

Pojazdy elektryczne

część II

Jacek Skibicki

Wydawnictwo
Politechniki Gdańskiej

Pojazdy elektryczne

część II

Jacek Skibicki

Gdańsk 2012

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Romuald Szymkiewicz

RECENZENT
Zbigniew Stein

PROJEKT OKŁADKI I SKŁAD
Jacek Skibicki

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2012

Publikacja dostępna tylko w wersji elektronicznej

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978-83-7348-418-4

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 7,4, ark. druku 7,5, 991/689

SPIS TREŚCI

Od autora	v
Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	vii
4. Hamowanie pojazdów	111
4.1. Hamulce mechaniczne	112
4.1.1. Hamulce mechaniczne z napędem ręcznym	112
4.1.2. Hamulce mechaniczne z napędem pneumatycznym	113
4.1.2.1. Hamulec pneumatyczny niesamoczynny	113
4.1.2.2. Hamulec pneumatyczny samoczynny	114
4.1.2.3. Hamulec postojowy sprężynowy z luzowaniem pneumatycznym	116
4.1.3. Hamulce mechaniczne z napędem elektropneumatycznym	116
4.2. Hamulce elektromechaniczne	118
4.2.1. Hamulce elektromechaniczne solenoidowe	118
4.2.2. Hamulce elektromechaniczne szynowe	119
4.2.3. Hamulce elektromechaniczne szczękowe	121
4.3. Hamulce elektrodynamiczne	122
4.3.1. Hamowanie elektrodynamiczne przy wykorzystaniu silników szeregowych prądu stałego	124
4.3.1.1. Hamowanie oporowe przy wykorzystaniu prądnicy szeregowej samowzbudnej	124
4.3.1.2. Hamownie odzyskowe przy wykorzystaniu silników prądu stałego i sterowania klasycznego	127
4.3.1.3. Hamownie odzyskowe przy wykorzystaniu silników prądu stałego sterowanych impulsowo	131
4.3.2. Hamowanie elektrodynamiczne przy wykorzystaniu silników prądu przemiennego	133
4.3.2.1. Hamowanie oporowe pojazdów z silnikami jednofazowymi komutatorowymi prądu przemiennego	133
4.3.2.2. Hamowanie odzyskowe pojazdów z silnikami jednofazowymi komutatorowymi prądu przemiennego	137
4.3.2.3. Hamowanie odzyskowe pojazdów wyposażonych w silniki trójfazowe indukcyjne zasilane z sieci trakcyjnej trójfazowej	145
4.3.2.4. Hamowanie elektrodynamiczne pojazdów wyposażonych w silniki trójfazowe indukcyjne zasilane z przekształtnika	146
4.3.2.5. Hamowanie elektrodynamiczne pojazdów wyposażonych w silniki trójfazowe synchroniczne zasilane z przekształtnika	149
4.3.3. Hamulce wirowe	151
4.4. Hamulce aerodynamiczne	153
5. Elementy obwodu głównego pojazdu	155
5.1. Odbieraki prądu	155
5.1.1. Odbieraki prądu przystosowane do współpracy z górną siecią trakcyjną	156

5.1.1.1. Odbieraki wózkowe	156
5.1.1.2. Odbieraki trzpieniowe	157
5.1.1.3. Odbieraki drążkowe krążkowe (rolkowe)	157
5.1.1.4. Odbieraki drążkowe łyżkowe	160
5.1.1.5. Odbieraki drążkowe łyżkowe podwójne	162
5.1.1.6. Odbieraki pałkowe typu lira	162
5.1.1.7. Odbieraki prętowe poprzeczne systemu Oerlikon	165
5.1.1.8. Odbieraki ramkowe podwójne	166
5.1.1.9. Odbieraki ramkowe dwukierunkowe z małym pałkiem	167
5.1.1.10. Odbieraki nożycowe – pantografy	168
5.1.1.11. Odbieraki teleskopowe	190
5.1.2. Odbieraki prądu przystosowane do współpracy z boczną siecią trakcyjną	190
5.1.2.1. Boczne odbieraki pałkowe	190
5.1.2.2. Boczne odbieraki typu nożycowego – pantografy	191
5.1.3. Odbieraki prądu przystosowane do współpracy z dolną siecią trakcyjną	193
5.1.3.1. Odbieraki łyżwowe dostosowane do górnego odbioru prądu	194
5.1.3.2. Odbieraki łyżwowe dostosowane do dolnego odbioru prądu	194
5.1.3.3. Odbieraki łyżwowe uniwersalne	195
5.1.3.4. Odbieraki łyżwowe dostosowane do bocznego odbioru prądu	196
5.1.4. Odbieraki prądu przystosowane do współpracy z siecią kanałową	198
Literatura	201

Od autora

Oddając do rąk czytelnika drugą część książki „Pojazdy elektryczne”, autor ma nadzieję, że przybliży ona i ułatwi zrozumienie kolejnych zagadnień związanych z problematyką transportu elektrycznego. W niniejszym tomie omówiono hamowanie elektrycznych pojazdów szynowych oraz zaprezentowano typy i cechy poszczególnych rodzajów odbieraków prądu. Ponieważ książka ta jest kontynuacją pierwszej części opracowania pod tym samym tytułem, zdecydowano się na zachowanie numeracji rozdziałów i stron w celu lepszej przejrzystości tekstu i umożliwienia czytelnym odwołań do poprzedniej części.

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

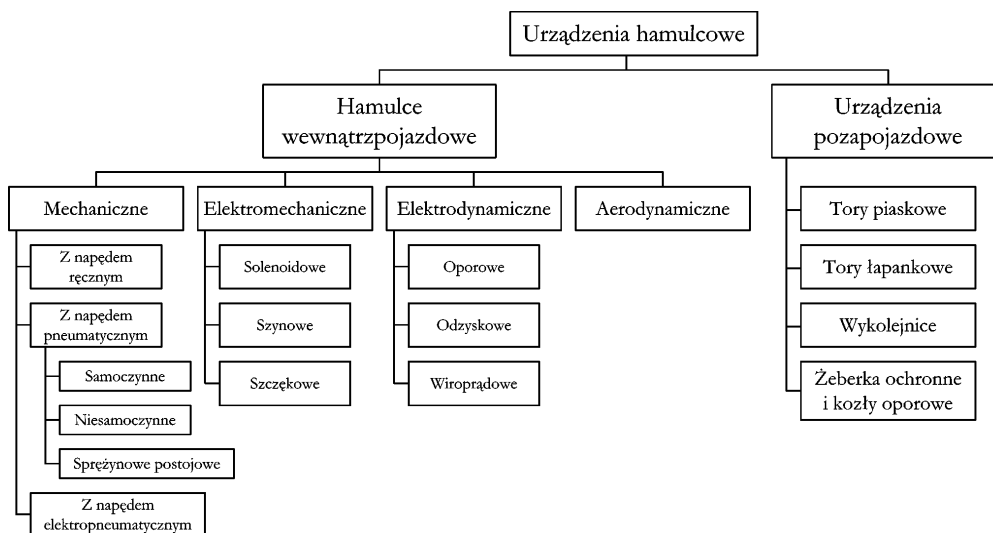
AC	– Alternating Current (prąd przemienny)
AEG	– Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (<i>Niemieckie Przedsiębiorstwo Energetyczne</i>)
AGV	– Automotrice à Grande Vitesse (<i>Zespół Trakcyjny Dużej Prędkości</i>)
ASEA	– Allemana Svenska Elektriska Aktienbolaget
Atr	– autotransformator
B	– bateria akumulatorów
B	– strumień magnetyczny
c	– stała maszyny elektrycznej
C_f	– pojemność filtra wejściowego pojazdu
DB	– Deutsche Bahn (<i>Koleje Niemieckie</i>)
DC	– Direct Current (prąd stały)
D_z	– dioda zwrotna
e_s	– siła elektromotoryczna generowana w silniku trakcyjnym podczas hamowania
EZT	– Elektryczny Zespół Trakcyjny
F	– siła pociągowa
F_a	– siła aerodynamiczna
F_b	– siła hamująca
F_o	– siła odciągająca
f	– częstotliwość
F_{max}	– maksymalna siła rozruchowa
F_μ	– siła przyczepności
FS	– Ferrovie dello Stato Italiane (<i>Włoskie Koleje Państwowe</i>)
GTO	– Gate Turn Off (<i>tyrystor wyłączalny bramką</i>)
i	– prąd
ICE	– Inter City Express
IGBT	– Insulated Gate Bipolar Transistor (<i> tranzystor bipolarny z izolowaną bramką</i>)
i_b	– prąd hamowania
i_s	– prąd pobierany z sieci trakcyjnej
$i_{s sr}$	– średnia wartość prądu pobieranego z sieci trakcyjnej
i_{sil}	– prąd silnika trakcyjnego
$i_{sil min}$	– minimalna wartość prądu silnika trakcyjnego
$i_{sil max}$	– maksymalna wartość prądu silnika trakcyjnego
k_m	– współczynnik momentu maszyny
L_d	– indukcyjność dodatkowa
L_f	– indukcyjność filtra wejściowego pojazdu
L_m	– indukcyjność magnesująca
L_r	– indukcyjność wirnika
L_s	– indukcyjność stojana
L_w	– indukcyjność wzbudzenia
\dot{L}_p	– łącznik półprzewodnikowy
M	– moment napędowy
M_b	– moment hamowania
M_c	– wartość zadana momentu elektromagnetycznego
ÖBB	– Österreichische Bundesbahnen (<i>Austriackie Koleje Państwowe</i>)
P	– moc
P	– prostownik

PCC	– President’s Conference Committee (typ wagonu tramwajowego)
PEM	– przetwornica elektromaszynowa
PI	– regulator proporcjonalno-całkujący
PKP	– Polskie Koleje Państwowe
p_p	– liczba par biegunów
R_1	– rezystancja fazy stojana silnika indukcyjnego
R_2'	– rezystancja fazy wirnika silnika indukcyjnego sprowadzona do stojana
R_d	– rezystancja dodatkowa włączona szeregowo z uzwojeniami silnika
R_b	– rezystor hamowania
R_r	– rezystancja wirnika odniesiona do stojana
R_s	– rezystancja uzwojeń silnika
R_{st}	– rezystancja stabilizująca
s	– poślizg silnika indukcyjnego
S-Bahn	– Stadtschnellbahn (<i>Szybka Kolej Miejska</i>)
SBB	– Schweizerische Bundesbahnen (<i>Szwajcarskie Koleje Państwowe</i>)
SI	– silnik indukcyjny
SLM	– Schweizerische Lokomotiv und Maschinenfabrik (<i>Szwajcarska Fabryka Lokomotyw i Maszyn</i>)
SNCB	– Société Nationale des Chemins de Fer Belges (<i>Narodowe Towarzystwo Kolei Belgijskich</i>)
SNCF	– Société Nationale des Chemins de Fer Francis (<i>Narodowe Towarzystwo Kolei Francuskich</i>)
SS	– silnik synchroniczny
T	– okres impulsowania
T	– twornik
TGV	– Très Grande Vitesse (<i>Pociąg Dużej Prędkości</i>)
t_{off}	– czas wyłączenia łącznika energoelektronicznego
t_{on}	– czas załączenia łącznika energoelektronicznego
Tr	– transformator
Tr _d	– transformator dodawczy
U	– napięcie
U_f	– napięcie fazowe sieci zasilającej
u_{ind}	– napięcie samoindukcji
U_{max1}	– maksymalna wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna długotrwale
U_{max2}	– maksymalna wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna nie dłużej niż dwie minuty
U_{min1}	– najniższa wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna krótkotrwale
U_{min2}	– najniższa wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalne długotrwale
U_n	– znamionowa wartość napięcia
u_s	– napięcie w sieci trakcyjnej
u_{sil}	– napięcie zasilające silnik trakcyjny
$u_{sil\bar{s}}$	– średnia wartość napięcia zasilającego silniki trakcyjne
v	– prędkość
v_{max}	– prędkość maksymalna
v_s	– prędkość synchroniczna
X_1	– reaktancja fazy stojana silnika indukcyjnego
X_2'	– reaktancja fazy wirnika silnika indukcyjnego sprowadzona do stojana
X_t	– reaktancja twornika
a	– współczynnik wypełnienia dla układów impulsowych
θ	– kąt pomiędzy układami współrzędnych d, q i α, β
τ_r	– stała czasowa wirnika
Ψ_{rd}	– moduł wektora strumienia
Ψ_{ζ}	– wartość zadana strumienia wirnika
μ	– współczynnik tarcia

- ω – prędkość kątowna wirnika
- ω_e – prędkość kątowna wirnika elektryczna
- ω_s – prędkość synchroniczna wirowania pola
- ω_{sl} – poślizg elektryczny
- Φ – strumień magnetyczny

4. Hamowanie pojazdów

Pod pojęciem hamowania pojazdów rozumiemy zmniejszanie ich prędkości lub jej utrzymanie podczas jazdy na spadku, spowodowane przyłożeniem siły o zwrocie przeciwnym do kierunku jazdy, zwanej siłą hamującą, której pochodzenie jest inne niż normalne opory ruchu. Siła ta może być wynikiem zadziałania urządzeń zamontowanych w pojeździe lub znajdujących się poza pojazdem. Wyróżniamy szereg typów i rodzajów urządzeń hamulcowych o odmiennych zasadach działania. Klasyfikację urządzeń stosowanych do obniżania prędkości elektrycznych szynowych pojazdów trakcyjnych przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Klasyfikacja urządzeń hamulcowych

Pozapojazdowe urządzenia hamulcowe wykorzystywane są wyłącznie w sytuacjach awaryjnych, gdy konieczne jest zatrzymanie pojazdów, które wymknęły się spod kontroli, np. lokomotyw lub wagonów zbiegłych, itp. W tych przypadkach zatrzymanie odbywa się często kosztem częściowego uszkodzenia pojazdu i (lub) toru, byle tylko zażegnać sytuację niebezpieczną i nie doprowadzić do większej katastrofy. Podczas normalnej eksploatacji korzysta się z hamulców wewnętrzpojazdowych. Cechy rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych typów hamulców sprawiają, że różne są ich zakresy stosowalności. Niekiedy istnieje możliwość zamiennego używania poszczególnych rodzajów hamulców, a czasami typy tych urządzeń się uzupełniają, stanowiąc razem kompletny układ hamulcowy pojazdu.

Idealny system hamulcowy powinien charakteryzować się następującymi parametrami:

- powinien zatrzymać pojazd na zadanej drodze zwanej drogą hamowania;
- powinien mieć możliwość płynnej regulacji siły hamowania, tak by zatrzymanie przebiegało łagodnie, bez wstrząsów i szarpnięć;

- czas uruchomienia hamulca, czyli czas od momentu załączenia przez prowadzącego procesu hamowania do faktycznego rozpoczęcia tego procesu powinien być jak najkrótszy;
- hamulec musi działać niezawodnie, a jego konstrukcja powinna być jak najprostsza, tak by bieżące utrzymanie nie było skomplikowane;
- hamulec powinien być niewyczerpalny, czyli mieć możliwość działania przez czas nieograniczenie długi;
- w przypadku pociągów pasażerskich składających się z kilku wagonów powinna być możliwość uruchomienia hamulca z każdego wagonu (hamulec bezpieczeństwa);
- załączanie lub luzowanie hamulca powinno się odbywać jednocześnie we wszystkich wagonach pociągu wyposażonych w system hamulcowy, a siła hamowania powinna być taka sama dla wszystkich osi;
- wartość siły hamującej powinna być niezależna od prędkości i obejmować cały zakres dopuszczalnych szybkości dla danego pojazdu włącznie z prędkością zerową.

Żaden z obecnie wykorzystywanych układów hamulcowych nie spełnia wszystkich powyższych wymagań. Dlatego każdy pojazd wyposażony jest w kilka różnych rodzajów hamulców, których cechy i parametry wzajemnie się uzupełniają, tak by zapewnić bezpieczeństwo i umożliwić zażycie hamulca niezależnie od zaistniałych warunków zewnętrznych.

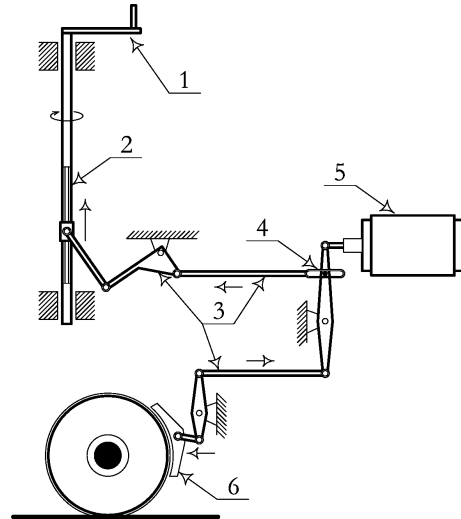
4.1. Hamulce mechaniczne

Działanie hamulców mechanicznych stosowanych w pojazdach szynowych polega na wytworzeniu siły tarcia pomiędzy okładziną cierną (klockiem hamulcowym), a obręczą koła lub tarczą hamulcową. Energia kinetyczna pojazdu zamienia się w energię cieplną powodującą nagrzewanie okładzin ciernych, a częściowo zostaje zużyta na ścieranie mechaniczne tych okładzin. Klocki hamulcowe dociskane są do obręczy kół lub tarczy hamulcowych za pomocą przekładni napędzanych ręcznie lub z wykorzystaniem urządzeń pneumatycznych.

4.1.1. Hamulce mechaniczne z napędem ręcznym

Hamulce mechaniczne z napędem ręcznym są najstarszym systemem hamulcowym stosowanym w pojazdach szynowych. W pierwszym okresie rozwoju kolei pojazdy były wyposażone wyłącznie w ten rodzaj hamulców. Wraz z postępem technicznym wykorzystywano inne, bardziej skuteczne rozwiązania. Jednak pewne właściwości tych hamulców sprawiają, że do dnia dzisiejszego prawie każdy pojazd szynowy jest w nie wyposażony. Zasada działania hamulca z napędem ręcznym została pokazana na rys. 4.2. Obrót w prawo korbą (1) powoduje przesuwanie w górę wodzaka po części gwintowanej elementu obrotowego (2). Wywołuje to poruszenie dźwigni i cięgieł mechanicznych (3), które dociskają klocek hamulcowy (6) do obręczy koła (dla hamulców klockowych), lub okładzinę cierną do tarczy hamulcowej (dla hamulców tarczowych). Szczelina (4) w cięgłe jest konieczna aby umożliwić ruch dźwigni siłownika pneumatycznego (5) w sytuacji, gdy wykorzystywane są hamulce powietrzne. Obracanie korbą w przeciwną stronę (w lewo) powoduje zluźnienie hamulca. Głównymi wadami hamulca mechanicznego z napędem ręcznym są:

- długi czas potrzebny do uruchomienia wynikający z konieczności manualnego obracania korbą napędową;
- niska skuteczność hamowania, która jest rezultatem ograniczonej siły docisku zdecydowanie niższej niż przy napędzie pneumatycznym mimo stosowania przekładni mechanicznych zwielokrotniających siłę fizyczną człowieka;
- w sytuacji gdy hamulce ręczne są wykorzystywane jako podstawowe, konieczne jest umieszczenie w każdym wagonie pracownika (hamulcowego), który będzie je uruchamiał bądź luzował zgodnie z sygnałami przekazywanymi przez maszynistę pociągu.



Rys. 4.2. Zasada działania hamulca mechanicznego z napędem ręcznym – opis w tekście

Mimo tych wszystkich wad hamulce z napędem ręcznym nadal znajdują zastosowanie, gdyż są z założenia niewyczerpalne, a siła hamowania nie zmienia się w czasie, tj. utrzymuje się na stałym poziomie dowolnie długo od momentu załączenia. Ponadto nie wymagają one do funkcjonowania żadnych dodatkowych źródeł energii. Będą zatem działać w każdych warunkach. Stosuje się je więc jako hamulce awaryjne, uruchamiane wówczas, gdy hamulce właściwe ulegną uszkodzeniu, a także jako hamulce postojowe, służące do unieruchomienia pojazdu przy dłuższych postojach np. na bocznicach, w lokomotywni itp. W nowoczesnych pojazdach trakcyjnych są one niekiedy zastępowane przez tzw. hamulce postojowe sprężynowe z luzowaniem pneumatycznym (patrz p. 4.1.2.3).

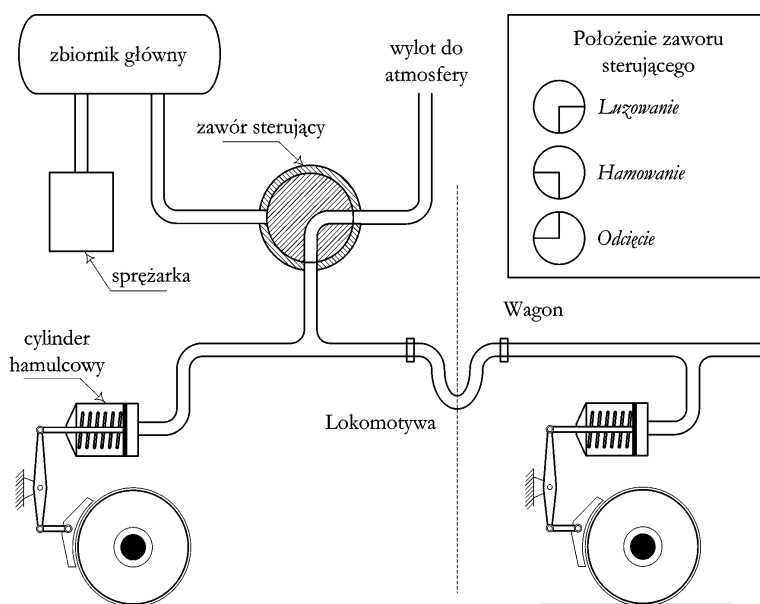
4.1.2. Hamulce mechaniczne z napędem pneumatycznym

Niska skuteczność hamulców z napędem ręcznym i długi czas ich uruchamiania skłoniły konstruktorów do poszukiwania innych, bardziej skutecznych metod hamowania. Pierwsze udane rozwiązanie powstało w 1869 roku, gdy George Westinghouse opatentował hamulec mechaniczny uruchamiany sprężonym powietrzem. Ze względu na sposób działania został on nazwany centralnym lub niesamoczynnym. Kilka lat później, w 1875 roku, ten sam wynalazca zaprezentował udoskonaloną wersję hamulca zwaną automatyczną lub samoczynną. Obie te wersje, praktycznie bez większych zmian, używane są powszechnie aż do dzisiaj.

4.1.2.1. Hamulec pneumatyczny niesamoczynny

Zasada działania hamulca pneumatycznego niesamoczynnego została pokazana na rys. 4.3. Wzdłuż całego pociągu rozmieszczony jest przewód hamulcowy. W lokomotywie znajduje się główny zbiornik ze sprężonym powietrzem napelniany z kompresora. Gdy maszynista chce zatrzymać pociąg lub zmniejszyć jego prędkość ustawia zawór sterujący w pozycji *hamowanie*.

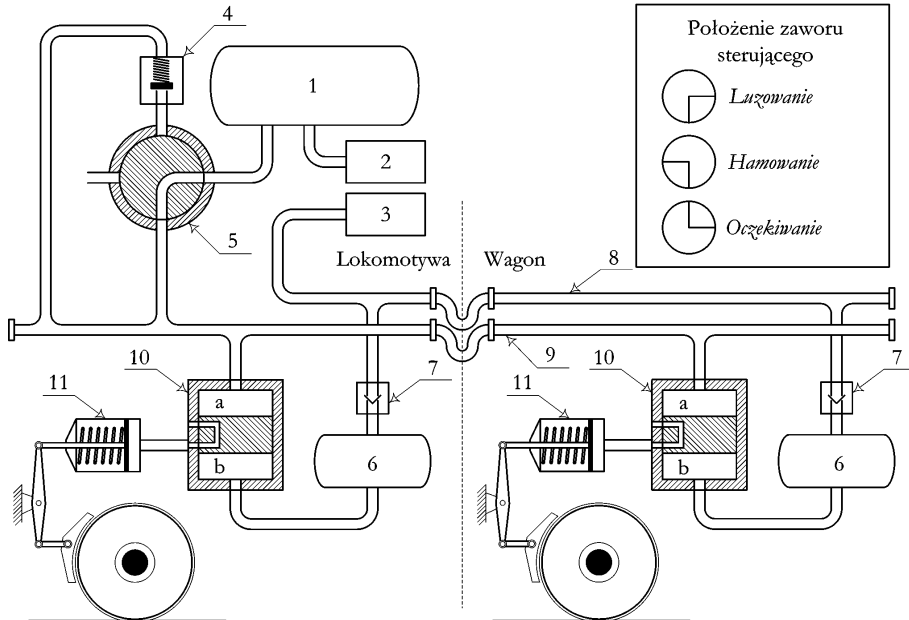
Powietrze ze zbiornika głównego jest wtlaczone do przewodu hamulcowego, a wzrastające w nim ciśnienie powoduje uruchomienie cylindrów hamulcowych, których ruch sprawia, że okładziny cierne hamulca są dociskane do obręczy kół lub tarcz hamulcowych. W celu odhamowania maszynista przekłada zawór sterujący w pozycję *luźowanie*. Powoduje to połączenie przewodu hamulcowego z atmosferą, czyli obniżenie ciśnienia wewnątrz tego przewodu. Sprężyny znajdujące się w cylindrach hamulcowych odciągają klocki od powierzchni ciernych i siła hamująca maleje. W pozycji *odcięcie* zawór odcina dopływ sprężonego powietrza od przewodu hamulcowego, a ponieważ także przewód i cylindry odcięte są również od atmosfery, to utrzymuje się w nich takie ciśnienie, jakie panowało tam w chwili odcięcia. Teoretycznie nie powinno się ono zmniejszać, jednak zawsze istnieją drobne nieszczelności zarówno w samym zaworze, jak i na łączeniach przewodu hamulcowego, tak że po pewnym czasie wystąpi zauważalny spadek ciśnienia w cylindrach, a co za tym idzie, odczuwalne będzie zmniejszenie siły hamującej. Zaletami hamulca niesamocznego są jego prosta budowa oraz teoretyczna niewyczerpywalność (pod warunkiem odpowiednio dużej wydajności sprężarki), gdyż układ pneumatyczny zasilany jest bezpośrednio ze zbiornika głównego lokomotywy. Do wad można zaliczyć możliwość uruchomienia hamowania jedynie przez maszynistę – niemożliwe jest zatem zrealizowanie hamulca bezpieczeństwa oraz fakt, że każda większa nieszczelność układu pneumatycznego lub uszkodzenie przewodu hamulcowego powstałe np. w wyniku rozerwania składu powoduje, że hamulce przestają działać. Ta druga wada sprawia, że hamulce niesamoczynnne wykorzystywane są wyłącznie w lokomotywach podczas jazdy luzem. Nie zachodzi wówczas niebezpieczeństwo przerwania przewodu hamulcowego.



Rys. 4.3. Hamulec pneumatyczny niesamoczynnny – zasada działania

4.1.2.2. Hamulec pneumatyczny samoczynnny

Uproszczonego schematu hamulca pneumatycznego samocznego obrazującego zasadę jego działania pokazano na rys. 4.4.



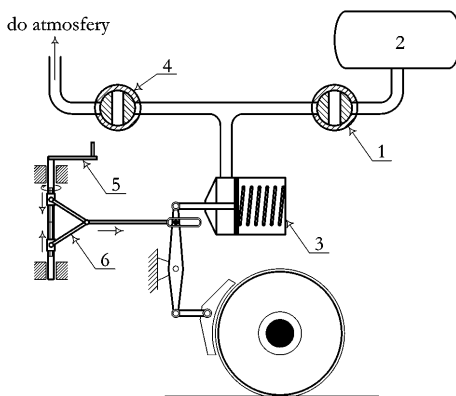
Rys. 4.4. Schemat hamulca samoczynnego – zasada działania (opis w tekście)

Elementem bezpośrednio sterującym pracą cylindrów hamulcowych (11) są zawory trójdrożne (10). Ciśnienie w komorze (a) zaworu jest takie jak w głównym przewodzie hamulcowym (9). Komora (b) jest połączona z dodatkowym zbiornikiem sprężonego powietrza (6). Zbiorniki te znajdują się zarówno w lokomotywie, jak i w każdym wagonie pociągu. W stanie oczekiwania ciśnienie w obu komorach zaworu jest jednakowe i tłok znajduje się w stanie równowagi. Wówczas komora cylindra hamulcowego jest połączona z atmosferą przez kanalik wyłobiony w rdzeniu tłoka, tak jak pokazano na rysunku. W celu zahamowania pociągu należy obniżyć ciśnienie w głównym przewodzie hamulcowym (9). W trybie normalnej pracy dokonuje tego maszynista poprzez odpowiednie ustawienie zaworu sterującego (5). Powoduje to przesunięcie tłoka zaworu trójdrożnego w górę i umożliwia połączenie zbiornika dodatkowego (6) z cylindrem hamulcowym (11), następuje wówczas wzrost ciśnienia w tym cylindrze i w efekcie dociśnięcie klocków hamulcowych do powierzchni ciernych. Aby zluźować hamulce należy zwiększyć ciśnienie w przewodzie głównym (9) wtłaczając tam powietrze ze zbiornika głównego znajdującego się w lokomotywie (1) napelnianego sprężarką (2). To sprawi, że tłok zaworu trójdrożnego powróci do stanu równowagi, wypuszczając powietrze z cylindra hamulcowego do atmosfery. Po uzyskaniu właściwego ciśnienia i odhamowaniu pociągu maszynista powinien ustawić zawór sterujący w pozycji *oczekiwania*. Wówczas zbiornik główny jest połączony z głównym przewodem hamulcowym za pośrednictwem zaworu sprężynowego (4), przez który uzupełniane są drobne straty powietrza wynikające z niewielkich nieszczelności przewodu hamulcowego. Po każdym cyklu hamowania następuje ubytek powietrza w zbiornikach dodatkowych (6), który jest na bieżąco uzupełniany za pomocą wyrównawczego przewodu hamulcowego (8) połączonego ze sprężarką dodatkową (3) znajdującą się w lokomotywie. Zawory jednokierunkowe (7) zabezpieczają przed ucieczką powietrza ze zbiorników dodatkowych w przypadku uszkodzenia wyrównawczego przewodu hamulcowego.

Podstawową zaletą hamulców samoczynnych jest automatyczne zahamowanie składu w przypadku rozerwania pociągu. Ponadto możliwe jest uruchomienie hamulca z dowolnego punktu pociągu (hamulec bezpieczeństwa). Wystarczy umieścić w odpowiednich punktach dźwignie otwierające główny przewód hamulcowy. Do wad tego typu hamulców można zaliczyć ich wyczerpalność. Każdy cykl hamowanie - odhamowanie powoduje zużycie pewnej ilości powietrza i obniżenie ciśnienia w zbiornikach dodatkowych. Jeżeli zadziałania hamulca będą następowały bezpośrednio po sobie, w krótkich odstępach czasu, wówczas sprężarka dodatkowa znajdująca się w lokomotywie, której wydajność jest ograniczona, może nie być w stanie wystarczająco szybko wyrównać ciśnienia w zbiornikach dodatkowych. Spowoduje to czasową utratę zdolności hamowania przez pociąg. Problem ten dotyczy zwłaszcza długich składów towarowych. Dlatego przepisy eksploatacyjne stosowane na kolei wymagają, by na trasach o trudnym profilu pionowym, czy charakteryzujących się bardzo długimi spadkami, pociągi o masie powyżej 600 ton były prowadzone dwiema lokomotywami tak, by podwoić liczbę sprężarek zasilających system hamulcowy pociągu. Jako przykład odcinka, gdzie przepisy te są stosowane, można tu podać fragment linii nr 201 pomiędzy stacjami Gdańsk Osowa – Gdynia Główna, gdzie występuje spadek o długości 14,8 km i nachyleniu dochodzącym do 11,8‰.

4.1.2.3. Hamulec postojowy sprężynowy z luzowaniem pneumatycznym

W nowoczesnych pojazdach trakcyjnych mechaniczne hamulce z napędem ręcznym wykorzystywane podczas postoju lub w sytuacjach awaryjnych są zastępowane przez hamulce sprężynowe luzowane pneumatycznie. Zasada działania takiego hamulca została przedstawiona na rys. 4.5. W sytuacji, gdy układ nie jest zasilony sprężonym powietrzem sprężyna znajdująca się



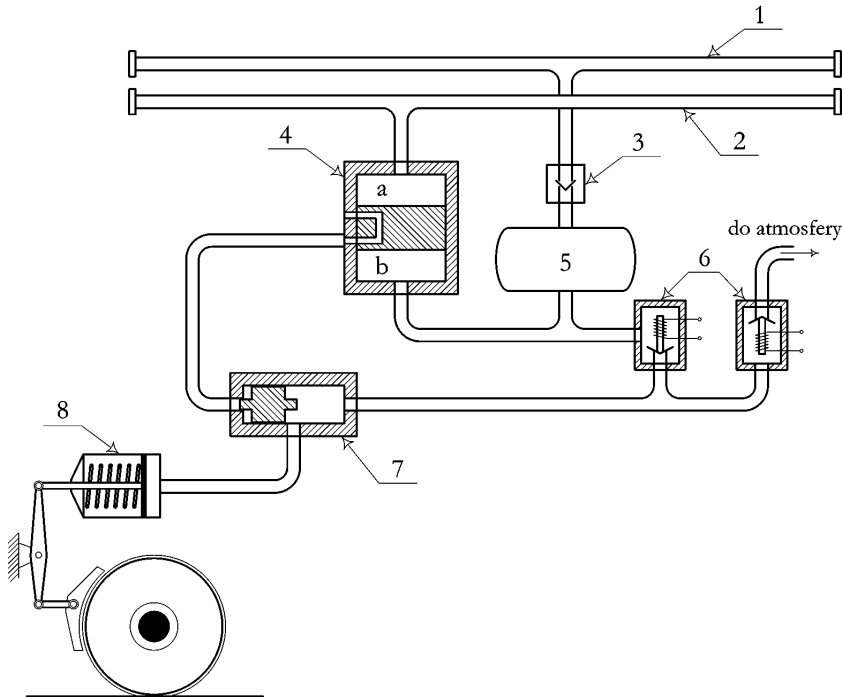
Rys. 4.5. Hamulec postojowy sprężynowy z luzowaniem pneumatycznym – zasada działania (opis w tekście)

wewnątrz tłoka (3) poprzez układ dźwigni dociska klocek hamulcowy do tarczy lub obręczy koła. W celu odhamowania należy zwiększyć ciśnienie w tłoku poprzez otwarcie zaworu napełniającego (1). Sprężone powietrze ze zbiornika (2) zostanie wtłoczone do cylindra i, pokonując siłę sprężyny, spowoduje luzowanie hamulca. Z kolei załączenie odbywa się przez otwarcie zaworu (4) i tym samym wypuszczenie sprężonego powietrza z cylindra do atmosfery. Należy zwrócić uwagę, że jakiegokolwiek brak ciśnienia w układzie sprężonego powietrza czy też jego uszkodzenie spowoduje załączenie hamulca. Dlatego w sytuacjach awaryjnych można go luzować ręcznie za pomocą dźwigni mechanicznej (6) uruchamianej korwą (5).

4.1.3. Hamulce mechaniczne z napędem elektropneumatycznym

Wspólną cechą hamulców z napędem pneumatycznym, która negatywnie wpływa na jakość hamowania jest ograniczona prędkość rozchodzenia się powietrza w przewodzie hamulcowym

(tzw. prędkość fali hamowania). Prędkość ta dochodzi co najwyżej do 250 m/s. W rezultacie rozpoczęcie lub zakończenie procesu hamowania nie odbywa się w jednocześnie we wszystkich wagonach. Wywołuje to efekt tzw. nabiegania wagonów, co prowadzi do występowania niekorzystnych naprężeń w sprzęgach, a w skrajnych przypadkach rezultatem może być rozerwanie lub wykolejenie składu. Zjawisko to jest szczególnie odczuwalne w przypadku długich pociągów towarowych. Rozwiązaniem tego problemu jest wykorzystanie elektrozaworów sterujących pracą układu pneumatycznego hamulca. Zasada działania tego rodzaju hamulca zostanie omówiona na przykładzie jego podstawowej, najprostszej wersji. Uproszczony schemat układu hamulca z napędem elektropneumatycznym przedstawiono na rys. 4.6.



Rys. 4.6. Schemat hamulca z napędem elektropneumatycznym – zasada działania (opis w tekście)

Podobnie jak w przypadku hamulca pneumatycznego samoczynnego, główny (2) i pomocniczy przewód hamulcowy (1) biegną przez całą długość składu. Jednak w normalnym trybie pracy hamulec nie jest uruchamiany (luzowany) przez zmiany ciśnienia w głównym przewodzie hamulcowym, a poprzez bezpośrednie napełnianie lub opróżnianie cylindra hamulcowego (8) ze zbiornika dodatkowego (5) za pośrednictwem elektrozaworów sterujących (6). Aby umożliwić zarówno elektropneumatyczne, jak i czysto pneumatyczne sterowanie pracą hamulca konieczne jest doposażenie układu w tzw. podwójny zawór zwrotny (7). Zawór ten ma dwa położenia stabilne tłoka. W sytuacji przedstawionej na rysunku układ hamulcowy pracuje w trybie sterowania elektropneumatycznego i jest to normalny tryb pracy tego typu hamulca. W trybie tym napełnianie bądź luzowanie cylindra hamulcowego jest dokonywane za pośrednictwem elektrozaworów. Uruchomienie elektrozaworu napełniającego powoduje połączenia zbiornika dodatkowego z cylindrem hamulcowym i wzrost ciśnienia w tym ostatnim. Aby luzować hamulec, należy załączyć elektrozawór luzujący, który połączy komorę cylindra z atmosferą. W sytuacji

awaryjnej, np. podczas uszkodzenia elektrycznego obwodu sterującego czy konieczności uruchomienia hamulca bezpieczeństwa układ przechodzi na sterowanie pneumatyczne. Obniżenie ciśnienia w głównym przewodzie hamulcowym wywoła przesunięcie tłoka zaworu trójdrożnego (4) w górę i w konsekwencji ciśnienie powietrza ze zbiornika dodatkowego przesunie tłok podwójnego zaworu zwrotnego (7) w drugie skrajne położenie, umożliwiając tym samym zwiększenie ciśnienia w cylindrze hamulcowym. Odhamowanie w trybie sterowania pneumatycznego odbywa się identycznie jak dla hamulców samoczynnych, czyli poprzez zwiększenie ciśnienia w głównym przewodzie hamulcowym, co spowoduje wyrównanie ciśnień w komorach a i b zaworu trójdrożnego i tym samym połączy komorę cylindra z atmosferą. Powrót układu do stanu wyjściowego, czyli do pracy przy sterowaniu elektropneumatycznym odbędzie się przy pierwszym załączeniu elektrozaworu napełniającego, co spowoduje przesunięcie tłoka podwójnego zaworu zwrotnego (7) w położenie pokazane na rysunku.

Zaletą hamulców z napędem elektropneumatycznym, oprócz jednoczesnego rozpoczynania i kończenia procesu hamowania we wszystkich wagonach pociągu, jest mniejsze zużycie sprężonego powietrza, gdyż nie ma konieczności opróżniania i napełniania głównego przewodu hamulcowego podczas każdego cyklu hamowanie – odhamowanie. Sprężarki pracują więc w łagodniejszym reżymie, jednak ich wydajność musi być taka sama, jak w układach sterowanych wyłącznie w sposób pneumatyczny, gdyż muszą być przystosowane do pracy w trybie awaryjnym, czyli właśnie przy sterowaniu czysto pneumatycznym.

4.2. Hamulce elektromechaniczne

Hamulce elektromechaniczne działają, podobnie jak hamulce mechaniczne, na zasadzie wytworzenia siły tarcia i zamiany energii kinetycznej pojazdu na energię cieplną. Źródłem siły powodującej wzajemne dociśnięcie elementów ciernych są w tym przypadku urządzenia elektryczne pracujące na zasadzie elektromagnesu. Wyróżniamy kilka typów hamulców elektromechanicznych:

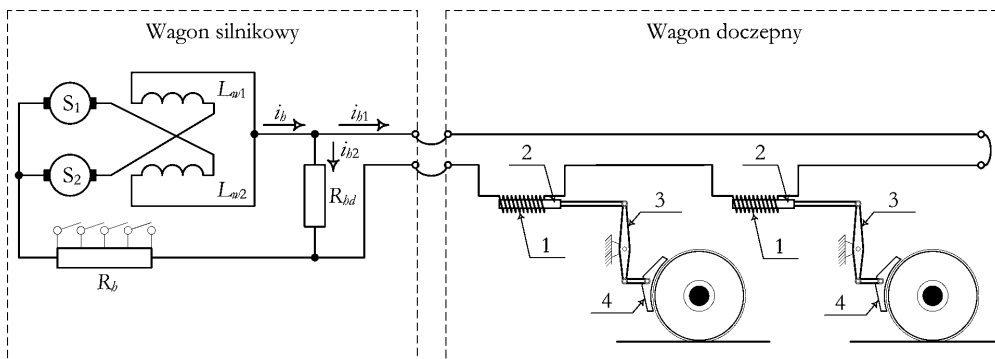
- hamulce solenoidowe,
- hamulce szynowe,
- hamulce elektromechaniczne szczękowe.

Wszystkie wymienione powyżej typy hamulców elektromechanicznych znalazły zastosowanie głównie w pojazdach tramwajowych, z których większość nie ma instalacji sprężonego powietrza i w związku z tym wykorzystanie hamulców z napędem pneumatycznym nie było w nich możliwe. Jedynie niektóre tramwaje budowane w dawnym Związku Radzieckim były wyposażone w układy pneumatyczne i klasyczne „kolejowe” hamulce powietrzne (np. model *KTM/KTII-1*) [34].

4.2.1. Hamulce elektromechaniczne solenoidowe

Hamulce elektromechaniczne solenoidowe wykorzystywane są w konstrukcjach niektórych wozów tramwajowych do hamowania osi tocznych. W większości tramwajów wszystkie osie są napędzane i istnieje możliwość wykorzystania hamowania dynamicznego (patrz punkt. 4.3.), jednak, zwłaszcza w konstrukcjach wozów przegubowych, środkowe wózki wyposażone są nie-

kiedy wyłącznie w osie toczne. Osie toczne występują też w wagonach doczepnych charakterystycznych dla pojazdów tramwajowych starszych generacji. Na tych osiach zwykle instalowane są hamulce elektromechaniczne solenoidowe. Zasada działania hamulców solenoidowych została przedstawiona na rys. 4.7. Silniki trakcyjne wagonu silnikowego S_1 i S_2 podczas hamowania dynamicznego zamieniają energię kinetyczną pojazdu na energię elektryczną, generując prąd hamowania i_b . Część tego prądu, oznaczona jako i_{b1} , płynie przez obwód znajdujący się w wagonie doczepnym zawierający solenoidy (1). Przepływ prądu powoduje wciągnięcie do wnętrza solenoidów rdzeni ferromagnetycznych (2), których ruch, poprzez elementy dźwigni (3), powoduje dociśnięcie klocków hamulcowych (4) do obręczy kół lub tarcz hamulcowych, wywołując w efekcie hamowanie pojazdu. Podział prądu hamowania na składowe i_{b1} i i_{b2} wynika z konieczności zapewnienia ciągłości jego przepływu w sytuacji awaryjnego przerwania obwodu znajdującego się w wagonie doczepnym, np. na skutek odłączenia się tego wagonu. Brak rezystora R_{hd} spowodowałby, w przypadku przerwy w obwodzie elektrycznym, utratę zdolności hamowania przez pojazd.



Rys. 4.7. Hamulec elektromechaniczny solenoidowy – zasada działania (opis w tekście)

Hamulce solenoidowe mogą wykorzystywać do zasilania energię:

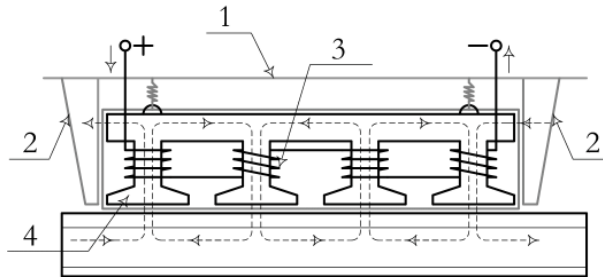
- wytworzoną przez silniki trakcyjne podczas hamowania dynamicznego,
- pobraną bezpośrednio z sieci trakcyjnej,
- pobraną z baterii akumulatorów elektrochemicznych.

Najczęściej wykorzystywane jest pierwsze rozwiązanie, gdyż w drugim przypadku istnieje zawsze niebezpieczeństwo zaniku napięcia w sieci trakcyjnej i wówczas hamulce te przestałyby działać, a w trzecim, dla zapewnienia wymaganej ilości energii, potrzebna byłaby bateria akumulatorów o dużej pojemności.

4.2.2. Hamulce elektromechaniczne szynowe

Hamulce elektromechaniczne szynowe są stosowane we wszystkich obecnie eksploatowanych pojazdach tramwajowych. Ostatnio znalazły również zastosowanie w niektórych nowoczesnych zespołach trakcyjnych (np. *Talent* firmy *Bombardier*), a także w wagonach pasażerskich. Zawieszane na sprężynach przymocowanych do ramy wózka, poruszające się w odpowiednich prowadnicach, w stanie spoczynku znajdują się w odległości kilkunastu milimetrów od główki szyny. Załączenie napięcia zasilającego powoduje wzbudzenie elektromagnesu, a w rezultacie

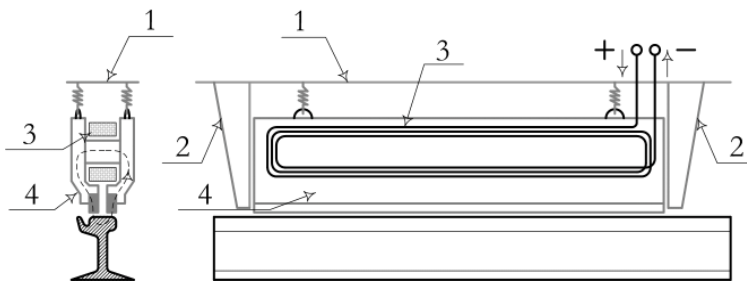
przyciągnięcie i dociśnięcie hamulca do szyny, czego rezultatem jest powstanie siły hamującej. Wyróżniamy dwa typy hamulców szynowych: z magnesowaniem podłużnym i poprzecznym. Zasada działania hamulca z magnesowaniem podłużnym jest przedstawiona na rys. 4.8.



Rys. 4.8. Hamulec szynowy z magnesowaniem podłużnym (opis w tekście)

Hamulec tego typu składa się z rdzenia elektromagnesu, który charakteryzuje się szeregiem biegunów (4) umieszczonych w jednej linii. Na biegunach nawinięte są uzwojenia (3), wszystkie połączone szeregowo. Kierunek nawinięcia uzwojeń na sąsiednich biegunach jest przeciwny, tak by było możliwe wytworzenie strumieni magnetycznych o zwrotach przedstawionych na rysunku. Całość jest zamocowana za pomocą sprężyn do ramy pojazdu lub wózka (1), a prowadnice (2) umożliwiają jedynie pionowy ruch hamulca. Po załączeniu napięcia zasilającego nastąpi zadziałanie urządzenia, czyli przyciągnięcie elektromagnesu do główek szyny.

Hamulec z magnesowaniem poprzecznym jest odmienny konstrukcyjnie (rys. 4.9). Składa się z rdzenia (4) z dwoma wydłużonymi biegunami, na którym nawinięte jest jedno uzwojenie (3). Mocowanie mechaniczne do ramy pojazdu (1) za pomocą sprężyn oraz prowadzenie w ruchu pionowym (2) jest takie samo jak dla hamulca z magnesowaniem podłużnym.

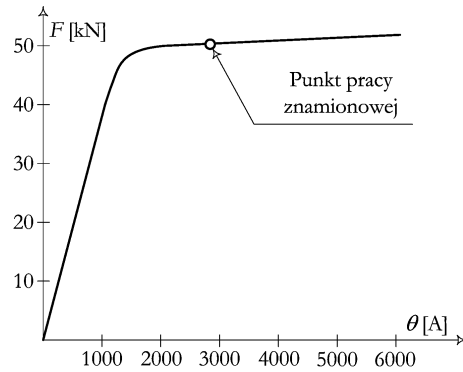


Rys. 4.9. Hamulec szynowy z magnesowaniem poprzecznym (opis w tekście)

Niezależnie od typu hamulca, rezultat osiągnąć po załączeniu napięcia jest identyczny. Jednak hamulce z magnesowaniem poprzecznym są prostsze konstrukcyjnie, dlatego właśnie to rozwiązanie jest obecnie powszechnie stosowane. Hamulce z magnesowaniem podłużnym występują jedynie w starszych typach pojazdów tramwajowych. Długość hamulca szynowego w wersji tramwajowej jest ograniczona do około 1 m, co wynika z konieczności zapewnienia dobrego styku hamulca z szyną podczas pracy na ciasnych łukach o małym promieniu. Dodatkowo taki wymiar pozwala na umieszczenie hamulca pomiędzy osiami wózka tramwajowego. Pojedynczy hamulec dociskany jest do szyny z siłą od 40 do 60 kN, w zależności od rozwiązań kon-

strukcyjnych urządzenia, co pozwala na osiągnięcie (po uwzględnieniu współczynnika tarcia $\mu = 0,25$) siły hamującej o wartości około $10 \div 15$ kN na jeden elektromagnes. Pozwala to na uzyskanie, dla w pełni załadowanego typowego wagonu tramwajowego, opóźnienia hamowania wynoszącego około 2 m/s^2 , przy wykorzystaniu jedynie hamulców szynowych.

Główną zaletą hamulców szynowych jest niezależność od hamulców działających na zestawy kołowe. W związku z tym maksymalna siła hamowania nie jest zależna od przyczepności na styku koło – szyna, a jedynie od siły tarcia pomiędzy hamulcem a szyną, która zależy głównie od siły docisku hamulca. Wadą natomiast jest praktycznie niemożliwa regulacja siły hamowania. Hamulce te są zatem ustawione na wartość maksymalną tej siły. Pokazuje to charakterystyka siły docisku w funkcji przepływu prądu wraz z zaznaczonym punktem pracy znamionowej, która została przedstawiona na rys. 4.10. Te cechy sprawiają, że hamulce szynowe są wykorzystywane w sytuacjach awaryjnych, kiedy to wspomagają hamulce robocze pojazdu.

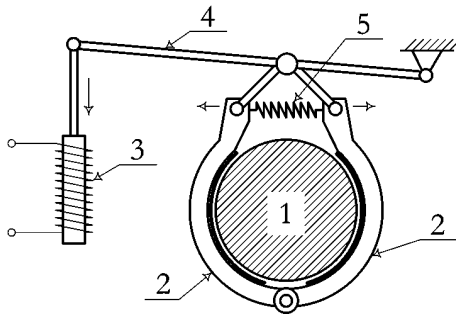


Rys. 4.10. Charakterystyka siły docisku hamulca szynowego

Zasilanie hamulców szynowych może być zrealizowane, podobnie jak w przypadku hamulców solenoidowych, na trzy sposoby. Można wykorzystać w tym celu prąd hamowania dynamicznego silników trakcyjnych, bezpośrednie zasilanie z sieci oraz zasilanie ze źródła niezależnego, jakim jest bateria akumulatorów. W praktyce korzysta się z ostatniej metody. Dwie pierwsze wymagałyby doprowadzenia do urządzenia napięcia trakcyjnego (lub zastosowanie dodatkowej przetwornicy obniżającej), co stwarzałoby problemy z zapewnieniem właściwej izolacji galwanicznej, jako że hamulce szynowe pracują w trudnych warunkach (wilgoć, zanieczyszczenia). Ponadto zastosowanie baterii akumulatorów sprawia, że zdolność hamowania awaryjnego zachowana jest również po zaniku napięcia sieciowego, a sporadyczne używanie hamulca powoduje, iż pojemność tej baterii (a co za tym idzie i masa) nie musi być duża. Napięcie zasilania typowych hamulców szynowych mieści się w zakresie 24 do 40 V.

4.2.3. Hamulce elektromechaniczne szczękowe

Hamulce elektromechaniczne szczękowe, stosowane w nowszych tramwajach zastępują hamulce mechaniczne ręczne, znane ze starszych konstrukcji wagonów wolnobieżnych. Ich zadaniem jest utrzymanie wozu w stanie zahamowanym podczas postoju oraz zatrzymanie pojazdu przy bardzo małych prędkościach (poniżej 3 km/h), gdy hamulce elektrodynamiczne przestają funkcjonować. Zasada działania hamulca szczękowego została przedstawiona schematycznie na rys. 4.11. W stanie spoczynku szczęki hamulca (2) są dociśnięte do wału silnika (1) za pomocą sprężyny (5). W celu odhamowania należy podłączyć napięcie zasilania do elektromagnesu (3), co spowoduje wciągnięcie rdzenia, przez co układ dźwigni mechanicznych (4), pokonując siłę sprężyny, odciągnie szczęki, zwalnając hamulec. Załączenie solenoidu, czyli zwolnienie hamulca, następuje automatycznie w momencie uruchomienia napędu pojazdu, a jego wyłączenie następuje automatycznie w momencie zatrzymania pojazdu.



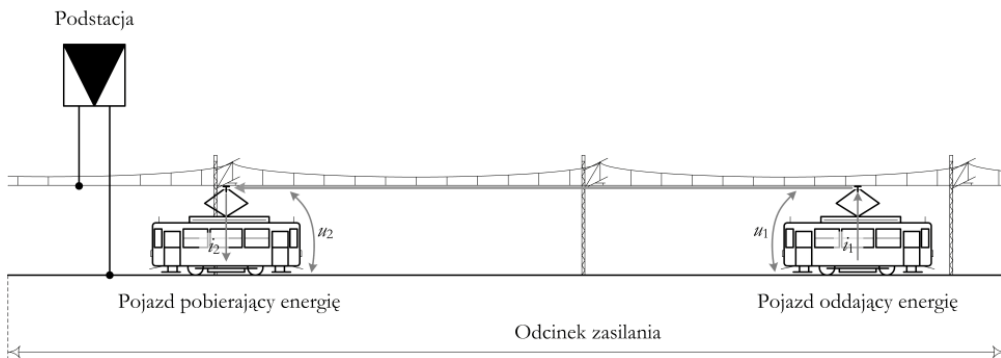
Rys. 4.11. Hamulce elektromechaniczny szczękowy – zasada działania (opis w tekście)

czenie ma miejsce, gdy zanika moment hamujący hamulców dynamicznych, czyli przy prędkości około 3 km/h. Zadziałanie hamulców szczękowych będzie miało miejsce również przy zaniku napięcia zasilającego, co gwarantuje zatrzymanie pojazdu w takiej sytuacji (jednak stosunkowo mała siła docisku sprawi, że droga hamowania będzie w tym przypadku znaczna). W razie uszkodzenia solenoidu, aby umożliwić zjazd tramwaju do zajezdni, urządzenie wyposażone jest w dźwignię mechaniczną, blokującą szczęki hamulca w pozycji odhamowania. Odpowiednikiem

tego typu hamulca w pojazdach kolejowych są sprężynowe hamulce postojowe z napędem pneumatycznym, omówione w p. 4.1.2.3.

4.3. Hamulce elektrodynamiczne

Hamowanie elektrodynamiczne zachodzi, gdy źródłem siły hamującej są silniki trakcyjne, pracujące podczas hamowania jako prądnice, które zamieniają energię kinetyczną pojazdu na energię elektryczną. Do hamulców elektrodynamicznych zaliczamy również hamulce wiroprowadowe, będące niezależnymi urządzeniami, omówione w p. 4.3.3. Hamowanie elektrodynamiczne może być zrealizowane niezależnie od typu silnika trakcyjnego i systemu zasilania pojazdu. Energia elektryczna wytworzona podczas procesu hamowania może być zamieniona na energię ciepłą w rezystorach (tzw. hamowanie elektrodynamiczne oporowe) lub oddana do sieci zasilającej (hamowanie elektrodynamiczne odzyskowe). Ideę hamowania odzyskowego przedstawiono na rys. 4.12.



Rys. 4.12. Idea hamowania dynamicznego odzyskowego

Aby można było zrealizować odzysk energii podczas hamowania muszą być spełnione dwa podstawowe warunki:

- na odcinku zasilania musi istnieć odbiornik, który przejmie energię hamowania pojazdu, a prąd pobierany przez ten odbiornik musi mieć wartość nie niższą niż prąd generowany przez pojazd hamujący tj. $i_2 \geq i_1$;
- napięcie na odbieraku prądu pojazdu hamującego musi być wyższe niż napięcie na odbiorniku, tak by był możliwy przepływ prądu od pojazdu do odbiornika, a jednocześnie nie może ono być wyższe niż maksymalna wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna krótkotrwale tj. $u_2 < u_1 \leq U_{\max 2}$.

Jeżeli któryś z tych warunków nie będzie spełniony, wówczas hamowanie odzyskowe nie będzie możliwe, a układ sterowania pojazdu zrealizuje wariant hamowania oporowego.

Odbiornikiem energii może być drugi pojazd znajdujący się na odcinku zasilania, pracujący w trybie trakcyjnym (tj. rozruchu lub jazdy ze stałą prędkością). Inną możliwością jest magazynowanie energii hamowania w zasobnikach i wykorzystywanie jej przy najbliższej okazji, bądź też zastosowanie podstacji dwukierunkowych i zwrot energii do sieci energetyki przemysłowej.

Oprócz możliwości odzysku energii, inną zaletą hamowania elektrodynamicznego jest teoretyczna niemożność zablokowania i poślizgu koła, gdyż zatrzymanie wirnika maszyny wywoła zanik indukowanej siły elektromotorycznej, co spowoduje, że prąd w obwodzie przestanie płynąć i ustanie działanie hamujące. Stałe czasowe charakteryzujące obwód magnetyczny mogą wywołać zatrzymanie koła, ale trwa ono tak krótko, że wystąpienie negatywnych skutków tego zatrzymania (punktowe zużycie obręczy) jest niemożliwe. W rezultacie siła hamująca zawsze dostosowuje się automatycznie do warunków przyczepnościowych, jakie występują w chwili hamowania, co jest niemożliwe przy wykorzystaniu innych systemów hamulcowych. Stosowanie hamowania elektrodynamicznego skutkuje również zmniejszeniem zużycia klocków hamulcowych i innych elementów ciernych hamulców mechanicznych. Jest to szczególnie istotne w przypadku pojazdów często zatrzymujących się, a więc tramwajów, metra czy pociągów szybkiej kolei miejskiej. Należy jednak pamiętać, że prąd hamowania obciąża dodatkowo silniki trakcyjne. Zwiększa się zatem ich nagrzewanie, co należy uwzględnić przy doborze silników do pojazdu trakcyjnego wyposażonego w możliwość hamowania dynamicznego. Ponadto intensywność hamowania słabnie przy niższych prędkościach, a przy bardzo małych zanika. Zjawisko to jest szczególnie odczuwalne przy klasycznych systemach sterowania. Dla nowoczesnych przekształtnikowych układów napędowych stała wartość siły hamowania jest utrzymywana do prędkości bardzo niskich (rzędu kilku km/h). Jednak całkowite zatrzymanie pojazdu przy wykorzystaniu wyłącznie hamowania elektrodynamicznego (do prędkości 0 km/h) jest niemożliwe (z jednym wyjątkiem). Ostatni etap hamowania musi być więc zrealizowany przy wykorzystaniu tradycyjnych hamulców mechanicznych. Kolejną cechą hamowania elektrodynamicznego jest fakt, że hamują tylko osie napędzane. Nie jest to wadą w sytuacji, gdy wszystkie lub prawie wszystkie osie pojazdu są napędne (tramwaje, metro) ale, w przypadku pociągów ciągniętych przez lokomotywy, cecha ta skutecznie ogranicza obszar stosowalności hamulców elektrodynamicznych do podhamowywania, utrzymywania stałej prędkości na spadku itp. Hamowanie służbowe musi być, w tym przypadku, zrealizowane przy użyciu hamulców mechanicznych, gdyż w przeciwnym razie droga hamowania będzie zbyt długa.

Układ hamowania elektrodynamicznego powinien ponadto spełniać warunki stabilności mechanicznej i elektrycznej. Pod pojęciem stabilności mechanicznej rozumiemy stan równowagi, w którym każde zwiększenie prędkości pojazdu spowoduje wzrost siły hamowania, a zmniejsze-

nie szybkości ograniczy automatycznie siłę hamującą. Stabilność elektryczna to z kolei utrzymywanie równowagi elektrycznej polegającej na równomiernym obciążaniu się maszyn elektrycznych, bez względu na różnicę charakterystyk mechanicznych czy odmienną prędkość obrotową wynikającą z niejednakowych średnic kół pojazdu. Układ powinien samoczynnie wracać do stanu stabilności po jakimkolwiek zachwianiu wywołanym stanami nieustalonymi podczas procesu hamowania. Ponadto w przypadku hamowania odzyskowego zmiany wartości napięcia w sieci trakcyjnej nie powinny w sposób znaczący zmieniać natężenia prądu hamowania i tym samym siły hamującej.

4.3.1. Hamowanie elektrodynamiczne przy wykorzystaniu silników szeregowych prądu stałego

Pojazdy napędzane silnikami szeregowymi prądu stałego dają możliwość hamowania elektrodynamicznego, zarówno oporowego, jak i odzyskowego. W zależności od stopnia zawansowania technicznego pojazdu i konkretnych zastosowanych rozwiązań, hamowanie to można zrealizować na kilka sposobów, omówionych szczegółowo poniżej.

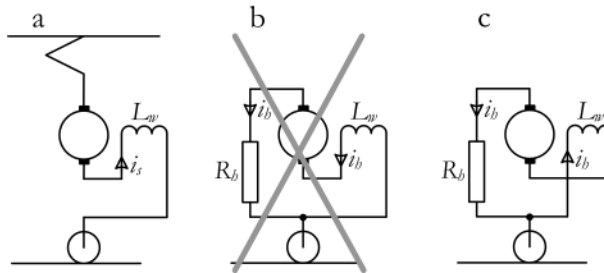
4.3.1.1. Hamowanie oporowe przy wykorzystaniu prądnicy szeregowej samowzbudnej

Jeżeli silnik szeregowy prądu stałego poruszającego się pojazdu zostanie odłączony od napięcia zasilającego, a następnie jego zaciski będą zwarte poprzez rezystancję, wówczas na skutek magnetyzmu szczątkowego nastąpi w wirniku maszyny wzbudzenie prądu o nieznaczonej wartości. Kierunek przepływu tak wytworzonego prądu będzie zgodny ze zwrotem siły elektromotorycznej SEM maszyny, czyli przeciwny, niż miało to miejsce w czasie, gdy maszyna pracowała w trybie silnikowym. Prąd ten wywoła roz magnesowanie maszyny, a co za tym idzie, zjawisko generacji zaniknie i do hamowania dynamicznego nie dojdzie. Aby tego niekorzystnego zjawiska uniknąć, należy przed rozpoczęciem procesu hamowania dokonać przełączenia uzwojeń maszyny tak, aby kierunek przepływu prądu przez uzwojenie wzbudzenia był taki sam, jak podczas pracy silnikowej. Wówczas szczątkowy prąd początkowy wywoła, na skutek dodatniego sprzężenia zwrotnego, domagnesowanie maszyny i w rezultacie prąd hamowania będzie wynikał z wartości siły elektromotorycznej generowanej przez maszynę (zależnej od jej prędkości obrotowej) i rezystancji dołączonej do jej zacisków. Przedstawiono to schematycznie na rys. 4.13.

Siła elektromotoryczna generowana w silniku trakcyjnym podczas hamowania dana jest zależnością:

$$e_s = c \cdot \Phi(i) \cdot \omega, \quad (4.1)$$

gdzie: c – stała maszyny; Φ – strumień; ω – prędkość kątowa wirnika.



Rys. 4.13. Hamowanie dynamiczne oporowe w konfiguracji prądnicy szeregowej samowzbudnej, gdzie: a) praca silnikowa; b) niewłaściwa konfiguracja obwodu – tzw. połączenie samobójcze; c) właściwa konfiguracja obwodu podczas hamowania dynamicznego

Prąd hamowania jest wprost proporcjonalny do siły elektromotorycznej i odwrotnie proporcjonalny do sumarycznej rezystancji obwodu:

$$i_b = \frac{e_s}{R_s + R_b}, \quad (4.2)$$

gdzie: R_s – rezystancja uzwojeń silnika; R_b – rezystancja rezystora hamowania.

Natomiast moment hamowania proporcjonalny jest do prądu i strumienia zgodnie z zależnością:

$$M_b = c \cdot \Phi(i) \cdot i_b. \quad (4.3)$$

Ponieważ prędkość kątowa silnika podczas hamowania maleje, zmniejsza się również wartość prądu i_b , a tym samym słabnie siła hamująca. Regulacja wartości tej siły jest możliwa na dwa sposoby:

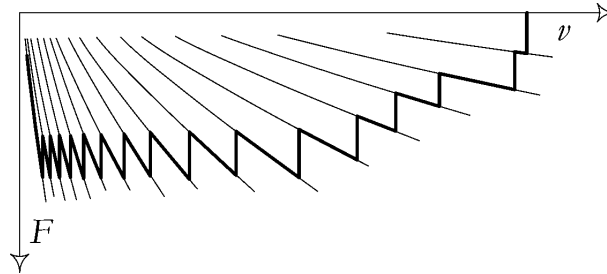
- poprzez zmianę wartości napięcia generowanego przez silnik (zmiana strumienia wzbudzenia),
- poprzez zmianę (zmniejszanie) wartości rezystancji hamowania R_b .

W praktyce korzysta się z obu metod. W początkowej fazie hamowania, gdy prędkość pojazdu jest jeszcze znaczna, prąd hamowania reguluje się, zmieniając (stopniowo zwiększając) strumień wzbudzenia maszyny. Powodem jest fakt, że brak ograniczenia wartości strumienia sprawiłby, iż siła elektromotoryczna zaindukowana w silniku trakcyjnym przekroczyłaby znacznie maksymalną dopuszczalną wartość napięcia dla tego silnika. Następnie, przy pełnym wzbudzeniu, stopniowo zmniejszana jest wartość rezystancji dołączonej do zacisków silnika, aż do całkowitego zwarcia maszyny. W rozwiązaniach klasycznych dokonuje się tego za pomocą układu stycznikowego. Urządzenie to z reguły jest konstrukcyjnie powiązane z mechanizmem rozrusznika, a jako rezystory hamowania wykorzystuje się na ogół te same elementy co podczas rozruchu. Wartości rezystancji poszczególnych stopni dobiera się tak, by charakterystyka hamowania, czyli zależność siły hamującej od prędkości pojazdu, była w przybliżeniu odwrotnością charakterystyki trakcyjnej. Wartość siły hamującej, jaką można uzyskać jest ograniczona następującymi czynnikami:

- maksymalną prędkością pojazdu,
- najwyższą wartością napięcia dopuszczalnego na zaciskach silnika,
- maksymalną wartością siły hamującej wynikającą z warunków przyczepności,
- maksymalną wartością prądu hamowania,

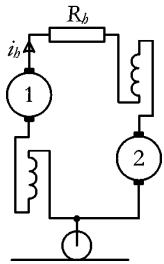
- minimalną wartością prędkości, przy której nastąpi wzbudzenie silnika i generacja siły hamującej.

Przykładowa charakterystyka hamowania oporowego pojazdu z silnikami szeregowymi prądu stałego i sterowaniem stycznikowym przedstawiona została na rys. 4.14.



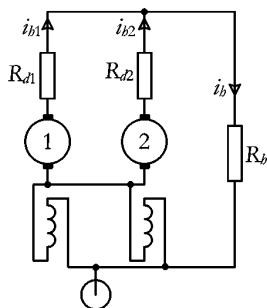
Rys. 4.14. Charakterystyka hamowania oporowego pojazdu z silnikami szeregowymi prądu stałego i sterowaniem stycznikowym

Ponieważ pojazd trakcyjny wyposażony jest na ogół w więcej niż jeden silnik wymagane jest odpowiednie połączenie maszyn podczas hamowania. W przypadku układu dwusilnikowego najprostszym rozwiązaniem jest połączenie szeregowo, tak jak pokazano na rys. 4.15. Taka konfiguracja jest stabilna elektrycznie w przypadku różnic w charakterystykach mechanicznych silników, gdyż z konieczności wartość prądu płynąca przez uzwojenia obu maszyn jest jednakowa. Jednak, gdy napięcie nominalne silników jest równe napięciu sieciowemu, to maksymalna wartość rezystancji hamowania musi być dwukrotnie większa niż rezystancji rozruchowej, co wymaga zwiększenia liczby rezystorów zamontowanych w pojeździe. Nie jest to korzystne, dlatego z połączenia szeregowego silników podczas hamowania korzysta się bardzo rzadko. Z kolei przy równoległym połączeniu maszyn, tak jak to

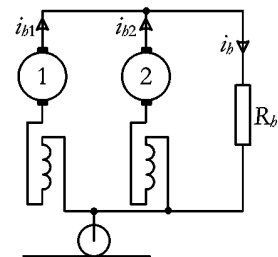


Rys. 4.15. Szeregowo połączenie silników podczas hamowania

pokazano na rys. 4.16., wartość rezystora hamowania jest taka sama, jak podczas rozruchu, jednak taki układ charakteryzuje się brakiem stabilności elektrycznej. Nawet najmniejsze zwiększenie wartości prądu, np. w silniku nr 1, spowoduje wzrost siły elektromotorycznej tego silnika i w konsekwencji dalsze zwiększenie wartości prądu. Jednocześnie mała będzie prąd płynący przez silnik nr 2, a co za tym idzie, zmniejszać się będzie jego SEM. Proces ten będzie trwał tak długo, aż prąd silnika nr 2 spadnie do zera i zmieni kierunek, zmieniając tym samym biegunowość tego silnika. Oznaczać to będzie, że w obwodzie pojawią się dwie prądnice szeregowo połączone szeregowo, a prąd płynący będzie ograniczony tylko sumaryczną



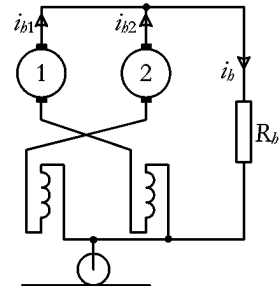
Rys. 4.17. Równoległy układ silników z połączeniem wyrównawczym



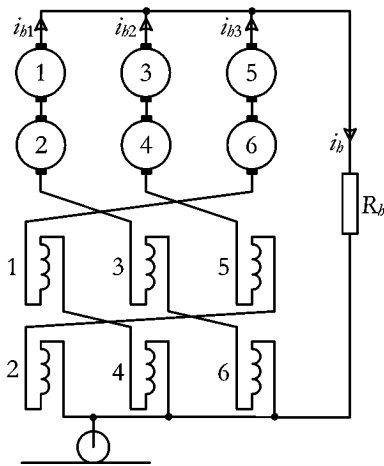
Rys. 4.16. Równoległe połączenie silników podczas hamowania

wartością rezystancji uzwojeń obu maszyn. Aby do tego nie dopuścić, stosuje się połączenie wyrównawcze lub łączy uzwojenia silników w sposób skrzyżowany.

Połączenie wyrównawcze zostało pokazane na rys. 4.17. Takie połączenie układu zapewnia stabilność elektryczną, gdyż zmiana wartości prądu twornika jednego silnika spowoduje zmianę prądów wzbudzenia obu maszyn. Wartości prądów wzbudzenia są w przybliżeniu jednakowe, niezależnie od wielkości obciążenia. Rezystory dodatkowe $R_{\rho 1}$ i $R_{\rho 2}$ stosuje się, aby zmniejszyć różnicę prądów tworników obu maszyn, która wynika z odmiennych wartości indukowanych sił elektromotorycznych oraz ich nieidentycznych charakterystyk mechanicznych. Ponieważ włączenie rezystorów dodatkowych powoduje, że rośnie dolna wartość prędkości, przy której będzie możliwe hamowanie, a ponadto komplikacji ulega obwód główny pojazdu, niekiedy zamiast tych rezystorów montuje się rezy-



Rys. 4.18. Równoległy układ silników z połączeniem skrzyżowanym



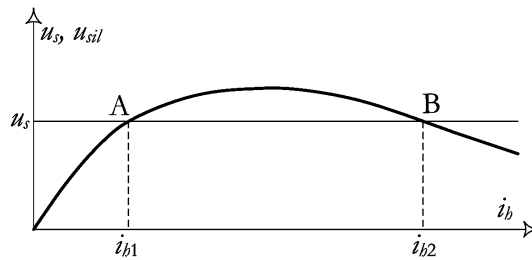
Rys. 4.19. Połączenie skrzyżowane dla pojazdu 6-cio silnikowego

stor w przewodzie wyrównawczym. Jego wartość nie może być jednak zbyt duża, aby nie naruszyć stabilności elektrycznej układu. Znacznie częściej niż połączenie wyrównawcze stosuje się skrzyżowanie połączeń uzwojeń silników. Układ taki przedstawiono na rys. 4.18. Jest on w pełni stabilny elektrycznie, gdyż zwiększenie siły elektromotorycznej np. silnika nr 1 spowoduje wzrost wartości prądu wzbudzenia silnika nr 2, i tym samym wzrośnie również siła elektromotoryczna indukowana w tym silniku, nie dopuszczając do nierównomiernego obciążenia maszyn. Połączenie skrzyżowane stosuje się również przy większej liczbie silników trakcyjnych. Na rys. 4.19 pokazano układ połączeń dla pojazdu 6-cio silnikowego przy trzech grupach równoległych po dwa silniki. Zapewnia on stabilność elektryczną i równomierne obciążenie poszczególnych silników trakcyjnych.

4.3.1.2. Hamowanie odzyskowe przy wykorzystaniu silników prądu stałego i sterowania klasycznego

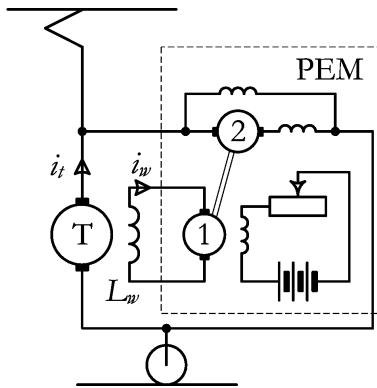
Wydawać by się mogło, że najprostszym sposobem zrealizowania hamowania odzyskowego jest bezpośrednie podłączenie maszyny, pracującej jako prądnica szeregową, do sieci zasilającej. Charakterystyka zewnętrzna takiej prądnicy przedstawiona została na rys. 4.20. Jak widać, prądnica taka ma dwa punkty pracy, oznaczone jako A i B. W punkcie A, gdy napięcie prądnicy u_{sil} jest równe napięciu zasilającemu u_s , wartość prądu wynosi i_{b1} . Jednak ten punkt pracy układu jest niestabilny. Wzrost wartości napięcia w sieci trakcyjnej spowoduje zwiększenie prądu hamowania, co tym samym zwiększy wartość siły elektromotorycznej generowanej przez maszynę, a to z kolei wywoła dalszy wzrost napięcia w sieci trakcyjnej. Proces ten będzie przebiegał teoretycznie aż do osiągnięcia stabilnego punktu pracy (B). Punkt ten jednak odpowiada bardzo dużej wartości prądu silnika (i_{b2}), przy której maszyna ulegnie zniszczeniu. Z drugiej strony zmniejszenie prędkości obrotowej silników wywołane hamowaniem spowoduje ograniczenie wartości generowanej siły elektromotorycznej. Jeżeli wartość tej siły spadnie poniżej poziomu napięcia w sieci

trakcyjnej, spowoduje to zanik efektu hamowania i maszyna przejdzie do trybu pracy silnikowej. Praktyczna realizacja hamowania odzyskowego przy wykorzystaniu maszyn prądu stałego pracujących w konfiguracji prądnicy szeregowej jest zatem niemożliwa.



Rys. 4.20. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy szeregowej przy hamowaniu odzyskowym

Rozwiązaniem jest zmiana konfiguracji maszyn elektrycznych pojazdu z szeregowej na obcowzbudną. Konfigurację obwodu głównego w trybie hamowania odzyskowego dla układu

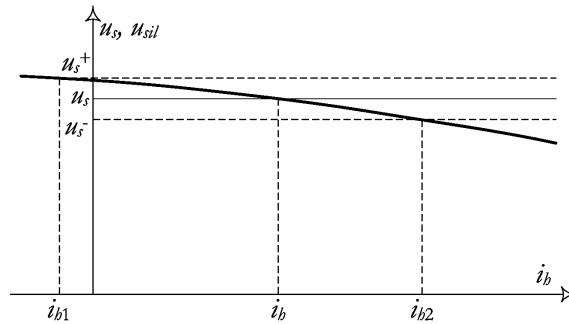


Rys. 4.21. Obcowzbudna konfiguracja silnika trakcyjnego prądu stałego podczas hamowania odzyskowego

klasycznego z przetwornicą maszynową przedstawiono na rys. 4.21. Przetwornica elektromaszynowa (PEM) składa się z silnika szeregowo bocznikowego (2), zasilanego z sieci trakcyjnej, sprzężonego mechanicznie z prądnicą obcowzbudną (1). Uzwojenie wzbudzenia silnika trakcyjnego L_w zasilane jest bezpośrednio z prądnicy, a wartość prądu wzbudzenia i_w regulowana jest poprzez zmianę napięcia na wyjściu przetwornicy. Charakterystyka zewnętrzna takiego układu przedstawiona została na rys. 4.22. W tym przypadku punkt pracy jest stabilny. Zmniejszenie wartości napięcia wywoła zwiększenie prądu silnika, który spowoduje wzrost siły elektromotorycznej maszyny i układ powróci wówczas do punktu równowagi. Problemem jest jednak bardzo duża wrażliwość układu na zmiany wartości napięcia w sieci trakcyjnej.

Należy pamiętać, że zmiany takie są w trakcji elektrycznej zjawiskiem normalnym. Nieznaczne obniżenie wartości napięcia w sieci wywołuje znaczące zwiększenie prądu hamowania, a z kolei podwyższenie napięcia spowoduje, że prąd hamowania może przyjąć nawet wartości ujemne, czyli maszyna przejdzie w tryb pracy silnikowej (patrz rys. 4.22).

Takie zmiany wartości prądu silnika wywołają analogiczne zmiany momentu hamującego, co z eksploatacyjnego punktu widzenia (komfort jazdy) jest niedopuszczalne. Aby ograniczyć wpływ zmian napięcia na wartość prądu płynącego przez silnik należy zastosować tzw. rezystor stabilizacyjny. Konfiguracja obwodu głównego przy takim rozwiązaniu została przedstawiona na rys. 4.23.



Rys. 4.22. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy obcowzbudnej przy hamowaniu odzyskowym

Przez rezystor stabilizujący R_s płynie suma prądów wzbudzenia i_w oraz twornika i_t . Napięcie wzbudzenia generowane przez przetwornicę elektromaszynową równoważone jest przez spadek napięcia na rezystancji uzwojenia wzbudzenia i rezystancji stabilizującej. Wyraża to zależność:

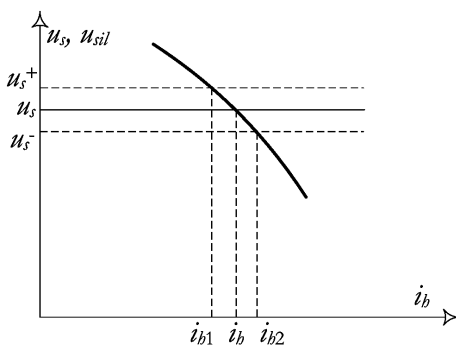
$$u_w = (i_t + i_w) \cdot R_{st} + i_w \cdot R_w, \quad (4.4)$$

gdzie: i_t – prąd twornika; i_w – prąd wzbudzenia; R_{st} – rezystancja stabilizująca; R_w – rezystancja uzwojenia wzbudzenia.

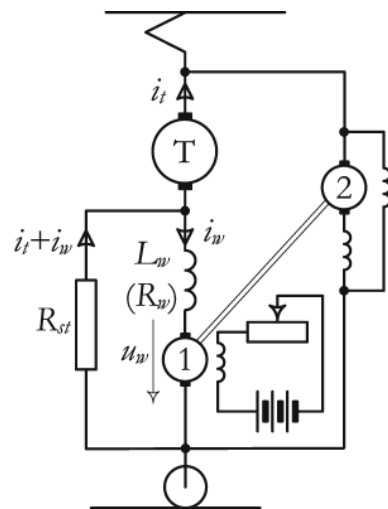
Po przekształceniu otrzymamy równanie opisujące prąd wzbudzenia:

$$i_w = \frac{u_w - i_t \cdot R_{st}}{R_s + R_w}, \quad (4.5)$$

z którego wynika że, przy stałej wartości napięcia wzbudzenia, zwiększenie prądu płynącego przez twornik (oddawanego do sieci) spowoduje zmniejszenie prądu wzbudzenia i odwrotnie. Prądy wzbudzenia i twornika nie są więc już całkowicie niezależne od siebie. To sprawia, że charakterystyka zewnętrzna ulegnie nachyleniu i przyjmie



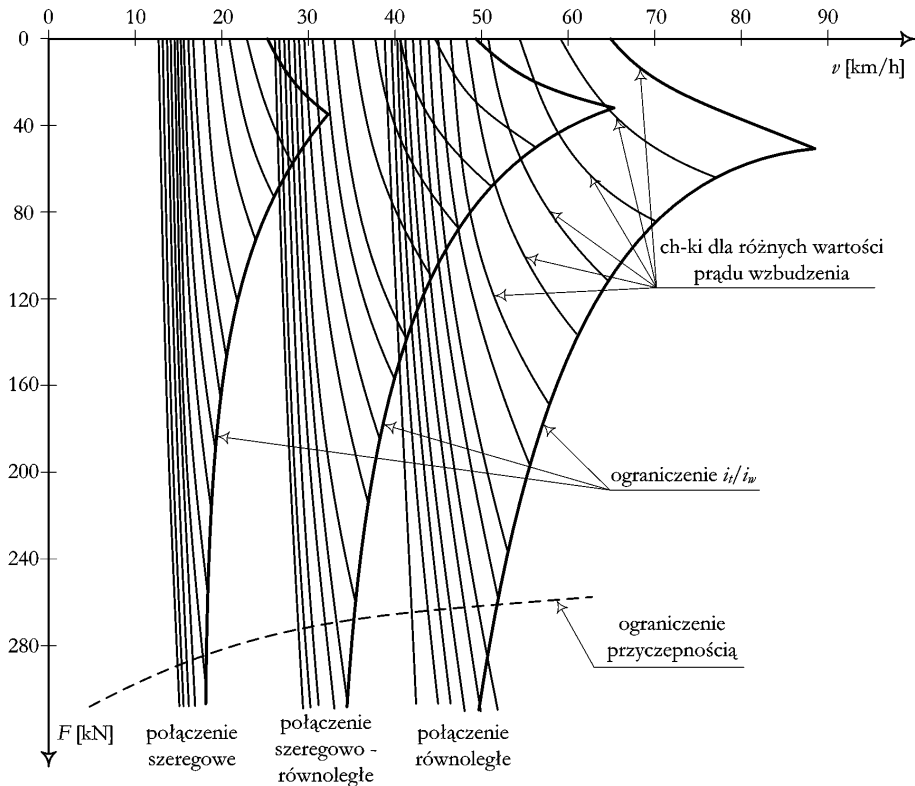
Rys. 4.24. Charakterystyka zewnętrzna układu prądnicy z rezystorem stabilizacyjnym



Rys. 4.23. Konfiguracja obwodu głównego przy hamowaniu odzyskowym z rezystorem stabilizacyjnym

kształt pokazany na rys. 4.24. Tym samym zmiany wartości napięcia w sieci trakcyjnej będą miały znacznie mniejszy wpływ na wahania prądu oddawanego i na zmiany momentu hamowania. Stromość nachylenia charakterystyki zewnętrznej jest zależna od wartości rezystancji stabilizującej. Im jest ona większa, tym bardziej stroma będzie charakterystyka i tym mniejsza wrażliwość układu na wahania napięcia w sieci trakcyjnej. W praktyce wartość rezystancji stabilizacyjnej zawiera się w granicach $0,3 \div 1$ razy rezystancja uzwojenia wzbudzenia.

Regulując wartość prądu wzbudzenia silników pojazdu, otrzymujemy rodziny charakterystyk hamowania dla różnych konfiguracji połączeń silników trakcyjnych. Należy tylko pamiętać, żeby wartość prądu twornika nie przekroczyła dwu-, trzykrotnej wartości prądu wzbudzenia, gdyż w przeciwnym wypadku pogorszeniu ulegną warunki komutacji w maszynie. Prowadzący pojazd musi zatem jednocześnie kontrolować prądy obu uzwojeń i uważać, by nie przekroczyć wyżej podanego stosunku ich wartości. Obsługa pojazdu jest więc bardziej kłopotliwa i wymaga więcej uwagi ze strony prowadzącego. Charakterystyki hamowania dla przykładowej lokomotywy elektrycznej pokazano na rys. 4.25.



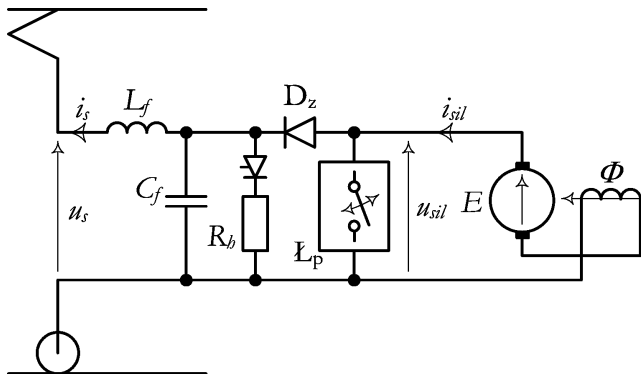
Rys. 4.25. Charakterystyka hamowania sześciosilnikowej lokomotywy elektrycznej typu B 18 [61]

Jak można zauważyć, charakterystyka hamowania odbiega znacząco od idealnej, która powinna być w kształcie odwrotnością charakterystyki rozruchu. Widać, że wartość siły hamującej nie jest stała podczas zmiany prędkości. To sprawia, że hamowanie odzyskowe w układach klasycznych z silnikami prądu stałego jako hamowanie służbowe praktycznie nie może być zastosowane. Jedynym obszarem wykorzystania rekuperacji jest utrzymywanie stałej prędkości (podhamowywanie) podczas zjeżdżania ze wzniesienia. Ta cecha, w połączeniu ze stosunkowo uciążliwym procesem sterowania (realizowanym przez prowadzącego), spowodowała, że hamowanie odzyskowe w pojazdach klasycznych zasilanych napięciem stałym, mimo technicznych możliwości jego realizacji, jest stosowane niezmiernie rzadko. W Polsce żaden będący w eksploatacji pojazd klasyczny nie umożliwia hamowania odzyskowego.

Teoretycznie możliwym do realizacji rozwiązaniem hamowania odzyskowego przy wykorzystaniu silników prądu stałego jest zastosowanie automatycznych regulatorów prądu wzbudzenia, które będą utrzymywały (w pewnych granicach) stałą wartość prądu twornika, niezależnie od prędkości pojazdu i wysokości napięcia w sieci zasilającej. Nie zostało to jednak nigdy urzeczywistnione, gdyż w momencie, kiedy rozwój techniki (energoelektroniki) umożliwił praktyczną budowę takiego układu, wymyślono bardziej zaawansowane rozwiązanie zapewniające praktyczne i w pełni funkcjonalne realizowanie hamowania odzyskowego.

4.3.1.3. Hamowanie odzyskowe przy wykorzystaniu silników prądu stałego sterowanych impulsowo

Zastosowanie impulsowej regulacji pracy silników szeregowych prądu stałego umożliwiło nieskomplikowaną realizację hamowania odzyskowego. Zasada pracy układów impulsowych została przedstawiona w rozdz. 3.2.2. W celu przeprowadzenia hamowania konfiguracja obwodu głównego pojazdu musi ulec zmianie, tak jak przedstawiono to na rys. 4.26.



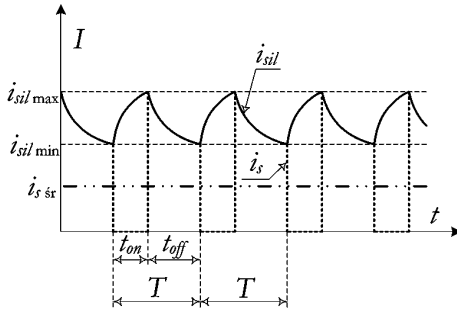
Rys. 4.26. Uproszczona konfiguracja obwodu głównego pojazdu zasilanego impulsowo podczas hamowania – opis w tekście

W porównaniu z konfiguracją obwodu podczas rozruchu przedstawioną na rys. 3.17. zamieniono miejscami łącznik półprzewodnikowy L_p i diodę D_z . Zmieniono również biegunowość uzwojenia wzbudzenia, tak by nie nastąpiło przemagnesowanie maszyny. W czasie, gdy łącznik półprzewodnikowy jest w stanie przewodzenia, maszyna pracująca w konfiguracji prądnicy szeregowej samowzbudnej ulega zwarceniu. Prąd płynący w obwodzie narasta. Wprowadzenie łącznika w stan blokowania powoduje pojawienie się na elementach indukcyjnych maszyny napięcia samoindukcji zgodnie z zależnością:

$$u_{ind} = (L_t + L_w) \cdot \frac{di_{sil}}{dt}, \quad (4.6)$$

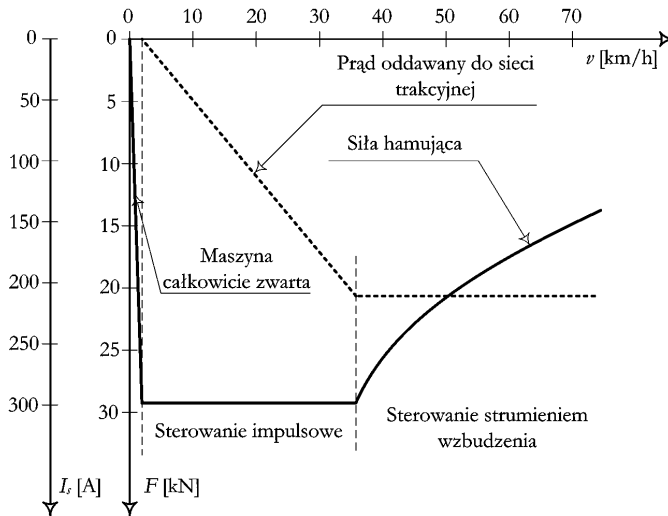
gdzie: L_t – indukcyjność uzwojenia twornika; L_w – indukcyjność uzwojenia wzbudzenia; i_{sil} – prąd silnika.

Jeżeli suma napięcia samoindukcji i siły elektromotorycznej generowanej przez maszynę będzie wyższa niż wartość napięcia w sieci trakcyjnej u_s , wówczas jest możliwe oddanie energii do układu zasilania. Przebieg prądu silnika i prądu oddawanego do sieci zasilającej przedstawiono



Rys. 4.27. Przebieg prądu silnika i prądu oddawanego do sieci trakcyjnej podczas hamowania impulsowego

dopuszczalną wartość maksymalną oznacza to, że w danej chwili zrealizowanie hamowania odzyskowego nie jest możliwe (brak odbioru energii). W takim przypadku ulegnie załączeniu rezystor hamowania R_h i zostanie zrealizowane hamowanie oporowe. W niektórych pojazdach, po załączeniu rezystora hamowania, cały proces musi być już zrealizowany jako oporowy, nawet gdy w jego trakcie pojawi się odbiór energii. Bardziej zaawansowane układy sterowania monitorują w sposób ciągły wartość napięcia i w przypadku pojawienia się odbioru, hamowanie oporowe zostaje przerwane i reszta procesu jest zrealizowana w trybie hamowania odzyskowego. Charakterystyka hamowania przykładowego pojazdu z układem sterowania impulsowego została pokazana na rys. 4.28.



Rys. 4.28. Charakterystyka hamowania zmodernizowanego tramwaju typu 105N z rozruchem impulsowym [18]

W początkowej fazie hamowania (przy dużej prędkości jazdy) sterowanie pracą układu odbywa się poprzez regulację strumienia wzbudzenia, tak by prąd oddawany do sieci miał wartość stałą. Często wówczas zmieniana jest konfiguracja obwodu na obcowzbudną lub szeregowo obcowzbudną (tak jak w przypadku tramwaju 105N po modernizacji, którego charakterystyka

jest omawiana). Przy pełnej wartości prądu wzbudzenia układ przechodzi na pracę impulsową. Średnia wartość prądu płynąca przez silniki trakcyjne jest wówczas utrzymywana na stałym poziomie, a stopniowo zwiększa się współczynnik wypełnienia przełączających elementów półprzewodnikowych. Wartość prądu rekuperacji maleje według zależności liniowej, aż do momentu, gdy silniki trakcyjne zostają zwarte (współczynnik wypełnienia łącznika półprzewodnikowego wynosi jeden). W tym momencie maszyny pracują jak zwarte prądnice szeregowo i wytworzona energia elektryczna jest tracona w rezystancji uzwojeń tych maszyn. Siła hamowania wówczas stopniowo zanika, proporcjonalnie do zmniejszania się wartości prądu. Końcowe dohamowanie pojazdu musi odbyć się za pomocą hamulców mechanicznych lub elektromechanicznych.

Jak widać, kształt charakterystyki hamowania jest taki, jakiego oczekujemy, a automatyczne układy regulacji sprawiają, że obsługa pojazdu jest prosta. Hamowanie odzyskowe przy użyciu układów impulsowych stosowano powszechnie w pojazdach komunikacji miejskiej (tramwajach, trolejbusach, pociągach metra) od przełomu lat 70. i 80. XX wieku. Obecnie nowo budowane pojazdy wykorzystują bardziej zaawansowane systemy napędowe, ale układy impulsowe nadal są chętnie stosowane podczas modernizacji wozów klasycznych. Sterowanie impulsowe w pojazdach kolejowych stosowane jest bardzo rzadko, a wynika to z faktu, że w momencie, gdy pojawiły się elementy energoelektroniczne o wystarczającej mocy dla zastosowań kolejowych, popularność osiągnęły napędy przekształtnikowe z silnikami indukcyjnymi. W Polsce jedynie krótka, eksperymentalna seria lokomotyw manewrowych serii *EM10* korzysta z układów impulsowych, jednak nie realizują one hamowania odzyskowego, a jedynie rezystorowe.

4.3.2. Hamowanie elektrodynamiczne przy wykorzystaniu silników prądu przemiennego

Analogicznie jak w przypadku pojazdów z silnikami prądu stałego, hamowanie elektrodynamiczne jest możliwe do przeprowadzenia, gdy pojazdy napędzane są silnikami prądu przemiennego. W zależności od typu zastosowanego silnika, sposobu doprowadzania energii i konstrukcji układu sterowania pojazdu możliwe jest zrealizowanie hamowania elektrodynamicznego w różnych wariantach, a mianowicie:

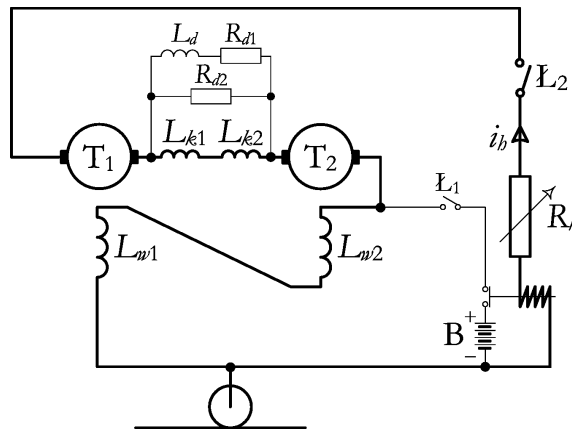
- pojazdy z silnikami jednofazowymi komutatorowymi napięcia przemiennego – hamowanie rezystorowe lub odzyskowe;
- pojazdy z silnikami trójfazowymi indukcyjnymi zasilane trójfazowo – tylko hamowanie odzyskowe;
- pojazdy z silnikami trójfazowymi indukcyjnymi lub synchronicznymi, zasilane z przekształtnika – hamowanie rezystorowe lub odzyskowe (zdolność do zrealizowania hamowania odzyskowego zależy od konstrukcji i metody sterowania przekształtnika).

4.3.2.1. Hamowanie oporowe pojazdów z silnikami jednofazowymi komutatorowymi prądu przemiennego

Hamowanie elektrodynamiczne rezystancyjne w pojazdach z silnikami jednofazowymi komutatorowymi prądu przemiennego może być zrealizowane dla trzech trybów pracy maszyny:

- działającej jako prądnica szeregową samowzbudna prądu stałego,
- działającej jako prądnica obcowzbudna jednofazowa prądu przemiennego,
- działającej jako prądnica obcowzbudna prądu stałego.

Możliwość hamowania w trybie prądnicy prądu stałego wynika z podobieństwa w konstrukcji pomiędzy maszyną szeregową prądu stałego, a jednofazową komutatorową prądu przemiennego. Sposób sterowania pracą układu i charakterystyka hamowania będą identyczne dla obu typów pojazdów. W przypadku pojazdów prądu przemiennego wymagana jest jednak pewna modyfikacja obwodu głównego. Wynika ona z faktu, że po odłączeniu zasilania silników trakcyjnych w momencie wejścia w tryb wybiegu, nie ma możliwości stwierdzenia poziomu i zwrotu magnetyzmu szczątkowego w uzwojeniach wzbudzenia maszyn. Gdyby bezpośrednio dokonać zwarcia obwodu silnika poprzez rezystor hamowania, tak jak to ma miejsce w przypadku pojazdów prądu stałego, prawdopodobieństwo, że hamowanie zostanie zainicjowane wynosi zaledwie około 25%. W pozostałych przypadkach wartość magnetyzmu szczątkowego będzie zbyt niska lub jego zwrot będzie przeciwny i maszyna nie ulegnie wzbudzeniu. Rozwiązaniem jest dodanie źródła prądu stałego, które w początkowej fazie hamowania dokonuje wstępnego wzbudzenia maszyny, co pokazano na rys. 4.29.

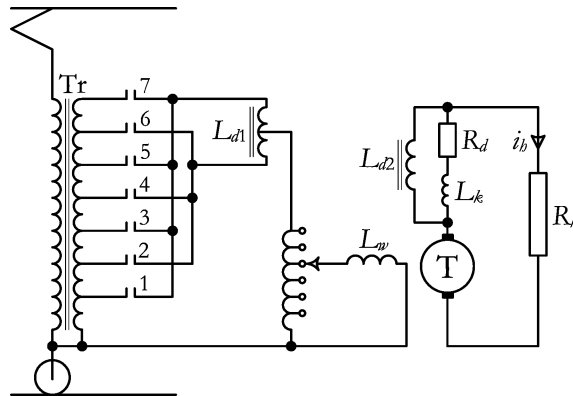


Rys. 4.29. Hamowanie rezystancyjne silnikami komutatorowymi napięcia przemiennego pracującymi jako prądnice prądu stałego (opis w tekście)

W celu rozpoczęcia procesu hamowania należy zamknąć łącznik L_1 , a następnie L_2 . Zamknięcie łącznika L_1 spowoduje wstępne wzbudzenie maszyn, określając jednocześnie zwrot napięcia generowanego i kierunek przepływu prądu i_b . Po załączeniu łącznika L_2 tworniki maszyn zaczną generować siłę elektromotoryczną, która spowoduje przepływ prądu i_b o niedużej wartości. Na skutek dodatniego sprzężenia zwrotnego dowzbudzi on maszyny i dalszy proces hamowania odbędzie się identycznie jak dla pojazdów zasilanych napięciem stałym. Wzrost wartości prądu i_b powyżej pewnego poziomu spowoduje automatyczne odłączenie baterii, zapobiegając tym samym niekontrolowanemu zwiększaniu generowanego napięcia. Zbocznikowanie pomocniczych uzwojeń komutacyjnych L_{k1} i L_{k2} układem rezystancyjno-indukcyjnym wynika z konieczności dopasowania wartości indukcji magnetycznej w strefie komutacji maszyny w zależności od tego, czy pracuje ona przy prądzie przemiennym (tryb silnikowy), czy przy prądzie stałym (tryb prądnicowy). Przy prądzie stałym dławik L_d stanowi praktycznie zwarcie, i w związku z tym wartość prądu płynącego przez uzwojenia komutacyjne jest mniejsza. Odwrotna sytu-

acja występuje przy prądzie przemiennym. To sprawia, że wartość indukcji magnetycznej w strefie komutacji jest wyższa przy prądzie przemiennym niż przy stałym. Taka konieczność wynika z faktu, że przy prądzie przemiennym potrzebna jest kompensacja w zwartym przez szczotkę zezwoju uzwojenia twornika, zarówno wpływu siły elektromotorycznej rotacji, jak i siły elektromotorycznej transformacji. Przy prądzie stałym występuje jedynie wpływ SEM rotacji, w związku z czym strumień indukcji magnetycznej w strefie komutacji musi być mniejszy. Dodatkową cechą zastosowania układu wstępnego wzbudzenia maszyny jest brak konieczności zmiany biegunowości uzwojenia wzbudzenia, jak to miało miejsce w przypadku silników prądu stałego. Charakterystyka hamowania jest identyczna, jak dla pojazdów prądu stałego (patrz rys. 4.14).

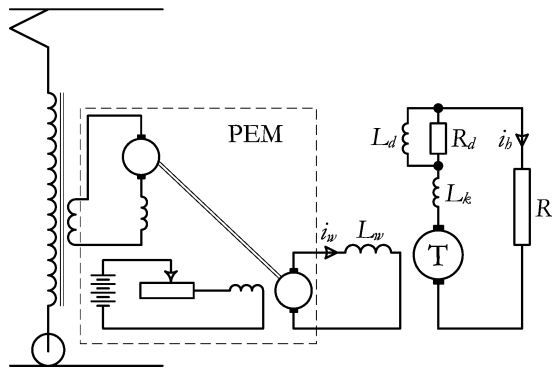
Drugim sposobem przeprowadzenia hamowania rezystorowego jest połączenie układu w konfiguracji prądnicy obcowzbudnej napięcia przemiennego, tak jak to pokazano na rys. 4.30.



Rys. 4.30. Konfiguracja obwodu głównego pojazdu podczas hamowania oporowego w trybie prądnicy obcowzbudnej napięcia przemiennego (opis w tekście)

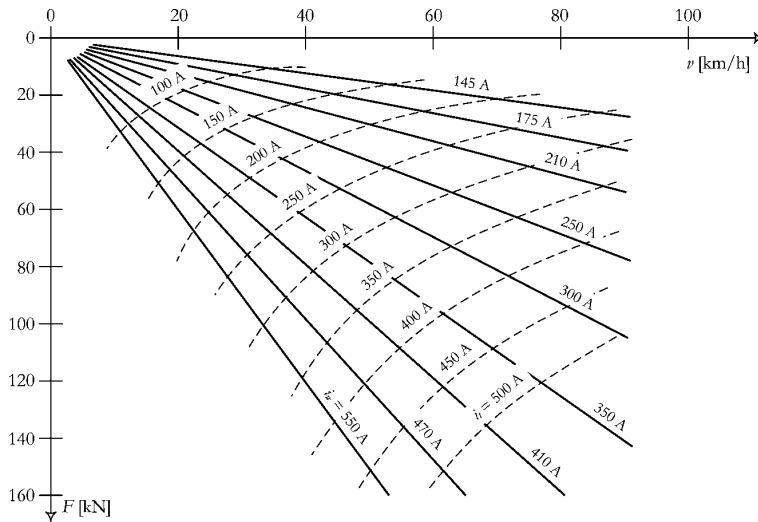
Po przejściu na tryb prądnicowy uzwojenie wzbudzenia maszyny jest podłączone do autotransformatora sterującego, który to autotransformator łączy się do wyjścia stycznikowego układu regulacji wykorzystywanego podczas pracy silnikowej. Przy pojazdach wielosilnikowych uzwojenia wzbudzenia wszystkich maszyn łączy się szeregowo, tak by móc korzystać z możliwie wysokiego odczepu transformatora głównego pojazdu. Umożliwia to zwiększenie zakresu regulacji strumienia wzbudzenia i sprawia, że prąd wzbudzenia wszystkich maszyn jest taki sam. Rozpoczęcie pracy prądnicowej sprawia, że faza prądu twornika, a więc i pomocniczego uzwojenia kompensacyjnego L_k zmienia się o około 180° w porównaniu z pracą silnikową. Z kolei faza prądu wzbudzenia pozostaje praktycznie niezmienną. To sprawia, że znacznie wzrasta negatywny wpływ SEM transformacji na zwarty przez szczotki zezwój uzwojenia twornika. Aby temu zapobiec, należy zmienić fazę prądu płynącego przez uzwojenia kompensacyjne. Dokonuje się tego, bocznikując te uzwojenia dławikiem L_{d2} . Dzięki temu kompensuje się SEM transformacji podczas pracy prądnicowej maszyny. Wadą tej metody hamowania jest zależność momentu hamującego od aktualnego poziomu napięcia w sieci zasilającej. Każda zmiana wartości tego napięcia powoduje, przy klasycznym układzie sterowania, zmianę prądu wzbudzenia i tym samym wpływa na pracę maszyn elektrycznych pojazdu. Częściowym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie, do zasilania uzwojenia wzbudzenia, niezależnego źródła prądu stałego. W rozwiązaniach klasycznych źródłem tym jest przetwornica elektromaszynowa, składająca się

z silnika komutatorowego prądu przemiennego i obcowzbudnej prądnicy prądu stałego. Pozwala to na pewne uniezależnienie się od wahań napięcia w sieci trakcyjnej. Poglądowy schemat obwodu hamowania takiego pojazdu pokazano na rys. 4.31.



Rys. 4.31. Konfiguracja obwodu głównego pojazdu podczas hamowania oporowego w trybie prądnicy obcowzbudnej napięcia stałego (PEM – przetwornica elektromaszynowa)

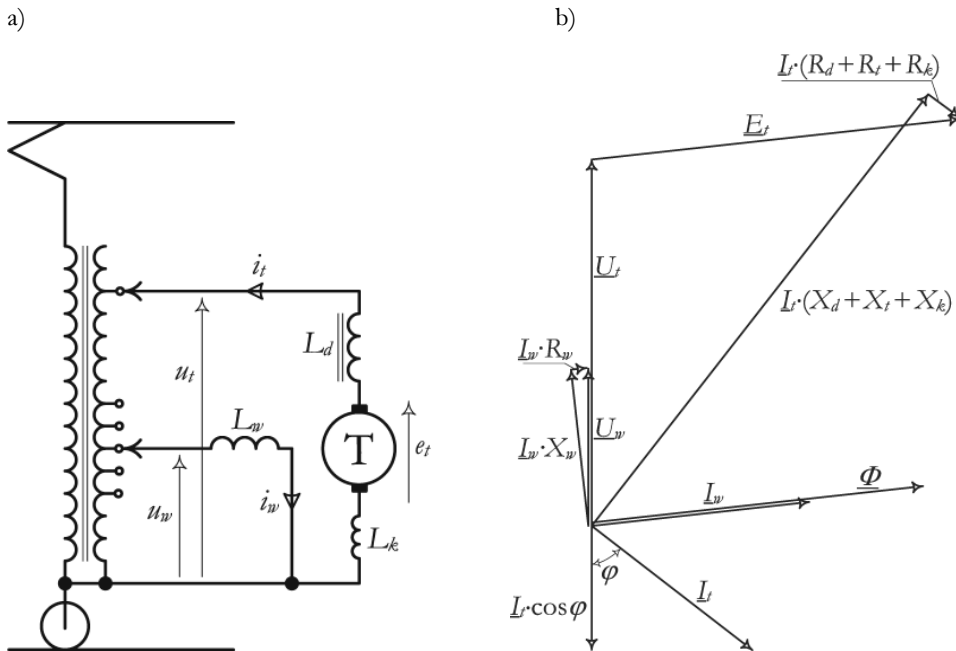
Niezależnie od tego, czy maszyny elektryczne pojazdu pracują w trybie prądnicy obcowzbudnej prądu przemiennego, czy stałego, charakterystyka hamowania dla obu wariantów jest praktycznie identyczna. Regulując wartością prądu wzbudzenia, można sterować siłą hamowania, gdyż od prędkości pojazdu i strumienia wzbudzenia zależy SEM generowana przez maszynę, co przekłada się bezpośrednio na prąd twornika i wartość siły hamującej. Przy niskich prędkościach skuteczność procesu spada i siła hamująca maleje, co jest zjawiskiem normalnym przy hamowaniu elektrodynamicznym w układach klasycznych. Przykładową charakterystykę hamowania pojazdu przy pracy maszyn w trybie prądnicy obcowzbudnej pokazano na rys. 4.32. Jest to charakterystyka elektrycznego zespołu trakcyjnego typu *ABDe 2/8*, eksploatowanego przez koleje szwajcarskie.



Rys. 4.32. Przykładowa charakterystyka hamowania elektrodynamicznego pojazdu wyposażonego w silniki komutatorowe pracujące w trybie prądnicy obcowzbudnej (zespół trakcyjny *ABDe 2/8*)

4.3.2.2. Hamowanie odzyskowe pojazdów z jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego

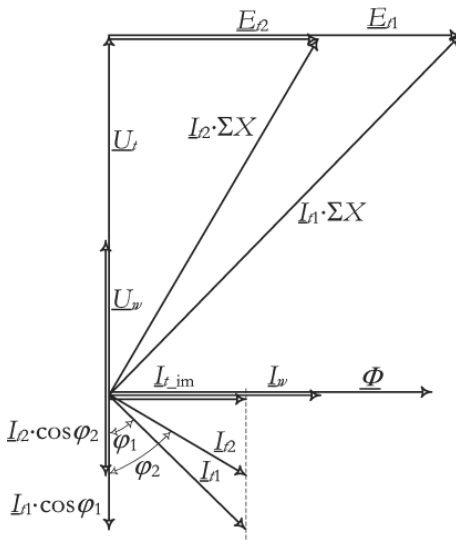
W przypadku pojazdów z jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego, podobnie jak w przypadku maszyn prądu stałego, szeregową konfiguracją uzwojeń silnika nie umożliwia realizacji hamowania odzyskowego. Najprostszą konfiguracją obwodu głównego pojazdu, dla której można wykonać hamowanie odzyskowe, jest układ ze wzbudzeniem równoległym przedstawiony na rys. 4.33a. Wykres wektorowy napięć i prądów pokazano na rys. 4.33b.



Rys. 4.33. Hamowanie odzyskowe silnikiem komutatorowym jednofazowym prądu przemiennego w konfiguracji ze wzbudzeniem równoległym, gdzie: a) uproszczony schemat obwodu głównego; b) wykres wektorowy napięć i prądów (opis w tekście)

Uzwojenie wzbudzenia zasilane jest bezpośrednio z transformatora trakcyjnego, a wartość prądu jest regulowana przez zmianę odczepu transformatora. Do uzwojenia twornika jest podłączony szeregowo dławik dodatkowy L_d , którego zadaniem jest ograniczenie prądu w obwodzie twornika. Wektor napięcia wzbudzenia \underline{U}_w jest w fazie z wektorem napięcia \underline{U} , do którego podłączony jest obwód twornika. Napięcie wzbudzenia równoważone jest sumą geometryczną spadków napięć na reaktancji indukcyjnej X_w i rezystancji R_w uzwojenia wzbudzenia. Prąd wzbudzenia \underline{I}_w jest przesunięty w fazie o 90° względem spadku napięcia na reaktancji indukcyjnej uzwojenia wzbudzenia. Zwrot wektora strumienia wzbudzenia $\underline{\Phi}$ jest taki, jak zwrot wektora prądu \underline{I}_w . Siła elektromotoryczna rotacji \underline{E}_t , generowana przez twornik maszyny jest w fazie ze strumieniem wzbudzenia. Spadek napięcia na reaktancjach indukcyjnych i rezystancjach obwodu twornika musi zrównoważyć geometryczną sumę napięcia \underline{U}_t i SEM rotacji \underline{E}_t . Wypadkowa reaktancja indukcyjna obwodu twornika jest sumą reaktancji dławika dodatkowego X_d , uzwojenia komutacyjnego X_k i uzwojenia samego twornika X_t , a rezystancja sumą oporności tych elementów, czyli R_d , R_k i R_t . Kierunek wektora prądu twornika \underline{I}_t jest przesunięty o 90° względem

spadku napięcia na elementach indukcyjnych obwodu twornika. Składowa czynna prądu twornika $I_t \cos \varphi$, będąca w przeciwfazie do napięcia \underline{U} , świadczy o zaistnieniu hamowania odzyskowego. Jak można zauważyć, cechą tej metody hamowania jest dość niska wartość współczynnika



Rys. 4.34. Uproszczony wykres wektorowy dla układu hamowania odzyskowego silnikiem jednofazowym komutatorowym przy różnych prędkościach jazdy

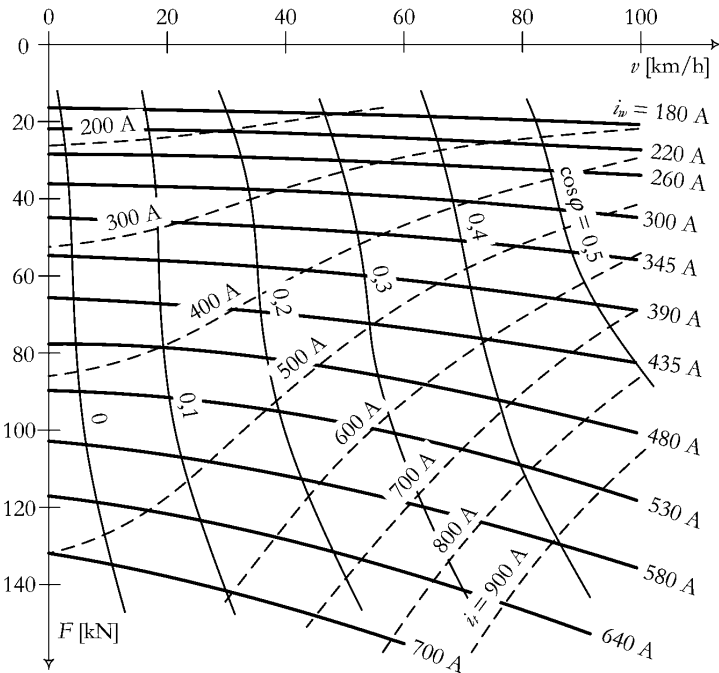
mocy. Ponadto indukcyjność dławika dodatkowego i jego prąd znamionowy muszą być znaczne, a wytrzymałość napięciowa wyższa niż wartość napięcia na odczepie transformatora, do którego podłączony jest obwód twornika, co pociąga za sobą zwiększenie masy i wymiarów elementu. Jednak te niezadowalające cechy układu są rekompensowane przez bardzo korzystny, z eksploatacyjnego punktu widzenia, kształt charakterystyki hamowania. Dla lepszego zobrazowania tego zagadnienia na rys. 4.34. pokazano uproszczony wykres wektorowy napięć i prądów w układzie dla dwóch różnych wartości prędkości pojazdu. Uproszczenie polega na pominięciu rezystancji występujących w obwodzie. Wyższej prędkości jazdy odpowiada większa wartość SEM rotacji \underline{E}_{t1} , niższej – mniejsza \underline{E}_{t2} . Odpowiadają im dwie wartości prądu twornika I_{t1} oraz I_{t2} . Wraz ze zmniejszaniem prędkości wartość prądu maleje

oraz zdecydowanie pogarsza się współczynnik mocy. Po rozłożeniu wektora prądu twornika na część czynną i bierną widać, że zmniejsza się jedynie moduł części czynnej, a składowa bierna pozostaje niezmienną. Wiedząc ponadto, że moment jednofazowego silnika komutatorowego prądu przemiennego określony jest zależnością:

$$M = C \cdot \Phi \cdot i_t \cdot \cos \Psi, \quad (4.7)$$

gdzie: C – stała maszyny; Ψ – kąt pomiędzy strumieniem wzbudzenia, a prądem twornika; widzimy, że przy tej konfiguracji układu moment hamujący na wale maszyny jest proporcjonalny do składowej biernej prądu twornika, gdyż właśnie ta składowa jest w fazie ze strumieniem wzbudzenia. Składowa czynna nie będzie miała udziału w generacji momentu mechanicznego, gdyż $\cos 90^\circ = 0$. Ponieważ zaś wartość składowej biernej prądu twornika jest niezależna od prędkości pojazdu, niezależny od niej będzie również moment hamujący generowany na wale maszyny. Dla stałej wartości napięcia u_t i prądu wzbudzenia i_w , siła hamowania będzie więc teoretycznie niezmienna w całym zakresie prędkości pojazdu, tj. od prędkości maksymalnej aż do pełnego zatrzymania. W praktyce, ze względu na istnienie rezystancji w obwodach twornika i wzbudzenia wartość siły hamowania będzie nieznacznie wzrastać wraz ze zwiększaniem prędkości pojazdu. Wystąpienie momentu na wale maszyny dla prędkości bliskich zeru i przy pełnym zatrzymaniu jest możliwe, ponieważ dla tego zakresu prędkości współczynnik mocy przyjmuje wartości ujemne, co oznacza, że energia potrzebna na wytworzenie siły hamującej jest pobierana z sieci trakcyjnej. Przykładową charakterystykę hamowania pojazdu wyposażonego w układ omówiony powyżej pokazano na rys. 4.35. Oprócz krzywych przedstawiających zależność siły

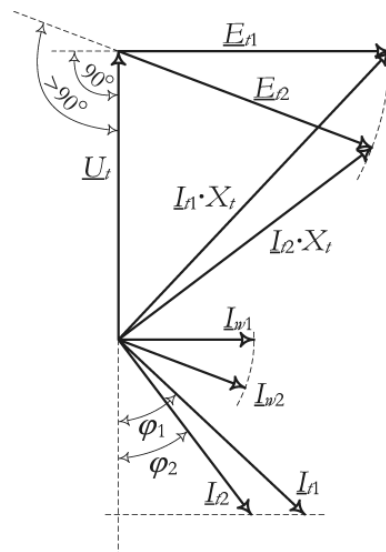
hamowania od prędkości pojazdu dla różnych wartości prądu wzbudzenia, wykreślono krzywe odpowiadające stałym współczynnikom mocy oraz krzywe stałych prądów obwodu twornika.



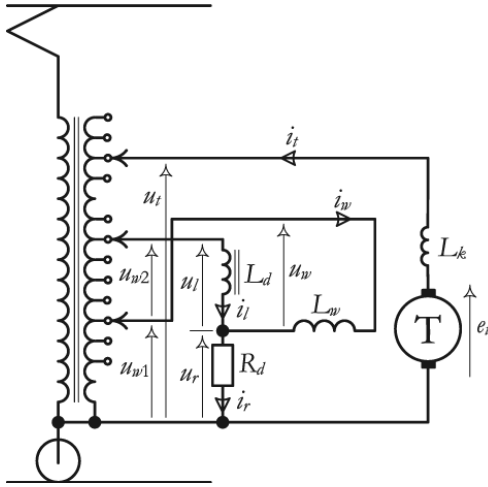
Rys. 4.35. Charakterystyka hamowania elektrodynamicznego odzyskowego pojazdu z silnikami jednofazowymi komutatorowymi prądu przemiennego pracującymi w trybie wzbudzenia równoległego

Niska wartość współczynnika mocy sprawia, że efektywność hamowania odzyskowego nie jest wysoka. Aby podwyższyć ten współczynnik, należy zwiększyć przesunięcie fazowe pomiędzy wektorami SEM rotacji \underline{E} i napięcia \underline{U}_t do wartości przekraczającej 90° , tak jak to pokazano schematycznie na wykresie (patrz rys. 4.36). Widać, że przy niezmięnionej wartości prądu wzbudzenia i SEM rotacji (moduły wektorów \underline{E}_1 i \underline{E}_2 są sobie równe, podobnie jak \underline{I}_{w1} oraz \underline{I}_{w2}), nastąpiło zmniejszenie wartości prądu płynącego w obwodzie twornika i zdecydowane podwyższenie współczynnika mocy układu. Należy zauważyć również, że składowa czynna prądu twornika także pozostała niezmienną. Zwiększono więc efektywność hamowania odzyskowego.

Aby zrealizować takie założenia należy w układzie przedstawionym na rys. 4.33a zmienić sposób podłączenia uzwojenia wzbudzenia. Połączenie takie, nazywane mostkowym, pokazano na rys. 4.37. Uzwojenie wzbudzenia L_w jednym końcem podłączone jest pomiędzy odczep transformatora trakcyjnego, a środkowy zacisk dwójnika szeregowego $R_d L_d$, który to dwójnik dołączony



Rys. 4.36. Poprawa współczynnika mocy – opis w tekście

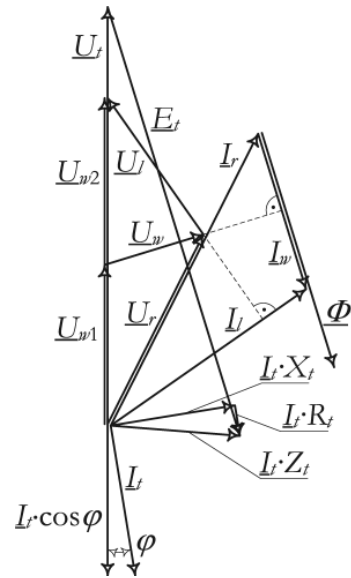


Rys. 4.37. Hamowanie odzyskowe silnikiem jednofazowym komutowanym prądu przemiennego – połączenie mostkowe uzwojenia wzbudzenia – opis w tekście

z pierwszym prawem Kirchhoffa. Wektor strumienia wzbudzenia Φ , którego zwrot jest zgodny z wektorem I_w determinuje zwrot wektora SEM rotacji E_r . Sumę geometryczną wektorów U_r i E_r zamyka spadek napięcia na impedancji Z_r obwodu twornika, złożony ze spadków na reaktancji indukcyjnej X_r i rezystancji R_r tego obwodu. Prąd twornika I_r , przesunięty o 90° względem indukcyjnego spadku napięcia jest praktycznie w przeciwfazie do napięcia U_r , dając współczynnik mocy bliski jedności. Regulując wzajemny stosunek napięć U_{w1} i U_{w2} , można sterować wartością współczynnika mocy układu.

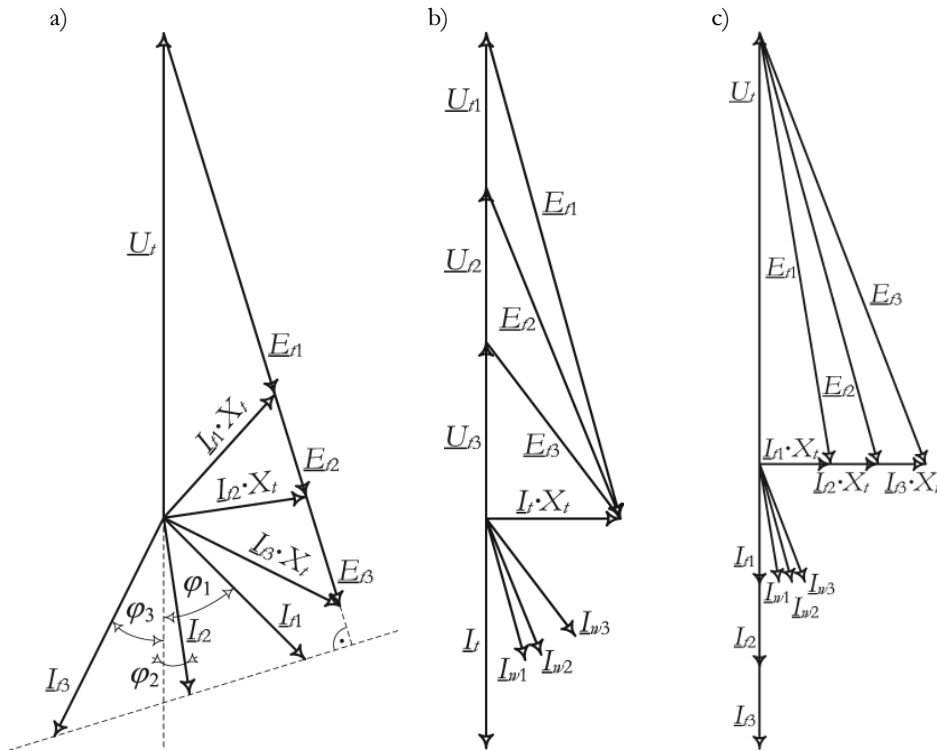
Podobnie jak w układzie z równoległym połączeniem obwodu wzbudzenia, siła hamująca jest niezależna od prędkości pojazdu, co pokazuje uproszczony wykres wektorowy (pominięto rezystancje elementów indukcyjnych) przedstawiony na rys. 4.39a. Trzema różnymi prędkościami pojazdu odpowiadają trzy wartości SEM rotacji E_{r1} , E_{r2} oraz E_{r3} (zmiany SEM rotacji są proporcjonalne do zmian prędkości). Widać, że zarówno dla najniższej, jak i najwyższej prędkości wartość prądu twornika wzrasta, a współczynnik mocy dość gwałtownie się pogarsza. Składowa prądu twornika będąca w fazie ze strumieniem wzbudzenia, a co za tym idzie w fazie z SEM rotacji pozostaje mimo to niezmienna, czyli, zgodnie z zależnością 4.7, siła hamująca jest stała. Jednak zmiany prędkości pojazdu w szerszych granicach względem wartości, przy której współczynnik mocy równy jest jedności wywołują niedopuszczalnie duże zwiększenie prądu twornika, co może doprowadzić do uszkodzenia maszyny. Praca układu przy stałej wartości prądu wzbudzenia i niezmiennym napięciu U_r ,

jest do innego odczepu transformatora. Takie połączenie sprawia, że jest możliwe sterowanie kątem przesunięcia fazowego prądu wzbudzenia. Pokazano to na wykresie wektorowym przedstawionym na rys. 4.38. Napięcia U_{w1} oraz U_{w2} są w fazie z napięciem U_r , do którego podłączony jest obwód twornika. Napięcia te równoważy suma geometryczna spadków napięć na reaktancji dławika dodatkowego X_d i rezystancji dodatkowej R_d . Prąd I_r płynący przez rezystor jest w fazie z napięciem U_r , a prąd I_l jest przesunięty o 90° względem napięcia U_r . Wektor napięcia wzbudzenia U_w łączy punkt końca i początku wektorów U_{w1} oraz U_{w2} z punktem końca i początku wektorów U_r oraz U_l . Z kolei wektor prądu wzbudzenia I_w jest zwrócony prostopadle do wektora napięcia i zamyka trójkąt prądów I_r oraz I_l , zgodnie



Rys. 4.38. Wykres wektorowy prądów i napięć dla układu z rys. 4.37. – opis w tekście

do którego podłączony jest obwód twornika jest możliwa zatem jedynie dla wąskiego zakresu prędkości w pobliżu wartości odpowiadającej współczynnikowi mocy równemu jeden.

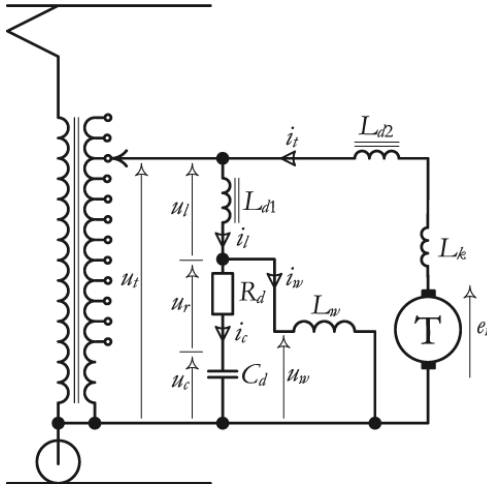


Rys. 4.39. Uproszczone wykresy wektorowe dla układu z rys. 4.37, gdzie: a) zmiana współczynnika mocy przy zmianie prędkości pojazdu przy stałych wartościach \underline{U}_t oraz \underline{L}_w ; b) utrzymanie stałego współczynnika mocy przy zmianie prędkości; c) regulacja siły hamującej przy stałej wartości prędkości – opis w tekście

Aby utrzymać w przybliżeniu stałą wartość siły hamującej w szerokim zakresie zmian prędkości pojazdu, przy zachowaniu wysokiego współczynnika mocy, należy jednocześnie zmieniać amplitudę napięcia \underline{U}_t i fazę prądu wzbudzenia \underline{L}_w , tak jak to pokazano na rys. 4.39b. Widać, że mimo zmniejszania prędkości moduł i zwrot wektora prądu twornika nie ulegają zmianie, a współczynnik mocy jest utrzymywany na poziomie jedności. Nieznacznie zmniejsza się natomiast siła hamująca, gdyż składowa prądu twornika będąca w fazie ze strumieniem, a więc i prądem wzbudzenia, ulega ograniczeniu. Teoretycznie wysoką wartość współczynnika mocy można utrzymać aż do bardzo małej prędkości, jednak siła hamująca spadnie wówczas do zera (przy \underline{U}_t bliskim zeru kierunki wektorów strumienia wzbudzenia i prądu twornika tworzą kąt bliski 90°). Dlatego w praktyce, gdy prędkość spadnie do poziomu, przy którym odejście od wysokiej wartości współczynnika mocy nie spowoduje nadmiernego wzrostu prądu twornika (gdy wektor \underline{U}_t będzie w przybliżeniu równy co do modułu wektorowi $\underline{L}_t \cdot \underline{X}_t$), rezygnuje się z utrzymania wysokiej wartości $\cos \varphi$ na rzecz zachowania zdolności hamowania dla małych prędkości włącznie z pełnym zatrzymaniem pojazdu.

Aby sterować wartością siły hamującej dla danej prędkości jazdy, należy zmieniać moduł i fazę wektora prądu wzbudzenia (patrz rys. 4.39c). Chcąc zwiększyć siłę hamującą należy nieco zmniejszyć kąt pomiędzy kierunkami wektorów \underline{U}_t i \underline{L}_w (wynoszący prawie 180°). Spowoduje to

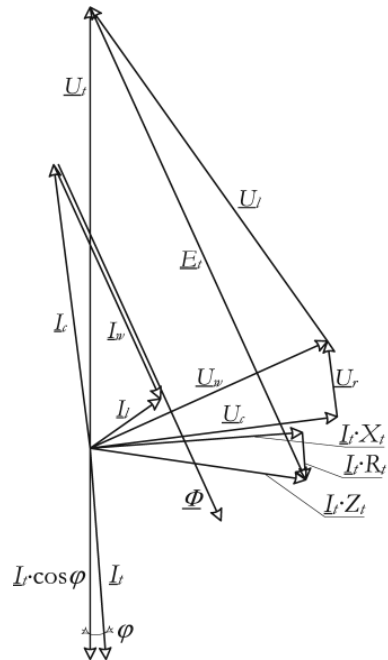
analogiczną zmianę kąta pomiędzy \underline{U}_t i \underline{E}_r , co wywoła wzrost wartości prądu twornika, a tym samym zwiększy się siła hamowania przy niezmienionym współczynniku mocy.



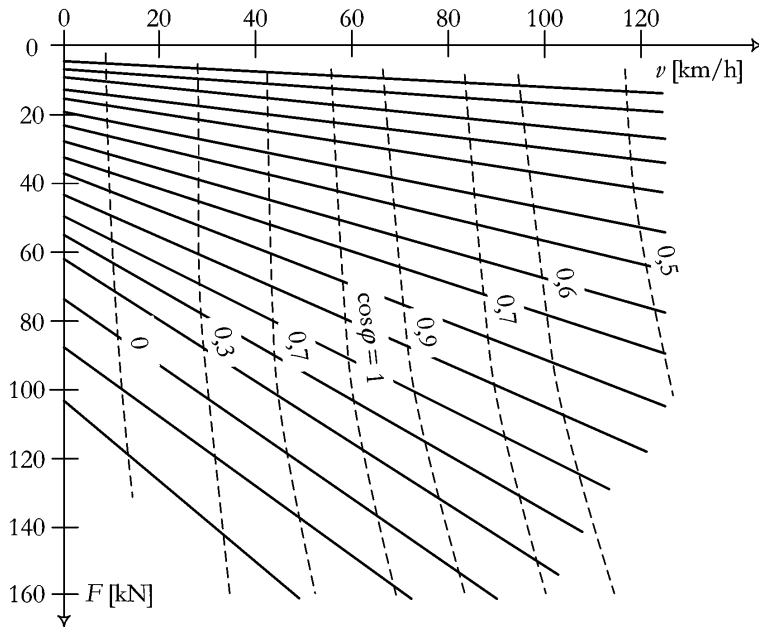
Rys. 4.40. Hamowanie odzyskowe silnikiem jednofazowym komutowanym prądu przemiennego – połączenie z kondensatorem w obwodzie wzbudzenia – opis w tekście

Innym sposobem częściowej poprawy współczynnika mocy podczas hamowania odzyskowego jest zastosowanie kondensatorów w obwodzie wzbudzenia, tak jak to pokazano na rys. 4.40. Jak widać, uzwojenie wzbudzenia włączone jest pomiędzy dławik a rezystor szeregowo połączonych elementów L_{d1}, R_d, C_d . Dzięki temu możemy zwiększyć kąt pomiędzy wektorami SEM rotacji \underline{E}_r i napięcia transformatora \underline{U}_t , poprawiając współczynnik mocy, tak jak to pokazano na wykresie wektorowym (rys. 4.41). Wektor napięcia \underline{U}_t musi być równy geometrycznej sumie napięć \underline{U}_r , \underline{U}_c oraz \underline{U}_e . Wzajemny stosunek tych trzech wielkości determinuje kierunek, zwrot i moduł wektora napięcia wzbudzenia \underline{U}_w . Kierunek i zwrot wektora prądu wzbudzenia \underline{I}_w , prostopadły do wektora \underline{U}_w określa kierunek i zwrot

wektora strumienia wzbudzenia Φ , a pośrednio SEM rotacji \underline{E}_r . Sumę geometryczną wektorów \underline{U}_t i \underline{E}_r zamyka spadek napięcia na impedancji obwodu twornika Z_t , składający się ze spadków napięć na częściach indukcyjnych L_t i rezystancyjnych R_t . Prostopadle do indukcyjnego spadku napięcia skierowany jest wektor prądu twornika \underline{I}_t , którego składowa, będąca w przeciwfazie do napięcia \underline{U}_t stanowi o hamowaniu odzyskowym, a składowa zgodna ze strumieniem wzbudzenia (niezaznaczona na rysunku) odpowiada za moment hamujący. Wartość siły hamującej reguluje się poprzez zmianę napięcia \underline{U}_t . Dla danej wartości \underline{U}_t siła hamująca jest praktycznie stała przy zmianie prędkości, zmienia się natomiast współczynnik mocy analogicznie do tego, co przedstawiono na rys. 4.39a. Aby ograniczyć wzrost wartości prądu obwodu twornika przy $\cos \varphi$ znacznie różniącym się od jedności, szeregowo z uzwojeniem twornika włączony jest dławik dodatkowy L_{d2} . Przykładową rodzinę charakterystyk hamowania, przy różnych wartościach prądu wzbudzenia, dla pojazdu z elementami pojemnościowymi w obwodzie wzbudzenia przedstawiono na rys. 4.42. Jak można zauważyć, jest ona bardzo zbliżona do tej z rys. 4.35, inaczej przebiegają jedynie krzywe współczynnika mocy.



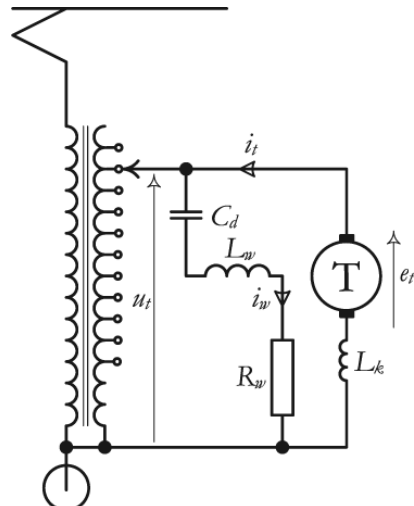
Rys. 4.41. Wykres wektorowy prądów i napięć dla układu z rys. 4.40 – opis w tekście



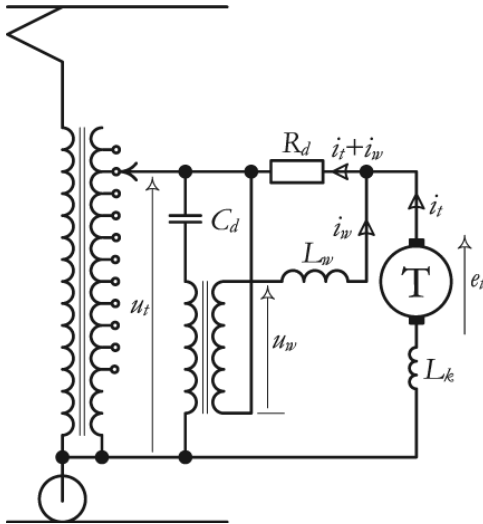
Rys. 4.42. Charakterystyka hamowania elektrodynamicznego odzyskowego pojazdu z silnikami jednofazowymi komutatorowymi prądu przemiennego pracującymi w trybie wzbudzenia równoległego z elementami pojemnościowymi w obwodzie wzbudzenia

Charakterystyki hamowania pokazane na rys. 4.35 i 4.42, w których siła hamująca w sposób nieznaczny (zwłaszcza przy mniejszych wartościach i_w) zależy od prędkości pojazdu sprawdzą się doskonale w przypadku realizacji hamowania służbowego, aż do całkowitego zatrzymania. Jednak w sytuacji, gdy konieczne jest przyhamowywanie, np. w celu utrzymania stałej prędkości podczas jazdy na spadku, ten kształt charakterystyki hamowania jest niekorzystny. Trudno bowiem, przy tak wyglądającej zależności siły hamującej od prędkości, dobrać właściwy stopień hamowania, zwłaszcza w sytuacji, gdy profil trasy jest zmienny.

W takim przypadku lepsza będzie charakterystyka, w której siła hamująca zależy od prędkości w sposób bardzo znaczący. Charakterystykę taką można uzyskać poprzez dołączenie pojemności szeregowo z uzwojeniem wzbudzenia, tak jak to pokazano na rys. 4.43. Odpowiednie dobranie wartości pojemności kondensatora C_d , tak by gałąź obwodu wzbudzenia pracowała w stanie rezonansu sprawi, że prąd wzbudzenia I_w będzie w fazie z napięciem U_t . To z kolei spowoduje, że prąd twornika I_t będzie w fazie ze strumieniem wzbudzenia, a więc siła hamująca będzie proporcjonalna do wartości tego prądu. Wartość ta zależy z kolei od SEM rotacji E_r , która jest proporcjonalna do prędkości. Wynika stąd, że siła hamująca



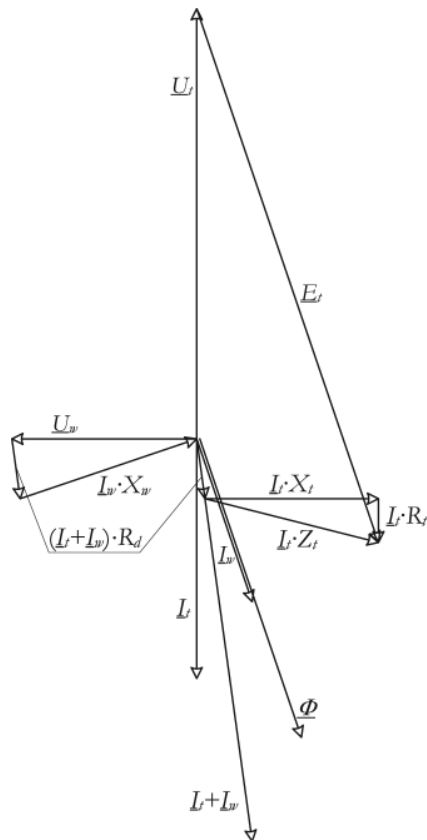
Rys. 4.43. Hamowanie odzyskowe silnikiem jednofazowym komutatorowym prądu przemiennego – kondensator połączony szeregowo z uzwojeniem wzbudzenia – opis w tekście



Rys. 4.44. Hamowanie odzyskowe silnikiem jednofazowym komutowanym prądu przemiennego – układ z transformatorem dodatkowym w obwodzie uzwojenia wzbudzenia – opis w tekście

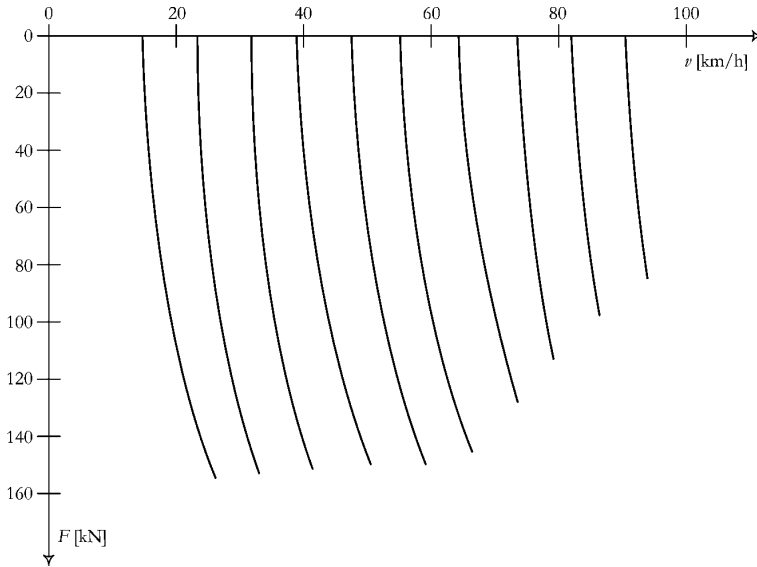
wektora strumienia Φ , a co za tym idzie, również wektora SEM rotacji E_r . Wektor napięcia \underline{U} jest równoważony poprzez geometryczną sumę napięć na rezystancji dodatkowej R_d i impedancji obwodu twornika Z_t . To ostatnie napięcie składa się ze składowych: czynnej i biernej, występujących na rezystancji R_t i reaktancji X_t uzwojenia twornika. Kierunek wektora prądu twornika I_t jest prostopadły do kierunku wektora indukcyjnego spadku napięcia, a jego zwrot jest przeciwny do napięcia \underline{U} , co świadczy o wystąpieniu hamowania odzyskowego. Moment hamujący zależy jak zwykle od składowej prądu I_t , będącej w fazie ze strumieniem wzbudzenia Φ . Współczynnik mocy dla tego przypadku równy jest jedności. Warto zauważyć, że zmniejszenie prędkości pojazdu nie spowoduje pogorszenia współczynnika mocy. Dzieje się tak, gdyż redukcja SEM rotacji E_r , wywołując zmniejszenie wartości prądu I_t , spowoduje tym samym ograniczenie modułu wektora spadku napięcia na rezystancji dodatkowej R_d . To sprawi, że zmianie ulegnie kierunek wektora prądu wzbudzenia I_w , nie dopuszczając tym samym do pogorszenia współczynnika mocy układu. Siła hamująca zależy silnie od prędkości, co pokazuje charakterystyka hamowania

będzie wraz ze zmniejszaniem prędkości malała, osiągając wartość zerową, gdy SEM rotacji E_r zrówna się z napięciem \underline{U} . Wprowadzenie gałęzi wzbudzenia w stan rezonansu spowoduje znaczny wzrost wartości płynącego prądu, gdyż rezystancja uzwojenia wzbudzenia R_w jest nieduża. Chcąc tego uniknąć, można zastosować dodatkowy transformator w obwodzie wzbudzenia, tak jak to pokazano na rys. 4.44. Efekt zastosowania transformatora pokazuje wykres wektorowy przedstawiony na rys. 4.45. Napięcie wzbudzenia \underline{U}_w wyprzedza napięcie \underline{U} , o kąt 90° . Napięcie \underline{U}_w równoważy geometryczna suma spadków napięć na reaktancji indukcyjnej uzwojenia wzbudzenia X_w i rezystancji dodatkowej R_d . Wektor prądu wzbudzenia I_w determinuje zwrot i kierunek



Rys. 4.45. Wykres wektorowy prądów i napięć dla układu z rys. 4.44 – opis w tekście

widoczna na rys. 4.46. Wybór właściwej krzywej hamowania odbywa się poprzez zmianę wartości napięcia transformatora \underline{U}_t .



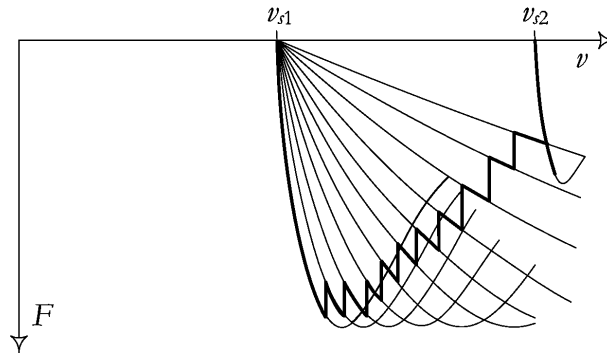
Rys. 4.46. Charakterystyka elektrodynamicznego hamowania odzyskowego pojazdu z silnikami jednofazowymi komutatorowymi prądu przemiennego pracującymi w trybie wzbudzenia równoległego z transformatorem dodatkowym w obwodzie wzbudzenia

Widoczne jest, że kształt charakterystyki hamowania elektrodynamicznego odzyskowego dla pojazdów z silnikami komutatorowymi jednofazowymi prądu przemiennego można, w zależności od konfiguracji obwodu głównego, dostosować do konkretnych wymagań eksploatacyjnych. Dla pojazdów kolei podmiejskich, gdzie występują często powtarzające się rozruchy i hamowania, korzystniejsza będzie charakterystyka, gdzie siła hamująca jest niezależna lub mało zależna od prędkości, przy jednoczesnym umożliwieniu zatrzymania pojazdu do prędkości zerowej przy wykorzystaniu jedynie hamulców elektrodynamicznych (rys. 4.35 i 4.42). Z kolei dla pojazdów ruchu dalekobieżnego, zwłaszcza jeżeli obsługują linie podgórskie i górskie, na których występują długie nachylenia, bardziej przydatna będzie charakterystyka taka, jak przedstawiono na rys 4.46, zapewniająca utrzymanie w miarę stałej prędkości podczas zjazdu ze wzniesienia.

4.3.2.3. Hamowanie odzyskowe pojazdów wyposażonych w silniki trójfazowe indukcyjne zasilane z sieci trakcyjnej trójfazowej

Maszyna indukcyjna trójfazowa przechodzi na pracę generatorową, gdy jej prędkość obrotowa wzrośnie powyżej prędkości synchronicznej. Poślizg zmienia wówczas swój znak na ujemny i tym samym zostaje wygenerowany moment hamujący. Dla pojazdów zasilanych trójfazowo rozpoczęcie hamowania dynamicznego nie wymaga żadnych czynności łączeniowych w obwodzie głównym, czy zmian w układzie sterowania. Jedynym warunkiem jest osiągnięcie przez pojazd szybkości odpowiadającej nadsynchronicznej prędkości wirowania silników. Jak pokazano w rozdziale 3.3.1 przy trójfazowym zasilaniu, wykorzystując zmianę liczby par biegunów i kaskadowe połączenie silników trakcyjnych uzyskuje się kilka (najczęściej od 2 do 4) charaktery-

styk trakcyjnych naturalnych i tyleż samo prędkości synchronicznych. Analogicznie sytuacja wygląda w przypadku hamowania, co pokazano na rys. 4.47.



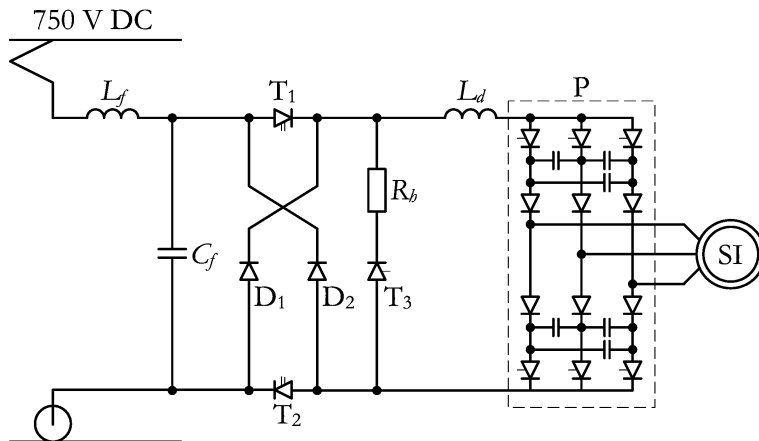
Rys. 4.47. Przykładowa charakterystyka hamowania pojazdu z silnikami indukcyjnymi zasilanego z sieci trójfazowej

Liczba charakterystyk naturalnych jest równa liczbie prędkości synchronicznych i na tych charakterystykach jest dopuszczalna praca długotrwała. Rezystory włączone do uzwojenia wirnika (patrz rys. 3.26) umożliwiają przejście z jednej charakterystyki na drugą. Hamowanie nie jest jednak możliwe poniżej najniższej prędkości synchronicznej. Można zauważyć, że charakterystyka o tym kształcie doskonale sprawdzi się przy utrzymywaniu stałej prędkości podczas zjazdu ze wzniesienia. W porównaniu z jazdą pod górę, prędkość obrotowa silników podczas zjeżdżania będzie wyższa jedynie o podwójną wartość poślizgu maszyny. Analogicznie wzrośnie prędkość pojazdu. Ze względu na budowę układu zasilania (podstacja w tym systemie to z reguły transformator trójfazowy podłączony do sieci przemysłowej) zawsze możliwy będzie odzysk energii. Zbędne są zatem rezystory hamowania wewnątrz pojazdu.

4.3.2.4. Hamowanie elektrodynamiczne pojazdów wyposażonych w silniki trójfazowe indukcyjne zasilane z przekształtnika

Zasilanie trójfazowego silnika indukcyjnego z przekształtnika znacznie ułatwia zrealizowanie hamowania dynamicznego. Możliwość zmiany częstotliwości napięcia zasilającego silniki trakcyjne sprawia, że można dowolnie kształtować ich charakterystykę mechaniczną. Nie występuje więc ograniczenie liczby charakterystyk hamowania do kilku związanych z prędkościami synchronicznymi dla różnej liczby par biegunów, tak jak to ma miejsce przy zasilaniu z sieci trójfazowej, ale przy każdej szybkości wirowania można, odpowiednio sterując przekształtnikiem, sprawić, że szybkość ta będzie nadsynchroniczna, co wywoła zaistnienie hamowania dynamicznego. W trakcie tego hamowania energia elektryczna generowana przez maszyny jest przekazywana poprzez przekształtnik do tzw. obwodu pośredniczącego. Tam, w zależności od konstrukcji pojazdu, może być ona wytracona w rezystorach hamowania, lub przesłana do sieci trakcyjnej. Możliwość zrealizowania hamowania odzyskowego zależy więc wyłącznie od konstrukcji obwodu głównego pojazdu. Nie jest natomiast w żaden sposób związana z budową silnika trakcyjnego czy konfiguracją jego połączenia. W pojazdach trakcyjnych jako przekształtniki zasilające silniki indukcyjne wykorzystywane są zarówno falowniki prądu (starsze rozwiąza-

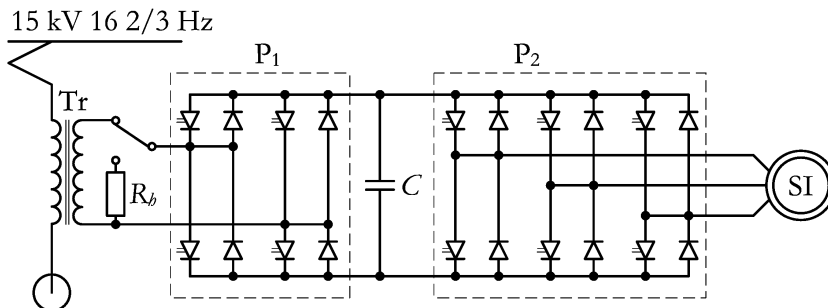
nie) jak i falowniki napięcia. Przykładowy, uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu zasilanego z sieci prądu stałego wyposażonego w falownik prądu przedstawiono na rys. 4.48.



Rys. 4.48. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu zasilanego napięciem stałym z falownikiem prądu i silnikiem indukcyjnym – opis w tekście

W trakcie pracy silnikowej tyristor T_1 steruje wartością prądu przekształtnika poprzez cykliczne załączanie i wyłączenie napięcia zasilającego. W chwili, gdy jest on w stanie blokowania prąd zamyka się przez tyristor T_2 , który jest załączony przez cały czas pracy silnikowej, oraz diodę D_1 . W trybie hamowania dynamicznego tyristor T_2 zostaje wyłączony, a tyristor T_1 reguluje wartość prądu oddawanego do układu zasilania. Podczas hamowania odzyskowego obwód prądowy zamyka się poprzez diody D_1 i D_2 , przekształtnik P oraz układ zasilania. W sytuacji, gdy hamowanie odzyskowe nie jest możliwe (brak odbioru energii) i napięcie na kondensatorze filtra wejściowego C_f nadmiernie wzrasta, wówczas załączeniu ulega tyristor T_3 i zostaje zrealizowane hamowanie oporowe. Impulsowa regulacja prądu za pomocą tyristora T_1 jest analogiczna do tej, jaka ma miejsce przy pojazdach z silnikami szeregowymi prądu stałego i rozruchem impulsowym (patrz rozdziały 3.2.2 i 4.3.1.3).

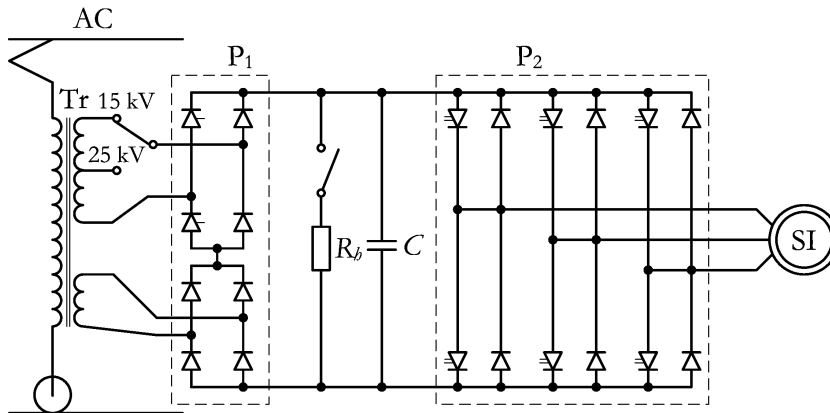
Przykładowe rozwiązanie obwodu głównego pojazdu przy zasilaniu napięciem przemiennym z wykorzystaniem falowników napięcia przedstawiono na rys. 4.49.



Rys. 4.49. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu zasilanego napięciem przemiennym z falownikiem napięcia i silnikiem indukcyjnym – opis w tekście

Energia hamowania przekazywana jest od silnika trakcyjnego poprzez przekształtnik dwukierunkowy P_2 do obwodu pośredniczącego z kondensatorem C , a następnie przekazywana do sieci trakcyjnej. Pojazd jest zasadniczo przewidziany do realizowania hamowania odzyskowego, gdyż podstacje w systemach napięcia przemiennego są z reguły dwukierunkowe, tj. umożliwiają przesłanie energii do systemu energetyki przemysłowej. Jednak w razie wystąpienia problemów ze zwrotem energii zostanie ona wytracona na rezystorze R_b . Rezystor ten może być włączony tak jak pokazano na rysunku. Jest to jednak rozwiązanie rzadziej spotykane. Najczęściej jest on podłączony, wraz z elementem załączającym, równolegle do kondensatora C w obwodzie pośredniczącym napięcia stałego.

Nie wszystkie konstrukcje przekształtników stosowanych w pojazdach umożliwiają zrealizowanie hamowania odzyskowego. Przykład takiego rozwiązania pokazano na rys. 4.50.

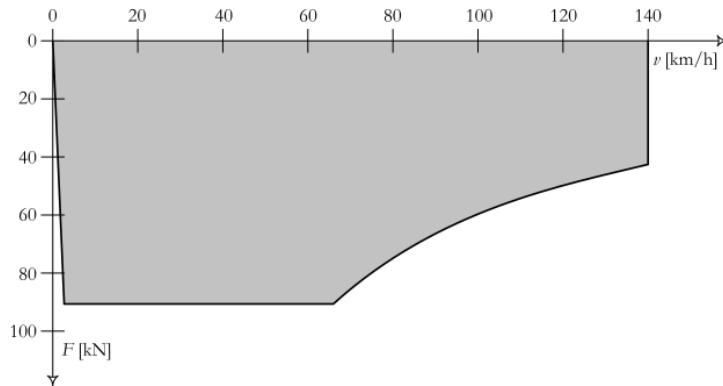


Rys. 4.50. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu zasilanego napięciem przemiennym z falownikiem napięcia i silnikiem indukcyjnym bez możliwości realizacji hamowania odzyskowego
– opis w tekście

Jest to uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu dwusystemowego mogącego pracować przy zasilaniu napięciem przemiennym 15 kV, 16 i 2/3 Hz oraz 25 kV, 50 Hz. Jak można zauważyć, przekształtnik P_1 , zamieniający energię napięcia przemiennego z sieci trakcyjnej na energię napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym, jest urządzeniem jednokierunkowym. Nie umożliwia tym samym przesłania energii od obwodu pośredniczącego do sieci trakcyjnej. Każde hamowanie dynamiczne musi być więc zrealizowane jako oporowe, a energia wytracona w rezystorze hamowania R_b .

Niezależnie od konstrukcji przekształtnika, systemu zasilania pojazdu czy możliwości realizacji hamowania odzyskowego, uzyskiwana charakterystyka hamowania jest dla wszystkich przypadków taka sama pod względem kształtu. Przykładową charakterystykę hamowania przedstawiono na rys. 4.51. Jak widać jest ona dokładnym odwróceniem charakterystyki trakcyjnej. Ponadto dzięki możliwości dowolnego sterowania parametrami przekształtnika, punkt pracy napędu podczas hamowania może leżeć w dowolnym miejscu obszaru znajdującego się pod krzywą siły maksymalnej (obszar zaznaczony kolorem szarym). Również sterowanie siłą hamowania w dopuszczalnym zakresie może przebiegać w sposób dowolny. Jest zatem możliwe utrzymywanie stałej prędkości jazdy podczas zjeżdżania ze wzniesienia, jak również można sterować układem tak, by utrzymać stałą siłę hamowania, niezależnie od prędkości pojazdu. Przy bardzo małych

prędkościach zjawisko hamowania dynamicznego zanika. Teoretycznie, przy wykorzystaniu układów przekształtnikowych, można zrealizować hamowanie dynamiczne aż do prędkości zerowej. Wymaga to jednak znacznej rozbudowy i skomplikowania systemu sterowania układem napędowym, tzn. falownik musi umożliwiać płynne przejście do tzw. III ćwiartki obszaru regulacji pracy maszyny indukcyjnej, czyli do pracy silnikowej dla przeciwnego kierunku obrotów. Wówczas, dla prędkości bliskich zeru, odbywałoby się, z punktu widzenia silnika, hamowanie przeciwprądem. Jednak korzyści eksploatacyjne z takiego rozwiązania są praktycznie żadne i nie uzasadniają wzrostu komplikacji układu sterującego. Dlatego w pojazdach trakcyjnych takie rozwiązania nie są stosowane. Końcowy etap hamowania jest realizowany przy wykorzystaniu hamulców mechanicznych załączanych automatycznie tak, by zapewnić zatrzymanie pojazdu.

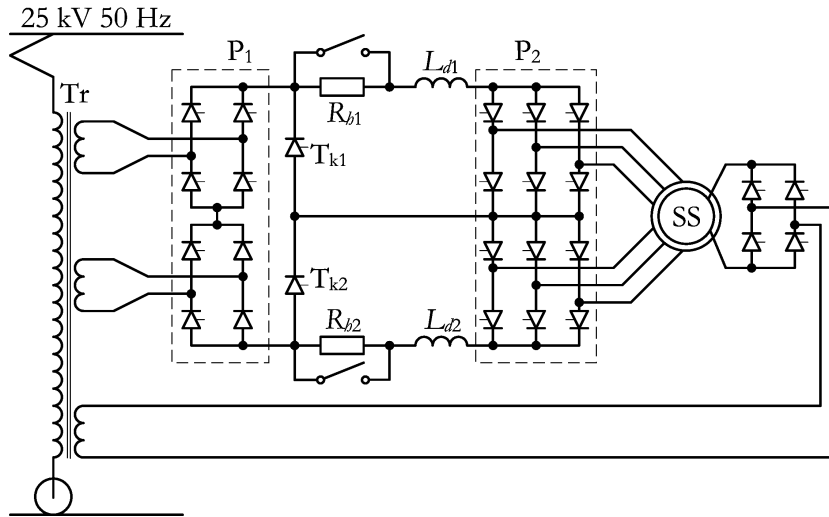


Rys. 4.51. Przykładowa charakterystyka hamowania dynamicznego dla pojazdów z silnikami indukcyjnymi zasilanymi przekształtnikowo – opis w tekście

4.3.2.5. Hamowanie elektrodynamiczne pojazdów wyposażonych w silniki trójfazowe synchroniczne zasilane z przekształtnika

Silniki synchroniczne są stosowane w elektrycznych pojazdach szynowych już od lat 70. ubiegłego wieku. Jednak jak dotąd nie są one zbyt popularne. Powodem tego stanu rzeczy jest większa komplikacja układu napędowego (konieczność montażu dodatkowego obwodu zasilającego uzwojenie wzbudzenia) oraz bardziej złożona budowa samego silnika (w porównaniu z maszynami asynchronicznymi) związana z obecnością pierścieni ślizgowych i szczotek. Jednocześnie silniki synchroniczne nie wykazywały znaczących zalet w porównaniu z indukcyjnymi. W ostatnich latach sytuacja ta zaczyna pomalu się zmieniać, co jest związane ze skonstruowaniem silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy wystarczającej dla potrzeb trakcyjnych. Silnik taki charakteryzuje się mniejszą masą własną (w porównaniu z maszyną indukcyjną o tej samej mocy) i posiada większą przeciążalność momentem co jest istotną zaletą w zastosowaniach trakcyjnych. Jednocześnie przekształtnikowy układ sterowania jest, co do złożoności, praktycznie identyczny jak dla silników indukcyjnych.

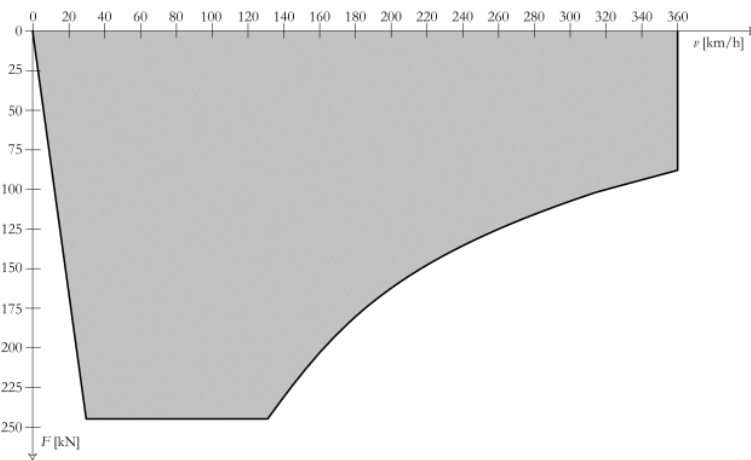
Podobnie jak w przypadku silników asynchronicznych, tak i przy wykorzystaniu silników synchronicznych hamowanie elektrodynamiczne może być zrealizowane zarówno jako oporowe, jak i odzyskowe. Na rys. 4.52. pokazano uproszczony schemat obwodu głównego lokomotywy BB 10004 kolei SNCF napędzanej silnikami synchronicznymi dwuuzwojeniowymi z klasycznym układem wzbudzenia zasilanymi z falownika prądu.



Rys. 4.52. Uproszczony schemat obwodu głównego lokomotywy *BB 10004* z silnikami synchronicznymi z możliwością realizacji hamowania dynamicznego oporowego (opis w tekście)

W lokomotywie tej ze względu na konstrukcję przekształtnika możliwe jest jedynie hamowanie oporowe. Podczas hamowania dynamicznego przekształtnik P_2 przechodzi na pracę prostownikową, a rezystory hamowania R_{b1} i R_{b2} zostają rozwarne. Obwód prądowy zamyka się przez diodową gałąź dolnej części przekształtnika P_1 i dwa załączone tyrystory górnej części tego przekształtnika. Tyrystory komutacyjne T_{k1} i T_{k2} , wykorzystywane pomocniczo w początkowej fazie rozruchu, podczas hamowania pracują w stanie blokowania.

W przypadku zespołu trakcyjnego dużej prędkości *AGV* napędzanego silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi zastosowano falownik napięcia i przekształtniki dwukierunkowe umożliwiające realizację hamowania odzyskowego lub oporowego. Charakterystyka hamowania dla pojazdów z silnikami synchronicznymi jest taka sama jak dla silników indukcyjnych. Przykładową charakterystykę (zespół trakcyjny *AGV*) pokazano na rys. 4.53.

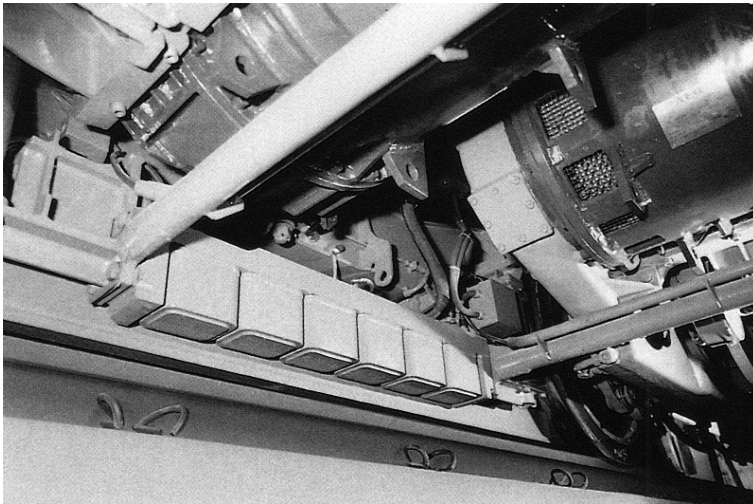


Rys. 4.53. Charakterystyka hamowania zespołu trakcyjnego *AGV* z silnikami synchronicznymi

4.3.3. Hamulce wiropądowe

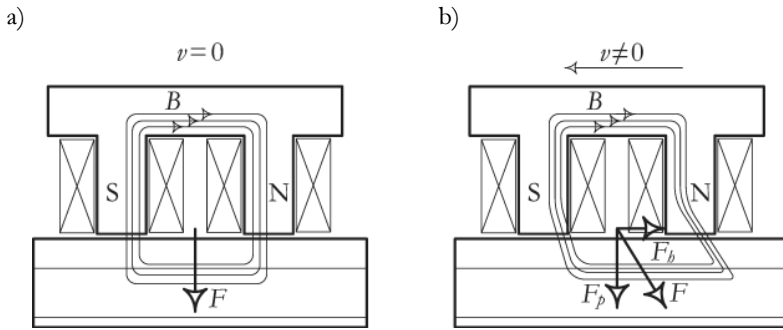
Współczynnik przyczepności na styku koło – szyna zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości jazdy. Dla prędkości przekraczających 250 km/h niska wartość tego współczynnika zmniejsza skuteczność hamowania. Dodatkowymi czynnikami negatywnie wpływającymi na pracę tradycyjnych hamulców jest zawilgocenie szyn wywołane złymi warunkami atmosferycznymi czy wreszcie opadające liście tworzące na powierzchni tocznej szyn śliską maź znacznie redukującą przyczepność. Czynniki te mogą wywoływać zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu pociągów, dlatego cały czas prowadzone są prace nad podniesieniem efektywności procesu hamowania zwłaszcza dla dużych prędkości jazdy. Jednym z rozwiązań tego problemu jest zastosowanie hamulców wiropądowych. Hamulce te wykorzystują zjawiska fizyczne zachodzące w przewodniku poruszającym się w polu elektromagnetycznym. Pole elektromagnetyczne indukuje napięcie w każdym elemencie metalowym, jaki porusza się prostopadle do linii tego pola. Zaindukowane napięcie jest źródłem prądów wirowych, które wytwarzają pole elektromagnetyczne przeciwdziałające polu źródłowemu, wywołując tym samym siłę, której jedna ze składowych jest przeciwnie skierowana do kierunku przemieszczania się elementu. Efekt ten wykorzystywany jest we wszystkich maszynach elektrycznych.

W elektrycznych pojazdach szynowych jak dotąd zastosowano dwa typy hamulców wiropądowych, liniowe i kołowe. Hamulce liniowe zbudowane są w postaci elektromagnesów umieszczonych między osiami wózka pojazdu w niewielkiej odległości nad szyną, która stanowi element oddziaływania hamulca. Odległość ta nie przekracza 1 cm, a w omawianym typie hamulca wynosi 7 mm. Dla większych odległości skuteczność działania hamulca wydatnie maleje. Wygląd hamulca wiropądowego liniowego przedstawiono na fot. 4.1.



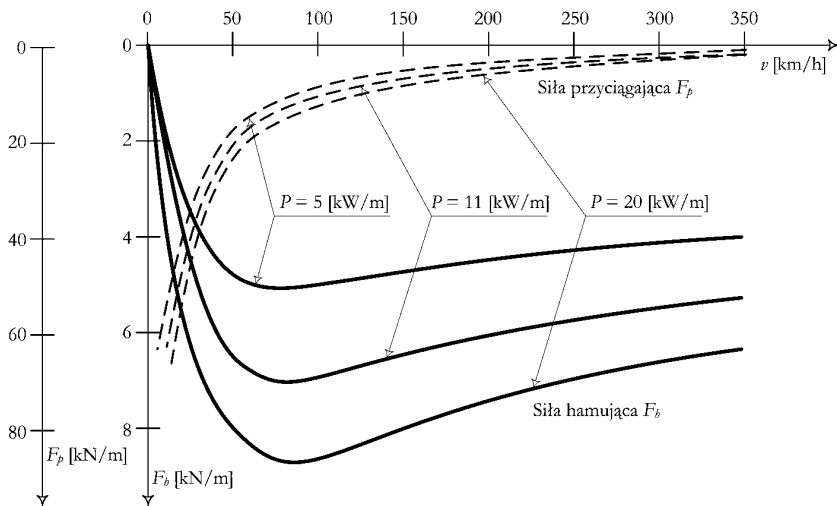
Fot. 4.1. Hamulec wiropądowy liniowy [38]

Hamulce te zasilane są napięciem stałym o regulowanej wartości. Wykorzystuje się w tym celu najczęściej energię uzyskaną podczas hamowania dynamicznego silnikami trakcyjnymi pojazdu, ale może ona również pochodzić z dodatkowej przetwornicy zasilającej. Zasada działania hamulca wiropądowego została pokazana na rys. 4.54.



Rys. 4.54. Hamulec wirorządowy liniowy – zasada działania: a) przy prędkości zerowej; b) przy prędkości różnej od zera

W przypadku, gdy prędkość pojazdu jest równa zero, załączenie hamulca wirorządowego wywoła jedynie pojawienie się siły przyciągającej F . Jeżeli prędkość będzie różna od zera, wówczas w szynie zaczną indukować się prądy wirowe, wywołując odkształcenie linii sił pola elektromagnetycznego. To sprawi, że oprócz siły przyciągającej F_p , pojawi się składowa hamująca F_b skierowana przeciwnie do kierunku jazdy. Hamulec wirorządowy spełnia zatem dwie role. Siła przyciągająca spowoduje zwiększenie siły docisku kół pojazdu do szyn, polepszając tym samym współczynnik przyczepności, a siła hamująca będzie zmniejszała prędkość pojazdu. Przykładowa charakterystyka hamulca wirorządowego została przedstawiona na rys. 4.55. Zaznaczono zależności siły hamującej oraz siły przyciągającej od prędkości jazdy, dla trzech wartości mocy elektrycznej dostarczanej do hamulca. Wszystkie jednostki podano w wartościach względnych w przeliczeniu na 1 metr długości hamulca. Jak można zauważyć, efektywność hamowania dla tego typu hamulca maleje poniżej prędkości wynoszącej około 50 km/h, co ogranicza zakres jego stosowania do większych prędkości jazdy.

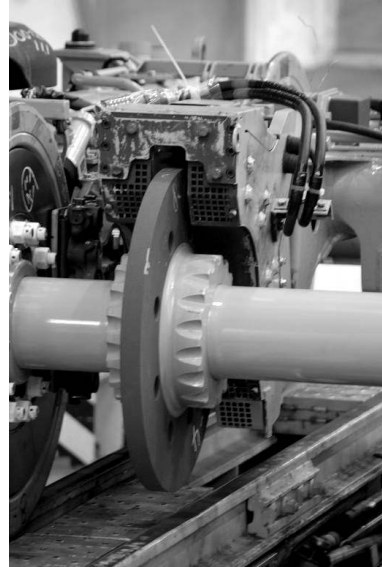


Rys. 4.55. Charakterystyka hamulca wirorządowego liniowego – opis w tekście

Ujemną cechą stosowania hamulców wirorządowych liniowych jest nagrzewanie toków szynowych w trakcie hamowania. Jest to zjawisko niekorzystne, zwłaszcza w czasie upałów, gdy

temperatura szyn i tak już jest wysoka. Dodatkowe wydzielanie ciepła może w takich warunkach spowodować powstanie nadmiernych naprężeń i w konsekwencji wywołać odkształcenie toru. Ryzyko wystąpienia takiej sytuacji jest szczególnie wysokie w miejscach, gdzie następują częste hamowania. Czas pomiędzy jednym hamowaniem, a drugim może być wówczas niewystarczający do ostygnięcia szyn. Dodatkowo zjawiska termiczne zachodzące podczas pracy hamulców wiroprądowych wywołują zaburzenia w urządzeniach sterowania ruchem, takich jak czujniki zagrzaných osi czy kablowe urządzenia transmisji tor – pojazd. Dlatego używanie hamulców wiroprądowych jest ograniczone przepisami tylko do linii, których infrastruktura została zaprojektowana pod kątem wykorzystania tego typu hamulców. Przepisy ograniczają również siły, z jaką hamulce te mogą oddziaływać na tor. Jest to związane wzdłużną wytrzymałością nawierzchni. Siły te wynoszą 180 kN dla hamowania służbowego i 360 kN dla hamowania awaryjnego (dla jednego pociągu). Jak dotąd hamulce wiroprądowe liniowe znalazły zastosowanie w niektórych zespołach trakcyjnych dużej prędkości. Pierwszą jednostką wyposażoną w ten rodzaj hamulca był zespół kolei niemieckich *ICE3* produkcji *Siemensa*.

Hamulce wiroprądowe kołowe działają na identycznej zasadzie jak liniowe. Elektromagnes hamulca nie oddziałuje jednak na szynę, a na okrągłą tarczę zamontowaną na osi zestawu kołowego. Zastosowanie tego typu hamulca nie powoduje poprawy efektywności hamowania dla dużych prędkości jazdy, a jedynie zmniejsza zużycie elementów ciernych i redukuje poziom hałasu. Ta druga cecha zadecydowała o wykorzystaniu hamulców wiroprądowych kołowych w japońskich zespołach trakcyjnych *Shinkansen* od serii 100 do 700. Pozwoliło to spełnić, obowiązujące w Japonii, bardzo restrykcyjne normy dotyczące poziomu hałasu emitowanego przez pociągi dużej prędkości. Widok hamulca wiroprądowego kołowego pokazano na fot. 4.2.

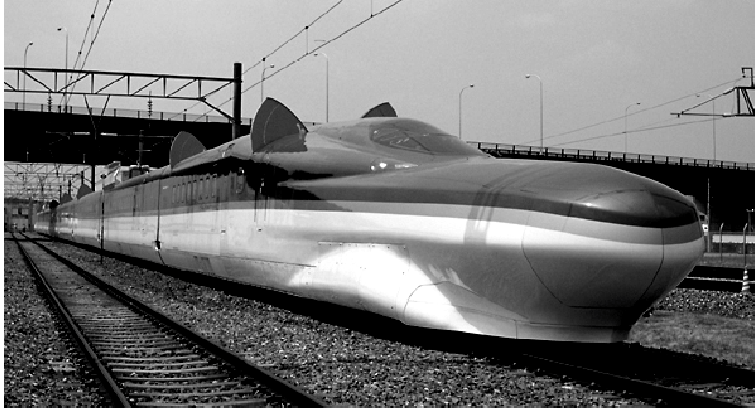


Fot. 4.2. Hamulec wiroprądowy kołowy [94]

4.4. Hamulce aerodynamiczne

Inną metodą zwiększenia efektywności procesu hamowania przy bardzo dużych prędkościach jazdy jest zastosowanie hamulców aerodynamicznych. Pod pojęciem hamowania aerodynamicznego rozumiemy celowe zwiększenie oporów ruchu za pomocą elementów lub urządzeń podwyższających współczynnik oporów od powietrza. Ponieważ opory te są proporcjonalne do kwadratu prędkości jazdy, hamulce aerodynamiczne są skuteczne jedynie przy najwyższych prędkościach. Jedynym jak dotąd elektrycznym pojazdem szynowym wyposażonym w hamulce aerodynamiczne jest prototypowy zespół trakcyjny dużej prędkości *Fastech 360* produkcji japońskiej. Jest to pierwszy pojazd trakcyjny, którego prędkość konstrukcyjna przekracza 400 km/h. Celem zastosowania tych hamulców było zapewnienie wymaganej długości drogi hamowania dla pociągów dużej prędkości określonej przez japońskie przepisy na 4 km. Widok pojazdu z włą-

czonymi hamulcami aerodynamicznymi pokazano na fot. 4.3. Pozytywne wyniki prób tego typu hamulca pokazują, że prawdopodobnie, wraz z dalszym zwiększaniem eksploatacyjnej prędkości jazdy pociągów do poziomu $380 \div 430$ km/h, znajdą one zastosowanie w pojazdach produkowanych seryjnie.



Fot. 4.3. Prototypowy zespół trakcyjny *Fastech 360* z włączonymi hamulcami aerodynamicznymi [69]

Jako ciekawostkę, można podać informację, że z hamowania aerodynamicznego w pojazdach szynowych po raz pierwszy skorzystano w trakcie ustanawiania we Francji rekordu prędkości w 1955 roku (331 km/h). Wówczas to, dla wstępnego przyhamowania pojazdu, otwarto okna w wagonach aby zwiększyć opory aerodynamiczne pociągu, a dopiero gdy prędkość została nieco ograniczona załączono hamulce mechaniczne.

5. Elementy obwodu głównego pojazdu

Elementami obwodu głównego nazywamy te podzespoły pojazdu elektrycznego, które pośredniczą w transmisji energii koniecznej do wprawienia tego pojazdu w ruch. Do elementów obwodu głównego zaliczamy:

- odbieraki prądu,
- układy zabezpieczeń nadprądowych oraz pod i nadnapięciowych,
- filtry wejściowe,
- transformatory trakcyjne,
- rezystory rozruchowe,
- przekształtniki energoelektroniczne,
- silniki trakcyjne,
- zasobniki energii elektrycznej,
- elementy pomocnicze (styczniki, nawrotniki, odłączniki itp.).

Oczywiście żaden pojazd nie zawiera wszystkich wymienionych powyżej elementów, gdyż zakres ich stosowalności zależy od czasu budowy pojazdu, systemu zasilania do jakiego jest przeznaczony i jego zaawansowania technicznego. Każdy pojazd jest wyposażony w odbierak prądu czy silniki trakcyjne, ale pozostałe wyposażenie zmienia się w zależności od sposobu zasilania oraz sterowania pracą układu napędowego.

5.1. Odbieraki prądu

Odbieraki prądu są elementem bezpośrednio odpowiedzialnym za dostarczenie energii elektrycznej do pojazdu trakcyjnego. Konstrukcja odbieraka powinna zapewniać pewny i ciągły styk elektryczny elementu kontaktowego (najczęściej ślizgacza) z siecią zasilającą. Styk ten powinien zapewniać dostarczanie prądu o natężeniu wymaganym dla danego pojazdu bez nadmiernego nagrzewania elementów odbieraka i sieci trakcyjnej. Parametry elektryczne styku nie powinny ulegać pogorszeniu wraz ze wzrostem prędkości jazdy oraz być stałe w dopuszczalnym zakresie zmian położenia sieci trakcyjnej względem pojazdu. Szczególnie szkodliwym zdarzeniem są chwilowe oderwania elementu kontaktowego odbieraka od sieci trakcyjnej. Odbierak powinien być tak zbudowany, aby minimalizować występowanie odskoków, lecz należy pamiętać, że niezwykle istotną rolę w poprawnej współpracy odbieraka z siecią ma konstrukcja i prawidłowe utrzymanie techniczne samej sieci.

Budowa mechaniczna odbieraka zależy przede wszystkim od rodzaju sieci trakcyjnej i jej położenia względem pojazdu. Można wyróżnić tutaj następujące, zasadnicze sposoby umieszczenia sieci trakcyjnej:

- nad pojazdem trakcyjnym, tzw. sieć górna,
- obok pojazdu trakcyjnego, tzw. sieć boczna,

- na wysokości szyn jezdnych, z boku lub pomiędzy tokami szynowymi, tzw. sieć dolna,
- poniżej poziomu gruntu, tzw. sieć kanałowa.

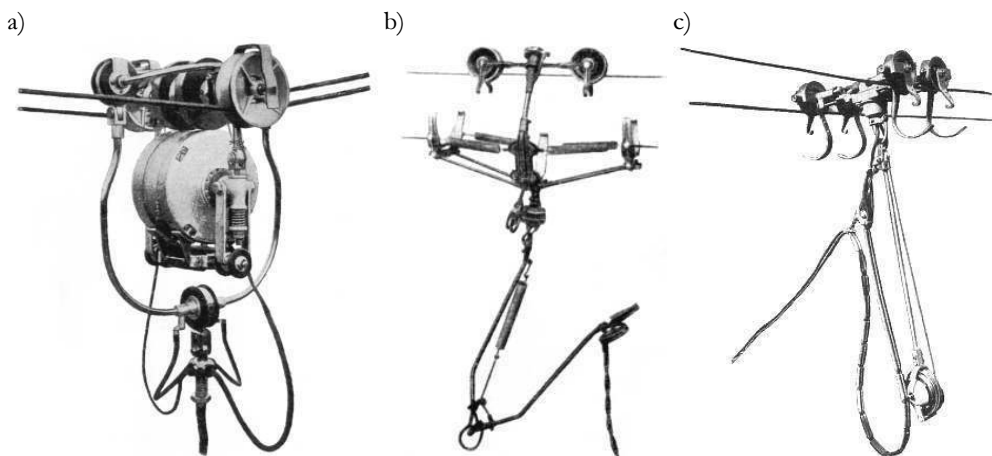
Dla każdego sposobu rozmieszczenia sieci trakcyjnej względem pojazdu istnieje szereg konstrukcji odbieraków prądu omówionych w dalszej części rozdziału.

5.1.1. Odbieraki prądu przystosowane do współpracy z górną siecią trakcyjną

Górna sieć jezdna jest najczęściej stosowaną metodą doprowadzenia energii elektrycznej do pojazdu. Sieci górne wykorzystywane są powszechnie na liniach kolejowych (niezależnie od systemu zasilania), tramwajowych, trolejbusowych, a także, choć bardzo rzadko, na liniach metra. Istnieje szereg konstrukcji odbieraków dostosowanych do odbioru energii elektrycznej z sieci górnych. Część rozwiązań można już zaliczyć do historycznych, jednak większość typów odbieraków jest nadal wykorzystywana w praktyce.

5.1.1.1. Odbieraki wózkowe

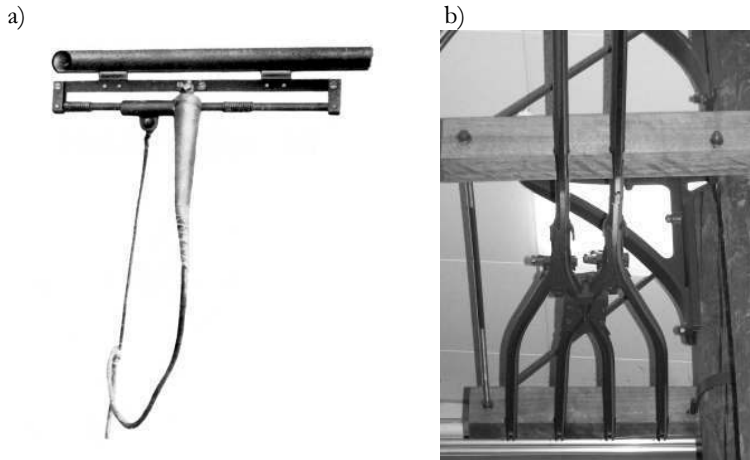
Odbieraki wózkowe należą do najstarszych historycznie urządzeń umożliwiających dostarczenie energii do pojazdu. Stosowano je w pierwszych systemach tramwajowych i trolejbusowych. Odbierak tego typu ma postać małego wózka, który toczy się po przewodach sieci trakcyjnej. Docisk styku odbieraka do przewodu jezdnego zapewnia siła grawitacji działająca na wózek lub dość złożony układ sprężyn dociskających (patrz fot. 5.1a). Połączenie elektryczne z pojazdem zapewnia elastyczny przewód. W czasie jazdy odbierak jest ciągnięty przez pojazd. Odbieraki wózkowe wymagały budowy skomplikowanych rozjazdów sieciowych (tzw. zwrotówek) w miejscach odgałęzień linii, a także były wrażliwe na nierówności sieci trakcyjnej i łatwo spadały z przewodów. Stosowano skomplikowane w kształcie elementy mające na celu zapobieżenie spadaniu odbieraka (patrz fot. 5.1c). Jako rozwiązanie mało praktyczne zostały szybko zastąpione przez inne typy odbieraków. Obecnie nie są stosowane. Kilka przykładowych konstrukcji odbieraków wózkowych pokazano na fot. 5.1.



Fot. 5.1. Odbieraki wózkowe, gdzie: a) system Lombard & Gérin; b) system Köhler; c) system Stoll [4]

5.1.1.2. Odbieraki trzpieniowe

Innym typem odbieraka, podobnie jak konstrukcje wózkowe ciągnięnym przez pojazd, jest odbierak trzpieniowy. Ma on postać pręta o przekroju okrągłym, z przymocowanym od spodu wyprowadzeniem. Konstrukcja ta porusza się wewnątrz przewodu trakcyjnego wykonanego w postaci nieodmkniętej od dołu rurki. Siłę stykową zapewnia grawitacja. Takie nietypowe rozwiązanie wymaga stosowania dość skomplikowanych rozjazdów sieciowych. Ponadto istnieje niebezpieczeństwo zaklinowania ślizgacza w przewodzie trakcyjnym. Widok odbieraka i budowę rozjazdu sieciowego pokazano na fot. 5.2. Odbieraki trzpieniowe były stosowane we wczesnych pojazdach tramwajowych, obecnie nie są wykorzystywane.



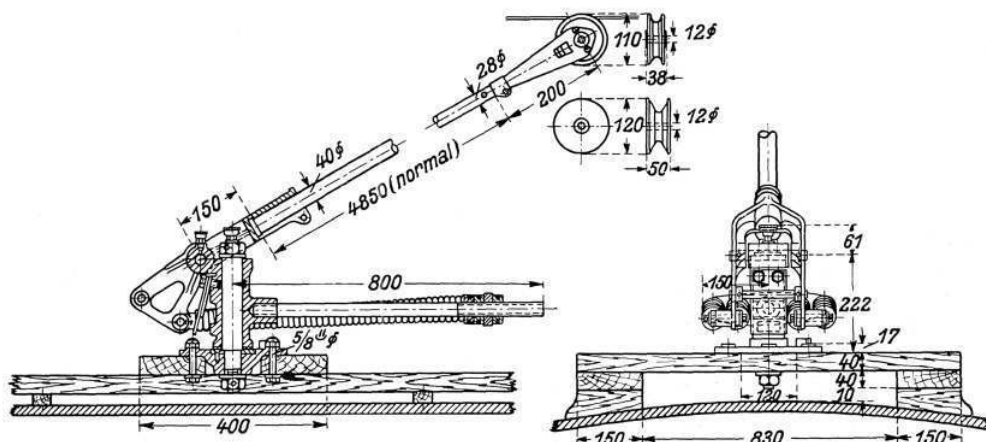
Fot. 5.2. Odbierak trzpieniowy, gdzie: a) widok odbieraka [31]; b) konstrukcja rozjazdu sieciowego (fot. J. Heegmann)

5.1.1.3. Odbieraki drążkowe krążkowe (rolkowe)

Negatywne cechy odbieraków wózkowych i trzpieniowych skłoniły do poszukiwania lepszych rozwiązań konstrukcyjnych. W 1888 roku po raz pierwszy zastosowano odbieraki drążkowe krążkowe wynalezione przez Franka J. Sprague'a. Miało to miejsce w Richmond w stanie Wirginia. Odbieraki drążkowe wykonane są w postaci pręta o długości około 5 m, zakończonego głowicą, w której umieszczony jest obrotowy krążek wykonany z brązu o średnicy od 11 do 17 cm. Krążek ten ma na obwodzie wyżłobiony rowek o głębokości około 2,5 cm. Sprężyny działające na pręt odbieraka dociskają krążek do przewodu jezdnego, tak że toczy się on po nim utrzymywany w prawidłowym położeniu przez ściany rowka. Pręt odbieraka jest zamocowany w podstawie znajdującej się na dachu pojazdu w taki sposób, że możliwy jest jego ruch zarówno w płaszczyźnie pionowej, co ma miejsce przy zmianie wysokości zawieszenia przewodu jezdnego, jak i poziomej, przy odchylaniu się sieci od osi pojazdu na boki. Konstrukcja odbieraka wymaga zastosowania zwrotówek na sieci trakcyjnej.

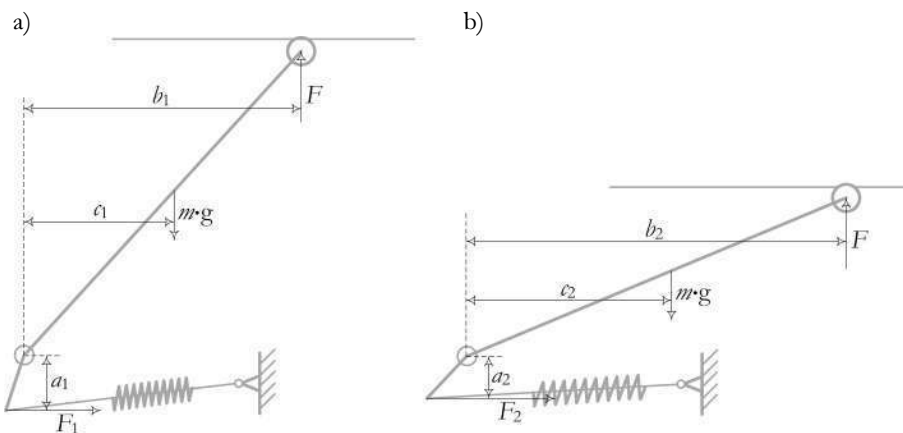
Wysokość zawieszenia przewodu jezdnego nad torem nie jest stała. W większości przypadków zmienia się, obniżając np. pod mostami czy wiaduktami oraz podwyższając w miejscach skrzyżowań z drogami kołowymi. Ponadto w prostych typach sieci wysokość ta jest mniejsza w środku przęsła, a większa w punktach podwieszenia (sieci płaskie). Odbierak musi się więc

dostosować do aktualnej wysokości zawieszenia, zapewniając w zakresie jej dopuszczalnych zmian stałą siłę docisku. O tym, czy dany odbierak spełnia to wymaganie, mówi jego charakterystyka statyczna. Charakterystyka ta jest to zależność siły docisku elementu stykowego do przewodu jezdnego w funkcji wysokości uniesienia odbieraka. Odbieraki drążkowe krążkowe były pierwszą konstrukcją, w której to wymaganie musiało być wzięte pod uwagę. Przykładowa budowa odbieraka krążkowego została pokazana na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Odbierak drążkowy krążkowy [24]

Siła sprężyny dociskającej zmienia się wraz z wysokością uniesienia odbieraka. Gdy jest ona mniejsza, sprężyna jest bardziej naciągnięta, a wraz ze zwiększaniem uniesienia siła naciągu maleje. Zmiana ta jest kompensowana przez odpowiedni wybór punktu zaczepienia sprężyny do ruchomego pręta odbieraka. Mocowanie takie, jak pokazano na rysunku, sprawia, że przy większym naciągu sprężyny, czyli przy niższym uniesieniu, ramię działania siły względem osi obrotu jest mniejsze niż w sytuacji, gdy uniesienie jest większe i sprężyna mniej naciągnięta. Redukcja siły naciągu jest więc kompensowana zwiększeniem ramienia działania tej siły. Pokazano to w sposób uproszczony na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Odbierak drążkowy – bilans momentów sił, gdzie: a) wysokie uniesienie odbieraka; b) niskie uniesienie odbieraka – opis w tekście

Przy wysokim uniesieniu odbieraka siła sprężyny F_1 działająca na ramieniu a_1 jest równoważona siłą grawitacji działającą na ramieniu c_1 i siłą nacisku na przewód jezdny F działającą na ramieniu b_1 . Można to zapisać następującą zależnością:

$$F_1 \cdot a_1 = m \cdot g \cdot c_1 + F \cdot b_1, \quad (5.1)$$

gdzie: m – masa pałaka; g – przyspieszenie ziemskie.

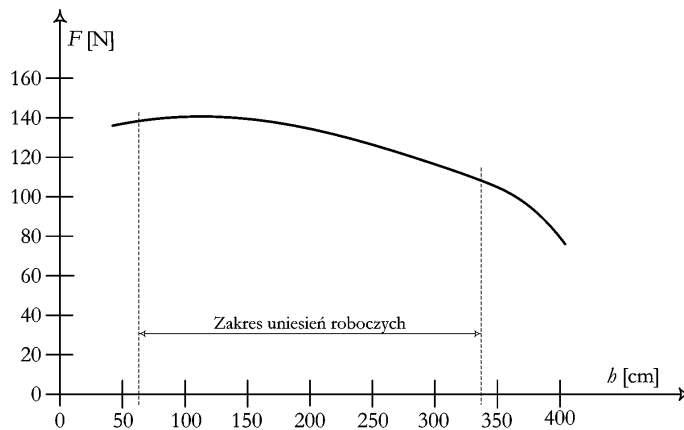
Analogicznie dla niskiego uniesienia możemy zapisać równanie:

$$F_2 \cdot a_2 = m \cdot g \cdot c_2 + F \cdot b_2. \quad (5.2)$$

Stąd wynika, że jeżeli będzie spełniona równość:

$$\frac{F_1 \cdot a_1 - m \cdot g \cdot c_1}{b_1} = \frac{F_2 \cdot a_2 - m \cdot g \cdot c_2}{b_2}, \quad (5.3)$$

wówczas siła docisku odbieraka do przewodu jezdnego będzie taka sama dla obu rozważanych wysokości. Równość ta nie jest możliwa do spełnienia dla zbyt szerokiego zakresu zmian uniesienia, ponadto w rzeczywistości na drążek odbieraka działają siły nieuwzględnione podczas analizy. Jednak w obszarze roboczych uniesień jest możliwe uzyskanie siły docisku, która będzie się zmieniała w sposób nieznaczny. Przykładową charakterystykę statyczną odbieraka drążkowego pokazano na rys. 5.3. Na rysunku nie uwzględniono sił tarcia w przegubie odbieraka. Wysokość uniesienia roboczych liczona jest od poziomu dachu pojazdu.



Rys. 5.3. Charakterystyka statyczna odbieraka drążkowego

Podczas jazdy odbierak musi być zawsze odchylony do tyłu, tak aby krążek nie był pchany, lecz ciągnięty przez pojazd. Dlatego w przypadku zmiany kierunku jazdy odbierak należy przelożyć, obracając go po całkowitym opuszczeniu o 180° . Wydawać by się mogło, że odbieraki krążkowe nie powinny ścierać przewodu jezdnej sieci trakcyjnej. W rzeczywistości jest inaczej, a jest to konsekwencją faktu, że obracający się z dużą prędkością krążek (przy szybkości 30 km/h, krążek wiruje z prędkością ok. 1300 obr/min) zeszlifowuje brzegami rowka przewód trakcyjny. Inną niedogodnością jest konieczność takiej konstrukcji głowicy odbieraka aby prąd

trakcyjny omijał łożysko rolki. Po bocznych jej powierzchniach ślizgają się szczotki odbierające prąd z krążka bezpośrednio do kabla znajdującego się wewnątrz drążka.

Odbieraki krążkowe praktycznie wyszły już z użycia, korzystają z nich jeszcze tramwaje w Blackpool (patrz fot. 5.3.) oraz niektóre linie turystyczne z taborem historycznym w Europie i Stanach Zjednoczonych.



Fot. 5.3. Tramwaj w Blackpool z odbierakiem drążkowym krążkowym (fot. M. Jobling)

5.1.1.4. Odbieraki drążkowe łyżkowe

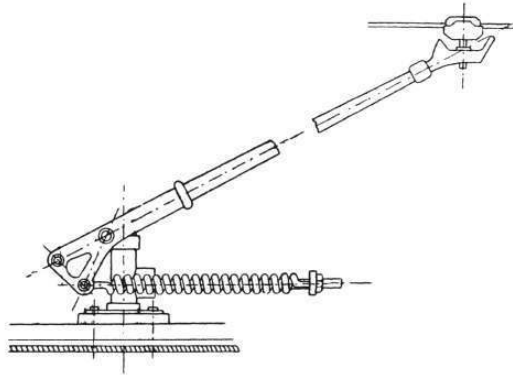
Odbieraki drążkowe łyżkowe są konstrukcyjnie bardzo zbliżone do krążkowych. Jediną różnicą pomiędzy nimi jest zastąpienie krążka tzw. łyżką, która zamiast toczyć, ślizga się po przewodzie jezdnym. Widok łyżki odbieraka prądu pokazano na fot. 5.4. Aby zmniejszyć tarcie, łyżka wyposażona jest w specjalną wkładkę ślizgową wykonaną najczęściej ze spieków grafitowych, rzadziej z miękkiej miedzi lub aluminium. Wyróżniamy dwa podstawowe typy odbieraków łyżkowych, czyli z dolnym (starsze rozwiązanie) i górnym mocowaniem sprężyny (patrz rys. 5.4). Brak wirującego krążka oraz zastosowanie wkładek ślizgowych redukujących tarcie sprawiają, że odbieraki łyżkowe znacznie wolniej zużywają sieć jezdnią w porównaniu z krążkowymi. Charakterystyka statyczna tego typu odbieraka jest taka sama jak dla konstrukcji krążkowych. Maksymalna prędkość jazdy pojazdów z odbierakami krążkowymi i łyżkowymi wynosi najwyżej 70 km/h, co ogranicza zastosowanie tych typów odbieraków do pojazdów komunikacji miejskiej. Odbieraki łyżkowe stosowane są powszechnie w trolejbusach, gdzie żaden inny rodzaj odbieraka nie może być zastosowany, oraz, choć znacznie rzadziej, w pojazdach tramwajowych (np. w Rydze, Toronto czy Hong Kongu, patrz fot. 5.5). Podobnie jak odbieraki krążkowe, odbieraki łyżkowe zawsze muszą być nachylone do tyłu i wymagają



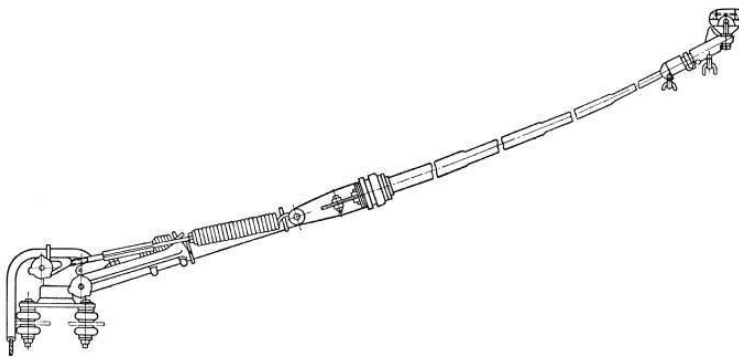
Fot. 5.4. Łyżka odbieraka prądu (fot. M. Bartłomiejczyk)

zastosowania zwrotówek na sieci trakcyjnej. Wersje trolejbusowe odbieraków są dłuższe od tramwajowych, gdyż dla trolejbusów dopuszcza się znacznie większe przemieszczenia sieci względem toru jazdy niż dla tramwajów. W tym ostatnim przypadku sieć trakcyjna praktycznie nigdy nie wychodzi poza obrys wagonu.

a)



b)



Rys. 5.4. Odbieraki drążkowe łyżkowe, gdzie: a) wersja z dolnym mocowaniem sprężyny; b) wersja z górnym mocowaniem sprężyny [13, 56]



Fot. 5.5. Tramwaj w Rydze z odbierakiem drążkowym łyżkowym (fot. P. Van den Bossche)

5.1.1.5. Odbieraki drążkowe łyżkowe podwójne

W początkowym okresie rozwoju trakcji trolejbusowej zaproponowano rozwiązanie polegające na zastosowaniu pojedynczego odbieraka drążkowego ślizgającego się po obu przewodach trakcyjnych (dodatnim i ujemnym) jednocześnie. Wymagało to zastosowania podwójnej głowicy odbieraka. System ten wymagał, aby przewody trakcyjne były umiejscowione bardzo blisko siebie, co stwarzało



Fot. 5.6. Głowica odbieraka drążkowego podwójnego – system Schiemann'a [4]

ryzyko występowania zwarć podczas wietrznej pogody. Ponadto prowadzenie odbieraka było gorsze, zwłaszcza w sytuacji gdy wysokość zawieszenia przewodów nie była jednakowa. Odbieraki tego typu eksploatowano do lat 50. XX wieku. Ostatnim miastem, gdzie były wykorzystywane jest Eberswelde w Niemczech, gdzie ich eksploatację zakończono w 1951 roku, zmieniając system odbioru energii na klasyczny dwuodbierakowy. Obecnie nie są używane. Widok podwójnej głowicy odbieraka pokazano na fot. 5.6, a pojazd wyposażony w taki odbierak na fot. 5.7.

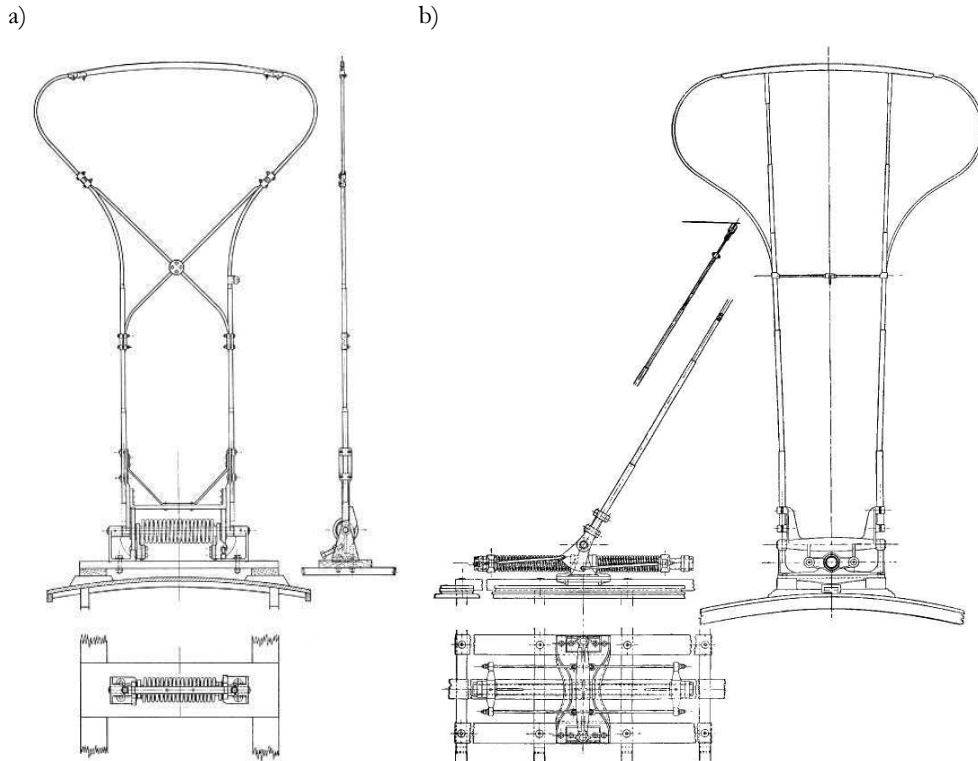


Fot. 5.7. Trolejbus z odbierakiem drążkowym łyżkowym podwójnym [4]

5.1.1.6. Odbieraki pałkowe typu lira

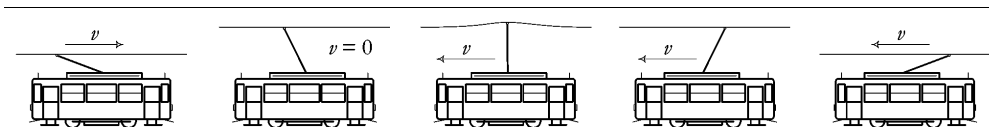
Wspólną wadą wszystkich typów odbieraków drążkowych jest konieczność montażu na sieci trakcyjnej zwrotówek oraz możliwość wykołowania odbieraka zwłaszcza przy wyższych prędkościach jazdy pojazdu. Tych negatywnych cech nie mają odbieraki pałkowe typu lira. Rama pałaka zbudowana jest z rur stalowych z umieszczonym u góry łukowato wygiętym ślizgaczem. Ślizgacz jest wykonany najczęściej z aluminium, a jego długość wynosi od 1000 do 1200 mm w zależności od konstrukcji odbieraka. Wyposażony jest on na całej swojej długości w rowek wypełniony smarem grafitowym, który zmniejsza współczynnik tarcia pomiędzy przewodem jezdnym, a ślizgaczem, spowalniając tym samym proces ścierania obu elementów. Rama odbie-

raka może obracać się w osi poziomej, a układ sprężyn usiłuje zawsze doprowadzić odbierak do położenia pionowego, dociskając tym samym ślizgacz do przewodu jezdnego sieci trakcyjnej. Wyróżniamy dwa rozwiązania układu dociskającego, tj. ze sprężyną pracującą na skręcanie i z dwoma sprężynami pracującymi na ściskanie. Układ dwóch sprężyn zapewnia bardziej równomierną siłę docisku w funkcji wysokości uniesienia. Ze względu na większą masę pałaka w porównaniu z drążkiem, charakterystyka statyczna jest mniej równomierna niż ta przedstawiona na rys. 5.3. Siła docisku stopniowo maleje przy zwiększaniu uniesienia. Konstrukcję obu typów odbieraków pokazano na rys. 5.5.



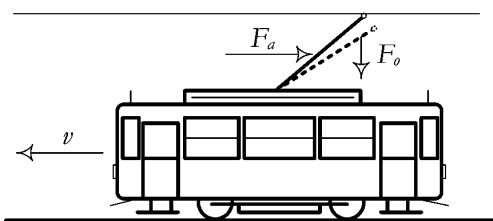
Rys. 5.5. Odbierak pałakowy typu lira, gdzie: a) odbierak ze sprężyną pracującą na skręcanie; b) odbierak z układem dwóch sprężyn pracujących na ściskanie [56, 57]

Podobnie jak w przypadku odbieraków drążkowych, odbierak pałakowy musi być zawsze odchylony do tyłu. Przy zmianie kierunku jazdy odbierak wymaga przełożenia. Dokonuje się tego najczęściej ręcznie, obracając po opuszczeniu cały pałak o 180°. Odbierak w tym wykonaniu mocowany jest na obrotowym trzpieniu i możliwy jest jego obrót po uprzednim odblokowaniu mechanizmu. Innym rozwiązaniem są tzw. konstrukcje samoprzekładające. Samoprzełożenie odbieraka polega na tym, że w miejscu zmiany kierunku jazdy sieć trakcyjna zawieszona jest znacznie wyżej niż normalnie, tak iż pałak dochodzi prawie do położenia pionowego. Rozpoczęcie jazdy w przeciwnym kierunku spowoduje, że odbierak sam się przełoży na skutek występowania sił tarcia pomiędzy przewodem jezdnym, a ślizgaczem. Następnie ulegnie on obniżeniu do właściwego położenia roboczego, gdy pojazd opuści strefę przekładania odbieraka. Proces ten pokazano schematycznie na rys. 5.6.



Rys. 5.6. Samoprzekładanie odbieraka pałkowego przy zmianie kierunku jazdy

Odbieraki pałkowe nie wymagają stosowania zwrotówek na sieci trakcyjnej, ale za to konieczne jest zapewnienie zmieniającego się odsuwu bocznego przewodu jezdnego od osi toru, czyli tzw. zygzakowania, w celu równomiernego zużywania się ślizgacza. Zygzakowanie z przyczyn oczywistych nie było konieczne przy odbierakach drążkowych. Odbieraki pałkowe zachowują się poprawnie do prędkości około 60 km/h. Przy wyższych szybkościach współpraca



Rys. 5.7. Odciągające działanie sił aerodynamicznych na odbierak pałkowy

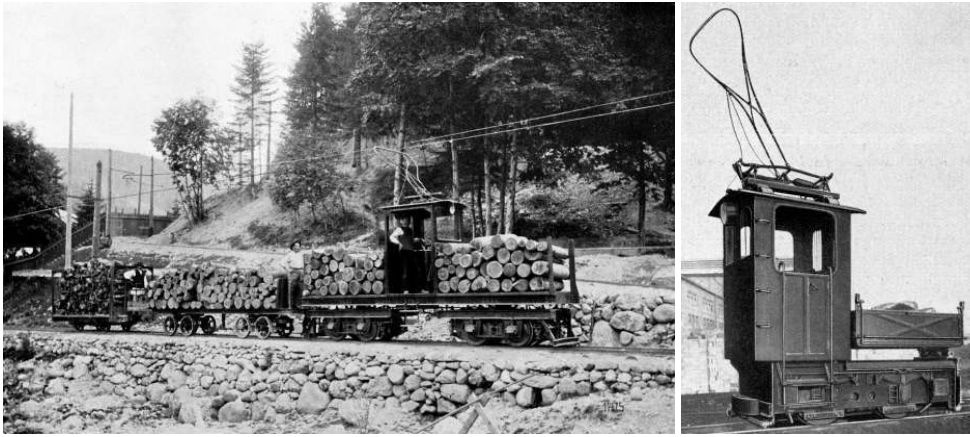
ślizgacza z przewodem jezdnym ulega pogorszeniu na skutek sił aerodynamicznych, które działają odciągająco na odbierak, powodując zmniejszenie siły docisku. Pokazano to schematycznie na rys. 5.7. Siła oporów aerodynamicznych F_a wywołanych pędem powietrza oddziałuje na odbierak tak, że pojawia się siła odciągająca F_o . W odbierakach drążkowych również występuje ten efekt, jednak ze względu

na znacznie mniejszą powierzchnię natarcia, nie jest on tak odczuwalny jak przy konstrukcjach pałkowych.

Odbieraki pałkowe wykorzystywane są obecnie przez niektóre wozy tramwajowe w miastach rosyjskich i państwach byłego ZSRR, m. in. w Mińsku, Kazaniu (patrz. fot. 5.8), Wolczańsku czy Chabarowsku oraz w wagonach historycznych i zabytkowych w Europie i na świecie. Na kolei tego typu odbieraki były dawniej stosowane w lokomotywach przemysłowych małej mocy, pojazdach wąskotorowych, lekkich wagonach silnikowych itp. (patrz fot. 5.9).



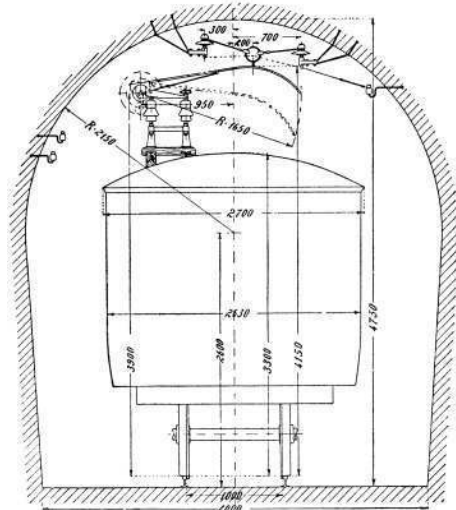
Fot. 5.8. Tramwaj PB3-6 z odbierakiem pałkowym w Kazaniu (fot. A. Surikov)



Fot. 5.9. Lokomotywy przemysłowe małej mocy dawnej konstrukcji z odbierakami pałakowymi [24, 98]

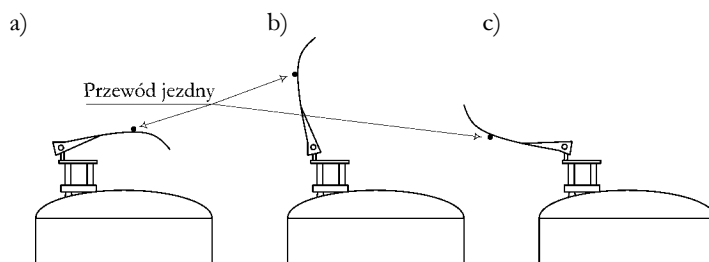
5.1.1.7. Odbieraki prętowe poprzeczne systemu Oerlikon

W pierwszych latach XX wieku firma *Oerlikon* zaproponowała własną konstrukcję odbieraka prądu do celów kolejowych. Schemat jego działania pokazano na rys. 5.8. Odbierak w kształcie wygiętego łukowato pręta zamocowany jest na dachu pojazdu poprzecznie do kierunku jazdy w sposób niesymetryczny. System sprężynowy dociska pręt, tak że jego górna powierzchnia ślizga się po przewodzie jezdny sieci trakcyjnej. Zaletą tego typu odbieraka jest duża dowolność umieszczenia przewodu jezdny względem pojazdu. Może on być umieszczony nad pojazdem, wówczas odbierak przyjmie położenie takie jak na rys. 5.8. Ale dopuszczalne jest także położenie górnoboczne przewodu, wówczas odbierak odchyli się do pozycji pionowej i ślizgacz będzie stykał się na bocznej powierzchni przewodu. W skrajnym położeniu przewód jezdny może znajdować się całkowicie z boku pojazdu i wówczas odbierak, obrócony o około 180° względem położenia wyjściowego będzie naciskał na przewód od góry. Dopuszczalne położenia przewodu jezdny względem pojazdu pokazano schematycznie na rys. 5.9. Jest to jedyna konstrukcja odbieraka, gdzie ślizgacz może pracować zarówno z siecią górną, jak i boczną.



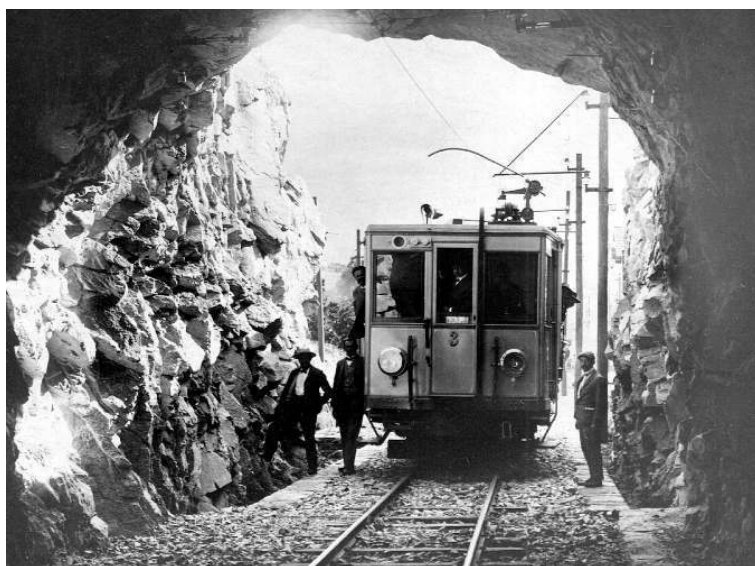
Rys. 5.8. Odbierak prętowy poprzeczny systemu *Oerlikon* – opis w tekście [57]

Niestety, jednostronne mocowanie ślizgacza odbieraka prądu czyniło go bardzo podatnym na uszkodzenia mechaniczne. Ponadto w tak szerokim zakresie dopuszczalnych zmian położenia ślizgacza nie było możliwe zapewnienie stałej wartości siły docisku do przewodu jezdny. Siła ta malała wraz ze wzrostem odchylenia pręta ślizgacza. Również współpraca z siecią jezdny przy wyższych prędkościach jazdy (ponad 60 km/h) była niezadowalająca.



Rys. 5.9. Dopuszczalne położenia przewodu jezdnyego względem pojazdu przy zastosowaniu odbieraków prądu systemu *Oerlikon*, gdzie: a) położenie górne; b) położenie górno-boczne; c) położenie boczne

Odbieraki tego typu były używane przez pojazdy obsługujące kilka linii kolejowych w Szwajcarii (patrz. fot. 5.10), a także prowadzono próby z ich wykorzystaniem, gdy rozpoczęto elektryfikację kolei szwedzkich. Jednak problemy eksploatacyjne sprawiły, że ten typ odbieraka się nie przyjął. Ostatnia lokomotywa wyposażona w odbierak *Oerlikon* zakończyła eksploatację w 1958 roku.

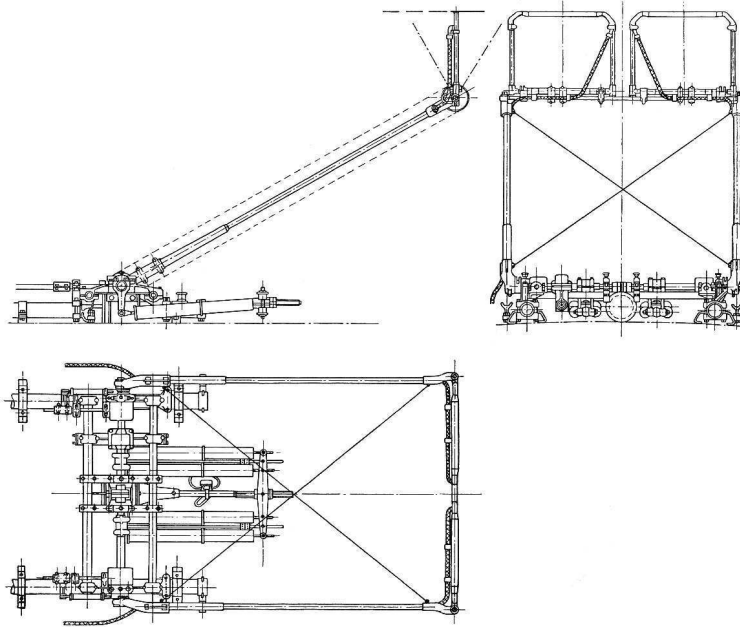


Fot. 5.10. Elektryczny wagon motorowy z odbierakiem *Oerlikon* (fot. ze zbiorów autora)

5.1.1.8. Odbieraki ramkowe podwójne

Odbierak ramkowy podwójny składa się z dwóch części. Dolna zbudowana jest z rur metalowych w kształcie ramy. Jest ona zamocowana przegubowo z jednej strony na dachu pojazdu. Do drugiego końca ramy, również przegubowo, zamocowane są dwie małe ramki zakończone ślizgaczami współpracującymi z siecią jezdnią. Konstrukcja odbieraka przedstawiona została na rys. 5.10.

Odbieraki ramkowe podwójne wykorzystywane są w pojazdach zasilanych trójfazowo. Niegdyś były używane powszechnie w lokomotywach kolei włoskich, gdzie zasilanie trójfazowe na liniach głównych było stosowane najdłużej. Obecnie w tego typu odbieraki są wyposażone lokomotywy kursujące na linii *Col de Saint Ignace – La Rhune* (patrz fot. 5.11).



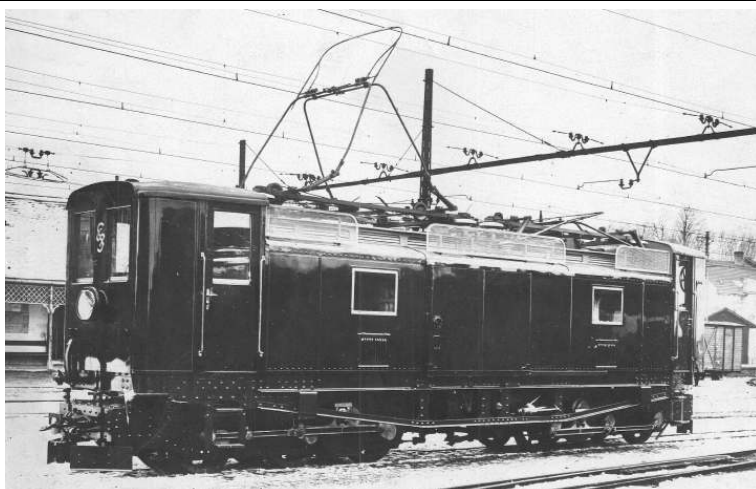
Rys. 5.10. Odbierak ramkowy podwójny [64]



Fot. 5.11. Lokomotywa z odbierakiem ramkowym podwójnym [96]

5.1.1.9. Odbieraki ramkowe dwukierunkowe z małym pałkiem

Etapem pośrednim pomiędzy prostymi pałkowymi czy ramkowymi, a współczesnymi konstrukcjami, był odbierak ramkowy dwukierunkowy. Widok pojazdu wyposażonego w ten odbierak pokazano na fot. 5.12.



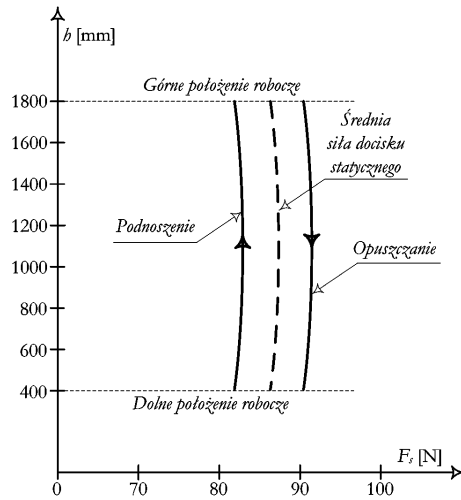
Fot. 5.12. Odbierak ramkowy dwukierunkowy z małym pałakiem (fot. ze zbiorów autora)

Jest on rozwinięciem konstrukcji odbieraka ramkowego i pałakowego. Składa się z dwóch ramek zamontowanych tak, że patrząc z boku, tworzą one trójkąt równoramienny. Konstrukcja zakończona jest krótkim pałakiem wyposażonym w ślizgacz. Pałak ulega samoprzestawieniu przy zmianie kierunku jazdy. Zmiana ta nie wymaga więc żadnych czynności dodatkowych. Uniesienie i opuszczenie odbywa się przez obrót specjalnych dźwigni (widocznych na fotografii). Odbierak ten był podstawą do opracowania konstrukcji nożycowych (tzw. pantografów) używanych powszechnie do dzisiaj.

5.1.1.10. Odbieraki nożycowe – pantografy

Pantografy należą, już od wielu lat, do najbardziej rozpowszechnionych konstrukcji odbieraków prądu. Po raz pierwszy zostały wykorzystane w Stanach Zjednoczonych na kolei miejskiej w San Francisco już w roku 1903. Miały one jednak jeszcze sporo wad, były ciężkie i nie posiadały elastycznego zawieszenia ślizgacza. Ulepszoną wersję opracowała niemiecka firma *Siemens & Halske* w roku 1910 i od tego czasu, stale doskonalone, używane są powszechnie do dzisiaj. Wyposażona jest w nie znakomita większość pojazdów kolejowych oraz tramwajowych. Zapewniają niezawodny odbiór energii przy dużych wartościach prądu i wysokich prędkościach jazdy. Ponadto zachowują się jednakowo podczas jazdy w obu kierunkach. Nie są więc wymagane żadne czynności dodatkowe przy zmianie kierunku jazdy. Ich charakterystyka statyczna jest, z eksploatacyjnego punktu widzenia, bardzo korzystna. Przy prawidłowej regulacji siła docisku jest praktycznie stała w szerokim zakresie uniesień roboczych odbieraka. Przykładową charakterystykę statyczną pokazano na rys. 5.11. Różnica w sile docisku przy podnoszeniu i opuszczaniu wynika z występowania sił tarcia w przegubach konstrukcji odbieraka. Siły tarcia są zawsze zwrócone przeciwnie do kierunku ruchu, dlatego zmniejszają siłę docisku przy podnoszeniu, a zwiększają przy opuszczaniu. Siłę docisku można regulować w szerokich granicach. Jej wymagana wielkość zależy od różnych czynników, takich jak: wartość pobieranego prądu, typ konstrukcyjny sieci i odbieraka, materiał nakładek ślizgowych czy warunki klimatyczne. Dopuszczalne siły nacisku określone są przez przepisy obowiązujące w poszczególnych zarządach kole-

jowych. Wartości stosowane obecnie mieszczą się w granicach od ok. 55 do 120 N dla systemów prądu stałego i od 45 do 105 N dla systemów prądu przemiennego. Zbyt duży nacisk powoduje nadmiernie unoszenie przewodu jezdnego sieci trakcyjnej, co może doprowadzić w skrajnym przypadku do uszkodzenia mechanicznego sieci i odbieraka oraz przyspiesza zużycie przewodu i nakładek ślizgowych. Zbyt mały docisk pogarsza parametry elektryczne styku (zwiększa jego rezystancję), a podczas jazdy z wyższymi prędkościami może wywołać chwilowe odskoki odbieraka od sieci. Siła docisku może być zapewniona przez układ sprężynowy lub, jak ma to miejsce w najnowszych konstrukcjach, układ pneumatyczny z regulatorem ciśnienia.



Rys. 5.11. Charakterystyka statyczna nożycowego odbieraka prądu

Wszystkie odbieraki kolejowe są skonstruowane tak, że gdy układ napędowy nie jest załączony, znajdują się one w pozycji opuszczonej (tzw. konstrukcje normalnie opuszczone). Żeby spowodować uniesienie należy doprowadzić energię do układu napędowego, najczęściej poprzez zasilenie cylindra pneumatycznego sprężonym powietrzem. Pozycja uniesiona jest więc pozycją wymuszoną. Ponadto układ napędowy odbieraka musi być skonstruowany tak, by nawet przy maksymalnej prędkości jazdy, gdy na ślizgacz odbieraka działają siły aerodynamiczne dodatkowo zwiększające docisk do przewodu jezdnego, było możliwe jego opuszczenie. Unoszenie i opuszczanie odbieraków kolejowych odbywa się najczęściej w sposób zdalny z pulpitu maszynisty.

Nieco inaczej sytuacja wygląda w przypadku odbieraków tramwajowych. Należą one do tzw. konstrukcji normalnie uniesionych, czyli pozycją wymuszoną jest dolne położenie odbieraka. Ponieważ odbieraki tramwajowe mają w większości konstrukcję uproszczoną, czynności unoszenia i opuszczania wykonywane są często ręcznie za pomocą sznurka, choć nowsze typy pantografów również umożliwiają ich realizację w sposób automatyczny (silowniki elektryczne).

Nakładki ślizgowe są elementem bezpośrednio stykającym się z siecią jezdnią i od ich budowy w znacznej mierze zależy pewność dostarczenia energii do pojazdu. Materiał nakładek musi być tak dobrany, by umożliwić przepływ prądu o wymaganym natężeniu bez niebezpieczeństwa punktowego przegrzania nakładki i przewodu jezdnego. Jest to szczególnie istotne w trakcie postoju, gdy energia jest pobierana np. na potrzeby ogrzewania lub klimatyzacji. Nakładki wykonuje się z grafitu, spieków grafitowo-metalowych lub miedzi. Nakładki miedziane, w celu zmniejszenia sił tarcia, wymagają dodatkowo smarowania, dlatego ślizgacz jest wyposażony w rowek, który wypełnia się smarem grafitowym. Powoduje to nieestetycznie wyglądające zabrudzenia na dachach pojazdów trakcyjnych i wagonów. Przy nakładkach grafitowych ten zabieg nie jest konieczny, a ponadto znacznie wolniej ścierają one przewód jezdny. Wadą nakładek grafitowych w porównaniu z miedzianymi jest większa podatność na uszkodzenia mechaniczne, jednak przy dobrze utrzymanej sieci trakcyjnej ta wada ma znaczenie drugorzędne. Dlatego obecnie w większości zarządów kolejowych stosowane są nakładki grafitowe lub wykonane z kompozytów grafitowo-metalowych. Konstrukcja ślizgacza musi uwzględniać spodziewane

natężenie prądu pobieranego przez pojazd. Wiadomo, że w systemach napięcia przemiennego 15 kV i 25 kV prądy pobierane będą stosunkowo niewielkie, nawet dla pojazdów dużych mocy. Dlatego odbieraki przeznaczone dla tych systemów mają stosunkowo lekką konstrukcję mechaniczną i nakładki dostosowane do prądów nie przekraczających 1000 A. Przy systemach prądu stałego 1500 V i 3000 V konstrukcja odbieraków jest dużo cięższa, a także stosuje się z reguły podwójne lub nawet poczwórne nakładki ślizgowe konieczne przy prądach roboczych rzędu nawet 3500 A. Szerokość ślizgacza zależy od wielkości odsuwu i każdy zarząd linii kolejowych określa ją stosownymi przepisami.

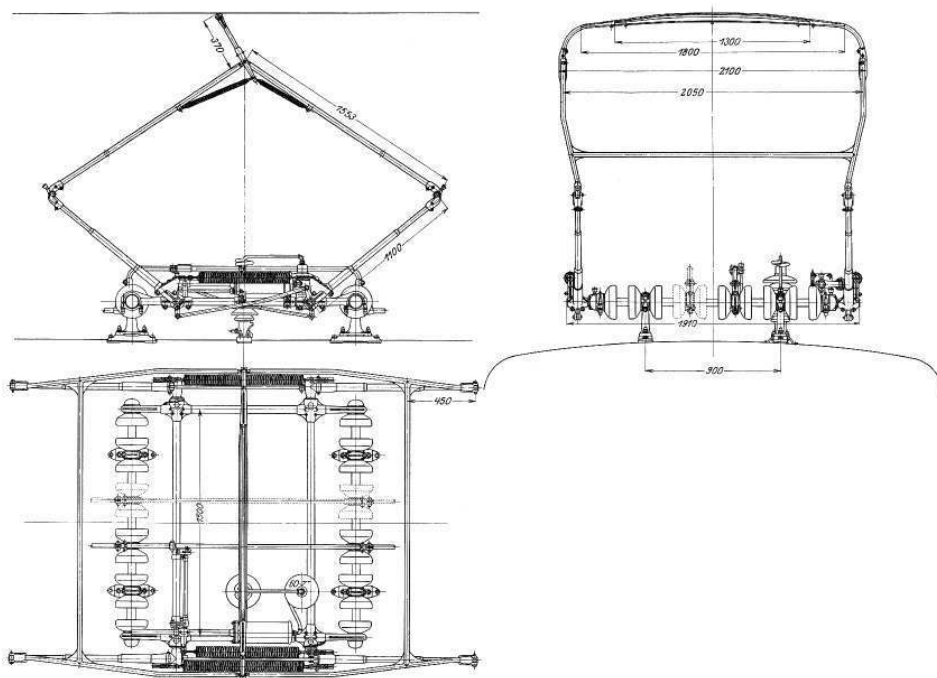
Istnieje kilka podstawowych typów odbieraków nożycowych:

- odbieraki czteroramienne symetryczne (tzw. pełny pantograf),
- odbieraki ośmioramienne symetryczne (tzw. pantografy podwójne),
- odbieraki czteroramienne skrzyżowane symetryczne (dolne ramiona skrzyżowane w kształcie litery X),
- odbieraki dwuramienne symetryczne (tzw. typ wiedeński),
- odbieraki jednoramienne niesymetryczne (tzw. pantograf połówkowy).

W każdej wyżej wymienionej kategorii występuje szereg podtypów odbieraków, różniących się np. rodzajem ślizgacza i sposobem jego zamocowania, czy konstrukcją układu napędowego. Poniżej zostaną omówione najważniejsze i najciekawsze konstrukcje.

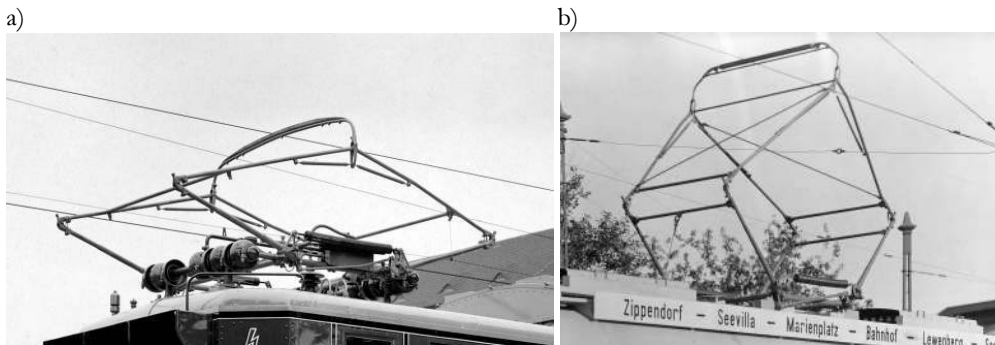
Odbieraki czteroramienne symetryczne ze ślizgaczem pałkowym

Jest to jedna z pierwszych w pełni funkcjonalnych konstrukcji odbieraka nożycowego. Do konstrukcji pantografu przymocowany jest elastycznie pałkowy ślizgacz, tak jak to pokazano na rys. 5.12.



Rys. 5.12. Odbierak czteroramienny symetryczny ze ślizgaczem pałkowym [64]

Sprężyny mocujące ślizgacz starają się doprowadzić go do pozycji pionowej. W zależności od kierunku jazdy odchyła się on w jedną lub drugą stronę na skutek występowania sił tarcia pomiędzy nakładką ślizgacza, a przewodem jezdnym. Odchylenie ślizgacza od pionu zapewnia jednocześnie elastyczność jego zawieszenia. Za unoszenie odbieraka do pozycji roboczej odpowiadają dwie skrajne sprężyny po obu stronach konstrukcji (patrz rys. 5.11). Regulacja siły docisku jest dokonywana przez zmianę naciągu tych sprężyn. Trzecia sprężyna (wewnętrzna) opuszcza odbierak, pokonując siłę unoszącą obu pozostałych. W celu uniesienia odbieraka należy jej działanie zneutralizować poprzez zasilenie cylindra napędowego sprężonym powietrzem. Wysunięcie tłoka cylindra spowoduje, że sprężyna opuszczająca zostanie rozciągnięta mechanicznie i przestanie oddziaływać na ramiona odbieraka. Takie rozwiązanie napędu zostało wykorzystane w praktycznie wszystkich późniejszych konstrukcjach odbieraków kolejowych z układem sprężynowym. Lekki, elastycznie zamocowany ślizgacz zapewnia prawidłową współpracę z siecią trakcyjną do prędkości 160 km/h. Był to podstawowy typ odbieraka stosowany w lokomotywach i zespołach trakcyjnych budowanych w latach międzywojennych dla systemu napięcia przemiennego 15 kV 16 i 2/3 Hz. Oprócz wersji kolejowej opracowano uproszczoną konstrukcję z napędem ręcznym stosowaną w pojazdach tramwajowych. Obecnie ten typ odbieraka nie jest już wykorzystywany w taborze eksploatowanym w ruchu liniowym, można go jednak spotkać w czynnych pojazdach historycznych prowadzących pociągi turystyczne i składy retro. Widok obu typów odbieraka (tramwajowego i kolejowego) zaprezentowano na fot. 5.13.



Fot. 5.13. Odbierak czteroramienny symetryczny ze ślizgaczem ramkowym, gdzie: a) wersja kolejowa z napędem pneumatycznym; b) wersja tramwajowa z napędem ręcznym (fot. ze zbiorów autora)

Odbieraki czteroramienne symetryczne ze ślizgaczem płaskim

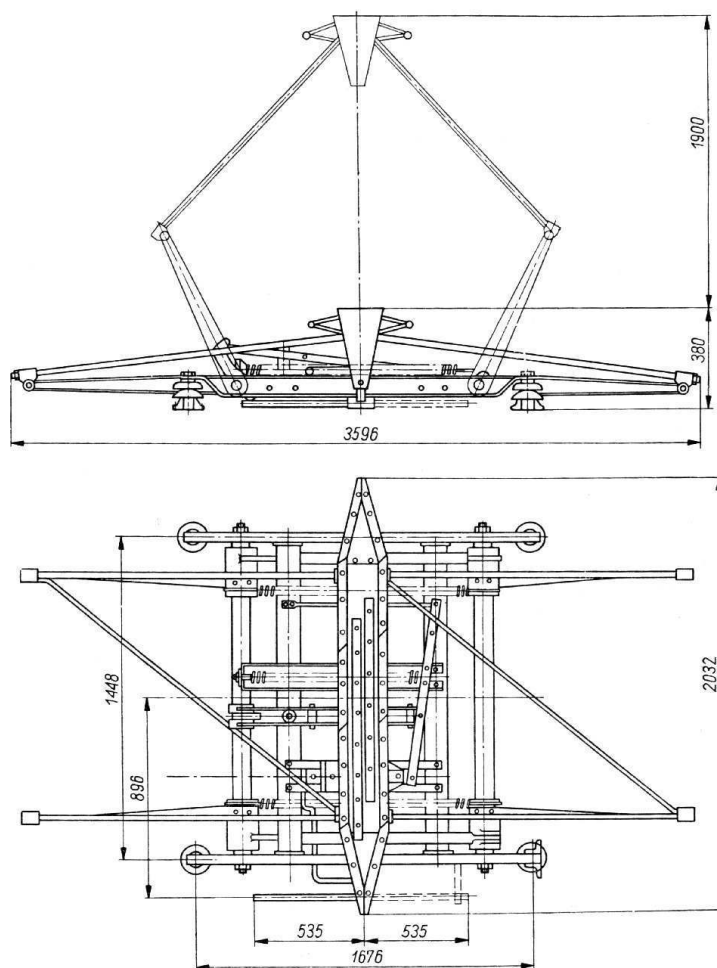
Odbieraki czteroramienne symetryczne ze ślizgaczem płaskim nadal należą do jednych z najpopularniejszych typów odbieraków stosowanych w elektrycznych pojazdach szynowych. W nowo budowanych jednostkach stosowane są już raczej rzadko, jednak duża liczba pojazdów jest jeszcze w nie wyposażona. Ślizgacz płaski różni się od pałkowego tym, że, składając się najczęściej z dwóch ślizgów, jest całkowicie symetryczny, tzn. zachowuje się identycznie dla obu kierunków jazdy (nie występuje zjawisko przekładania charakterystyczne dla ślizgaczy pałkowych). To zdecydowanie poprawia współpracę z siecią jezdnią, zwłaszcza przy większych prędkościach jazdy.

Istnieje bardzo dużo odmian tego typu odbieraka, różniących się od siebie szczegółami konstrukcyjnymi takimi jak budowa i sposób mocowania ślizgacza, układ i zamocowanie sprężyn

unoszących itp. Poniżej omówiono kilka przykładowych konstrukcji, typowych dla systemów zasilania, do jakich je przeznaczono.

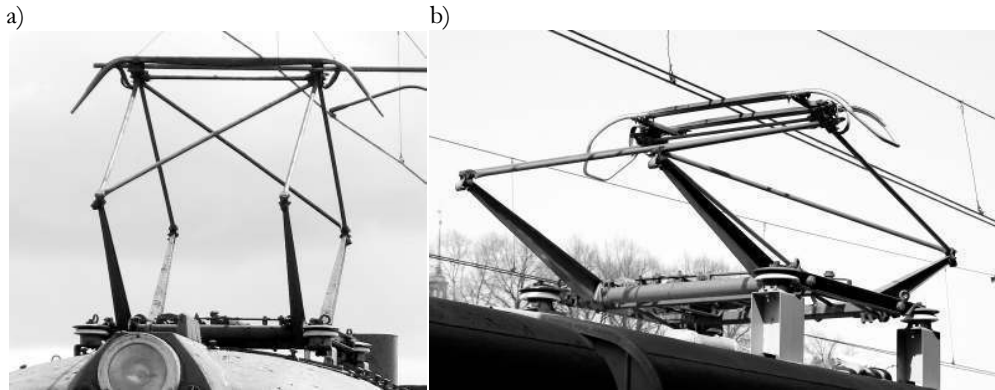
Odbierak typu AKP-4E (5ZL) dla systemu 3000 V DC kolei PKP

Odbieraki typów AKP-4E i 5ZL są podstawowymi odbierakami prądu stosowanymi na PKP. Montowane są zarówno na lokomotywach, jak i elektrycznych zespołach trakcyjnych. Obie konstrukcje różnią się jedynie sposobem odsprężynowania ślizgacza. W odbieraku AKP-4E ślizgacz odsprężynowany jest za pomocą układu wahaczy i sprężyn, a w odbieraku 5ZL za pomocą teleskopów ze sprężynami w środku. Różnica ta wpływa na prędkość maksymalną z jaką mogą być eksploatowane odbieraki. Dla AKP-4E wynosi ona 125 km/h, a dla 5ZL jest równa 160 km/h. Są to odbieraki o średnio ciężkiej konstrukcji dostosowane do pobierania prądu ciągłego o natężeniu 1000 A. Mogą więc być zastosowane w pojazdach o mocy nie przekraczającej 3 MW. Oryginalnie odbieraki były wyposażone w ślizgacze z nakładkami miedzianymi, a od stycznia 2011 roku, w związku ze zmianą przepisów, nastąpiła wymiana dotychczasowych ślizgaczy na nowe z nakładkami grafitowymi. Konstrukcję odbieraka przedstawiono na rys. 5.13.



Rys. 5.13. Odbierak AKP-4E kolei PKP dla systemu 3000 V DC [30]

Odbierak wyposażony jest w napęd pneumatyczny, a siłę docisku zapewnia układ sprężyn. Dwie skrajne sprężyny odpowiedzialne są za unoszenie, środkowa zaś opuszcza odbierak. Doprowadzenie sprężonego powietrza do cylindra napędowego sprawia, że sprężyna opuszczająca zostaje rozciągnięta i przestaje oddziaływać na ramiona odbieraka, pozwalając na uniesienie konstrukcji. Odbieraki *AKP-4E* i *5ZL* w nowo budowanych pojazdach nie są już montowane jednak nadal można je spotkać, w przeważającej liczbie eksploatowanych w Polsce lokomotyw i zespołów trakcyjnych. Widok odbieraka w wersjach z nakładką miedzianą oraz grafitową pokazano na fot. 5.14.



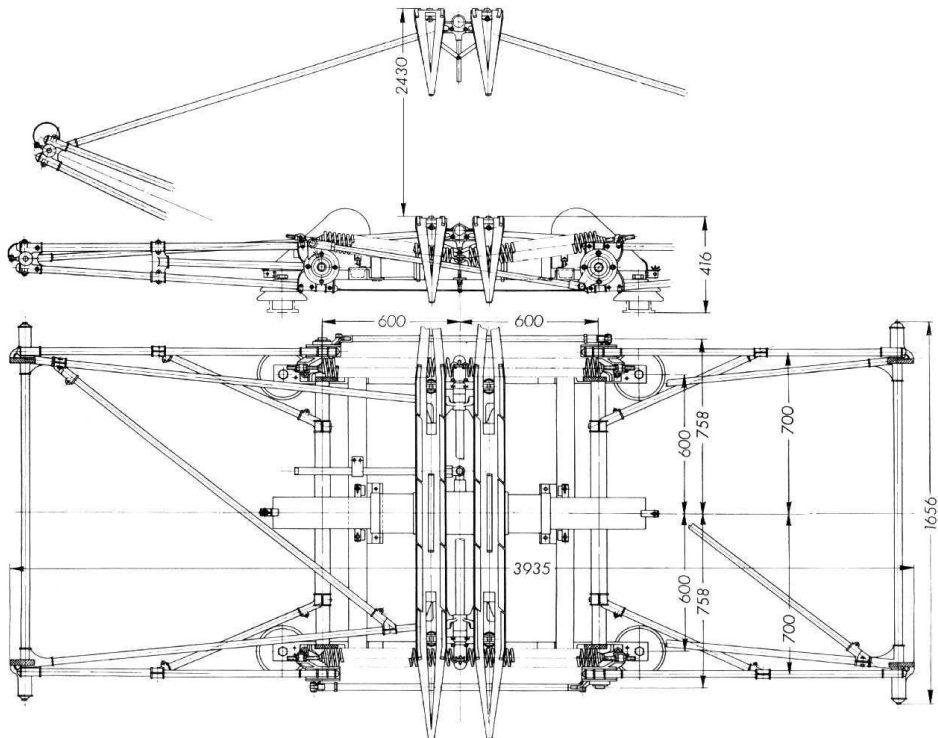
Fot. 5.14. Odbierak prądu *AKP-4E*, gdzie: a) wersja ze ślizgaczem z nakładką miedzianą; b) wersja ze ślizgaczem z nakładką grafitową (fot. autora)

Odbierak typu G dla systemu 1500 V DC kolei SNCF

Stosunkowo niska, jak na potrzeby kolejowej trakcji elektrycznej, wartość napięcia zasilania wynosząca 1500 V wymaga zastosowania w pojazdach ciężkich konstrukcyjnie odbieraków prądu. Można do nich zaliczyć odbierak typu G stosowany w starszych lokomotywach i zespołach trakcyjnych kolei SNCF. Dostosowany jest on do maksymalnej wartości prądu pobieranego wynoszącej 3500 A. Żeby to osiągnąć wyposażono go w dwa ślizgacze z nakładkami miedzianymi, z których każdy ma dwa ślizgi. Łącznie daje to cztery powierzchnie styku z siecią trakcyjną. Ponieważ w systemie 1500 V DC korzysta się z ciężkich sieci trakcyjnych o dużym przekroju mających dwa przewody jezdne, odbierak styka się z nimi w sumie w ośmiu punktach. Oba ślizgacze mają niezależne układy odsprężynowania, aby poprawić współpracę odbieraka z siecią. Mimo takich zabiegów moce pojazdów zasilanych z tego systemu są ograniczone do około 4,5 MW. Ponadto każdy pojazd wyposażony jest w dwa odbieraki. W czasie postoju i w początkowej fazie rozruchu, gdy istnieje niebezpieczeństwo punktowego przegrzania ślizgacza i sieci trakcyjnej, uniesione są oba odbieraki. Z kolei w czasie jazdy, gdy przewód jezdny przemieszcza się po ślizgaczu na skutek zygzakowania, prąd pobierany przepływa przez coraz to inny jego fragment, przedni odbierak jest opuszczany i pojazd korzysta tylko z tylnego.

Ciężki podwójny ślizgacz wraz z masywną konstrukcją ramion pantografu sprawiają, że wymagany jest układ aż czterech sprężyn unoszących. Odbierak ma napęd pneumatyczny, którego zasada działania jest analogiczna do innych konstrukcji nożycowych ze sprężynowym systemem docisku. Odbieraki tego typu umożliwiają jazdę z prędkością do 160 km/h. Jest to praktycznie największa szybkość, jaką można uzyskać dla systemu zasilania 1500 V DC. Ograniczenie

masy składu pozwala, przy spełnieniu kilku innych warunków od strony układu zasilania, na podniesienie tej prędkości do 200 km/h (takie parametry ma np. lokomotywa serii BB 7200). Odbieraki typu G były konstrukcją standardową używaną w pojazdach kolei francuskich zasilanych napięciem 1500 V DC. Obecnie, ze względu na przebiegający intensywnie od kilkunastu lat proces wymiany i modernizacji taboru kolejowego, występują już coraz rzadziej, zastępowane przez nowsze typy odbieraków jednoramiennych. Konstrukcję odbieraka pokazano na rys. 5.14, a jego widok na fot. 5.15.



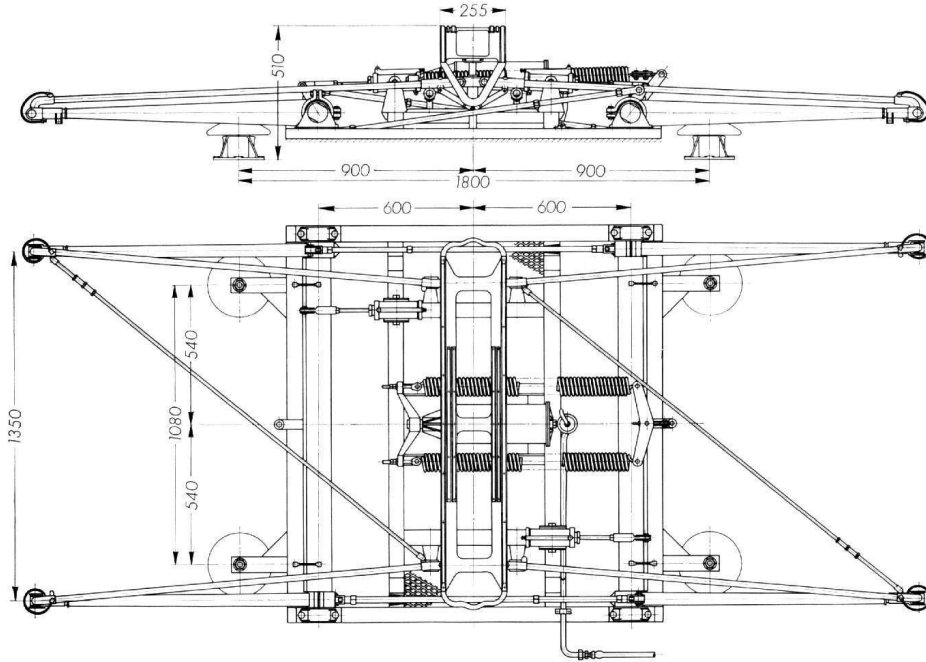
Rys. 5.14. Odbierak typu G kolei SNCF dla systemu 1500 V DC [64]



Fot. 5.15. Odbierak typu G z dwoma ślizgaczami (fot. autora)

Odbierak typu 52 dla systemu 3000 V DC kolei FS

Koleje włoskie, podobnie jak koleje polskie, korzystają z systemu zasilania 3000 V DC. Budowa włoskich odbieraków prądu różni się jednak znacząco od krajowych. Jedną z typowych konstrukcji odbieraka stosowaną przez koleje FS jest typ 52, pokazany na rys. 5.15.



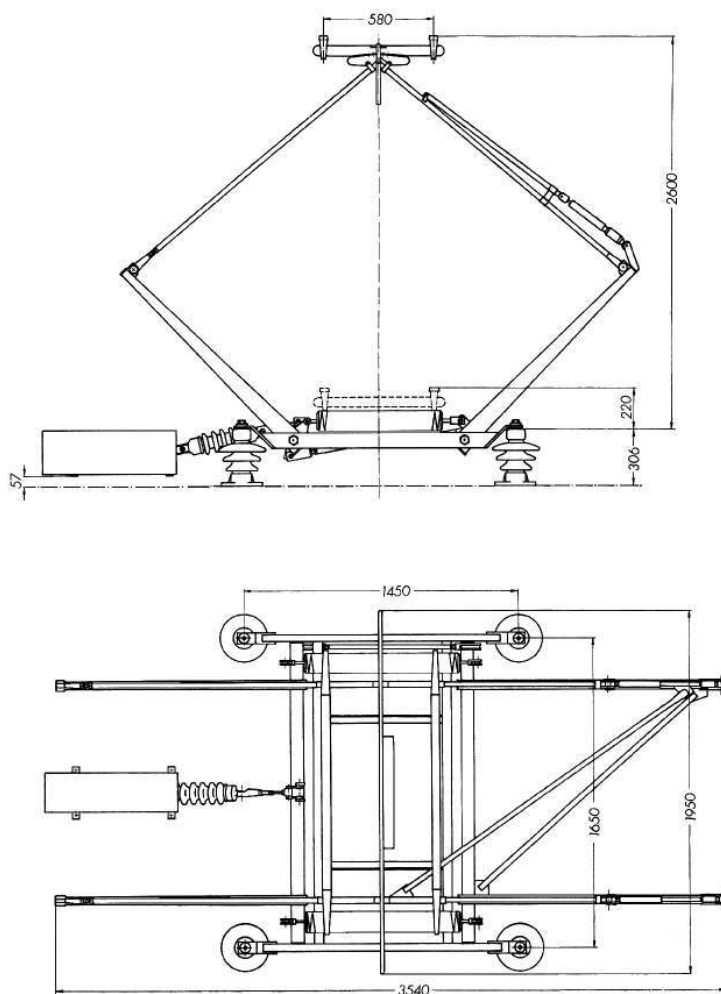
Rys. 5.15. Odbierak typu 52 kolei FS dla systemu 3000 V DC [64]

W porównaniu z odbierakiem krajowym zwraca uwagę znacznie węższy ślizgacz (o około 60 cm). Wynika to z mniejszego zakresu zygzakowania stosowanego przez koleje włoskie. Wynosi on ± 20 cm, w porównaniu z obowiązującym na PKP zygzakowaniem równym ± 30 cm na odcinkach prostych i ± 40 cm na łukach. Ponadto bardzo nietypowo został w tym odbieraku zrealizowany napęd i system dociskający. Zamiast dwóch przeciwsośnie oddziałujących układów sprężyn, jednego unoszącego i drugiego opuszczającego, którego wpływ na ramiona odbieraka jest neutralizowany działaniem tłoka cylindra napędowego, zastosowano tylko jeden zestaw sprężyn (unoszących). Gdy napęd odbieraka nie jest zasilany, wówczas tłok cylindra jest schowany, co sprawia, że sprężyny są nienaprężone, a odbierak przyjmuje dolną pozycję na skutek działania siły grawitacji. Zasilenie cylindra sprężonym powietrzem sprawi, że jego tłok zostanie wysunięty, co spowoduje naciągnięcie sprężyn. Zaczną one wówczas działać na ramiona odbieraka unosząc ślizgacz do góry, dociskając jego powierzchnię do sieci trakcyjnej. Odbierak tego typu może być eksploatowany z prędkością do 180 km/h.

Odbierak typu DBS 54 dla systemu 15 kV 16 i 2/3 Hz kolei DB

Odbierak typu DBS 54 jest lekką mechanicznie konstrukcją przystosowaną do odbioru prądu średniej wielkości przy zasilaniu napięciem przemiennym 15 kV 16 i 2/3 Hz. Przy tej wysokości napięcia prądy robocze nie przekraczają zwykle wartości 500 A. Poprawia to zdecydowanie

współpracę ślizgacza z siecią trakcyjną i redukuje problemy pojawiające się przy odbiorze prądów wyższych wartości (punktowe przegrzewanie nakładki ślizgacza itp.). Konstrukcja mechaniczna odbieraka widoczna jest na rys. 5.16.



Rys. 5.16. Odbierak DBS 54 kolei DB dla systemu 15 kV, 16 i 2/3 Hz [64]

Odbierak jest wyposażony w podwójny, symetryczny ślizgacz z nakładkami grafitowymi (oprócz typu ślizgacza pokazanego na rysunku, stosuje się również inne o zbliżonej konstrukcji). Docisk do sieci trakcyjnej realizują dwie sprężyny, zapewniając stałą siłę docisku w szerokim zakresie uniesień roboczych odbieraka. Siła ta standardowo wynosi od 50 do 70 N. Pneumatyczny cylinder napędowy wraz ze sprężyną opuszczającą znajdują się na dachu pojazdu poza konstrukcją pantografu. Wymaga to zastosowania połączenia mechanicznego zapewniającego izolację elektryczną. Odbierak DBS 54 to standardowa konstrukcja stosowana w pojazdach budowanych dla kolei niemieckich w latach 60. i 70. ubiegłego wieku. Zasadniczo był on przeznaczony do eksploatacji z prędkością do 160 km/h, jednak z czasem prędkość ta została zwiększona do 200 km/h. Obecnie tego typu odbieraki są powoli wycofywane z użytku, co jest zwi-

zane z intensywną modernizacją taboru kolejowego, jaka ma miejsce w ostatnich latach. Nadal można je jednak spotkać zamontowane na, wciąż eksploatowanych, lokomotywach starszych typów. Widok odbieraka pokazano na fot. 5.16.

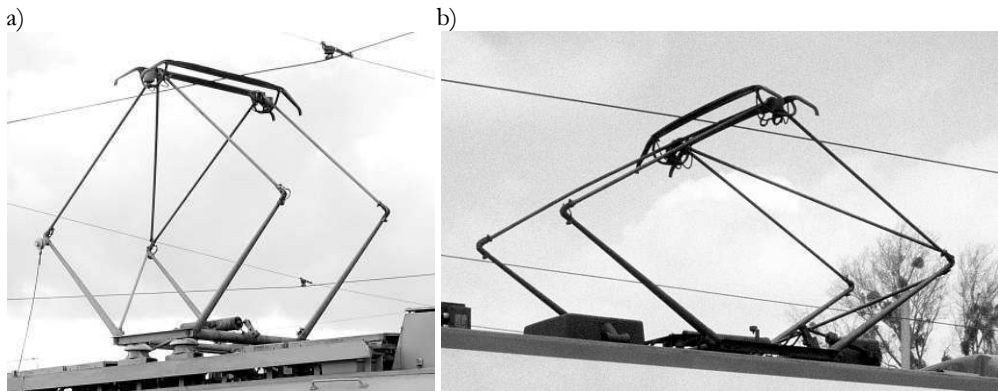


Fot. 5.16. Odbierak typu DBS 54 kolei DB (fot. T. Wolf)

Odbierak czteroramienny w wykonaniu tramwajowym

Odbieraki nożycowe czteroramienne ze ślizgaczem płaskim są również stosowane w pojazdach tramwajowych. Charakteryzują się one, w porównaniu z kolejowymi, uproszczoną konstrukcją mechaniczną, zwłaszcza jeśli chodzi o układ napędowy. Wyróżniamy dwa typy napędu stosowane w tych odbierakach, tj. ręczny – gdzie pantograf opuszczany i podnoszony jest przez obsługę pojazdu za pomocą sznurka (starsze rozwiązanie), a także elektryczny – gdzie ruch konstrukcji zapewnia siłownik elektryczny zasilany z baterii akumulatorów.

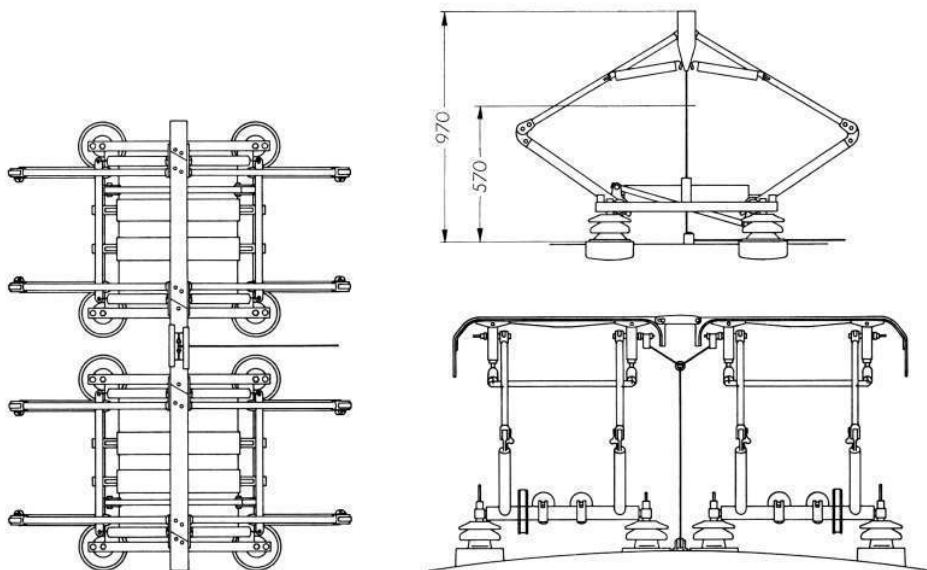
W Polsce odbieraki tramwajowe czteroramienne są stosowane m.in. w wagonach typu *GT6*, *GT8* i *N8C* produkcji firmy *Düwag*, zakupionych przez krajowe przedsiębiorstwa komunikacyjne w ostatnich latach oraz w wozach typu *N* i pochodnych, produkcji firmy *Konstal*, używanych obecnie okazjonalnie jako tabor historyczny. Widok odbieraka w wersji z napędem ręcznym i elektrycznym pokazano na fot. 5.17.



Fot. 5.17. Odbierak nożycowy czteroramienny w wersji tramwajowej, gdzie: a) z napędem ręcznym; b) z napędem elektrycznym (fot. autora)

Odbieraki ośmioramienne symetryczne

Odbieraki ośmioramienne służą do odbioru energii elektrycznej przez pojazdy zasilane z sieci trójfazowej. Składają się one z dwóch małych odbieraków czteroramiennych połączonych mechanicznie elementem izolacyjnym, posiadających wspólny układ napędowy. Konstrukcję odbieraka ośmioramiennego przedstawiono na rys. 5.17.



Rys. 5.17. Odbierak ośmioramienny symetryczny [64]

Niewielkie wymiary pantografu ograniczają dopuszczalny zakres zmian uniesienia robocze- go, co wymaga odpowiedniego podwieszenia sieci trakcyjnej. W przypadku prezentowanej konstrukcji zmiany te wynoszą 40 cm. Dla porównania, dla odbieraka czteroramiennego *AKP-4E* różnica pomiędzy najniższym i najwyższym dopuszczalnym uniesieniem wynosi 140 cm. Siłę unoszącą zapewniają cztery sprężyny. Odbierak należy do konstrukcji normalnie uniesionych, a opuszczanie i podnoszenie realizowane jest ręcznie za pomocą sznurka. Istnieje również wariant opuszczany silownikiem elektrycznym.

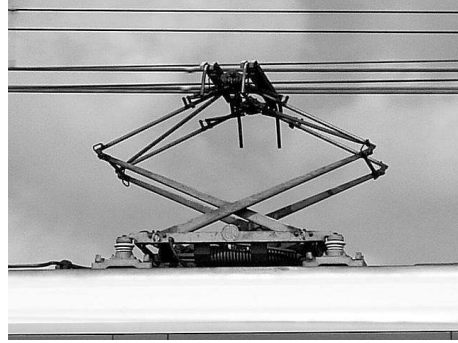
Odbieraki ośmioramienne eksploatowane są w pojazdach obsługujących trzy z czterech ist- niejących na świecie linii kolejowych zasilanych trójfazowo, a mianowicie: *Zermatt – Gornergat* i *Kleine Scheidegg – Jungfraujoch* w Szwajcarii oraz kolej na *Corcovado* w Brazylii.

Odbieraki czteroramienne skrzyżowane symetryczne

Konstrukcja odbieraków czteroramiennych skrzyżowanych powstała w celu ograniczenia wymiarów geometrycznych pantografu. W takiej sytuacji odbierak zajmuje mniej miejsca na dachu pojazdu, dzięki czemu można umieścić tam więcej innych podzespołów, takich jak rezy- story rozruchowe czy przekształtniki, powiększając tym samym powierzchnię użyteczną pojaz- du. Ma to znaczenie zwłaszcza w przypadku zespołów trakcyjnych. Ponadto odbieraki skrzyżo- wane charakteryzują się nieco mniejszą masą niż zwykle pantografy, a należy pamiętać, że im części ruchome odbieraka są lżejsze i im tzw. masa zastępcza jest mniejsza, tym lepiej współpra- cuje on z siecią trakcyjną. Pod pojęciem masy zastępczej odbieraka rozumiemy masę, która

umieszczona w punkcie styku ma taką samą energię kinetyczną jak masa części ruchomej całego odbieraka przy założeniu, że prędkości pionowe odbieraka i ślizgacza są jednakowe. Stwierdzenie to jest prawdziwe dla nieusprężynowanego odbieraka. W praktyce poprawnie skonstruowane zawieszenie elastyczne ślizgacza w sposób istotny redukuje masę zastępczą odbieraka.

Mimo przedstawionych powyżej zalet, odbieraki skrzyżowane nie należą do popularnych. Powodem jest znaczne skomplikowanie mechanizmu unoszącego pantograf. Odbieraki tego typu w Europie nie są eksploatowane, można je za to spotkać w pojazdach używanych przez koleje koreańskie i japońskie. Widok odbieraka skrzyżowanego przedstawiono na fot. 5.18.



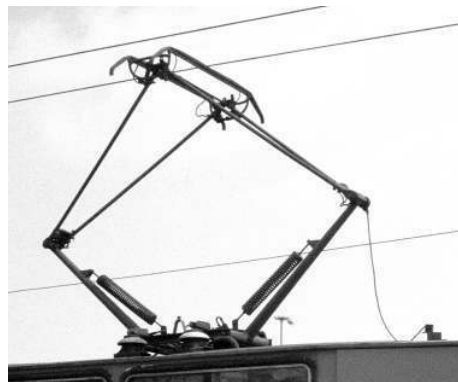
Fot. 5.18. Odbierak czteroramienny skrzyżowany symetryczny [97]

Odbieraki dwuramienne symetryczne

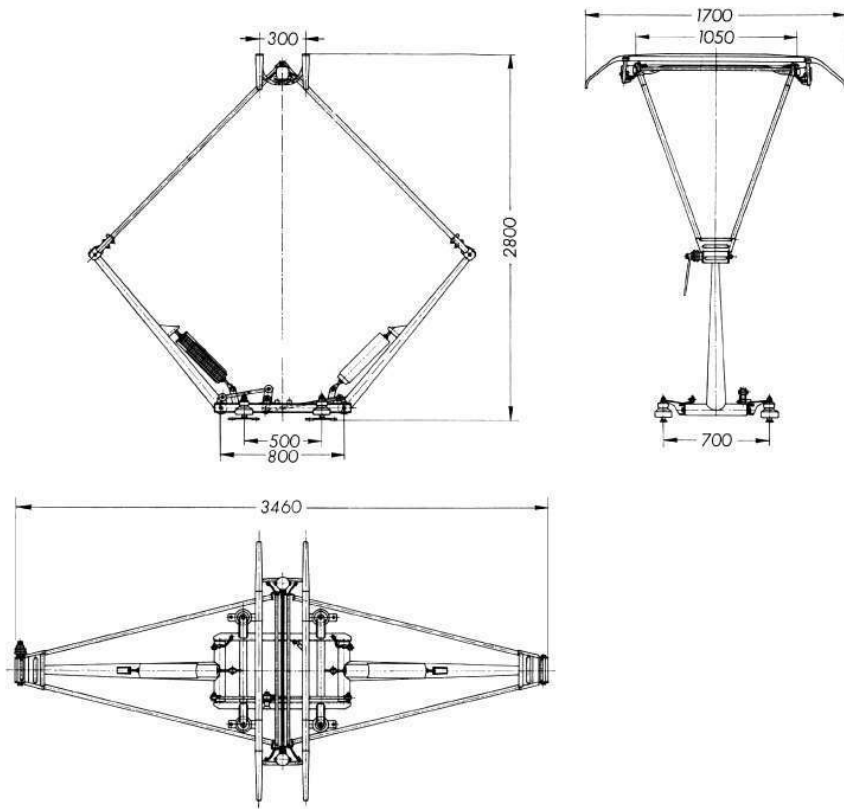
Odbieraki nożycowe dwuramienne są konstrukcją pośrednią, pomiędzy klasycznymi pantografami czteroramiennymi a nowoczesnymi rozwiązaniami jednoramiennymi. Masa takiego odbieraka jest mniejsza, a ponadto zredukowanie liczby przegubów ogranicza opory tarcia, jakie w tych przegubach występują, co sprawia, że różnica pomiędzy siłą docisku przy opuszczaniu i podnoszeniu jest mniejsza niż w przypadku konstrukcji czteroramiennych. Odbieraki dwuramienne są powszechnie stosowane w pojazdach tramwajowych. Na kolei ten typ odbieraka jest mniej popularny, można go spotkać w pojazdach eksploatowanych w Rosji i krajach byłego ZSRR.

Odbierak dwuramienny tramwajowy typ BS 71

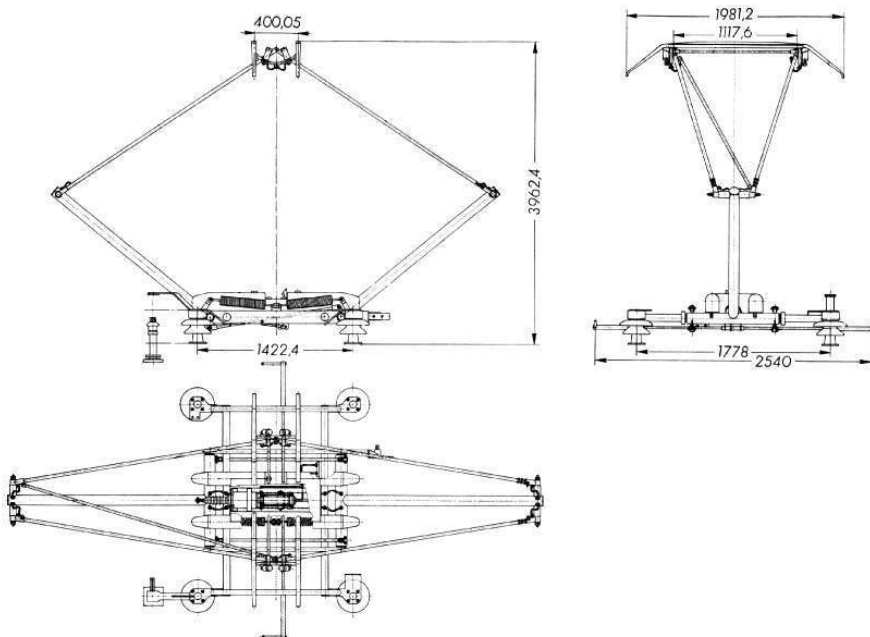
Odbierak typu *BS 71* firmy *Stemmann* jest bardzo popularną konstrukcją, w którą wyposażone są pojazdy tramwajowe w wielu krajach europejskich. W Polsce był on produkowany na licencji pod symbolem *OTK-1*. Budowę odbieraka pokazano na rys. 5.18. Odbierak ten należy do konstrukcji normalnie uniesionych. Siłę docisku zapewniają dwie sprężyny zamocowane do dolnych ramion pantografu. Najlepsze warunki pracy występują, gdy średni docisk statyczny wynosi 69 N. Podwójny ślizgacz z nakładką grafitową przymocowany jest poprzez układ sprężyn i wahaczy. Maksymalna wartość prądu ciągłego wynosi 400 A, co jest wystarczające dla potrzeb pojazdów tramwajowych średniej mocy. Opuszczanie i podnoszenie odbywa się ręcznie za pomocą sznurka, lub elektrycznie przy wykorzystaniu siłownika zasilanego z baterii akumulatorów. W Polsce, w ten typ odbieraka wyposażone są praktycznie wszystkie tramwaje produkcji krajowej serii *105N* i pochodne, a także starsze konstrukcje, takie jak *102N* i *13N*. Widok odbieraka w wersji z napędem ręcznym pokazano na fot. 5.19.



Fot. 5.19. Odbierak dwuramienny *OTK-1* (*BS 71*) w wersji z napędem ręcznym (fot. autora)



Rys. 5.18. Odbierak dwuramienny symetryczny w wersji tramwajowej [64]



Rys. 5.19. Odbierak dwuramienny symetryczny w wersji kolejowej [64]

Odbierak dwuramienny kolejowy typ BS 134

Odbieraki dwuramienne do zastosowań kolejowych mają bardziej masywną budowę mechaniczną w porównaniu z wersją tramwajową. Na rys. 5.19. pokazano, jako typową konstrukcję tego typu, odbierak BS 134 firmy *Stemmann*. Podobnie jak wszystkie odbieraki kolejowe przy braku zasilania układu napędowego przyjmuje on położenie opuszczone, a uniesienie jest możliwe po napełnieniu cylindra sterującego sprężonym powietrzem. Siłę docisku zapewnia układ czterech sprężyn unoszących zabudowanych osłoną zabezpieczającą przed wpływem czynników zewnętrznych, takich jak opady śniegu czy oblodzenie. Odbierak ten przewidziano do eksploatacji w pojazdach poruszających się z prędkościami do 260 km/h. Mimo tego na kolejach zachodniej Europy nie był on eksploatowany, gdyż bezpośrednio po etapie korzystania z odbieraków czteroramiennych zaczęto stosować konstrukcje jednoramienne. Ale, wzorując się na jego budowie, opracowano w Związku Radzieckim odbieraki typu *II-7* i *T.1-13V*, które są powszechnie wykorzystywane w tamtejszych lokomotywach i zespołach trakcyjnych zasilanych napięciem 25 kV 50 Hz, poruszających się z prędkościami do 200 km/h. W odbieraki te wyposażone są również lokomotywy serii *Sr1* kolei fińskich *V/R*, budowane w ZSRR, a później w Rosji, w latach 1973 ÷ 1996 (patrz fot. 5.20).



Fot. 5.20. Odbierak dwuramienny typu *T.1-13V* (fot. A. Pocencow)

Odbieraki jednoramienne niesymetryczne

Celem doskonalenia budowy odbieraków nożycowych jest zmniejszenie masy zastępczej konstrukcji. Można to osiągnąć na dwa sposoby. Pierwszym z nich jest ograniczenie dopuszczalnego zakresu zmian wysokości roboczej. Gdy zakres tych zmian jest nieduży, wówczas odbierak może być mniejszy, jego ramiona krótsze, a co za tym idzie całość pantografu będzie lżejsza. Stosowalność tego rozwiązania jest jednak mocno ograniczona, gdyż dopuszczalne zakresy zmian wysokości roboczej przewodu jezdnego względem główki szyny są określane przez poszczególnych zarządców infrastruktury, a producenci taboru muszą się do tych wymagań dostosować. Dlatego sposób ten można zastosować tylko w sytuacji, gdy zakładamy, że pojazd będzie poruszał się po wydzielonym obszarze sieci kolejowej, gdzie infrastruktura będzie spełniała specjalne wymagania odnośnie zmian wysokości zawieszenia sieci trakcyjnej. Drugim rozwiązaniem jest redukcja masy konstrukcji pantografu przez zmniejszenie liczby ramion. Odbierak będzie wówczas lżejszy, a jego masa zastępcza ulegnie obniżeniu. Można oczywiście oba sposoby stosować jednocześnie i takie rozwiązanie jest niekiedy stosowane w pojazdach poruszających się wyłącznie po liniach kolei dużych prędkości, na których, zgodnie z obowiązującymi przepisami, wysokość zawieszenia przewodu jezdnej sieci trakcyjnej jest stała.

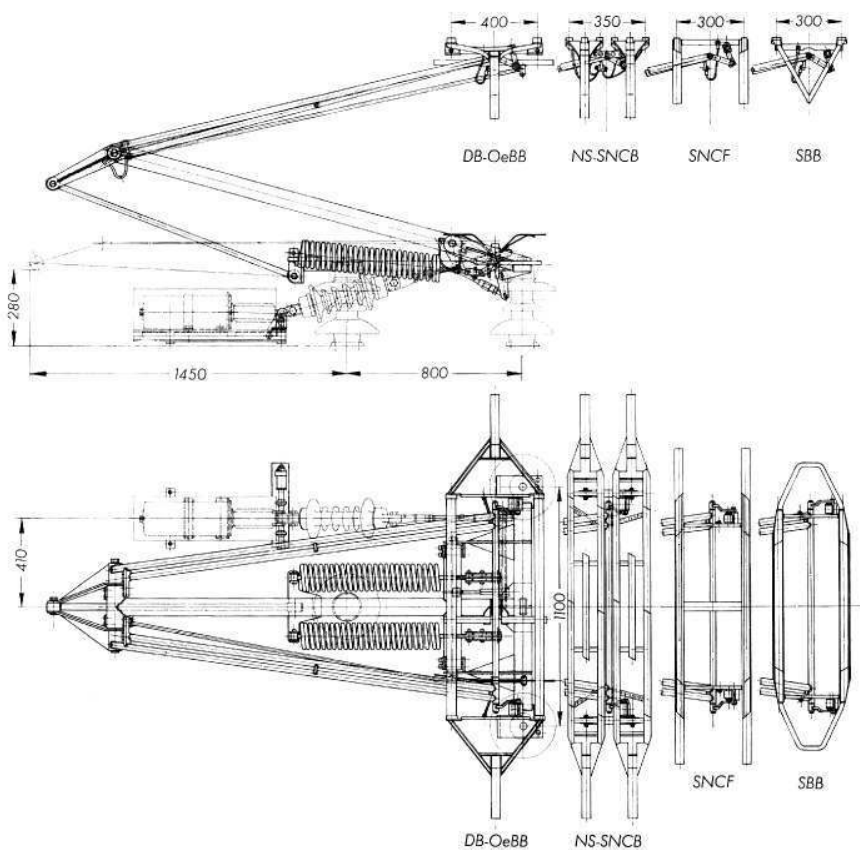
Efektym dążenia do zmniejszenia masy zastępczej odbieraka jest opracowanie konstrukcji jednoramiennych niesymetrycznych. Ponadto mniejsza liczba ramion to i redukcja ilości przegubów, a więc i ograniczenie występujących sił tarcia. Obecnie tego typu odbieraki są stosowane powszechnie, w praktycznie wszystkich nowobudowanych elektrycznych pojazdach szynowych

zarówno kolejowych, jak i tramwajowych. Również w ramach przeprowadzanych modernizacji starszego taboru często wymienia się dotychczas eksploatowane odbieraki czteroramienne na nowsze konstrukcje jednoramienne.

Układ napędowy odbieraków jednoramiennych do zastosowań kolejowych może być zrealizowany na dwa sposoby. W starszych konstrukcjach jest on podobny to tego, jaki był stosowany w odbierakach czteroramiennych. Siłę unoszącą zapewniają sprężyny, których działanie jest uzależnione od zasilenia sprężonym powietrzem cylindra napędowego. W odbierakach najnowszej budowy zrezygnowano ze sprężyn mechanicznych, zastępując je tzw. sprężyną pneumatyczną fałdową. Jest to specjalny siłownik, w którym utrzymywana jest stała zadana wartość ciśnienia niezależnie od objętości tego siłownika. Objętość ta zmienia się wraz z ruchem ramienia odbieraka. Przy górnych uniesieniach jest ona większa, przy dolnych mniejsza. Opuszczanie takiego odbieraka odbywa się pod wpływem siły grawitacji działającej na układ ramion i ślizgacz, a następuje po zmniejszeniu ciśnienia w sprężynie pneumatycznej. Odbieraki tramwajowe ze względu na brak w pojazdach instalacji pneumatycznej korzystają wyłącznie ze sprężynowych układów unoszących. Poniżej omówiono kilka wybranych konstrukcji odbieraków jednoramiennych.

Odbieraki jednoramienne kolejowe z unoszeniem sprężynowym

Na rys. 5.20 pokazano typową konstrukcję odbieraka kolejowego jednoramiennego ze sprężynowym układem unoszenia.

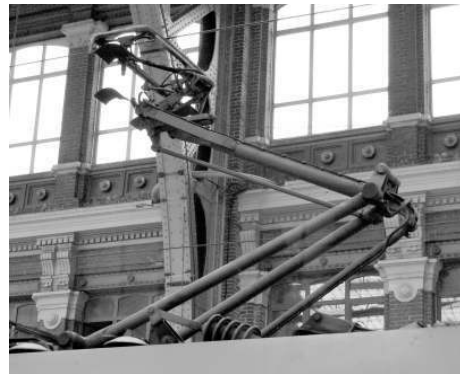


Rys. 5.20. Odbierak kolejowy jednoramienny z unoszeniem sprężynowym [64]

Odbierak ten ma standardową konstrukcję mechaniczną wykorzystywaną w większości odbieraków jednoramiennych. Dolne ramię zamocowane jest obrotowo jednym końcem do podstawy odbieraka. Na drugim końcu, zamocowane również obrotowo, znajduje się podwójne ramię górne zakończone ślizgaczem. Aby ruch górnego ramienia był skorelowany z dolnym zastosowano dodatkowe ciągnie mechaniczne łączące górne ramię z podstawą. Siłę docisku zapewniają dwie sprężyny unoszące, a sterowanie napędem odbywa się analogicznie jak w odbierakach czteroramiennych, czyli napelnienie cylindra sprężonym powietrzem wywołuje ruch tłoka, który neutralizuje działanie sprężyny opuszczającej, umożliwiając tym samym uniesienie pantografu. W zależności od systemu zasilania i wymagań zarządu kolejowego, do pantografu montuje się konkretny ślizgacz. Na rysunku pokazano od lewej: ślizgacz stosowany na kolejach niemieckich *DB* i austriackich *ÖBB* do systemu 15 kV 16 i 2/3 Hz; ślizgacz dla kolei holenderskich *NS* i belgijskich *SNCB* do systemu 1500 lub 3000 V DC; ślizgacz dla kolei francuskich *SNCF* do systemu 25 kV 50 Hz oraz ślizgacz dla kolei szwajcarskich *SBB* do systemu 15 kV 16 i 2/3 Hz. Odbierak ma więc konstrukcję uniwersalną i może być wyposażony w dowolny typ ślizgacza w zależności od potrzeb. Ten typ konstrukcji odbieraka występuje powszechnie w pojazdach produkowanych w latach 70. i 80. ubiegłego wieku, które w znacznej mierze wciąż znajdują się w eksploatacji. Szczególnie chętnie montowano go na lokomotywach wielosystemowych, gdzie stosuje się do czterech odbieraków, każdy wyposażony w inny ślizgacz.

Odbieraki jednoramienne kolejowe o konstrukcji odwróconej

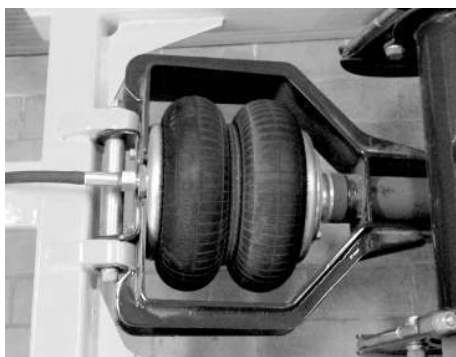
W celu dalszego ograniczenia masy zastępczej odbieraka, stosuje się niekiedy tzw. konstrukcje odwrócone. W odbieraku pokazanym na rys. 5.20 ramię dolne jest pojedyncze, a górne podwójne. Odwrócenie tej sytuacji (dolne ramię podwójne, a górne pojedyncze) sprawi, że nastąpi przeniesienie masy pantografu w dół, co zredukuje masę zastępczą odbieraka. Odbieraki kolejowe o konstrukcji odwróconej wykorzystywane są w zespołach trakcyjnych *TGV*. Niekiedy w celu dalszej redukcji masy zastępczej stosuje się dodatkowo pantografowe mocowanie ślizgacza. Takie mocowanie zapewnia większy możliwy zakres względnych przemieszczeń pomiędzy nim a pantografem głównym (w porównaniu do tradycyjnych zawiesznień teleskopowych lub wahaczowych), co zapewnia lepsze wpasowywanie się ślizgacza w kształt sieci trakcyjnej. Ma to szczególne znaczenie przy dużych prędkościach jazdy, gdy na skutek nierównomiernej elastyczności sieci następuje silniejsze wypieranie przewodu jezdnego w środku przęsła w porównaniu z punktami podwieszenia. Odbierak taki pokazano na fot. 5.21.



Fot. 5.21. Odbierak jednoramienny o konstrukcji odwróconej z pantografowym mocowaniem ślizgacza (fot. autora)

Odbieraki jednoramienne kolejowe z unoszeniem pneumatycznym

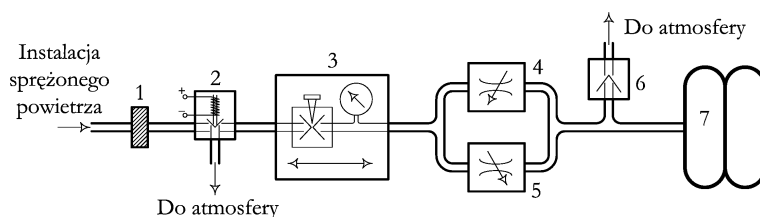
Zastąpienie mechanicznych sprężyn unoszących tzw. sprężyną pneumatyczną fałdową pozwoliło na znaczne uproszczenie konstrukcji napędu odbieraka. Skomplikowany układ sprężyn unoszących i opuszczających działających przeciwobnie zastąpiono jednym elementem, który



Fot. 5.22. Sprężyna pneumatyczna faldowa
(fot. autora)

jest odpowiedzialny zarówno za sam proces unoszenia i opuszczania, jak i za zapewnienie wymaganej siły docisku ślizgacza do sieci trakcyjnej. Sprężyna pneumatyczna faldowa, nazywana również siłownikiem mieszkowym, to cylinder o zmiennej objętości. Widok sprężyny pokazano na fot. 5.22. Aby spełniała ona swoje zadanie, czyli utrzymywała stałą siłę docisku ślizgacza niezależnie od wysokości uniesienia, musi być zasilana sprężonym powietrzem przez specjalny układ regulacji pokazany na rys. 5.21. Sprężone powietrze podawane jest z instalacji pneumatycznej

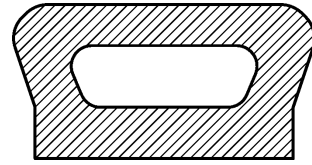
pojazdu poprzez filtr (1). Zadaniem filtru jest oczyszczenie powietrza z zanieczyszczeń stałych oraz kropli wody lub smarów które mogłyby negatywnie wpływać na pracę pozostałych elementów układu. Załączenie elektrozaworu (2) powoduje podanie powietrza na reduktor ciśnienia (3). Reduktor ten obniża ciśnienie wejściowe do wartości potrzebnej, aby zapewnić właściwą siłę docisku ślizgacza. Ciśnienie wyjściowe reduktora przyjmuje wartość stałą, którą można regulować w pewnych granicach. Zawory dławiące (4 i 5) ograniczają tempo zwiększania i obniżania ciśnienia w sprężynie (7). Daje to efekt łagodnego unoszenia i opuszczania odbieraka, zapobiegając tym samym uderzeniom ślizgacza w sieć trakcyjną czy gwałtownemu opadnięciu konstrukcji pantografu na podstawę, co w skrajnym przypadku mogłoby doprowadzić do jej uszkodzenia. Zadaniem zaworu bezpieczeństwa (6) jest niedopuszczenie do nadmiernego wzrostu ciśnienia w sprężynie i tym samym ponadnormatywnego zwiększenia siły docisku. Taka sytuacja może wystąpić np. przy gwałtownym obniżeniu wysokości zawieszenia sieci trakcyjnej, co wywołuje szybki ruch ślizgacza w dół i zmniejsza tym samym objętość sprężyny. Elektrozawór załączający (2) jest dwukierunkowy, tzn. jego załączenie powoduje połączenie układu z obwodem pneumatycznym pojazdu, a wyłączenie wypuszcza powietrze z instalacji odbieraka do atmosfery.



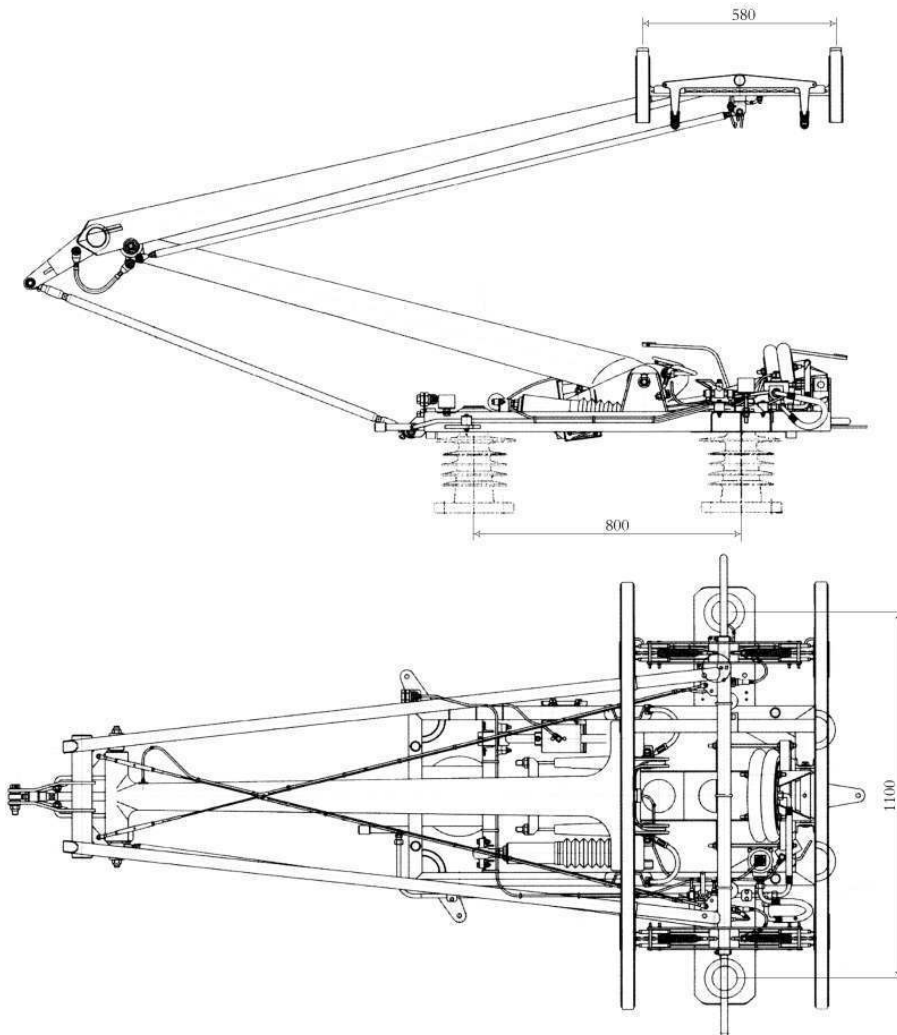
Rys. 5.21. Układ regulacji sprężyny pneumatycznej – opis w tekście

Jako przykład konstrukcji odbieraka z unoszeniem pneumatycznym można podać konstrukcję firmy *Stemmann* typ *DS.A380F*. Jest to nowoczesny odbierak przeznaczony dla pojazdów dużych prędkości zasilanych napięciem przemiennym 15 kV 16 i 2/3 Hz lub 25 kV 50 Hz. Konstrukcję odbieraka pokazano na rys. 5.23, a jego widok na fot. 5.23. Odbierak wyposażono w podwójny ślizgacz z nakładkami grafitowymi o dopuszczalnym prądzie znamionowym wynoszącym 1000 A. Prędkość jazdy może wynosić nawet 350 km/h. Siła docisku statycznego może być regulowana w zakresie od 70 do 120 N. Opcjonalnie odbierak może być wyposażony w specjalny ślizgacz, który w razie uszkodzenia mechanicznego nakładki sprawia, że odbierak au-

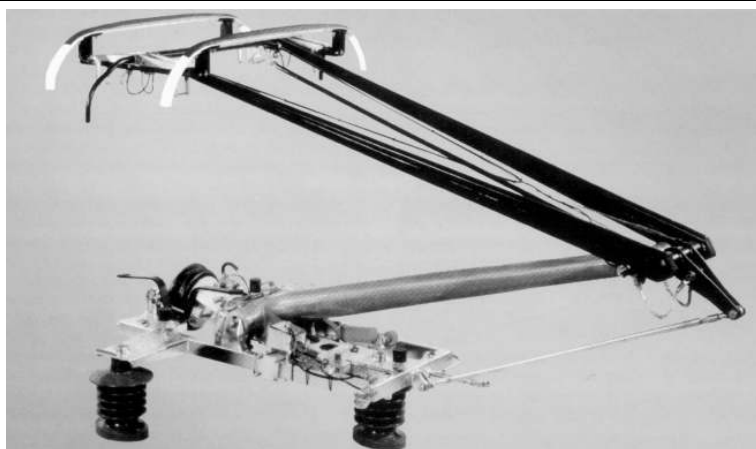
tomatycznie zostaje opuszczony. W takim wykonaniu nakładka ta tworzy komorę zamkniętą w środku, połączoną z układem pneumatycznym odbieraka (patrz przekrój nakładki pokazany na rys. 5.22). Uszkodzenie mechaniczne nakładki, na tyle duże, że rozszczelni przestrzeń zamkniętą, spowoduje połączenie obwodu sprężonego powietrza z atmosferą, co wywoła natychmiastowe opuszczenie odbieraka. Dzięki temu uszkodzona nakładka nie będzie stanowiła zagrożenia i nie spowoduje zniszczenia sieci trakcyjnej (jedną z najczęściej występujących przyczyn uszkodzenia sieci trakcyjnej jest zerwanie przewodu jezdnego przez uszkodzoną nakładkę ślizgową). Wadą takiego rozwiązania jest konieczność doprowadzenia obwodu pneumatycznego do nakładki, co komplikuje konstrukcję mechaniczną odbieraka, zwłaszcza jeśli chodzi o zawieszenie elastyczne ślizgacza. Odbieraki *DSA380F* są zamontowane na najnowszej generacji pojazdach dużej prędkości serii *ICE3* eksploatowanych przez koleje niemieckie.



Rys. 5.22. Przekrój nakładki dla ślizgacza z mechanizmem samoopuszczającym

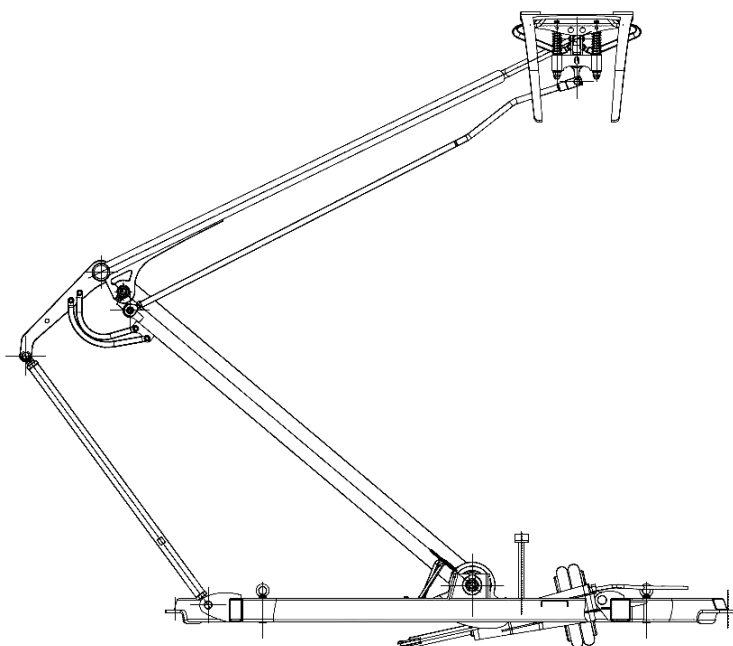


Rys. 5.23. Odbierak jednoramienny *DSA380F* (źródło: materiały firmy *Stemmann*)



Fot. 5.23. Odbierak jednoramienny *DS A380F* (fot. *Stemmann*)

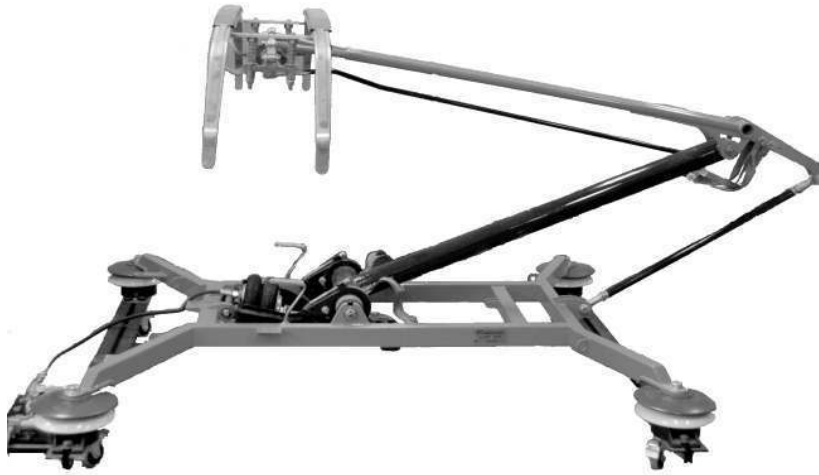
W 2009 roku przemysł krajowy również wyprodukował nowoczesny odbierak połówkowy z unoszeniem pneumatycznym. Jest to model *160EC* firmy *EC Engineering*. Jest to lekka konstrukcja składająca się z pojedynczego ramienia dolnego i podwójnego górnego. Dwa pręty ramienia górnego umieszczone są jednak bardzo blisko siebie, tak że opory powietrza konstrukcji są takie jak dla obu ramion pojedynczych. Odbierak wyposażony jest w ślizgacz z dwiema nakładkami grafitowymi. Konstrukcję urządzenia pokazano na rys. 5.24, a widok na fot. 5.24.



Rys. 5.24. Odbierak jednoramienny typu *160EC* (źródło: materiały firmy *EC Engineering*)

Parametry odbieraka są dostosowane do wymagań krajowych. Może być on zamontowany na pojazdach poruszających się z prędkością do 160 km/h, a prąd znamionowy ciągły wynosi 1200 A. Przy obowiązującym w Polsce systemie zasilania 3000 V DC, jest to wartość wystarcza-

jąca dla pojazdów małej i średniej mocy. System mocowania mechanicznego do pojazdu opracowano tak, że może być on zamontowany na praktycznie wszystkich typach lokomotyw i zespołów trakcyjnych eksploatowanych w kraju. Ponieważ próbna eksploatacja zakończyła się sukcesem rozpoczęto seryjną produkcję urządzenia.



Fot. 5.24. Odbierak jednoramienny typu 160EC (fot. autora)

Odbieraki jednoramienne kolejowe o ograniczonym ruchu pionowym pantografu

Podwieszenie przewodu jezdnej sieci trakcyjnej na stałej wysokości, lub ograniczenie dopuszczalnych zmian tej wysokości, umożliwiają znaczną redukcję wymiarów geometrycznych, a co za tym idzie masy odbieraka prądu. Lżejszy odbierak automatycznie zapewnia mniejszą masę zastępczą oddziałującą na sieć trakcyjną. Takie rozwiązanie zostało zastosowane w Japonii, gdzie w pojazdach dużych prędkości stosuje się nieduże wymiarowo, bardzo lekkie konstrukcje odbieraków jednoramiennych np. typu PS207 (patrz. fot. 5.25). Klasyczny sprężynowy układ docisku zamknięty jest w specjalnie zaprojektowanej obudowie aerodynamicznej, a całość umieszczona została na izolatorze nietypowego kształtu. Oba te elementy (obudowa i izolator) zostały zaprojektowane pod kątem ograniczenia oporów powietrza oraz zmniejszenia hałasu generowanego przez odbierak. Również w tym celu zamontowano osłony na przeguby odbieraka i odpowiednio wyprofilowano ślizgacz. Niezwykle niska masa zastępcza w połączeniu z doskonałym utrzymaniem sieci, a także bardzo małą nierów-



Fot. 5.25. Odbierak jednoramienny PS207 o ograniczonym zakresie ruchu pionowego (fot. O. Chikuwa)

nomiernością jej elastyczności pozwoliły na całkowitą rezygnację z usprężynowania zawieszenia ślizgacza. Zadanie zapewnienia właściwej elastyczności konstrukcji przejmują główne sprężyny dociskające.

Dalsze uproszczenie konstrukcji nożycowej zostało zrealizowane przez firmę *Kosin Seikosho*, producenta odbieraków stosowanych w zespołach trakcyjnych *Shinkansen* serii 700 (patrz fot. 5.26). Ramię dolne odbieraka zostało wymiarowo ograniczone do minimum i umieszczone



Fot. 5.26. Odbierak kolejowy firmy *Kosin Seikosho* (fot. „Tennen-Gas”)

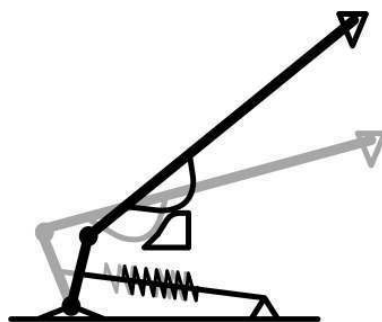
w zamkniętej obudowie napędu. Sprężyna unosząca zapewnia docisk ślizgacza do przewodu jezdnego. Ruch pionowy wymuszony jest dzięki krzywce mechanicznej umieszczonej na ramieniu górnym. Ograniczenie wielkości dolnego ramienia zredukowało jeszcze bardziej masę zastępczą, co przełożyło się na dalsze zmniejszenie oddziaływania dynamicznego na sieć jezdnią. Uproszczony schemat pokazujący zasadę działania odbieraka przedstawiono na rys. 5.25. Zapewnienie stałej wartości siły docisku ślizgacza do przewodu jezdnego jest uzyskane dzięki odpowiedniemu zamocowaniu sprężyny, której moment siły zmienia się wraz z ruchem odbieraka. Przy mniej naprężonej sprężynie (odbierak uniesiony wyżej) ramię działania siły jest większe niż przy niższym położeniu odbieraka. Warto jeszcze dodać, że w konstrukcjach japońskich niezwykle mała masa ślizgaczy jest możliwa również dzięki bardzo ograniczonemu zakresowi odsuwu bocznego sieci trakcyjnej stosowanego przez tamtejszy zarząd kolei.

Zastosowanie tak lekkich konstrukcji jest możliwe wyłącznie przy zasilaniu pojazdów napięciem przemianym o wysokiej wartości 15 lub 25 kV. Dla systemów napięcia stałego 1500 i 3000 V większe wymagane wartości prądów roboczych determinują stosowanie masywniejszych ślizgaczy, a co za tym idzie cięższych konstrukcji pantografów. Nowoczesne odbieraki jednoramienne zawsze jednak będą oferowały lepszą współpracę z siecią trakcyjną od tradycyjnych konstrukcji czteroramiennych.

Odbieraki jednoramienne do zastosowań tramwajowych

Jednoramienne odbieraki tramwajowe nie różnią się znacząco od konstrukcji kolejowych. Jedyne różnice występują w mechanizmie napędowym. Jak wszystkie odbieraki tramwajowe mają one budowę normalnie uniesioną. Siłę docisku zapewnia układ sprężyn, a unoszenie i opuszczanie realizowane jest przy pomocy ściązacza elektrycznego zasilanego z akumulatora. Gdyby akumulator uległ uszkodzeniu lub był rozładowany odbierak można unieść lub opuścić za pomocą korby i przekładni mechanicznej. Typowym przedstawicielem takiej konstrukcji jest odbierak *Fb700* firmy *Stemmann* (patrz rys. 5.26). Jest to lekka mechanicznie, klasyczna konstrukcja jednoramienna z pojedynczym ramieniem dolnym i podwójnym górnym. Ślizgacz wyposażony

w zamkniętej obudowie napędu. Sprężyna unosząca zapewnia docisk ślizgacza do przewodu jezdnego. Ruch pionowy wymuszony jest dzięki krzywce mechanicznej umieszczonej na ramieniu górnym. Ograniczenie wielkości dolnego ramienia zredukowało jeszcze bardziej masę zastępczą, co przełożyło się na dalsze zmniejszenie oddziaływania dynamicznego na sieć jezdnią. Uproszczony schemat pokazujący zasadę działania odbieraka przedstawiono na rys. 5.25. Zapewnienie stałej wartości siły docisku ślizgacza do przewodu jezdnego jest uzyskane dzięki odpowiedniemu zamocowaniu sprężyny, której moment siły zmienia się wraz z ruchem odbieraka. Przy mniej naprężonej sprężynie (odbierak uniesiony wyżej) ramię działania siły jest większe niż przy niższym położeniu odbieraka. Warto jeszcze dodać, że w konstrukcjach japońskich niezwykle mała masa ślizgaczy jest możliwa również dzięki bardzo ograniczonemu zakresowi odsuwu bocznego sieci trakcyjnej stosowanego przez tamtejszy zarząd kolei.



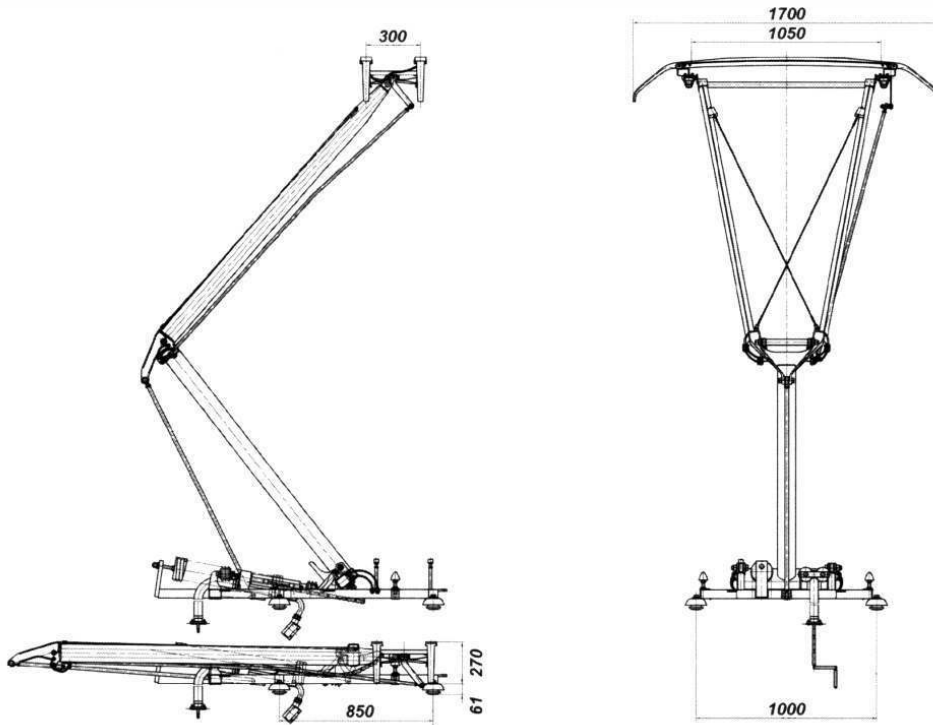
Rys. 5.25. Zasada działania odbieraka firmy *Kosin Seikosho*

jest w nakładki grafitowe lub wykonane z kompozytów grafitowo metalowych. W zależności od typu nakładki maksymalny prąd ciągły wynosi 1000 A (dla czystego grafitu) lub 1500 A (dla grafitu domieszkowanego). Takie wartości są wystarczające dla nowoczesnych pojazdów tramwajowych których moce nie rzadko przekraczają 500 kW, sięgając niekiedy dla wozów wieloprzegubowych nawet 800 kW (np. *Combino NF12B*). Siłę docisku można regulować w zakresie od 60 do 120 N w zależności od wymagań użytkownika. Prędkość maksymalna, z jaką może poruszać się pojazd wyposażony w ten odbierak, wynosi 120 km/h. Może być więc eksploatowany nie tylko w tradycyjnych pojazdach tramwajowych, ale również w wozach poruszających się po liniach tzw. tramwaju szybkiego.

Odbieraki *FB700* są również wykorzystywane przez krajowych producentów taboru. Montuje się je m.in. w tramwajach typu *120Na* produkcji bydgoskiej firmy *Pesa*. Widok odbieraka pokazano na fot. 5.27.



Fot. 5.27. Odbierak jednoramienny typu *Fb700* (fot. autora)



Rys. 5.26. Odbierak tramwajowy jednoramienny typu *Fb700* (źródło: *Stemmann*)

5.1.1.11. Odbieraki teleskopowe

Zastąpienie układu sprężyn unoszących urządzeniami pneumatycznymi umożliwiło całkowicie odmienne podejście do budowy odbieraka prądu. Uznano, że w sytuacji, gdy siłę docisku reguluje się nie przez zmianę naciągu sprężyny, a podnosząc lub obniżając ciśnienie w obwodzie



Fot. 5.28. Odbierak teleskopowy WPS204
(fot. „Tennen-Gas”)

pneumatycznym, stosowanie konstrukcji nożycowych jest zbędne. W ten sposób powstały odbieraki teleskopowe. Mają one kształt pionowej kolumny, której długość można zmieniać przez rozsuwanie. Przykładem tego typu odbieraka jest model WPS204 produkcji japońskiej stosowany w pociągach dużej prędkości *Shinkansen* serii 500. Odbierak ten pokazano na fot. 5.28. Zwraca uwagę opływowy kształt tak, by konstrukcja stawiała jak najmniejszy opór. Ponadto znikoma masa zastępcza sprawiła, że zrezygnowano z elastycznego zawieszenia ślizgacza. Odbieraki tego typu mogą być stosowane jedynie wówczas, gdy sieć

trakcyjna jest zawieszona na stałej wysokości, lub zmiany tej wysokości są minimalne.

5.1.2. Odbieraki prądu przystosowane do współpracy z boczną siecią trakcyjną

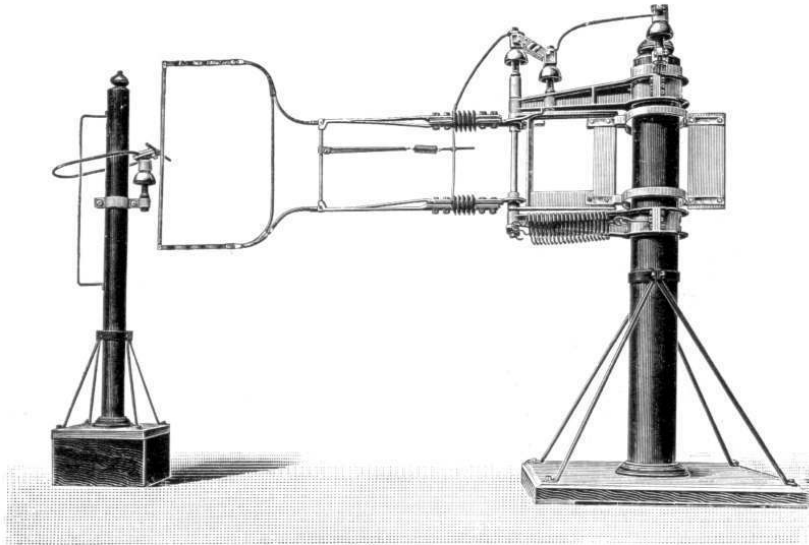
Boczna sieć trakcyjna w transporcie kolejowym jest stosowana stosunkowo rzadko. Na kolejach użytku publicznego obecnie już nie występuje. W przeszłości użytkowana była na linii Zossen – Marienfelde pod Berlinem oraz na liniach podmiejskich w okolicy Sztokholmu. Obecnie korzystają z niej natomiast koleje przemysłowe. W ten sposób zelektryfikowane są tory ładunkowe materiałów sypkich, na których górna sieć trakcyjna stanowiłaby przeszkodę do przeprowadzenia załadunku.

Konstrukcyjnie odbieraki prądu dostosowane do współpracy z boczną siecią trakcyjną są bardzo zbliżone do klasycznych służących do odbioru energii z sieci górnej. Charakteryzują się jednak mniejszymi rozmiarami. Ponieważ prędkość jazdy na torach przemysłowych wyposażonych w sieć boczną z reguły nie przekracza wartości kilku km/h problemy związane ze współpracą odbieraka z siecią, zjawiskami dynamicznymi, wypieraniem przewodu itp. nie mają żadnego znaczenia. Dlatego konstrukcja mechaniczna odbieraków często bywa znacznie uproszczona. Lokomotywy przemysłowe korzystają z sieci bocznej jedynie na długości torów ładunkowych. Na pozostałych odcinkach stosuje się na ogół sieć górną, dlatego pojazdy te muszą być wyposażone również w „zwykłe” odbieraki prądu.

5.1.2.1. Boczne odbieraki pałkowe

Boczne odbieraki typu pałkowego obecnie należą już do rozwiązań historycznych. W przeszłości były wykorzystywane przez pojazdy poruszające się po, wspomnianej już linii Zossen –

Marienfelde (patrz rys. 5.27), a także występowały w lokomotywach kolei przemysłowych (fot. 5.29).



Rys. 5.27. Odbierak boczny typu pałkowego eksploatowany w pojazdach na linii Zossen – Marienfelde [31]

Pierwszy przedstawiony tutaj typ odbieraka dociskał przewód trakcyjny z boku, a szerokość ślizgacza nie mogła być mniejsza niż zwis przewodu między punktami podwieszenia i środkiem przęsła. Tak jak wszystkie odbieraki pałkowe musiał być on ciągnięty za pojazdem, a zmiana kierunku jazdy wymagała przelożenia pałaka.

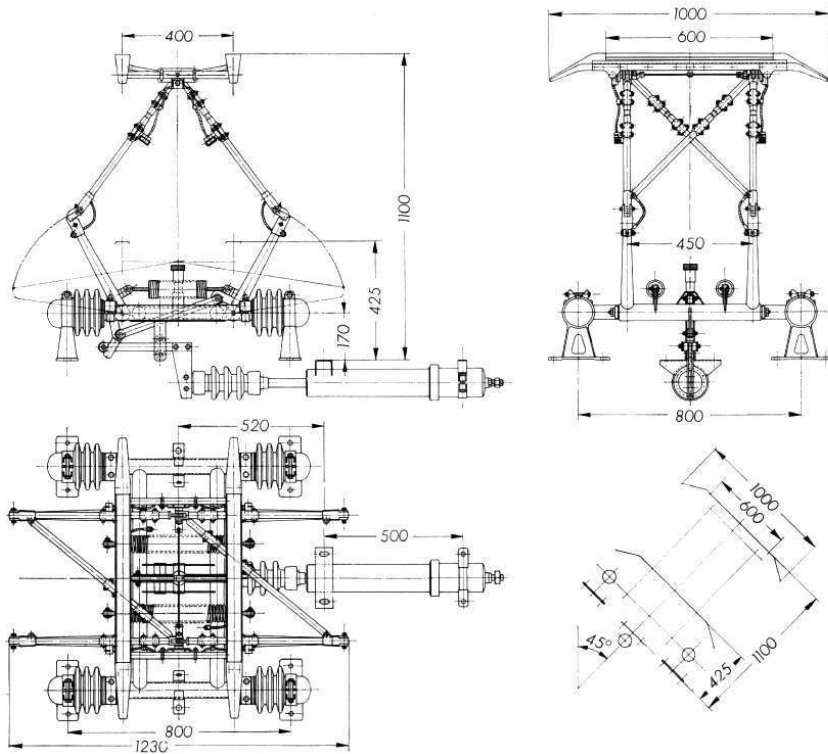
Odbieraki pałkowe stosowane w lokomotywach przemysłowych były nieduże rozmiarowo i miały bardzo uproszczoną konstrukcję mechaniczną. Odbierak, który pokazano na fot. 5.29 jest zamocowany na ruchomym wysięgniku, wysuwanym z pojazdu na czas jazdy na torze z siecią boczną. Na pozostałych torach lokomotywa korzysta z typowego dachowego odbieraka czteroramiennego.



Fot. 5.29. Lokomotywa przemysłowa z bocznym odbierakiem pałkowym [24]

5.1.2.2. Boczne odbieraki typu nożycowego – pantografy

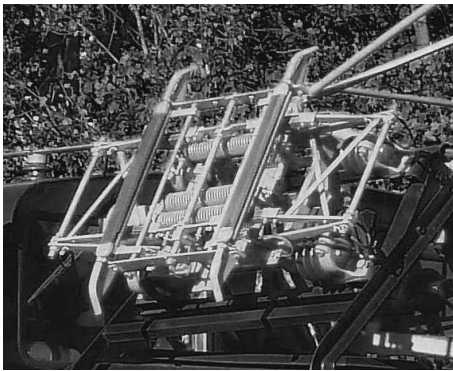
Obecnie eksploatowane lokomotywy przemysłowe dostosowane do pobierania energii z sieci bocznej są wyposażone w odbieraki nożycowe. Przykładową konstrukcję takiego odbieraka pokazano na rys. 5.28.



Rys. 5.28. Odbierak boczny typu nożycowego [64]

Odbieraki te są zbudowane identycznie jak klasyczne konstrukcje czteroramienne. Charakteryzują się jedynie znacznie mniejszymi rozmiarami oraz są przystosowane do pracy pod kątem

45 stopni. Uniesienie i docisk do przewodu jezdniczego zapewniają dwie sprężyny. Za opuszczanie odpowiada trzecia, której działanie jest neutralizowane pracą cylindra napędowego. Zasada działania jest więc identyczna jak w przypadku odbieraków pełnowymiarowych. Zakres zmian uniesienia roboczego jest nieduży, co wynika bezpośrednio z małych wymiarów konstrukcji, nie stanowi to jednak problemu eksploatacyjnego, gdyż sieć trakcyjna na torach ładunkowych nie zmienia swego położenia względem osi toru.



Fot. 5.30. Odbierak nożycowy boczny zamontowany na lokomotywie przemysłowej (fot. „Wassen”)

Górnicych KWB Konin oraz linie kopalni Adamów. Widok odbieraka bocznego zamocowanego na lokomotywie pokazano na fot. 5.30.

Odbieraki tego typu można również spotkać w kraju. Wyposażone są w nie lokomotywy typu EL2 obsługujące m.in. linie wewnętrzne Kolei

5.1.3. Odbieraki prądu przystosowane do współpracy z dolną siecią trakcyjną

Dolna sieć trakcyjna wykonywana jest zazwyczaj w postaci trzeciej szyny zamocowanej na izolatorach i biegnącej wzdłuż toków jezdnych po prawej lub lewej stronie toru (patrząc w kierunku jazdy). Niezwykle rzadko trzecia szyna umieszczana jest pomiędzy tokami jezdnyymi (np. *Volk's Electric Railway* w Brighton). Oczywiście jest, że szyna prądowa nie może być ciągła na całej długości. Wymagane są przerwy na rozjazdach, przejściach dla pieszych czy przejazdach kolejowych. Pojazdy muszą być więc wyposażone w kilka odbieraków (minimum cztery), rozmieszczonych tak, by zawsze choć jeden stykał się z szyną prądową. Bliskość ziemi i toków jezdnych ograniczają napięcie zasilania do wartości około 1200 V. Najczęściej stosowane jest napięcie 750 V DC. Również uzyskiwanie prędkości wyższych niż 160 km/h jest przy zasilaniu tym systemem praktycznie niemożliwe, ze względu na nienajlepszą współpracę odbieraków prądu z szyną zasilającą przy dużych prędkościach jazdy. Nie można również pominąć kwestii trudności z zapewnieniem bezpieczeństwa dla ludzi czy zwierząt przekraczających linie zelektryfikowane tym systemem.

Z tych względów zasilanie trzecią szyną jest ograniczone głównie do pojazdów poruszających się po liniach metra. Przy stosunkowo niskich prędkościach i całkowitym wydzieleniu trasy, wady systemu są mało uciążliwe, a dzięki trzeciej szynie przekrój tuneli może być mniejszy niż gdyby zastosować sieć górną, co obniża koszt budowy. Z tego systemu zasilania korzystają również niektóre koleje miejskie naziemne (np. w Berlinie). Na kolejach głównych zasilanie trzecią szyną stosowane jest bardzo rzadko i jest ograniczone do pewnych stref klimatycznych. W trudnych warunkach zimowych, przy opadach śniegu itp. korzystanie z tego systemu jest bardzo utrudnione. W Europie jedynie część linii kolejowych na południu Anglii oraz w okolicach Liverpoolu jest zelektryfikowanych systemem trzeciej szyny. Bardzo rzadko trzecią szynę wykorzystuje się do zasilania pojazdów tramwajowych. System taki wykorzystano w Bordeaux, gdzie trzecia szyna jest zamocowana na poziomie ziemi pomiędzy tokami jezdnyymi. Ze względu na swobodny dostęp przechodniów do torowiska zasilany jest jedynie odcinek znajdujący się bezpośrednio pod pojazdem.

Do odbioru energii w systemach trzeciej szyny wykorzystuje się tzw. odbieraki łyżkowe. W zależności od budowy szyny prądowej wyróżniamy następujące typy tych odbieraków:

- odbieraki dostosowane do górnego odbioru prądu,
- odbieraki dostosowane do dolnego odbioru prądu,
- odbieraki uniwersalne (dostosowane do górnego i dolnego odbioru prądu),
- odbieraki dostosowane do bocznego odbioru prądu.

Pierwsze trzy odmiany wykorzystywane są wyłącznie w pojazdach poruszających się na kołach stalowych po klasycznym torowisku. Ostatni zaś typ występuje zarówno w pojazdach klasycznych, jak i w niekonwencjonalnych, wyposażonych w koła ogumione, wykorzystujących specjalne bieżnie betonowe.

5.1.3.1. Odbieraki łyżwowe dostosowane do górnego odbioru prądu

Odbieraki dostosowane do górnego odbioru prądu należą do najprostszych konstrukcyjnie, a co za tym idzie najbardziej niezawodnych. Dlatego są stosowane dość chętnie, ale wyłącznie w pojazdach obsługujących systemy zamknięte (z nielicznymi wyjątkami), gdzie osoby postronne nie mogą przebywać na torowisku, gdyż w otwartym terenie nieosłonięta szyna prądowa stwarza zbyt duże zagrożenie dla bezpieczeństwa. Spora część linii metra korzysta z systemów górnego odbioru prądu.

W niektórych wykonaniach źródłem siły docisku jest ciężar samej łyżwy (patrz fot. 5.31a,b). Niekiedy jednak stosuje się dodatkowe sprężyny zwiększające siłę docisku (fot. 5.31c). Siła docisku łyżwy do szyny wynosi około 160 N. W warunkach zimowych, gdy szyna prądowa jest oblodzona, docisk ten musi wzrosnąć nawet do 600 N. W tym celu w odbierakach z dociskiem grawitacyjnym należy zwiększyć ciężar łyżwy, a w odbierakach sprężynowych wymienić sprężynę na silniejszą. Trwałość ślizgu wynosi około 20 000 km przebiegu (w warunkach letnich). Wzrost siły docisku w warunkach zimowych ogranicza ją do około 5000 km. Ponieważ rozmieszczenie trzeciej szyny względem szyn jezdnych jest niezmienne, przemieszczanie pionowe łyżwy odbieraka możliwe jest w minimalnym zakresie, tak by styk został zachowany przy uwzględnieniu ewentualnego kołysania pudła wagonu wywołanego nierównościami toru, czy też odchyleniami na łukach.

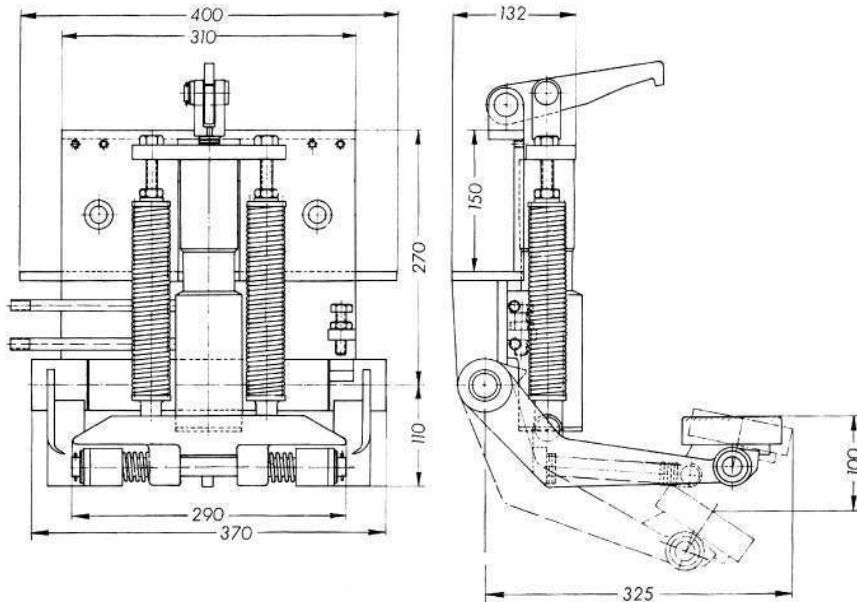


Fot. 5.31. Odbieraki łyżwowe dostosowane do górnego odbioru prądu, gdzie: a, b) odbieraki z dociskiem grawitacyjnym; c) odbierak z dociskiem sprężynowym (fot. a: D. Schwen; b, c: autora)

5.1.3.2. Odbieraki łyżwowe dostosowane do dolnego odbioru prądu

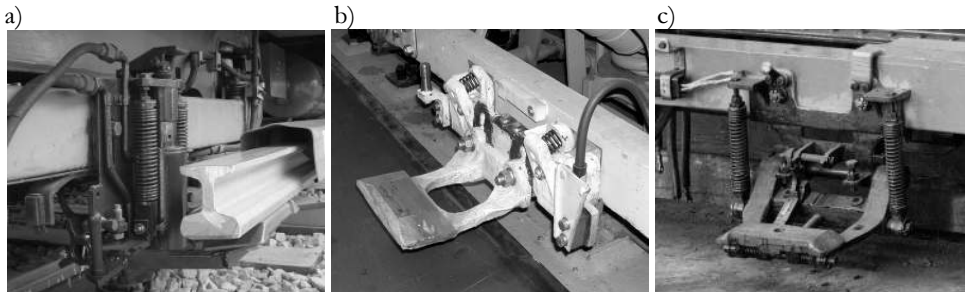
Zastosowanie dolnego odbioru prądu zwiększa poziom bezpieczeństwa, gdyż przypadkowy kontakt z szyną prądową jest utrudniony. Komplikuje to jednak konstrukcję odbieraka prądu, gdyż musi on zawierać układ zapewniający docisk łyżwy do szyny. Ponadto odbierak taki jest bardziej narażony na uszkodzenia mechaniczne mogące wystąpić zwłaszcza w momencie zetknięcia się z szyną prądową w sytuacji nieprawidłowo utrzymanego wślizgu.

Przykładową budowę mechaniczną odbieraka do dolnego odbioru prądu pokazano na rys. 5.29.



Rys. 5.29. Odbierak łyżkowy dostosowany do dolnego odbioru prądu do dociskiem sprężynowym i sterowaniem pneumatycznym [64]

Silę docisku zapewniają dwie sprężyny, a całość sterowana jest w sposób pneumatyczny. Aby odbierak przyjął pozycję roboczą należy doprowadzić sprężone powietrze do cylindra znajdującego się między sprężynami. Wówczas jego tłok wysunie się, a sprężyny ulegną naciągnięciu, unosząc łyżwę i zapewniając wymaganą siłę docisku do szyny prądowej. Istnieją też inne konstrukcje odbieraków, które nie są wyposażone w sterowanie pneumatyczne, a jedynie w sprężyny dociskające. Kilka przykładowych rozwiązań pokazano na fot. 5.32.



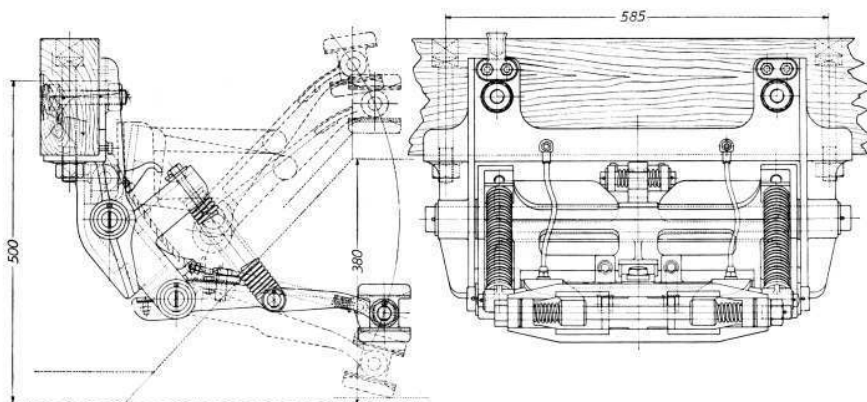
Fot. 5.32. Odbieraki łyżkowe dostosowane do dolnego odbioru prądu, gdzie: a) odbierak ze sterowaniem pneumatycznym; b, c) odbieraki tylko z układem sprężyn (fot. a: „Mattes”; b: „Šjů”; c: ze zbiorów autora)

5.1.3.3. Odbieraki łyżkowe uniwersalne

Odbieraki łyżkowe uniwersalne mogą służyć do pobierania energii z szyny prądowej, zarówno w systemie górnego, jak i dolnego odbioru prądu. Mimo uniwersalności takiego rozwiązania, są to konstrukcje bardzo mało popularne, gdyż praktycznie zawsze w danym systemie

transportowym korzystającym z zasilania za pomocą trzeciej szyny, stosuje się ujednoczony typ szyny prądowej.

Przykładową konstrukcję odbieraka uniwersalnego pokazano na rys. 5.30.



Rys. 5.30. Odbierak łyżwowy typu uniwersalnego [64]

Łyżwa tego odbieraka jest symetryczna i ma dwie powierzchnie ślizgowe, górną i dolną. Zamocowana jest ona na wysięgniku mającym dwa położenia robocze, w których jest blokowany mechanicznie. Sprężyny dociskające są zamocowane tak, że w położeniu dolnym, pracując na rozciąganie dociskają łyżwę do szyny. W położeniu górnym natomiast istnieje pewien luz umożliwiający swobodny ruch ślizgu, a siłę docisku zapewnia ciężar samej łyżwy. Przekładanie odbieraka pomiędzy położeniami dokonywane jest ręcznie podczas postoju pojazdu (przy braku napięcia zasilającego). Widok odbieraka łyżwowego uniwersalnego pokazano na fot. 5.33.



Fot. 5.33. Odbierak łyżwowy uniwersalny (fot. ze zbiorów autora)

5.1.3.4. Odbieraki łyżwowe dostosowane do boczego odbioru prądu

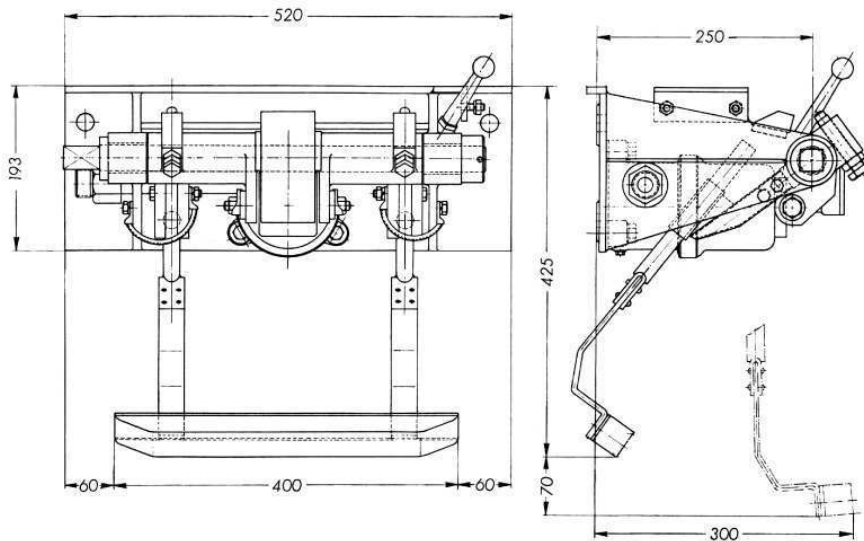
Boczny odbiór prądu z trzeciej szyny jest rozwiązaniem występującym najrzadziej. Dominują rozwiązania z odbiorem górnym bądź dolnym. Odbiór boczny stosowany jest głównie w pojazdach niekonwencjonalnych poruszających się po kołach ogumionych. Występuje również w klasycznych pojazdach szynowych, ale stosunkowo rzadko. Na rys. 5.31 pokazano budowę przykładowego odbieraka łyżwowego do boczego odbioru prądu. Jest to konstrukcja o sterowaniu pneumatycznym ze sprężynowym układem dociskającym. Położeniem normalnym jest pozycja złożona. Wysłunięcie odbieraka i dociśnięcie łyżwy do szyny prądowej następuje po doprowadzeniu sprężonego powietrza do cylindra napędowego. Wysłunięcie tłoka rozciąga sprę-

żyne dodatkową, która utrzymuje odbierak w pozycji złożonej. W sytuacji awaryjnej istnieje możliwość ręcznej zmiany położenia odbieraka i zablokowania go w pozycji wysuniętej.

Odbieraki tego typu są stosowane w pojazdach obsługujących linie naziemnej kolei miejskiej *S-Bahn* w Hamburgu (klasyczny system szynowy). Widok odbieraka pokazano na fot. 5.34. Ponieważ linie *S-bahn* biegną w terenach ogólnodostępnych konieczne jest osłonięcie szyny prądowej tak, by poprawić bezpieczeństwo i ograniczyć sposobność przypadkowego zetknięcia się z powierzchnią tej szyny. Stąd konstrukcja z dość wysuniętym ślizgiem, umożliwiającą kontakt z osłoniętą szyną zasilającą.



Fot. 5.34. Odbierak łyżwowy dostosowany do bocznego odbioru prądu (*S-Bahn* Hamburg) [22]



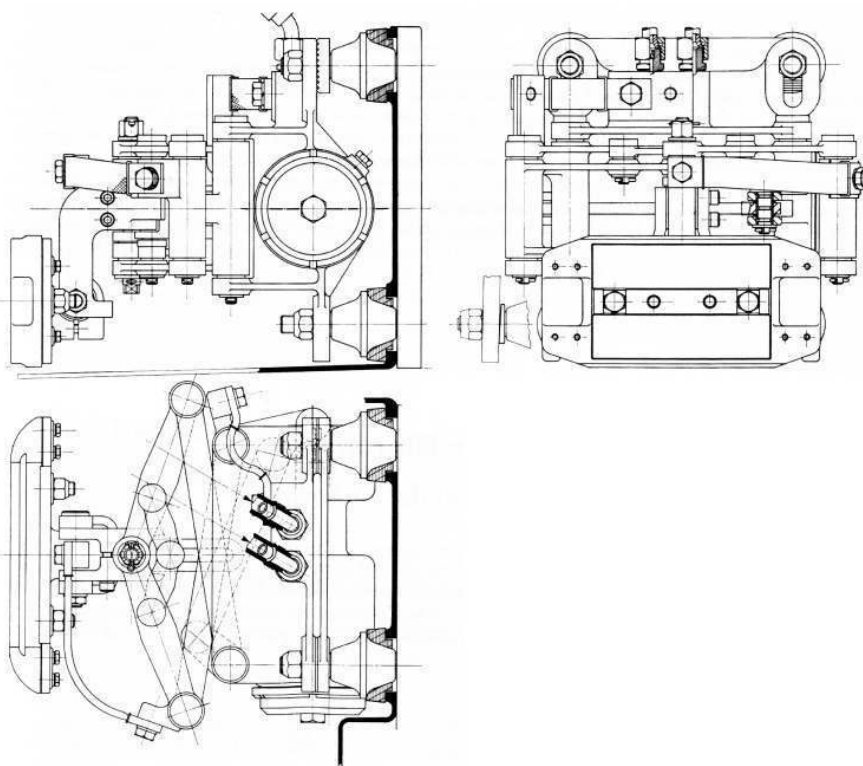
Rys. 5.31. Odbierak łyżwowy dostosowany do bocznego odbioru prądu (*S-Bahn* Hamburg) [64]

W systemach zamkniętych, gdzie nie ma dostępu do torowiska dla osób postronnych stosowane są inne typy odbieraków dostosowanych do bocznego odbioru prądu. Przykładowe rozwiązanie zastosowane w metrze mediolańskim pokazano na rys. 5.31. Stosunkowo szeroki ślizg odbieraka dociskany jest do szyny prądowej za pomocą układu ramion mechanicznych napędzanych pneumatycznie. Podobne rozwiązanie stosowane jest w pojazdach poruszających się na kołach ogumionych obsługujących linie metra paryskiego (patrz fot. 5.35). Ponieważ przy kołach ogumionych nie jest zapewnione połączenie z siecią powrotną, konieczne jest zastosowanie dodatkowego odbieraka tzw. „ujemnego” przyłączającego do pojazdu minus zasilania (widoczny na fot. 5.35). Odbieraki ujemne stosuje się też w pojazdach klasycznych (szynowych) zasilanych tzw. systemem czwartej szyny. W takim systemie toki szynowe jezdne nie stanowią



Fot. 5.35. Odbierak łyżwowy boczny dla metra paryskiego (fot. „Chicouris”)

jednego z biegunów zasilania, gdyż zasilanie dostarczone jest dwoma dodatkowymi szynami prądowymi izolowanymi od podłoża. Dzięki takiemu rozwiązaniu minimalizuje się problemy związane z prądami błędzającymi, które są szczególnie dokuczliwe w obecności gęstej sieci podziemnej infrastruktury miejskiej. System czwartej szyny zastosowano m.in. w metrze londyńskim. Co ciekawe szyna powrotna nie ma tam potencjału zerowego, a ujemny -210 V , co w połączeniu z potencjałem trzeciej szyny na poziomie $+420\text{ V}$ daje pełne napięcie zasilające pojazd.

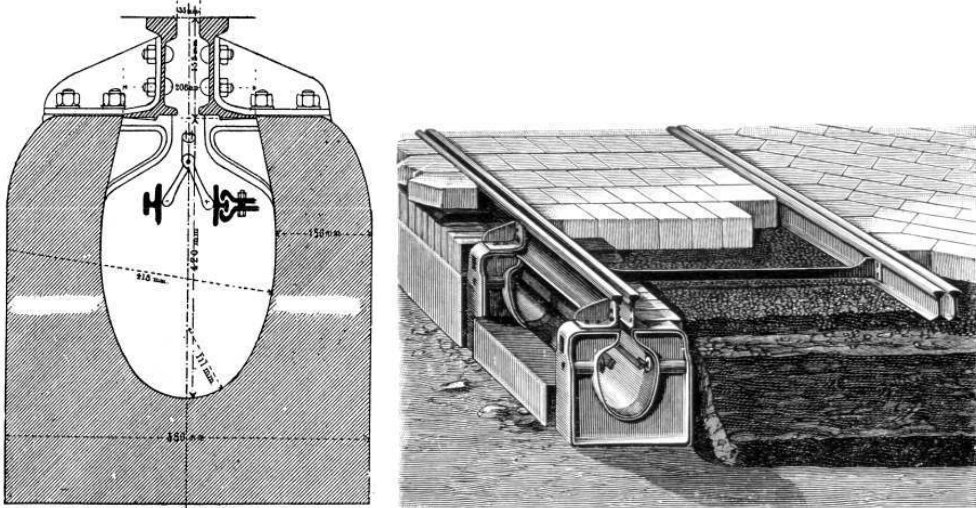


Rys. 5.31. Odbierak łyżwowy dostosowany do boczego odbioru prądu (metro mediolańskie) [64]

5.1.4. Odbieraki prądu przystosowane do współpracy z siecią kanałową

Kanałowe systemy zasilania pojazdów szynowych pojawiły się z przyczyn estetycznych. W początkowym okresie budowy linii tramwajowych władze miast nie zgadzali się na podwieszanie sieci górnej jako elementu szpecącego wygląd ulic. Zaczęto więc budować sieci zasilające pod ziemią mimo znacznie większych nakładów finansowych w porównaniu z siecią górną.

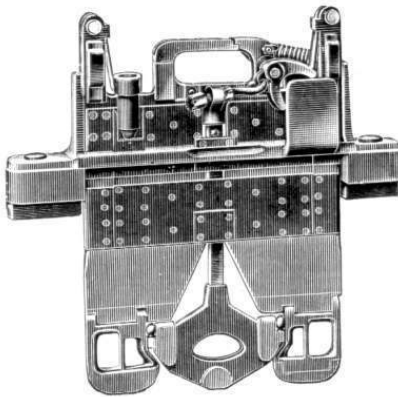
Kanał z siecią zasilającą był umiejscowiony pomiędzy tokami szynowymi, pośrodku lub przy jednym z toków. Przykładowe rozwiązania pokazano na rys. 5.32. Szczelina przez którą wchodził odbierak prądu była bardzo wąska, tak by nie było możliwe przypadkowe dotknięcie szyny prądowej.



Rys. 5.32. Przykładowe rozwiązania sieci kanałowej [57,62]

Eksploatacja kanałowych systemów zasilania była bardzo kłopotliwa i kosztowna. Wymagała doskonale utrzymanej nawierzchni torowej.

Mimo specjalnych systemów odwadniających, większe opady deszczu powodowały zalewanie kanałów i wstrzymywały ruch pojazdów. Ponadto w warunkach zimowych eksploatacja takiego systemu była praktycznie niemożliwa, gdyż lód i śnieg zalepiały szczelinę. Dlatego w Polsce pojazdy z tego typu odbierakami nigdy nie były użytkowane. Bardzo utrudnione było również przeprowadzanie prac naprawczych i konserwatorskich. Każde poważniejsze uszkodzenie wymagało, w celu wykonania naprawy, demontażu fragmentu nawierzchni ulicy. Dlatego próbowano niekiedy budować kanały o takich wymiarach, by



Rys. 5.33. Odbierak prądu przystosowany do współpracy z siecią kanałową [31]

do środka mógł wejść człowiek, jednak koszt takiego rozwiązania były niezmiernie wysokie

Przykładową konstrukcję odbieraka prądu współpracującego z siecią kanałową pokazano na rys. 5.33. Środkowa część odbieraka była ruchoma i w pozycji roboczej obracała się o pewien kąt, stykając się elementami ślizgowymi z szynami prądowymi. Docisk zapewniała sprężyna widoczna na rysunku.

Niezwykle kłopotliwa eksploatacja systemów zasilania kanałowego sprawiła, że stosunkowo szybko zarządy komunikacji miejskiej odchodziły od niego, na korzyść górnych systemów zasilających. Ostatni odcinek sieci tramwajowej zasilanej w sposób kanałowy zlikwidowano w Waszyngtonie w styczniu 1962 roku. Obecnie jedyną pozostałością po tego typu układach zasilania są fragmenty nieużywanych torowisk, które można zobaczyć m.in. w Londynie oraz zabytkowe wozy tramwajowe znajdujące się w muzeach transportu i komunikacji.

Literatura

- [1] Allen C.J.: *Modern railways, their engineering, equipment and operation*. London, Faber & Faber Limited 1959.
- [2] Arns H.: *60 Jahre elektrische Straßenbahn*. Berlin, Verkehrstechnik Mai 1941.
- [3] Аватков А. С.: *Электровозы и моторные вагоны переменного тока*. Москва, Трансжелдориздат 1963.
- [4] Betz L.: *Das Trolleybus – system*. Berlin, M. Kraun 1930.
- [5] Бондаревский А. И., Василев Г. И., Жиц М. З.: *Подвижной состав трамвая и метрополитена*. Москва, МКХ РСФСР 1960.
- [6] Clark R. A.: *The Milwaukee Electrification*. The Milwaukee Road Magazine, July-August 1973.
- [7] Domański E., Świtalski M.: *Urządzenia elektryczne pojazdów szynowych*. Warszawa, WKiŁ 1974.
- [8] Domański E., Świtalski M.: *Elektryczne pojazdy trakcyjne*. Warszawa, WKiŁ 1980.
- [9] Duffy M. C.: *Electric railways 1880-1990*. London, The IEE 2003.
- [10] Dyja E.: *Hamulce kolejowe*. Warszawa, PWSZ 1959.
- [11] Dyja E.: *Hamulce elektropneumatyczne taboru kolejowego*. Warszawa, WKiŁ 1964.
- [12] EC Engineering: *Pierwszy polski pantograf od ponad 20 lat*. Technika Transportu Szynowego, nr 11-2010 str. 34 – 36.
- [13] Ефремов И. С.: *Троллейбусы*. Москва, МКХ РСФСР 1962.
- [14] Estler T.: *Das große Loktypenbuch*. Stuttgart, Transpress 2004.
- [15] Furman J.: *Zespoły napędowe elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Warszawa, WKiŁ 1975.
- [16] Gawłowski K.: *Lokomotywa wielosystemowa typu E186 serii EU43*. Technika Transportu Szynowego, nr 1/2-2008 str. 17 – 24.
- [17] Giziński Z., Karasek S., Kowalski J.: *Nowoczesne tramwaje*. Warszawa, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Komunalnej 1967.
- [18] Giziński Z., Kozik W.: *Nowa generacja tyrystorowych układów regulacji do tramwajów 105N i 112N*. Technika Transportu Szynowego, nr 8-1996 str. 10 – 12.
- [19] Grassart P.: *La SNCF célèbre les 50 ans du record à 331 km/h*. La vie du Rail, N° 2992 30 mars 2005.
- [20] Gronowicz J., Kasprzak B.: *Lokomotywy spalinowe*. Warszawa, WKiŁ 1989.
- [21] Gronowicz J.: *Sterowanie pojazdów trakcyjnych*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1987.
- [22] Grünholz H.: *Elektrische Vollbahnlokomotiven*. Berlin, AEG 1930.
- [23] Haut F. J. G.: *Historia lokomotywy elektrycznej*. Warszawa, WKiŁ 1975.
- [24] Höring D. O. (red.): *Elektrische bahnen*. Berlin, Walter de Gruyter & Co. 1929.
- [25] Jarvis R.: *Davidson's locomotive: how did He do it?* Engineering Science and Education Journal, December 1996, str. 281 – 288.
- [26] Kasprzak J., Koczara W.: *Podstawy napędu elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Warszawa, WKiŁ 1990.
- [27] Калинин В. К., Михайлов Н. М.: *Электроподвижной состав железных дорог*. Москва, Транспорт 1964.
- [28] Kamiński J., Skoniccki J., Tomczyk L.: *Podręcznik maszynisty elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Warszawa, WKiŁ 1967.
- [29] *Katalog 60-A: Aparatura trakcyjna*. Warszawa, WEMA 1968.
- [30] *Katalog SWW 1115: Aparatura elektryczna pojazdów trakcyjnych, tom II*. Warszawa, WEMA 1975.
- [31] Koeßler P.: *Das Deutsche museum In München und das elektrische Bahnwesen*. Elektrische Bahnen, April 1925, str. 113 – 121.
- [32] Kowalski E.: *Pojazdy trakcyjne*. Warszawa, WKiŁ 1979.
- [33] Krzemieniecki A.: *Tabor kolejowy*. Warszawa, WKiŁ 1976.
- [34] Кутыловский М. П., Федотов А. И.: *Подвижной состав трамвая*. Москва, МКХ РСФСР 1948.
- [35] Langrod A.: *Zasady ustroju i działania hamulców kolejowych o sprzężonym powietrzu*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacyjne 1957.
- [36] Lepka J., Stekl P.: *3-phase AC induction motor vector control using DSP56F80x*. Motorola Inc. 2002.
- [37] Либман Г М Чернявский С Н.: *Устройство и работа электровозов постоянного тока*. Москва, Транспорт 1964.
- [38] Lübke D.: *ICE zug der zukunft*. Darmstadt, Hestra-Verlag 1991.

- [39] Machowski J.: *Elektryczne napędy trakcyjne*. Kraków, Wydawnictwo Akademii Górniczo Hutniczej 1980.
- [40] Maciszewski H., Pawlus J., Sumiński S.: *Lokomotywy elektryczne serii EU06 i EU07*. Warszawa, WKiŁ 1974.
- [41] Madej J.: *Teoria ruchu pojazdów szynowych*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.
- [42] Macmillan D.: *Moving more people, making less impact*. Business Week, 14 may 2007.
- [43] Марковников В.А.: *Тормозные системы троллейбусов и вагонов трамвая*. Москва, МКХ РСФСР 1955.
- [44] Mirow L.: *Nutzbremsung bei Einphasen Wechselstrom Bahnen*. Elektrische Bahnen, Januar 1937, str. 5 – 15.
- [45] Monkiewicz T.: *Maszyny komutatorowe prądów zmiennych*. Warszawa, Komisja Wydawnicza Towarzystwa Bratniej Pomocy Studentów Politechniki Warszawskiej 1933.
- [46] Neumann T.: *Wagony i hamulce kolejowe*. Warszawa, WKiŁ 1976.
- [47] Orlik A.: *Hamulce pociągów kolejowych, podstawy konstrukcji i działania*. Warszawa, WKiŁ 1978
- [48] Ransome-Wallis P. (red.): *The concise encyclopedia of world railway locomotives*. New York, Hawthorn Books Inc. 1959.
- [49] Plewako S.: *Tabor kolei elektrycznej*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacyjne 1954.
- [50] Plewako S.: *Tabor trakcji elektrycznej*. Warszawa, WKiŁ 1964.
- [51] Plewako S., Romaniszyn Z., Cianciara K.: *Pojazdy trakcyjne kolei elektrycznych*. Warszawa, WKiŁ 1966.
- [52] Plutyński K., Szpankowski W.: *Wózeczek akumulatorowy i jego eksploatacja*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacyjne 1954.
- [53] Podoski J.: *Tramwaj szybki, projektowanie i eksploatacja*. Warszawa, WKiŁ 1983.
- [54] Podoski J.: *Trolejbusy, budowa i eksploatacja*. Warszawa, Wydawnictwo „Arkady” 1958.
- [55] Podoski J., Kacprzak J., Mysiek J.: *Zasady trakcji elektrycznej*. Warszawa, WKiŁ 1980.
- [56] Podoski R.: *Trakcja elektryczna*, tom I i II. Warszawa, Wydawnictwa komunikacyjne 1951, 1954.
- [57] Podoski R.: *Tramwaje i koleje elektryczne*, tom I i II. Warszawa, Komisja Wydawnicza Towarzystwa Bratniej Pomocy Studentów Politechniki Warszawskiej 1922.
- [58] Praca zbiorowa: *Historia elektryki polskiej, tom V Trakcja elektryczna*. Warszawa, WNT 1971.
- [59] Praca zbiorowa: *Podręcznik inżyniera elektryka*, tom I, II, III, IV. Warszawa, Trzaska, Evert i Michalski 1947 – 1954.
- [60] Rabsztyń M.: *Tyrystorowe zespoły trakcyjne EN57 na PKP*. Technika Transportu Szynowego, nr 5/1996 str. 32.
- [61] Розенфельд В.Е., Чеботарев Е.В., Сидоров Н.Н., Болотов Н.А.: *Основы электрической тяги, часть первая*. Москва, Ленинград, Госэнергоиздат 1957
- [62] Ruśkiewicz T.: *Tramwaje i koleje elektryczne*. Warszawa, Druk Rubieszewskiego i Wrotnowskiego 1901.
- [63] Sachs K.: *Elektrische Vollbahnlokomotiven*. Berlin, Springer 1928.
- [64] Sachs K.: *Elektrische Triebfahrzeuge. Part I, II, III*. Wien, New York, Springer 1973.
- [65] Сидоров Н. И., Прудыус А. С.: *Как устроен и работает электровоз*. Москва, Трансжелдориздат 1959.
- [66] Siemiński T., Jarosz T.: *Odbieraki prądu i ich współpraca z siecią jezdnią*. Warszawa, WKiŁ 1989.
- [67] Steimel A.: *Electric traction—motive power and energy supply*. Münchenn, Oldenbourg Industrieverlag 2008.
- [68] Stockar R.F.: *Nutzbremsung bei mit Einphasen-Wechselstrom betrieben elektrischen Bahnen*. Elektrische Bahnen, Juli 1931, str. 197 – 204.
- [69] *Testy szybkiego pociągu FASTECH 360*. Railway Journal (Japan), September 2005.
- [70] Tichmieniew B. N., Trachtman L..M.: *Aparatura i układy elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Warszawa, WKiŁ 1965.
- [71] Тихменев Б. Н.: *Электровозы переменного тока со статическими преобразователями*. Москва, Трансжелдориздат 1958.
- [72] Тихменев Б. Н., Трахтман А. М.: *Подвижной состав электрических железных дорог*. Москва, Трансжелдориздат 1958.
- [73] Töfflinger K.: *Neue elektrische Bremsverfahren für Straßen und Schnellbahnen*. Berlin, Julius Springer 1934.
- [74] *The Horseless Age magazine*. Vol. 29, No. 8, February 21, 1912.
- [75] Tunia H., Winiarski B.: *Energoelektronika w pytaniach i odpowiedziach*. Warszawa, WNT 1996.
- [76] Wakuda Y.: *Railway modernization and Shinkansen*. Japan Railway & Transport Review, April 1997, str. 60 – 63.
- [77] Westbrook M. H.: *The electric car*. London, IEE 2001.
- [78] Zembrzusi K.: *Teoria napędu i hamowania pociągu*. Warszawa, PWN 1978.

-
- [79] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_locomotive
 - [80] http://en.wikipedia.org/wiki/Baltimore_Belt_Line
 - [81] <http://www.erbzine.com/mag12/1282.html>
 - [82] http://en.wikipedia.org/wiki/La_Jamais_Contente
 - [83] <http://www.autowallpaper.de/Wallpaper/Porsche/Lohner-Porsche-Elektromobil/Lohner-Porsche-Elektromobil.htm>
 - [84] http://en.wikipedia.org/wiki/PCC_streetcar
 - [85] http://en.wikipedia.org/wiki/Detroit_Electric
 - [86] <http://www.schlesische-eisenbahnen.de/eltrieb.html>
 - [87] <http://ffmfw.free.fr/Bourgogne/Agenda/6expo/6624Amberieu/recl/APMFS.htm>
 - [88] <http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetschwebbahn>
 - [89] http://en.wikipedia.org/wiki/EMD_F9
 - [90] http://pl.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCwag_GT6
 - [91] http://pl.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCwag_N8C
 - [92] http://de.wikipedia.org/wiki/Karlsruher_Modell
 - [93] <http://ja.wikipedia.org/wiki/ED44>
 - [94] http://pl.wikipedia.org/wiki/EMD_DDA40X
 - [95] http://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current_brake
 - [96] http://en.wikipedia.org/wiki/Petit_train_de_la_Rhone
 - [97] <http://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%A7%91%EC%A0%84%EC%9E%A5%EC%B9%98>
 - [98] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_locomotive_load_capacity.jpg