_{LDrem} + K_{LDpal} + K_{LDwyp} + K_{LDbryg} = K_{LDam} + K_{LDlokam} + K_{LDrem} + K_{LDpal} + K_{LDwyp} + K_{LDbryg} \quad (5.8)$$

gdzie:

- $I_{LD}$  - cena zakupu nowej lokomotywy spalinowej (z silnikiem Diesla),
- $I_{LDlok}$  - koszty pomieszczeń lokomotywowni przypadające na 1 lokomotywę,
- $P_{am}$  - odpisy amortyzacyjne (wartość średnia),
- $K_{LDrem}$  - roczne koszty napraw lokomotywy spalinowej,
- $K_{LDpal}$  - roczne koszty paliwa (oleju napędowego) oraz oleju silnikowego,
- $K_{LDwyp}$  - roczne koszty zakupu smarów, piasku, klocków hamulcowych i magazynowania wymienionych materiałów,
- $K_{LDbryg}$  - koszty zatrudnienia brygad obsługi i maszynistów przypadające na 1 lokomotywę,

- $K_{LDam}$  - koszty amortyzacji lokomotywy spalinowej,
- $K_{LDlok.am.}$  - koszty amortyzacji pomieszczeń lokomotywowni przypadające na 1 lokomotywę.

Całkowite roczne koszty eksploatacji lokomotywy hybrydowej zależą od przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego. Niniejsza analiza obejmuje 2 rozwiązania bazujące na podwoziu wyposażonym w silniki trakcyjne oraz pudle lokomotywy SM42 o układzie osi  $B_0B_0$ , wyposażonej w zespół prądowłórczy.

1. W rozwiązaniu I zasobnik mieści się w pudle lokomotywy o układzie osi  $B_0B_0$ .

2. W rozwiązaniu II zasobnik podzielony jest na dwie części. W pudle lokomotywy mieści się część zasobnika o masie  $m_{rez}$ , zaś w tendrze wyposażonym w 2 osie napędne pozostała część zasobnika o masie  $m_z - m_{rez}$ . Układ osi w rozwiązaniu II:  $B_0B_0 + B_0$ .

Całkowite roczne koszty eksploatacji lokomotywy hybrydowej wynoszą:

$$K_{LH} = K_{LHam} + K_{LHlok.am} + K_{LHrem} + K_{LHpai} + K_{LHwyp} + K_{LHbryg} + K_{zam} + K_{dzam} + K_{zrem} + K_{dzrem} \quad (5.9)$$

We wzorze (5.9) wprowadzono następujące dodatkowe oznaczenia:

- $K_{zam}$  - koszt amortyzacji zasobnika,
- $K_{zrem}$  - koszt napraw zasobnika,
- $K_{dzam}$  - koszt amortyzacji urządzeń dodatkowych umożliwiających włączenie zasobnika do obwodu głównego lokomotywy oraz urządzeń do wentylacji,
- $K_{dzrem}$  - koszt napraw urządzeń dodatkowych wymienionych wyżej.

Różnica całkowitych rocznych kosztów eksploatacji lokomotywy spalinowej i hybrydowej wynosi:

$$\Delta K = K_{LD} - K_{LH} = (K_{LDam} - K_{LHam}) + (K_{LDlok.am} - K_{LHlok.am}) + (K_{LDrem} - K_{LHrem}) + (K_{LDpal} - K_{LHpai}) + (K_{LDwyp} - K_{LHwyp}) + (K_{LDbryg} - K_{LHbryg}) - (K_{zam} + K_{zrem} + K_{dzam} + K_{dzrem}) \quad (5.10)$$

Niżej wyszczególniono koszty, które znoszą się w wyniku substytucji elementów składników kosztów:

a) Koszty amortyzacji części lokomotywowni oraz koszty jej wyposażenia przypadające na jedną lokomotywę spalinową i hybrydową o tej samej liczbie osi napędnych i masie znoszą się.

Uwzględniając możliwość stosowania w lokomotywie hybrydowej hamowania ze zwrotem energii do zasobnika, otrzymamy z jednej strony niższe koszty wyposażenia lokomotywy w klocki hamulcowe, zaś z drugiej strony dodatkowe koszty związane z wyposażeniem lokomotywni w urządzenia do ładowania baterii akumulatorów i ich konserwacji.

Można więc przyjąć, że:

$$(K_{LDlok\ am} - K_{LHlok\ am}) + (K_{LDwyp} - K_{LHwyp}) \cong 0. \quad (5.11)$$

b) Założono także, że różnica kosztów utrzymania brygad obsługi bieżącej lokomotyw i maszynistów dla porównywanych lokomotyw jest pomijalna. Koszt obsługi zasobnika złożonego, np. z ogniw akumulatorowych kompensowany jest wyższym kosztem obsługi silnika spalinowego o mocy  $P_{Dn} > P_{DHn}$  w lokomotywie spalinowej.

$$(K_{LDbryg} - K_{LHbryg}) \cong 0. \quad (5.12)$$

c) różnica kosztów amortyzacji lokomotywy spalinowej  $K_{LDam}$  i lokomotywy hybrydowej  $K_{LHam}$  (bez uwzględnienia kosztów zasobnika) wynika z różnicy ceny zakupu zespołu prądowłórczego oraz urządzeń pomocniczych związanych z zespołem prądowłórczym.

Przyjmując, że cena zakupu zespołu prądowłórczego jest funkcją jego mocy znamionowej, można napisać:

$$I_{DG} = a_{DGI} + b_{DGI}P_{Dn} \quad (5.13)$$

$$I_{DGH} = a_{DGI} + b_{DGI}P_{DHn} \quad (5.14)$$

gdzie:

- $P_{Dn}$  - moc znamionowa silnika spalinowego zespołu prądowłórczego lokomotywy spalinowej,
- $P_{DHn}$  - jw., lecz lokomotywy hybrydowej,
- $a_{DGI}, b_{DGI}$  - współczynniki określające cenę zespołu prądowłórczego,

Różnica ceny zakupu zespołów prądowłórczych wraz z urządzeniami pomocniczymi wynosi:

$$I_{DG} - I_{DGH} = b_{DGI}(P_{Dn} - P_{DHn}). \quad (5.15)$$

Różnica kosztów amortyzacji ww. zespołów:

$$(K_{LDam} - K_{LHam}) = b_{DGI}(P_{Dn} - P_{DHn})P_{am}. \quad (5.16)$$

d) Różnica kosztów napraw lokomotywy spalinowej  $K_{LDrem}$  i lokomotywy hybrydowej  $K_{LHrem}$  (bez tendra i zasobnika) wynika z różnicy kosztów napraw zespołów prądowłórczych oraz urządzeń pomocniczych porównywanych lokomotyw. Różnicę kosztów można sprowadzić do postaci równania (5.16):

$$(K_{LDrem} - K_{LHrem}) = b_{DGrem}(P_{Dn} - P_{DHn}). \quad (5.17)$$

e) Różnica kosztów zużycia paliwa i oleju silnikowego jest proporcjonalna do różnicy ilości zużytego paliwa i oleju silnikowego w czasie całorocznej eksploatacji przez lokomotywę spalinową i hybrydową. Różnicę ww. kosztów wyznaczono dla określonych rodzajów pracy manewrowej lokomotyw. Koszt zużywanego przez lokomotywę oleju silnikowego włączono do kosztu paliwa (oleju napędowego) poprzez współczynnik  $k_{ol}$ . Różnicę kosztów paliwa i oleju silnikowego można będzie obliczyć z zależności:

$$(K_{LDpal} - K_{LHpal}) = c_{jpal}(G_{LDr} - G_{LHr})k_{ol} \quad (5.18)$$

gdzie:

- $c_{jpal}$  - cena jednostkowa paliwa,
- $G_{LDr}$  - zużycie paliwa przez silnik lokomotywy spalinowej w ciągu 1 roku,
- $G_{LHr}$  - jw., lecz lokomotywy hybrydowej.

Roczne zużycie paliwa przez lokomotywę spalinową wynosi:

$$G_{LDr} = G_{LD}N \quad (5.19)$$

gdzie:

- $N$  - liczba 30-minutowych przedziałów czasu pracy lokomotywy przypadająca na 1 rok eksploatacji,
- $G_{LD}$  - zużycie paliwa przez lokomotywę realizującą określony rodzaj pracy manewrowej (4.29).

Roczne zużycie paliwa przez lokomotywę hybrydową można przedstawić w postaci sumy składowej zasadniczej (4.30) oraz składowej związanej z ładowaniem zasobnika energii (4.31) i (4.19).

$$G_{LHr} = G_{LH}N = (a_g + b_g P_{DHn} + dA_1)N. \quad (5.20)$$

f) Koszt amortyzacji zasobnika energii  $K_{zam}$  złożonego z ogniw akumulatorowych proponuje się obliczyć z zależności:

$$K_{zam} = c_{jz}^m z \left[ \frac{Lc(1\ rok)}{Lc(gw)} + \frac{1}{T_z} \right] \quad (5.21)$$

$$Lc(1 \text{ rok}) = \frac{K_g N}{100\%} \quad (5.22)$$

gdzie:

- $c_{jz}$  - cena jednostkowa zasobnika,
- $m_z$  - masa zasobnika energii,
- $Lc(gw)$  - gwarantowana liczba cykli pracy zasobnika,
- $N$  - liczba 30-minutowych przedziałów (5.19),
- $Lc(1 \text{ rok})$  - liczba pełnych cykli wyładowania i ładowania zasobnika w ciągu roku,
- $K_q$  - stopień wykorzystania energii znamionowej ogniwa w % (4.23),
- $T_z$  - trwałość ogniwa w latach (bez wyłączeń eksploatacyjnych).

g) Koszt amortyzacji  $K_{dzam}$  urządzeń dodatkowych umożliwiających włączenie zasobnika do obwodu głównego lokomotywy określono na podstawie ceny przekształtnika  $I_{prz}$ , ceny instalacji dodatkowych  $I_{inst}$  oraz stopy amortyzacji  $p_{am}$ :

$$K_{dzam} = (I_{prz} + I_{inst})p_{am} \quad (5.23)$$

h) Koszty napraw  $K_{dzrem}$  ww. urządzeń przyjęto szacunkowo jako wartość stałą.

i) Koszty napraw zasobnika  $K_{zrem}$  uzależniono liniowo w funkcji masy zasobnika:

$$K_{zrem} = a_{zrem} + b_{zrem}m_z \quad (5.24)$$

Różnicę kosztów eksploatacji lokomotywy spalinowej i hybrydowej określonej zależnością (5.10) można sprowadzić po uwzględnieniu zależności (5.11), (5.12) i (5.16)-(5.18) - do następującej postaci:

$$\Delta K = b_{DGI}(P_{Dn} - P_{DHn})p_{am} + b_{DGrem}(P_{Dn} - P_{DHn}) - \sum K_z + c_{jpal} \cdot (G_{LD} - G_{LH})k_{ol} \cdot N \quad (5.25)$$

$$\sum K_z = K_{zam} + K_{zrem} + K_{dzam} + K_{dzrem} \quad (5.26)$$

### 5.3.2. Analiza przyrostu korzyści wynikających z zastąpienia lokomotywy spalinowej lokomotywą hybrydową

a) Wyznaczenie funkcji przyrostu korzyści

W celu wyznaczenia różnicy kosztów eksploatacji w postaci funkcji ograniczonej do dwóch zmiennych, wprowadzono nową zmienną  $Y$ :

$$Y = P_{max} - P_{DHn} \quad (5.27)$$

zdefiniowaną jako zakres wyrównywania obciążeń silnika spalinowego lokomotywy hybrydowej. Powyższa wielkość związana jest bezpośrednio z funkcją opisującą zależność pomiędzy mocą silnika lokomotywy spalinowej  $P_D$  (4.13; 4.14) w zakresie szczytowych obciążeń, a łącznym czasem jej występowania na uporządkowanym uśrednionym przebiegu obciążenia. Wprowadzając w miejsce iloczynów współczynników  $b$  i mocy znamionowej  $P_{DHn}$  w równaniu (5.25) zależność:

$$-bP_{DHn} = bY - bP_{max} \quad (5.28)$$

oraz wykorzystując zależności (4.19), (4.23), (5.19)-(5.22), (5.24), otrzymano nową postać równania określającego różnicę kosztów eksploatacji lokomotywy spalinowej i hybrydowej:

$$\Delta K = K_0 + K_1 Y - K_2 Y^2 - \frac{1}{m_z} K_3 Y^3 - m_z K_4 \quad (5.29)$$

$$K_0 = P_{Dn}(b_{DGI}p_{am} + b_{DGrem}) + c_{jpal}k_{ol}N(G_{DG} - a_g) - (P_{max}K_1 + K_{dz} + a_{zrem}) \quad (5.30)$$

$$K_1 = b_{DGI}p_{am} + b_{DGrem} + c_{jpal}k_{ol}N b_g \quad (5.31)$$

$$K_{dz} = K_{dzam} + K_{dzrem} \quad (5.32)$$

$$K_2 = \frac{c_{jpal}k_{ol}N \cdot d \cdot a_{en}^2 G}{2c} + \frac{c_{jz}N \cdot a_g^2 G}{Lc(gw)100\%2c} \quad (5.33)$$

$$K_3 = \frac{c_{jpal}k_{ol}N \cdot d \cdot b_{en}^2 G}{3c^2 p_w} + \frac{c_{jz}N \cdot b_g^2 G}{Lc(gw)100\%3c} \quad (5.34)$$

$$K_4 = b_{zrem} + c_{jz}T_z^{-1} \quad (5.35)$$

Dzieląc współczynniki równania (5.29) przez cenę jednostkową paliwa  $c_{jpal}$  można wyznaczyć przyrost korzyści wynikających z zastąpienia lokomotywy spalinowej lokomotywą hybrydową w postaci uzyskanego paliwa  $\Delta G_{rp}$ . Na ilość uzyskanego paliwa składają się:

- rzeczywista różnica w zużyciu paliwa pomiędzy lokomotywą spalinową (5.19) i hybrydową (5.20) określona zależnością:

$$\Delta G_r = G_{LDr} - G_{LHr} \quad (5.36)$$

- ilość paliwa, jaką można zakupić za część korzyści określonych równaniem (5.29)

$$\Delta G_r(\text{korz}) = \frac{\Delta K}{c_{jpal}} - \Delta G_r = \Delta G_{rp} - \Delta G_r \quad (5.37)$$

Przyrost korzyści określony w postaci ilości uzyskanego paliwa  $\Delta G_{rp}$  wynosi:

$$\Delta G_{rp} = K_{op} + K_{1p}Y - K_{2p}Y^2 - \frac{1}{m_z} K_{3p}Y^3 - m_z K_{4p} \quad (5.38)$$

$$K_{op} = K_o/c_{jpal}; \quad K_{1p} = K_1/c_{jpal}; \quad K_{2p} = K_2/c_{jpal};$$

$$K_{3p} = K_3/c_{jpal}; \quad K_{4p} = K_4/c_{jpal} \quad (5.39)$$

b) Ekstremum funkcji przyrostu korzyści (5.38)

Do dalszych obliczeń przyjęto następujące oznaczenia pochodnych cząstkowych funkcji przyrostu korzyści.

$$\frac{\partial(\Delta G_{rp})}{\partial Y} = f_y \quad \frac{\partial(\Delta G_{rp})}{\partial m_z} = f_{m_z}$$

$$\frac{\partial^2(\Delta G_{rp})}{\partial Y^2} = f_{yy} \quad \frac{\partial^2(\Delta G_{rp})}{\partial m_z^2} = f_{m_z m_z} \quad (5.40)$$

$$\frac{\partial^2(\Delta G_{rp})}{\partial Y \partial m_z} = f_{ym_z} \quad \frac{\partial^2(\Delta G_{rp})}{\partial m_z \partial Y} = f_{m_z y}$$

Pierwsze pochodne cząstkowe funkcji (5.38) wynoszą:

$$f_y = K_{1p} - 2K_{2p}Y - \frac{3}{m_z} K_{3p}Y^2 \quad (5.41)$$

$$f_{m_z} = \frac{1}{m_z} K_{3p}Y^3 - K_{4p} \quad (5.42)$$

Dla  $f_y = 0$

$$m_z = \frac{3K_{3p}Y^2}{K_{1p} - 2K_{2p}Y} \quad (5.43)$$

Dla  $f_{m_z} = 0$

$$m_z = \left[ Y^3 \frac{K_{3p}}{K_{4p}} \right]^{1/2} \quad (5.44)$$

Drugie pochodne cząstkowe funkcji (5.38) wynoszą:

$$f_{yy} = -2K_{2p} - \frac{6}{m_z} K_{3p}Y \quad (5.45)$$

$$f_{m_z m_z} = -\frac{1}{m_z^3} K_{3p}Y^3 \quad (5.46)$$

$$f_{ym_z} = f_{m_z y} = \frac{3}{m_z^2} K_{3p}Y^2 \quad (5.47)$$

Warunkiem wystarczającym, aby funkcja (5.38) posiadająca ciągle drugie pochodne cząstkowe (5.45)-(5.47) w otoczeniu punktu  $P_0(Y_0, m_{z0})$  posiadała w tym punkcie ekstremum lokalne jest:

$$1. \quad f_y(Y_0, m_{z0}) = 0; \quad f_{m_z}(Y_0, m_{z0}) = 0 \quad (5.48)$$

$$2. \quad W(Y_0, m_{z0}) = \begin{vmatrix} f_{yy}(Y_0, m_{z0}) & f_{ym_z}(Y_0, m_{z0}) \\ f_{m_z y}(Y_0, m_{z0}) & f_{m_z m_z}(Y_0, m_{z0}) \end{vmatrix} > 0 \quad (5.49)$$

Tabela 5.2

Wyniki obliczeń współczynników równania (5.38) dla poziomu kosztów "A"

Rodzaj pracy manewrowej: Praca manewrowa na górcie rozrządowej

Seria lok. spalinowej	SM42	SM31
Moc znamionowa $P_{Dn}$ [kW]	589	883
Układ osi lok. spalinowej	$B_0 B_0$	$C_0 C_0$
Układ osi lok. hybrydowej	$B_0 B_0$	$B_0 B_0 + B_0$
Maksymalna moc $P_{max}$ [kW]	432	494
$Y_{max}$ [kW]	285	262

Współczynniki równania (5.38) dla obciążeń pomierzonych

$G_{DG}$ [kg/0,5 h]	9,632	11,545
$c$ [kW/s]	9,344	3,72
$a_g$ [kg]	7,681	7,301
$b_g$ [kg/kW]	$3,87 \cdot 10^{-3}$	$5,75 \cdot 10^{-3}$
$K_{op}$ [kg]	9273	36140
$K_{1p}$ [kg/kW]	102	129
$K_{2p}$ [kg/kW <sup>2</sup> ]	0,0428	0,1076
$K_{3p}$ [kg <sup>2</sup> /kW <sup>3</sup> ]	2,57	6,45
$K_{4p}$ [kg/kg]	0,273	0,273

Współczynniki równania (5.38) dla górnego końca przedziału ufności wartości oczekiwanych obciążeń ( $\mu_g$ )

$G_{DG}$ [kg/0,5 h]	10,850	13,279
$c$ [kW/s]	4,57	2,183
$a_g$ [kg]	8,925	8,973
$b_g$ [kg/kW]	$4,42 \cdot 10^{-3}$	$6,24 \cdot 10^{-3}$
$K_{op}$ [kg]	5290	33547
$K_{1p}$ [kg/kW]	110	136
$K_{2p}$ [kg/kW <sup>2</sup> ]	0,08759	0,1834
$K_{3p}$ [kg <sup>2</sup> /kW <sup>3</sup> ]	5,25	11,0
$K_{4p}$ [kg/kg]	0,273	0,273

Poszukiwane maksimum lokalne występuje wtedy, . gdy

$$f_{yy}(Y_0^m z_0) < 0 . \quad (5.50)$$

c) Wyznaczenie współczynników funkcji przyrostu korzyści

Dla określenia warunków spełnienia zależności (5.49), (5.50) i obliczenia maksimum funkcji przyrostu korzyści wynikającej z zastosowania lokomotywy hybrydowej w miejsce dotychczas eksploatowanej lokomotywy spalinowej wyznaczono współczynniki funkcji (5.38) odpowiadające poziomowi kosztów "A" (dla poziomu cen z połowy 1988 r.) oraz poziomowi kosztów "B" (dla poziomu cen z końca 1988 r.).

Na podstawie cen obowiązujących w połowie 1988 r. (poziom kosztów "A") określone zostały w pracy [72] następujące wartości współczynników (5.30)-(5.35):

$$b_{DGI} = 24740 \text{ zł/kW}; \quad b_{DGrem} = 3320 \text{ zł/kW}; \quad p_{am} = 0,07;$$

$$K_{dz} = K_{dzam} + K_{dzrem} = 126000 + 60000 = 186000 \text{ zł};$$

$$K_{zrem} = a_{zrem} + m_z b_{zrem}; \quad a_{zrem} = 30000 \text{ zł}; \quad b_{zrem} = 4,05 \text{ zł/kg};$$

$$c_{jpal} = 110 \text{ zł/kg}; \quad c_{jz} = 260 \text{ zł/kg} \quad (\text{dla ogniw 6A570})$$

$$c_{zj}/c_{jpal} = 260/110 = 2,36.$$

W końcu 1988 r. (poziom kosztów "B") nastąpiła zmiana cen ogniw akumulatorowych ( $c_{jz} = 1,5 c_{jz}$ ) oraz składowej kosztów napraw tych ogniw ( $b_{zrem} = 1,5 b_{zrem}$ ) o ok. 50%;  $c_{jz}/c_{jpal} = 3,54$ .

Pozostałe wartości współczynników nie związane z przebiegiem obciążenia oraz poziomem kosztów:

$$N = 290 \text{ dób/rok} \times 23 \text{ godz./dobę} \times 2 \text{ przedz./godz.} = 13340 \text{ przedz./rok},$$

$$k_{oi} = 1,08; \quad a_{en} = 1; \quad b_{en} = 100 \text{ kg/kW} \quad [\text{dla 6A570 (3.8)}],$$

$$a_q = 0,66\% \text{ kg/(kJ)}; \quad b_q = 54\% \text{ kg}^2/(\text{kW}^2\text{s}) \quad [\text{dla 6A570 (3.10)}],$$

$$Lc(gw) = 1000 \text{ cykli (dla 6A570 wg [62]);} \quad T_z = 10 \text{ lat};$$

$$d = 0,04729 \times 10^{-3} \text{ kg/kJ}; \quad \eta_G = 0,9; \quad \eta_{pw} = 0,95.$$

Wyniki obliczeń współczynników funkcji (5.38) dla lokomotyw przewidzianych do realizacji prac manewrowych na górcie rozrządowej zestawiono w tabelach 5.2 i 5.3.

d) Wyznaczenie maksimum funkcji przyrostu korzyści (5.38)

Podstawiając do zależności (5.43) i (5.44) współczynniki funkcji (5.38) zestawione w tabelach 5.2 i 5.3 wyznaczono charakterystyki  $m_z = f(Y)$  dla dwóch wariantów rozwiązań lokomotywy hybrydowej o układach osi  $B_0 B_0$  i  $B_0 B_0 + B_0$ , dla przebiegów obciążeń lokomotyw serii SM42 i SM31 pracujących w rejonie górci rozrządowej, uwzględniające dodatkowo dla lokomotyw sześciosiowych różne poziomy kosztów ogniw akumulatorowych (rys. 5.1, 5.2 i 5.3). Przedstawiony na rys. 5.1 do 5.3 obszar dopuszczalnych rozwiązań wyznaczają następujące proste:

1) prosta wyznaczająca maksymalną wartość zakresu wyrównywania obciążeń  $Y_{max}$ :

$$Y_{max} = P_{max} - P_{DhN}^{(min)} = P_{max} - P_k \quad (5.51)$$

gdzie:

- $P_{max}$  - maksymalna wartość mocy wyznaczona funkcją aproksymującą szczytowy zakres obciążeń silnika spalinowego (rys. 2.6 do 2.9), (2.12), (2.14),
- $P_{DhN}^{(min)} = P_k$  - minimalna wartość mocy znamionowej silnika spalinowego lokomotywy hybrydowej, dla której spełniona jest funkcja przyrostu korzyści (5.38),
- $P_k$  - dolna wartość mocy funkcji aproksymującej (2.12) (rys. 2.7) szczytowy zakres obciążeń silnika spalinowego.

Dla lok. SM42:  $P_k = 147$  kW,  $P_{max} = 432$  kW,  $Y_{max} = 285$  kW;

Dla lok. SM31:  $P_k = 232$  kW,  $P_{max} = 494$  kW,  $Y_{max} = 262$  kW;

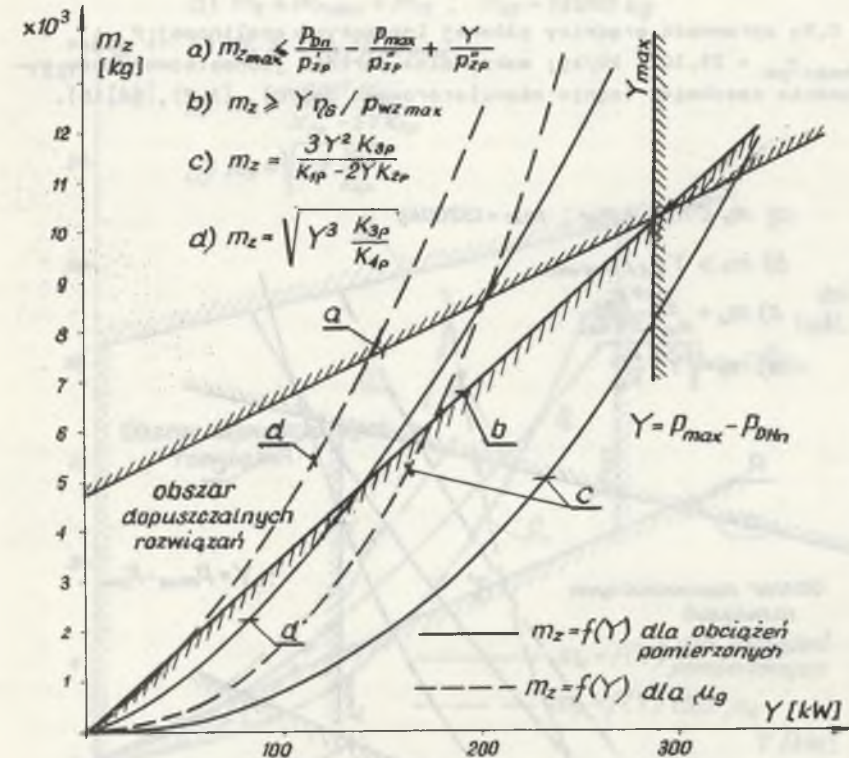
Tabela 5.3

Wyniki obliczeń współczynników równania (5.38) dla poziomu kosztów "B"

Rodzaj pracy manewrowej: Praca manewrowa na górcie rozrządowej

Seria lok. spalinowej	SM31
Moc znamionowa $P_{Dn}$ [kW]	883
Układ osi lok. spalinowej	$C_0 C_0$
Układ osi lok. hybrydowej	$B_0 B_0 + B_0$
Maksymalna moc $P_{max}$ [kW]	494
$Y_{max}$ [kW]	262

Współczynniki równania	Dla obciążeń pomierzonych	Dla górnego końca przedziału ufnosci oczekiwanych obciążeń ( $\mu_g$ )
$G_{DG}$ [kg/0,5 h]	11,545	13,279
$c$ [kW/s]	3,72	2,183
$a_g$ [kg]	7,301	8,973
$b_g$ [kg/kW]	$5,75 \cdot 10^{-3}$	$6,24 \cdot 10^{-3}$
$K_{op}$ [kg]	36140	33547
$K_{1p}$ [kg/kW]	129	136
$K_{2p}$ [kg/kW <sup>2</sup> ]	0,12	0,205
$K_{3p}$ [kg <sup>2</sup> /kW <sup>3</sup> ]	7,06	12,0
$K_{4p}$ [kg/kg]	0,4095	0,4095



Rys. 5.1. Przebiegi zależności pomiędzy masą zasobnika i zakresem wyrównywania obciążeń  $m_z = f(Y)$  wyznaczone na podstawie funkcji przyrostu korzyści (5.38) dla lokomotywy hybrydowej o układzie osi  $B_0 B_0$  - poziom kosztów "A" (tab. 5.2)

Fig. 5.1. Courses of dependences between accumulator mass and load compensation range  $m_z = f(Y)$  set according to the function of gain increment (5.38) for hybrid locomotive with the axis position  $B_0 B_0$  - costs "A" (tab. 5.2)

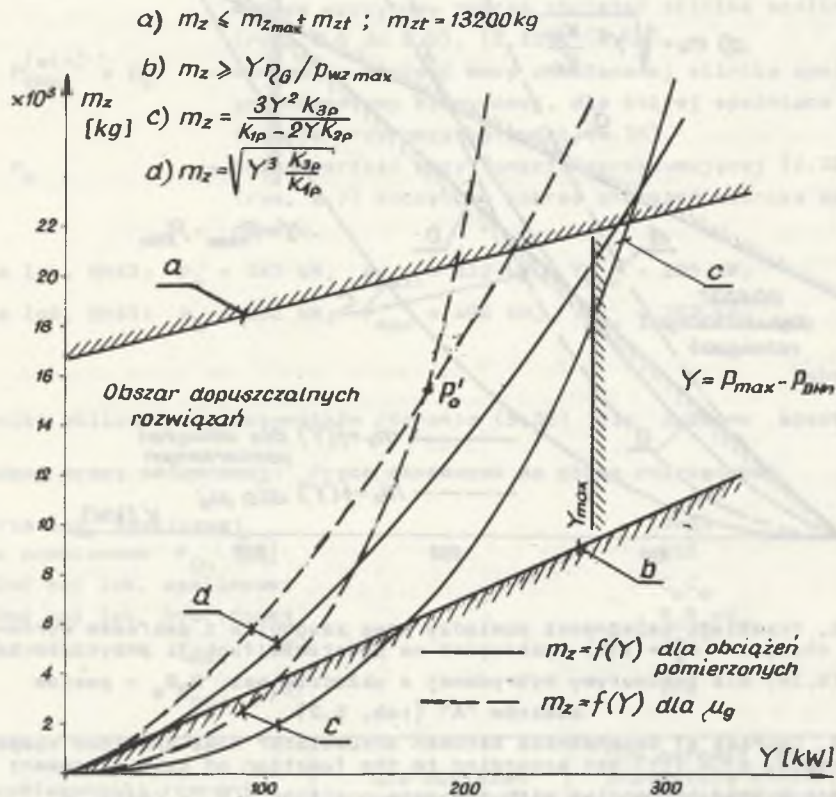
2) prosta określająca minimalną masę zasobnika zapewniającą jego obciążenie w dopuszczalnych granicach:

$$m_{zmin} = \frac{(P_{max} - P_{DhN}) \eta_G}{P_{wmax} \rho_w} = \frac{Y \eta_G}{P_{wmax}} = 36Y \quad (5.52)$$



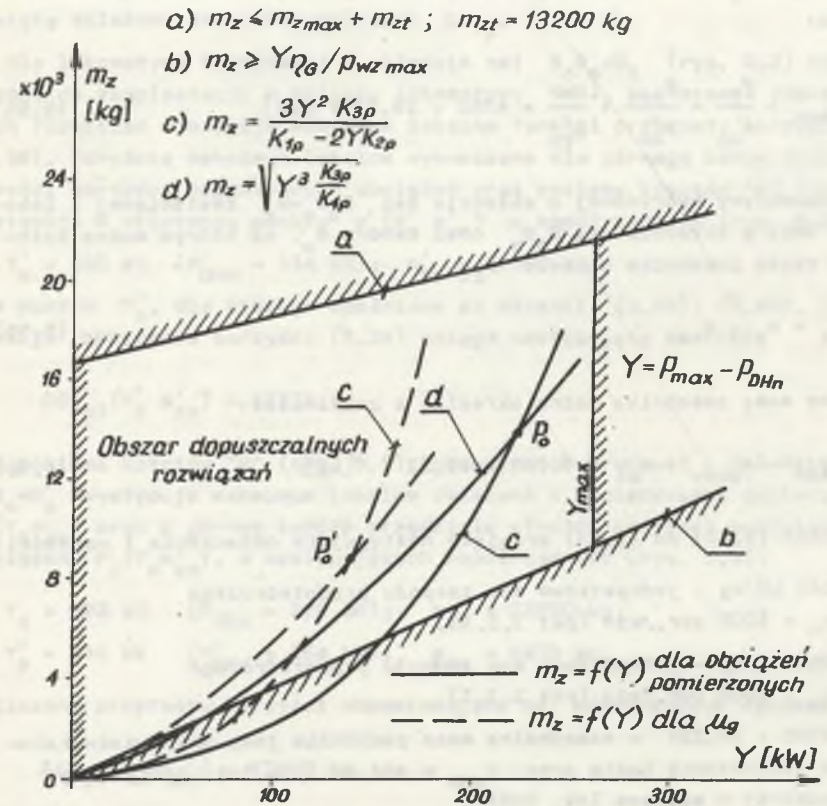
gdzie:

$\eta_G = 0,9$ ; sprawność prądnicy głównej lokomotywy spalinowej;  $P_{wzmax} = P_{wmax} \eta_{pw} = 25 \cdot 10^{-3}$  kW/kg; maksymalna wartość jednostkowej mocy wyładowania zasobnika (ogniw akumulatorowych 6A570), (3.2), (4.16).



Rys. 5.2. Przebiegi zależności  $m_z = f(Y)$  dla lokomotywy hybrydowej o układzie osi  $B_0B_0+B_0$  - poziom kosztów "A" (tab. 5.2)

Fig. 5.2. Courses of dependences  $m_z = f(Y)$  for hybrid locomotive with the axis position  $B_0B_0+B_0$  - costs "A" (tab. 5.2)



Rys. 5.3. Przebiegi zależności  $m_z = f(Y)$  dla lokomotywy hybrydowej o układzie osi  $B_0B_0+B_0$  - poziom kosztów "B" (tab. 5.3)

Fig. 5.3. Courses of dependences  $m_z = f(Y)$  for hybrid locomotive with the axis position  $B_0B_0+B_0$  - costs "B" (tab. 5.3)

3) prosta określająca maksymalną masę zasobnika, jaką można zainstalować w lokomotywie hybrydowej o układzie osi  $B_0B_0$ , określona równaniem (4.7):

$$m_{zmax} = m_{rez} = \frac{P_{Dn}}{P'_{zp}} - \frac{P'_{DHn}}{P''_{zp}} \quad (5.53)$$

Podstawiając w miejsce  $P_{DHn}$  zależność:

$$-P_{DHn} = Y - P_{max} \quad (5.54)$$

otrzymano:

$$m_{zmax} = \frac{P_{Dn}}{p'_{zp}} - \frac{P_{max}}{p''_{zp}} + \frac{Y}{p''_{zp}} = 4780 + 19,23 Y \text{ [kg]} \quad (5.55)$$

Ela lokomotywy hybrydowej o układzie osi  $B_0B_0+B_0$  zestawionej z lokomotywy - bazy o układzie osi  $B_0B_0$  oraz tendra  $B_0$ , na którym można zainstalować część zasobnika o masie  $m_{zt}$

$$m_{zt} = m_z - m_{rez} \quad (5.56)$$

maksymalną masę zasobnika można określić z zależności:

$$m_{zmax}'' = m_{zmax}' + m_{zt} = 16790 + 19,23 Y \text{ [kg]} \quad (5.56)$$

W równaniach (5.51) do (5.54) przyjęto następujące oznaczenia i wartości:

$p_{zp}' = 0,045 \text{ kW/kg}$  - jednostkowa moc zespołu prądotwórczego dla  $n_n = 1000 \text{ obr./min}$  (pkt 3.3.1),

$p_{zp}'' = 0,052 \text{ kW/kg}$  - jednostkowa moc zespołu prądotwórczego dla  $n_n = 1500 \text{ obr./min}$  (pkt 3.3.1),

$m_{zmax} = 3590 + 19,23Y$  - maksymalna masa zasobnika jaką można zainstalować na lokomotywie bazie przy  $P_{max} = 494 \text{ kW}$  (dla lok. hybrydowej wprowadzonej w miejsce lok. SM31),

$m_{zt} = 13200 \text{ kg}$  - masa zasobnika, jaką można zainstalować na tendrze o układzie osi  $B_0$ , do budowy którego wykorzystano wózek lokomotywy SM31 bez środkowej osi napędnej. Powyższa propozycja została przekonsultowana w Biurze Konstrukcyjnym Fabloku.

Dla lokomotywy hybrydowej o układzie osi  $B_0B_0$ , dla której charakterystyki  $m_z = f(Y)$  przedstawiono na rys. 5.1 w obszarze dopuszczalnych rozwiązań nie występuje maksimum lokalne funkcji przyrostu korzyści (5.38). Zakładając następujące parametry układu zasilania silników trakcyjnych lokomotywy hybrydowej mieszczące się w obszarze dopuszczalnych rozwiązań:

$P_{Dn} = 257,6 \text{ kW}$ ;  $Y = 432 - 257,6 = 174,4 \text{ kW}$ ;  $m_z = 8000 \text{ kg}$   
funkcja (5.38) dla współczynników zestawionych w tabeli 5.2 osiągnie następujące wartości:

$$\Delta G_{rp1} = 21870 \text{ kg} \quad (10979 \text{ kg}) \quad (\text{dla obciążeń pomierzonych})$$

$$\Delta G_{rp2} = 16145 \text{ kg} \quad (7117 \text{ kg}) \quad (\text{dla górnego końca przedziału ufności wartości oczekiwanych obciążeń}).$$

W nawiasach podano rzeczywistą różnicę w zużyciu paliwa  $\Delta G_r$  (5.36) stanowiącą składową przyrostu korzyści  $\Delta G_{rp}$ .

Dla lokomotywy hybrydowej o układzie osi  $B_0B_0+B_0$  (rys. 5.2) wprowadzonej do eksploatacji w miejscu lokomotywy SM31, w obszarze dopuszczalnych rozwiązań występuje maksimum lokalne funkcji przyrostu korzyści (5.38). Powyższe maksimum lokalne wyznaczone dla górnego końca przedziału ufności wartości oczekiwanych obciążeń oraz poziomu kosztów "A" (tab. 5.2) występuje w otoczeniu punktu  $P'_0(Y'_0 m'_{z0})$  o współrzędnych (rys. 5.2):

$$Y'_0 = 180 \text{ kW} \quad (P'_{Dn} = 314 \text{ kW}); \quad m'_{z0} = 15300 \text{ kg.}$$

Dla punktu  $P'_0$ , dla którego spełnione są warunki (5.48); (5.49), (5.50) funkcja przyrostu korzyści (5.38) osiąga następującą wartość:

$$\Delta G_{rp3}(Y'_0 m'_{z0}) = 43715 \text{ kg.}$$

Dla poziomu kosztów "B" (tab. 5.3) lokomotywy hybrydowej o układzie osi  $B_0B_0+B_0$  występuje maksimum lokalne związane z obciążeniami pomierzonymi  $P'_0(Y'_0 m'_{z0})$  oraz z górnym końcem przedziału ufności wartości oczekiwanych obciążeń  $P'_0(Y'_0 m'_{z0})$ , o następujących współrzędnych (rys. 5.3):

$$Y_0 = 222 \text{ kW} \quad (P_{Dn} = 272 \text{ kW}); \quad m_{z0} = 13750 \text{ kg,}$$

$$Y'_0 = 140 \text{ kW} \quad (P'_{Dn} = 354 \text{ kW}); \quad m_{z0} = 8970 \text{ kg.}$$

Obliczone przyrosty korzyści odpowiadające ww. współrzędnym wynoszą:

$$\Delta G_{rp4}(Y_0 m_{z0}) = 47615 \text{ kg,}$$

$$\Delta G_{rp5}(Y'_0 m'_{z0}) = 41225 \text{ kg.}$$

Zakładając następujące parametry układu zasilania silników trakcyjnych lokomotywy hybrydowej o układzie osi  $B_0B_0+B_0$  wprowadzonej do eksploatacji w rejonie górki rozrządowej w miejsce lokomotywy spalinowej serii SM31:

$$P_{Dn} = 294,4 \text{ kW}; \quad Y = 199,6 \text{ kW}; \quad m_z = 14000 \text{ kg}$$

obliczono następujące przyrosty korzyści:

- dla obciążeń pomierzonych

$$\Delta G_{rp6} = 50115 \text{ kg} \quad (29068 \text{ kg}) \quad - \text{ poziom kosztów "A",}$$

$$\Delta G_{rp7} = 47364 \text{ kg} \quad (29068 \text{ kg}) \quad - \text{ poziom kosztów "B",}$$

- dla górnego końca przedziału ufności wartości oczekiwanych obciążeń

$$\Delta G_{rp8} = 43316 \text{ kg} \quad (24492 \text{ kg}) \quad - \text{ poziom kosztów "A",}$$

$$\Delta G_{rp9} = 39977 \text{ kg} \quad (24492 \text{ kg}) \quad - \text{ poziom kosztów "B".}$$

#### 5.4. Wnioski

Wyprowadzona w niniejszym rozdziale zależność (5.2) umożliwia obliczenie optymalnej masy zasobnika energii, zapewniającej uzyskanie minimalnego zużycia paliwa przez lokomotywę hybrydową zestawioną z lokomotywy bazy oraz tendra i wyposażoną w silnik spalinowy o założonej mocy znamionowej.

Przykłady obliczeń optymalnej masy zasobnika energii oraz masy lokomotywy z tendrem (tab. 5.1) odniesione do obciążeń lokomotyw serii SM31 pracujących w rejonie górki rozrządowej z ciężkimi składami wagonów lub na torach o niekorzystnym profilu wykazały, że optymalna masa zasobnika energii w małym stopniu zależy od masy rezerwowej  $m_{rez}$ . Łączna masa lokomotywy z tendrem i zasobnikiem przy mocy znamionowej silnika spalinowego  $P_{DHN} = (257,6-331) \text{ kW}$  mieści się w przedziale (90-110) ton, co zbliżone jest do wymagań literatury [12], [15] określających minimalną masę lokomotywy  $m_L$  (lub  $m_L + m_t$ ) rozrządzającej skład wagonów o masie  $m_w$ :

$$m_L \geq 0,064 m_w \quad (5.51)$$

Czynnikiem decydującym o doborze masy zasobnika energii oraz mocy znamionowej silnika spalinowego zespołu prądowłórczego, stanowiących główny człon układu zasilania silników trakcyjnych lokomotywy hybrydowej powinno być uzyskanie maksymalnej korzyści wynikającej z wprowadzenia do eksploatacji ww. lokomotywy w miejsce dotychczas eksploatowanych lokomotyw spalinowych. Wyznaczona w niniejszym rozdziale funkcja przyrostu korzyści związanych z wprowadzeniem do eksploatacji lokomotyw hybrydowych ujmuje nie tylko korzyści w postaci zmniejszonego zużycia paliwa przez ww. lokomotywę, lecz także korzyści związane z ograniczeniem sumy pozostałych składników kosztów eksploatacji.

Wyprowadzona funkcja przyrostu korzyści odniesiona została do jednostek pieniężnych - złotych (5.29) oraz do jednostek towarowych - kg paliwa (5.38). Ta ostatnia postać (5.38) jest wygodna, kiedy ceny paliwa, ogniwo akumulatorowych oraz pozostałego wyposażenia lokomotywy ulegają ciągłym zmianom. Czynniki decydującymi o współrzędnych punktu  $P_0(Y_0, m_{z0})$ , w otoczeniu którego funkcja przyrostu korzyści osiąga wartość maksymalną (rys. 5.2; 5.3) są:

- przebieg obciążenia lokomotywy spalinowej, w miejsce której wprowadzono lokomotywę hybrydową,
- ceny jednostkowe paliw i zasobników energii.

Przeprowadzone obliczenia korzyści wynikającej z wprowadzenia do eksploatacji w rejonie górki rozrządowej w miejsce lokomotywy SM31 lokomotywy hybrydowej o układzie osi  $B_0B_0+B_0$ , wyposażonej w silnik spalinowy o mocy znamionowej  $P_{DHN} = 294,4 \text{ kW}$  i zasobnik energii o masie  $m_z = 14000 \text{ kg}$  złożony z ogniwo akumulatorowych 6A570 wykazały, że:

- korzyść wyznaczona w postaci uzyskanego paliwa  $\Delta G_{rp}$  (5.38) mieści się w granicach od 40 do 50 tysięcy kg paliwa na 1 lokomotywę w ciągu 1 roku,
- na ww. ilość uzyskanego paliwa składają się rzeczywista różnica zużycia paliwa przez lokomotywę spalinową i hybrydową  $\Delta G_r$  (5.36) mieszczącą się w granicach od ok. 24 do 29 tysięcy kg na lokomotywę w ciągu roku oraz pozostała ilość paliwa  $\Delta G_r(\text{korz})$  (5.37), jaką można zakupić za część korzyści  $\Delta G_{rp}$  (5.38).

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku przeprowadzonej analizy i badań eksploatacyjnych obciążeń silników spalinowych lokomotyw manewrowych i przemysłowych (rozd. 2) wykazano, że istnieje szereg rejonów pracy manewrowej charakteryzujących się niskim wykorzystaniem mocy znamionowej lokomotyw. Należą do nich rejon stacji, gdzie realizowana jest praca miejscowa oraz rejon górek rozrządowych. Dla wykazania słuszności tezy, że w wyżej wymienionych rejonach pracy manewrowej bardziej efektywne są lokomotywy hybrydowe, spalinowo-zasobnikowe od obecnie eksploatowanych lokomotyw spalinowych, wyznaczono w ramach analizy efektywności lokomotyw hybrydowych (rozd. 5) funkcję przyrostu korzyści związanych z wprowadzeniem ich do eksploatacji.

Analizę efektywności lokomotyw hybrydowych przeprowadzono na podstawie niżej wyszczególnionej bazy danych:

- uporządkowanych i uśrednionych przebiegów obciążeń silników spalinowych lokomotyw manewrowych. Przebiegi te wyznaczono dla obciążeń pomierzonych oraz dla górnego końca wartości oczekiwanych obciążeń lokomotyw pracujących w wybranych rejonach manewrowych (rozd. 2),
- parametrów i charakterystyk źródeł zasilania silników trakcyjnych (rozd. 3). Przedmiotem analizy parametrów energetycznych źródeł zasilania były wybrane ogniwa akumulatorowe kwasowe i zasadowe, pełniące rolę zasobnika energii oraz zespoły prądotwórcze zestawione z prądnic napędzanych wysokoprężnymi silnikami spalinowymi,
- informacji na temat cen lub stosunku cen paliwa, ogniwa akumulatorowych i zespołów prądotwórczych oraz wybranych składników kosztów eksploatacji lokomotyw spalinowych i hybrydowych.

Współczynnik krotności energii ładowania do energii wyładowania zasobnika oraz stopień wykorzystania energii znamionowej zasobnika, z którego pobrano jednostkę energii wyznaczone (rozd. 3) w postaci funkcji, której zmienną niezależną jest jednostkowa moc wyładowania, stanowiły podstawę do wyprowadzenia zależności (rozd. 4) określających wzajemne związki pomiędzy:

- przebiegiem obciążenia lokomotywy,
- parametrami i charakterystykami źródeł zasilania silników trakcyjnych,
- energią ładowania oraz stopniem wykorzystania zasobnika pracującego w układzie zasilania silników trakcyjnych lokomotywy hybrydowej,
- zużyciem paliwa przez lokomotywę spalinową i hybrydową.

Dla opracowanego algorytmu do wyznaczenia energii ładowania, stopnia wykorzystania zasobnika energii oraz zużycia paliwa, przez lokomotywę, został napisany i uruchomiony program komputerowy. Wyznaczona na podstawie powyższego algorytmu oraz analizy wyników obliczeń i analizy kosztów eksploatacji lokomotyw (rozd. 5) funkcja przyrostu korzyści związanych z wprowadzeniem do eksploatacji lokomotyw hybrydowych, pozwoliła wykazać słuszność tezy postawionej w rozdz. 1. Wyższa efektywność lokomotyw hybrydowych od dotychczas eksploatowanych lokomotyw spalinowych w wybranych rejonach pracy manewrowej sprowadza się do uzyskania następujących korzyści:

- zmniejszenia zużycia paliw i olejów silnikowych,
- ograniczenia kosztów eksploatacji lokomotyw,
- zmniejszenia szkodliwego oddziaływania pracujących lokomotyw na środowisko.

Wyznaczona funkcja przyrostu korzyści umożliwia dokonanie optymalnego doboru układu zasilania silników trakcyjnych lokomotywy hybrydowej, czyli ustalenia optymalnej mocy znamionowej silnika spalinowego oraz masy zasobnika energii.

Wykonana praca pozwala sformułować następujące wnioski szczegółowe:

1. Największą korzyść zapewnia wprowadzenie do eksploatacji lokomotyw hybrydowych o układzie osi  $B_0B_0+B_0$  wyposażonych w silnik spalinowy o mocy ok. 300 kW i zasobnik energii złożony z kwasowych ogniwa trakcyjnych o masie 14000 kg w miejsce dotychczas eksploatowanych w rejonie górki rozrządowej lokomotyw spalinowych serii SM31. Na powyższą korzyść składa się ograniczenie zużycia paliwa w granicach od 24 do 29 tysięcy kg na lokomotywę w ciągu roku oraz ograniczenie pozostałych kosztów eksploatacji (poza kosztem ww. zaoszczędzonego paliwa) równoważnych 16 do 21 tysięcy kg paliwa.

2. Wprowadzenie do eksploatacji lokomotyw hybrydowych o układzie osi  $B_0B_0$  wyposażonych w silnik spalinowy o mocy 257,6 kW i zasobnik złożony z kwasowych ogniwa trakcyjnych o masie 8000 kg, w miejsce dotychczas eksploatowanych lokomotyw serii SM42 w pracach miejscowych [72] oraz w rejonie górki rozrządowej (rozd. 5) zapewni korzyści w postaci ok. 6 do 10 tysięcy kg zaoszczędzonego paliwa na lokomotywę w ciągu roku oraz zmniejszonych całkowitych kosztów eksploatacyjnych.

3. Lokomotywy hybrydowe spalinowo-zasobnikowe umożliwiają zastosowanie stosunkowo prostych układów hamowania z odzyskiem energii. Rozwiązanie takie (analizowane w ramach V etapu pracy 72) zapewnia dodatkowe ograniczenie kosztów eksploatacji lokomotyw.

LITERATURA

Książki i monografie

- [1] Bobrowski D.: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT, Warszawa 1986.
- [2] Bolewski S., Kowalczyk E.: Lokomotywy spalinowe serii SM42. WKŁ, Warszawa 1971.
- [3] Boldov N.A., Stepanov A.D.: Teploelektriceskij podwiżnoj sostav. Transport, Moskva 1968.
- [4] Furman J.: Zespoły napędowe elektrycznych pojazdów trakcyjnych. WKŁ, Warszawa 1975.
- [5] Gajda B.: Stacje rozrządowe. WKŁ, Warszawa 1966.
- [6] Gajda B.: Technologia i automatyzacja pracy stacji. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1983.
- [7] Gajda B.: Technika ruchu kolejowego, cz. 1 i 2. WKŁ, Warszawa 1978.
- [8] Gomółka J., Kowalczyk F., Franke A.: Współczesne chemiczne źródła prądu. MON, Warszawa 1977.
- [9] Habarda D.: Mestetka hromadna doprava. ALFA Bratislava, SNTL Praha 1984.
- [10] Hazem M.M.: Energetika lokomotivov. Transport, Moskva 1977.
- [11] Jansa F.: Elektrická trakcia I tom, ALFA, Bratislava 1976.
- [12] Jansa F.: Elektrická vozidla. VSD, Zilina. ALFA Bratislava 1970.
- [13] Jansa F.: Dieselelektrická vozba. I tom, Technicko-vedecké vydavateľstvi Praha 1951.
- [14] Jaworecki Cz. Teoria trakcji elektrycznej. WK Warszawa 1956.
- [15] Kałuża E.: Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej. Wyd. II. Skrypt uczelniany nr 1066. Politechnika Śląska, Gliwice 1982.
- [16] Kręgielski R.: Wpływ transportu na środowisko. Ocena ekonomiczna. WKŁ, Warszawa 1979.
- [17] Krasnovajew N.I., Barski M.R., Szreder I.B., Vanag J.A.: Kontaktno-akumuljatornaja tjaga na železnodorożnom transportie. Transport, Moskva 1977.
- [18] Kuczewski Z.: Energoelektronika. Skrypt uczelniany nr 734. Wyd. II. Politechnika Śląska, Gliwice 1987.
- [19] Marcyniuk A.: Teoria pomiaru. Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiaru. Skrypt uczelniany Nr 687 Politechnika Śląska, Gliwice 1977.
- [20] Matzke W.: Silniki wysokoprężne pojazdów szynowych, WKŁ, Warszawa 1977.
- [21] Podoski J.: Trakcja spalinowo-elektryczna. WKŁ, Warszawa 1963.
- [22] Podoski J.: Zasady trakcji elektrycznej. WKŁ, Warszawa 1967.
- [23] Podoski R.: Trakcja elektryczna, tom 1 i 2. WK, Warszawa 1951/1954.

- [24] Rozenfeld V.E., Isaer I.P., Sidorov N.N.: Teoria elektriceskoj tjagi. Transport, Moskva 1983.
- [25] Sachs K. Elektrische Triebfahrzeuge tom. 1.2. Wyd. II, Springer Verlag Wien, New York 1973.
- [26] Sobolewski H.: Trakcja elektryczna, spalinowa i parowa. Skrypt uczelniany, Politechnika Warszawska, Warszawa 1963.
- [27] Szelest P.A.: Sovremiennyje promyslennyje teplovozy. Transport, Moskva 1978.
- [28] Szumanowski A.: Akumulacja energii w pojazdach. WKŁ, Warszawa 1984.
- [29] Węgierski J.: Układy torowe stacji. WKŁ, Warszawa 1974.
- [30] Zieliński R.: Tablice statystyczne. PWN, Warszawa 1972.

Artykuły i referaty

- [31] Bolewski S.: Problem ekonomicznego zużycia paliw, energii elektrycznej i smarów w transporcie kolejowym. Trakcja i wagony, nr 5, 1978.
- [32] Bolewski S.: Trakcja elektryczna w pracy manewrowej kolei. Trakcja i wagony, nr 1, 1982.
- [33] Dziuba W.: Zastosowanie prądu przemiennego w lokomotywach spalinowych. Przegląd Kolejowy Elektrotechniczny, nr 5, 1969.
- [34] Gronowicz J.: Eksploatacyjne badania identyfikujące pracę lokomotyw spalinowych. Pojazdy szynowe 1/1969.
- [35] Gronowicz J.: Analiza czynników wpływających na obniżenie zużycia paliwa w procesie eksploatacji lokomotyw spalinowych. Trakcja i wagony, 7-8/1979.
- [36] Gronowicz J.: Trakcja spalinowa w świecie. Stan obecny i tendencje rozwojowe. Trakcja i wagony, nr 9, 1984.
- [37] Gronowicz J.: Wskaźniki energetyczne pracy lokomotyw spalinowych oraz metody normowania zużycia paliwa.
- [38] Kałuża E.: Lokomotywy hybrydowe alternatywą dla manewrowych lokomotyw spalinowych. Semtrak 88. Materiały IV Konferencji Naukowej: Elektrotechnika, elektronika i automatyka w transporcie szynowym. Politechnika Krakowska - Zakopane 1988.
- [39] Kałuża E.: O pewnych aspektach doboru elektrochemicznych zasobnikowych źródeł energii dla pojazdów hybrydowych. XII seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów. Organ: Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej: Zakład Badań Podstawowych MP i PAN Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Gliwice - Wisła 1989.
- [40] Kałuża E.: Analiza i synteza układów regulacji mocy lokomotyw spalinowo-elektrycznych metodami przestrzeni stanów. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka z. 38, Gliwice 1973.
- [41] Kałuża E.: Analiza możliwości i celowości stosowania hybrydowych źródeł zasilania silników trakcyjnych w lokomotywach przemysłowych i manewrowych. Materiały konferencyjne "Nowoczesne Elektryczne Układy Napędowe". Ośrodek Postępu Technicznego w Katowicach. Katowice 1976.
- [42] Kałuża E.: Analiza możliwości stosowania i dobór baterii akumulatorów do napędu głównego wagonów motorowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka z. 54, Gliwice 1976.
- [43] Kałuża E., Janecki R.: Analiza obciążeń, parametrów trakcyjnych oraz wyposażenia lokomotyw spalinowo-elektrycznych pracujących na terenie stacji hutniczych. Referaty II Sympozjum Katowice - Porąbka 1977 "Transport kolejowy". Organizatorzy: Instytut Transportu i Komunikacji Politechniki Śląskiej i Zakład Transportu Kolejowego Huty "Katowice".

- 44] Kałuża E.: Analiza celowości wprowadzania do eksploatacji lokomotyw sieciowo-spalinowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka z. 78, Gliwice 1982.
- 45] Müller J.: Motorové lokomotivy pro hutní průmysl. Strojirenství. SNTL Praha sv. 29 c 11 1979.
- 46] Mróz A.: Średnia moc silnika spalinowego w eksploatacji kolejowej. Silniki spalinowe nr 2, 1971.
- 47] Opava J.: Vyoj a perspektiva motorových lokomotiv s elektrickým prenosom výkonu. Sborník konference cSVTS. Motorové Lokomotivy Karlovy Vary 1982. Dum techniky Plzeň.
- 48] Opava J.: Problematika volby vozebni soustavy v zavodove dopravě. Sborník přednásek za seminare c. V-51. Nove prvky posunovacich lokomotiv ČSD a zavodove dopravy. UKDZ, Praha 1983.
- 49] Pohl J.: Informace o inovaci v oboru motorových lokomotiv. Sborník přednásek za seminare c. V-51. Nove prvky posunovacich lokomotiv ČSD a zavodove dopravy, UKDZ, Praha 1983.
- 50] Praca zbiorowa: Neue Batterien für Elektro-Straßenfahrzeuge. Varta special report 2/1972, 3000 Hannover.
- 51] Rudziński L.: Wymiarowanie modernizowanych stacji rozrządowych. Eksploatacja kolei, nr 3, 1987.
- 52] Schleuter W.: Zur Ermittlung des Ladezustandes von Akkumulatoren. Sonderdruck aus etz - Archiv. Band 4 VDE - Verlag GmbH, Berlin 1982.
- 53] Schleuter W.: Das elektrische Ersatzschaltbild des Bleiakumulators unter Berücksichtigung erzwungener Elektrolytströmung. Sonderdruck aus etz - Archiv. Band 4 VDE - Verlag GmbH, Berlin 1982.
- 54] Schwarz K.: Nabijeni akumulatorowych baterii elektromobilu. Technika elektrických stroju, nr 3, 1973.
- 55] Schwarz K.: Způsoby regulace rychlosti elektromobilu. Technika elektrických stroju, nr 3, 1973.
- 56] Slezák K.: Syntéza stejnosměrného pohonu elektromobilu. Technika elektrických stroju, nr 3, 1973.
- 57] Zalewski R.: Elektryczne lokomotywy sieciowe do pracy manewrowej PKP. Wiadomości elektrotechniczne nr 3-4, 1988.

#### Normy, katalogi, instrukcje, dokumentacje

- 58] PN-71/E-01004: Akumulatory elektryczne. Nazwy i określenia.
- 59] PN-81/E-83006.00: Ogniwa akumulatorowe kwasowe trakcyjne. Ogólne wymagania i badania.
- 50] PN-81/E-83006/01: Ogniwa akumulatorowe kwasowe trakcyjne. Wymiary i pojemności ogniw z płytami pancernymi.
- 51] PN-80/M-34000: Silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym. Charakterystyki.
- 52] Katalog SWW 1134-153: Ogniwa i baterie akumulatorowe trakcyjne. WEMA, Warszawa 1974.
- 53] Instrukcja obsługi: Kwasowe ogniwa trakcyjne z dodatnimi płytami pancernymi. WPM, WEMA, Warszawa 1974.
- 54] Katalog 10-0: Akumulatory zasadowe. WPM WEMA, Warszawa.
- 55] Katalog SWW-0715-1: Silniki wysokoprężne. WPM.
- 56] Katalog 41-M: Maszyny prądu stałego do trakcji elektrycznej. WEMA, Warszawa 1970.

- [67] Varta - Fahrzeug Bleiakumulatoren. Varta Hannover, 1972.
- [68] Polskie Koleje Państwowe: R34 - Instrukcja o pracy manewrowej. WK, Warszawa 1971.
- [69] Fabryka Lokomotyw "Fablok" w Chrzanowie: D.T.R., Lokomotywa spalinowa typu 411D, serii SM31, z przekładnią elektryczną. 1974.

#### Opracowania nieopublikowane

- [70] Dziuba W.: Analiza porównawcza układów regulacyjnych krajowych i zagranicznych lokomotyw spalinowych. Opracowanie nr 255/68. Instytut Elektrotechniki, Warszawa 1965.
- [71] Kałuża E., Opava J.: Kierunki poszukiwań nowych rozwiązań lokomotyw spalinowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 109. Gliwice 1989 (w druku).
- [72] Kałuża E.: Pojazdy hybrydowe. Praca wykonana w ramach CPBP. 02.19. Podstawy rozwoju systemów i środków transportu. Temat 05.17. Etapy I, II i III. 1986/87/88.
- [73] Kałuża E.: Wyrównywanie szczytowych obciążeń silnika spalinowego hybrydowej lokomotywy manewrowej za pomocą zasobnika energii. Archiwum Transportu 1989.
- [74] Praca zbiorowa: Zbadanie możliwości stosowania wysokowydajnych zasobnikowych źródeł energii do napędu głównych manewrowych lokomotyw sieciowo-akumulatorowych oraz do zasilania obwodów pomocniczych pojazdów szynowych. Praca NB-165/114/RE-3/11/9/74 cz. II wykonana w Zespole Elektrycznych Układów Trakcyjnych Politechniki Śląskiej. Gliwice 1975.

HYBRYDOWE LOKOMOTYWY MANEWROWE  
W ŚWIETLE EFEKTYWNOŚCI EKSPLOATACYJNEJ

S t r e z z e n i e

Tematyka pracy obejmuje wybrane zagadnienia budowy i eksploatacji hybrydowych lokomotyw manewrowych przeznaczonych do pracy na niezelektryfikowanych torach stacji rozrządowych PKP oraz na torach stacji zakładowych.

W ramach pracy wykonano analizę i badania eksploatacyjne obciążeń silników spalinowych lokomotyw manewrowych pracujących na wybranych stacjach.

Wyniki badań obciążeń przedstawiono w postaci uporządkowanych i uśrednionych przebiegów obciążeń spalinowych lokomotyw realizujących pracę miejscową na stacjach rozrządowych oraz stacji osobowej i zakładowej, pracę manewrową w rejonie górki rozrządowej i pracę manewrową na torze wyciągowym płaskim. Dalej wyznaczono parametry i charakterystyki wybranych źródeł zasilania silników trakcyjnych lokomotyw hybrydowych: trakcyjnych ogniw akumulatorowych oraz zespołów prądowłórczych.

Charakterystyki energetyczne ogniw akumulatorowych wyznaczone w funkcji jednostkowej mocy wyładowania umożliwiły wyprowadzenie zależności na obliczanie energii ładowania oraz stopnia wykorzystania energii znamionowej ogniw pracujących w układzie zasilania silników trakcyjnych lokomotywy hybrydowej. Wykazano w jakim stopniu powyższe parametry zależą od charakteru obciążenia lokomotywy, mocy znamionowej silnika spalinowego i charakterystyk energetycznych zasobników energii.

W ramach analizy efektywności rozwiązania układu zasilania silników trakcyjnych lokomotyw wyznaczono m.in. funkcję przyrostu korzyści wynikających z wprowadzenia do eksploatacji lokomotyw hybrydowych, spalino-zasobnikowych w miejsce dotychczas eksploatowanych lokomotyw spalino-wych.

ГИБРИДНЫЕ МАНЕВРОВЫЕ ЛОКОМОТИВЫ  
В СВЕТЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Р е з ю м е

Тематика работы охватывает избранные вопросы строения и эксплуатации гибридных маневровых локомотивов предназначенных для работы на незлектрифицированных путях сортировочных станций ПКП и на путях заводских станции.

В рамках работы выполнено анализ и эксплуатационные испытания нагрузок двигателей внутреннего сгорания маневровых локомотивов, работающих на избранных станциях.

Результаты испытаний нагрузок приводятся в виде упорядоченных и усреднённых пробегов тепловозов, выполняющих местную работу на сортировочных станциях, а также на пассажирской и заводской станциях, маневровые работы в районе сортировочной горки и маневровую работу на плоском вытяжном пути. Дальше назначены параметры и характеристики отобранных источников питания тяговых двигателей гибридных локомотивов: тяговых аккумуляторных элементов и агрегатов создающих ток.

Энергетические характеристики аккумуляторных элементов определены в функции удельной мощности разряда дали возможность вывести зависимости на вычисление энергии зарядки и степени использования номинальной энергии элементов работающих в системе питания тяговых двигателей гибридного локомотива. Доказывается в какой степени выше приведённые параметры зависят от характера нагрузки локомотива, номинальной мощности двигателя внутреннего сгорания и энергетических характеристик накопителей энергии.

В рамках анализа эффективности решения системы питания тяговых двигателей локомотива установлено между прочим функцию увеличения выгоды вытекающей из-за введения в эксплуатацию гибридных локомотивов, дизель - аккумуляторных в место тепловозов до сих пор эксплуатируемых.

HYBRID SHUNTING LOCOMOTIVES  
-THEIR EXPLOITATION EFFECTIVENESS

S u m m a r y

The subject of the research covers some problems connected with the design and exploitation of hybrid shunting locomotives to be used on non - electrified tracks of shunting yards of Polish railways (PKP) and factory railways. An analysis and exploitational tests of engine loads in diesel shunting locomotives running on some chosen stations have been performed. The results of these tests are presented as systematized and average load characteristic curves of diesel locomotives shunting locally on shunting yards, railways and factory railways, shunting at a hump as well as other shunting tracks.

Parameters and characteristic curves of some chosen engine supply sources of traction hybrid locomotives, e.g. traction secondary cells and diesel generators have been determined. Introducing some dependences to calculate load energy and usability percentage of cells' nominal energy working in the supply units of traction hybrid locomotive has been made possible by determining energy characteristic curves defined in unit function of unload power.

The dependance of the above - mentioned parameters on locomotive load, rated power of diesel engine and characteristic curves of energy accumulator has been shown.

Function of gain increment in exploiting diesel accumulator hybrid locomotives, instead of previously used diesel locomotives has been defined to analyze the engine supply system in traction locomotives.



BIBLIOTEKA GŁÓWNA  
Politechniki Śląskiej

P.3347 | 90/118