

Historia i dzień dzisiejszy trakcji elektrycznej

Tadeusz Glinka

Początki i rozwój trakcji elektrycznej

Moritz Jakobi zbudował w 1833 r. pierwszy silnik elektryczny prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi i wykorzystał go do napędu łodzi płynącej po Newie w Sankt Petersburgu. Pierwsza lokomotywa elektryczna została zbudowana przez Szkota, Roberta Davidsona z Aberdeen w 1837 r. Była ona napędzana silnikiem prądu stałego zasilanym z baterii elektrycznej. Davidson zbudował później jeszcze większą lokomotywę, którą nazwał Galvani. Zaprezentowana została na Royal Scottish Society of Arts Exhibition w 1841 r., a jej pierwsze testy odbyły się w Edynburgu oraz w Glasgow we wrześniu następnego roku. Niestety ograniczona energia elektryczna dostępna z baterii uniemożliwiła rozwój lokomotyw elektrycznych i ich zastosowanie.

Rok 1879 uważany jest za początek rozwoju trakcji elektrycznej. W tym właśnie roku Werner von Siemens zbudował i przedstawił na wystawie rzemieślniczej w Berlinie pierwszą elektryczną kolejkę – pociąg pasażerski. Kolejka Siemens'a była napędzana przez

silnik prądu stałego o mocy 2,2 kW, 150 V, a trasa w kształcie koła miała długość 270 m. Kolejka składała się z lokomotywy i trzech odkrytych wagonów, osiągała prędkość maksymalną 12 km/h – fot. 1. Źródłem energii było dynamo ulokowane w pobliżu torów, a energia elektryczna dostarczana była przez trzecią szynę znajdującą się pomiędzy szynami torów. W ciągu pierwszych czterech miesięcy kolejka ta przewiozła blisko 90 000 pasażerów. Silnik napędzający kolejkę był pierwszym sprawnie działającym silnikiem szeregowym prądu stałego. Ten pierwszy system trakcyjny stanowił udany eksperyment, w oparciu którego rozpoczęto budowę linii tramwajowych.

Pierwsza na świecie elektryczna linia tramwajowa została otwarta w miasteczku Groß-Lichterfelde pod Berlinem, w Niemczech w 1881 r. Zbudowana została przez Wernera von Siemens'a. Początkowo trasa miała służyć jedynie jako obiekt badań. Siemens chciał zbudować sieć linii elektrycznych w całym Berlinie, ale sceptycznie nastawiona rada miasta nie pozwalała mu tego zrobić aż do 1902 r.

Streszczenie: Rok 1879 uważany jest za początek rozwoju trakcji elektrycznej. W tym właśnie roku Werner von Siemens zbudował i przedstawił na wystawie rzemieślniczej w Berlinie pierwszy elektryczny pociąg pasażerski napędzany silnikiem prądu stałego zasilany z sieci trakcyjnej 600 V DC. Od tego czasu trakcja elektryczna ciągle się rozwija.

Kolejne etapy rozwoju układów napędowych lokomotyw i systemów zasilania to:

- napęd lokomotyw trójfazowymi silnikami indukcyjnymi pierścieniowymi zasilanymi bezpośrednio z sieci trójfazowej 3,3 kV, 16 2/3 Hz;
- napęd lokomotyw jednofazowymi silnikami prądu przemiennego zasilanymi poprzez jednofazowy transformator zabudowany w lokomotywie, sieć trakcyjna 1-fazowa 15 kV, 16 2/3 Hz;
- napęd lokomotyw silnikami szeregowymi prądu stałego, sieć trakcyjna 3 kV DC;
- napęd lokomotyw silnikami indukcyjnymi klatkowymi, sieć trakcyjna w zależności od kraju: 3 kV DC, 15 kV AC, 20 kV AC, 25 kV AC.

Najnowsze osiągnięcia trakcji elektrycznej to kolej magnetyczna.

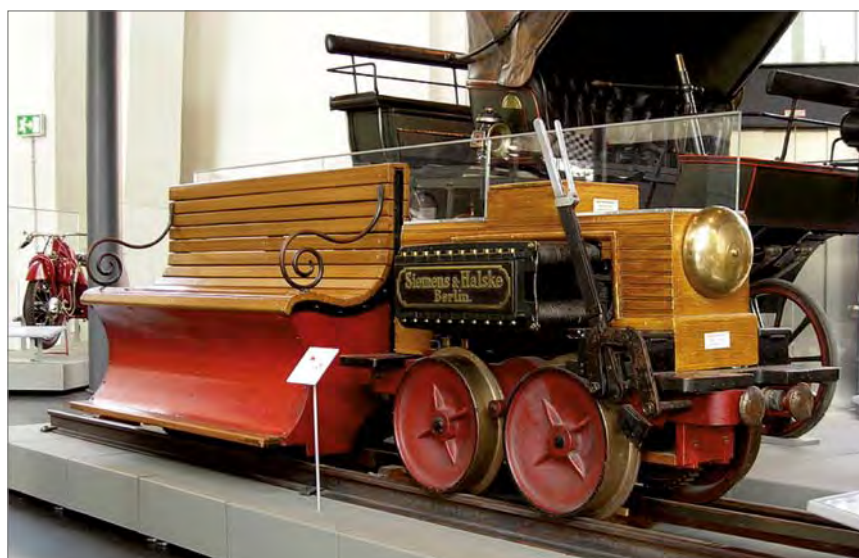
PAST AND PRESENT OF ELECTRIC TRACTION

Abstract: *The beginning of electric traction dates back to 1879. It was during Berlin Trades Exposition in 1879 that Werner von Siemens built and showed first passenger electric railway driven with direct current motor supplied from 600 V dc traction network. Since then electric traction has been undergoing continuous development.*

The successive stages of locomotive drive systems and supply systems evolution may be enumerated as follows:

- locomotive three-phase induction slip-ring motor drive, supplied directly from 3,3 kV, 16 2/3 Hz three-phase network;
- locomotive one-phase ac motor drive, supplied via one-phase transformer located in the locomotive, one-phase, 15 kV, 16 2/3 Hz traction network;
- locomotive dc series motors drive, 3 kV dc network;
- locomotive induction cage motor drive, traction network varies from country to country (3 kV dc, 15 kV ac, 20 kV ac, 25 kV ac).

The magnetic railway is the most current achievement in electric traction.



Fot. 1. Kolejka elektryczna z 1879 r. zbudowana przez Wernera von Siemens'a, dane znamionowe: 2,2 kW, 150 V DC, prędkość 12 km/h, masa 954 kg, siła 75 kN



reklama

Fot. 2. Pierwsza na świecie lokomotywa 3X3600 V AC, 15 Hz zaprojektowana przez Kálmána Kandó i zbudowana w firmie Ganz elektryfikowała kolej Valtellina we Włoszech

W ślad za Niemcami ruszyły inne kraje. W Wielkiej Brytanii kolej elektryczną Volka otwarto w 1883 r. w Brighton. W USA elektryczne wozy zostały zbudowane przez Franka J. Sprague w 1888 r. i wprowadzone na linii pasażerskiej Richmond – Union.

Rozwojowi trakcji elektrycznej sprzyjały tunele i metro w dużych miastach. Dym z parowozów był szkodliwy, więc gminy coraz częściej zabraniały ich stosowania. Pierwszą działającą elektryczną linią metra była South London Railway w Wielkiej Brytanii, otwarta dzięki klauzuli zakazującej użycia parowozów. Została ona otwarta w 1890 r. przy użyciu lokomotyw elektrycznych, zbudowanych przez firmę Mather & Platt. Pierwsza główna linia kolejowa Baltimore – Belt Line w USA, na odcinku czterech mil, została zelektryfikowana w 1895 r.

Pierwsze lokomotywy elektryczne były napędzane silnikami prądu stałego. Hiperboliczny kształt charakterystyki mechanicznej $M = f(n)$ silnika szeregowego prądu stałego predysponował go szczególnie do zastosowań trakcyjnych. Jednak z uwagi na ograniczone możliwości zasilania sieci trakcyjnej napięciem przekraczającym 600 V (lata 1890–1900) nie można było przy elektryfikacji linii kolejowych stosować rozwiązań sprawdzonych dla tramwajów, bowiem moce lokomotyw znacznie przekraczały moce tramwajów.

W 1888 r. Doliwo-Dobrowolski zbudował prądnicę synchroniczną 3-fazową, a rok później silnik indukcyjny klatkowy, powstały zatem warunki do rozwoju

trakcji elektrycznej kolejowej z napędem asynchronicznym. Pierwszy wykorzystał tę możliwość węgierski inżynier i wynalazca Kálmán Kandó w firmie Ganz w Budapeszcie w 1894 r. Uważany jest on za „ojca elektrycznych pociągów”. Włoska kolej była pierwszą na świecie, która wprowadziła trakcję elektryczną wg projektu Kálmána Kandó. Linia Valtellina o długości 106 km została otwarta 4 września 1902 r. Była to linia trójfazowa o parametrach – 3,6 kV, 15 Hz – fot. 2. W 1915 r. Kálmán Kandó sformułował zasadę, że trakcja elektryczna rozwinie się, jeżeli będzie zasilana energią elektryczną z sieci publicznych za pośrednictwem podstacji transformatorowych. Dalszemu rozwojowi trakcji elektrycznej z napędem asynchronicznym sprzyjało wynalezienie przetwornicy jednotwornikowej przetwarzającej prąd stały na trójfazowy prąd zmienny. W 1923 r. pierwsze lokomotywy z przetwornicą jednotwornikową zostały skonstruowane na Węgrzech na podstawie projektów Kandó i rozpoczęto ich produkcję seryjną. Sekcja Węgierskich Kolei Państwowych na odcinku Budapeszt – Hegyeshalom – Wiedeń (1929) została zbudowana w oparciu o ten wynalazek.

W okresie elektryfikacji kolei włoskiej wykonano badania dotyczące optymalnego wyboru zasilania trakcji. Testowano zasilanie o parametrach:

- 3,6 kV; 16,6 Hz, zasilanie trójfazowe;
- 1500 V DC;
- 3 kV DC;
- 10 kV AC; 50 Hz.



Fot. 3. Silnik indukcyjny STx 500-4A, 830 kW do napędu lokomotywy



Fot. 4. Silnik wzbudzany magnesami trwałymi z komutacją elektroniczną do napędu lokomotywy kopalnianej o mocy 60 kW



Fot. 5. Silnik STDa280-4B, 180 kW do napędu metra warszawskiego

Napięcie sieci trakcyjnej 3 kV DC uznano za najlepsze. Wykorzystanie tego systemu było możliwe dzięki opracowaniu silników szeregowych DC wysokiego napięcia 3000/2 V zasilanych poprzez rezystory rozruchowe z sieci 3 kV DC, a także dzięki podjęciu produkcji i wprowadzeniu na podstację trakcyjne wysokosprawnych prostowników rtęciowych umożliwiających zasilanie sieci trakcyjnej napięciem 3 kV, DC. Walory systemu zasilania 3 kV DC sprawiły, że z wyjątkiem Węgier wszystkie kraje, które przystępowały do elektryfikacji swoich linii kolejowych w latach 1915–1950 realizowały to przedsięwzięcie systemem prądu stałego 3 kV DC. W 1930 r. zasilanie 3 kV DC zostało wybrane w kolejach włoskich, a później także w Polsce. Powrócono zatem do napędów prądu stałego. Tramwaje i pociągi metra standardowo mają także trakcję prądu stałego o napięciu 600 V i 750 V i są napędzane silnikami szeregowymi prądu stałego. Napędy prądu stałego są powszechnie stosowane do lat 80. XX wieku przez wszystkie firmy budujące tabor trakcyjny.

Należy wspomnieć, że w latach 20. XX wieku Niemcy, Austria i kraje Skandynawskie przyjęły system trakcji kolejowej 15 kV, 16,6 Hz z napędem silnikami 1-fazowymi komutatorowymi o wzbudzeniu szeregowym. Po drugiej wojnie światowej sukcesywnie wymieniano go na zasilanie 15 kV, 50 Hz z silnikami napędowymi prądu stałego o wzbudzeniu szeregowym. Na lokomotywie był zainstalowany transformator i prostownik.

W latach 1950–1970 nastąpiła szybka elektryfikacja linii kolejowych na świecie, w tym w Europie i w Polsce. Konstrukcja i technologia lokomotyw elektrycznych stale się rozwijała. Milwaukee Road klasy PE-2 z 1918 r. ważył 240 t,

miał moc 3330 kW i osiągał prędkość 112 km/h. Wyprodukowany w 1935 r. niemiecki E 18 miał moc 2800 kW, ale ważył 108 t i osiągał prędkość maksymalną 150 km/h. W dniu 29 marca 1955 r. francuska lokomotywa CC 7107 osiągnęła prędkość 331 km/h. W 1960 r. lokomotywy SJ klasy Dm produkowane przez ASEA w Szwecji miały moc 7200 kW. W tym samym okresie koleje niemieckie i francuskie zostały wyposażone w lokomotywy do przewozów pasażerskich z prędkością do 200 km/h.

Do lat 80. XX wieku podstawowym napędem były silniki prądu stałego o wzbudzeniu szeregowym. Rozwój energoelektroniki i falowników stworzył warunki do powrotu napędów asynchronicznych. Silniki indukcyjne klatkowe zasilane z falowników zaczęto wprowadzać najpierw w tramwajach, a następnie w lokomotywach i zespołach trakcyjnych. W dniu 2 września 2006 r. standardowa lokomotywa Siemens Eurosprinter typu ES64-U4 z napędem asynchronicznym osiągnęła prędkość 357 km/h. Jest to rekord dla lokomotywy ciągnącej pociąg z wagonami.

pozytywne wyniki prób i doświadczeń przeprowadzonych przez inżynierów francuskich po II wojnie światowej na linii Hollentalbahn oraz na własnych liniach zelektryfikowanych napięciem 20 kV, 50 Hz (1951 r.), a później

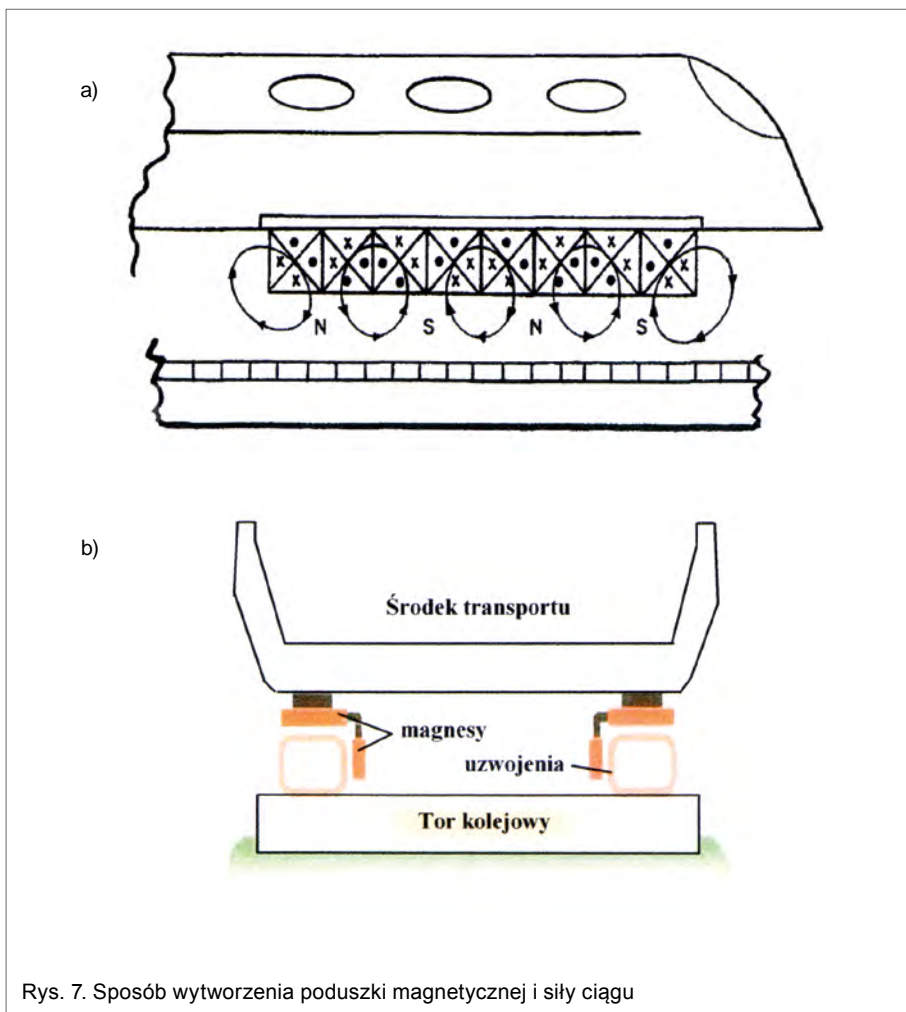
25 kV, 50 Hz pozwoliły stwierdzić, że ten system trakcji prądu przemiennego dla tranzytowych linii kolejowych i dużych prędkości jest najbardziej efektywny.

Trakcja elektryczna w Polsce

Na ziemiach polskich pierwszy tramwaj wprowadzono w Poznaniu w 1887 r., w Bydgoszczy w 1888 r., w 1898 r. w Grudziądzu, Łodzi i Wałbrzychu, a w 1908 r. w Warszawie [1]. Kolejowa trakcja elektryczna w rejonie warszawskim została otwarta w 1936 r. i tę datę uważa się za początek trakcji elektrycznej w Pol-



Fot. 6. Kolej magnetyczna w Szanghaju



reklama

Rys. 7. Sposób wytworzenia poduszki magnetycznej i siły ciągu

sce. Linie tranzytowe elektryfikowano po wojnie w latach 50. i 60. ubiegłego wieku. Łącznie w Polsce zelektryfikowano ponad 20 tys. kilometrów linii kolejowych, na 26 tys. kilometrów wszystkich linii. Napięcie sieci trakcyjnej wynosi 3 kV DC. W Polsce do 1990 r. produkowano: lokomotywy, wagony, zespoły trakcyjne, tramwaje, lokomotywy kopalniane (Pafawag, Cegielski, Konstal). Obecnie Zakłady Remontowe Lokomotyw Elektrycznych w Gliwicach podjęły się budowy nowoczesnej lokomotywy o mocy 5 MW, która przechodzi badania eksploatacyjne. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych (BOBRME) Komel opracował dla tej lokomotywy silnik napędowy. Jest to silnik indukcyjny o mocy 830 kW. W lokomotywie jest zainstalowanych sześć silników. Silniki wyprodukował Zakład Maszyn Elektrycznych EMIT SA w Żychlinie – fot. 3. Przekształtniki do zasilania tych silników wraz z systemem sterowania i diagnostyki oraz przetwornicę statyczną do zasilania napędów i obwodów pomocniczych opracował i zbudował Instytut Elektrotechniki w Warszawie.

Silnik do napędu lokomotywy kopalnianej wzbudzany magnesami trwałymi z komutacją elektroniczną opracował i wyprodukował BOBRME Komel – fot. 4. Komutator energoelektroniczny opracowała i wyprodukowała firma ENEL w Gliwicach. Lokomotywę wyprodukował Instytut Techniki Górniczej KOMAG w Gliwicach.

BOBRME Komel opracował projekt silnika indukcyjnego klatkowego bezkątowego o mocy 180 kW zasilanego z falownika do napędu zespołu trakcyjnego metra typu METROPOLIS – fot. 5. Silnik produkuje ZME EMIT.

Rozwój trakcji elektrycznej

Linie trakcyjne dużych prędkości bazują na systemie 25 kV, 50 Hz. W latach 1980–1990 rozwój bardzo szybkiej kolei przyniósł ożywienie elektryfikacji. Japoński Shinkansen i francuski TGV były pierwszymi systemami, dla których linie dużych prędkości budowano od podstaw. Podobne programy zostały podjęte we Włoszech, Niemczech i Hiszpanii. Przykładem jest linia trakcyjna Paryż–Marsy-

lia, na której maksymalna prędkość jazdy pociągów wynosi 350 km/h. Planowana także linia Paryż–Moskwa będzie mieć sieć trakcyjną 25 kV, 50 Hz.

Nowa generacja kolei to kolej magnetyczna. Kolej magnetyczna (zwana czasem Maglev z ang. *magnetic levitation* – lewitacja magnetyczna), jest to kolej, w której tradycyjne torowisko zostało zastąpione przez układ elektromagnesów. Dzięki polu magnetycznemu kolej ta nie ma kontaktu z powierzchnią toru, gdyż cały czas unosi się nad nim. Do realizacji tego zadania wykorzystuje się elektromagnesy wykonane z nadprzewodników (w Japonii) lub magnesy trwałe (w Niemczech). Pojazdy mogą przez to rozwijać duże prędkości. Dzięki zastosowaniu poduszki magnetycznej eliminowane jest tarcie kół, które w tradycyjnych pociągach znacznie ogranicza maksymalną prędkość jazdy. Dzięki temu maglevy zbliżają się do 600 km/h (rekord świata w prędkości magleva należący do jego japońskiej wersji, a wynoszący 581 km/h

został osiągnięty 2 grudnia 2003 r. i jest o 6 km/h większy od rekordu TGV). Linie kolei magnetycznej istnieją w Japonii, Niemczech i Chinach.

Wnioski

Historia rozwoju trakcji elektrycznej ma już ponad 120 lat. W ciągu całego tego okresu występuje ciągły rozwój tak zasilania trakcji energią elektryczną, jak i lokomotyw, zespołów trakcyjnych i tramwajów, pociągów metra, lokomotyw przemysłowych. Z punktu widzenia napędów elektrycznych to na początku stosowano silniki prądu stałego, następnie silniki indukcyjne, silniki komutatorowe prądu zmiennego, ponownie silniki prądu stałego i obecnie silniki indukcyjne klatkowe. Rozwój napędów elektrycznych pojazdów trakcyjnych nie jest sprawą zamkniętą, należy przypuszczać, że trakcja elektryczna w rozwiązaniu klasycznym będzie wykorzystywać silniki elektryczne o najwyższej sprawności, to

jest maszyny synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi z komutacją elektroniczną.

Trakcja elektryczna przyszłości to pojazdy na poduszkach magnetycznych.

Literatura

- [1] PRACA ZBIOROWA: *Warszawskie tramwaje elektryczne*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 1998.
- [2] PLEWAKO ST.: *Podstawy trakcji elektrycznej*. Wydawnictwo Komunikacyjne, Warszawa 1955.
- [3] CHRABĄSZCZ I., PRUSAK J., DRAPIK SŁ.: *Trakcja prądu stałego*. Układy zasilania, 2009.

prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka –
Instytut Elektrotechniki i Informatyki,
Wydział Elektryczny,
Politechnika Śląska w Gliwicach