

Pojazdy elektryczne

część I

Jacek Skibicki

Wydawnictwo
Politechniki Gdańskiej

Pojazdy elektryczne

część I

Jacek Skibicki

Gdańsk 2010

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 2010

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

ISBN 978–83–7348–298–2

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 6,2, ark. druku 6,75, 935/581

„...Jako rzeczywiście działający model przemiany energii mechanicznej w elektryczną i z powrotem w energię mechaniczną można ocenić tę kolejkę jako interesującą, ale trudno dopatrywać się w tym jakichś dalekosiężnych perspektyw...”

Ten komentarz ukazał się w prasie berlińskiej w 1879 roku, po tym jak Werner von Siemens zaprezentował pierwszą lokomotywę elektryczną.

Okazało się, że jest zupełnie inaczej . . .

SPIS TREŚCI

| | |
|---|-----------|
| Od autora | 7 |
| Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń | 9 |
| 1. Pojęcia podstawowe, klasyfikacja pojazdów elektrycznych | 11 |
| 2. Historia pojazdów elektrycznych | 15 |
| 2.1. Pierwsze próby, lata 1828 ÷ 1880 | 15 |
| 2.2. Początki zastosowań praktycznych, lata 1880 ÷ 1900 | 17 |
| 2.3. Rozwój i stabilizacja, lata 1900 ÷ 1950 | 24 |
| 2.4. Historia najnowsza – od 1950 | 36 |
| I – POJAZDY SIECIOWE | 53 |
| 3. Rozruch i regulacja prędkości pojazdów | 55 |
| 3.1. Charakterystyka trakcyjna i metody sterowania pracą obwodu głównego pojazdu ... | 55 |
| 3.2. Pojazdy zasilane z sieci napięcia stałego | 58 |
| 3.2.1. Pojazdy klasyczne z rozruchem oporowym i silnikami szeregowymi prądu stałego | 58 |
| 3.2.1.1. Etapy rozruchu pojazdów klasycznych | 59 |
| 3.2.1.2. Przełączanie grup silników | 61 |
| 3.2.1.3. Metody przełączania grup silników | 62 |
| 3.2.1.4. Regulacja prędkości przez osłabianie wzbudzenia | 67 |
| 3.2.2. Pojazdy z rozruchem impulsowym i silnikami szeregowymi prądu stałego | 68 |
| 3.2.2.1. Zasada impulsowej regulacji wartości napięcia | 68 |
| 3.2.2.2. Dodatkowe wymagania dla pojazdów z rozruchem impulsowym | 70 |
| 3.2.3. Pojazdy z napędem przekształtnikowym i silnikami prądu przemiennego | 71 |
| 3.2.3.1. Zasada kształtowania charakterystyk silnika indukcyjnego | 71 |
| 3.2.3.2. Metoda sterowania pracą silnika indukcyjnego | 73 |
| 3.3. Pojazdy zasilane z sieci napięcia przemiennego | 77 |
| 3.3.1. Pojazdy zasilane napięciem trójfazowym | 78 |
| 3.3.2. Pojazdy zasilane napięciem jednofazowym o częstotliwości obniżonej | 81 |
| 3.3.2.1. Pojazdy z jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego | 81 |
| 3.3.2.2. Pojazdy z silnikami szeregowymi prądu stałego lub tętniącego | 90 |
| 3.3.2.3. Pojazdy z silnikami trójfazowymi prądu przemiennego | 92 |
| 3.3.3. Pojazdy zasilane napięciem jednofazowym o częstotliwości przemysłowej ... | 94 |
| 3.3.3.1. Pojazdy z jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego | 94 |
| 3.3.3.2. Pojazdy z silnikami prądu stałego (tętniącego) | 95 |
| 3.3.3.3. Pojazdy z silnikami trójfazowymi prądu przemiennego | 98 |
| 3.4. Pojazdy wielosystemowe | 98 |
| 3.4.1. Pojazdy z jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego . | 99 |

| | |
|---|-----|
| 3.4.2. Pojazdy z silnikami szeregowymi prądu stałego dostosowane do różnych wartości napięcia zasilającego | 100 |
| 3.4.3. Pojazdy z silnikami prądu stałego (tętniącego) dostosowane do zasilania napięciem stałym i przemiennym | 102 |
| 3.4.4. Pojazdy z silnikami trójfazowymi prądu przemiennego | 107 |
| Literatura | 110 |

Od autora

Pojazdy elektryczne znajdują coraz szersze zastosowanie w szeroko rozumianym transporcie. Począwszy od transportu szynowego, w znacznej części zdominowanego już przez tego typu pojazdy, aż do samochodów, skuterów, rowerów, gdzie również napęd elektryczny jest wykorzystywany coraz powszechniej. Niniejsza książka ma na celu zapoznanie czytelnika z podstawowymi wiadomościami dotyczącymi pojazdów elektrycznych, obszarami ich wykorzystania, budową, metodami sterowania itp. Ponieważ tematyka pojazdów elektrycznych łączy w sobie problemy z szeregu działów techniki założono, że czytelnik ma bazowe wiadomości z takich dziedzin, jak: elektrotechnika, elektronika, energoelektronika, maszyny elektryczne, napęd elektryczny, tak więc pojęcia podstawowe z tych dziedzin nie są objaśniane w tekście. Książka jest w założeniu pomocniczym materiałem uzupełniającym treści wykładowe dla przedmiotów: *Pojazdy elektryczne*, *Pojazdy szynowe*, *Trakcja Elektryczna*, *Inżynieria elektryczna w transporcie*. Może być również pomocna dla inżynierów i techników związanych z szeroko pojętym transportem zelektryfikowanym, a także dla wszystkich zainteresowanych tematyką pojazdów elektrycznych.

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 |
| c | – stała maszyny elektrycznej |
| C_f | – pojemność filtra wejściowego pojazdu |
| DC | – Direct Current (prąd stały) |
| D_z | – dioda zwrotna |
| EZT | – Elektryczny Zespół Trakcyjny |
| F | – siła pociągowa |
| f | – częstotliwość |
| F_{\max} | – maksymalna siła rozruchowa |
| F_{μ} | – siła przyczepności |
| GTO | – Gate Turn Off (<i>tyrystor wyłączalny bramką</i>) |
| i | – prąd |
| ICE | – Inter City Express |
| IGBT | – Insulated Gate Bipolar Transistor (<i>transystor bipolarny z izolowaną bramką</i>) |
| i_s | – prąd pobierany z sieci trakcyjnej |
| $i_{s\text{śr}}$ | – średnia wartość prądu pobieranego z sieci trakcyjnej |
| i_{sil} | – prąd silnika trakcyjnego |
| $i_{sil\text{ min}}$ | – minimalna wartość prądu silnika trakcyjnego |
| $i_{sil\text{ max}}$ | – 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 |
| L_p | – łącznik półprzewodnikowy |
| M | – moment napędowy |
| M_{ξ} | – wartość zadana momentu elektromagnetycznego |
| P | – moc |
| P | – prostownik |
| PCC | – President's Conference Committee (typ wagonu tramwajowego) |
| PI | – regulator proporcjonalno-calkujący |
| 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 |
| s | – poślizg silnika indukcyjnego |
| S-Bahn | – Stadtschnellbahn (<i>Szybka Kolej Miejska</i>) |

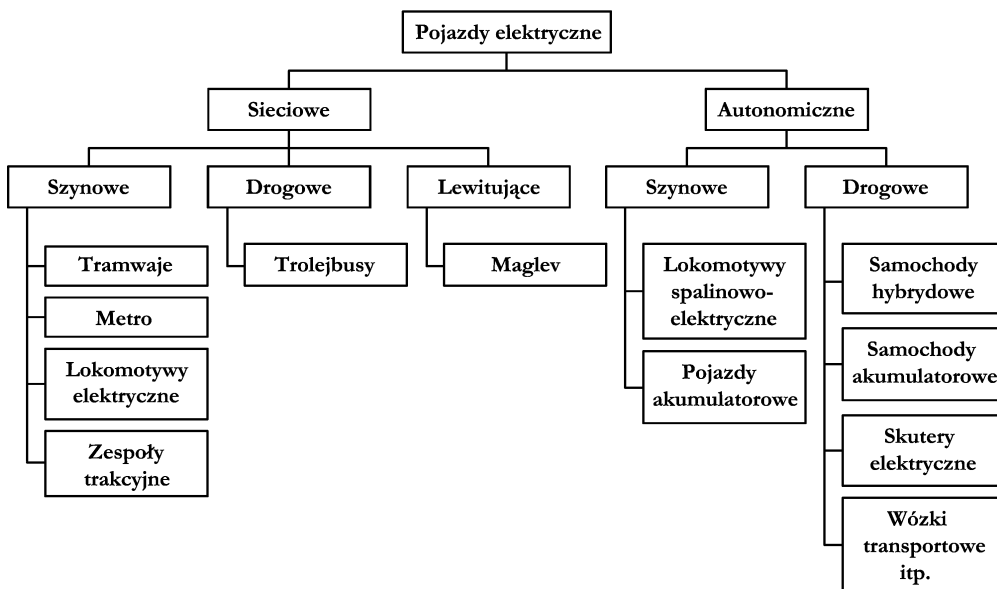
Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

| | |
|--------------------|--|
| SBB | – Schweizerische Bundesbahnen (<i>Szwajcarskie Koleje Państwowe</i>) |
| 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>) |
| T | – okres impulsowania |
| 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_{max1} | – maksymalna wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna długotrwale |
| U_{max2} | – maksymalna wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna nie dłużej niż 2 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 |
| $u_{sil\acute{s}}$ | – 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 |
| 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_{α} | – wartość zadana strumienia wirnika |
| ω | – prędkość kątowa wirnika |
| ω_e | – prędkość kątowa wirnika elektryczna |
| ω_s | – prędkość synchroniczna wirowania pola |
| ω_{sl} | – poślizg elektryczny |
| Φ | – strumień magnetyczny |

1. Pojęcia podstawowe, klasyfikacja pojazdów elektrycznych

Każdego dnia korzystamy z wielu urządzeń służących do przemieszczania osób i towarów napędzanych energią elektryczną. Nie wszystkie one jednak mogą zostać zaliczone do pojazdów elektrycznych. Pojazdem elektrycznym nazywamy bowiem pojazd napędzany za pośrednictwem energii elektrycznej, którego silnik napędowy lub elementy tego silnika znajdują się w pojeździe. Taka definicja wyraźnie określa, które z pojazdów napędzanych energią elektryczną nie mogą zostać nazwane elektrycznymi. Będą to np. kolejki linowe, linowo-szynowe czy windy, których silnik napędowy znajduje się poza pojazdem.

Pojazdy elektryczne dzielimy, ze względu na sposób zasilania, na sieciowe i autonomiczne. Pojazdy sieciowe pobierają energię z zewnętrznego źródła zasilającego za pomocą umieszczonych w pobliżu toru jazdy pojazdów przewodów zasilających, czyli sieci trakcyjnej. W pojazdach autonomicznych źródło energii znajduje się wewnątrz pojazdu, nie są więc one zależne od zewnętrznych źródeł zasilania. Oba rodzaje pojazdów można podzielić na szereg kategorii, których pełna specyfikacja została przedstawiona na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Klasyfikacja pojazdów elektrycznych

Pojazdy sieciowe mogą być zasilane zarówno energią prądu stałego, jak i przemiennego. Stosowanych jest wiele systemów, które przedstawiono na rys. 1.2. Mnogość rozwiązań wynika z uwarunkowań historycznych. W pierwszym okresie rozwoju transportu zelektryfikowanego dokonywano prób z różnymi parametrami napięcia zasilającego i z biegiem czasu wykształciły się systemy obecnie dominujące. Są to, dla pojazdów kolejowych, systemy 1500 V i 3000 V prą-

du stałego oraz 15 kV, 16 2/3 Hz i 25 kV, 50 Hz jednofazowe prądu przemiennego. Dla pojazdów komunikacji miejskiej (tramwaje, trolejbusy, metro) dominuje zasilanie prądem stałym o nominalnej wartości napięcia wynoszącej od 500 do 750 V. Eksploatacja konkretnego systemu zasilania pojazdów kolejowych wynika ściśle z okresu, w jakim podejmowana była decyzja o elektryfikacji sieci. Kraje rozpoczynające elektryfikację w pierwszych dwóch dekadach XX wieku wybierały systemy napięcia przemiennego o częstotliwości obniżonej, co było związane ze skonstruowaniem silnika komutatorowego prądu przemiennego dużej mocy. Z kolei w latach 20. i 30. XX wieku wybierano systemy prądu stałego, co z kolei było podyktowane pojawieniem się silników prądu stałego na wysokie napięcie i wynalezieniem prostownika rtęciowego. Systemy napięcia przemiennego o częstotliwości przemysłowej powstały w latach 50. ubiegłego wieku. Od tamtego czasu wszystkie kraje rozpoczynające elektryfikację sieci kolejowej wybierają ten rodzaj zasilania. Należy oczywiście pamiętać, że na rys. 1.2. podane są napięcia nominalne dla poszczególnych systemów zasilania. Rzeczywista wartość napięcia w sieci trakcyjnej może się zawierać w przedziałach określonych właściwymi przepisami. Zakresy dopuszczalnych zmian wartości napięcia zasilającego dla najczęściej stosowanych systemów określone są normą europejską EN 50163 i zostały one przedstawione w tabl. 1.1.

Tabl. 1.1. Dopuszczalne wartości napięcia w sieci trakcyjnej wg EN 50163

| System | Wartość napięcia [V] | | | | |
|-----------------|----------------------|------------|-------|------------|------------|
| | U_{min1} | U_{min2} | U_n | U_{max1} | U_{max2} |
| 600 V DC | 400 | 400 | 600 | 720 | 800 |
| 750 V DC | 500 | 500 | 750 | 900 | 1000 |
| 1500 V DC | 1000 | 1000 | 1500 | 1800 | 1950 |
| 3000 V DC | 2000 | 2000 | 3000 | 3600 | 3900 |
| 15 kV 16 2/3 Hz | 11000 | 12000 | 15000 | 17250 | 18000 |
| 25 kV 50 Hz | 17500 | 19000 | 25000 | 27500 | 29000 |

Gdzie:

U_{min1} – najniższa wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna krótkotrwale;

U_{min2} – najniższa wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna długotrwale;

U_n – znamionowa wartość napięcia;

U_{max1} – maksymalna wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna długotrwale;

U_{max2} – maksymalna wartość napięcia w sieci trakcyjnej dopuszczalna na nie dłużej niż 2 minuty.

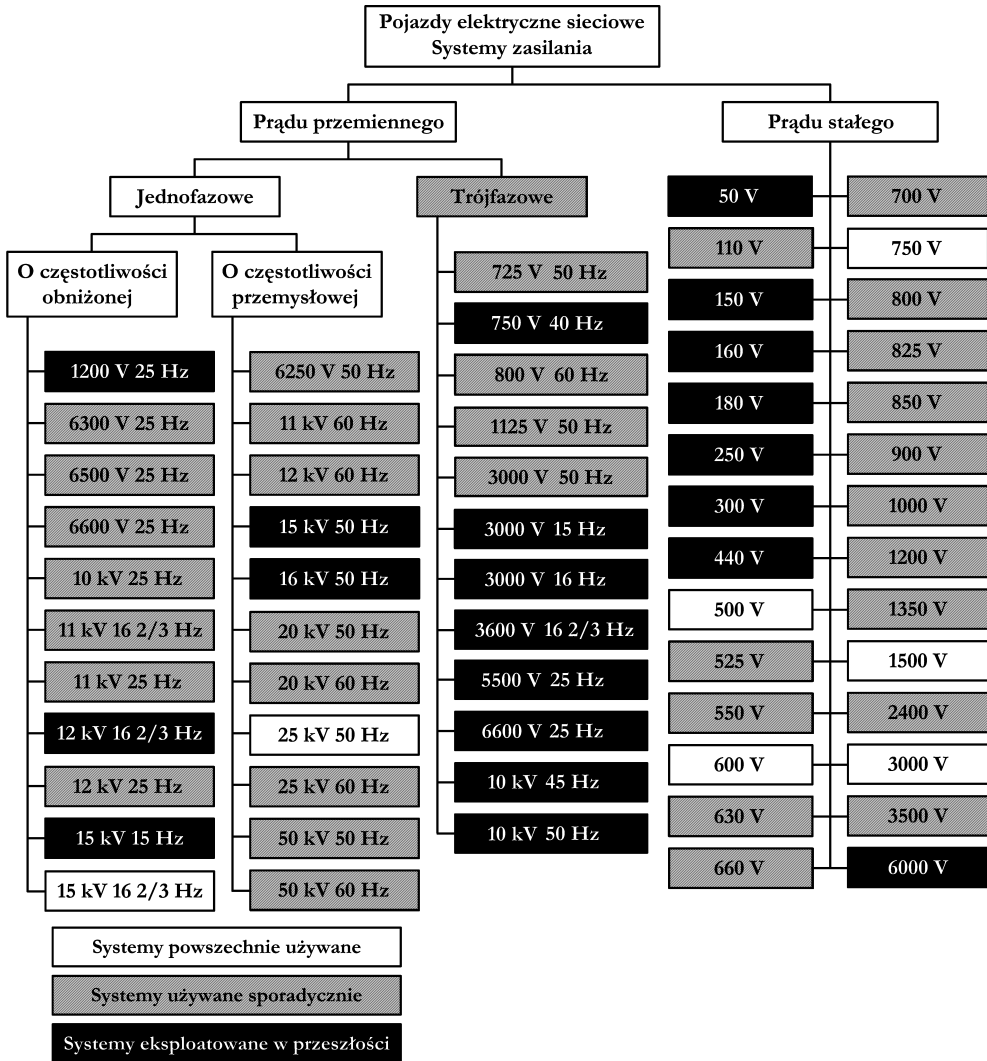
W zależności od przeznaczenia, pojazdy sieciowe można podzielić na cztery podstawowe grupy zastosowań.

Pojazdy tramwajowe o mocy rzędu 100 ÷ 200 kW, zasilane z górnej sieci jezdnej napięciem o wartości znamionowej ok. 600 V DC; sieć powrotną stanowią szyny. Ich prędkość maksymalna nie przekracza 70 km/h. Jest to podstawowy środek komunikacji publicznej w miastach średniej wielkości.

Trolejbusy – pojazdy na kołach ogumionych o mocy rzędu 100 kW, zasilane z dwubiegowej sieci o napięciu ok. 600 V DC. Prędkość trolejbusów jest porównywalna z prędkością tramwajów. Obecnie, ze względów ekologicznych, można zaobserwować renesans trolejbusów jako środka komunikacji miejskiej.

Pojazdy metra – zespoły trakcyjne poruszające się w centrach miast w specjalnych tunelach. Na przedmieściach na ogół są to linie naziemne. Moc pociągów metra jest znacznie większa niż tramwajów czy trolejbusów i sięga nawet 4 MW. Są one zasilane w większości przypad-

ków z trzeciej szyny napięciem o wartości około 750 V DC. Pojazdy metra są podstawą systemu komunikacji zbiorowej w dużych aglomeracjach miejskich.



Rys. 1.2. Systemy zasilania elektrycznych pojazdów sieciowych

Pojazdy kolejowe – w przypadku zasilania napięciem stałym wykorzystuje się na ogół napięcie o wartości znamionowej 3000 V, rzadziej 1500 V i 750 V. Dla systemów napięcia przemiennego będą to wartości 15 kV, 16 i 2/3 Hz i 25 kV, 50 Hz. Istnieje duża różnorodność kolejowych elektrycznych pojazdów trakcyjnych, począwszy od zespołów trakcyjnych mających zastosowanie w komunikacji podmiejskiej, o mocach porównywalnych z pojazdami metra, przez lokomotywy liniowe, których moce znamionowe sięgają $6 \div 10$ MW, aż do superszybkich jednostek o mocach rzędu kilkunastu MW, rozwijających prędkości do 350 km/h.

W grupie elektrycznych pojazdów autonomicznych do niedawna dominowały lokomotywy spalinowo-elektryczne, służące do obsługi ruchu kolejowego na liniach nieelektryfikowanych. Dopiero w ostatnich latach, dzięki postępowi w konstrukcji ogniw elektrochemicznych, a także z

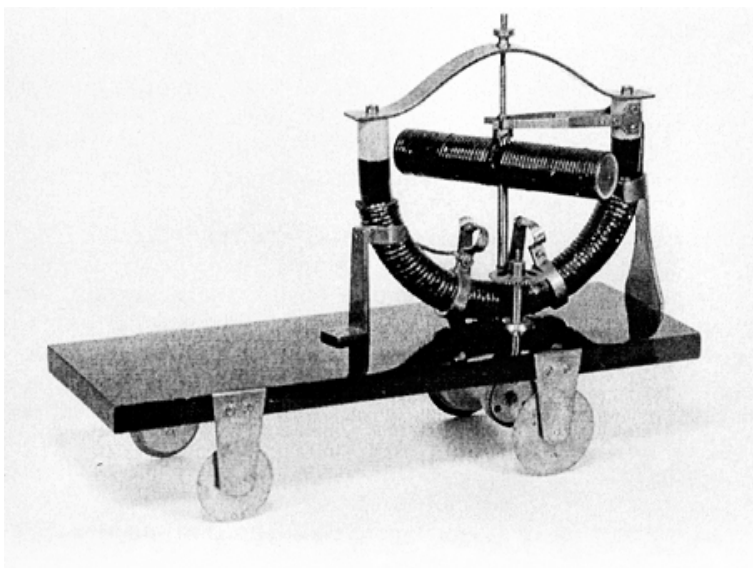
uwagi na czynniki ekologiczne, daje się zauważyć nowe konstrukcje elektrycznych pojazdów drogowych. Można tu wymienić najbardziej obecnie liczebne samochody hybrydowe, jak również pojawiające się coraz częściej samochody elektryczne. Należy też wspomnieć o samochodach napędzanych ogniwami paliwowymi, jednak jak dotąd wysoka cena tych ogniw, a także kosztowne pozyskiwanie i kłopotliwe magazynowanie wodoru stanowią czynniki niepozwalające na szersze rozpowszechnienie tego typu pojazdów. Autonomiczne pojazdy elektryczne obsługują również pewną niszę związaną z przewozem pasażerów i towarów na nieduże odległości na terenach turystycznych, w kurortach czy wewnątrz pomieszczeń. Są to wszelkiego typu wózki akumulatorowe, pojazdy golfowe, małe pojazdy indywidualne itp. Daje się także zauważyć rosnącą podaż pojazdów elektrycznych małej mocy typu skutery, rowery elektryczne, czy pojazdów niekonwencjonalnych, jak np. *Segway*.

2. Historia pojazdów elektrycznych

W swojej już ponad stu pięćdziesięcioletniej historii pojazdy elektryczne są nieustannie rozwijane i udoskonalane. Znajduje się dla nich coraz to nowe dziedziny zastosowań. Zmiany obejmują zarówno ulepszanie konstrukcji mechanicznej pojazdów, podnoszenie ich mocy znamionowej, zwiększanie maksymalnej osiągananej prędkości, jak również modyfikację poszczególnych elementów wyposażenia czyli silników trakcyjnych, układów sterowania i obwodów pomocniczych.

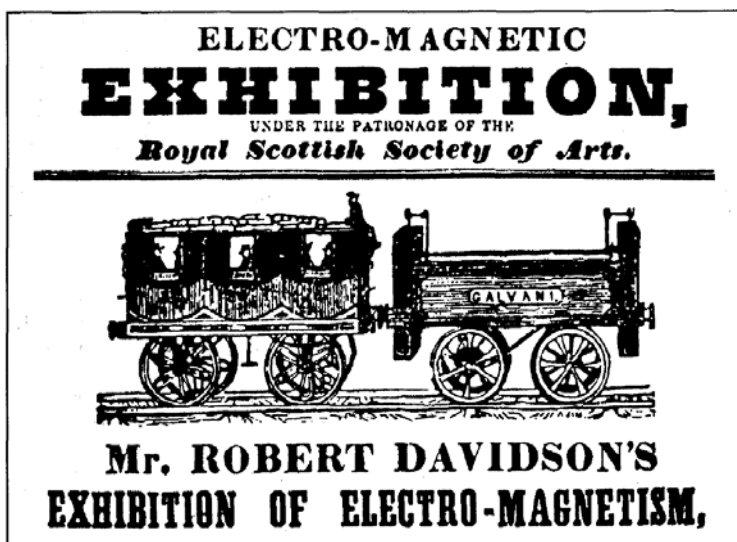
2.1. Pierwsze próby, lata 1828 ÷ 1880

Próby zastosowania energii elektrycznej do napędu pojazdów były podejmowane od czasu odkrycia elektryczności. Brak pełnej dokumentacji faktograficznej tamtego okresu, jak również brak szerszej informacji na temat prac niektórych wynalazców, sprawiają, że wyczerpujące omówienie tego etapu rozwoju pojazdów elektrycznych jest niemożliwe. Obecnie za pierwszą konstrukcję, którą można zaliczyć do pojazdów elektrycznych, przyjmuje się model wykonany w 1828 roku przez Ányosa Jedlika, węgierskiego wynalazcę i pioniera w dziedzinie maszyn elektrycznych. Zamontował on skonstruowany przez siebie prosty silnik elektryczny w modelu pojazdu i wprawił go w ruch. Pojazd ten przedstawiono na fot 2.1.



Fot. 2.1. Pierwszy pojazd elektryczny – 1828 [48]

W połowie XIX wieku odnotowano próby zbudowania lokomotywy elektrycznej. Pierwsza taka konstrukcja powstała w 1842 roku. Zaprojektował ją i wykonał szkocki wynalazca Robert Davidson. Widok pojazdu przedstawiono na rys. 2.1. Lokomotywę nazwano *Galvani*, na cześć pioniera elektryczności Luigi Galvaniego. Pojazd zasilano z kwasowo-cynkowych ogniw galwanicznych. Jego prędkość maksymalna wynosiła około 5 km/h. O porażce projektu zdecydowały ponad czterdziestokrotnie wyższe koszty eksploatacji w porównaniu z parowozem, nie wspominając o małym zasięgu i kłopotliwym ładowaniu ogniw pojazdu. To sprawiło, że prace zakończone na etapie prototypu. Ta i inne próby prowadzone w tamtym okresie nie zostały zakończone sukcesem. Niewątpliwie powodem niepowodzeń był, oprócz prymitywnej konstrukcji ówczesnych maszyn elektrycznych, brak wystarczająco wydajnego źródła energii elektrycznej. Baterie cynkowe, używane z powodzeniem w telegrafii, okazały się nieprzydatne do napędu pojazdów, a metoda zasilania z zewnętrznego źródła energii jeszcze nie została wynaleziona.



Rys. 2.1. Pierwszy elektryczny pojazd szynowy – lokomotywa *Galvani* 1842 [15]

Dopiero w dniu 31 maja 1879 roku Werner von Siemens z okazji Berlińskiej Wystawy Przemysłowej zaprezentował pierwszą użyteczną konstrukcję pojazdu elektrycznego. Była to mała dwuosiowa lokomotywa o mocy 2,2 kW, poruszająca się po owalnym torowisku długości około 300 m, zasilana z trzeciej szyny znajdującej się pomiędzy szynami jezdnyymi napięciem 150 V DC (fot. 2.2).

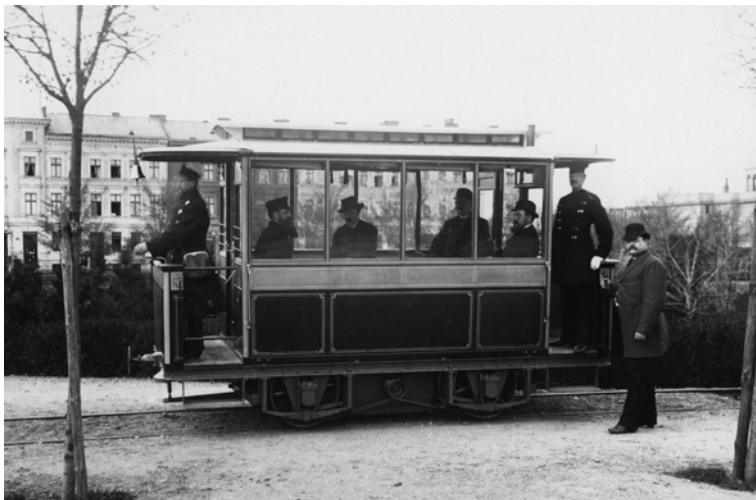
Źródło energii stanowiła prądnica napędzana maszyną parową. Do lokomotywy były dołączone małe wagony dla pasażerów. Pojawiły się zatem wszystkie elementy charakterystyczne dla pojazdów sieciowych, tj. pojazd czerpiący energię z zewnętrznego źródła zasilania, sieć trakcyjna, sieć powrotna i podstacja trakcyjna. Konstrukcja Wernera von Siemensa, mimo nieprzychylnego stosunku ówczesnej prasy, odniosła wielki sukces i w ciągu 4 miesięcy trwania wystawy pociąg napędzany tą lokomotywą przewiózł około 80 tysięcy osób [13].



Fot. 2.2. Lokomotywa elektryczna Siemens – 1879 [14]

2.2. Początki zastosowań praktycznych, lata 1880 ÷ 1900

Sukces prototypowej konstrukcji zaprezentowanej w Berlinie skłonił do prac nad praktycznym zastosowaniem energii elektrycznej do napędu pojazdów. 16 maja 1881 roku uruchomiono pierwszą na świecie linię tramwajową długości 2,45 km w berlińskiej dzielnicy Lichterfelde (fot. 2.3). Linię obsługiwały dwuosiowe pojazdy mające 26 miejsc, napędzane jednym silnikiem o mocy 7 kW, zasilane napięciem 180 V DC. Prędkość maksymalna wynosiła około 20 km/h.



Fot. 2.3. Pierwszy tramwaj elektryczny – 1881 (fot. ze zbiorów autora)

Zasilanie odbywało się w sposób bardzo nietypowy, a mianowicie poprzez toki szynowe. Jedna szyna stanowiła dodatni biegun zasilania, druga ujemny. Był to sposób wysoce niepraktyczny i stwarzający duże trudności, związane choćby z zapewnieniem odpowiedniego poziomu izolacji pomiędzy tokami szynowymi. Bardzo kłopotliwe było wykonanie np. rozjazdu. Należy

też wspomnieć o problemach związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa dla pieszych mogących przypadkowo stanąć na obu tokach szynowych jednocześnie, co nie było trudne, gdyż zastosowano wąski rozstaw szyn, wynoszący 1000 mm [2]. Jako nowinka techniczna linia cieszyła się dużą popularnością. W ciągu pierwszych trzech miesięcy eksploatacji z tramwaju skorzystało około 12 tysięcy pasażerów.

Negatywne cechy metody zasilania, jaką zastosowano w tej pionierskiej konstrukcji sprawiły, że wkrótce opracowano pierwsze rozwiązania wykorzystujące do przesyłu energii elektrycznej górną sieć jezdnią. Jeden z pierwszych takich systemów zastosowano na linii tramwajowej Sachsenhausen-Offenbach, którą otwarto 10 kwietnia 1884 roku (fot. 2.4). W tym przypadku odbierak prądu stanowiły dwa trzpienie metalowe poruszające się w specjalnie ukształtowanej górnej sieci jezdnej w formie dwóch równoległych rurek ze szczeliną od spodu. Rurki stanowiły dwa bieguny zasilania. Wymagało to budowy złożonych konstrukcyjnie rozjazdów sieciowych, co jest widoczne na fotografii. Napięcie zasilania wynosiło 300 V DC.

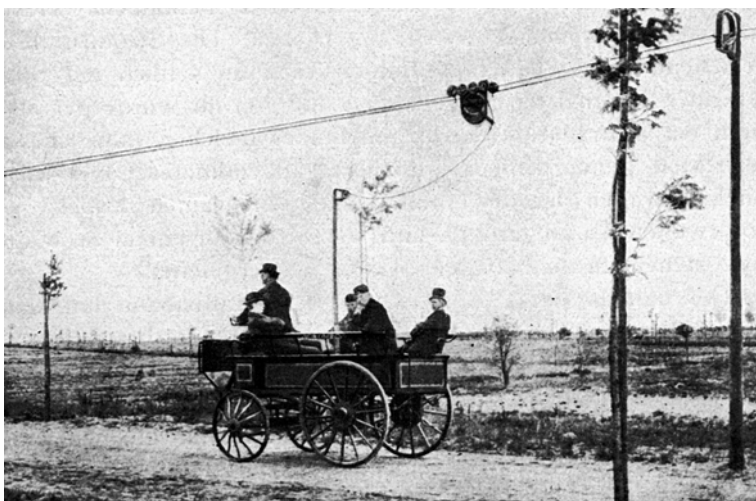


Fot. 2.4. Jedno z pierwszych rozwiązań górnej sieci jezdnej – 1884 (fot. ze zbiorów autora)

Takie rozwiązanie sieci trakcyjnej i odbieraka prądu zostało zaadaptowane, z pewnymi zmianami, z prototypowej konstrukcji pojazdu trolejbusowego. Pojazd ten, o nazwie *Elektromote*, został zaprezentowany przez Siemens 29 kwietnia 1882 w Halensee na przedmieściach Berlina. Był to przerobiony powóz doposażony w dwa silniki elektryczne, które napędzały tylną oś za pomocą przekładni łańcuchowej. Silniki miały moc 2,2 kW każdy i zasilane były z górnej dwubiegunowej sieci trakcyjnej napięciem 550 V DC. Odbierak prądu nazwany *kontaktwagen* poruszał się po sieci ciągniony przez pojazd i był z nim połączony za pośrednictwem elastycznego przewodu elektrycznego (fot. 2.5).

Ta pierwsza, eksperymentalna linia trolejbusowa miała długość zaledwie 540 metrów i funkcjonowała przez okres półtora miesiąca do 13 czerwca 1882, po czym urządzenia i wyposażenie techniczne zdemontowano [4]. Zastosowanie górnej sieci zasilającej w systemach tramwajowych umożliwiło podniesienie napięcia zasilającego do wartości wynoszącej około 500 ÷ 600 V DC, a więc do takiej, jaka jest stosowana obecnie. Pozwoliło to na skonstruowanie silnika

trakcyjnego o mocy rzędu $20 \div 30$ kW, wystarczającej do napędu stosunkowo lekkich pojazdów tramwajowych. Spowodowało to dynamiczną rozbudowę sieci tramwajowych. W ciągu ostatniej dekady XIX wieku w samej tylko Europie zbudowano bądź zelektryfikowano kilka tysięcy kilometrów linii. Szczegółowe dane przedstawiono w tabelicy 2.1.



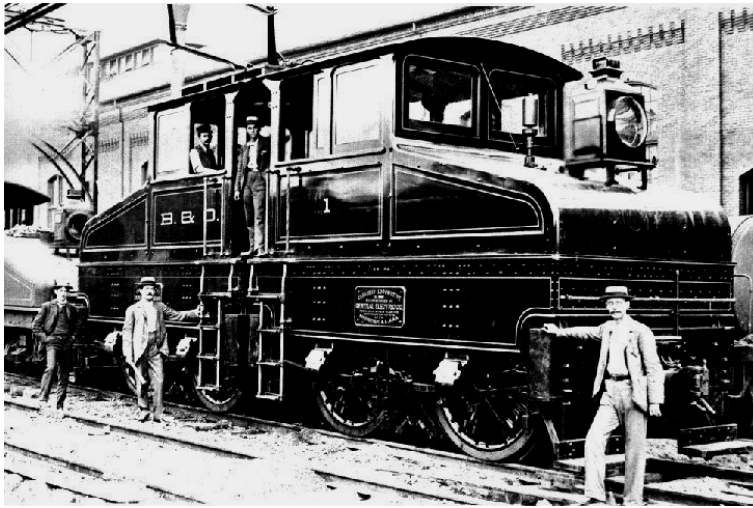
Fot. 2.5. Prototyp trolejbusu – 1882 [4]

Tabl. 2.1. Rozwój sieci tramwajowych w Europie w latach 1896 ÷ 1899 [37]

| Kraj | Długość linii w [km] | | | |
|------------------------|----------------------|----------------|---------------|----------------|
| | 1896 | 1897 | 1898 | 1899 |
| Anglia i Irlandia | 107,5 | 127,42 | 157,2 | 759,918 |
| Austro-Węgry | 71,0 | 83,89 | 106,5 | 962,07 |
| Belgia i Holandia | 28,0 | 38,1 | 72,2 | 194,0 |
| Bośnia | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 7,5 |
| Dania | – | – | – | 114,4 |
| Francja | 132 | 279,69 | 296,8 | 426,86 |
| Hiszpania i Portugalia | 32,3 | 50 | 63,8 | 145,6 |
| Niemcy | 406,5 | 642,69 | 1138,2 | 3457,25 |
| Norwegia i Szwecja | 8,0 | 5 | 24,1 | 62,16 |
| Rosja | 10,0 | 14,75 | 30,7 | 214,1 |
| Rumunia | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 49,5 |
| Serbia | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 12,0 |
| Szwajcaria | 47,0 | 78,75 | 146,2 | 265,992 |
| Włochy | 40,0 | 115,67 | 132,7 | 459,055 |
| Razem w Europie | 904,4 | 1457,53 | 2190,5 | 7134,42 |

Lata 90. XIX wieku to również okres pierwszych prób z wykorzystaniem energii elektrycznej do napędu lokomotyw. Początkowo usiłowano wykorzystać w tym celu napięcie zasilające o parametrach tramwajowych, czyli o wartości około 600 V DC. Jednak znacznie większe zapotrzebowanie pojazdów na moc spowodowało, że próby te, prowadzone w Stanach Zjednoczo-

nych, nie zakończyły się szerszym wprowadzeniem tego systemu zasilania na liniach kolejowych. Pierwszym odcinkiem zelektryfikowanym tym systemem był kilkukilometrowy fragment linii Baltimore-Ohio, przebiegający przez długi na 2,3 km tunel Howard Street. Aby uniknąć zadytmienia, pociągi, prowadzone normalnie parowozami, były przeciągane przez tunel lokomotywami elektrycznymi. Jedną z tych lokomotyw pokazano na fot. 2.6.



Fot. 2.6. Lokomotywa linii Baltimore-Ohio – 1895 [49]

Zasilanie zrealizowano za pomocą górnej sieci jezdnej, w postaci dwóch sztywnych płaskownik



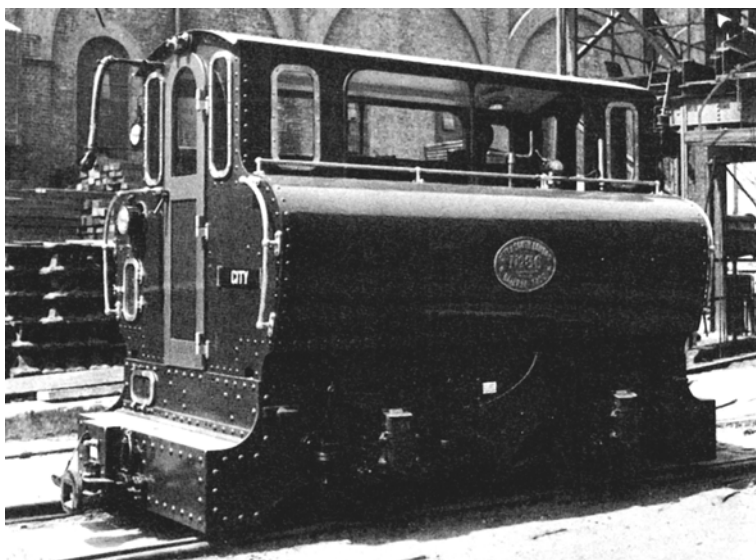
Fot. 2.7. Pierwsza lokomotywa systemu trójfazowego, linii Burgdorf-Thun – 1899 (fot. autora)

wników. Wartość nominalna napięcia wynosiła 650 V, moc lokomotyw 1 MW, a prędkość maksymalna 28 km/h [25]. Plany podniesienia wartości napięcia zasilającego skończyły się niepowodzeniem, gdyż nie potrafiono wówczas wyprodukować silnika komutatorowego prądu stałego o wyższym znamionowym napięciu izolacji.

Brak w owym czasie szerszych widoków na elektryfikację linii kolejowych napięciem stałym zaowocował opracowaniem innych systemów zasilania pojazdów. Pewne perspektywy dawały systemy trójfazowe. Wiązało się to z istniejącą wówczas możliwością skonstruowania silnika indukcyjnego o stosunkowo dużej mocy, wystarczającej do napędu lokomotywy. Po raz pierwszy trójfazowy system zasilania zastosowano na szwajcarskiej linii kolejowej Burgdorf-Thun (otwartej 21 lipca 1899 roku), o długości 45 km. Ruch obsługi-

waly dwuosiove lokomotywy, wyprodukowane przez firmę *Brown-Boveri*, zasilane napięciem trójfazowym o wartości 750 V i częstotliwości 40 Hz (fot. 2.7). Moc pojazdów wynosiła 420 kW. Możliwe były tylko dwie zadane, ustalone prędkości jazdy, tj. 18 i 36 km/h. Zmiana prędkości odbywała się przez przełączenie liczby par biegunów w silnikach trakcyjnych. Wykorzystanie trójfazowego napięcia zasilania wymagało zastosowania dwuprzewodowej, górnej sieci trakcyjnej. Dwie fazy napięcia były podłączone do sieci górnej, a trzecia faza do szyn jezdnych. Bardzo komplikowało to budowę sieci i utrudniało zapewnienie izolacji międzyfazowej, zwłaszcza na rozjazdach.

Kolejną dziedziną transportu, w której próbowano (z powodzeniem) zastosować pojazdy elektryczne, było metro. Pierwsza linia metra została otwarta w Londynie 11 stycznia 1863 roku, jednak przez prawie 30 lat eksploatacji wykorzystywano tam wyłącznie trakcję parową. Dopiero na nowo powstałej głębiniowej linii, zbudowanej przez *City and South London Railway* w 1890 roku, zastosowano trakcję elektryczną. Pociągi metra były ciągnięte przez lokomotywy dwuosiove o mocy 70 kW, zasilane napięciem 500 V DC. Prędkość jazdy wynosiła 22 km/h (fot. 2.8). Jako ciekawostkę można podać fakt, że przez pierwszy okres na linii jeździły wagony bez okien, wyposażone jedynie w małe wzierniki, gdyż producenci doszli do wniosku, że są one niepotrzebne, ponieważ podróż i tak odbywa się pod ziemią. Dopiero po protestach pasażerów dokonano przebudowy i zamontowano okna, takie jak w innych wagonach.



Fot. 2.8. Pierwsza elektryczna lokomotywa metra – 1890 [7]

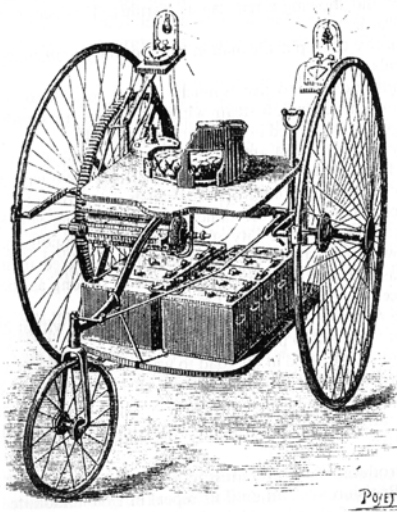
Druga zelektryfikowana linia metra w Europie została zbudowana w Budapeszcie. Oddano ją do eksploatacji 2 maja 1896 roku. Długość wynosiła 3,7 km. Obsługiwana była elektrycznymi wagonami motorowymi zasilanymi, nietypowo jak na metro, z nisko zawieszanej górnej sieci jezdnej napięciem 550 V DC (fot. 2.9). Niskie zawieszenie sieci wymagało zastosowania nietypowych odbieraków prądu. Wagony pochodzące z pierwszego okresu eksploatacji były w użyciu bardzo długo, bo aż do 1970 roku.



Fot. 2.9. Elektryczny wagon motorowy metra w Budapeszcie – 1896 (fot. ze zbiorów autora)

Koniec XIX stulecia to również pierwsze konstrukcje samochodów zasilanych energią elektryczną. Jednym z pionierskich pojazdów tego typu był trójkołowiec zbudowany w Anglii przez W. Ayrtona i J. Perrye'go (patrz rys. 2.2). Był to jednoosobowy wehikul napędzany silnikiem prądu stałego o mocy 1,5 kW, zasilany z baterii akumulatorów. Regulacja prędkości odbywała

się w sposób bezstratny, poprzez przelączenie zacisków baterii i tym samym zmianę wartości napięcia zasilania. Prędkość maksymalna wynosiła 14 km/h (przy pełnym napięciu 20 V), a zasięg wahał się od 15 do 40 km, w zależności od prędkości jazdy.



Rys. 2.2. Pierwszy samochód elektryczny – 1882
[47]

około 25 km/h. Wadą samochodu była bardzo duża masa własna, wynosząca 2 tony, wynikająca z masy baterii. Wyprodukowano zaledwie 11 sztuk tego pojazdu [50].



Fot. 2.10. Samochód elektryczny firmy *Morrison Electric* – 1890 [50]

Pierwszy samochód, który przekroczył prędkość 100 km/h, również napędzany był energią elektryczną. Był to wehikul o kształcie pocisku, napędzany dwoma silnikami o łącznej mocy 50 kW, zasilanymi z baterii kwasowo-olowiowej o napięciu nominalnym 200 V (fot. 2.11). Rekordowa prędkość osiągnięta 29 kwietnia 1899 roku wyniosła 105,85 km/h.



Fot. 2.11. Samochód *La Jamais Contente* – 1899 [51]

Godnym uwagi samochodem elektrycznym jest konstrukcja Ferdynanda Porsche'a, zaprezentowana w Paryżu 14 kwietnia 1900 roku, znana jako *Lohner-Wagen* (fot. 2.12). Pojazd ten był napędzany dwoma silnikami elektrycznymi, o mocy łącznej 3,5 kW, zasilanymi z baterii akumu-

latorów o pojemności 300 Ah przy napięciu 80 V. Ilość zgromadzonej energii wystarczała na przejechanie 50 km z prędkością maksymalną 50 km/h. Samochód miał trójstopniową regulację prędkości jazdy. Można było ustawić prędkość minimalną (17 km/h); normalną (37 km/h) i maksymalną (50 km/h) [52].



Fot. 2.12. Porsche nr 1 *Lobner-Wagen* – 1900 [52]

Ciekawostką jest fakt, że zastosowano w tym samochodzie napęd bezprzekładniowy z silnikami umieszczonymi w piastach przednich kół (widoczne na fotografii). Takie rozwiązanie przeniesienia momentu napędowego jest i dziś uznawane za nowatorskie, lecz ze względu na problemy konstrukcyjne związane z wymaganą małą prędkością obrotową silnika bywa stosowane stosunkowo rzadko.

2.3. Rozwój i stabilizacja, lata 1900 ÷ 1950

Doświadczenia lat 1880 ÷ 1900 pokazały szereg praktycznych zalet pojazdów elektrycznych. Technologia ta doskonale zdała egzamin w pojazdach tramwajowych. Dokonano pierwszych wdrożeń w systemach kolei i metra. Również okazało się możliwe skonstruowanie samochodu elektrycznego.

Początek XX wieku to budowa nowych oraz elektryfikacja już istniejących linii podmiejskich i metra. Obsługa tych linii wymaga dużej dynamiki jazdy pomiędzy blisko rozmieszczonymi przystankami, a więc sporych wartości przyspieszeń rozruchu i opóźnień hamowania. Pociągi zestawione z lokomotyw i wagonów nie zapewniają żądanych parametrów trakcyjnych ze względu na niekorzystny stosunek liczby osi napędnych do całkowitej liczby osi pociągu. Dlatego obsługa linii metra i podmiejskich składami lokomotywa + wagony była niepraktyczna. Opracowano więc, specjalnie na potrzeby kolejowej komunikacji aglomeracyjnej, nowy rodzaj pojazdu elektrycznego, a mianowicie zespoły trakcyjne. Są to kilkuwagonowe normalnie nierozłączalne jednostki, złożone z wagonów silnikowych i doczepnych zestawianych w różnych konfiguracjach.

cyjach bez wyróżnionej lokomotywy. Elementy wyposażenia elektrycznego wozów silnikowych umieszczone są pod podłogą i na dachu pojazdu. Pierwszy elektryczny zespół trakcyjny (EZT) wszedł do eksploatacji 13 czerwca 1900 roku w Berlinie na linii Wannseebahn, obecnie wchodzącej w sieć kolei podmiejskiej S-Bahn (fot. 2.13).



Fot. 2.13. Pierwszy elektryczny zespół trakcyjny – 1900 (fot. ze zbiorów autora)

Pojazd ten zasilany był napięciem stałym o wartości 750 V z trzeciej szyny. Ten sposób zasilania został później przyjęty jako standard dla większości linii metra i kolei podmiejskich. Moc jednostki napędowej wynosiła 300 kW, co pozwalało osiągnąć prędkość 55 km/h.

Sieci metra i kolei podmiejskiej były jednym z głównych czynników prorozwojowych dużych aglomeracji miejskich. Pozwalały na szybki i tani dojazd do centrów miast, przy niewielkim negatywnym oddziaływaniu na otoczenie. Jednocześnie pasażerowie mieli zagwarantowaną bardzo wysoki poziom jakości usług i komfortu podróży, odbiegający nieraz znacznie od tego, jaki występuje obecnie. Na fot. 2.14 pokazano wnętrze wagonu berlińskiej kolei podmiejskiej w 1925 roku.

Pierwsze lata XX wieku to również początek elektryfikacji linii kolejowych na nieco większą skalę. Początkowo, ze względu na duże koszty, elektryfikowano te linie, na których przewaga trakcji elektrycznej nad trakcją parową jest najbardziej widoczna. Były to linie górskie, prowadzone



Fot. 2.14. Wnętrze wagonu kolei podmiejskiej – 1925 (fot. ze zbiorów autora)

w trudnym terenie, o sporych nachyleniach, czy przebiegające przez długie tunele. Krajem wiodącym w elektryfikacji była Szwajcaria, gdzie dodatkowym czynnikiem przyspieszającym ten proces był brak własnych zasobów węgla.

Warto tutaj odnotować budowę otwartej w 1906 roku zelektryfikowanej linii Loetschberg-Simplon, która jako pierwsza od początku była projektowana pod kątem zastosowania trakcji elektrycznej. Wiązało się to z decyzją przebicia najdłuższego wówczas na świecie (23 km) tunelu pod przełęczą Simplon. Na linii wykorzystano system trójfazowy o napięciu 3000 V i częstotliwości obniżonej do 16 Hz. Lokomotywy dostarczone do obsługi linii przez firmę *Brown-Boveri*, o układzie osi 1-C-1 miały moc 730 kW i prędkość 35 km/h (fot. 2.15).

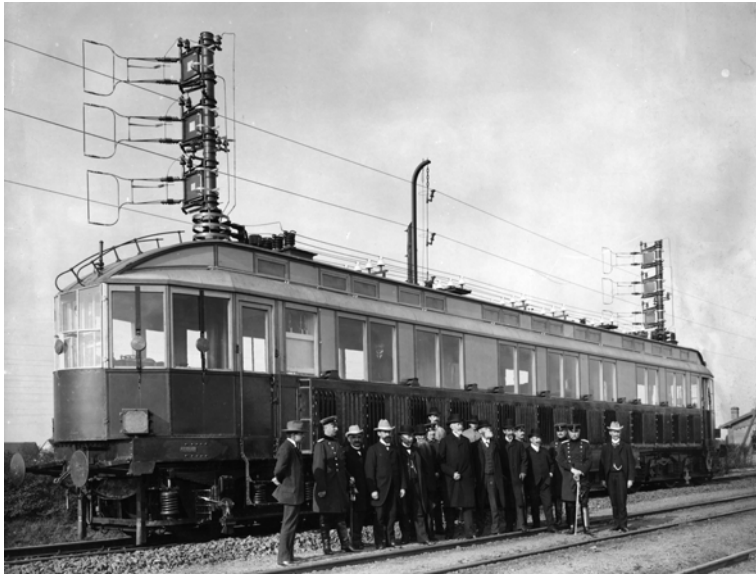


Fot. 2.15. Lokomotywa trójfazowa 1-C-1 linii Simplońskiej – 1906 (fot. ze zbiorów autora)

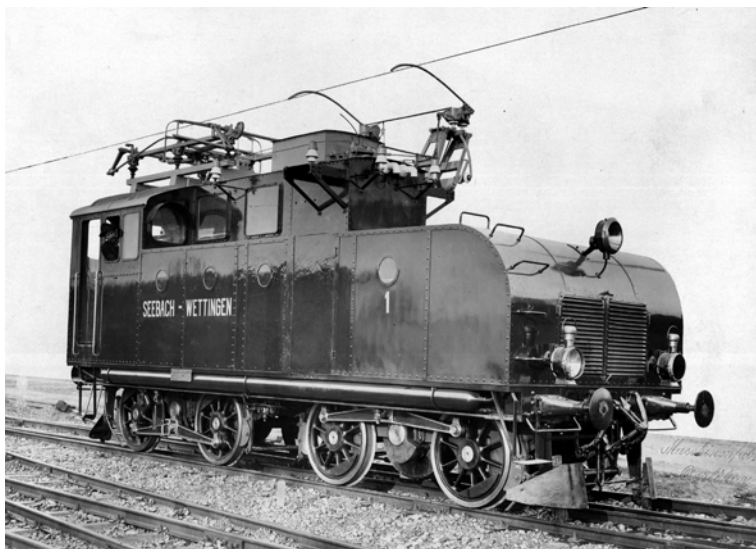
Kolejnym interesującym wydarzeniem były próby zastosowania trójfazowego napięcia o wartości 10 kV. Prace przeprowadzono na linii Zossen-Marienfelde przy udziale firm *Siemens* i *AEG*. W trakcie tych prób eksperymentalny wagon motorowy osiągnął niewiarygodną jak na owe czasy prędkość 203 km/h [18]. Wagon ten, o masie 94,5 t, pobierał moc 2,2 MW i był zasilany z trójprzewodowej bocznej sieci trakcyjnej za pomocą nietypowych odbieraków prądu (fot. 2.16). Wysokie napięcie było obniżane w transformatorze pojazdowym do wartości 1150 V i podawane na trójfazowe silniki trakcyjne. Takie ułożenie sieci trakcyjnej nie mogło znaleźć praktycznego zastosowania z przyczyn technicznych. Nie było możliwe w tym układzie np. wykonanie rozjazdu sieciowego. Jednak próby te pokazały, mimo wczesnego etapu rozwoju, jak duże możliwości daje zastosowanie energii elektrycznej do napędu pojazdów.

Skomplikowana budowa sieci trakcyjnej w systemach trójfazowych napięcia przemiennego skłoniła do prób z nowym systemem zasilania pojazdów kolejowych. Uwagę skierowano na system jednofazowy napięcia przemiennego, który pozwalał na uproszczenie sieci trakcyjnej do jednego przewodu zasilającego. Pierwsze doświadczenia z tym systemem przeprowadzono w latach 1905 ÷ 1907 w Szwajcarii na linii Seebach-Wettingen o długości 23 km. Zastosowano napięcie o wartości 15 kV i częstotliwości przemysłowej 50 Hz. Pierwsza lokomotywa wyposażona była w przetwornicę elektromaszynową. Napięcie sieci, obniżone poprzez transformator

do 700 V, zasilano przetwornicę o mocy 400 kW, na której wyjściu otrzymywano napięcie 600 V DC. Tym napięciem zasilano dwa silniki bocznikowe prądu stałego o mocy 150 kW każdy. Nieco później, w związku z wyprodukowaniem przez firmę *Oerlikon* poprawnie funkcjonującego jednofazowego silnika komutatorowego prądu przemiennego, lokomotywę przekonstruowano, zastępując przetwornicę i silniki prądu stałego silnikami jednofazowymi, każdy o mocy 180 kW. Zastosowanie silnika prądu przemiennego wymagało jednak obniżenia częstotliwości napięcia zasilającego do 15 Hz, ponieważ pojawiły się problemy z komutacją w silniku. Pojazd ten rozwijał prędkość 60 km/h. Lokomotywę tę możemy zobaczyć na fot. 2.17.



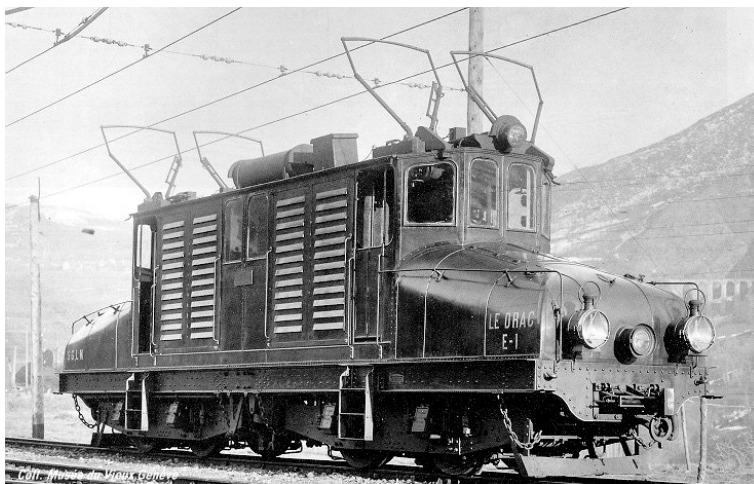
Fot. 2.16. Eksperymentalny wagon motorowy linii Zossen-Marienfelde – 1903 (fot. ze zbiorów autora)



Fot. 2.17. Pierwsza lokomotywa zasilana napięciem przemiennym jednofazowym – 1905 (fot. ze zbiorów autora)

Pomimo że próbną eksploatację zakończono po półtora roku i urządzenia elektryczne zdemontowano, to zebrane doświadczenia przesądziły o wyborze systemu 15 kV 15 Hz do elektryfikacji głównych linii kolejowych w Szwajcarii. Za jej przykładem poszły Niemcy i inne kraje rozpoczynające elektryfikację linii kolejowych w tamtym okresie (Szwecja, Norwegia). Po pewnym czasie, z przyczyn technicznych, częstotliwość podniesiono do 16 i 2/3 Hz. W tej formie system ten jest użytkowany do dnia dzisiejszego.

Równolegle prowadzono prace nad zastosowaniem do zasilania pojazdów napięcia stałego o dużej wartości. Napięcie stosowane w sieciach tramwajowych (600 V) okazało się zbyt niskie na potrzeby lokomotyw. Przeszkodą w jego podniesieniu była trudność w zbudowaniu silnika o wystarczająco wysokiej wytrzymałości elektrycznej izolacji. Pierwszą próbą zastosowania napięcia stałego o wysokiej wartości było zelektryfikowanie w 1903 roku francuskiej linii St. George-de-Commiers – La Mure długości 30 km. Wykorzystano tam napięcie stałe o wartości 2400 V. Dostarczano je do pojazdu za pośrednictwem sieci dwuprzewodowej, dwubiegunowej, o potencjalach odpowiednio +1200 i -1200 V względem zerowego potencjału szyn. W ten sposób ominięto częściowo problem wytrzymałości izolacji silników trakcyjnych, gdyż różnica potencjałów względem zera zasilania nigdy nie przekraczała 1200 V. Do obsługi linii zastosowano lokomotywy w układzie osi Bo-Bo o mocy nominalnej 360 kW i prędkości maksymalnej 22,5 km/h (patrz fot. 2.18). Były one w stanie prowadzić pociągi o masie 108 t, po nachyleniu sięgającym 26,3‰ [13]. Próba ta wykazała, że jest możliwe zastosowanie systemów napięcia stałego do elektryfikacji linii kolejowych. Jednak dwubiegunowe zasilanie nie oferowało uproszczenia konstrukcji sieci trakcyjnej w porównaniu z systemami trójfazowymi napięcia przemiennego. To sprawiło, że system ten nie został rozpowszechniony, a jego eksploatację zakończono w latach 50. XX wieku.



Fot. 2.18. Pierwsza lokomotywa zasilana napięciem stałym o dużej wartości – 1903 [13]

Opracowane na przełomie XIX i XX wieku systemy zasilania pojazdów kolejowych nie były pozbawione wad. Złożona budowa sieci trakcyjnej w systemach trójfazowych napięcia przemiennego czy dwubiegunowych napięcia stałego oraz konieczność montowania w pojazdach ciężkiego transformatora w systemie napięcia przemiennego o obniżonej częstotliwości powo-

dowały, że żaden z tych systemów nie był idealny. Połączeniem prostej budowy sieci trakcyjnej i braku transformatora w pojazdach był jednobiegunowy system napięcia stałego o wysokiej wartości. Amerykańska kompania *The Chicago, Milwaukee and St. Paul Railroad* jako pierwsza podjęła decyzję o elektryfikacji swojej sieci kolejowej systemem 3 kV napięcia stałego. Było to możliwe po skonstruowaniu, około 1910 roku, silnika prądu stałego na napięcie znamionowe 1500 V. 30 listopada 1915 roku oddano do użytku pierwszy odcinek długości 180 km pomiędzy Three Forks a Deer Lodge, a do roku 1920 zelektryfikowano 1062 kilometrów tras. Do obsługi linii zbudowano potężne 12-osiove lokomotywy o długości ponad 35 metrów, masie całkowitej 254 tony i mocy ciąglej wynoszącej 2,2 MW (fot. 2.19).



Fot. 2.19. Pierwsza lokomotywa zasilana z napięcia stałego 3000 V – 1915 [6]

Sukces przedsięwzięcia sprawił, że wiele innych krajów rozpoczynających elektryfikację swoich sieci kolejowych w latach 20. i 30. wybierało systemy napięcia stałego o wysokiej wartości. Decydowano się na wariant 1500 V (Francja, Belgia, Holandia), lub też częściej na 3000 V (Hiszpania, Włochy, Czechosłowacja, ZSRR, Polska).

Wszystkie prace pokrótce opisane powyżej zaowocowały powstaniem trzech standardowych systemów elektryfikacji linii kolejowych, a mianowicie: napięcia przemiennego 15 kV, 15 Hz (16 i 2/3 Hz) oraz napięcia stałego o wartościach 3000 V lub 1500 V. Systemy napięcia trójfazowego, rozbudowane najbardziej w rejonach południowej Szwajcarii i północnych Włoch, były od lat 30. XX wieku powoli, ale sukcesywnie zastępowane i ich eksploatację na liniach głównych zakończono w latach 70. Elektryfikacja najszybciej postępowała tam, gdzie jej przewaga nad trakcją parową była najbardziej widoczna, czyli w rejonach górzystych, tj. w Szwajcarii, gdzie już w roku 1928 połowa długości wszystkich linii kolejowych była zelektryfikowana, oraz w południowych Niemczech i na Śląsku. Stan elektryfikacji w Europie centralnej w roku 1928 przedstawia mapa pokazana na rys. 2.3.

W latach I wojny światowej pojawiła się odmiana znanego już wcześniej elektrycznego zespołu trakcyjnego, różniącego się od wcześniejszych konstrukcji sposobem zasilania. Dotychczas budowane pojazdy były zasilane z napięcia stałego o wartości około 750 V. Ich stosowanie wymagało zatem całkowitej separacji linii przez nie obsługiwanych od innych zelektryfikowanych odcinków kolei głównych. Było to akceptowalne, a wręcz wskazane, w dużych ośrodkach

2. Historia pojazdów elektrycznych

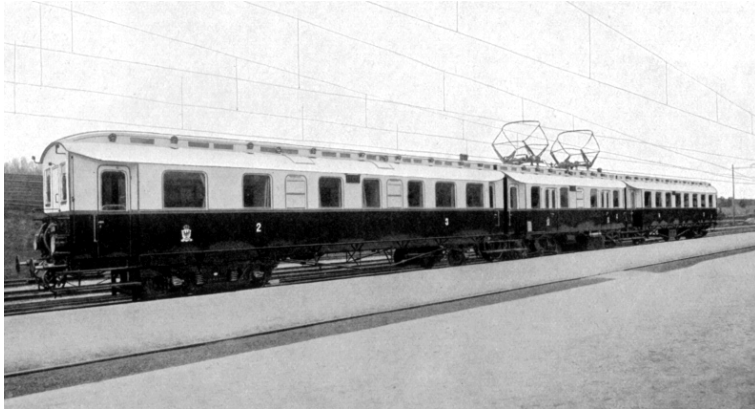
budujących sieci metra lub naziemnej kolei miejskiej. Aby umożliwić obsługę ruchem aglomeracyjnym tych miejsc, gdzie budowa wydzielonej linii kolei miejskiej była nieuzasadniona z ekonomicznego i eksploatacyjnego punktu widzenia, opracowano elektryczny zespół trakcyjny zasilany z napięcia kolei głównych. Pierwszy taki pojazd oddano do eksploatacji w 1914 roku. Był to zespół o oznaczeniu ET 87, zasilany z napięcia przemiennego 15 kV 16 i 2/3 Hz, o mocy ciągłej 376 kW i prędkości maksymalnej 70 km/h (fot. 2.20). W początkowym okresie eksploatacji jednostki te obsługiwały linie podmiejskie i regionalne w okolicy dzisiejszego Wrocławia.

Należy odnotować również pojawienie się w latach 20. lokomotyw spalinowo-elektrycznych. Próby zastosowania silnika spalinowego do napędów pojazdów kolejowych były prowadzone od końca XIX wieku, jednak bardzo długo nie uzyskiwano zadowalających wyników. Głównym problemem było rozwiązanie przeniesienia napędu z silnika spalinowego na koła pojazdu. Dopiero wykorzystanie przekładni elektrycznej umożliwiło budowę użytecznej lokomotywy z napędem spalinowym. Pierwsze takie pojazdy pojawiły się równolegle w Niemczech i Związku Radzieckim w roku 1924 [11]. Lokomotywa niemiecka miała silnik o mocy 150 kW i rozwijała prędkość 60 km/h. Nadawała się więc do prac manewrowych i prowadzenia lekkich pociągów.

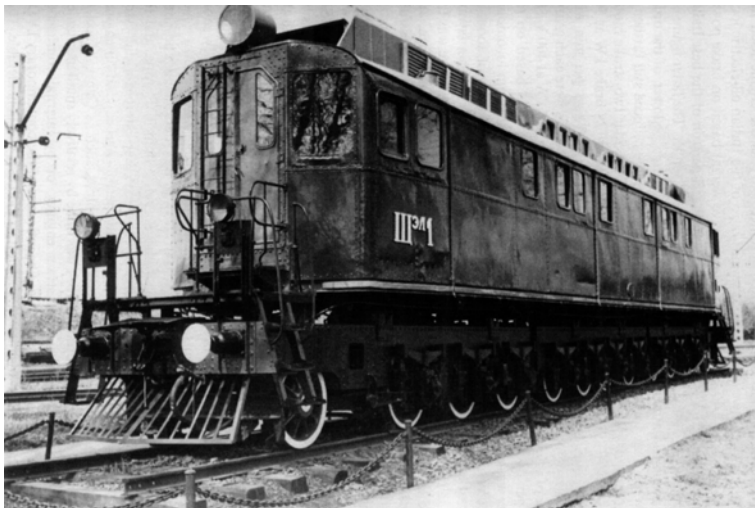


Rys. 2.3. Linie zelektryfikowane w Europie centralnej w roku 1928 [14]

Na szczególną uwagę zasługuje konstrukcja radziecka, oznaczona symbolem III³⁴1, o układzie osi 1-Co-Do-Co-1, będąca pierwszą na świecie spalinowo-elektryczną lokomotywą liniową (fot. 2.21). Źródłem energii był silnik o mocy 730 kW pochodzący od łodzi podwodnej, napędzający dwa generatory elektryczne. Energia elektryczna zasilala 10 silników trakcyjnych, indywidualnie napędzających zestawy kołowe. Pozwalało to na osiągnięcie prędkości maksymalnej 75 km/h. Ciężar pojazdu wynosił 180 t. Lokomotywa była eksploatowana na linii Moskwa-Kursk. Jednak konieczność częstego usuwania usterek, występujących jak zawsze w każdej prototypowej konstrukcji spowodowała, że po dwóch latach wycofano ją z użytku. Od 1934 lokomotywa była wykorzystywana jako przewoźny generator energii elektrycznej.



Fot. 2.20. Pierwszy elektryczny zespół trakcyjny zasilany z napięcia kolei głównych – 1914 [55]



Fot. 2.21. Pierwsza lokomotywa spalinowo-elektryczna dużej mocy – 1924 [7]

Pierwsze dekady XX wieku nie przyniosły znaczącego postępu w budowie tramwajów. Wykształcone pod koniec XIX wieku dwuosiowe konstrukcje pojazdów silnikowych o mocy nominalnej wynoszącej około 40 ÷ 100 kW w połączeniu z wagonami doczepnymi zaspokajały ów-

czesne potrzeby transportowe miast. Przykładową konstrukcję wozu tramwajowego z lat 20. pokazano na fot. 2.22.



Fot. 2.22. Typowa konstrukcja tramwaju lat 20. XX wieku – *Bergmann 1927* (fot. autora)

Były to tzw. pojazdy wolnobieżne, gdyż ich prędkość maksymalna wynosiła około 50 km/h. Pojawiła się jednak w tym okresie konstrukcja zwiastująca przyszłe kierunki rozwoju pojazdów tramwajowych. Był to protoplasta wszystkich nowoczesnych wozów szybkieźnych, tramwaj PCC (*President's Conference Committee*). Pojazd pokazano na fot. 2.23.

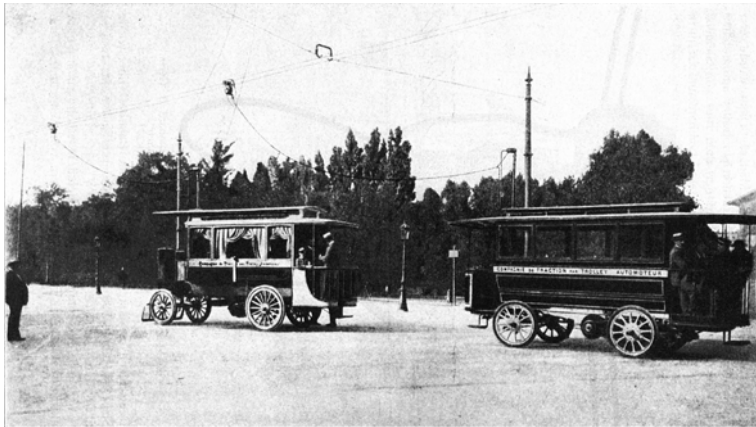


Fot. 2.23. Tramwaj PCC – 1936 [53]

Model ten został opracowany w Stanach Zjednoczonych z inicjatywy *Zrzeszenia Dyrektorów Przedsiębiorstw Komunikacyjnych* (stąd nazwa) pod koniec lat 20., a pierwszy egzemplarz zaprezentowano 1 października 1936 roku (długi czas pomiędzy opracowaniem a zaprezentowaniem był rezultatem Wielkiego Kryzysu 1929 roku). Celem projektu było polepszenie parametrów rucho-

wych pojazdów tramwajowych. Dotychczas eksploatowane wozy wolnobieżne zaczęły przeskadzać w narastającym coraz bardziej ruchu pojazdów drogowych. Nowo opracowana konstrukcja, napędzana czterema silnikami o łącznej mocy 160 kW, mogła osiągać przyspieszenie rozruchu sięgające $1,9 \text{ m/s}^2$ i robocze opóźnienie hamowania $1,6 \text{ m/s}^2$ (maksymalne, awaryjne opóźnienie hamowania wynosiło 4 m/s^2). Aby umożliwić jednoczesną eksploatację nowych tramwajów z dotychczas używanymi wozami wolnobieżnymi nie zmieniono nominalnej wartości napięcia zasilania (600 V DC). Osiągnięte dobre parametry trakcyjne pozwoliły na współistnienie ruchu pojazdów tramwajowych i samochodowych. Ten model tramwaju był pierwowzorem, na którym opierały się praktycznie wszystkie konstrukcje pochodzące z lat 50. i 60., eksploatowane w większości do dnia dzisiejszego.

Nie licząc eksperymentów Siemens z prototypem trolejbusu w roku 1882, pierwszą komercyjną linię tego środka transportu otwarto w Paryżu w roku 1900 z okazji organizowanej w tym mieście Wystawy Światowej. Pojazdy i osprzęt elektrotechniczny zbudowała, po czteroletnim okresie prób, francuska firma *Lombard & G erin*, wzorujac się na eksperymentalnym rozwiazaniu Siemens (fot. 2.24).



Fot. 2.24. Pierwsza komercyjna linia trolejbusowa – 1900 [4]

Zasilanie bylo zrealizowane z gornej dwubiegunowej sieci trakcyjnej za pomoca odbierakow wozkowych polaczonych z pojazdami elastycznym przewodem. Wartość napięcia zasilającego wynosiła 500 V DC. W ślad za tą pierwszą linią szereg miast, głównie europejskich, zbudowało następne. Jednak po kilkuletnim okresie eksploatacji ich funkcjonowanie w większości przypadków zawieszano. Powodem był znacznie niższy komfort jazdy w porównaniu do tramwajów, co wywoływało niechęć pasażerów do tego środka transportu. Wynikało to ze stosowania twardych kół, wyposażonych w obręcze wykonane z pełnej gumy, co w połączeniu z brukowanymi nawierzchniami ulic było źródłem nieprzyjemnych wstrząsów i drgań. Dopiero wprowadzenie do powszechnego użytku opon pneumatycznych sprawiło, że trolejbusy wróciły do łask. Dodatkowo zastosowanie używanych do dziś indywidualnych odbieraków drążkowych przyczyniło się do szerszego upowszechnienia w latach 20. i 30. systemów trolejbusowych (m.in. w 1930 roku uruchomiono w Poznaniu pierwszą linię trolejbusową w Polsce). Standardowo wykorzystywano zasilanie napięciem stałym o wartości 550 V, a moce silników wynosiły około $35 \div 50 \text{ kW}$. Przy-

kładowy pojazd z tamtego okresu pokazano na fot. 2.25. Szczególnie intensywna rozbudowa i budowa nowych sieci trolejbusowych miała miejsce podczas II wojny światowej i była związana z brakiem i ścisłą reglamentacją paliw płynnych. Budowa linii trolejbusowych okazała się wówczas doskonałym rozwiązaniem problemów komunikacyjnych w miastach. Powstawały nawet linie międzymiastowe (Szwajcaria). Między innymi w tym okresie zbudowano sieć w Gdyni.



Fot. 2.25. Typowy trolejbus z lat 30. XX wieku (fot. ze zbiorów autora)

Lata 1900 ÷ 1914 to okres „*złotej ery*” w historii samochodów elektrycznych. W roku 1903 samochody elektryczne stanowiły ponad połowę wszystkich pojazdów silnikowych poruszających się po ulicach Londynu. Podobnie sytuacja wyglądała w innych miastach ówczesnej Europy i Stanów Zjednoczonych. Powodem tej sytuacji był fakt, że nie wynaleziono jeszcze rozrusznika do silnika spalinowego. Uruchomienie więc takiego samochodu było czynnością skomplikowaną, wymagającą dużej siły fizycznej, a czasami nawet niebezpieczną. Ponadto ówczesne silniki spalinowe, będące na wczesnym etapie rozwoju, były wrażliwe na niskie temperatury i uruchomienie takiego silnika w warunkach zimowych było praktycznie niemożliwe. Korzystali z tego producenci samochodów elektrycznych, reklamując swoje pojazdy jako ciche, proste w obsłudze i niezawodne w każdych warunkach atmosferycznych (rys. 2.4). Samochody elektryczne produkowało wiele firm. Można tu wymienić takie jak: *National Electric*, *Grinnel*, *Argo Electric*, *Baker Electric*, *Babcock Electric* czy najbardziej znana *Detroit Electric*. Typowy pojazd tego okresu przedstawiono na fot. 2.26. Jego zasięg wynosił około 130 km, przy prędkości maksymalnej 32 km/h. Był to więc pojazd idealny do zastosowań miejskich. Produkowano zarówno samochody osobowe, jak i dostawcze. Jednak uruchomienie przez *Ford Motor Company* produkcji na masową skalę modelu *Ford T* w roku 1908 sprawiło, że udział samochodów z silnikiem spalinowym zaczął rosnąć. Ponadto postęp w konstrukcji samego silnika spalinowego i stopniowa eliminacja jego wad oraz skonstruowanie rozrusznika ułatwiającego uruchomienie pojazdu dodatkowo przechyliło szalę na korzyść pojazdów ze spalaniem wewnętrznym. Znaczenie miał również fakt, że cena tych samochodów była znacznie niższa niż elektrycznych. To sprawiło, że sprzedaż tych ostatnich zaczęła spadać. Jako ostatnia zaprzestala produkcji firma *Detroit Electric* w 1939 roku. Od tego czasu samochodowe pojazdy elektryczne były wykorzystywane jedynie jako wózki

akumulatorowe do przewozu towarów w zakładach przemysłowych, czy poczty na dworcach kolejowych.



FORTY-FOUR below zero or 110° in the shade has no terrors for the Detroit Electric Commercial Vehicle, equipped with the Thomas A. Edison Battery.

With the mercury standing at 44° below zero in Winnipeg, Detroit Electric Commercial Vehicles were on the streets giving their regular service, although traffic in general was at a standstill. Think of it. The cold was so intense that even telegraph wires were snapped.

At the same time Detroit Electric Commercial Vehicles were giving equally good service in sunny Southern California.

THE
Detroit
ELECTRIC

Detroit Electric Commercial Vehicles are designed for the use of the Edison Battery only, which in a Detroit Electric Commercial Vehicle, is 300 pounds lighter than a lead battery equipment. Still more weight is saved by the lighter construction possible throughout the entire car.

Electricity is the most economical power in existence. Its operation is cheaper, the maintenance cost, whether per ton, per mile, per package or per year, is the lowest yet obtained by any commercial vehicle.

48-page catalog, giving complete information and prices, will be sent on request.

Anderson Electric Car Company, 453 Clay Avenue
DETROIT, MICHIGAN

BRANCHES:—NEW YORK, Broadway at 80th Street
Brooklyn Buffalo CHICAGO, 2416 Michigan Avenue (Also branch at Evanston, Ill.)
Cleveland Kansas City Minneapolis St. Louis

Selling Representatives in Leading Cities

Rys. 2.4. Reklama firmy *Detroit Electric* – 1912 [44]



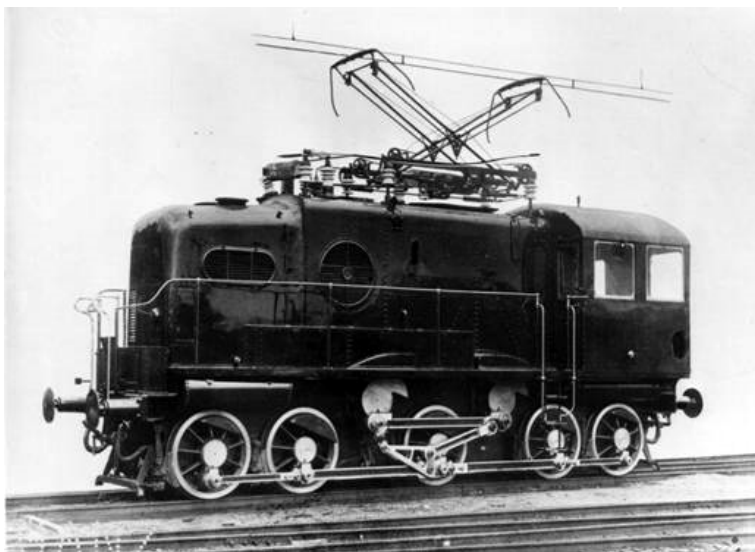
Fot. 2.26. Samochód *Detroit Electric*, model 1916 [54]

2.4. Historia najnowsza – od 1950

Pierwsze lata powojenne to prace nad ostatecznym ukształtowaniem się najnowszego jak na razie systemu zasilania pojazdów kolejowych napięciem przemiennym jednofazowym o wartości 25 kV i częstotliwości 50 Hz. Próby zastosowania do zasilania lokomotyw napięcia o częstotliwości przemysłowej miały miejsce już przed wojną. Pierwszy udany eksperyment odbył się na Węgrzech, gdzie pod kierunkiem inżyniera Kálmána Kandó uruchomiono około roku 1918 próbną linię zasilaną napięciem 16 kV 50 Hz. Poruszały się po niej lokomotywy wyposażone w przetwornik faz zamieniający jednofazowe napięcia 16 kV na wielofazowe o napięciu około 1000 V. Przetwornik ten zasilal jeden silnik trakcyjny napędzający koła pojazdu za pośrednictwem układu wiązarów. Prędkość maksymalna lokomotywy wynosiła 68 km/h (fot. 2.27).

Te zakończone sukcesem próby zachęciły do dalszych prac nad pojazdami zasilanymi napięciem o częstotliwości sieciowej. Były one realizowane w Niemczech, gdzie w 1920 roku zdecydowano się na elektryfikację linii Hoellenthal, o długości 55 km, systemem 20 kV 50 Hz. Do obsługi tej eksperymentalnej linii zbudowano cztery typy lokomotyw, aby sprawdzić, który ze znanych wtedy sposobów zasilania pojazdu napięciem o takich parametrach będzie najlepszy. Pierwszy typ, firmy *Siemens*, był wyposażony w urządzenia przetwarzające napięcie o częstotliwości przemysłowej na napięcie o częstotliwości obniżonej, zasilające jednofazowy silnik komutatorowy prądu przemiennego. Drugi wariant, zbudowany przez firmę *Brown-Boveri*, miał ręciovne prostowniki przetwarzające napięcie przemiennie na stałe i silniki szeregowo-prądowe. Trzeci rodzaj, firmy *AEG*, podobnie jak drugi, był wyposażony w prostownik ręc-

ciowy, a ostatni, wykonany przez konsorcjum firm *Krupp-Punga-Schoen*, miał przetwornik wirujący zamieniający napięcie jednofazowe w trójfazowe zasilające silniki indukcyjne.



Fot. 2.27. Lokomotywa *Kandó-Ganz*, 16 kV 50 Hz [13]



Fot. 2.28. Eksperymentalna lokomotywa zasilana napięciem 20 kV 50 Hz – 1920 [8]

Te zakończone sukcesem próby zachęciły do dalszych prac nad pojazdami zasilanymi napięciem o częstotliwości sieciowej. Były one realizowane w Niemczech, gdzie w 1920 roku zdecydowano się na elektryfikację linii Hoellenthal, o długości 55 km, systemem 20 kV 50 Hz. Do obsługi tej eksperymentalnej linii zbudowano cztery typy lokomotyw, aby sprawdzić, który ze znanych wtedy sposobów zasilania pojazdu napięciem o takich parametrach będzie najlepszy. Pierwszy typ, firmy *Siemens*, był wyposażony w urządzenia przetwarzające napięcie o częstotliwości przemysłowej na napięcie o częstotliwości obniżonej, zasilające jednofazowy silnik komutatorowy prądu przemiennego. Drugi wariant, zbudowany przez firmę *Brown-Boveri*, posiadał ręc-

ciowe prostowniki przetwarzające napięcie przemiennie na stałe i silniki szeregowo prądu stałego (fot. 2.28). Trzeci rodzaj, firmy *AEG*, podobnie jak drugi był wyposażony w prostownik rctęciowy, a ostatni, wykonany przez konsorcjum firm *Krupp-Punga-Schoen*, posiadał przetwornik wirujący zamieniający napięcie jednofazowe w trójfazowe zasilające silniki indukcyjne. Po wojnie linia ta weszła do francuskiej strefy okupacyjnej, co pozwoliło na zapoznanie się przez francuskich inżynierów z wynikami eksploatacji tego systemu zasilania. Ponieważ wyniki były pozytywne, Francuskie Koleje Państwowe zdecydowały się na próbną elektryfikację 76 kilometrowego odcinka linii Genewa-Chamonix, pomiędzy Aix-les-Bains a La-Roche-sur-Foron właśnie systemem 20 kV 50 Hz. Na etapie prac projektowych podniesiono założoną wartość napięcia do 25 kV. Eksploatację nowego systemu rozpoczęto w 1951 roku, po dostarczeniu lokomotyw do obsługi linii zbudowanych przez firmy *Oerlikon* (część elektryczna) i *SLM-Winterthur* (część mechaniczna). Były to lokomotywy o układzie osi Co-Co, o mocy 3,15 MW i prędkości maksymalnej 100 km/h. Ciężar całkowity pojazdu wynosił 104 t. Jednocześnie były to lokomotywy dwusystemowe, gdyż warunkiem zamawiającego (*SNCF*) była możliwość eksploatacji tych maszyn również przy napięciu zasilającym 1500 V DC, stosowanym na pozostałych zelektryfikowanych liniach we Francji. Pojazd ten pokazano na fot. 2.29.



Fot. 2.29. Pierwsza lokomotywa systemu 25 kV 50 Hz – 1951 [56]

Wyniki, jakie uzyskano podczas eksploatacji tego odcinka, pokazały szereg zalet elektryfikacji napięciem o częstotliwości przemysłowej. Sukces był na tyle duży, że *SNCF* zdecydowała o elektryfikacji tym systemem linii Thionville-Valenciennes, jednej z głównych magistral międzynarodowych. A gdy i to przedsięwzięcie zakończyło się pozytywnie, postanowiono, że dalsza elektryfikacja francuskich linii kolejowych będzie prowadzona systemem napięcia przemiennego jednofazowego o wartości 25 kV i częstotliwości przemysłowej 50 Hz.

Lata 50. XX wieku to okres silnej konkurencji ze strony transportu lotniczego i motoryzacji indywidualnej. Kolej musiała więc przedsięwziąć starania o utrzymanie swojej pozycji na rynku. Jedną z metod było zwiększenie prędkości jazdy. Wymagało to przeprowadzenia szeregu prób i opracowania nowych konstrukcji pojazdów. Prace te prowadzono w różnych krajach. Na uwagę

zasługuje tu ustanowienie przez SNCF w dniach 28 i 29 marca 1955 roku rekordu prędkości wynoszącego 331 km/h. Próby były prowadzone dwiema lokomotywami o oznaczeniach CC 7107 i BB 9004. Pierwsza z nich miała moc 3,49 MW i prędkość konstrukcyjną wynoszącą 150 km/h; druga odpowiednio moc 2,98 MW i prędkość 140 km/h. W dniu 28 marca 1955 roku lokomotywa CC 7107 ze składem trzech wagonów pomiarowych osiągnęła prędkość 320,6 km/h. Dzień później druga lokomotywa z identycznym składem wagonów pojechała z rekordową prędkością 331 km/h (fot. 2.30).



Fot. 2.30. Lokomotywa BB 9004 podczas bicia rekordu prędkości (fot. SNCF)

Podczas jazdy moc pobierana z sieci trakcyjnej prawie trzykrotnie przekraczała jej moc nominalną. Jest to do dziś niepobity rekord prędkości pociągu zasilanego z napięcia 1500 V DC. Podczas prób uszkodzeniu uległ odbierak prądu, sieć trakcyjna oraz nastąpiło znaczne odkształcenie nawierzchni torowej (remontowanej przed próbą) na skutek sił dynamicznych pomiędzy lokomotywą a podłożem (fot. 2.31). Eksperyment pokazał, że pociągi zasilane energią elektryczną mogą osiągać bardzo duże prędkości, wymaga to jednak całkowitej przebudowy torowisk i wykorzystania wyższych wartości napięć zasilających.

Musiało upłynąć jeszcze 10 lat, aby pierwsze europejskie pociągi przekroczyły, w regularnej eksploatacji, prędkość 160 km/h. Nastąpiło to w 1965 roku, kiedy koleje niemieckie wprowadziły do ruchu nowe lokomotywy serii E.03 (późniejsze oznaczenie BR 103), produkcji firm Henschel i Siemens (fot. 2.32). Lokomotywy te, zasilane napięciem 15 kV 16 i 2/3 Hz, miały moc ciągłą wynoszącą 5,94 MW, co pozwalało na prowadzenie pociągów ekspresowych z maksymalną prędkością 200 km/h (początkowo wykorzystywano je do



Fot. 2.31. Deformacja nawierzchni po próbie prędkości [10]

obsługi trasy Monachium-Augsburg, dostosowanej fragmentami do tej prędkości). Ta konstrukcja wyznaczyła standard współczesnej jednoczłonowej lokomotywy elektrycznej. Obecnie większość modeli, niezależnie od tego jakim systemem jest zasilana, ma parametry elektryczne i eksploatacyjne podobne do lokomotywy serii *E.03*.



Fot. 2.32. Pierwsza lokomotywa o prędkości maksymalnej 200 km/h (fot. S. Terfloth)

Rok przed wprowadzeniem w Europie prędkości eksploatacyjnej 200 km/h, w Japonii otwarto pierwszą na świecie linię kolei dużych prędkości pomiędzy Tokio a Osaką, o długości 515 km (patrz fot. 2.33). Do jej obsługi skonstruowano elektryczne zespoły trakcyjne nazwane *Shinkansen*, serii 0, o bardzo dużej mocy wynoszącej 11,84 MW, zasilane napięciem 25 kV 60 Hz. Prędkość konstrukcyjna tych jednostek wynosiła 220 km/h. Przez pierwszy okres eksploatacji poruszały się one z prędkością 200 km/h, później została ona podniesiona do 210 km/h. O niezawodności tych pojazdów i dopracowaniu konstrukcji świadczy fakt, że ich eksploatacja zakończyła się dopiero w listopadzie 2008 roku. Linia cieszyła się ogromnym powodzeniem (przez trzy pierwsze lata funkcjonowania przewieziono 100 milionów pasażerów) i wyznaczyła kierunki rozwoju nowoczesnego kolejowego transportu pasażerskiego.

Sukces kolei japońskich skłonił europejskie zarządy kolejowe krajów rozwiniętych do prac nad pociągami dużej prędkości. Najwcześniej były one prowadzone we Francji, gdzie 4 kwietnia 1972 roku rozpoczęto próby z pociągiem *TGV* (*Très Grande Vitesse*). Eksperymentalna jednostka *TGV* (produkcji *Alstom*) była zespołem trakcyjnym składającym się z dwóch jednostek napędowych na obu końcach i trzech wagonów (fot. 2.34). Źródłem energii były cztery turbiny gazowe o łącznej mocy 3,76 MW (po przebudowie 4,4 MW), napędzające za pośrednictwem przekładni elektrycznej 12 silników trakcyjnych. Pojemność zbiorników paliwa wynosiła 8000 litrów. Pojazd ten wykonał 5227 jazd testowych, podczas których przejechał około pół miliona kilometrów. W dniu 8 grudnia 1972 roku została osiągnięta najwyższa prędkość, czyli 318 km/h. Jest to nadal aktualny rekord prędkości pojazdów zasilanych turbiną gazową. Zastosowanie tego rodzaju źródła energii miało na celu zmniejszenie kosztów wdrożenia programu kolei dużych prędkości, gdyż przy takim założeniu nie trzeba było budować infrastruktury elektrotrakcyjnej. Jednak

kryzys paliwowy w 1973 roku i związana z nim znaczna wyżka cen ropy naftowej i paliw kopalnych zweryfikował te plany i seryjnie budowane jednostki miały już zasilanie elektryczne z górnej sieci trakcyjnej. Po trwających prawie 10 lat próbach, 27 sierpnia 1981 roku uroczystie przekazano do eksploatacji pierwszą linię kolei *TGV* z Paryża do Lyonu. Wcześniej, podczas jazd testowych, 26 lutego 1981 ustanowiono nowy rekord prędkości wynoszący 380 km/h. Dokładnie dziesięć lat po Francji, swoje linie dużych prędkości uruchomiły Koleje Niemieckie, inaugurując 29 maja 1991 roku ruch pociągów *ICE* (*Inter City Express*). W następnych latach kolejne kraje w Europie i poza nią uruchamiały, a później rozbudowywały połączenia obsługiwane pociągami dużej prędkości.



Fot. 2.33. Otwarcie pierwszej linii dużej prędkości – Japonia, 1 września 1964 [46]



Fot. 2.34. Prototypowa jednostka *TGV 001* (fot. J. P. Lescat)

W Niemczech oraz w Japonii prowadzone są od lat 70. XX wieku prace nad koleją magnetyczną, mającą zastąpić w przyszłości obecnie istniejące szybkie pociągi klasyczne. Jednak ogromny koszt wdrożenia takiego projektu oraz całkowita niekompatybilność z istniejącą infrastrukturą transportową sprawiły, że obecnie w użytku komercyjnym znajduje się jedynie jedna linia długości 30 km, otwarta w 2004 roku, łącząca Szanghaj z lotniskiem (zbudowana w celach bardziej prestiżowych niż praktycznych). Pociągi *Maglev* pokonują ją w 7 minut i 20 sekund, z prędkością maksymalną 430 km/h (fot. 2.35).



Fot. 2.35. Pierwsza komercyjna linia *Maglev* [57]

Postęp w dziedzinie konstrukcji kolejowych elektrycznych pojazdów sieciowych nie jest wyłącznie związany ze zwiększaniem prędkości tych pojazdów. Wykorzystywanie w poszczególnych krajach odmiennych systemów zasilania niezmiernie utrudniało międzynarodowy ruch kolejowy, wymuszając konieczność zmiany lokomotyw na granicach, co tym samym wydłużało czas jazdy pociągów, zwłaszcza towarowych. Była to duża niedogodność, szczególnie dająca się we znaki przy rosnącej konkurencji ze strony transportu drogowego. Aby zaradzić temu problemowi, rozpoczęto prace nad lokomotywami wielosystemowymi, czyli takimi, które mogą pracować pobierając energię z więcej niż jednego systemu napięcia zasilającego. Przełom nastąpił w 1964 roku, gdy firma *Alstom* zaprezentowała pierwszą lokomotywę czterosystemową, nazwaną „europejską”. Mogła się ona poruszać po liniach zelektryfikowanych napięciami 1500 i 3000 V DC, 15 kV 16 i 2/3 Hz oraz 25 kV 50 Hz, czyli praktycznie po wszystkich zelektryfikowanych liniach Europy. Moc ciągła lokomotywy wynosiła 3,67 MW, a po modyfikacji konstrukcji 4,48 MW. Przekładnia mechaniczna o dwóch przełożeniach zapewniała prędkość maksymalną 160 lub 240 km/h. Pojazd pokazano na fot. 2.36.

Drugim przełomowym rozwiązaniem w elektrycznych pojazdach kolejowych było zastosowanie elementów energoelektronicznych w obwodach głównych tych pojazdów. Pierwszą udaną konstrukcją była szwedzka lokomotywa *RC 2/3*, zbudowana przez firmę *ASEA* w 1970 roku, wyposażona w przekształtniki tyrystorowe. Lokomotywa ta jest zasilana z napięcia 15 kV 16 i 2/3 Hz, jej moc nominalna wynosi 3,6 MW. Prędkość maksymalna jest zależna od wybranego

przełożenia przekładni mechanicznej. Dla pociągów towarowych jest równa 130 km/h, a przy ustawieniu do prowadzenia pociągów pasażerskich – 160 km/h.



Fot. 2.36. Pierwsza lokomotywa czterosystemowa – 1964 (fot. J. P. Lescat)



Fot. 2.37. Pierwsza lokomotywa z przekształtnikiem tyrystorowym [40]

Ostatnie pół wieku to również burzliwy rozwój lokomotyw spalinowo-elektrycznych. Po okresie stagnacji, przypadającym na lata II wojny światowej, nastąpił gwałtowny rozwój tej rodziny pojazdów elektrycznych. Proces ten najbardziej intensywnie przebiegał w krajach dysponujących rozległą siecią kolejową i długimi liniami przebiegającymi przez tereny słabo zaludnione, o ubogiej infrastrukturze, a więc w Stanach Zjednoczonych i Związku Radzieckim. Budowano zarówno lokomotywy przeznaczone do ruchu manewrowego, jak i potężne jednostki do prowadzenia ciężkich pociągów towarowych i pasażerskich. W latach 50. ówczesny stan techniki nie pozwalał na skonstruowanie lokomotywy spalinowej z silnikiem diesla o mocy większej niż około 1,5 MW, która to moc nie była wystarczająca do obsługi najdłuższych składów. Powsta-

2. Historia pojazdów elektrycznych

wąły więc lokomotyw dwu-, trzy-, a nawet czteroczłonowe. Przykładem takiego pojazdu jest, przedstawiona na fot. 2.38, radziecka lokomotywa dwuczłonowa serii *TЭ3*. Produkowana w latach 1953 ÷ 73, służyła do prowadzenia pociągów towarowych. Źródłem energii były dwa silniki diesla o mocy łącznej 2,92 MW, sprzężone z prądnicami o mocy 1,35 MW każda. Zasilaly one 12 silników trakcyjnych (6 w każdym członie). Prędkość maksymalna wynosiła 100 km/h. Pojazd ważył 252 tony.



Fot. 2.38. Lokomotywa spalinowo-elektryczna serii *TЭ3* (fot. S. Nemanov)



Fot. 2.39. Czteroczłonowa lokomotywa *EMD F9* – 1953 [58]

Podobne konstrukcje powstawały w Stanach Zjednoczonych. Na uwagę zasługuje tu lokomotywa produkowana przez firmę *Electro-Motive Division*, o oznaczeniu *EMD* serii *F* (fot. 2.39), produkowana w kilku wariantach od 1939 roku do końca lat 60. Była to pierwsza lokomotywa o konstrukcji modułowej. Produkowano sekcje z jedną kabiną sterowniczą oraz bez kabiny. Można je było zestawiać w konfiguracjach do czterech członów. Moc takiej czteroczłonowej lokomotywy wynosiła 5,2 MW (w wersji *F9*), przy prędkości maksymalnej 105 km/h. Służyły one do prowadzenia ciężkich pociągów pasażerskich i towarowych.

Wraz z postępem w budowie silników spalinowych wzrastała moc pojedynczej lokomotywy, aż do skonstruowania w 1969 roku ośmioosiowej lokomotywy *EMD DD40X*, o mocy 4,9 MW (fot. 2.40). Ta jednostka, będąca do dziś najsilniejszą jednoczłonową lokomotywą spalinową na świecie, nie należy jednak do konstrukcji udanych. Największą wadą pojazdu jest jego masa wynosząca 247 t, co powoduje, że naciski osiowe przekraczają 30 t. To sprawia, że lokomotywa bardzo negatywnie oddziałuje na tor szybko niszcząc nawierzchnię. Obecnie zaledwie jedna na 47 wyprodukowanych jednostek jest nadal w eksploatacji. Ta konstrukcja, mimo że nie do końca udana, pokazała możliwość budowy lokomotywy spalinowo-elektrycznej bardzo dużej mocy, torując drogę do powstania dzisiejszych nowoczesnych pojazdów.



Fot. 2.40. Lokomotywa *EMD DD40X* – 1969 [63]

Okres powojenny to gwałtowny regres w dziedzinie transportu tramwajowego, związany z rozwojem motoryzacji indywidualnej. W latach 50., w krajach Europy zachodniej i w Stanach Zjednoczonych masowo likwidowano linie tramwajowe, tak że w niektórych krajach ten system transportowy praktycznie przestał istnieć. Wydawało się wówczas, że samochody w połączeniu z komunikacją autobusową rozwiążą wszystkie problemy transportowe aglomeracji miejskich. Tendencja ta trwała do połowy lat 70., gdy kryzys paliwowy i narastające problemy z kongestią, jak również wzrastające zanieczyszczenie powietrza w miastach sprawiły, że tramwaje wróciły do łask. Nieco inna sytuacja miała miejsce w krajach socjalistycznych, a wynikało to z ograniczonych możliwości rozwoju komunikacji indywidualnej, choć i tak, głównie w latach 60., część linii tramwajowych zlikwidowano, zastępując je komunikacją autobusową. Miasta, które nie zdecydowały się na likwidację sieci tramwajowych, stanęły przed koniecznością odnowy taboru. Większość powojennych konstrukcji pojazdów tramwajowych oparta była na amerykańskim modelu *PCC* (patrz punkt 2.3). Nowością było opracowanie nowoczesnego wozu przegubowego dosto-

sowanego do obsługi zwiększonych potoków podróźnych. Prace nad pojazdami przegubowymi były prowadzone już w okresie I wojny światowej, jednak tego typu tramwaje nie znalazły wówczas szerszego zastosowania. Pierwszą nowoczesną konstrukcją przegubową, produkowaną na masową skalę, był model *GT 6* firmy *Diivag* zaprezentowany 10 lutego 1956 roku. Pojazd ten został oparty na trzech wózkach skrętnych, w tym dwóch skrajnych napędnych i jednego tocznego typu Jacobsa. Zasilany jest z górnej sieci jezdnej napięciem 600 V DC, a napędzany dwoma silnikami o mocy 100 kW każdy. Prędkość maksymalna pojazdu wynosi 67 km/h. Tramwaj ma 112 miejsc, w tym 44 siedzące (fot. 2.41). Pojazdy te są eksploatowane do dnia dzisiejszego, również w Polsce dokąd trafiły w latach 90. Świadczy to o bardzo udanej i trwałej konstrukcji tych wozów. Polskie modele *102 N* i *102 Na* produkowane przez firmę *Konstal* w latach 60. i 70., również były wzorowane na wagonie *GT 6*.



Fot. 2.41. Pierwszy popularny tramwaj przegubowy *Diivag GT 6* – 1956 [59]



Fot. 2.42. Tramwaj *Diivag N8C* – 1978 [60]

Podobnie jak w przypadku pojazdów kolejowych, elementy energoelektroniczne w obwodach głównych tramwajów pojawiły się na przełomie lat 60. i 70., a upowszechniły pod koniec lat 70.. Jako przykład konstrukcji wczesnego tramwaju z napędem energoelektronicznym można podać model *N8C* firmy *Diivag*, które zaprezentowano w październiku 1978 roku. Jest to dwuprzegubowa, pojemna konstrukcja (226 miejsc w tym 54 siedzące), oparta na czterech wózkach (fot. 2.42). Wyposażona jest w rozruch impulsowy. Moc pojazdu wynosi 300 kW, a prędkość maksymalna 70 km/h. Wozy te są w eksploatacji do dnia dzisiejszego.

Zastosowanie elementów energoelektronicznych w obwodach głównych pojazdów tramwajowych umożliwiło budowę wozów dwusystemowych, tzn. takich, które mogą poruszać się zarówno po torowiskach tramwajowych przy zasilaniu napięciem stałym o wartości około 600 V, jak i po torach kolejowych, pobierając energię z innego systemu zasilania. To umożliwiło połączenie funkcji komunikacji podmiejskiej z komunikacją miejską, stanowiąc dobre rozwiązanie dla pasażerów, umożliwiając im dojazd z dalekich przedmieść do centrów miast bez konieczności przesiadek. Pierwszy taki system został uruchomiony w Karlsruhe w 1991 roku. Obsługują go pojazdy wyprodukowane przez konsorcjum firm *AdTranz*, *Siemens* i *Diivag*. Model *GT8-100C/2S* może być zasilany zarówno z sieci tramwajowej napięciem 750 V DC, jak i z sieci kolejowej napięciem 15 kV 16 i 2/3 Hz (fot. 2.43). Moc pojazdów wynosi 560 kW, a prędkość maksymalna 90 km/h.



Fot. 2.43. Pierwszy tramwaj dwusystemowy *GT8-100C/2S* – 1991 [61]

Ostatnie lata to dominacja, wśród tramwajów nowo budowanych, konstrukcji niskopodłogowych, modułowych, tzn. składających się z szeregu standardowych członów, które można zestawiać w dowolnej konfiguracji zgodnie z życzeniami zamawiającego. Powstają nawet konstrukcje siedmioczłonowe, o pojemności do 400 osób, jak np. model *Citadis* produkcji *Alstom* w wersji dla Strasburga (fot. 2.44), które mimo długości wynoszącej ponad 45 metrów mogą pokonywać luki o promieniach typowo tramwajowych. Pojazdy te, zasilane z sieci napięciem 750 V DC, mają moc 720 kW i prędkość maksymalną 60 km/h.



Fot. 2.44. Tramwaj *Citadis* dla Strasburga (fot. autora)

Komunikacja trolejbusowa przeszła po II wojnie światowej podobne zmiany jak tramwajowa. Po początkowej szybkiej odbudowie zniszczeń wojennych sieci trolejbusowe rozwijały się do lat 50., kiedy to w 1956 roku władze Londynu, który posiadał bardzo rozległą sieć trolejbusową, podjęły decyzję o całkowitej jej likwidacji. Ponieważ Wielka Brytania była jednym z największych światowych producentów trolejbusów, decyzje likwidacyjne władz Londynu dotknęły użytkowników tych pojazdów w innych krajach. Proces likwidacji objął również m.in. Stany Zjednoczone, Kanadę, Francję i Niemcy. Trend ten ominął tylko Szwajcarię, która utrzymała swoje linie trolejbusowe oraz Związek Radziecki, gdzie ten system transportu był cały czas rozbudowywany. Również w Polsce z 12 istniejących po wojnie systemów trolejbusowych zostały zaledwie trzy. Konstrukcja nadwozi pojazdów trolejbusowych rozwijała się podobnie jak dla pojazdów autobusowych, gdyż na ogół do budowy trolejbusów wykorzystywano pudła autobusów, zastępując silnik wysokoprężny armaturą elektrotrakcyjną. Przykładową konstrukcję z końca lat 50. pokazano na fot. 2.45.



Fot. 2.45. Trolejbus *3uV-5* – 1959 (fot. S. Filatov)

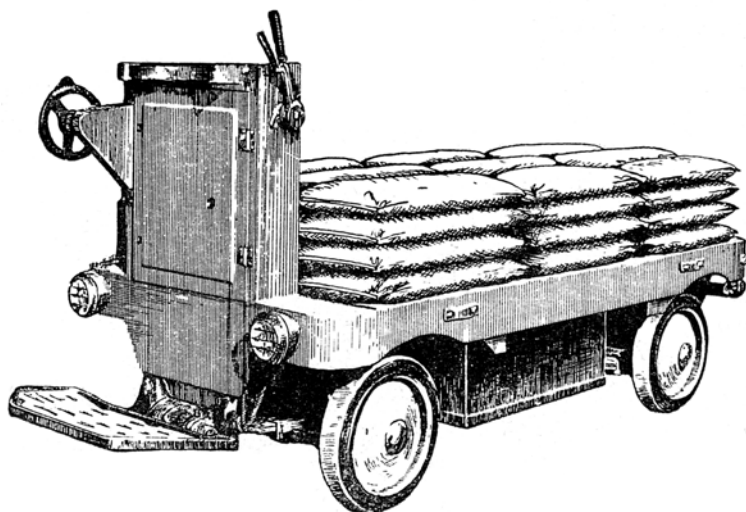
Model *3uV-5* produkcji ZSRR był najbardziej popularnym trolejbusem w tamtym okresie. Łącznie wyprodukowano ponad 20 tysięcy egzemplarzy tego modelu. Pojazd, zasilany z dwubiegunowej sieci trakcyjnej napięciem 550 V DC, miał jeden silnik trakcyjny o mocy 95 kW, pozwalający osiągnąć prędkość maksymalną 68 km/h. Pojazd mógł łącznie przewieźć 122 osoby, w tym 38 na miejscach siedzących. Likwidacja sieci trolejbusowych została zatrzymana w połowie lat 70. z tych samych przyczyn, co w przypadku komunikacji tramwajowej. Od tego czasu nastąpił renesans tego środka transportu. Buduje się nowe i rozbudowuje istniejące linie. W systemy trolejbusowe inwestują zwłaszcza mniejsze miasta o charakterze turystycznym i uzdrowiskowym, gdy władzom zależy na pozytywnym wizerunku miejscowości. Konstrukcje nowoczesnych trolejbusów nie różnią się wyglądem od autobusów, gdyż produkują je te same firmy. Oczywiście zamiast silnika spalinowego montowany jest napęd elektryczny wraz z osprzętem. Przykład konstrukcji nowoczesnego trolejbusu pokazano na fot. 2.46. Model *Solaris Trolino 18* oparty jest na pudle autobusu przegubowego tej firmy. Napędzany jest silnikiem indukcyjnym o mocy 175 kW, sterowanym z przekształtnika. Zasilanie 600/750 V DC. Prędkość maksymalna pojazdu wynosi 60 km/h.



Fot. 2.46. Nowoczesny trolejbus *Solaris Trolino 18* (fot. M. Bartłomiejczyk)

Autonomiczne samochody elektryczne w okresie powojennym praktycznie nie istniały. Wyjątkiem były małe wózki akumulatorowe, obsługujące wszelkiego rodzaju magazyny. Były to pojazdy zasilane z baterii kwasowo-olowiowych o prędkości maksymalnej około 10 ÷ 15 km/h, przeznaczone do przewozu towarów na krótkie odległości. Ze względu na przeznaczenie niektóre wózki akumulatorowe nie miały siedzącego stanowiska kierowcy i były obsługiwane na stojąco. Przykład takiego pojazdu pokazano na rys. 2.5.

Podjęmowano nieliczne próby seryjnej budowy samochodu elektrycznego. Jedną z pierwszych była konstrukcja wyprodukowana w 1966 roku przez firmę *Enfield Automotive* o nazwie *Enfield 8000* (fot. 2.47). Był to mały dwuosobowy samochód wyposażony w silnik o mocy 6 kW, zasilany z baterii kwasowej o napięciu 48 V. Prędkość maksymalna pojazdu wynosiła 64 km/h, a zasięg sięgał 90 km. Wyprodukowano zaledwie około 100 egzemplarzy tego samochodu. Nie zyskał on uznania, gdyż cena przekraczała cenę zwykłego samochodu osobowego.



Rys. 2.5. Wózek akumulatorowy z lat 50. [28]



Fot. 2.47. Samochód Enfield 8000 – 1966 [47]

Próby seryjnej produkcji samochodów elektrycznych podejmowano co jakiś czas, jednak żadna z nich nie zakończyła się powodzeniem. Jeden z nielicznych sukcesów w tej dziedzinie odniosła polska firma *Melex*, produkując od 1971 roku pojazd o tej samej nazwie. Nie jest to jednak stricte samochód elektryczny, ale należy go zakwalifikować do wózków akumulatorowych, jako że jest to pojazd wolnobieżny i jego prędkość maksymalna wynosi 25 km/h. Pierwszy samochód elektryczny produkowany masowo pojawił się na rynku dopiero w drugiej połowie lat 90., kiedy to koncern *Toyota* wprowadził na rynek w 1997 roku model *Prius*. Nie jest to co prawda samochód czysto elektryczny, a jedynie hybrydowy, czyli napędzany zarówno silnikiem

spalinowym, jak i elektrycznym. Dzięki temu uzyskano ograniczenie zużycia paliwa. Zmniejszające się zasoby ropy naftowej sprawiają, że ciągle trwają prace nad samochodami elektrycznymi. Pojawiają się coraz to nowe modele i praktycznie każda firma motoryzacyjna ma obecnie w ofercie przynajmniej jeden samochód elektryczny lub hybrydowy. Pojawiają się nawet na rynku przedsiębiorstwa wytwarzające wyłącznie samochody elektryczne. Są to albo nowe firmy np. *Tesla Motors*, lub reaktywowane marki, które produkowały samochody elektryczne przed II wojną światową jak np. *Detroit Electric*. Należy oczekiwać, że postęp w dziedzinie konstrukcji ogniw elektrochemicznych i zasobników superkondensatorowych sprawi, że popularność samochodów elektrycznych będzie rosła i z czasem zdominują one rynek motoryzacji indywidualnej.

I – Pojazdy sieciowe

3. Rozruch i regulacja prędkości pojazdów

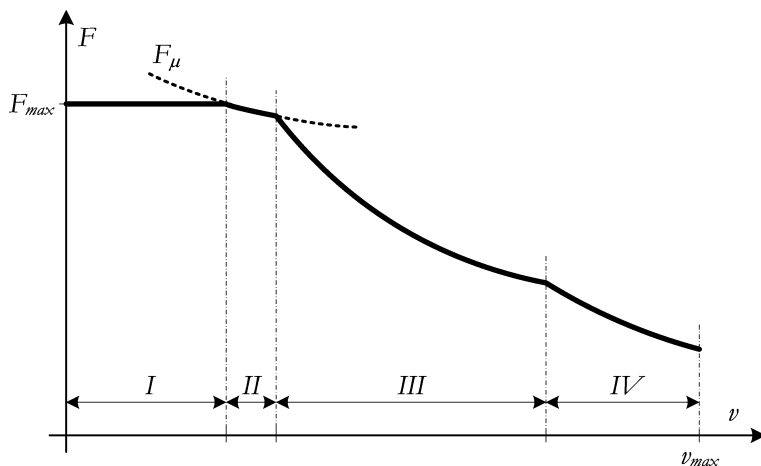
Pojęcia rozruchu i regulacji prędkości pojazdów elektrycznych obejmują całość zagadnień związanych ze sterowaniem wartością prędkości jazdy i dynamiką jej zmian. Nie dla wszystkich typów pojazdów i systemów ich sterowania można wyraźnie określić granicę oddzielającą te procesy. Stosunkowo najłatwiejsze jest to dla pojazdów z rozruchem oporowym (tzw. klasycznych), zasilanych z systemów napięcia stałego. W tym przypadku rozruch to szereg czynności łączeniowych, jakie należy wykonać podczas rozpędzania pojazdu do momentu, gdy silniki rozpoczną pracę na ich charakterystyce naturalnej. Podobnie można określić pojęcie rozruchu dla pojazdów zasilanych również z sieci napięcia stałego, wyposażonych w energoelektroniczny rozrusznik impulsowy (tzw. II generacji). W tym przypadku rozruch kończy się, gdy łącznik energoelektroniczny zostanie załączony na stałe (stopień wypełnienia równy jedności), a napięcie zasilające silniki będzie równe co do wartości napięciu w sieci trakcyjnej (pominąwszy spadek napięcia na samym łączniku). Znacznie trudniejsze jest jednoznaczne określenie końca procesu rozruchu dla pojazdów wyposażonych w falowniki i napędzanych silnikami indukcyjnymi, gdyż dla takiego układu napędowego dopuszczalna jest praca dla dowolnych parametrów: siła pociągowa – prędkość, leżących poniżej granicznej charakterystyki trakcyjnej dopuszczalnej dla danego pojazdu (patrz punkt 3.2.3.1). Dla tych pojazdów przyjmuje się, że rozruch trwa do momentu, gdy silniki zaczną pracować z mocą nominalną.

Nieco inaczej sprawa wygląda w przypadku systemów napięcia przemiennego. Niezależnie od generacji pojazdu, nie występują tak charakterystyczne punkty graniczne jak w systemach napięcia stałego. Dlatego dla pojazdów klasycznych przyjęto koniec rozruchu jako moment, gdy obwód główny zasilany jest z maksymalnej wartości napięcia wtórnego transformatora. W pojazdach nowoczesnych (wyposażonych w falowniki i silniki indukcyjne) kryteria są identyczne, jak w przypadku zasilania z systemów napięcia stałego. Etapy rozruchu dla wszystkich typów pojazdów sieciowych zostaną szczegółowo przedstawione w dalszej części rozdziału, oprócz trolejbusów oraz pociągów lewitujących (maglev), które to pojazdy ze względu na zupełnie odmienny charakter konstrukcji będą omówione w oddzielnych rozdziałach.

3.1. Charakterystyka trakcyjna i metody sterowania pracą obwodu głównego pojazdu

Niezależnie od typu pojazdu i systemu napięcia zasilającego proces rozruchu i regulacji prędkości jest prowadzony w taki sposób, aby uzyskać właściwą charakterystykę trakcyjną, czyli zależność siły pociągowej w funkcji prędkości $F = f(v)$. Najlepiej dostosowana do potrzeb i charakteru pracy większości pojazdów trakcyjnych okazała się tzw. „charakterystyka szeregową”, przedstawiona na rys. 3.1. Taki kształt zapewnia dużą wartość siły pociągowej w początkowym etapie rozruchu i tym samym dobrą wartość przyspieszenia, a jednocześnie możliwe jest osiągnięcie

większych prędkości, dla których wartość siły pociągowej jest wystarczająca do pokonania oporów ruchu. Charakterystykę o takim kształcie zapewniają w sposób naturalny stosowane najwcześniej do napędu pojazdów silniki szeregowo prądu stałego (stąd nazwa). Wykorzystywanie innych rodzajów maszyn elektrycznych wymaga takiego sterowania ich pracą, aby otrzymać kształt zależności jak najbardziej zbliżony do tego optymalnego z punktu widzenia zastosowań trakcyjnych. Charakterystykę trakcyjną można podzielić na cztery obszary pracy, a mianowicie:



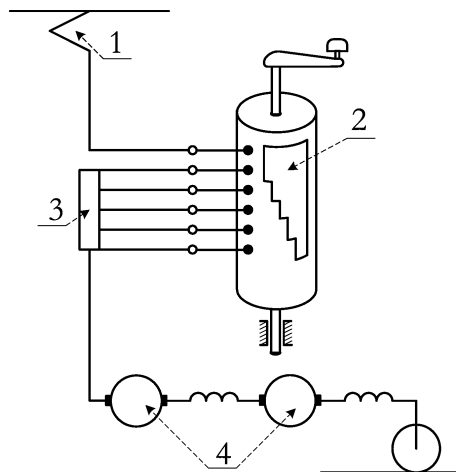
Rys. 3.1. Charakterystyka trakcyjna i jej ograniczenia

- I – *obszar pracy ze stałym momentem $M = \text{const}$* . W tym obszarze występuje ograniczenie związane z maksymalną siłą rozruchową F_{max} , która wynika z dopuszczalnej wartości prądu rozruchowego silnika;
- II – *obszar pracy na granicy przyczepności*. Wynikający z siły przyczepności F_{μ} , która jest zależna od rodzaju materiału użytego do wykonania szyn oraz obręczy kół, a także ich stanu technicznego i warunków zewnętrznych takich jak: zabrudzenia, wilgoć, oblodzenie itp.;
- III – *obszar pracy ze stałą mocą $P = \text{const}$* . Praca w obszarze regulacji ze stałą mocą rozpoczyna się w chwili, gdy wartość napięcia na silnikach trakcyjnych osiągnie założoną wartość maksymalną, mniejszą lub równą dopuszczalnej wartości napięcia. W tym obszarze wartość mocy jest ograniczona maksymalną dopuszczalną mocą ciągłą silnika, związaną z jego wytrzymałością cieplną;
- IV – *obszar pracy z ograniczeniem mocy*. Obszar ten jest związany z ograniczeniami wynikającymi z minimalnej wartości wzbudzenia w przypadku silników szeregowych, oraz maksymalnej dopuszczalnej wartości poślizgu dla maszyn asynchronicznych.

Dodatkowym ograniczeniem charakterystyki trakcyjnej jest najwyższa dopuszczalna prędkość pojazdu – v_{max} , wynikająca z maksymalnej prędkości obrotowej silników trakcyjnych związanej z ich wytrzymałością mechaniczną, a dla maszyn komutatorowych związana również z koniecznością zapewnienia prawidłowej pracy komutatora.

Sterowanie pracą obwodu głównego pojazdu trakcyjnego może odbywać się w sposób bezpośredni i pośredni. Przy sterowaniu bezpośrednim wszystkie czynności łączeniowe w obwodzie głównym i pomocniczym pojazdu są wykonywane urządzeniami i aparatami napędzanymi ręcznie przez prowadzącego. Jest to najprostszy sposób sterowania, jednak zakres jego stosowania

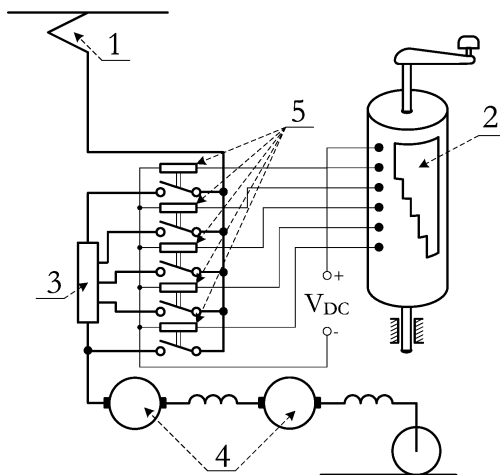
jest ograniczony ze względu na wysokość napięcia i moc sterowanych silników. Jako orientacyjne granice stosowalności można przyjąć prąd o wartości około 200 A, przy napięciu $600 \div 750$ V DC. Przy wyższych wartościach prądu płynącego w obwodzie głównym urządzenie sterownika zajmowałoby zbyt wiele miejsca i wymagałoby zbyt dużego wysiłku fizycznego do operowania nim. Z kolei dla wyższych wartości napięć nie byłyby zachowane warunki bezpieczeństwa, gdyż wiązałoby to się z doprowadzeniem wysokiego napięcia w pobliże stanowiska pracy prowadzącego pojazd. Sterowanie bezpośrednie wykorzystywane jest głównie w starszych typach tramwajów i trolejbusów. W pojazdach nowo budowanych ten typ sterowania nie jest obecnie stosowany. Schemat ideowy, pokazujący zasadę sterowania bezpośredniego, przedstawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Zasada sterowania bezpośredniego, gdzie: 1 – odbierak prądu; 2 – nastawnik; 3 – rezystor rozruchowy; 4 – silniki trakcyjne

Przy sterowaniu pośrednim wszystkie czynności łączeniowe w obwodzie głównym i pomocniczym pojazdu dokonywane są aparatami wyposażonymi w urządzenia napędowe uruchamiane przez prowadzącego za pomocą specjalnego układu, zwanego obwodem sterowania.

Idea tego rodzaju sterowania pokazana została na rys. 3.3. Sterowanie pośrednie może odbywać się w sposób nieautomatyczny, tzn. taki, gdzie każde kolejne przełączenie urządzeń w obwodzie głównym jest uwarunkowane dokonaniem przez prowadzącego odpowiedniego przełączenia w obwodzie sterowania, oraz w sposób automatyczny, gdzie cały szereg przełączeń w obwodzie głównym, następujących kolejno po sobie z uwzględnieniem czasu koniecznego dla ich dokonania, uzyskuje się za pomocą specjalnych układów sterowania, które pracują same bez udziału prowadzącego. Metoda sterowania pośredniego umożliwia realizację tzw. sterowania ukrotnionego, czyli jednoczesnego



Rys. 3.3. Zasada sterowania pośredniego, gdzie: 1, 2, 3, 4 – patrz rys. 3.2; 5 – styczniki sterowane indywidualnie

przewodzenia kilku sprzężonych ze sobą pojazdów trakcyjnych tego samego typu z jednej kabiny sterowniczej. Systemy pośrednie nieautomatyczne wykorzystywane są powszechnie w lokomotywach starszych generacji. Sterowanie automatyczne dominuje w zespołach trakcyjnych i pojazdach komunikacji miejskiej. W nowoczesnych pojazdach wszystkich rodzajów stosowane jest wyłącznie sterowanie pośrednie automatyczne, gdyż inne metody sterowania pracą układów przekształtnikowych są niemożliwe do zrealizowania.

3.2. Pojazdy zasilane z sieci napięcia stałego

W zależności od typu zastosowanych maszyn elektrycznych i metody sterowania pojazdy trakcyjne zasilane z sieci napięcia stałego można podzielić na trzy generacje, a mianowicie:

- pojazdy klasyczne – wyposażone w rozruch rezystorowy i napędzane silnikami szeregowymi prądu stałego;
- pojazdy II generacji – rozruch prowadzony jest za pomocą impulsowej regulacji średniej wartości napięcia na silnikach trakcyjnych; do napędu nadal wykorzystywane są silniki szeregowo prądu stałego;
- pojazdy III generacji – napędzane silnikami indukcyjnymi klatkowymi lub synchronicznymi, zasilanymi poprzez falowniki napięcia.

3.2.1. Pojazdy klasyczne z rozruchem oporowym i silnikami szeregowymi prądu stałego

Silniki szeregowo prądu stałego zostały najwcześniej wykorzystane do napędu elektrycznych pojazdów trakcyjnych. Szereg cech tych silników jest korzystnych z punktu widzenia potrzeb trakcyjnych. Należy tutaj wymienić m.in.:

- duży moment rozruchowy,
- miękką charakterystykę umożliwiającą elastyczne dostosowywanie się do oporów trakcyjnych,
- małą wrażliwość momentu rozruchowego na zmiany wartości napięcia zasilającego,
- możliwość pracy równoległej kilku silników, bez konieczności stosowania specjalnych układów sterujących, w przeciwieństwie do np. silników bocznikowych,
- prostą metodę rozruchu i regulacji prędkości, możliwą do realizacji przy użyciu elementów elektromechanicznych.

Wadą silnika szeregowo prądu stałego jest jego złożona budowa i stosunkowo duże koszty eksploatacji. Prędkość kątowa silnika określona jest zależnością:

$$\omega_s = \frac{U - i \cdot (R_s + R_d)}{c \cdot \Phi(i)}, \quad (3.1)$$

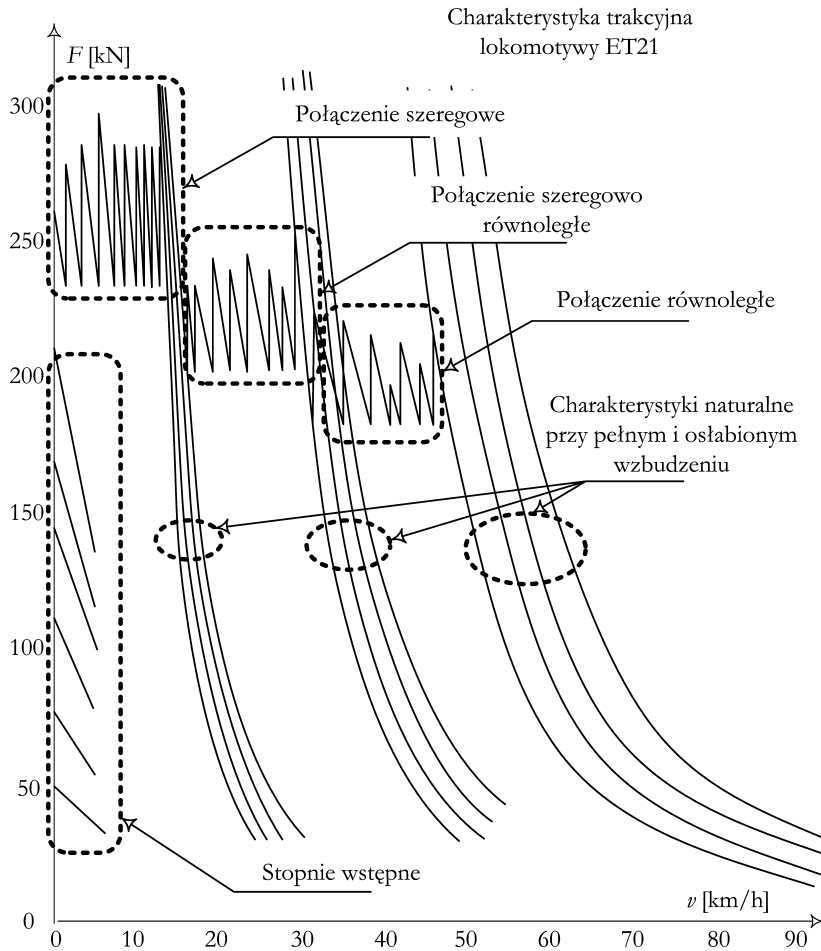
gdzie: U – napięcie na zaciskach silnika; i – prąd silnika; R_s – rezystancja uzwojeń; R_d – rezystancja dodatkowa włączona szeregowo z uzwojeniami silnika; c – stała maszyny; Φ – strumień.

Zależność (3.1) pokazuje, że prędkość silnika można zmieniać na trzy sposoby:

- poprzez zmianę wartości napięcia U zasilającego silnik,
- poprzez zmianę wartości rezystancji dodatkowej R_d dołączonej szeregowo do uzwojeń silnika – de facto w ten sposób również następuje zmiana napięcia na zaciskach silnika;
- zmieniając główny strumień magnetyczny silnika $\Phi(i)$ przez bocznikowanie uzwojeń wzbudzenia.

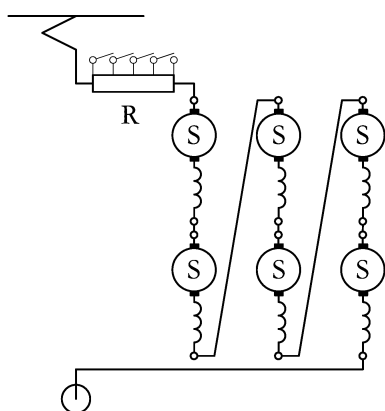
3.2.1.1. Etapy rozruchu pojazdów klasycznych

W trakcie rozruchu i regulacji prędkości pojazdów klasycznych korzysta się z wszystkich trzech metod regulacji prędkości silnika szeregowego według określonej kolejności. Proces ten zostanie omówiony na przykładzie rozruchu lokomotywy sześciosilnikowej typu ET 21 zasilanej napięciem stałym o wartości nominalnej 3000 V. Charakterystyka trakcyjna pojazdu wraz z zaznaczonymi poszczególnymi etapami rozruchu została przedstawiona na rys. 3.4.



Rys. 3.4. Etapy rozruchu rezystorowego lokomotywy 6-osiowej

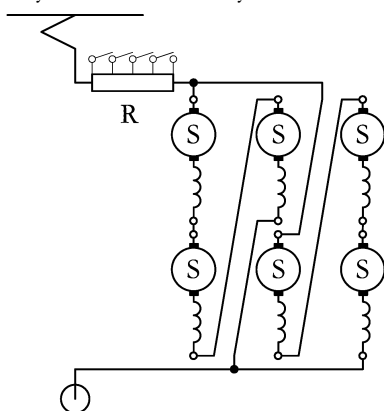
Konfiguracja obwodu głównego pojazdu na początku rozruchu przedstawiona jest na rys. 3.5. Wszystkie silniki połączone są szeregowo. Ponadto, w celu ograniczenia wartości prądu płynącego przez maszyny, dołączona jest rezystancja dodatkowa. Na początku wartość tej rezystancji dobrana jest tak, by prąd płynący przez obwód główny pojazdu był mniejszy od założonej wartości prądu rozruchowego. Wykorzystuje się wtedy tzw. wstępne stopnie rozruchowe. Dzięki temu następuje stopniowe narastanie momentu napędowego i wybranie luzów występujących w przekładniach mechanicznych pojazdu i na sprzęgach międzywagonowych. Unika się przez to szarpnięcia, które w niekorzystnych warunkach przy długich składach towarowych



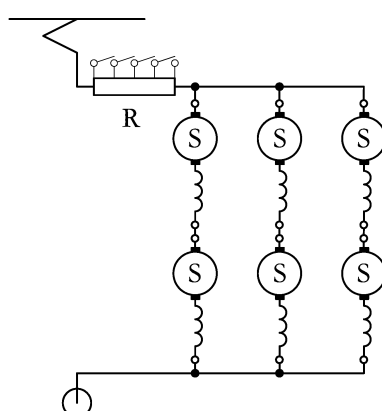
Rys. 3.5. Konfiguracja obwodu głównego przy połączeniu szeregowym: R – rezystor rozruchowy; S – silniki trakcyjne

może doprowadzić do zerwania sprzęgu i (lub) uszkodzenia przekładni mechanicznej, a w przypadku pociągów osobowych jest nieprzyjemne dla pasażerów. Gdy wartość prądu rozruchowego osiągnie wielkość założoną, następuje dalsze stopniowe zwieranie rezystora rozruchowego, tak by utrzymać średnią wartość prądu płynącego przez silniki trakcyjne na stałym poziomie. Proces ten trwa tak długo, aż cały rezystor zostanie zwarty i silniki będą załączone bezpośrednio do sieci zasilającej. Pracują one wtedy na charakterystyce naturalnej przy połączeniu szeregowym, czyli przy $1/3$ wartości napięcia nominalnego silnika (z reguły w systemie 3000 V DC silniki trakcyjne połączone są na stałe w parach po dwie maszyny szeregowo, a napięcie nominalne silnika wynosi 1500 V). Następuje wówczas przełączenie silników z

układu szeregowego na szeregowo-równoległy w dwie grupy po trzy maszyny, a dla utrzymania założonej wartości prądu dodatkowo zostaje załączony ponownie rezystor rozruchowy. Konfiguracja obwodu głównego dla tego etapu rozruchu pokazana została na rys. 3.6. Analogicznie jak przy połączeniu szeregowym, rezystor ulega stopniowemu zwieraniu do chwili, gdy silniki będą ponownie zasilane bezpośrednio z sieci trakcyjnej. Dla połączenia szeregowo-równoległego pracują one przy $2/3$ wartości napięcia znamionowego silnika. Po raz kolejny następuje zmiana konfiguracji obwodu głównego do połączenia równoległego (rys. 3.7). Oczywiście, aby utrzymać wartość prądu dołączane są w szereg rezystory rozruchowe. Ponownie zostają one stopniowo zwierane i ostatecznie silniki są załączone bezpośrednio do sieci trakcyjnej przy pełnej wartości napięcia. Przy pracy na charakterystykach naturalnych dla wszystkich konfiguracji połączeń możliwa jest regulacja prędkości poprzez osłabianie wzbudzenia silników trakcyjnych. Są to jedyne charakterystyki (naturalne przy pełnym i osłabionym wzbudzeniu), dla których jest dopuszczalna praca długotrwała. Pozostałe charakterystyki (oporowe) mogą być wykorzystywane jedynie w pracy dorywczej. W innym razie istnieje niebezpieczeństwo uszkodzenia rezystorów rozruchowych.



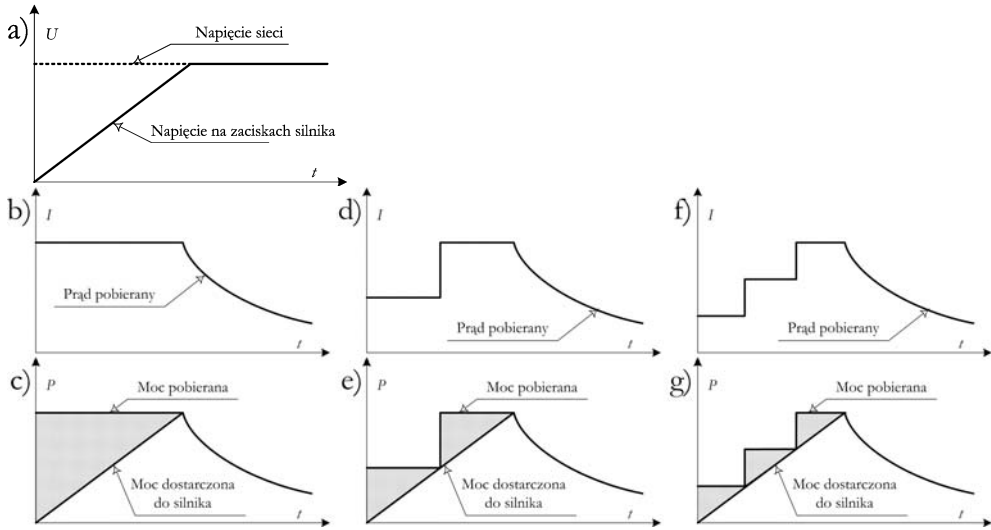
Rys. 3.6. Konfiguracja obwodu głównego przy połączeniu szeregowo-równoległym



Rys. 3.7. Konfiguracja obwodu głównego przy połączeniu równoległym

3.2.1.2. Przelączenie grup silników

Zmiana konfiguracji obwodu głównego pojazdu podczas rozruchu jest powodowana oszczędnościami energii jakie dzięki temu uzyskujemy. Na rys. 3.8 zobrazowano to graficznie.



Rys. 3.8. Przelączenie grup silników podczas rozruchu – opis w tekście

Niezależnie od stosowania (bądź nie) przelączenia grup, oraz od ilości przeląceń występujących w trakcie rozruchu, zmiana wartości napięcia na zaciskach silników jest jednakowa, taka jak pokazano na rys. 3.8a. Przy założonym stałym i niezmiennym napięciu sieci, wartość napięcia jednej grupy silników (najczęściej są to dwie maszyny połączone szeregowo) podczas rozruchu zwiększa się, w przybliżeniu liniowo, od wartości bliskiej zera do maksymalnej równej sieciowej (po zakończeniu rozruchu każda grupa silników jest podłączona bezpośrednio do sieci trakcyjnej). Przy braku przelączenia prąd pobierany jest równy sumie prądów poszczególnych grup silników. Jego wartość jest w przybliżeniu stała, pomijając wahania wywołane zwieraniem kolejnych sekcji rezystora rozruchowego (rys. 3.8b). Wiedząc, że w obwodach prądu stałego moc jest iloczynem prądu i napięcia, można stwierdzić, iż zaledwie połowa energii pobranej w trakcie rozruchu z układu zasilającego jest dostarczona do silników trakcyjnych. Druga połowa jest bezpowrotnie zamieniana na ciepło w rezystorach – obszar wyróżniony kolorem szarym na rys. 3.8c. Straty energii w trakcie rozruchu wynoszą więc 50%. Gdy pojazd jest wyposażony w dwie grupy silników (powszechne w pojazdach czterosilnikowych), to stosując zmianę konfiguracji z szeregowej na równoległą, otrzymamy przebiegi takie jak na rys. 3.8d, e. Przy połączeniu szeregowym grup silników prąd pobierany z sieci będzie równy połowie wartości prądu maksymalnego. Po przelączeniu wzrośnie on dwukrotnie do wartości maksymalnej. Dzięki temu straty energii w rezystorach rozruchowych maleją o połowę w stosunku do sytuacji, gdy przelączenie nie było stosowane, a całkowita sprawność rozruchu wzrasta do 67%. Analogiczna sytuacja dla pojazdów 6-silnikowych została pokazana na rys. 3.8f, g. Początkowo prąd pobierany jest równy 1/3 wartości prądu maksymalnego (wszystkie maszyny połączone szeregowo). Po zmianie konfiguracji na szeregowo-równoległą (2 grupy po 3 maszyny), prąd wzrasta dwukrotnie do 2/3 prądu maksymalnego. Dopiero przelączenie do połączenia równoległego (3 grupy po 2 maszyny

ny) sprawia, że pojazd pobiera z sieci prąd maksymalny. Ta dwukrotna zmiana konfiguracji obwodu głównego powoduje dalsze zmniejszanie strat energii podczas rozruchu (obszar kropkowany rys. 3.8g), a całkowita sprawność rozruchu wynosi 75%. W praktyce spotyka się jeszcze lokomotywy 8-silnikowe z układem połączeń silników 4 grupy po 2 maszyny, wymagające trzykrotnej zmiany konfiguracji połączeń podczas rozruchu. Przykładem takiej konstrukcji jest lokomotywa typu ET42. Dla takiego wariantu teoretyczna sprawność rozruchu wzrasta do 80%. Zwiększanie liczby przełączeń grup silników podczas rozruchu w lokomotywach wielosilnikowych jest korzystne nie tylko ze względu na zmniejszanie strat energii podczas rozruchu, ale wzrasta wówczas liczba charakterystyk naturalnych pojazdu, co umożliwia ekonomiczne prowadzenie pociągu przy małych prędkościach jazdy.

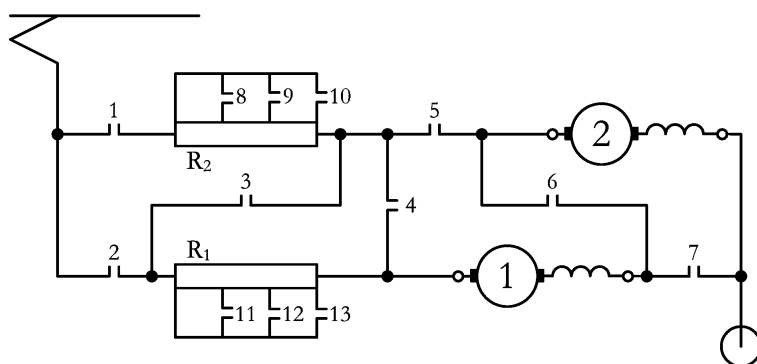
3.2.1.3. Metody przełączania grup silników

Przełączanie grup silników z układu szeregowego na równoległy może się odbywać następującymi metodami:

- odłączania całego obwodu od sieci zasilającej,
- zwarcia,
- bocznikową,
- mostkową.

Metoda odłączania całego obwodu od sieci zasilającej polega na dokonaniu zmiany konfiguracji w stanie bezprądowym po odłączeniu napięcia zasilającego. Jest to metoda najprostsza w realizacji, jednak całkowite odłączenie silników od źródła zasilania powoduje gwałtowny spadek momentu napędowego pojazdu do zera w momencie wyłączenia i ponowny jego wzrost przy załączeniu napięcia. To wywołuje szarpnięcie, niekorzystnie wpływające na pracę części mechanicznych układu napędowego. Z tego powodu ta metoda przełączania grup silników nie jest stosowana w praktyce.

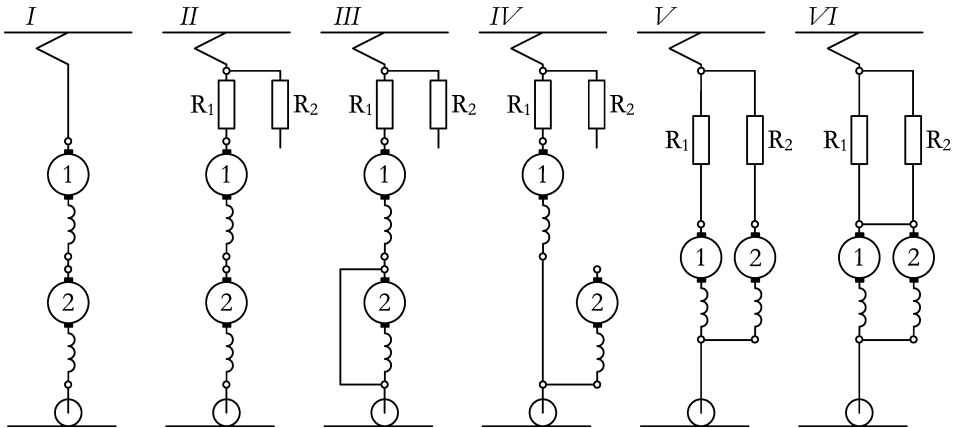
Metoda zwarcia – uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu wyposażonego w układ przełączania silników lub grup silników przy użyciu tej metody pokazano na rys. 3.9. Odpowiadającą mu sekwencję załączania styczników przedstawiono w tabl. 3.1.



Rys. 3.9. Uproszczony schemat obwodu głównego przy przełączaniu silników z układu szeregowego na równoległy metodą zwarcia

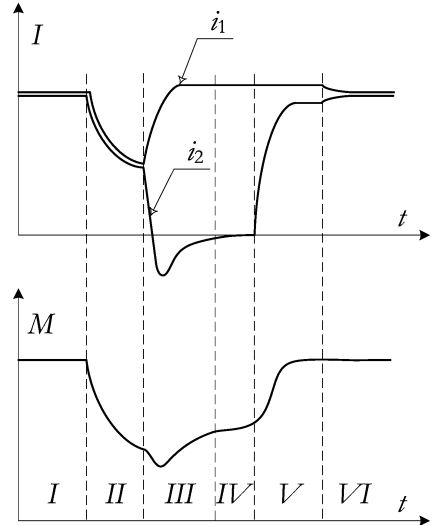
Tabl. 3.1. Sekwencja przełączania styczników – metoda zwarcia

| Etap | Nr stycznika | | | | | | | | | |
|------|--------------|---|---|---|---|---|---|--------|---------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 ÷ 10 | 11 ÷ 13 | |
| I | x | | x | | | x | | x | x | |
| II | x | x | | | | x | | | | |
| III | x | x | | | | x | x | | | |
| IV | x | x | | | | | x | | | |
| V | x | x | | | x | | x | | | |
| VI | x | x | | x | x | | x | | | |



Rys. 3.10. Przełączanie silników metodą zwarcia – etapy procesu

Przed przełączeniem (rys. 3.10 I) silniki lub grupy silników połączone są szeregowo i załączone do sieci zasilającej poprzez zwarte rezystory R_1 i R_2 . Następnie zamykany jest stycznik nr 2 i otwierany nr 3, jak również otwierane są grupy styczników $8 \div 10$ i $11 \div 13$. To sprawia, że w szereg z silnikami wtrącony jest rezystor R_1 i wartość prądu płynącego przez maszyny spada (rys. 3.11). Drugi rezystor (R_2) dołączany jest jednym biegunem do punktu potencjału sieci. Na etapie III następuje zwarcie jednego silnika lub grupy silników poprzez zamknięcie stycznika nr 7 (stąd nazwa metody). W tym momencie prąd płynący przez zwierzaną grupę silników osiąga wartości ujemne, gdyż maszyny te zachowują się wtedy jak prądnice. Następnie otwierany jest stycznik nr 6, co sprawia, że obwód zwarcia zostaje rozłączony (etap IV). Potem zamykany jest stycznik nr 5 i silnik nr 2 (grupa silników) dołączony zostaje do wolnego zacisku rezystora R_2 (etap V). Na zakończenie w celu wyrównania różnicy napięć zasilających silniki trakcyjne, która to różnica może się pojawić na skutek niejednakowych parametrów elektrycznych maszyn i rezystorów rozruchowych, zwiiera się dodatnie zaciski obu silników lub grup silników



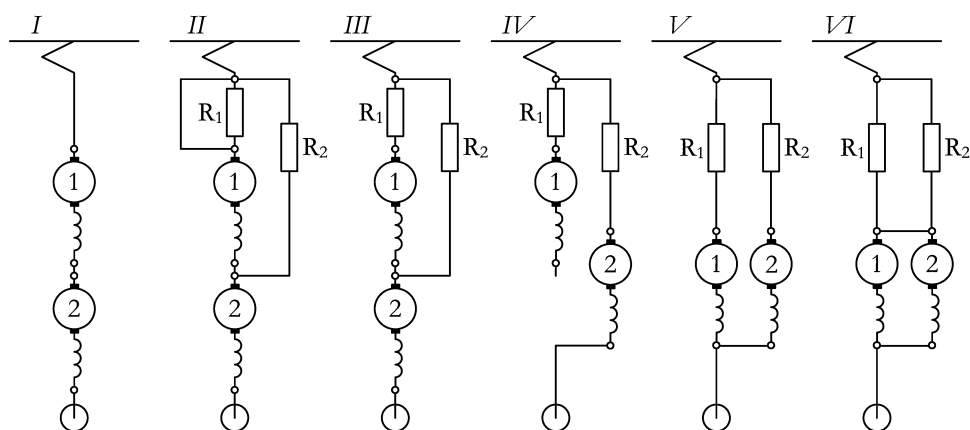
Rys. 3.11. Przebiegi prądów grup silników oraz wypadkowego momentu napędowego przy przełączaniu metodą zwarcia

poprzez zamknięcie stycznika nr 4 (etap *V*). Przelączenie grup silników metodą zwarcia nie powoduje całkowitego zaniku momentu napędowego pojazdu w czasie procesu, a jedynie jego obniżenie o około 60%, co pokazuje przybliżony przebieg na rys. 3.11. Podczas przelączenia jedynie grupa styczników rezystora R_1 (11 ÷ 13) jest otwierana pod obciążeniem, jednakże moc wyłączana jest nieduża, gdyż są one zbocznikowane rezystancjami rozruchowymi. Pozostałe styczniki pracują bezprądowo, więc z punktu widzenia ich pracy stosowanie metody zwarcia jest korzystne.

Metoda bocznikowa – jest modyfikacją metody zwarcia. Realizowana jest przy identycznej konfiguracji styczników. Zmieniona jest jedynie sekwencja przeląceń (patrz tabl. 3.2). Przy połączeniu szeregowym grup silników prąd przepływa przez stycznik nr 1, rezystor R_2 , stycznik nr 3, rezystor R_1 , pierwszą grupę silników, stycznik nr 6 i drugą grupę silników. W położeniu bezoporowym obie rezystancje są całkowicie zwarte (patrz rys. 3.12 *I*). Następnie zamyka się stycznik nr 2, otwiera nr 3, rozwarciu ulega rezystor R_2 , który zostaje dołączony do drugiej grupy silników poprzez zamknięcie stycznika nr 5.

Tabl. 3.2. Sekwencja przelączenia styczników – metoda bocznikowa

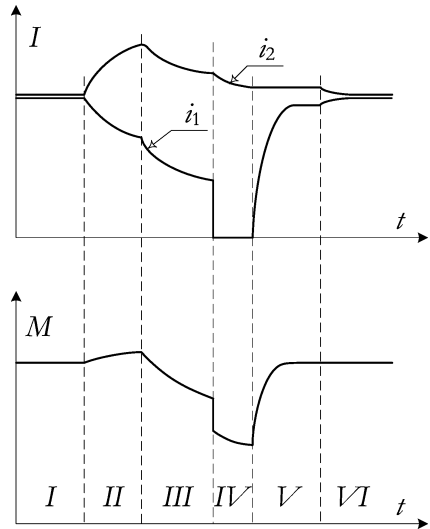
| Etap | Nr stycznika | | | | | | | | | |
|------------|--------------|---|---|---|---|---|---|--------|---------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 ÷ 10 | 11 ÷ 13 | |
| <i>I</i> | x | | x | | | x | | x | x | |
| <i>II</i> | x | x | | | x | x | | | x | |
| <i>III</i> | x | x | | | x | x | | | | |
| <i>IV</i> | x | x | | | x | | | | | |
| <i>V</i> | x | x | | | x | | x | | | |
| <i>VI</i> | x | x | | x | x | | x | | | |



Rys. 3.12. Przelączenie silników metodą bocznikową – etapy procesu

W ten sposób osiągany jest układ połączeń przedstawiony na rys. 3.12 *II*, w którym pierwsza grupa silników zostaje zbocznikowana rezystorem R_2 (stąd nazwa metody). W tym momencie prąd drugiej grupy silników wzrasta, a pierwszej maleje. Potem rozwarciu ulega rezystor R_1 , co sprawia, że wartości prądów obu grup silników maleją. W kolejnym etapie otwierany jest stycznik nr 6, co powoduje, że pierwsza grupa silników zostaje odłączona od zasilania i tym samym moment napędowy pojazdu spada do około 50% wartości początkowej (patrz rys. 3.13). Zamknięcie stycznika nr 7 daje równoległe połączenie grup silników (etap *V*). Na zakończenie,

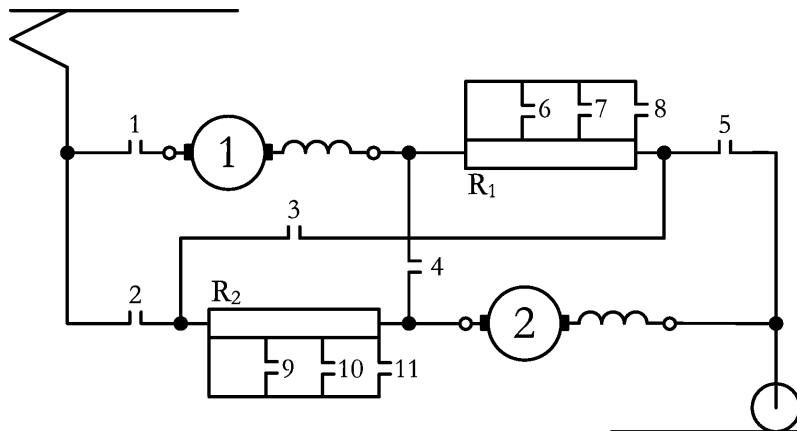
podobnie jak w przypadku metody zwarcia, zostają wyrównane wartości napięcia zasilającego maszyny poprzez zamknięcie stycznika nr 4. Zaletą metody bocznikowej jest wyeliminowanie zwierania grupy silników, a co za tym idzie, nie występuje składowa hamująca w momencie napędowym. Do wad należy zaliczyć konieczność rozłączenia pod obciążeniem stycznika nr 6, który musi przerwać prąd równy połowie prądu rozruchowego pierwszej grupy silników, co sprawia, że moc wyłączana przez niego jest znaczna. Pracuje więc on w trudniejszych warunkach niż przy metodzie zwarcia. To ogranicza obszar zastosowania metody bocznikowej do pojazdów średniej i mniejszej mocy np. tramwajowych (model N, produkcji *Konstal* był wyposażony w ten typ przelączania). Przy większych mocach, a tym samym wyższych wartościach prądów, gabaryty stycznika nr 6 byłyby zbyt duże.



Rys. 3.13. Przebiegi prądów grup silników oraz wypadkowego momentu napędowego przy przelączaniu metodą bocznikową

Przelączanie grup silników metodami zwarcia i bocznikową jest związane z dość znacznym zmniejszeniem wartości momentu rozruchowego, co jest odczuwalne szczególnie przy wyższych wartościach przyspieszeń, jakie są stosowane w pojazdach tramwajowych, metra czy kolei podziemskiej. Dlatego w tego typu pojazdach znalazła powszechne zastosowanie nieposiadająca tej wady metoda mostkowa.

Metoda mostkowa – uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu wykorzystującego do przelączania silników tą metodę pokazano na rys. 3.14, a odpowiednią sekwencję przelączania zamieszczono w tabl. 3.3.

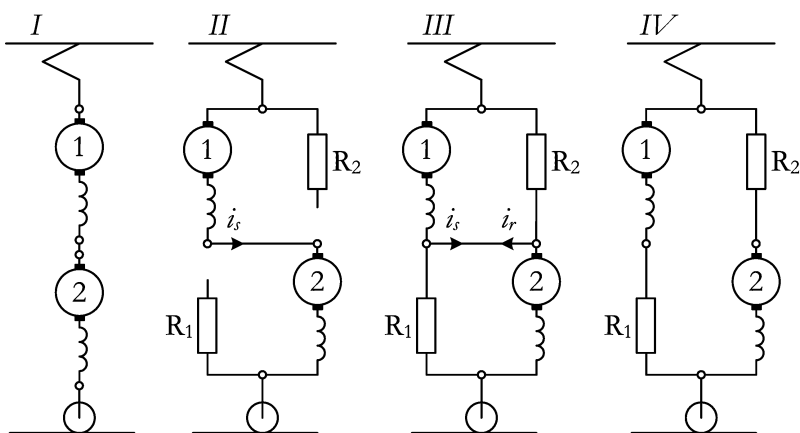


Rys. 3.14. Uproszczony schemat obwodu głównego przy przelączaniu silników z układu szeregowego na równoległy metodą mostkową

Tabl. 3.3. Sekwencja przełączania styczników – metoda mostkowa

| Etap | Nr stycznika | | | | | | |
|------|--------------|---|---|---|---|-------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 ÷ 8 | 9 ÷ 11 |
| I | x | | x | | | x | x |
| II | x | | | x | | | |
| III | x | x | | x | x | | |
| IV | x | x | | | x | | |

W położeniu bezoporowym przy połączeniu szeregowym prąd płynie przez zamknięty stycznik nr 1, pierwszą grupę silników, zwarty rezystor R_1 , stycznik nr 3, zwarty rezystor R_2 i drugą grupę silników. Stan połączeń elektrycznych dla tego etapu pokazano na rys. 3.15 I. W drugim etapie przełączania następuje zamknięcie stycznika nr 4, otwarcie nr 3, a także rozwarcie rezystorów rozruchowych. Otrzymywany jest wówczas stan połączeń, jak na rys. 3.15 II. Następnie zamykane są styczniki nr 2 i 5. Wartości rezystancji R_1 i R_2 powinny być dobrane tak, by prąd i , płynący przez nie był równy co do wartości prądowi silników i_s . Wówczas można, otwierając stycznik nr 4, przejść do pierwszego stopnia oporowego przy połączeniu silników w położeniu równoległym. Ponieważ wartości prądów płynących przez oporniki rozruchowe i silniki są jednakowe, otwieranie stycznika nr 4 odbywa się teoretycznie w stanie bezprądowym. Jak widać, podczas zmiany konfiguracji połączeń wartość prądu płynącego przez silniki nie ulega zmianie, zatem nie występują żadne wahania momentu napędowego, co jest podstawową zaletą tej metody. Jej wadą jest niemożność wyrównania wartości napięć zasilających silniki trakcyjne po zakończeniu procesu przełączania, co wymusza szczególnie staranny dobór tych silników o jak najbardziej zbliżonych charakterystykach, tak by nie następowało niejednakowe obciążanie maszyn w połączeniu równoległym. Ponadto należy pamiętać, że rozłączenie bezprądowe stycznika nr 4 będzie miało miejsce tylko dla jednej określonej wartości prądu silnika i_s i jednej wartości napięcia sieciowego. W innych przypadkach przez gałąź mostka będzie płynął prąd wyrównawczy, który stycznik nr 4 będzie musiał przerwać.



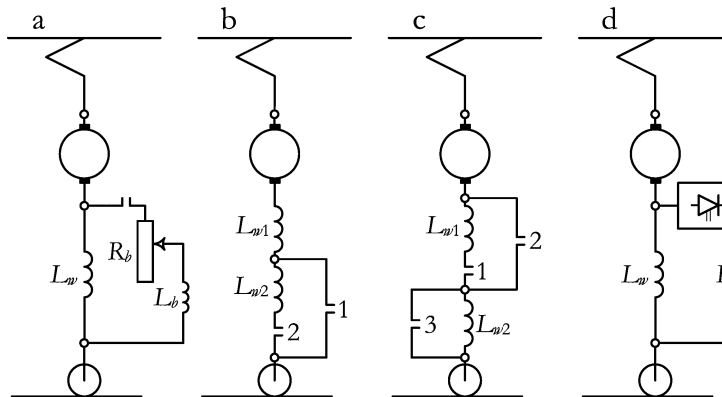
Rys. 3.15. Przełączanie silników metodą mostkową – etapy procesu

3.2.1.4. Regulacja prędkości przez osłabianie wzbudzenia

Dla tzw. charakterystyk naturalnych silników trakcyjnych (bezoporowych) przy pełnej lub obniżonej wartości napięcia możliwa jest regulacja prędkości pojazdu przez osłabianie strumienia wzbudzenia maszyn. Osłabianie to może być zrealizowane następującymi metodami:

- bocznikowania części prądu płynącego przez uzwojenie wzbudzenia,
- odłączania części uzwojeń wzbudzenia,
- zmiany konfiguracji uzwojeń wzbudzenia (możliwe dla uzwojeń sekcjonowanych),
- zastosowanie energoelektronicznego modulatora rezystancji do osłabienia wzbudzenia.

Schematy możliwych wariantów zmiany strumienia wzbudzenia przedstawiono na rys. 3.16.



Rys. 3.16. Metody odwzbudzenia silników trakcyjnych

Najczęściej stosowaną metodą jest bocznikowanie uzwojenia wzbudzenia (rys. 3.16 a), ponieważ w takim układzie można uzyskać dużą liczbę stopni osłabiania. W tej metodzie, równoległe do uzwojenia wzbudzenia dołącza się bocznik rezystancyjny lub częściowej rezystancyjno indukcyjny i poprzez zmianę wartości rezystancji regulowany jest stosunek prądu omijającego uzwojenie wzbudzenia do prądu płynącego przez to uzwojenie, czyli stopień odwzbudzenia. Dodatkowa indukcyjność w obwodzie bocznikującym zapobiega gwałtownym silnym zmniejszaniom strumienia wzbudzenia, jakie mogą zachodzić przy szybkich zmianach wartości prądu płynącego przez silniki (np. wywołanych oderwaniem się odbieraka od sieci trakcyjnej). W takich stanach niestabilnych, przy braku indukcyjności dodatkowej, prąd przepływałby głównie przez bocznik rezystancyjny, wywołując chwilowe znaczne osłabienie strumienia wzbudzenia silnika, niepożądane z punktu widzenia prawidłowej komutacji. Znacznie rzadziej stosowane są metody odłączania części uzwojenia (rys. 3.16 b) i przełączania uzwojeń (rys. 3.16 c), wymagające podziału uzwojenia wzbudzenia na sekcje i wyprowadzenia dużej liczby zacisków umożliwiających dokonywanie łączeń. Metoda wykorzystująca modulator rezystancji nie znalazła w pojazdach klasycznych szerszego zastosowania, głównie ze względu na konieczność dodatkowego wyposażenia pojazdu w filtr wejściowy LC , tłumiący zakłócenia emitowane do układu zasilania, a generowane przez łącznik półprzewodnikowy. Bywa za to wykorzystywana w pojazdach z rozruchem impulsowym, które i tak muszą być wyposażone w taki filtr. Osłabianie strumienia wzbudzenia może być realizowane, w zależności od konstrukcji silników, do poziomu około 50% dla maszyn bez uzwojeń kompensujących i 20% dla wyposażonych w uzwojenia kompensujące.

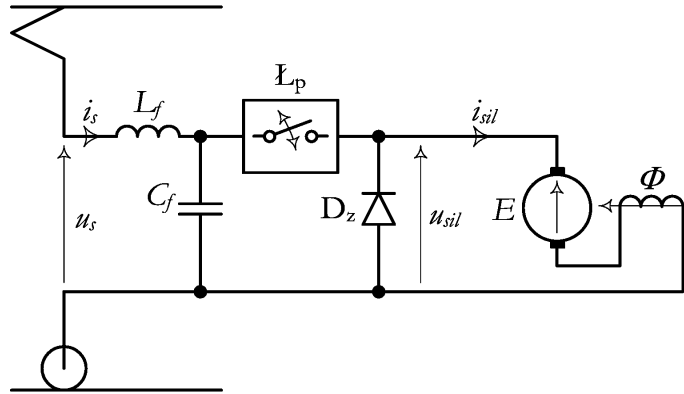
Ograniczenie to jest spowodowane jakością komutacji w silniku. Nadmierne osłabienie strumienia wzbudzenia wywołuje wzrost różnicy potencjałów na poszczególnych sekcjach komutatora, co w skrajnym przypadku może doprowadzić do iskrzenia, a nawet powstania łuku okrężnego na komutatorze.

3.2.2. Pojazdy z rozruchem impulsowym i silnikami szeregowymi prądu stałego

Straty energii w rezystorach rozruchowych są niepożądane. Udział strat w całkowitym zużyciu energii jest tym większy, im częściej przeprowadzany jest rozruch pojazdu. Problem ten jest więc najbardziej widoczny dla tramwajów, trolejbusów, pojazdów metra czy szybkiej kolei miejskiej, czyli wszędzie tam, gdzie odległości międzyprzystankowe są niewielkie. W ruchu dalekobieżnym rozruchy odbywają się rzadko, co sprawia, że ilość energii straconej w rezystorach jest mała w porównaniu do jej całkowitego zużycia. Problem strat rozruchowych ma więc znaczenie drugorzędne. Skonstruowanie elementów energoelektronicznych na duże wartości prądu i napięcia umożliwiło budowę układów napędowych pojazdów, wyposażonych w silniki szeregowo prądu stałego, o rozruchu bezstratnym (jeżeli pominąć straty energii w elementach półprzewodnikowych). W pojazdach tych rezystory rozruchowe zastąpiono łącznikiem energoelektronicznym, umożliwiającym zmianę średniej wartości napięcia poprzez cykliczne jego załączanie i wyłączenie (impulsowanie). Jako łączniki są stosowane, w starszych konstrukcjach, tyrystory GTO, a w nowszych tranzystory IGBT. Układy rozruchu impulsowego rozpowszechniły się w latach 70. XX wieku w pojazdach komunikacji miejskiej i podmiejskiej, czyli tam, gdzie korzyści wynikające z ich stosowania są najbardziej widoczne. Ponadto moce tramwajów, trolejbusów czy pojazdów metra są mniejsze niż lokomotyw, a więc wcześniej pojawiły się elementy półprzewodnikowe o parametrach energetycznych wystarczających do sterowania pracą obwodów głównych tych pojazdów. W przypadku lokomotyw i innych pojazdów dalekobieżnych większa moc, a co za tym idzie – zwiększone trudności technologiczne wykonania elementów półprzewodnikowych oraz mniejsze korzyści stosowania w tych pojazdach rozruchu impulsowego sprawiły, że ten rodzaj napędu w pojazdach kolejowych spotyka się sporadycznie. W czasie gdy pojawiły się już elementy energoelektroniczne o bardzo dużej mocy wystarczającej do obsługi układów napędowych lokomotyw, nastąpiła epoka układów falownikowych z silnikami indukcyjnymi lub synchronicznymi. Można więc powiedzieć, że etap rozruchu impulsowego został w pojazdach kolejowych dużej mocy zasilanych z sieci napięcia stałego pominięty. Jedynie niekiedy podczas modernizacji zastępuje się układy rozruchu oporowego impulsowym (np. lokomotywa *EM10*).

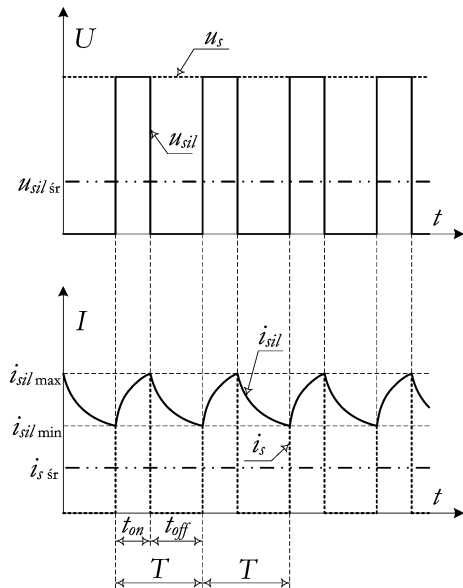
3.2.2.1. Zasada impulsowej regulacji wartości napięcia

Sterowanie impulsowe wartością napięcia zasilającego polega na okresowym załączeniu i wyłączeniu obwodu silników trakcyjnych z dużą częstotliwością, której wartość jest uzależniona od parametrów zastosowanych elementów energoelektronicznych. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu trakcyjnego podczas rozruchu impulsowego przedstawiono na rys. 3.17.



Rys. 3.17. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu z rozruchem impulsowym – opis w tekście

W przedstawionym układzie występują dwa stany. Jeden, gdy łącznik półprzewodnikowy L_p przewodzi – wówczas prąd z sieci dopływa do silnika, oraz drugi, gdy łącznik jest w stanie blokowania i prąd z sieci nie dopływa do silnika. Wówczas energia elektromagnetyczna zgromadzona w indukcyjnościach uzwojeń silnika rozładowuje się przez diodę zwrotną D_z , podtrzymując ciągłość prądu silnika. Wartość średnia napięcia na silniku u_{sr} otrzymywana jest w wyniku uśrednienia przebiegu napięcia prostokątnego w każdym cyklu impulsowania. W stanie ustalonym wartość prądu płynącego przez silnik jest określona rezystancją obwodu silnika oraz siłą elektromotoryczną rotacji wirnika. W stanie nieustalonym szybkość narastania lub opadania prądu zależna jest od stałej czasowej obwodu. Stała ta jest określona parametrami indukcyjnymi i rezystancyjnymi obwodu silnika (stała czasowa L/R). Rozruch impulsowy to następujące po sobie narastania i opadania prądu. W czasie gdy łącznik półprzewodnikowy jest zamknięty, prąd silnika i_{sil} narasta i jest równy co do wartości prądowi i_s pobieranemu ze źródła zasilającego. Gdy łącznik jest otwarty, prąd silnika opada, a prąd ze źródła zasilania nie jest pobierany. To sprawia, że średnia wartość prądu płynącego przez silnik jest wyższa niż prądu pobieranego z sieci trakcyjnej. Dzięki temu moc pobierana z sieci trakcyjnej jest równa tej dostarczonej do silnika, gdyż (pomijając straty w elementach półprzewodnikowych) iloczyn wartości średnich napięcia zasilania i prądu pobieranego ze źródła oraz napięcia silnika i prądu silnika są sobie równe. Przebiegi wielkości charakterystycznych, tj. napięcia sieci u_s , napięcia na silniku u_{sil} , prądu pobieranego z sieci i_s oraz prądu silnika i_{sil} , ilustrujące zasadę impulsowej regulacji napięcia, przedstawiono na rys. 3.18. Wartość średnia napięcia na zaciskach silnika określona jest zależnością:



Rys. 3.18. Zasada impulsowej regulacji napięcia – opis w tekście

$$u_{sil\acute{s}r} = \frac{1}{T} \cdot (u_s \cdot t_{on}) = u_s \cdot \frac{t_{on}}{T}, \quad (3.2)$$

gdzie: t_{on} – czas załączenia łącznika; T – okres impulsowania.

Współczynnik wypełnienia a równy jest:

$$a = \frac{t_{on}}{T}. \quad (3.3)$$

Wówczas średnią wartość napięcia na silniku oraz wartość napięcia w sieci trakcyjnej łączy zależność:

$$u_{sil\acute{s}r} = a \cdot u_s. \quad (3.4)$$

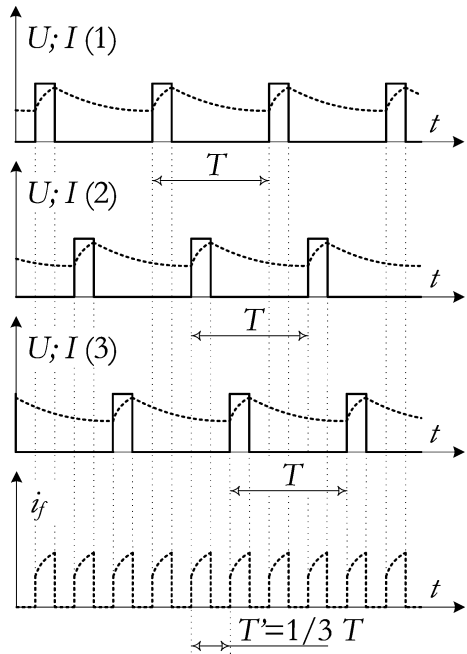
Współczynnik wypełnienia a może zmieniać się w zakresie od 0 do 1. Dla $a = 0$ średnia wartość napięcia na zaciskach silnika wynosi $u_{sil\acute{s}r} = 0$ i silnik pozostaje nieruchomy lub pracuje wybiegiem, natomiast dla $a = 1$ na zaciski silnika podane jest napięcie równe napięciu zasilającemu (jeżeli pominąć spadek napięcia na łączniku energoelektronicznym). Oczywiście, dzięki impulsowej regulacji średniej wartości napięcia nie jest wymagane przelączanie grup silników podczas rozruchu. W momencie, gdy współczynnik wypełnienia osiągnie wartość $a = 1$, łącznik półprzewodnikowy jest zwierany stycznikiem w celu wyeliminowania strat energii w elemencie energoelektronicznym wywołanych spadkiem napięcia na tym elemencie. Dalsza regulacja prędkości odbywa się poprzez osłabianie strumienia wzbudzenia silników trakcyjnych w sposób identyczny jak dla pojazdów klasycznych.

3.2.2.2. Dodatkowe wymagania dla pojazdów z rozruchem impulsowym

Impulsowe załączanie i wyłączenie napięcia jest źródłem zaburzeń, które emitowane do sieci trakcyjnej mogą negatywnie wpływać na pracę innych pojazdów czy układów teletransmisyjnych i sterowania ruchem. Dlatego wymagane jest zastosowanie w obwodzie głównym pojazdu filtra wejściowego $L_f C_f$. Jest to filtr dolnoprzepustowy typu gamma. Jego parametry elektryczne (tj. indukcyjność i pojemność) zależą od częstotliwości impulsowania, z którą związana jest wymagana wartość częstotliwości granicznej. Z punktu widzenia parametrów konstrukcyjnych filtra (gabaryty, masa) należy stosować jak najwyższe częstotliwości impulsowania. Jednak stosowanie dużych częstotliwości jest ograniczone zarówno parametrami elementów półprzewodnikowych (maksymalna częstotliwość pracy, czas wyłączenia, blokowania itp.), jak i stratami powstającymi w tych elementach podczas każdego cyklu przelączania. W praktyce w pojazdach dużych mocy stosuje się częstotliwości wynoszące kilka kHz, a dla pojazdów mniejszej mocy wzrastają one do kilkunastu, kilkudziesięciu kHz. Częstotliwość ta może zostać zwiększona, z punktu widzenia pracy filtra wejściowego, poprzez zastosowanie tzw. układów wielofazowych. Układ wielofazowy to nic innego, jak dwa lub więcej układy impulsowe zasilające osobno silnik lub grupę silników. Momenty załączania i wyłączenia w poszczególnych łącznikach są przesunięte w czasie tak, że wypadkowa częstotliwość impulsowania widziana od strony filtra jest iloczynem częstotliwości podstawowej i liczby łączników. Zasada działania impulsowych układów wielofazowych na przykładzie systemu trójfazowego została przedstawiona graficznie na rys. 3.19. Wyraźnie widać,

że częstotliwość impulsowania prądu i_f pobieranego z filtra wejściowego jest trzykrotnie wyższa od częstotliwości pracy łączników energoelektronicznych.

Zasilanie impulsowe nie pozostaje bez wpływu na pracę silników trakcyjnych. Napięcie impulsowe jest oczywiście napięciem jednoimiennym, jednak prąd silnika wywołany siłą elektromotoryczną o takim kształcie, mimo dużej wartości indukcyjności uzwojeń, nie jest prądem stałym, ale tętniącym. W silniku szeregowym prądu stałego na użyteczną energię mechaniczną zostaje zamieniona tylko składowa stała prądu. Wszystkie składowe zmienne zamieniane są na energię ciepłą. Dodatkowo, te o niższej częstotliwości mogą wywoływać drgania uzwojeń i przekładni mechanicznej napędu, a te o wyższej – hałas w postaci brzęczenia, którego natężenie może być słyszalne dla pasażerów. Zwiększenie ilości ciepła wydzielanego w uzwojeniach maszyn wymaga ich nieznacznego przewymiarowania, w praktyce o około $5 \div 10\%$.



Rys. 3.19. Zasada działania układów impulsowych wielofazowych – opis w tekście

3.2.3. Pojazdy z napędem przekształtnikowym i silnikami prądu przemiennego

Pojazdy z rozruchem impulsowym stanowią pośredni etap rozwoju pomiędzy pojazdami klasycznymi a współczesnymi, gdyż są one nadal wyposażone w kosztowne w eksploatacji i kłopotliwe w utrzymaniu trakcyjne silniki szeregowo prądu stałego. Rozwój energoelektroniki i postęp w dziedzinie budowy napędowych układów przekształtnikowych umożliwił opracowanie pojazdu zasilanego z sieci prądu stałego, a napędzanego przez stosunkowo tanie i niezawodne silniki indukcyjne.

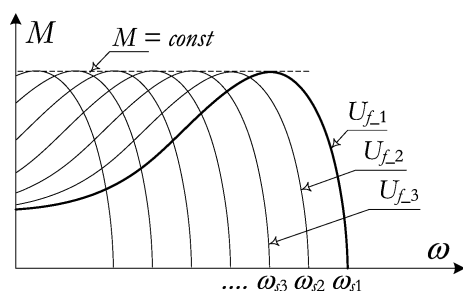
3.2.3.1. Zasada kształtowania charakterystyk silnika indukcyjnego

Regulacja prędkości pojazdu z silnikami indukcyjnymi wymaga zastosowania falownika, czyli układu przekształcającego energię napięcia stałego na energię napięcia przemiennego. Podstawowe parametry wyjściowe napięcia przemiennego, tj. wartość napięcia i częstotliwości, muszą się zmieniać w szerokich granicach. Sterowanie pracą silnika indukcyjnego musi się odbywać w taki sposób, by kształt charakterystyki trakcyjnej pojazdu był optymalny z punktu widzenia potrzeb trakcyjnych (patrz rys. 3.1). Moment napędowy trójfazowego silnika indukcyjnego o jednej parze biegunów dany jest zależnością:

$$M = \frac{3 \cdot U_f^2 \cdot R_2'}{s \cdot \omega_s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right) + (X_1 + X_2')^2 \right]}, \quad (3.5)$$

gdzie: U_f – napięcia fazowe sieci zasilającej; R_1 – rezystancja fazy stojana; R_2' – rezystancja fazy wirnika sprowadzona do stojana; X_1 – reaktancja fazy stojana; X_2' – reaktancja fazy wirnika sprowadzona do stojana; s – poślizg; ω_s – prędkość synchroniczna wirowania pola.

Wartość reaktancji uzwojeń silnika jest funkcją prędkości wirnika, czyli pośrednio i częstotliwości napięcia zasilającego. Zatem z zależności 3.5 wynika, że wartość momentu maksymalnego silnika jest wprost proporcjonalna do kwadratu napięcia zasilającego, a z pewnym przybliżeniem, odwrotnie proporcjonalna do kwadratu jego



Rys. 3.20. Charakterystyki silnika indukcyjnego w obszarze regulacji ze stałym momentem

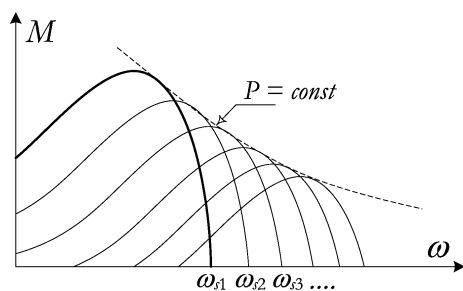
częstotliwości. Aby otrzymać kształt charakterystyki trakcyjnej w obszarze pracy ze stałym momentem ($M = \text{const.}$), należy więc utrzymywać stałą wartość stosunku U_f/ω_s . Otrzymamy wówczas zależność momentu od prędkości, przedstawioną na rys. 3.20. Wzrost wartości napięcia fazowego U_f jest możliwy do chwili, gdy jego wartość maksymalna zrówna się z wartością napięcia w obwodzie prądu stałego. Od tej chwili, zgodnie z zależnością 3.5, przy zwiększaniu częstotliwości

napięcia moment napędowy musi się obniżać przy zachowaniu stałej mocy układu ($P = \text{const.}$), jako że powiązanie mocy i momentu silnika indukcyjnego wyraża się wzorem:

$$P = M \cdot \omega = M \cdot \omega_s \cdot (1 - s), \quad (3.6)$$

gdzie: P – moc; ω – prędkość kątowa wirnika.

Utrzymując stałą wartość napięcia zasilającego i zwiększając jego częstotliwość, otrzymamy zależność momentu od prędkości przedstawioną na rys. 3.21. Zwiększanie częstotliwości napięcia zasilającego jest ograniczone maksymalną wartością poślizgu, przy jakiej może pracować silnik. W związku z tym układy sterowania niektórych pojazdów umożliwiają, po osiągnięciu tej

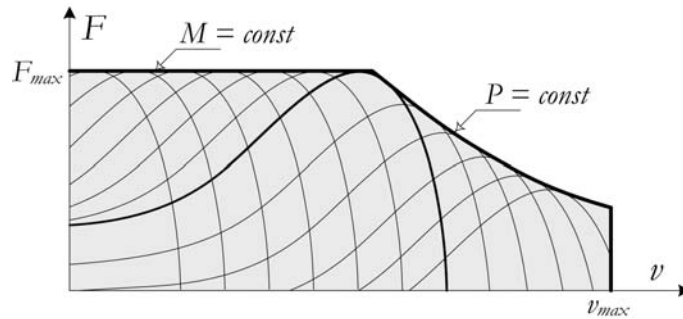


Rys. 3.21. Charakterystyki silnika indukcyjnego w obszarze regulacji ze stałą mocą

dalszy wzrost prędkości przy ograniczeniu mocy pojazdu, sterując na stałą wartość poślizgu silnika. Łącząc charakterystyki silnika dla obszarów sterowania ze stałym momentem i sterowania ze stałą mocą, otrzymamy podstawową wypadkową charakterystykę trakcyjną pojazdu napędzanego silnikami indukcyjnymi pokazaną na rys. 3.22. Należy pamiętać, że w przeciwieństwie do pojazdów klasycznych dostępne do pracy długotrwałej są nie pojedyncze charakterystyki czy rodziny charakterystyk, ale cały obszar pod krzywą

charakterystyki granicznej zaznaczony na rys. 3.22 kolorem szarym. Sterowanie układem napędowym pojazdu może być więc realizowane tak, by uzyskać wymaganą kombinację wielko-

ści siły pociągowej i prędkości. Możliwa jest więc np. jazda ze sterowaniem na wartość prędkości zadanej, czy ruszanie z zadaną wartością przyspieszenia. Takie sterowanie jest nieosiągalne lub bardzo kłopotliwe w realizacji dla pojazdów klasycznych czy wyposażonych w rozruch impulsowy. Nie oznacza to bynajmniej, że pojazdy z napędem przekształtnikowym i silnikami napięcia przemiennego są pozbawione wad. Pierwszą wadą jest, podobnie jak w pojazdach z rozruchem impulsowym, konieczność zastosowania filtra wejściowego L_f, C_f . Drugą wadą jest fakt, że przekształtniki trakcyjne muszą pracować cały czas. Nie ma możliwości bezpośredniego podłączenia silników do sieci zasilającej, jak miało to miejsce w poprzednich generacjach pojazdów. Ciągła praca przekształtnika wiąże się ze stratami energii w elementach półprzewodnikowych. Moc wydzielana na tych elementach sięga dla pojazdów większej mocy kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu kilowatów. To sprawia, że globalna sprawność układu napędowego pojazdu przekształtnikowego z silnikami napięcia przemiennego jest niższa niż pojazdów z rozruchem impulsowym, a w niektórych warunkach eksploatacji (rzadkie rozruchy) nawet niższa od pojazdów klasycznych. Jednak zalety w postaci swobody sterowania parametrami napędu oraz większa niezawodność samych silników sprawiają, że praktycznie wszystkie nowo budowane pojazdy są wyposażone w napęd z silnikami indukcyjnymi lub, w najnowszych konstrukcjach (np. jednostka *AGV* produkcji *Alstom*), silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi.



Rys. 3.22. Charakterystyka trakcyjna pojazdu napędzanego silnikami indukcyjnymi sterowanymi przekształtnikowo

3.2.3.2. Metoda sterowania pracą silnika indukcyjnego prądu przemiennego

Najczęściej wykorzystywaną metodą sterowania pracą silników prądu przemiennego w pojazdach trakcyjnych jest tzw. metoda wektorowa połowo zorientowana. Pozwala ona na zbliżenie właściwości silnika prądu przemiennego (indukcyjnego lub synchronicznego) do właściwości maszyny prądu stałego. Wykorzystując opis matematyczny w wirującym układzie współrzędnych d, q , związanych z wirnikiem, uzyskujemy możliwość sterowania silnikiem napięcia przemiennego jak silnikiem prądu stałego, gdyż wartość prądu w osi q silnika jest proporcjonalna do momentu napędowego, a wartość prądu w osi d do strumienia silnika. Metoda sterowania wektorowego zostanie poniżej omówiona szczegółowo dla silnika indukcyjnego. Może być ona również stosowana, jeżeli pojazd napędzany jest silnikami synchronicznymi. Dla tych maszyn prędkości wirowania pola stojana i wirnika są sobie równe, i tym samym wymaganych jest mniej przekształceń matematycznych niż dla silnika indukcyjnego. Schemat blokowy układu sterowania

wektorowego połowo zorientowanego silnikiem indukcyjnym przedstawiono na rys. 3.23. Wielkościami wejściowymi do układu są: strumień referencyjny Ψ_{ref} odpowiadający pełnej wartości wzbudzenia silnika, moment zadany M_ζ wykorzystywany w obszarze regulacji momentu oraz moc zadana P_s , z której korzysta się w obszarze regulacji mocy. W trybie regulacji momentu wartości prądów zadanych $i_{d\zeta}$, $i_{q\zeta}$ mają wartość stałą wyliczaną z zależności:

$$i_{d\zeta} = \frac{\Psi_\zeta}{L_m}, \quad (3.7)$$

$$i_{q\zeta} = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{M_\zeta}{\Psi_\zeta}, \quad (3.8)$$

gdzie: Ψ_ζ – wartość zadana strumienia wirnika ($\Psi_\zeta = \Psi_{ref}$), M_ζ – wartość zadana momentu elektromagnetycznego, L_m – indukcyjność magnesująca, k_m – współczynnik momentu maszyny.

Wielkość k_m wyraża się wzorem:

$$k_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{p_p \cdot L_m}{(L_r + L_m)}, \quad (3.9)$$

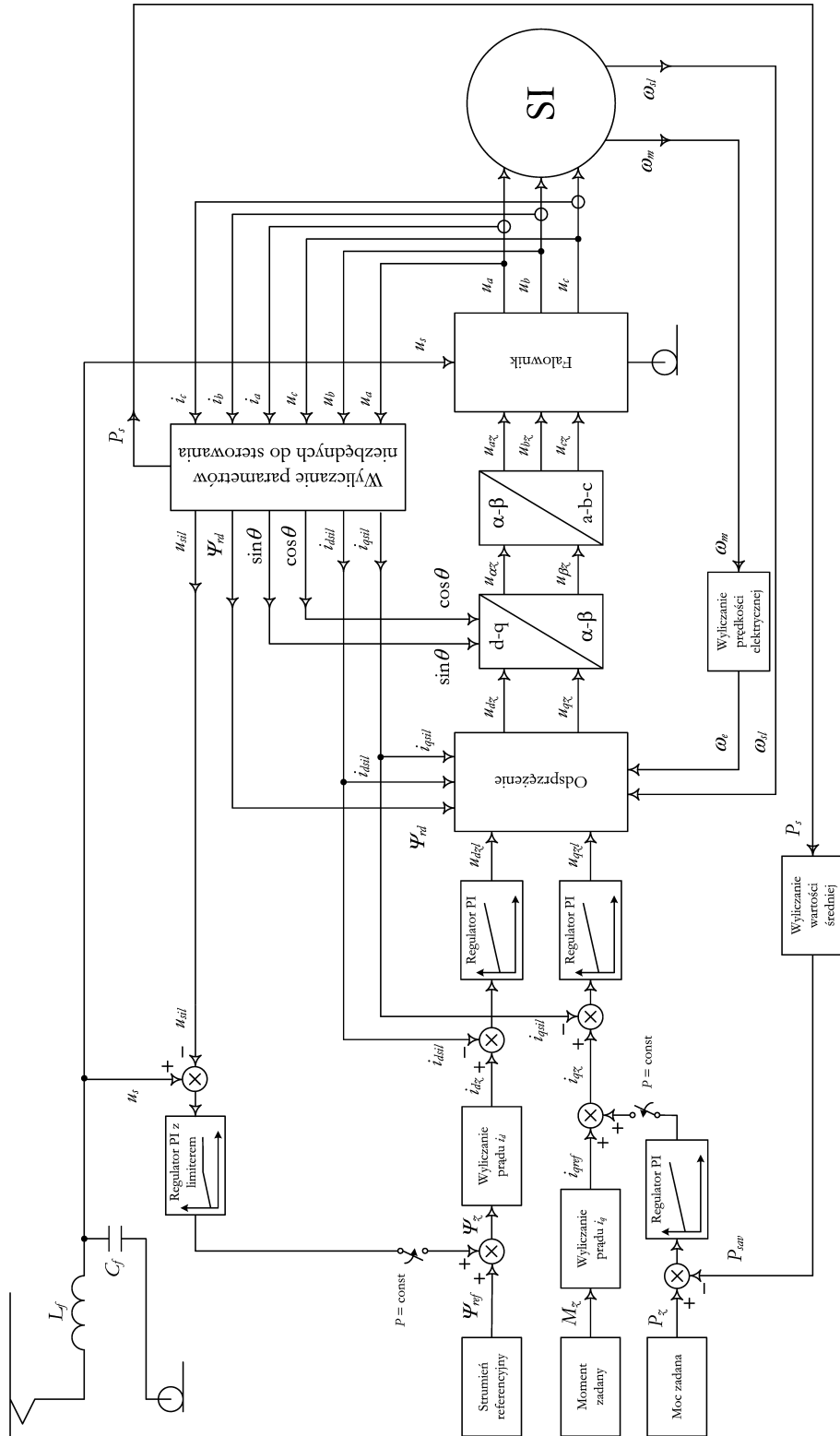
gdzie: p_p – liczba par biegunów. L_r – indukcyjność wirnika.

Zmiana trybu regulacji z momentu (najczęściej $M = \text{const.}$) na tryb regulacji mocy (najczęściej $P = \text{const.}$) następuje, gdy napięcie na silniku u_{sil} osiągnie wartość napięcia zasilającego na kondensatorze filtra wejściowego pojazdu u_s , czyli wartość napięcia w sieci trakcyjnej, lub inną wartość zadaną, gdy chcemy regulować pracę pojazdu na moc mniejszą od maksymalnej. Wówczas sygnał różnicowy pomiędzy tymi dwiema wielkościami jest podawany na wejście regulatora proporcjonalno całkującego PI. Sygnał wyjściowy z regulatora oddziałuje na wartość strumienia zadanego tak, aby utrzymać wartość napięcia na silniku równą napięciu na kondensatorze filtra wejściowego. Analogicznie, na podstawie sygnałów mocy rzeczywistej P_{sat} i mocy zadanej P_ζ otrzymywany jest sygnał, który modyfikuje wartość zadaną prądu $i_{q\zeta}$ w celu utrzymania mocy pobieranej na stałym poziomie. Następnie, na podstawie wartości zadanych prądów $i_{d\zeta}$ oraz $i_{q\zeta}$ konieczne jest uzyskanie sygnałów sterujących pracą falownika napięcia $u_{d\zeta}$, $u_{b\zeta}$ i $u_{c\zeta}$. Wartości zadane prądów w osiach d i q są porównywane z prądami rzeczywistymi silnika i_{dsil} oraz i_{qsil} , otrzymanymi z pomiaru i przekształcenia prądów trójfazowych. Sygnały różnicowe są podawane na wejścia regulatorów proporcjonalno całkujących PI. Na wyjściach z regulatorów otrzymujemy wartości zadane napięć w osiach d i q , a mianowicie $u_{d\zeta}$ oraz $u_{q\zeta}$. Sygnały te są następnie poddane odsprężeniu w celu wyeliminowania wpływu zmian jednej wielkości na drugą. Odsprężanie jest realizowane według poniższych zależności:

$$u_{d\zeta} = u_{d\zeta l} - \left[(\omega_e + \omega_{sl}) \cdot \left(L_s - \frac{L_m^2}{(L_r + L_m)} \right) \cdot i_{qsil} + \frac{\Psi_{rd} \cdot L_m}{(L_r + L_m) \cdot \tau_r} \right], \quad (3.10)$$

$$u_{q\zeta} = u_{q\zeta l} + \left[(\omega_e + \omega_{sl}) \cdot \left(L_s - \frac{L_m^2}{(L_r + L_m)} \right) \cdot i_{dsil} + \frac{\Psi_{rd} \cdot L_m \cdot \omega_e}{(L_r + L_m)} \right], \quad (3.11)$$

gdzie: ω_e – prędkość kątowa wirnika elektryczna, ω_{sl} – poślizg elektryczny, L_s – indukcyjność stojana, Ψ_{rd} – moduł wektora strumienia, τ_r – stała czasowa wirnika.



Rys. 3.23. Schemat układu sterowania silnikiem indukcyjnym metodą wektorową połowo zorientowaną – opis w tekście

Stała czasowa wirnika opisana jest zależnością:

$$\tau_r = \frac{L_r + L_m}{R_r}, \quad (3.12)$$

gdzie: R_r – rezystancja wirnika odniesiona do stojana

Otrzymane na wyjściu układu od sprzęgania sygnały sterujące u_{dq} $u_{q\kappa}$ są następnie przekształcane za pomocą dwukrotnej, odwrotnej transformaty Clarke'a – Parke'a $d,q \rightarrow \alpha,\beta$ oraz $\alpha,\beta \rightarrow a,b,c$:

$$u_{\alpha\kappa} = u_{d\kappa} \cdot \cos \theta - u_{q\kappa} \cdot \sin \theta, \quad (3.13a)$$

$$u_{\beta\kappa} = u_{d\kappa} \cdot \sin \theta + u_{q\kappa} \cdot \cos \theta, \quad (3.13b)$$

gdzie: θ – kąt pomiędzy układami współrzędnych d,q i α,β ,

$$u_{a\kappa} = u_{\alpha\kappa}, \quad (3.14a)$$

$$u_{b\kappa} = \frac{3}{2} \cdot \left(-\frac{1}{3} \cdot u_{\alpha\kappa} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot u_{\beta\kappa} \right), \quad (3.14b)$$

$$u_{c\kappa} = \frac{3}{2} \cdot \left(-\frac{1}{3} \cdot u_{\alpha\kappa} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot u_{\beta\kappa} \right). \quad (3.14c)$$

Sygnały $u_{a\kappa}$ $u_{b\kappa}$ $u_{c\kappa}$ otrzymane na wyjściu podukładu sterowania wektorowego podawane są na wejście falownika. Na ich podstawie na wyjściu falownika otrzymywane są napięcia fazowe u_a u_b oraz u_c .

Sygnały sprzężenia zwrotnego, niezbędne do sterowania pracą silnika, są otrzymywane za pomocą przekształceń mierzonych wielkości napięć i prądów w poszczególnych fazach zasilających silnik. Napięcie silnika u_s jest wyrażone poprzez zależność:

$$u_s = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}, \quad (3.15)$$

której wielkości składowe u_α i u_β uzyskiwane są z napięć trójfazowych za pomocą transformaty Clarke'a, $a,b,c \rightarrow \alpha,\beta$:

$$u_\alpha = \frac{2}{3} \cdot \left(u_a - \frac{1}{2} \cdot u_b - \frac{1}{2} \cdot u_c \right), \quad (3.16a)$$

$$u_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (u_b - u_c). \quad (3.16b)$$

Strumień wirnika wyliczany jest na podstawie składowych osiowych α,β (składowe te otrzymywane są z obliczeń siły elektromotorycznej rotacji wirnika wyznaczanej na podstawie opisu matematycznego maszyny – w niniejszych rozważaniach zależności te zostają pominięte – patrz [21]) według zależności:

$$\Psi_{rd} = \sqrt{\Psi_{\alpha r}^2 + \Psi_{\beta r}^2}. \quad (3.17)$$

Sinus i cosinus kąta θ wyznaczany jest na podstawie składowych strumienia wirnika:

$$\sin \theta = \frac{\Psi_{\beta r}}{\sqrt{\Psi_{\alpha r}^2 + \Psi_{\beta r}^2}}, \quad (3.18)$$

$$\cos \theta = \frac{\Psi_{\alpha r}}{\sqrt{\Psi_{\alpha r}^2 + \Psi_{\beta r}^2}}. \quad (3.19)$$

Sygnały zwrotne prądów osiowych w osiach związanych z wirnikiem (d, q) są otrzymywane z prądów fazowych a, b, c według transformaty Clarke'a-Parke'a:

$$i_{\alpha sil} = \frac{2}{3} \cdot \left(i_a - \frac{1}{2} \cdot i_b - \frac{1}{2} \cdot i_c \right), \quad (3.20a)$$

$$i_{\beta sil} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_b - i_c). \quad (3.20b)$$

$$i_{d sil} = i_{\alpha sil} \cdot \cos \theta + i_{\beta sil} \cdot \sin \theta, \quad (3.21a)$$

$$i_{q sil} = -i_{\alpha sil} \cdot \sin \theta + i_{\beta sil} \cdot \cos \theta. \quad (3.21b)$$

Wartość chwilowa mocy elektrycznej pobieranej przez silnik jest wyliczana na podstawie chwilowych wartości prądów fazowych i_a, i_b, i_c oraz napięć fazowych u_a, u_b, u_c . Chwilowa moc elektryczna jest wyliczana według poniższego wzoru:

$$p_s = u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c. \quad (3.22)$$

Cały proces regulacji odbywa się z wykorzystaniem układów mikroprocesorowych, które pozwalają na dowolne kształtowanie charakterystyki trakcyjnej pojazdu, przy sterowaniu silnikiem indukcyjnym tak jak maszyną prądu stałego, za pomocą zadawania wartości momentu i strumienia. Oprócz tej metody sterowania są spotykane i inne w tym bezczujnikowe. Jednak najkorzystniejsza z punktu widzenia sterowania pojazdem trakcyjnym i najczęściej stosowana jest opisana powyżej metoda wektorowa połowo zorientowana.

3.3. Pojazdy zasilane z sieci napięcia przemiennego

W pojazdach zasilanych z sieci napięcia przemiennego, podobnie jak w tych zasilanych z sieci napięcia stałego, budowa układu napędowego i metoda sterowania prędkością jest różna dla poszczególnych generacji pojazdów. Dodatkowo różnice występują również w zależności od systemu napięcia zasilającego (o częstotliwości obniżonej, przemysłowej, jedno – czy trójfazowy). Z tego powodu zauważalna jest znacznie większa różnorodność rozwiązań sterowania napędem pojazdów zasilanych z sieci napięcia przemiennego. Możemy tutaj wymienić następujące rozwiązania układów napędowych:

- z silnikami asynchronicznymi pierścieniowymi zasilanymi bezpośrednio lub za pośrednictwem transformatora z sieci trójfazowej – stosowane w systemach trójfazowych;
- z silnikami komutatorowymi zasilanymi bezpośrednio z transformatora pojazdu – dotyczy systemów jednofazowych, głównie o częstotliwości obniżonej;

- z przetwornicą wirującą zamieniającą napięcie przemiennie jednofazowe na napięcie stałe, zasilające silniki szeregowo prądu stałego – rozwiązanie historyczne obecnie niestosowane;
- z przetwornicą wirującą zamieniającą napięcie przemiennie jednofazowe na przemiennie wielofazowe zasilające silniki indukcyjne – również rozwiązanie historyczne;
- z prostownikiem niesterowanym zasilającym silniki prądu stałego – regulacja napięcia odbywa się poprzez zmianę przekładni transformatora – stosowane zarówno w systemach o częstotliwości przemysłowej, jak i obniżonej;
- z prostownikiem sterowanym zasilającym silniki prądu stałego – spotykane również w obu systemach jednofazowych;
- z układem prostownika i falownika zasilającego silniki indukcyjne – stosowane w pojazdach nowoczesnych;
- z układem prostownika i falownika zasilającego silniki synchroniczne – również stosowane w pojazdach nowoczesnych.

Cechą wspólną większości pojazdów zasilanych napięciem przemiennym jest obecność transformatora obniżającego napięcie sieciowe, zbyt wysokie, by wykorzystać je bezpośrednio do zasilania silników trakcyjnych.

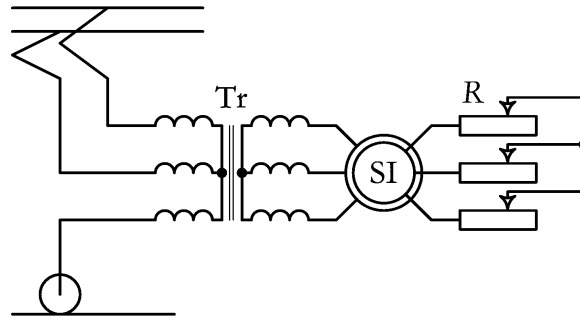
3.3.1. Pojazdy zasilane napięciem trójfazowym

Systemy trójfazowe rozpowszechnione na początku XX wieku, głównie w rejonie południowej Szwajcarii i północnych Włoch, obecnie należą do szczątkowych. Zaledwie cztery linie kolejowe na świecie wykorzystują zasilanie trójfazowe. Linie te jednak charakteryzują się specyficznymi parametrami, przy których ten system zasilania sprawdza się doskonale. Są to mianowicie linie górskie o nachyleniach dochodzących do 250‰, wyposażone w systemy zębate konieczne przy takich wartościach nachylenia (patrz fot. 3.1).



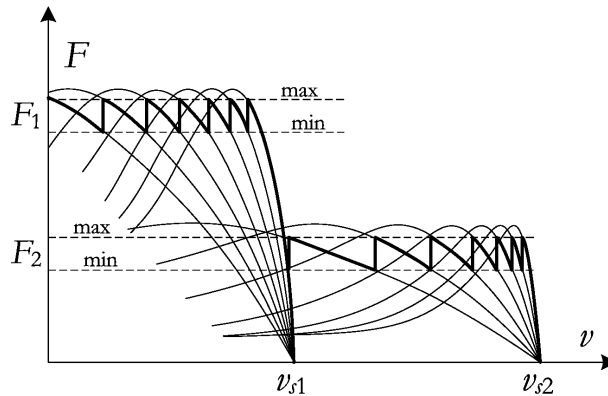
Fot. 3.1. Zespół trakcyjny zasilany trójfazowo na linii Zermatt-Gornergrat (fot. autora)

Podstawową trudnością sterowania układu napędowego na liniach o takich parametrach jest utrzymanie stałej wartości prędkości pojazdu zarówno przy wjeżdżaniu na, jak i zjeżdżaniu ze wzniesienia. Żaden z systemów sterowania wykorzystywanych w pojazdach zasilanych z sieci napięcia stałego czy przemiennego jednofazowego (poza nowoczesnymi układami sterowanymi mikroprocesorowo) nie jest w sposób prosty zapewnić utrzymania stałej wartości prędkości podczas jazdy po sporych nachyleniach. Natomiast systemy trójfazowe zapewniają to w sposób naturalny. Pojazdy zasilane trójfazowo napędzane są z reguły silnikami indukcyjnymi pierścieniowymi. Rozruch prowadzony jest poprzez stopniowe zwieranie rezystancji dołączonej do uzwojeń wirnika silnika indukcyjnego. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu zasilanego trójfazowo pokazany jest na rys. 3.24.



Rys. 3.24. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu zasilanego trójfazowo

Dla takiego układu pojazd ma zaledwie jedną charakterystykę bezstratną – dla całkowicie zwartej rezystora dodatkowego. Aby zwiększyć liczbę charakterystyk naturalnych, stosuje się przełączanie liczby par biegunów silnika. Można uzyskać wówczas kilka charakterystyk bezoporowych (najczęściej dwie). Charakterystyka trakcyjna takiego pojazdu wygląda wówczas tak, jak na rys. 3.25.



Rys. 3.25. Charakterystyka trakcyjna pojazdu zasilanego z sieci trójfazowej – opis w tekście

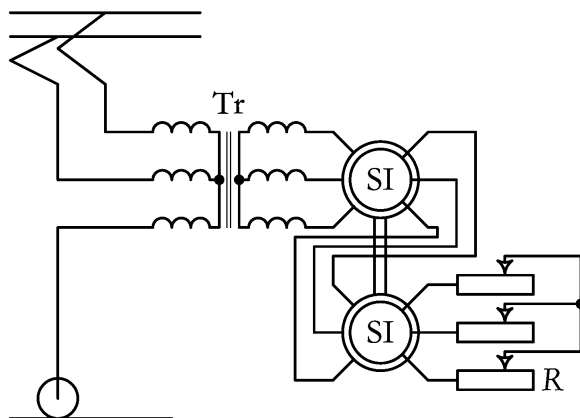
Rozruch pojazdu odbywa się najpierw przy większej liczbie par biegunów ze średnią stałą siłą F_1 , wahającą się od wartości maksymalnej do minimalnej. Wielkość tych wahań zależy od liczby stopni rezystora rozruchowego. Po zmniejszeniu liczby par biegunów (najczęściej dwukrotnym) wartość siły rozruchowej spada również dwukrotnie do F_2 i ponownie zwiera się stop-

niowo rezystory rozruchowe. Jak widać, pojazd ma dwie charakterystyki naturalne bezoporowe dla dwóch prędkości synchronicznych v_{s1} i v_{s2} , wynikających z liczby par biegunów, częstotliwości napięcia zasilającego i przełożenia przekładni mechanicznej. Charakterystyki naturalne pojazdu są bardzo sztywne i zmiana prędkości w zależności od obciążenia, a więc od nachylenia trasy, będzie możliwa tylko o wielkość poślizgu silnika trakcyjnego. Oczywiście, wraz ze wzrostem obciążenia rosnąć będzie moc pobierana z sieci przez pojazd, dlatego źródło zasilania musi zapewniać odpowiednią wydajność prądową. Aby uzyskać większą liczbę charakterystyk naturalnych układu napędowego pojazdu zasilanego trójfazowo stosuje się tzw. kaskadowe połączenie silników. W pierwszej fazie rozruchu uzwojenie stojana jednej maszyny łączone jest do uzwojenia wirnika drugiej. Oba silniki połączone są mechanicznie wspólnym wałem (patrz rys. 3.26). Uzyskuje się wówczas dodatkową wartość prędkości synchronicznej takiego układu, która jest określona zależnością:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_{p1} + p_{p2}}, \quad (3.23)$$

gdzie: f – częstotliwość napięcia zasilającego; p_{p1}, p_{p2} – liczba par biegunów pierwszego i drugiego silnika.

Następnie silniki są przełączane i pracują równolegle, zasilone bezpośrednio z transformatora. W ten sposób, łącząc ze sobą dwie jednakowe maszyny dwubiegunowe, możemy uzyskać cztery prędkości synchroniczne, a zatem tyleż charakterystyk naturalnych układu napędowego. Np. dysponując dwoma silnikami o 2 i 4 parach biegunów uzyskamy prędkości synchroniczne dla 2, 4, 6 i 8 par biegunów.



Rys. 3.26. Schemat obwodu głównego pojazdu z kaskadowym połączeniem silników trakcyjnych

Przeprowadzono również próby zastosowania silników indukcyjnych klatkowych i przeprowadzania rozruchu za pośrednictwem autotransformatora trójfazowego. Jednak mała wartość momentu rozruchowego przy niskim poziomie napięcia zasilającego, co jest cechą bardzo niekorzystną w pojazdach trakcyjnych, sprawiła, że ten rodzaj napędu nie znalazł praktycznego zastosowania. Inną zaletą pojazdów zasilanych z systemów trójfazowych, która jest cenna z punktu widzenia charakteru obsługiwanych tym systemem linii, jest prostota hamowania elektrycznego odzyskowego, co zostanie omówione szerzej w rozdz. 4 (*w przygotowaniu*).

3.3.2. Pojazdy zasilane napięciem jednofazowym o częstotliwości obniżonej

Podobnie jak w przypadku pojazdów zasilanych z sieci napięcia stałego, przy zasilaniu napięciem przemiennym jednofazowym o częstotliwości obniżonej, można wydzielić pewne generacje pojazdów, a mianowicie:

- napędzane jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego,
- napędzane silnikami szeregowymi prądu stałego (tętniącego) – związane z koniecznością wyposażenia pojazdu w układ zamieniający energię napięcia przemiennego na energię napięcia stałego,
- napędzane trójfazowymi silnikami indukcyjnymi lub synchronicznymi – wyposażone w układy przekształtnikowe i falowniki.

3.3.2.1. Pojazdy z jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego

Konstrukcja jednofazowego silnika komutatorowego prądu przemiennego jest bardzo zbliżona do silnika szeregowego prądu stałego. Różnice polegają na wykonaniu magnetowodu stojana z blach w celu zmniejszenia indukowania prądów wirowych wywołanych zmiennym strumieniem magnetycznym wzbudzenia, oraz zastosowaniu specjalnego uzwojenia kompensacyjnego w celu zmniejszenia przesunięcia fazowego między napięciem i prądem silnika. Podobieństwo konstrukcji obu typów maszyn jest tak znaczne, że silnik komutatorowy prądu przemiennego może z powodzeniem pracować przy zasilaniu napięciem stałym. Podobnie zresztą silnik szeregowy prądu stałego będzie się obracał po zasilaniu napięciem przemiennym, jednak wystąpią duże straty w żelazie i niekorzystne zjawiska komutacyjne wywołane brakiem uzwojeń kompensacyjnych. Bardzo zbliżone są charakterystyki trakcyjne obu silników i podobne są możliwości ich kształtowania. Prędkość kątowna silnika jest dana zależnością wektorową:

$$\omega_s = \frac{\bar{U} - \bar{I} \cdot \sqrt{(R_s + R_d)^2 + X_s^2}}{C \cdot \bar{\Phi}}, \quad (3.24)$$

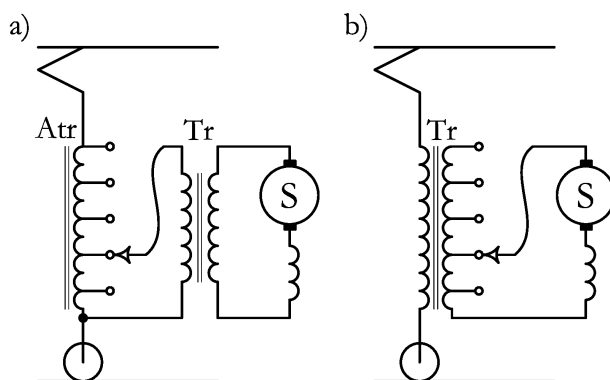
gdzie: \bar{U} – napięcie sieci trakcyjnej; \bar{I} – prąd silnika; R_s – rezystancja uzwojeń silnika; R_d – rezystancja dodatkowa; X_s – reaktancja indukcyjna uzwojeń silnika; C – stała maszyny; $\bar{\Phi}$ – strumień wzbudzenia.

Z przedstawionej powyżej zależności (podobnej do zależności 3.1 opisującej silnik szeregowy prądu stałego) wynika, że prędkość silnika komutatorowego prądu przemiennego można regulować poprzez zmianę:

- wartości napięcia zasilającego silnik,
- rezystancji dodatkowej w obwodzie silnika,
- strumienia wzbudzenia,
- reaktancji indukcyjnej w obwodzie silnika.

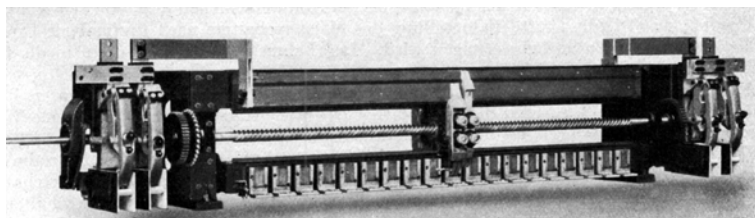
Metody regulacji prędkości obrotowej poprzez włączanie rezystancji dodatkowej czy reaktancji indukcyjnej w obwód silnika są nieekonomiczne w związku ze stratami energii, dlatego w praktyce nie spotyka się tych rozwiązań. Powszechnie wykorzystywana jest natomiast regulacja

poprzez zmianę wartości napięcia zasilającego silnik. Odbywa się ona poprzez zmianę przekładni transformatora głównego pojazdu. Transformatory te muszą być zatem wykonane jako wieloodczepowe. Rozróżnia się regulację wysokonapięciową i niskonapięciową. Przy regulacji wysokonapięciowej pojazd wyposażony jest w autotransformator z wyprowadzonymi odczepami regulacyjnymi, zasilający transformator właściwy o stałej przekładni. Dla regulacji niskonapięciowej następuje przełączanie pomiędzy odczepami uzwojenia wtórnego transformatora pojazdu. Idea obu metod regulacji została przedstawiona na rys. 3.27.



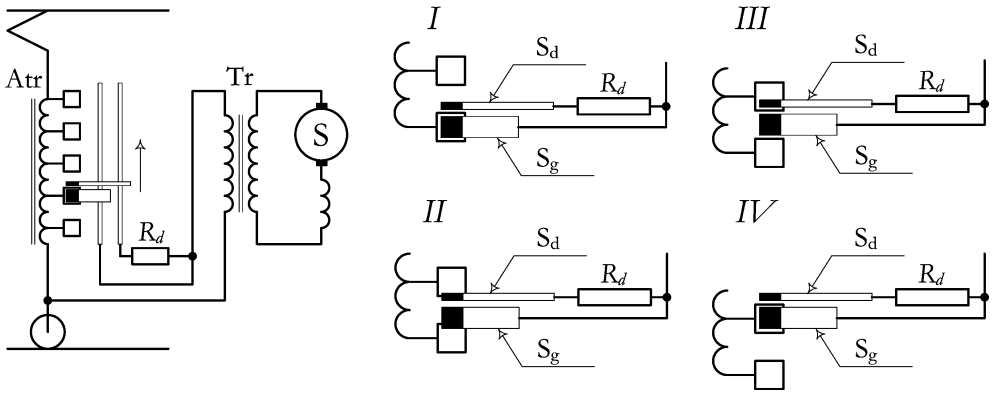
Rys. 3.27. Idea regulacji prędkości pojazdu z silnikiem komutatorowym prądu przemiennego, a) wysokonapięciowa; b) niskonapięciowa

Zastosowanie regulacji po stronie wysokiego napięcia sprawia, że wzrasta masa układu transformatorów, co jest wadą tej metody. Zaletą jednak jest przełączanie znacznie mniejszych wartości prądów niż dla regulacji po stronie niskiego napięcia, gdzie wymagane jest stosowanie styczników wieloprądowych. Z tego powodu zakres stosowania regulacji niskonapięciowej jest ograniczony do pojazdów mniejszej mocy, np. zespołów trakcyjnych, a w lokomotywach powszechniej spotyka się regulację po stronie wysokiego napięcia. Spotykane są jednak wyjątki od tej reguły. Zarówno dla jednej, jak i drugiej metody regulacji zmiana przekładni musi odbywać się przy obciążeniu, nie może zatem dochodzić to przerywania prądu obwodu głównego. Dlatego też przerwanie połączenia na jednym odczepie może być dokonane dopiero wtedy, gdy jest zamknięty obwód w odczepie następnym. Następuje wówczas zwarcie części uzwojenia transformatora i pomiędzy stykami płynie prąd zwarcia. Aby ograniczyć jego wartość, włącza się szeregowo w obwód stycznika rezystor lub odpowiednio dobrany dławik. Przykład mechanizmu układu stykowego z dodatkowo włączanym rezystorem dla metody regulacji wysokonapięciowej pokazano na fot. 3.2, a jego działanie wyjaśnia rys. 3.28.



Fot. 3.2. Mechanizm układu stykowego do regulacji napięcia transformatora [38]

Urządzenie składa się z dwóch przesuwających się styków: głównego – S_g i pomocniczego S_d . Szeregowo do styku pomocniczego dołączony jest rezystor dodatkowy R_d . W czasie pracy na danym odczepie autotransformatora wykorzystywany jest styk główny, a styk dodatkowy jest rozarty (Etap I). Podczas przełączania obwodu silników na kolejny odczep autotransformatora przez pewien czas wykorzystywane są oba styki. Stryk główny ma kontakt z odczepem n , a styk dodatkowy z odczepem $n+1$. Fragment uzwojenia jest wówczas zwarty przez rezystancję dodatkową (Etap II). Etap ten trwa tak długo, aż styk główny na skutek dalszego przesunięcia straci kontakt z odczepem n . Wówczas w tej fazie przełączania obwód silników jest zasilany wyłącznie poprzez styk dodatkowy i rezystancję (Etap III). Następnie styk główny przejmuje obciążenie i układ przyjmuje konfigurację docelową (Etap IV). Podczas przełączania z wyższego odczepu na niższy następuje proces w odwrotnej kolejności tj. (IV→III→II→I). Czyli najpierw obciążenie przejmuje styk dodatkowy z włączoną w szereg rezystancją, potem styk główny zamyka obwód zwarcia pomiędzy odczepami autotransformatora, a na końcu rozwierany jest styk pomocniczy.

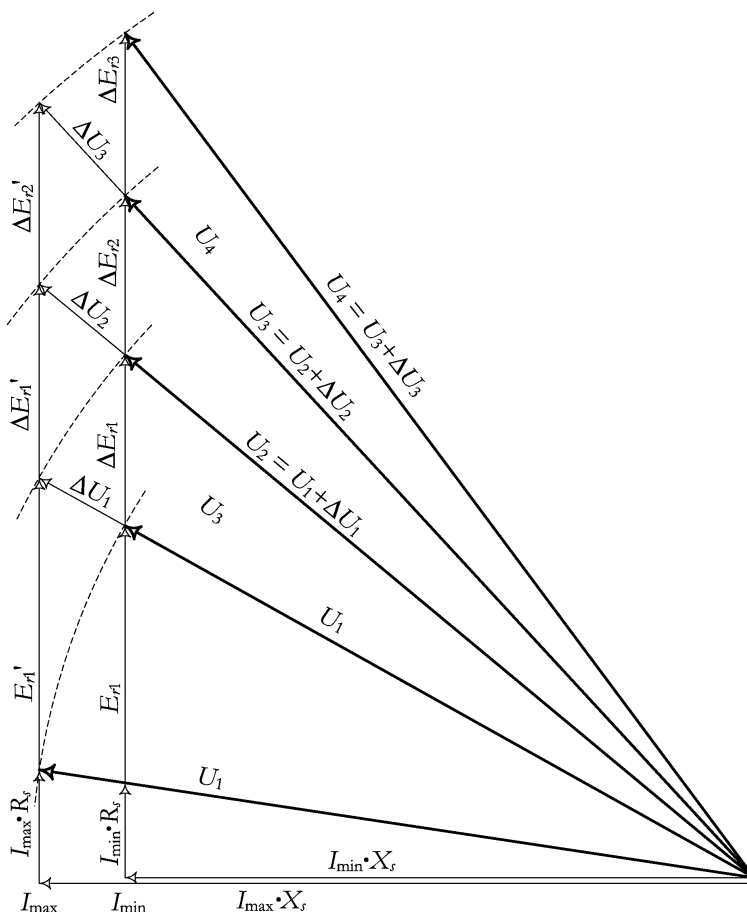


Rys. 3.28. Zasada działania układu regulacji po stronie wysokiego napięcia z wtrącaniem rezystora w obwód stycznika – opis w tekście

Wtrącanie w obwód prądowy rezystora dodatkowego (Etap III) nie powoduje zmniejszenia siły pociągowej pojazdu, gdyż jednocześnie wzrasta wartość napięcia zasilającego i prąd silników nie ulega obniżeniu. Jest to widoczne po przeanalizowaniu wykresu wektorowego napięć, przedstawionego na rys. 3.29. W początkowej chwili rozruchu, gdy wirnik pojazdu jest zatrzymany, wektor napięcia zasilającego U_1 równoważy spadek napięcia na reaktancji indukcyjnej silnika, czyli $I_{\max} \cdot X_s$ oraz spadek napięcia na rezystancji uzwojeń maszyny $I_{\max} \cdot R_s$. Wraz ze wzrostem prędkości silnika pojawia się siła elektromotoryczna rotacji E_r , skierowana prostopadle do wektora prądu płynącego przez silnik, która narasta aż do wartości E_r . Wówczas prąd płynący przez silnik osiąga wartość minimalną I_{\min} . W tym momencie następuje przełączenie odczepu transformatora tak, że wartość napięcia zasilającego silniki rośnie o ΔU_1 i prąd narasta do poziomu I_{\max} . Siła elektromotoryczna rotacji opisana jest zależnością:

$$E_r = \omega_s \cdot C \cdot \Phi, \quad (3.25)$$

gdzie: ω_s – prędkość kątowa silnika; C – stała maszyny; Φ – strumień wzbudzenia.



Rys. 3.29. Wykres wektorowy rozruchu silnika komutatorowego prądu przemiennego poprzez zmianę napięcia zasilającego

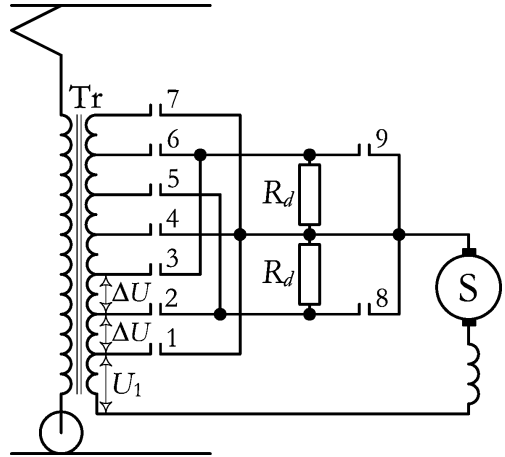
Zatem przy zwiększeniu wartości prądu następuje skokowy wzrost wartości SEM rotacji do poziomu E_d' , gdyż wzrasta (proporcjonalna do prądu) wartość strumienia wzbudzenia silnika Φ . Podczas pracy przy napięciu zasilającym U_2 następuje zwiększenie wartości SEM rotacji o ΔE_{r1} , przy której prąd silnika ponownie osiąga wartość minimalną. W tym momencie następuje ponowne przełączenie odczepu transformatora i cały proces jest powtarzany. Jeżeli wartość rezystancji dodatkowej wtrąconej w obwód główny podczas przełączania spełnia zależność:

$$R_d \leq \frac{\Delta E_r}{I_{\min}}, \quad (3.26)$$

to nie nastąpi zmniejszenie siły pociągowej, gdyż wartość prądu nie spadnie poniżej minimalnej. Ponieważ wartości przyrostu SEM rotacji są różne dla poszczególnych stopni rozruchowych, tj. $\Delta E_{r1} \neq \Delta E_{r2} \neq \Delta E_{r3}$ itd. rezystor R_d musi być tak dobrany, aby zależność 3.26 była spełniona dla najmniejszego przyrostu ΔE_r .

W pojazdach z regulacją po stronie niskiego napięcia konieczne jest zastosowanie układów stycznikowych, gdyż wartości prądów przełączanych są znacznie większe. Przykładowe rozwią-

zanie układu stycznikowego dla metody niskonapięciowej z wtrącaniem rezystora dodatkowego przedstawiono na rys. 3.30. Odpowiadającą mu docelową konfigurację połączeń styczników dla zasilania z poszczególnych odczepów transformatora zamieszczono w tabl. 3.4. Podczas każdego przełączania musi być zachowana reguła zwierania poszczególnych odczepów poprzez rezystancję dodatkową. Dlatego każda zmiana wymaga zamknięcia (otwarcia) trzech lub czterech styczników. Na przykład, w celu przejścia z pierwszego na drugi odczep transformatora należy najpierw zamknąć stycznik nr 2, potem otworzyć nr 1, a na końcu zamknąć nr 8. Wszystkie styczniki muszą być dostosowane do rozłączania pod prądem. Dodatkowo rozłączają one praktycznie pełny prąd obciążenia, co jest podstawową wadą tej metody. Wada ta została nieco ograniczona przy przełączaniu odczepów transformatora z wykorzystaniem dławika dodatkowego. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu wyposażonego w układ przełączania niskonapięciowego tą metodą przedstawiono na rys. 3.31.

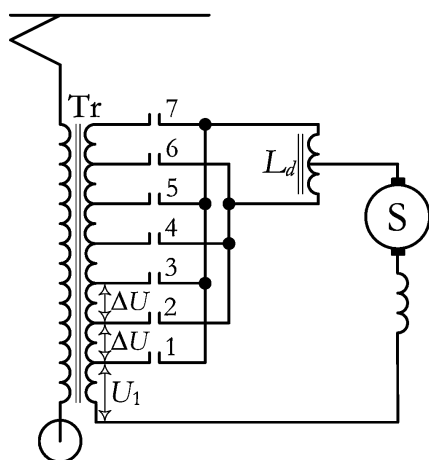


Rys. 3.30. Układ przełączania po stronie niskiego napięcia z włączaniem rezystora dodatkowego

Tabl. 3.4. Konfiguracja połączeń styczników dla układu przedstawionego na rys. 3.30

| Stopień rozruchu | Numer stycznika | | | | | | | | | Wartość napięcia na silniku |
|------------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|-----------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| 1 | x | | | | | | | | | U_1 |
| 2 | | x | | | | | | x | | $U_1 + \Delta U$ |
| 3 | | | x | | | | | | x | $U_1 + 2\Delta U$ |
| 4 | | | | x | | | | | | $U_1 + 3\Delta U$ |
| 5 | | | | | x | | | x | | $U_1 + 4\Delta U$ |
| 6 | | | | | | x | | | x | $U_1 + 5\Delta U$ |
| 7 | | | | | | | x | | | $U_1 + 6\Delta U$ |

Dławik dodatkowy, nazywany również przejściowym, ma trzy zaczepty: początkowy, końcowy oraz wyprowadzony ze środka uzwojenia. Taki dławik, włączony pomiędzy dwa kolejne odczepy transformatora, pracuje jako autotransformator i dzieli na dwoje napięcie danej sekcji. Zatem wartość napięcia na silnikach trakcyjnych jest równa sumie napięć sekcji włączonych łącznie i połowy napięcia tej sekcji, do której jest podłączony dławik. Dla układu pokazanego na rys. 3.31 konfigurację łączenia styczników przedstawiono w tabl. 3.5. Przełączanie z jednego stopnia na kolejny polega na odłączeniu jednego końca uzwojenia dławika i podłączeniu go do zaczepty następnej sekcji. Ponieważ dławik musi być podłączony oboma końcami do odczepów transformatora, liczba stopni rozruchowych jest zawsze o jeden mniejsza od liczby odczepów. Gdy dławik jest normalnie włączony obydwoioma końcami do zaczepty transformatora, wówczas prąd silników dzieli się równomiernie na dwie części płynące przez połówki uzwojenia dławika. Ponieważ płyną one w przeciwnych kierunkach, nie wywołują strumienia magnetycznego w rdzeniu dławika, gdyż ich oddziaływanie wzajemnie się równoważy. Dlatego dławik nie



Rys. 3.31. Układ przelączania po stronie niskiego napięcia z włączaniem dławika ograniczającego prąd zwarcia

wprowadza dodatkowej reaktancji w obwód silników. Podczas przelączania, gdy dławik podłączony jest do transformatora jednym końcem, zachowuje się on jak indukcyjność i prąd przepływający przez niego wywołuje spadek napięcia związany z jego reaktancją. Jednak nie powoduje to zmniejszenia wartości napięcia na silnikach trakcyjnych, gdyż w tej fazie przelączania dławik podłączony jest zawsze do wyższego o $\frac{1}{2} \Delta U$ potencjału, niż wynosiło napięcie na silnikach przed przelączaniem. Zaletą układu z dławikiem dodatkowym jest podział prądu silnika na dwa styczniki, co jest istotne, gdyż po stronie niskiego napięcia wartości prądów płynące w obwodzie silników są znaczne. Dodatkowo uproszczona zostaje sekwencja przelączania pomiędzy poszczególnymi stopniami rozruchowymi, gdyż występują tylko dwie

operacje, tj. otwarcie jednego i zamknięcie kolejnego stycznika.

Tabl. 3.5. Konfiguracja połączeń styczników dla układu przedstawionego na rys. 3.31

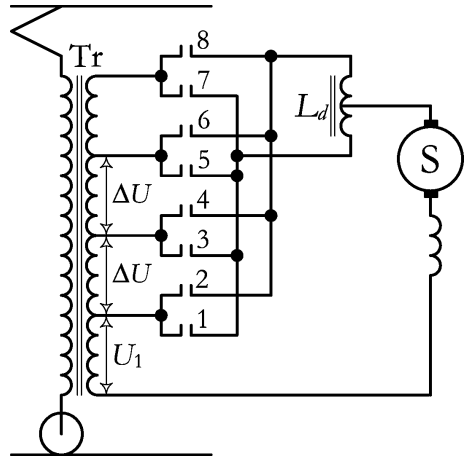
| Stopień rozruchu | Numer stycznika | | | | | | | Wartość napięcia na silniku |
|------------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|-------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 1 | x | x | | | | | | $U_1 + \frac{1}{2} \Delta U$ |
| 2 | | x | x | | | | | $U_1 + 1\frac{1}{2} \Delta U$ |
| 3 | | | x | x | | | | $U_1 + 2\frac{1}{2} \Delta U$ |
| 4 | | | | x | x | | | $U_1 + 3\frac{1}{2} \Delta U$ |
| 5 | | | | | x | x | | $U_1 + 4\frac{1}{2} \Delta U$ |
| 6 | | | | | | x | x | $U_1 + 5\frac{1}{2} \Delta U$ |

Tabl. 3.6. Konfiguracja połączeń styczników dla układu przedstawionego na rys. 3.32

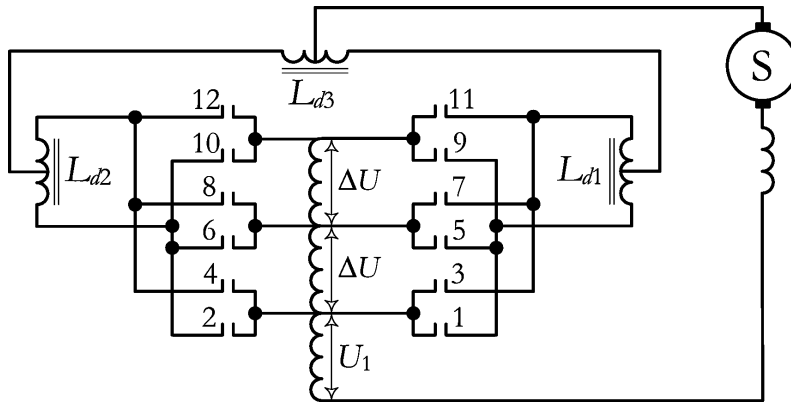
| Stopień rozruchu | Numer stycznika | | | | | | | | Wartość napięcia na silniku |
|------------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|-------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 1 | x | x | | | | | | | U_1 |
| 2 | | x | x | | | | | | $U_1 + \frac{1}{2} \Delta U$ |
| 3 | | | x | x | | | | | $U_1 + \Delta U$ |
| 4 | | | | x | x | | | | $U_1 + 1\frac{1}{2} \Delta U$ |
| 5 | | | | | x | x | | | $U_1 + 2 \Delta U$ |
| 6 | | | | | | x | x | | $U_1 + 2\frac{1}{2} \Delta U$ |
| 7 | | | | | | | x | x | $U_1 + 3 \Delta U$ |

Jedną z głównych wad układów niskonapięciowych jest, poza przelączaniem dużych wartości prądów silników, konieczność wyprowadzania szeregu odczepów uzwojenia wtórnego transformatora. Liczbę odczepów można zmniejszyć, wykorzystując modyfikację metody dławikowej. Schemat układu przelączania po modyfikacji przedstawiono na rys. 3.32. Poszczególne stopnie rozruchowe uzyskuje się nie tylko poprzez łączenie końców dławika dodatkowego do kolejnych odczepów transformatora, ale również dzięki połączeniu obu końców do tego samego odczepu. To pozwala na praktycznie dwukrotne zmniejszenie liczby odczepów w porównaniu do wariantu przed modyfikacją. Jest to bardzo istotna zaleta, gdyż duża liczba odczepów znacznie kompli-

kuje konstrukcję transformatora. Na pierwszym stopniu rozruchowym wartość napięcia na silnikach trakcyjnych wynosi U_1 , a każdy kolejny stopień powoduje jego wzrost o $\frac{1}{2} \Delta U$. Pełna konfiguracja połączeń styczników jest pokazana w tabl. 3.6. Wadą metody zmodyfikowanej jest spadek siły pociągowej pojazdu podczas przechodzenia ze stopni rozruchowych, odpowiadających podłączeniu obu końców dławika do wspólnego odczepu transformatora, na stopnie następne. Jest to wywołane wtrąceniem reaktancji indukcyjnej połowy uzwojenia dławika bez jednoczesnego podniesienia wartości napięcia zasilającego silniki. Jednak przy prawidłowym doborze parametrów dławika wartość siły pociągowej maleje jedynie o około 25%, i to na krótki okres pomiędzy otwarciem jednego a zamknięciem drugiego stycznika. Nie ma to więc większego znaczenia podczas regulacji prędkości pojazdu. Możliwe jest jeszcze dalsze zmniejszenie liczby odczepów uzwojenia wtórnego transformatora poprzez zastosowanie kaskadowego połączenia trzech dławików dodatkowych. Układ taki przedstawiono na rys. 3.33 (dla uproszczenia rysunku pominięto stronę pierwotną transformatora).



Rys. 3.32. Modyfikacja układu przełączania po stronie niskiego napięcia z dławikiem dodatkowym



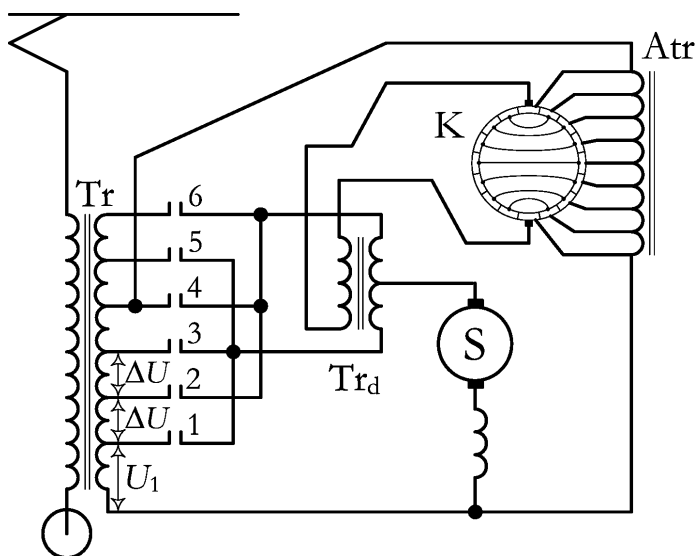
Rys. 3.33. Modyfikacja układu przełączania po stronie niskiego napięcia z trzema dławikami dodatkowymi

Odpowiadająca mu konfiguracja połączeń styczników dla poszczególnych stopni rozruchu została zamieszczona w tabl. 3.7. Można zauważyć, że mimo zaledwie trzech odczepów uzwojenia wtórnego uzyskano dziewięć stopni rozruchowych. Drugą zaletą takiego połączenia kaskadowego jest fakt, iż zawsze (poza samą fazą przełączania) zamknięte są cztery styczniki, czyli każdy z nich przewodzi jedną czwartą prądu obciążenia silników. Jest to bardzo korzystne, gdyż redukcji ulegają wymiary i masa tych elementów.

Tabl. 3.7. Konfiguracja połączeń styczników dla układu przedstawionego na rys. 3.33

| Stopień rozruchu | Numer stycznika | | | | | | | | | | | | Wartość napięcia na silniku | |
|------------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|-----------------------------|------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | |
| 1 | x | x | x | x | | | | | | | | | | U_1 |
| 2 | | x | x | x | x | | | | | | | | | $U_1 + \frac{1}{4}\Delta U$ |
| 3 | | | x | x | x | x | | | | | | | | $U_1 + \frac{1}{2}\Delta U$ |
| 4 | | | | x | x | x | x | | | | | | | $U_1 + \frac{3}{4}\Delta U$ |
| 5 | | | | | x | x | x | x | | | | | | $U_1 + \Delta U$ |
| 6 | | | | | | x | x | x | x | | | | | $U_1 + 1\frac{1}{4}\Delta U$ |
| 7 | | | | | | | x | x | x | x | | | | $U_1 + 1\frac{1}{2}\Delta U$ |
| 8 | | | | | | | | x | x | x | x | | | $U_1 + 1\frac{3}{4}\Delta U$ |
| 9 | | | | | | | | | x | x | x | x | | $U_1 + 2\Delta U$ |

Oprócz metod opisanych powyżej, mających charakter regulacji skokowej, możliwe jest praktycznie płynne zwiększanie wartości napięcia przy wykorzystaniu transformatorów dodatkowych i tzw. regulatorów komutatorowych. Schemat takiego układu przedstawiono na rys. 3.34.

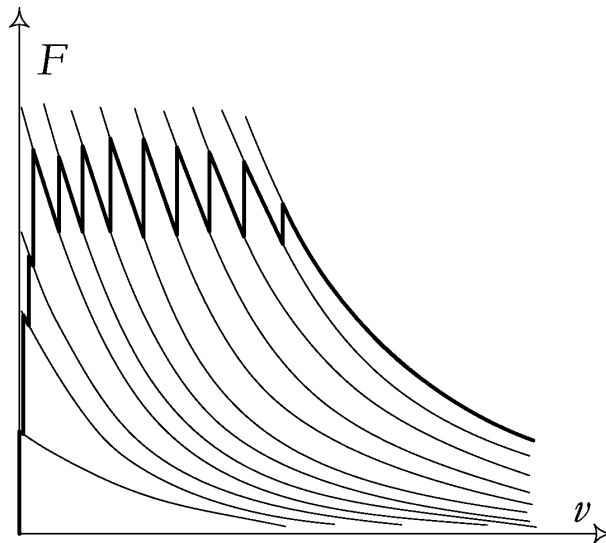


Rys. 3.34. Układ płynnej zmiany wartości napięcia z regulatorem komutatorowym

Pierwotne uzwojenie transformatora dodatkowego Tr_d zasilane jest z autotransformatora Atr za pośrednictwem przełącznika komutatorowego K . Zaciski skrajne autotransformatora połączone są z przeciwległymi działkami komutatora (na rysunku w osi pionowej), a odczepy pośrednie łączą się każdy z dwoma działkami leżącymi symetrycznie do osi pionowej komutatora. Uzwojenie pierwotne transformatora dodatkowego dołączone jest do szczotek, które mogą przesuwać się po powierzchni komutatora, łącząc to uzwojenie z różną ilością sekcji autotransformatora. W pozycji pionowej szczotek (tak jak na rysunku) do uzwojenia pierwotnego transformatora dodatkowego podana jest maksymalna wartość napięcia równa napięciu na całym uzwojeniu autotransformatora. W miarę obrotu napięcie to spada, aż w pozycji poziomej szczotki są zwarte i osiąga ono wartość zerową. Dalszy obrót spowoduje wzrost wartości napięcia w kierunku przeciwnym. Główne styczniki regulacyjne umożliwiają zmianę napięcia zasilającego silniki o ΔU , tak jak w układzie przedstawionym na rys. 3.31. Przekładnia transformatora dodatkowego

dobrana jest tak, by największa wartość napięcia na uzwojeniu wtórnym, tj. przy pionowym położeniu szczotek, wynosiła również ΔU , a przy obrocie o 180° zmieniało się o $2 \Delta U$, tj. od $+\Delta U$ do $-\Delta U$ lub odwrotnie. W pierwszej pozycji rozruchowej zamknięty jest stycznik nr 1, a szczotki komutatora ustawione pionowo. Napięcie zasilające silniki trakcyjne, pochodzące od transformatora głównego, wynosi U_1 . Do tego napięcia dodaje się połowę wartości napięcia transformatora dodatkowego ustawionego przeciwnie, czyli $-\frac{1}{2}\Delta U$. Zatem wypadkowa wartość napięcia zasilającego silniki równa jest $U_1 - \frac{1}{2}\Delta U$. Obrót szczotek komutatora o 180° powoduje wzrost napięcia na silnikach od wartości $U_1 - \frac{1}{2}\Delta U$ do $U_1 + \frac{1}{2}\Delta U$. Następuje wówczas zamknięcie stycznika nr 2 i otwarcie nr 1. Oba styczniki pracują przy różnicy potencjałów równej zero, a więc bez zjawisk lukowych. Dzieje się tak, gdyż w tym momencie napięcie na silnikach jest równe $U_1 + \frac{1}{2}\Delta U$, z punktu widzenia stycznika nr 1, lub $U_1 + \Delta U - \frac{1}{2}\Delta U$, jeśli patrzeć od strony stycznika nr 2. Kolejny obrót komutatora o 180° spowoduje ponowny wzrost napięcia na silniku o ΔU czyli od $U_1 + \Delta U - \frac{1}{2}\Delta U$ do $U_1 + \Delta U + \frac{1}{2}\Delta U$, po czym nastąpi zamknięcie stycznika nr 3 i otwarcie nr 2. Proces ten będzie się powtarzał przy przejściu przez wszystkie stopnie transformatora głównego. Praca długotrwała jest dopuszczalna na stopniach z dwustronnym włączeniem uzwojenia wtórnego transformatora dodatkowego (czyli gdy zamknięte są oba sąsiadujące ze sobą styczniki), przy pionowym ustawieniu komutatora. Wtedy bowiem do obu uzwojeń transformatora dodatkowego podłączone są wzajemnie równoważące się napięcia, dzięki czemu jego uzwojenie pierwotne jest odciążone, a prąd silników rozdziela się na dwie równe części, obciążając oba styczniki. Metoda ta ma więc dwie podstawowe zalety. Otwieranie styczników następuje bez zjawisk lukowych, zbędne są więc komory gaszeniowe, a także zyskujemy płynną regulację napięcia. Wadą natomiast jest skomplikowana konstrukcja samego regulatora komutatorowego i dlatego ten system sterowania nie jest spotykany zbyt często.

Niezależnie od sposobu przelączania uzwojeń transformatora efekt końcowy procesu z punktu widzenia silnika trakcyjnego jest taki sam, czyli zmienia się wartość napięcia zasilającego. Pozwala to na uzyskanie charakterystyki trakcyjnej o kształcie przedstawionym na rys. 3.35.

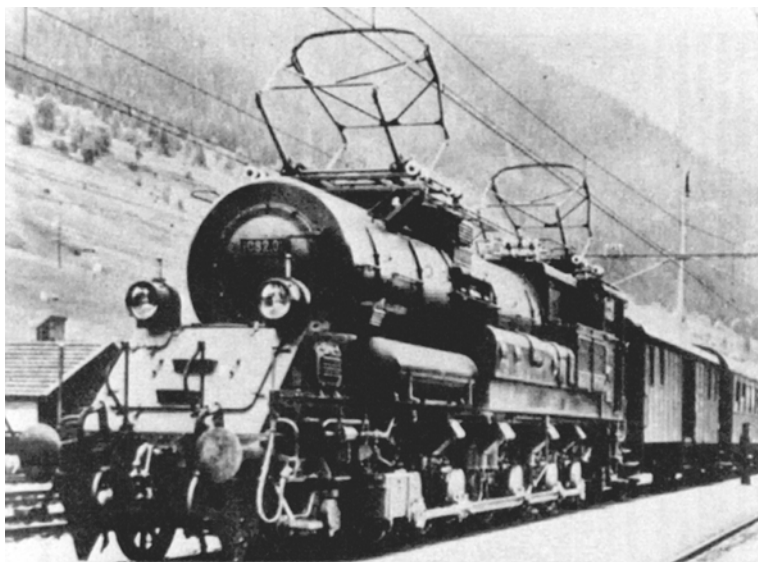


Rys. 3.35. Charakterystyka trakcyjna pojazdu napędzanego silnikami komutatorowymi prądu przemiennego

Jest ona bardzo zbliżona do tej, jaką uzyskuje się, wykorzystując silniki szeregowy prądu stałego, co wynika z podobnej konstrukcji obu rodzajów maszyn. Można wyróżnić wstępne stopnie rozruchowe, obszar pracy ze stałym momentem i pracę na charakterystyce naturalnej silników dla pełnej wartości napięcia zasilającego. Liczba charakterystyk składowych zależy od ilości stopni rozruchowych. Należy jednak mieć na uwadze, że w przeciwieństwie do pojazdów z silnikami szeregowymi prądu stałego, wszystkie charakterystyki są bezstratne i praca na nich dopuszczalna długotrwale (z wyjątkiem układu z regulatorem komutatorowym). Jest to wielka zaleta pojazdów zasilanych z sieci napięcia przemiennego jednofazowego. Podobnie jak dla pojazdów z maszynami prądu stałego, możliwa jest regulacja prędkości przez osłabianie strumienia wzbudzenia, jednak narastające wraz z odwzbudzeniem problemy z komutacją sprawiają, że z tej metody regulacji korzysta się w ograniczonym zakresie, a maksymalny stopień odwzbudzenia jest znacznie płytszy niż w maszynach prądu stałego i sięga co najwyżej 50%. Metody sterowania strumieniem wzbudzenia są identyczne, jak dla silników szeregowych prądu stałego.

3.3.2.2. Pojazdy z silnikami szeregowymi prądu stałego lub tętniącego

Równoległe z wykorzystaniem silników komutatorowych prądu przemiennego prowadzono prace nad układami przetwarzającymi energię napięcia przemiennego jednofazowego na energię napięcia stałego tak, by móc wykorzystać do napędu pojazdów silniki szeregowy prądu stałego. Początkowo próbowano zastosować w tym celu przetwornice wirujące. Przykładowy pojazd z takim rozwiązaniem napędu przedstawiono na fot. 3.3.



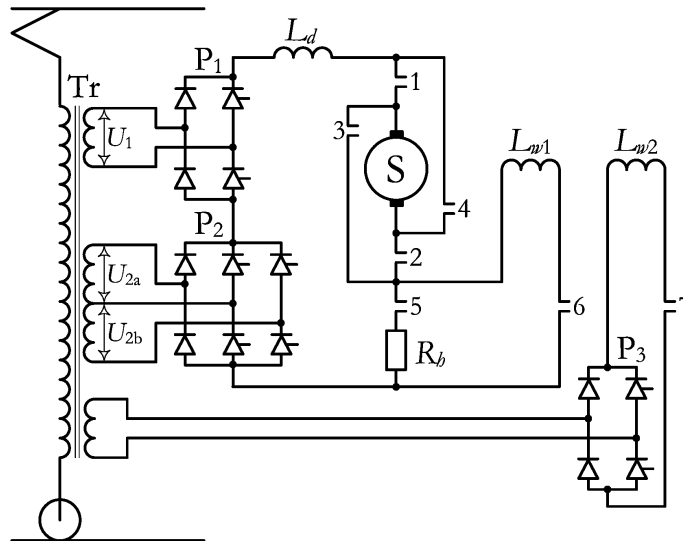
Fot. 3.3. Lokomotywa z przetwornicą wirującą i silnikami szeregowymi prądu stałego – 1931 [7]

Napięcie jednofazowe 15 kV 16 i 2/3 Hz było podane na transformator obniżający, następnie w przetwornicy jednotwornikowej zamieniano je na napięcie trójfazowe. Zasilalo ono maszyny synchroniczne sprzęgnięte z generatorami prądu stałego, które zasilaly silniki trakcyjne szeregowy prądu stałego. Moc lokomotywy wynosiła 1,5 MW, a prędkość maksymalna 60 km/h. Wadą pojazdu był duży ciężar wynoszący 118,5 t, z czego sama przetwornica ważyła 30 t. Po-

nadto wielokrotne przetwarzanie energii zmniejszało sprawność układu napędowego. Wszystkie te cechy sprawiły, że ten typ napędu nie znalazł w praktyce szerszego zastosowania.

Wynalezienie układów prostownikowych statycznych skłoniło do prób ich wykorzystania w pojazdach trakcyjnych. Początkowo były to prostowniki rtęciowe, a od lat 60. wykonane z diod półprzewodnikowych. Do napędu pojazdów można było wówczas zastosować silniki prądu stałego, a w zasadzie – prądu jednoimiennego tętniącego, co wymagało pewnych modyfikacji w konstrukcji maszyn (*patrz rozdział dotyczący silników trakcyjnych – w przygotowaniu*). Zastosowanie prostownikowych układów napędowych w pojazdach zasilanych z sieci napięcia przemiennego o częstotliwości obniżonej nie upowszechniło się w szerszym zakresie, gdyż ten rodzaj napędu nie oferował żadnego uproszczenia konstrukcji w stosunku do układów z silnikami komutatorowymi prądu przemiennego. Wręcz przeciwnie, ponieważ konieczne było zamontowanie w pojeździe prostownika, który zwiększał jego masę całkowitą. Dlatego, poza konstrukcjami eksperymentalnymi i seriami próbnymi (np. lokomotywa *Rb 1* firmy *ASEA*), ten rodzaj napędu w pojazdach zasilanych z sieci napięcia przemiennego o częstotliwości obniżonej nie znalazł zastosowania.

Dopiero wykorzystanie prostowników sterowanych tyrystorowych pozwoliło na uproszczenie budowy obwodu głównego pojazdu poprzez wyeliminowanie regulacji odczepowej i styczników, a zastosowanie transformatora o stałej przekładni. W pojazdach tych regulacja wartości napięcia zasilającego silniki odbywa się poprzez zmianę kąta wysterowania tyrystorów. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu z silnikami prądu stałego i regulacją tyrystorową przedstawiono na rys. 3.36.



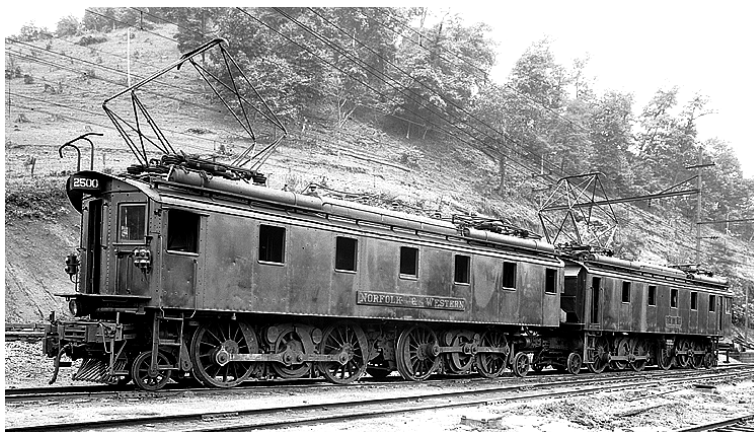
Rys. 3.36. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu z prostownikiem sterowanym i silnikami prądu stałego – opis w tekście

Podczas rozruchu i regulacji prędkości zamknięte są styczniki nr 1, 2 i 6. Silnik trakcyjny połączony jest wówczas w konfiguracji szeregowej z włączonym uzwojeniem wzbudzenia L_{w1} . W początkowym etapie rozruchu pracuje prostownik P₁. Tyrystory prostownika P₂ są zablokowane, a prąd silnika zamyka się poprzez gałąź niesterowaną tego prostownika. Gdy prostownik P₁

osiągnie maksymalne wysterowanie, a napięcie zasilające silnik jest wynikiem prostowania napięcia U_1 , wówczas rozpoczyna pracę prostownik P_2 . Są to w rzeczywistości dwa prostowniki, których strony stałoprądowe połączone równolegle. W zależności od tego, która para tyrystorów będzie aktywna, prostowane może być napięcie U_{2a} lub suma napięć $U_{2a} + U_{2b}$. Ponieważ szeregowo połączone prostowniki P_1 i P_2 są sterowane sekwencyjnie, tzn. prostownik P_2 rozpoczyna pracę, gdy P_1 jest już całkowicie wysterowany, poprawia się współczynnik mocy pojazdu, gdyż prąd prostownika całkowicie wysterowanego jest praktycznie w fazie z napięciem. Dławik dodatkowy L_{ob} włączany szeregowo z uzwojeniami silnika trakcyjnego, ma na celu ograniczenie współczynnika tętnień prądu wyprostowanego, czyli zmniejszenie amplitudy składowej zmiennej. Mimo to moc użyteczna silnika zmniejsza się o 5 do 7% w porównaniu z maszynami zasilanymi napięciem stałym, gdyż jak wiadomo energia składowej zmiennej prądu trakcyjnego zamieniana jest na ciepło. Charakterystyka trakcyjna pojazdu odpowiada klasycznej charakterystyce szeregowej. Podczas hamowania zamknięte są styczniki nr 3, 4, 5 i 7. Prostowniki P_1 i P_2 są nieaktywne. Silnik trakcyjny przełączony zostaje do pracy prądnicowej w konfiguracji obcowzbudnej z aktywnym uzwojeniem dodatkowym L_{a2} . Strumieniem wzbudzenia steruje prostownik P_3 . Energia hamowania jest zamieniana na ciepło w rezystorze R_r (patrz rozdział dotyczący hamowania pojazdów – w przygotowaniu). W niektórych rozwiązaniach pomija się całkowicie uzwojenie wzbudzenia szeregowego i silniki trakcyjne pracują wyłącznie w konfiguracji obcowzbudnej (np. lokomotywa serii Rc2 produkcji ASEA).

3.3.2.3. Pojazdy z silnikami trójfazowymi prądu przemiennego

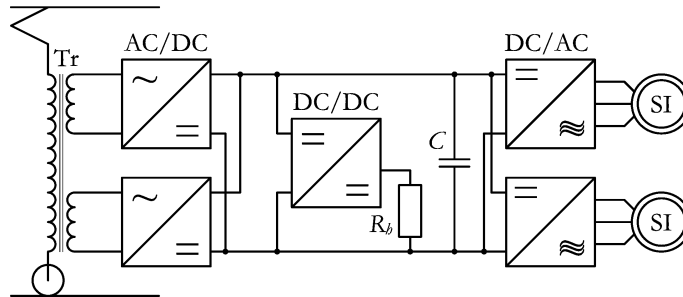
Pierwsze próby zastosowania silników trójfazowych do napędu pojazdów zasilanych z jednofazowej sieci napięcia przemiennego o częstotliwości obniżonej miały miejsce w Stanach Zjednoczonych, gdzie kompania *The Norfolk and Western Railway* zelektryfikowała w 1915 roku systemem 11 kV 25 Hz linię *Bluefield-Vivian*. Do obsługi linii firma *Westinghouse* dostarczyła lokomotywy o układzie osi 1-B-B-1+1-B-B-1. Widok pojazdu przedstawiono na fot. 3.4.



Fot. 3.4. Pierwsza lokomotywa zasilana napięciem przemiennym jednofazowym, napędzana trójfazowymi silnikami indukcyjnymi – 1914 [7]

Jedyną wówczas metodą zamiany napięcia jednofazowego na trójfazowe było zastosowanie przetwornicy faz. Działanie takiej przetwornicy polega na wykorzystaniu właściwości pola wirującego silnika asynchronicznego, indukującego w nieruchomych zwojach siły elektromotoryczne. Ich przesunięcie fazowe w stosunku do napięcia zasilającego jest zależne od przestrzennego rozmieszczenia uzwojeń. Tak wytworzone napięcie trójfazowe zasilalo silniki indukcyjne pierścieniowe. Silniki miały dwie prędkości synchroniczne, związane z liczbą par biegunów (4 lub 8), co dawało prędkości lokomotywy odpowiednio 22,5 i 45 km/h. Rozruch odbywał się przez zwieranie rezystorów dodatkowych dołączonych do uzwojeń wirnika. Moc pojazdu wynosiła 2 MW. Ponieważ zarówno silniki indukcyjne, jak i przetwornica faz są maszynami dwukierunkowymi, lokomotywy umożliwiały hamowanie dynamiczne odzyskowe.

Przetwornice maszynowe wykorzystywane do zamiany napięcia jednofazowego na trójfazowe nie były rozwiązaniem praktycznym i pojazdy z tego rodzaju napędem miały marginalny udział wśród pojazdów zasilanych napięciem jednofazowym o częstotliwości obniżonej. Dopiero rozwój energoelektroniki, podobnie jak w przypadku pojazdów zasilanych napięciem stałym, umożliwił powszechne wykorzystanie jako silników trakcyjnych maszyn indukcyjnych klatkowych lub silników synchronicznych. Ponieważ nie istnieje układ do bezpośredniej zamiany napięcia zmiennego o jednej częstotliwości na napięcie o innej częstotliwości, który umożliwiałby regulację parametrów napięcia wyjściowego w szerokich granicach, konieczne jest zastosowanie pośredniczącego obwodu napięcia stałego. Uproszczony, przykładowy schemat blokowy obwodu głównego pojazdu przedstawiono na rys. 3.37.



Rys. 3.37. Uproszczony schemat blokowy pojazdu z silnikami indukcyjnymi, zasilanego z sieci napięcia przemiennego

Podwojenie liczby przekształtników AC/DC i DC/AC jest podyktowane względami niezawodnościowymi (redundancją). W razie uszkodzenia np. jednego z przekształtników AC/DC, pojazd może kontynuować jazdę w trybie awaryjnym przy zmniejszonej mocy. Analogiczna sytuacja będzie miała miejsce, gdy uszkodzeniu ulegnie jeden z falowników DC/AC. W obwodzie pośredniczącym występuje kondensator, którego zadaniem jest wygładzanie napięcia wyprostowanego. Również w obwód pośredniczący włączony jest poprzez przetwornicę DC/DC rezystor hamowania R_b . Uzyskiwane charakterystyki trakcyjne i stosowane metody sterowania pracą silników trakcyjnych są identyczne, jak w przypadku pojazdów zasilanych z sieci napięcia stałego (patrz punkt 3.2.3.2).

3.3.3. Pojazdy zasilane napięciem jednofazowym o częstotliwości przemysłowej

Dla pojazdów zasilanych napięciem jednofazowym o częstotliwości przemysłowej możliwe są takie same rozwiązania układu napędowego, jak w przypadku pojazdów pracujących w systemach napięcia o częstotliwości obniżonej. Jednak inne wymagania związane z wyższą częstotliwością napięcia sprawiły, że niektóre typy napędu, powszechne w systemach o częstotliwości obniżonej, mają śladowe zastosowanie przy częstotliwościach przemysłowych, i odwrotnie. Możemy wyodrębnić dwie generacje pojazdów zasilanych jednofazowo napięciem o częstotliwości 50 lub 60 Hz, a mianowicie:

- napędzane silnikami prądu stałego (tętniącego) lub silnikami komutatorowymi prądu przemiennego;
- wyposażone w układy przekształtnikowe i napędzane silnikami trójfazowymi indukcyjnymi lub synchronicznymi.

Inne rozwiązania napędu, jak np. wykorzystanie przetworników wirujących czy rozdzielaczy faz, należy traktować jako konstrukcje eksperymentalne, budowane w okresie kształtowania się systemów napięcia jednofazowego o częstotliwościach przemysłowych. Jako niepraktyczne, nie znalazły one oczywiście szerszego zastosowania.

3.3.3.1. Pojazdy z jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego

Zastosowanie jednofazowych silników komutatorowych prądu przemiennego przy zasilaniu napięciem o częstotliwości przemysłowej napotkało szereg trudności, wynikających głównie z występujących problemów komutacyjnych. Postęp w konstrukcji tego typu maszyn skłonił jednak do prób z wykorzystaniem ich w pojazdach trakcyjnych zasilanych z tych systemów. Musiały być to jednak silniki o specjalnej konstrukcji, dużej liczbie par biegunów i ograniczonej mocy, tak by zapewnić właściwą pracę komutatora przy wyższej częstotliwości napięcia zasilającego. Te ograniczenia sprawiły, że jednofazowe silniki komutatorowe prądu przemiennego, przy zasilaniu napięciem o częstotliwości 50 Hz, spotyka się w pojazdach bardzo rzadko. Jako przykład ich wykorzystania można tu podać japońską lokomotywę typu *ED44*, opracowaną w 1955 roku przez koncern *Hitachi* (patrz fot. 3.5). Lokomotywa ta, zasilana napięciem 20 kV 50 Hz, napędzana jest czterema 16-biegunowymi silnikami z uzwojeniami kompensacyjnymi. Mimo czterech maszyn, moc ciąгла pojazdu wynosi zaledwie 1,12 MW, co umożliwia osiągnięcie prędkości maksymalnej 70 km/h. Ograniczenie mocy wynika właśnie z typu zastosowanych silników trakcyjnych i związanych z tym problemów z poprawną pracą komutatora. Sterowanie układem napędowym jest realizowane poprzez zmianę napięcia zasilającego silniki, identycznie jak to ma miejsce dla pojazdów zasilanych napięciem o częstotliwości obniżonej (patrz podrozdział 3.3.2.1).

To przykładowe rozwiązanie i kilka innych niezbyt udanych konstrukcji pojazdów pokazały, że wykorzystanie jednofazowych silników komutatorowych prądu przemiennego, przy zasilaniu napięciem o częstotliwości przemysłowej 50 Hz, nie jest korzystne. Z tego powodu większość pojazdów pracujących w tych systemach zasilania, a opracowanych w latach 50. i 60. (czyli przed

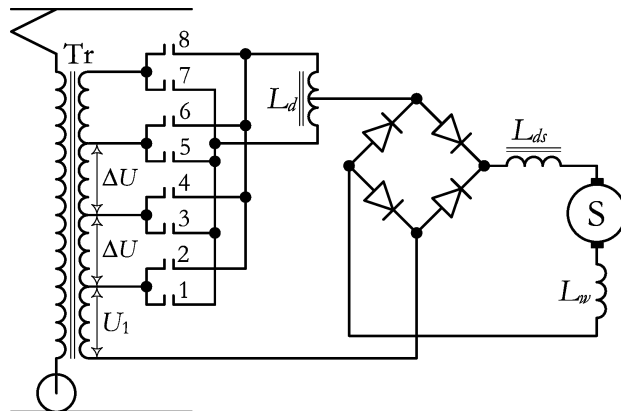
okresem dominacji przeksztaltników energoelektronicznych), wykorzystuje prostowniki niesterowane i silniki szeregowo prądu stałego (tętniącego).



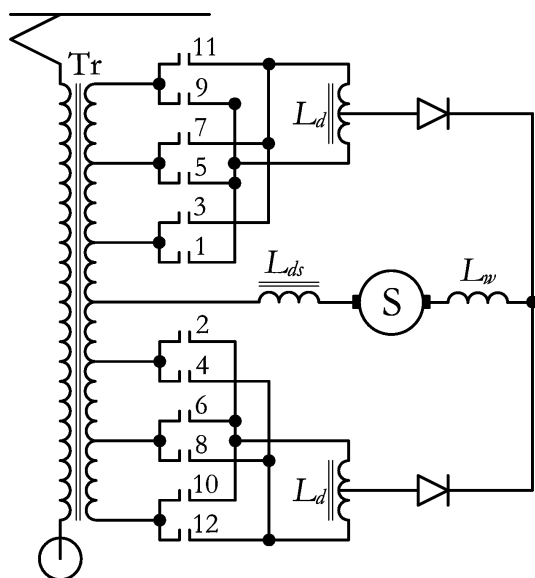
Fot. 3.5. Lokomotywa serii ED91 bliźniaczo podobna do ED44 [62]

3.3.3.2. Pojazdy z silnikami prądu stałego (tętniącego)

Napędy z układami prostownikowymi i silnikami szeregowymi prądu stałego (tętniącego) okazały się jedynym praktycznym rozwiązaniem przy zasilaniu napięciem jednofazowym o częstotliwości przemysłowej w pierwszym okresie istnienia tego systemu. Początkowo stosowano prostowniki rtęciowe, a wraz z rozwojem konstrukcji elementów półprzewodnikowych zaczęto wykorzystywać diody prostownicze. Sterowanie prędkością pojazdu jest realizowane przez zmianę wartości napięcia zasilającego silniki. Odbywa się ono w sposób identyczny, jak dla pojazdów z jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego, z zachowaniem tych samych zasad, tj. przełączania przy zachowaniu ciągłości prądu płynącego w obwodzie głównym. Dopuszczalne są wszystkie metody regulacji, zarówno po stronie wysokiego, jak i niskiego napięcia. Przykładowy, uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu z układem regulacji po stronie niskiego napięcia przedstawiono na rys 3.38.



Rys. 3.38. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu z układem mostkowym i silnikami prądu stałego



Rys. 3.39. Obwód główny z układem prostowników jednopółkowych

Jak widać, schemat różni się od tego pokazanego na rys. 3.32 jedynie obecnością mostka prostowniczego, zamieniającego napięcie przemiennie na jednoimienne o charakterze tętniącym. Napięcie to zasila silniki trakcyjne. Aby zmniejszyć tętnienia prądu, w szereg z silnikami włączony jest dławik dodatkowy L_{ds} . Sekwencja przełączania styczników podczas rozruchu pojazdu jest taka sama, jak zamieszczona w tabl. 3.5. Inną możliwością podłączenia silników jest wyprowadzenie punktu środkowego uzwojenia wtórnego transformatora i zastosowanie symetrycznych układów stycznikowych z prostownikami jednopółkowymi. Schemat takiego układu połączeń pokazano na rys. 3.39. Aby zachować symetrię połówek napięcia wy-

stowanego, przełączanie styczników powinno odbywać się jednocześnie w górnej i dolnej połowie uzwojenia. Otrzymuje się wówczas sekwencję przełączeń styczników, pokazaną w tabl. 3.8.

Tabl. 3.8. Konfiguracja połączeń styczników dla układu przedstawionego na rys. 3.39, przy symetrii napięcia zasilającego

| Stopień rozruchu | Numer stycznika | | | | | | | | | | | |
|------------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | x | x | x | x | | | | | | | | |
| 2 | | | x | x | x | x | | | | | | |
| 3 | | | | | x | x | x | x | | | | |
| 4 | | | | | | | x | x | x | x | | |
| 5 | | | | | | | | | x | x | x | x |

Tabl. 3.9. Konfiguracja połączeń styczników dla układu przedstawionego na rys. 3.39, przy dopuszczonej niesymetrii napięcia zasilającego

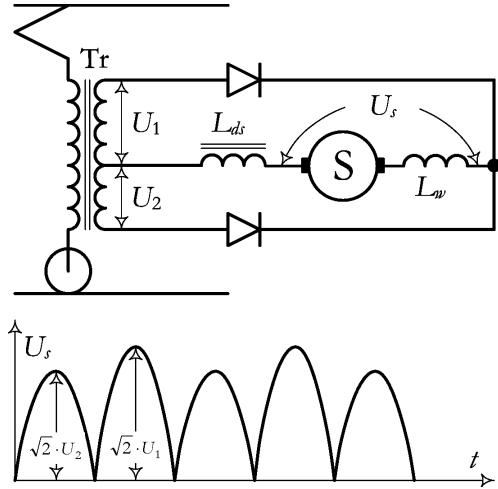
| Stopień rozruchu | Numer stycznika | | | | | | | | | | | |
|------------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | x | x | x | x | | | | | | | | |
| 2 | | x | x | x | x | | | | | | | |
| 3 | | | x | x | x | x | | | | | | |
| 4 | | | | x | x | x | x | | | | | |
| 5 | | | | | x | x | x | x | | | | |
| 6 | | | | | | x | x | x | x | | | |
| 7 | | | | | | | x | x | x | x | | |
| 8 | | | | | | | | x | x | x | x | |
| 9 | | | | | | | | | x | x | x | x |

Można zauważyć, że w porównaniu z układem mostkowym, liczba odczepów transformatora, styczników i dławików dodatkowych musi zostać podwojona, w celu zachowania liczby stopni rozruchowych. Zmniejsza się za to obciążenie poszczególnych styczników, ale nie rekompensuje to komplikacji układu łączeniowego. W celu zwiększenia liczby stopni rozruchowych, dopuszcza się zatem niesymetrię napięcia zasilającego górny i dolny prostownik. Konfiguracja połączeń styczników przyjmie wówczas postać pokazaną w tabl. 3.9.

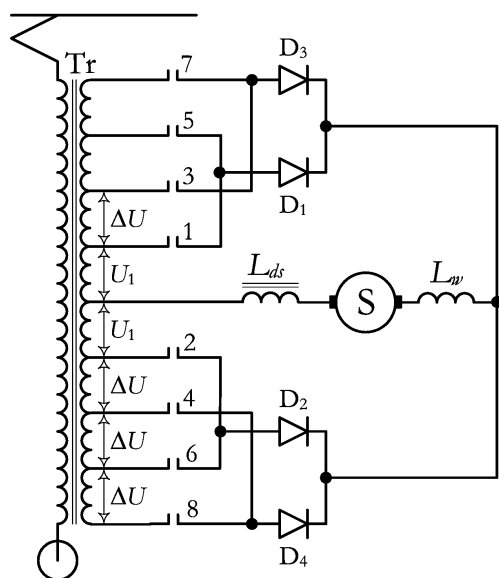
Przy takim rozwiązaniu wzrasta liczba stopni rozruchowych kosztem zwiększenia składowej przemiennnej w napięciu wyprostowanym, jako że napięcie to (w sytuacji asymetrii) składa się z naprzemiennie po sobie następujących połówek okresu o mniejszej i większej amplitudzie (patrz rys. 3.40).

Powoduje to oczywiście wzrost tętnień prądu wyprostowanego zasilającego silniki. Nie stanowi to większego problemu, gdyż znaczny wzrost tętnień prądu (czyli składowej przemiennnej) pojawia się dopiero przy bardzo dużej niesymetrii napięcia zasilania, która to sytuacja jest w praktyce niedopuszczalna. Rzeczywisty przyrost tętnień prądu wynosi około 10%. Niesymetria napięcia zasilającego prostowniki wywiera znacznie silniejszy wpływ na pracę samego transformatora niż na pracę silników trakcyjnych. Gdy w górnej i dolnej połowce uzwojenia wtórnego czynna jest różna liczba zwojów, powstaje składowa stała siły magnetomotorycznej uzwojenia wtórnego. Nie jest ona zrównoważona odpowiednią siłą magnetomotoryczną w uzwojeniu pierwotnym, co wywołuje przesunięcie krzywej magnesowania rdzenia względem zerowego punktu płaszczyzny układu współrzędnych $B-H$ (indukcja – natężenie pola magnetycznego). W rezultacie dochodzi do wstępnego namagnesowania rdzenia. To prowadzi z kolei do odkształceń sinusoidy napięcia, gdyż rdzeń transformatora zaczyna pracować na nieliniowej części charakterystyki magnesowania, co potęguje wzrost zawartości składowej przemiennnej w napięciu wyprostowanym. Aby nie dopuścić do zbyt dużych zmian kształtu napięcia, różnica pomiędzy wartościami U_1 i U_2 nie powinna przekraczać $3 \div 5\%$. Wszystko to sprawia, że stopnie z asymetrycznym napięciem zasilającym są traktowane jako przejściowe i praca długotrwała przy ich wykorzystaniu nie jest zalecana. Wobec niewielkich korzyści, czyli ograniczenia liczby zaworów prostownikowych, a także znacznej ilości cech ujemnych niekorzystnie wpływających na pracę silników trakcyjnych i transformatora pojazdu w pojazdach pierwszej generacji, zasilanych napięciem przemiennym o częstotliwości przemysłowej, dominują układy mostkowe prostowników.

Istnieje możliwość zastąpienia dławików dodatkowych diodami półprzewodnikowymi. Schemat przykładowego obwodu głównego pojazdu z takim rozwiązaniem przedstawiono na rys. 3.41. W tym układzie pierwszy stopień rozruchowy polega na zamknięciu styczników nr 1 i 2. Prąd płynie wówczas przez diody D_1 i D_2 . Przejście na drugi stopień rozruchu związane jest z zamknięciem stycznika nr 3. Automatycznie prąd zaczyna wówczas przewodzić dioda D_3 , gdyż



Rys. 3.40. Kształt napięcia zasilającego silniki trakcyjne przy niesymetrii napięcia zasilającego



Rys. 3.41. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu z wykorzystaniem diod zamiast dławików dodatkowych

wyższe napięcie na jej katodzie wprowadzi diodę D_2 w stan blokowania (zostanie ona spolaryzowana zaporowo). Zwarcie sekcji uzwojenia poprzez jednocześnie załączone styczniki nr 1 i 3 zapobiegają diody włączone w obwodzie zwarcia przeciwsobnie. Następnie otwiera się stycznik nr 1. Otwarcie to odbywa się w stanie bezprądowym. W ten sposób napięcie górnej połowki uzwojenia transformatora osiąga wartość $U_1 + \Delta U$ i otrzymywany jest stopień z niesymetrycznym napięciem zasilającym prostowniki. Następnie w sposób analogiczny następuje przełączenie w dolnej połowce uzwojenia transformatora, czyli zamknięcie stycznika nr 4 i otwarcie stycznika nr 2. Warto zauważyć, że w tym układzie otwieranie styczników odbywa się w stanie bezprądowym. Jednak ma to miejsce tylko przy przechodzeniu od niższych wartości napięć zasilających silniki do wartości wyższych. Podczas zmiany w drugą stronę styczniki przerywają prąd, muszą być zatem wyposażone w komory gaszeniowe.

Podczas zmiany w drugą stronę styczniki przerywają prąd, muszą być zatem wyposażone w komory gaszeniowe.

Rozwinięciem układów pojazdów z prostownikami niesterowanymi jest wykorzystanie elementów sterowanych, umożliwiających regulację wartości napięcia zasilającego silniki przez zmianę kąta zapłonu zaworów. Sterowanie odbywa się w sposób identyczny, jak dla pojazdów zasilanych napięciem o częstotliwości obniżonej (patrz podrozdział 3.3.2.2).

3.3.3.3. Pojazdy z silnikami trójfazowymi prądu przemiennego

Sterowanie pracą pojazdów napędzanych silnikami trójfazowymi jest identyczne, niezależnie od systemu zasilania (wyjąwszy marginalne systemu napięć trójfazowych – patrz punkt 3.3.1). Wynika to z faktu, że zawsze konieczne jest przetworzenie energii na postać wymaganą przez silniki trakcyjne. Dlatego regulacja prędkości tych pojazdów przy zasilaniu z systemów napięcia przemiennego o częstotliwości przemysłowej niczym się nie różni od tych pobierających energię z sieci napięcia stałego czy jednofazowego o częstotliwości obniżonej. Schemat obwodu głównego takiego pojazdu będzie taki sam, jak ten przedstawiony na rys. 3.36. Inna będzie tylko budowa transformatora, gdyż musi on być dostosowany do wyższej wartości napięcia i częstotliwości.

3.4. Pojazdy wielosystemowe

Pod pojęciem pojazdu wielosystemowego rozumiemy taki pojazd, który jest dostosowany do pobierania energii z więcej niż jednego systemu zasilania. Wymaga to przekształcenia (wewnątrz pojazdu) przynajmniej jednego typu energii na inny, dostosowany do wymagań układu

napędowego. Można również wykorzystać silniki trakcyjne zdolne do pracy przy zasilaniu różnymi rodzajami napięcia. Z technicznego punktu widzenia możliwe są następujące rozwiązania układu napędowego wielosystemowego pojazdu trakcyjnego:

- pojazdy wyposażone w komutatorowe silniki jednofazowe napięcia przemiennego, mogące pracować zarówno przy zasilaniu napięciem przemiennym o częstotliwości obniżonej, jak i przy napięciu stałym;
- pojazdy z silnikami szeregowymi prądu stałego dostosowane poprzez zmianę konfiguracji obwodu głównego do różnych wartości napięcia zasilania;
- pojazdy z silnikami szeregowymi prądu stałego (tętniącego), wyposażone w transformator i prostownik, mogące pracować zarówno w systemach napięcia stałego, jak i jednofazowych napięcia przemiennego
- pojazdy z silnikami trójfazowymi napięcia przemiennego (indukcyjnymi lub synchronicznymi), które mogą pracować, pobierając energię z kilku systemów zasilania, dzięki układom przekształtników.

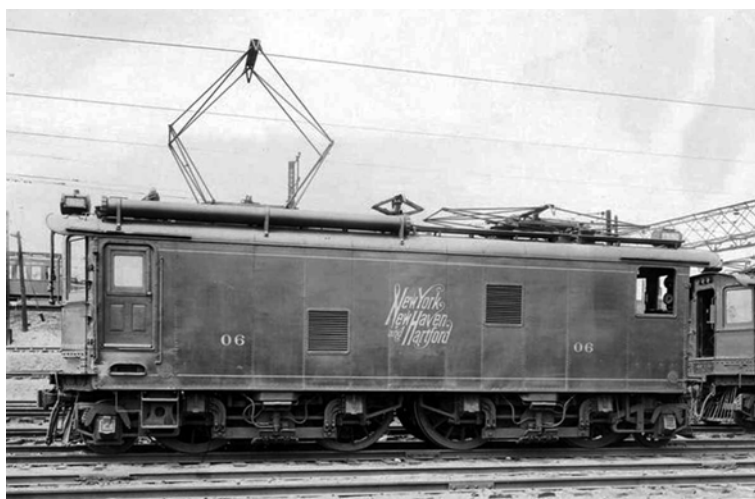
Potrzeba budowy pojazdów trakcyjnych wielosystemowych pojawiła się wówczas, gdy jeden przewoźnik obsługiwał linie zasilane różnymi rodzajami napięcia. W późniejszym okresie takim czynnikiem była również chęć usprawnienia transportu międzynarodowego pomiędzy krajami wykorzystującymi odmienne systemy zasilania. Pojazdy wielosystemowe pozwalają na uniknięcie strat czasu potrzebnego na zmianę pojazdu trakcyjnego na granicy. Obecnie w rzeczywistości zjednoczonej Europy i związanej z tym konieczności zapewnienia swobodnego transportu ludzi i towarów, pojazdy wielosystemowe są jedynym rozwiązaniem problemu przy mnogości wykorzystywanych systemów zasilania. W zależności od potrzeb i wybranego rodzaju układu napędowego, możliwie jest skonstruowanie pojazdów dwu-, trzy-, a nawet czerosystemowych.

3.4.1. Pojazdy z jednofazowymi silnikami komutatorowymi napięcia przemiennego

Pierwsze pojazdy mogące pracować przy zasilaniu z więcej niż jednego rodzaju napięcia zostały zbudowane już w 1906 roku. Były to lokomotywy dwusystemowe serii *EP-1*, wykonane przez firmę *Baldwin-Westinghouse* na potrzeby kompanii *New York, New Haven & Hartford Railroad*. Konieczność budowy takich lokomotyw wynikała z faktu, że linię kolejową pomiędzy Nowym Jorkiem a Stamford, obsługiwaną przez tego przewoźnika, zelektryfikowano przy użyciu dwóch rodzajów napięcia. W tunelach dojazdowych do Nowego Jorku zastosowano napięcie stałe o wartości 660 V, dostarczane do pojazdów trzecią szyną, natomiast na linii głównej eksploatowano górną sieć jezdnią przy napięciu przemiennym 11 kV 25 Hz. Lokomotywy napędzane były jednofazowymi silnikami komutatorowymi prądu przemiennego. Wykorzystano fakt, że silniki takie mogą z powodzeniem pracować przy zasilaniu napięciem stałym o odpowiedniej wartości. Moc pojazdu wynosiła około 900 kW, a prędkość maksymalna dochodziła do 95 km/h. Lokomotywę pokazano na fot. 3.6. W tego typu pojazdach sterowanie układem napędowym może być rozwiązane na dwa sposoby. Jedną z możliwości jest zabudowa w pojeździe zarówno aparatury do rozruchu i regulacji prędkości przy napięciu przemiennym, tj. transformatora obniżającego napięcie z odczepami i układem styczników; jak również rezystorów rozruchowych służących do rozruchu przy zasilaniu napięciem stałym. Takie rozwiązanie zastosowano w przedsta-

wionej powyżej lokomotywie. Drugą metodą jest wykorzystanie transformatora o stałej przekładni i stosowanie rozruchu rezystorowego przy zasilaniu zarówno napięciem stałym, jak i przemiennym. Można wówczas znacznie uprościć obwód główny pojazdu, kosztem występowania strat energii podczas rozruchu przy zasilaniu napięciem przemiennym. Takie rozwiązanie może być korzystne w sytuacji, gdy pojazd w większości sytuacji będzie pracował przy zasilaniu napięciem stałym, a część przemiennoprądowa zostanie wykorzystywana sporadycznie.

Teoretycznie, wykorzystując cechy silnika komutatorowego prądu przemiennego umożliwiające jego eksploatację przy zasilaniu zarówno napięciem stałym, jak i przemiennym, można zbudować pojazd trzy-, cztero-, a nawet więcej systemowy. Nigdy jednak nie został on skonstruowany. Nie było bowiem wówczas (tj. na początku XX wieku) takiej potrzeby. Powszechna elektryfikacja linii kolejowych nastąpiła znacznie później i w związku z tym poszczególne systemy zasilania na ogół były (w tamtych czasach) oddzielone strefami nieelektryfikowanymi. Dopiero masowa elektryfikacja linii głównych, która nastąpiła po II wojnie światowej, i wzrastający ruch transgraniczny pomiędzy krajami stosującymi odmienne systemy zasilania zrodziły potrzebę konstrukcji pojazdu uniwersalnego. Jednak postęp techniczny sprawił, że przy jego budowie wykorzystano inne, bardziej nowoczesne rozwiązania układu napędowego.



Fot. 3.6. Pierwsza lokomotywa dwusystemowa – 1906 [13]

3.4.2. Pojazdy z silnikami szeregowymi prądu stałego dostosowane do różnych wartości napięcia zasilającego

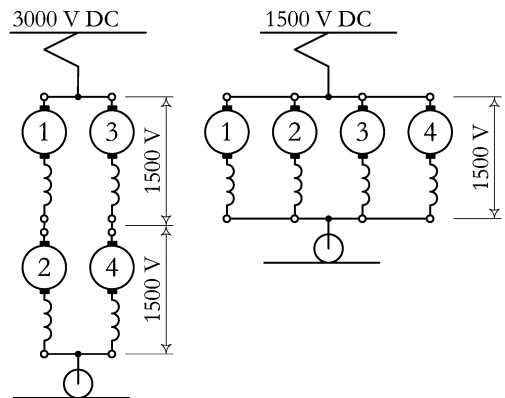
Z technicznego punktu widzenia najprostszy w konstrukcji pojazd wielosystemowy to taki, który wykorzystuje silniki szeregowo prądu stałego i jest dostosowany do zasilania z napięć o różnej wartości. Mimo to nie powstało wiele takich pojazdów. Wynika to z faktu, iż systemy napięcia stałego o różnej wartości sąsiadują ze sobą jedynie na granicy Belgii (3000 V) i Holandii (1500 V). Oba państwa należą do mniejszych pod względem obszaru i większa część ruchu międzynarodowego odbywa się z wykorzystaniem tych krajów jako tranzytowych, np. z Niemiec do Francji przez Belgię. Kiedy chcemy obsłużyć taką trasę jedną lokomotywą, musi ona być dostosowana również do zasilania napięciem przemiennym. Dlatego zbudowano zaledwie dwa typy

lokomotyw i jeden zespół trakcyjny, dostosowane do pobierania energii wyłącznie z obu systemów napięcia stałego. Przykładem takiego pojazdu jest lokomotywa serii *Class 25.5* kolei belgijskich *SNCB*, pokazana na fot. 3.7.



Fot. 3.7. Lokomotywa dwusystemowa pracująca przy napięciu 3000 V lub 1500 V DC (fot. R. Delaedt)

Przystosowanie do pracy przy różnych wartościach napięcia stałego polega na innej docelowej konfiguracji silników trakcyjnych. Dla pojazdu czterosilnikowego przy zasilaniu z napięcia 3000 V DC silniki trakcyjne połączone są w układzie szeregowo-równoległym, tj. dwie grupy dwóch maszyn połączonych szeregowo i razem równolegle. Po zmianie systemu zasilania konfiguracją docelową będzie układ równoległy, czyli wszystkie maszyny połączone równolegle (patrz rys. 3.42). Przy takiej możliwości, niezależnie od systemu zasilania, silniki trakcyjne będą pracowały zasilane napięciem równym co do wartości ich napięciu znamionowemu. Oczywiście dla obu wariantów możliwe są też inne konfiguracje połączeń, tj. szeregowo przy zasilaniu napięciem 3000 V i szeregowo oraz szeregowo-równoległa dla napięcia 1500 V. Dodatkowo, w celu umożliwienia pracy w obu systemach, przetwornica zasilająca obwody sterowania i pomocnicze, powinna być w stanie pracować przy dwóch wartościach napięcia wejściowego. Oczywiście, izolacja elektryczna tych pojazdów musi być przystosowana do wyższych wartości napięcia zasilającego. Rozruch i regulacja prędkości odbywa się identycznie, jak dla pojazdów jednosystemowych zasilanych napięciem stałym.



Rys. 3.42. Konfiguracja docelowa pojazdu dwusystemowego zasilanego z napięć stałych

3.4.3. Pojazdy z silnikami prądu stałego (tętniącego) dostosowane do zasilania napięciem stałym i przemiennym

Konieczność budowy na szerszą skalę pojazdów wielosystemowych, mogących pracować zarówno w systemach stało-, jak i zmiennonapięciowych, pojawiła się w latach 50. XX wieku. Wynikało to głównie z wprowadzenia do eksploatacji systemu zasilania napięciem przemiennym o częstotliwości przemysłowej 25 kV, 50 Hz. Jako pierwsze zdecydowały się na ten system koleje francuskie, używające do tej pory systemu 1500 V DC. Aby nie doprowadzić do powstania dwóch całkowicie odizolowanych części zelektryfikowanej sieci kolejowej, postanowiono wykorzystywać lokomotywy wielosystemowe. Jedyną możliwością budowy takiej lokomotywy (w latach 50. i 60.) było wykorzystanie silników szeregowych prądu stałego (tętniącego) i zabudowanie armatury elektrycznej umożliwiającej pracę przy zasilaniu zarówno napięciem przemiennym, jak i stałym. Możliwe są tutaj następujące rozwiązania techniczne:

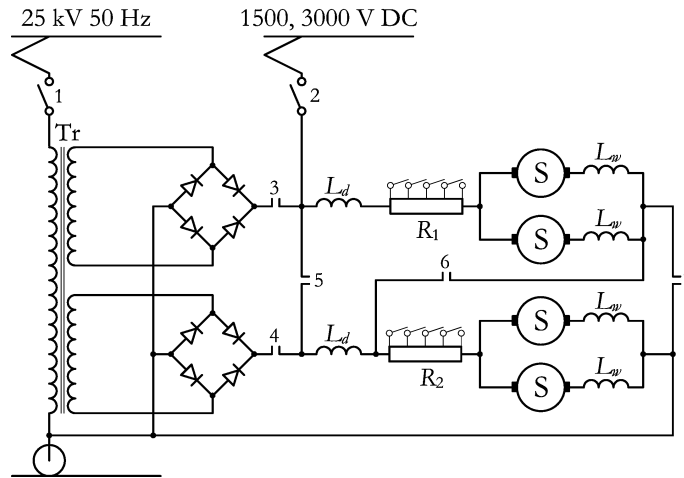
- zabudowa układu rozruchu rezystorowego dla zasilania napięciem stałym oraz transformatora i prostownika niesterowanego, wykorzystywanego przy zasilaniu napięciem przemiennym. Rezystory rozruchowe wykorzystywane są zarówno przy zasilaniu napięciem stałym, jak i przemiennym;
- zamontowanie w pojeździe pełnych układów regulacji prędkości dla obu rodzajów napięcia zasilającego, tj. rezystorów rozruchowych dla napięć stałych oraz transformatora z odczepami, stycznikowym układem sterowania i prostownika niesterowanego dla napięć przemiennych;
- wykorzystanie prostowników niesterowanych i układów impulsowych. Zbędne są wówczas rezystory rozruchowe i wieloodczepowy transformator pojazdu.

Budowa pojazdu z układem napędowym, wykonanym według pierwszej z wyżej wymienionych możliwości, zostanie omówiona pokrótce na przykładzie trzysystemowej lokomotywy serii *Class 15* kolei belgijskich *SNCB* (patrz fot. 3.8).



Fot. 3.8. Lokomotywa trzysystemowa kolei *SNCB* serii *Class 15* (fot. M. Bienick)

Konstrukcja tej lokomotywy została opracowana w 1961 roku. Przeznaczono ją do obsługi transgranicznego ruchu pasażerskiego pomiędzy Belgią (3000 V DC), Holandią (1500 V DC) i Francją (1500 V DC i 25 kV 50 Hz). Lokomotywa ma układ osi Bo-Bo, moc 2,62 MW (niezależnie od systemu zasilania) i może poruszać się z prędkością maksymalną równą 160 km/h. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu pokazano na rys. 3.43.



Rys. 3.43. Uproszczony schemat obwodu głównego lokomotywy trzystemowej *Class 15* kolei *SNCB*

Przy zasilaniu napięciem stałym o wartości 1500 V zamknięty jest łącznik odbieraka nr 2, zaś w konfiguracji docelowej zamknięte są styczniki nr 5 i 7, a otwarte wszystkie pozostałe. Silniki trakcyjne są wówczas połączone równolegle i zasilane napięciem nominalnym, czyli 1500 V. Praca w systemie 3000 V DC wymusza zmianę konfiguracji silników trakcyjnych na szeregowo-równoległą. Jest to realizowane przez otwarcie styczników nr 5 i 7, a zamknięcie stycznika nr 6. Reszta konfiguracji, w porównaniu do zasilania napięciem 1500 V DC, nie ulega zmianie. Zasilanie napięciem przemiennym wymaga załączenia transformatora głównego i mostków prostowniczych. Realizowane jest to przez zamknięcie łącznika nr 1 oraz styczników nr 3 i 4. Obie pary silników zasilane są niezależnie. Zatem otwarte zostają styczniki nr 5 i 6, a zamknięty nr 7. Zadaniem dławików dodatkowych L_d , włączonych szeregowo z każdą parą silników, jest zmniejszenie składowej przemiennego prądu wyprostowanego przy zasilaniu napięciem przemiennym. Zastosowanie transformatora o stałej przekładni i mostków prostowniczych niesterowanych wymusza wykorzystywanie rezystorów rozruchowych również przy zasilaniu pojazdu napięciem przemiennym, co wiąże się oczywiście ze stratami energii. Jest to rezultat uproszczonej konstrukcji przemiennoprądowej części obwodu głównego pojazdu. Takie rozwiązanie wynikło z założenia, że pojazd w większości będzie eksploatowany przy zasilaniu napięciem stałym, a praca w systemie napięcia przemiennego będzie miała miejsce jedynie sporadycznie. Zatem oszczędności energii nie rekompensowały zwiększonego kosztu budowy transformatora i montażu aparatury łączeniowej w części przemiennoprądowej.

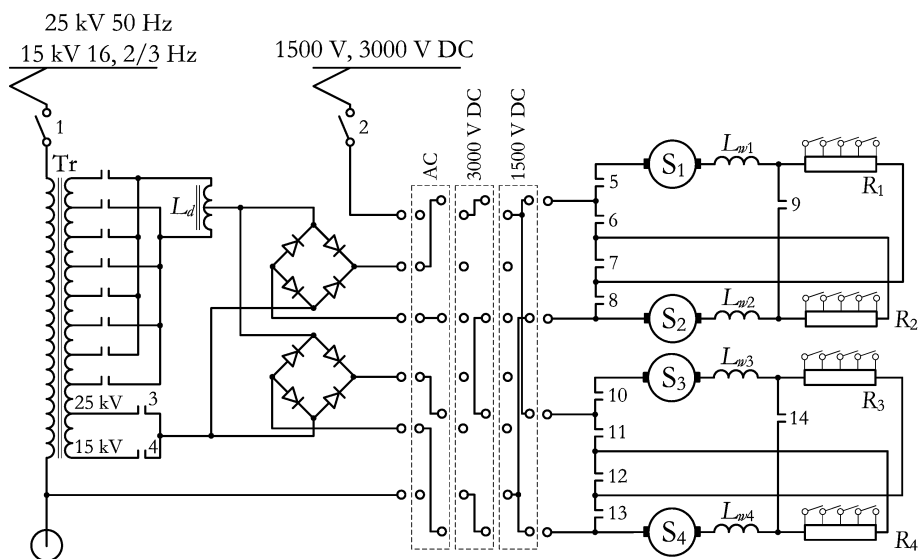
Dla pojazdów pracujących głównie w systemach napięcia przemiennego lub w jednakowym udziale przy obu rodzajach napięcia, takie rozwiązanie nie mogło zostać zaakceptowane. Budowano więc pojazdy z pełnym wyposażeniem elektrycznym obwodu głównego zarówno do sys-

temów przemiennie-, jak i stałonapięciowych. Jako przykład można tu podać elektryczny zespół trakcyjny kolei szwajcarskich SBB serii RAe 1051 (patrz fot. 3.9).



Fot. 3.9. Czterosystemowy elektryczny zespół trakcyjny serii RAe 1051 kolei szwajcarskich SBB (fot. S. Gottraux)

Jednostka ta została skonstruowana w latach 60. z przeznaczeniem do obsługi pociągów *Trans-Europe-Express* relacji Mediolan – Paryż. Wiązało się to z koniecznością dostosowania pojazdu do pracy w czterech systemach zasilania, tj.: 3000 V DC na terenie Włoch, 15 kV 16 i 2/3 Hz – w Szwajcarii oraz 25 kV 50 Hz i 1500 V DC we Francji. Moc pojazdu wynosi 2,31 MW, co pozwala na jazdę z prędkością 160 km/h. Parametry trakcyjne są jednakowe dla wszystkich systemów zasilania. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu zaprezentowano na rys. 3.44, a konfiguracja połączeń dla poszczególnych systemów zasilania została przedstawiona w tabl. 3.10.



Rys. 3.44. Uproszczony schemat obwodu głównego czterosystemowego elektrycznego zespołu trakcyjnego serii RAe 1051

Rozruch i regulacja prędkości przy zasilaniu napięciem przemiennym jest zrealizowana po stronie niskiego napięcia za pomocą układu stycznikowego z dławikiem dodatkowym. Wybór pomiędzy systemami AC odbywa się przez zmianę przekładni transformatora dla pierwszego stopnia rozruchowego (styczniki nr 3 i 4). Parametry elektryczne transformatora (m.in. wartość napięcia izolacji) muszą być dostosowane do pracy przy napięciu wyższym, tj. 25 kV, a obwód magnetyczny (wymiary geometryczne rdzenia) do częstotliwości obniżonej, czyli 16 i 2/3 Hz. Każda para silników trakcyjnych zasilana jest z indywidualnego mostka prostowniczego. Dla górnej pary silników obwód prądowy zamyka się przez stycznik nr 5, uzwojenia maszyny nr 1, stycznik nr 9 i uzwojenia maszyny nr 2.

Dla dolnej pary silników połączenie przebiega w sposób analogiczny, tj. stycznik nr 10, uzwojenia maszyny nr 3, stycznik nr 14 i uzwojenia maszyny nr 4. Nieco odmiennie wygląda układ połączeń silników trakcyjnych dla zasilania napięciem stałym. Przy napięciu 3000 V DC obie pary silników są na stałe połączone szeregowo, a przy napięciu 1500 V DC – równoległe. W ramach każdej pary istnieje możliwość szeregowego lub równoległego połączenia maszyn. Oznacza to, że przy wyższym napięciu zasilającym możliwe są konfiguracje szeregowo-równoległa, natomiast dla napięcia niższego dopuszcza się połączenia szeregowo-równoległe i równoległe (patrz tabl. 3.10). Rozruch przeprowadzany jest przy wykorzystaniu rezystorów pogrupowanych w cztery sekcje połączone szeregowo z każdym silnikiem trakcyjnym.

Tabl. 3.10. Konfiguracja połączeń styczników obwodu głównego dla pojazdu czterosystemowego serii RAe 1051

| System zasilania | Numer łącznika/stycznika | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 25 kV 50 Hz | x | | x | | x | | | | x | x | | | | x |
| 15 kV 16 i 2/3 Hz | x | | | x | x | | | | x | x | | | | x |
| 3000 V DC konf. szeregowo | | x | | | x | | x | | | x | | x | | |
| 1500 V DC konf. szeregowo-równoległa | | x | | | x | x | | x | | x | x | | x | |
| 1500 V DC konf. szeregowo-równoległa | | x | | | x | | x | | | x | | x | | |
| 1500 V DC konf. równoległa | | x | | | x | x | | x | | x | x | | x | |

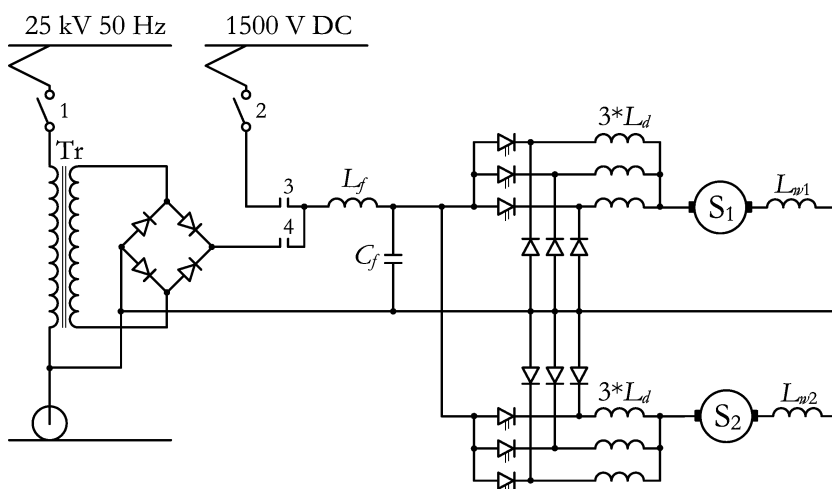
Ostatnim możliwym rozwiązaniem układu napędowego, wykorzystującym silniki szeregowo-prądu stałego (tętniącego), jest zastosowanie do sterowania pracą maszyn elementów energoelektronicznych. Rozwiązanie to pozwala na wyeliminowanie strat rozruchowych, zarówno przy zasilaniu napięciem stałym, jak i przemiennym. Ten rodzaj napędu wykorzystano np. w dwusystemowej lokomotywie serii *BB 22000* kolei francuskich *SNCF* produkcji *Alsthom*, przeznaczonej do obsługi pociągów pasażerskich w ruchu krajowym. Pojazd pokazano na fot. 3.10.

Lokomotywa może pracować przy zasilaniu napięciem przemiennym 25 kV 50 Hz oraz napięciem stałym o wartości 1500 V. Napędzana jest dwoma silnikami trakcyjnymi (po jednym na wózek). Moc pojazdu wynosi 4,04 MW przy zasilaniu napięciem stałym i 4,14 MW dla napięcia przemiennego. Po modernizacji moc wzrosła do 5,6 MW, ale tylko dla napięcia 25 kV. Przy napięciu 1500 V występuje ograniczenie mocy związane w wydajnością energetyczną układu zasilania i trudnością w doprowadzeniu do pojazdu prądu o wystarczająco dużym natężeniu.

Prędkość maksymalna wynosi 200 km/h, niezależnie od systemu zasilania. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu przedstawiono na rys. 3.45.



Fot. 3.10. Lokomotywa dwusystemowa serii BB 22000 kolei SNCF (fot. V. deMorteau)



Rys. 3.45. Uproszczony schemat obwodu głównego lokomotywy serii BB22000 kolei SNCF

Sterowanie pracą silników trakcyjnych odbywa się poprzez regulację średniej wartości napięcia zasilającego. Elementami wykonawczymi są dwa układy impulsowe połączone w konfiguracji trójfazowej. Zasada działania wielofazowych układów impulsowych została szerzej omówiona w podrozdziale 3.2.2.2. Każdy silnik trakcyjny zasilany jest z niezależnego obwodu, co umożliwia, w sytuacjach awaryjnych, pracę z wykorzystaniem jednej maszyny. Moc pojazdu ograniczona jest wówczas do połowy. Wykorzystanie układów impulsowych wymusiło zamontowanie w pojeździe filtra wejściowego $L_f C_f$, w celu ograniczenia poziomu zaburzeń emitowanych do sieci trakcyjnej. Przekładnia transformatora głównego dobrana jest tak, aby na wyjściu

prostownika niesterowanego wartość napięcia wynosiła w warunkach nominalnych 1500 V. Dzięki temu, z punktu widzenia układu sterowania silnikami trakcyjnymi, warunki zasilania są identyczne dla obu systemów napięcia.

3.4.4. Pojazdy z silnikami trójfazowymi prądu przemiennego

Większość obecnie konstruowanych elektrycznych pojazdów trakcyjnych napędzana jest trójfazowymi silnikami indukcyjnymi klatkowymi lub silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi. Fakt ten wymusza zastosowanie energoelektronicznych układów przetwarzających, gdyż tego rodzaju silniki nie mogą bezpośrednio pobierać energii z żadnego trakcyjnego systemu zasilania. Budowa pojazdu wielosystemowego polega zatem na umożliwieniu przetwarzania energii zasilającej pochodzącej z różnych systemów, tak by dostosować jej parametry do wymagań napędu. Urządzeniem bezpośrednio zasilającym silnik jest z reguły falownik, który wymaga na wejściu napięcia stałego. Zatem przy pracy w systemach napięcia przemiennego konieczne jest jego wyprostowanie. Przy systemach napięcia stałego to dodatkowe przetwarzanie energii teoretycznie nie jest potrzebne. Jednak w niektórych pojazdach dopuszczalny zakres zmian wartości napięcia stałego zasilającego falownik jest mniejszy od zmian, jakie mogą wystąpić w sieci trakcyjnej. Wówczas stosowane są dodatkowe przetwornice DC/DC, dostosowujące wartość napięcia zasilającego do wymagań falownika.

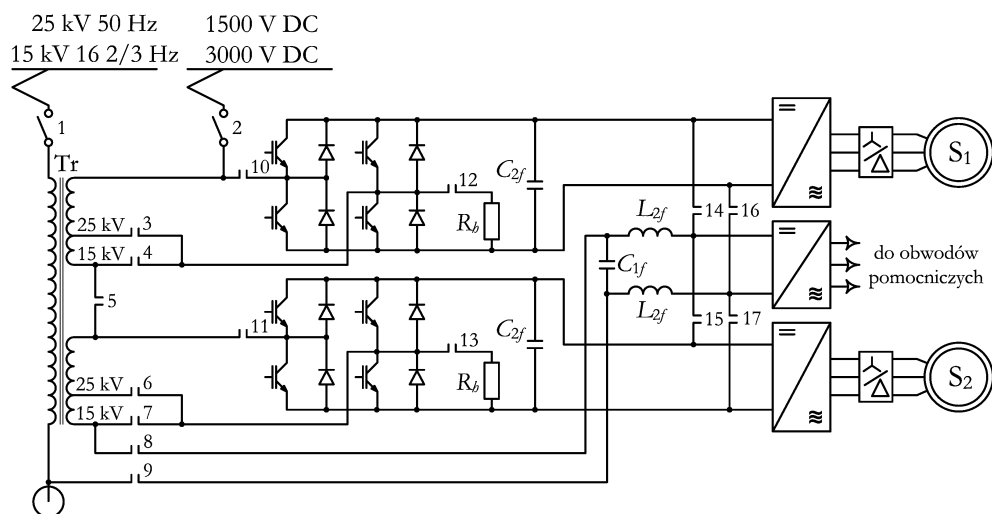
Przykładem nowoczesnego pojazdu wielosystemowego jest lokomotywa klasy *Eurosprinter*, o oznaczeniu fabrycznym *ES 64 F4*, produkcji koncernu *Siemens* (patrz fot. 3.11).



Fot. 3.11. Nowoczesna lokomotywa czterosystemowa typu *ES 64 F4* (fot. S. Terfloth)

Ta wersja pojazdu została zbudowana z przeznaczeniem do obsługi transeuropejskich ekspresowych pociągów towarowych. Może być zasilana z wszystkich podstawowych systemów napięcia, tj.: 25 kV 50 Hz, 15 kV 16 i 2/3 Hz, 3000 V DC i 1500 V DC. Moc pojazdu wynosi 6,4 MW dla systemów napięcia przemiennego, 6,0 MW dla systemu 3000 V DC i 4,2 MW przy zasilaniu napięciem 1500 V DC. Prędkość maksymalna jest niezależna od systemu zasilania i wynosi 140 km/h. Dzięki dużej mocy lokomotywa może prowadzić pociągi o masie do 3200 t w

terenie nizinnym. Uproszczony schemat obwodu głównego lokomotywy przedstawiono na rys. 3.46. Dla większej przejrzystości rysunku pokazano połowę obwodu (dla jednego wózka napędowego).



Rys. 3.46. Uproszczony schemat obwodu głównego lokomotywy czterosystemowej serii ES 64 F4

Pojazd wyposażony jest w cztery falowniki zasilające indywidualnie poszczególne silniki trakcyjne. Przy pracy w systemach napięcia przemiennego falowniki zasilane są poprzez dwukierunkowe prostowniki umożliwiające zarówno zamianę energii napięcia przemiennego na energię napięcia stałego, jak i odwrotnie (tzw. przekształtniki czterokwadrantowe). W zależności od wartości napięcia przemiennego (15 lub 25 kV) wejścia prostowników połączone są z mniejszą lub większą liczbą zwojów uzwojenia wtórnego transformatora pojazdu. Przy zasilaniu napięciem stałym uzwojenia wtórne transformatora wykorzystywane są jako indukcyjności pierwszego stopnia filtra wejściowego, tworząc wraz z kondensatorem C_{1f} filtr typu gamma. Drugim stopniem filtra wejściowego są pary elementów L_{2f} C_{2f} , które stanowią filtry (również typu gamma) włączone indywidualnie w obwód zasilania każdego układu falownik-silnik trakcyjny. Przy napięciu 3000 V DC oraz dla napięć przemiennych uzwojenia stojana silników trakcyjnych są połączone w gwiazdę. W sytuacji gdy lokomotywa zasilana jest napięciem 1500 V DC uzwojenia te łączy się w trójkąt, jako że maksymalna wartość napięcia z falownika jest wówczas niższa niż przy innych systemach zasilania. Rezystory hamowania R_b , przeznaczone do wytracania energii rekuperacji w warunkach braku odbioru, załączane są wyłącznie podczas pracy przy napięciu stałym, gdyż dla napięć przemiennych podstacje trakcyjne są dwukierunkowe i umożliwiają zwrot energii do systemu zasilającego (więcej informacji o problemach dotyczących hamowania przedstawiono w rozdz. 4). Pełna konfiguracja styczników w zależności od systemu zasilania przedstawiona jest w tabl. 3.11.

Napędy przekształtnikowe znacznie ułatwiły budowę pojazdów mogących pracować przy zasilaniu z więcej niż jednego systemu napięcia. Dlatego większość oferowanych obecnie przez producentów pojazdów trakcyjnych została zaprojektowana jako wielosystemowe. Ponieważ ta cecha (ze względu na wyższy koszt takiej lokomotywy czy zespołu trakcyjnego) nie zawsze jest pożądana z punktu widzenia zamawiającego, oferta wytwórcy obejmuje na ogół całą rodzinę

pojazdów o wspólnej nazwie, montowanych w różnych wariantach zgodnie z życzeniami klienta. Umożliwia to wielkoseryjną produkcję pojazdów trakcyjnych, co przekłada się na obniżenie ich ceny. Jako przykład można tu podać rodzinę lokomotyw *Traxx* produkcji firmy Bombardier, czy też *Europrinter* produkcji *Siemensa* (jeden z wariantów tego pojazdu omówiono powyżej). Lokomotywy te oferowane są w wersjach jedno-, dwu- lub wielosystemowych, a nawet niekiedy produkowane są warianty z napędem spalinowo-elektrycznym (np. *Traxx DE*).

Tabl. 3.11. Konfiguracja połączeń styczników obwodu głównego dla lokomotywy czterosystemowej serii ES 64 F4

| System zasilania | Numer łącznika/stycznika | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 25 kV 50 Hz | x | | x | | | x | | | | | | | | x | | x | |
| 15 kV 16 2/3 Hz | x | | | x | | | x | | | | | | | x | | x | |
| 3000, 1500 V DC | | x | | | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |

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. Krayn 1930.
- [5] Бондаревский Д. И., Василев Г. И., Жниц 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] Duffy M. C.: *Electric railways 1880-1990*. London, The IEE 2003.
- [8] Estler T.: *Das große Loktypenbuch*. Stuttgart, Transpress 2004.
- [9] Gawłowski K.: *Lokomotywa wielosystemowa typu E186 serii EU43*. Technika Transportu Szynowego, nr 1/2-2008 str. 17 – 24.
- [10] Grassart P.: *La SNCF célèbre les 50 ans du record à 331 km/h*. La vie du Rail, N° 2992 30 mars 2005.
- [11] Gronowicz J., Kasprzak B.: *Lokomotyny spalinowe*. Warszawa, WKiŁ 1989.
- [12] Grünholz H.: *Elektrische Vollbahnlokomotiven*. Berlin, AEG 1930.
- [13] Haut F. J. G.: *Historia lokomotyny elektrycznej*. Warszawa, WKiŁ 1975.
- [14] Höring D. O. (red.): *Elektrische bahnen*. Berlin, Walter de Gruyter & Co. 1929.
- [15] Jarvis R.: *Davidson's locomotive: how did He do it?* Engineering Science and Education Journal, December 1996, str. 281 – 288.
- [16] Kasprzak J., Koczara W.: *Podstawy napędu elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Warszawa, WKiŁ 1990.
- [17] Калинин В. К., Михайлов Н. М.: *Электроподвижной состав железных дорог*. Москва, Транспорт 1964.
- [18] Koeffler P.: *Das Deutsche museum In München und das elektrische Bahnwesen*. Elektrische Bahnen, April 1925, str. 113 – 121.
- [19] Kowalski E.: *Pojazdy trakcyjne*. Warszawa, WKiŁ 1979.
- [20] Кутыловский М. П., Федотов А. И.: *Подвижной состав трамвая*. Москва, МКХ РСФСР 1948.
- [21] Lepka J., Stekl P.: *3-phase AC induction motor vector control using DSP56F80x*. Motorola Inc. 2002.
- [22] Maciszewski H., Pawlus J., Sumiński S.: *Lokomotyny elektryczne serii EU06 i EU07*. Warszawa, WKiŁ 1974.
- [23] Madej J.: *Teoria ruchu pojazdów szynowych*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.
- [24] Monkiewicz T.: *Maszyny komutatorowe prądów zmiennych*. Warszawa, Komisja Wydawnicza Towarzystwa Bratniej Pomocy Studentów Politechniki Warszawskiej 1933.
- [25] Ransome-Wallis P. (red.): *The concise encyclopedia of world railway locomotives*. New York, Hawthorn Books Inc. 1959.
- [26] Plewako S.: *Tabor kolei elektrycznej*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacyjne 1954.
- [27] Plewako S., Romaniszyn Z., Cianciara K.: *Pojazdy trakcyjne kolei elektrycznych*. Warszawa, WKiŁ 1966.
- [28] Plutyński K., Szpankowski W.: *Wózek akumulatorowy i jego eksploatacja*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacyjne 1954.
- [29] Podoski J.: *Tramwaj szybki, projektowanie i eksploatacja*. Warszawa, WKiŁ 1983.
- [30] Podoski J.: *Trolejbusy, budowa i eksploatacja*. Warszawa, Wydawnictwo „Arkady” 1958.
- [31] Podoski J., Kasprzak J., Mysiek J.: *Zasady trakcji elektrycznej*. Warszawa, WKiŁ 1980.
- [32] Podoski R.: *Trakcja elektryczna, tom II*. Warszawa, Wydawnictwa komunikacyjne 1954.
- [33] Podoski R.: *Tramwaje i koleje elektryczne, tom I i II*. Warszawa, Komisja Wydawnicza Towarzystwa Bratniej Pomocy Studentów Politechniki Warszawskiej 1922.
- [34] Praca zbiorowa: *Historia elektryki polskiej tom V Trakcja elektryczna*. Warszawa, WNT 1971.
- [35] Praca zbiorowa: *Podręcznik inżyniera elektryka tom I, II, III, IV*. Warszawa, Trzaska, Evert i Michalski 1947 – 1954.
- [36] Rabsztyń M.: *Tyrystorowe zespoły trakcyjne EN57 na PKP*. Technika Transportu Szynowego, nr 5/1996 str. 32.
- [37] Ruśkiewicz T.: *Tramwaje i koleje elektryczne*. Warszawa, Druk Rubieszewskiego i Wrotnowskiego 1901.

- [38] Sachs K.: *Elektrische Vollbahnlokomotiven*. Berlin, Springer 1928.
- [39] Сидоров Н. И., Прудыус А. С.: *Как устроен и работает электровоз*. Москва, Трансжелдориздат 1959.
- [40] Steimel A.: *Electric traction—motive power and energy supply*. München, Oldenbourg Industrieverlag 2008.
- [41] Tichmieniew B. N., Trachtman L..M.: *Aparatura i układy elektrycznych pojazdów trakcyjnych*. Warszawa, WKiŁ 1965.
- [42] Тихменев Б. Н.: *Электровозы переменного тока со статическими преобразователями*. Москва, Трансжелдориздат 1958.
- [43] Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М.: *Подвижной состав электрических железных дорог*. Москва, Трансжелдориздат 1958.
- [44] *The Horseless Age magazine*. Vol. 29, No. 8 February 21, 1912.
- [45] Tunia H., Winiarski B.: *Energoelektronika w pytaniach i odpowiedziach*. Warszawa, WNT 1996.
- [46] Wakuda Y.: *Railway modernization and Shinkansen*. Japan Railway & Transport Review, April 1997, str. 60 – 63.
- [47] Westbrook M. H.: *The electric car*. London, IEE 2001.
- [48] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_locomotive
- [49] http://en.wikipedia.org/wiki/Baltimore_Belt_Line
- [50] <http://www.erbzine.com/mag12/1282.html>
- [51] http://en.wikipedia.org/wiki/La_Jamais_Contente
- [52] <http://www.autowallpaper.de/Wallpaper/Porsche/Lohner-Porsche-Elektromobil/Lohner-Porsche-Elektromobil.htm>
- [53] http://en.wikipedia.org/wiki/PCC_streetcar
- [54] http://en.wikipedia.org/wiki/Detroit_Electric
- [55] <http://www.schlesische-eisenbahnen.de/eltrieb.html>
- [56] <http://ffmfw.free.fr/Bourgogne/Agenda/6expo/6624Amberieu/reel/APMFS.htm>
- [57] <http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetschwebebahn>
- [58] http://en.wikipedia.org/wiki/EMD_F9
- [59] http://pl.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCwag_GT6
- [60] http://pl.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCwag_N8C
- [61] http://de.wikipedia.org/wiki/Karlsruher_Modell
- [62] <http://ja.wikipedia.org/wiki/ED44>
- [63] http://pl.wikipedia.org/wiki/EMD_DDA40X