

Od tramwaju do elektromobilności – 140 lat rozwoju i 100 lat nauczania trakcji elektrycznej w Politechnice Warszawskiej

Abstract. The article presents history and perspectives of development modern electric traction. Current state and opportunities and prognosis for electrified transport taking into account electromobility policy in Poland and the World is discussed. Due to 100 anniversary of didactic of electric traction at Warsaw University of Technology role of Electrical Engineering Faculty in teaching and research on electric traction is presented.

Streszczenie. W artykule przedstawiono historię a także perspektywy rozwojowe współczesnej trakcji elektrycznej. Przedstawiono stan obecny i możliwości oraz prognozy dla transportu zelektryfikowanego ze szczególnym uwzględnieniem polityki elektromobilności w Polsce i świecie. W związku ze stuleciem nauczania trakcji elektrycznej w Politechnice Warszawskiej omówiono wkład Wydziału Elektrycznego w kształcenie oraz badania naukowe i wdrożenia z zakresu trakcji elektrycznej. (*History and perspectives of development modern electric traction in Warsaw University of Technology*)

Keywords: electric traction electric vehicles, traction power supply, e-mobility.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, pojazdy elektryczne, zasilanie trakcji elektrycznej, e-mobilność.

Wprowadzenie

Działalność transportowa, w wyniku której powstaje usługa transportowa (przewiezienie osób/towarów w określonym czasie z miejsca A do miejsca B), choć nie powoduje w sposób bezpośredni powstania produktu materialnego (ale pozwala na jego zaistnienie, wzrost wartości i wymianę) to umożliwia funkcjonowanie i rozwój społeczeństw, a wynalezienie koła, kolei, samochodu i samolotu zdecydowało o poziomie rozwoju, na którym się znajdujemy. To powoduje, że transport bywa nazywany 'krwiobiegiem gospodarki'.

Przez napęd rozumie się zwykle doprowadzanie energii mechanicznej, uzyskiwanej z różnego rodzaju silników, do maszyny roboczej. Jeśli silniki są zasilane energią elektryczną, mówi się o napędzie elektrycznym, jeśli maszyną roboczą jest pojazd poruszający się po określonym torowisku, mówi się o elektrycznym napędzie trakcyjnym. Maszynami roboczymi mogą być kołowe pojazdy szynowe stosowane w ruchu kolejowym, miejskim i przemysłowym lub pojazdy poruszające się na poduszce magnetycznej lub powietrznej. Energia elektryczna doprowadzana do silników może być wytwarzana w pojeździe (zasilanie autonomiczne) lub dostarczana z układu zasilania, tj. zespołu podstacji trakcyjnych przez sieć napowietrzną (zasilanie sieciowe) lub sieć dolną, budowaną w postaci tzw. trzeciej szyny.

Przy zasilaniu autonomicznym wykorzystuje się głównie wysokoprężne silniki spalinowe, sprzęgnięte z prądnicą prądu stałego lub przemiennego, natomiast w pojazdach zasilanych sieciowo - napięcie stałe lub przemiennie jednofazowe. Projektowane są także pojazdy, zwłaszcza mniejszej mocy jak pojazdy samochodowe, wykorzystujące akumulatory czy niekonwencjonalne źródła energii (np. ogniwa paliwowe). Duża różnorodność sposobów zasilania, możliwości zastosowania różnych typów silników utrudnia szczegółową systematykę układów napędowych pojazdów. Można twierdzić, że do napędu pojazdów możliwe jest stosowanie dowolnego silnika elektrycznego zasilanego z dowolnego źródła energii. Kryterium wyboru określonego rozwiązania stanowią koszty, sprawność i niezawodność układu.

Istotnym elementem każdego układu napędowego jest przekształtnik przetwarzający energię elektryczną, dostarczaną ze źródła zasilania, do postaci dogodnej do zasilania silników. Zadaniem przekształtnika, łącznie z odpowiednim układem regulacyjnym, jest takie zasilanie silnika, aby pojazd posiadał wymagane, z ruchowego

punktu widzenia charakterystyki trakcyjne. Charakterystyki te określają zmiany siły pociągowej w funkcji prędkości jazdy.

Rys historyczny

Wiek XIX był złotym wiekiem kolei, która rozwijała się intensywnie, dzięki skonstruowaniu i wykorzystaniu, najpierw do celu transportu kopalnianego, pojazdów na metalowych kołach poruszających się po metalowych szynach. Ślady historyczne wskazują także na wcześniejsze próby z podobnymi pojazdami. Rozwój kolei osiągnął swój szczyt na początku XX wieku, gdy lokomotywy parowe osiągały prędkości powyżej 200 km/h (213 km/h w Niemczech w 1903 r.). Dalszy rozwój kolei stał się możliwy dzięki szybkiemu rozwojowi trakcji elektrycznej, ale w XX wieku, po udoskonaleniu silnika spalinowego, kolej stanęła wobec silnej konkurencji ze strony transportu drogowego i lotniczego. Spowodowało to w drugiej połowie XX wieku wypieranie naziemnego transportu szynowego z miast (likwidacja linii tramwajowych) na rzecz autobusów i transportu indywidualnego, a rozbudowa sieci dróg i lotnisk spowodowała spadek znaczenia kolei w transporcie pasażerskim na duże odległości. W Europie w przewozach pasażerskich nastąpił spadek udziału transportu szynowego z 10% w 1970 r. do 6% w 2000 r., a towarowych w tym samym okresie z 21% do 8%. Zatlóczenie dróg i zanieczyszczenie środowiska oraz trudności z dostępem i wzrost cen ropy naftowej na nowo zwiększyło zainteresowanie trakcją elektryczną, obserwowane już w latach 70-tych XX wieku.

Historycznie, pierwszym elektrycznym pojazdem trakcyjnym, zasilanym z zewnętrznego źródła energii była zbudowana przez Wernera Siemens'a lokomotywa o mocy 2.5 kW, zaprezentowana 31 maja 1879 r. na międzynarodowej wystawie w Berlinie¹. Lokomotywa ta, była zasilana napięciem stałym 150 V. Mimo małej mocy, posiadała ona wszystkie elementy konwencjonalnego pojazdu trakcyjnego, a więc układ zasilający przekształtnik zbudowany w postaci układu oporników o zmiennej rezystancji oraz silnik prądu stałego. Trasa kolejki miała około 300 m, zaś ciągniony pociąg składał się z 3 wagoników. Pojazd osiągał maksymalną prędkość 12 km/h². Zainteresowanie nowym typem pojazdu było tak duże, że w 1881 r. został zbudowany pierwszy elektryczny

¹ Data ta jest uważana za początek trakcji elektrycznej

tramwaj (W. Siemens) zasilany z linii napowietrznej o napięciu 500 V. Prawie jednocześnie zastosowano silniki elektryczne (1881 r.) do napędu pojazdu samochodowego². Źródłem energii elektrycznej była bateria akumulatorów. W rok później firma Siemens zbudowała pierwszy pojazd drogowy zasilany z sieci napowietrznej. Rozwiązanie to było pierwowzorem dzisiejszego trolejbusu³.

Z chwilą pojawienia się pierwszych instalacji napięcia przemiennego rozpoczęto próby z zastosowaniem zasilania pojazdów z sieci prądu przemiennego jednofazowego⁴. Zastosowanie trójfazowej sieci prądu przemiennego, mimo pewnych prób, napotykało jednak na istotne kłopoty związane z doprowadzaniem energii elektrycznej, głównie z powodu złej współpracy odbieraków prądu z zawieszonymi wzdłuż toru przewodami jezdniowymi i trudnościami w konstrukcji sieci na skrzyżowaniach i rozjazdach.

Do zasilania pojazdów z jednofazowej sieci prądu przemiennego wykorzystywano napięcie o częstotliwości obniżonej 16,7 Hz lub 25 Hz. Wynikało to z trudności w komutacji prądu stosowanych maszyn komutatorowych jednofazowych⁵. Prowadzono także próby z zastosowaniem silników trójfazowych zasilanych przez przetwornicę z sieci jednofazowej⁶. Próby te nie doprowadziły jednak do rozwiązań stosowanych w praktyce, ze względu na stosowanie ciężkich maszyn wirujących o mocy zbliżonej do mocy silników napędowych. Należy tu zauważyć na wczesne zainteresowanie trójfazowymi maszynami prądu przemiennego. Praktyczne zastosowanie ich do napędu pojazdów było jednak ograniczone możliwościami budowy układów przetwarzających napięcie stałe lub przemiennie jednofazowe na napięcie trójfazowe o regulowanej częstotliwości i amplitudzie. Było to możliwe po pojawieniu się pierwszych sterowanych elementów półprzewodnikowych dużej mocy. Postęp w budowie i rozwoju silników spalinowych spowodował próby stosowania ich do napędu pojazdów szynowych. Pierwsze próby napędu bezpośredniego, za pomocą przekładni mechanicznej wiążącej wał silnika z kołami, nie zdały egzaminu. Było to wynikiem znacznych przenoszonych mocy a zatem i znacznych, utrudniających jazdę, mas przekładni mechanicznej. Zastosowanie przekładni elektrycznej i hydraulicznej⁷ pozwoliło na szybki rozwój lokomotyw z silnikiem spalinowym. Przekładnie tego typu, zwłaszcza przekładnie elektryczne są stosowane obecnie w pojazdach samochodowych o bardzo dużej ładowności. Oprócz pojawiających się nowych rozwiązań pojazdów, rozwijała się elektryfikacja linii kolejowych. Pojazdy elektryczne wykorzystywano do przewozu osób i ładunków.

² Pierwszym pojazdem kołowym napędzanym przez silnik elektryczny była lokomotywa skonstruowana w 1838 r. przez Roberta Andersona w Aberdeen (Szkocja). W tym samym roku Thomas Davenport zbudował w Bardonia (USA) mały pojazd napędzany silnikiem elektrycznym zasilanym z baterii galwanicznej.

³ Linia trolejbusowa w Spandau pod Berlinem

⁴ 1892 r. - pierwsze próby z silnikami prądu przemiennego do napędu tramwaju w Lugano (Szwajcaria), 1897 r. - pierwsza lokomotywa prądu przemiennego (linia Burgdorf - Thum, Szwajcaria).

⁵ 1903 r. - pierwsze próby z silnikiem jednofazowym prądu przemiennego na linii Berlin - Niederschoneweide - Spindlerfeld (6 kV, 25 Hz), 1905 r. - oddana linia kolejowa Murnau - Oberammergau, z silnikami jednofazowymi 5,5 kV, 16,7 Hz.

⁶ próby z zastosowaniem układów przekształcających napięcia jednofazowe na trójfazowe prowadził węgierski inżynier K. Kando,

⁷ stosowane są różne typy przekładni hydraulicznej: hydrostatyczna, hydrodynamiczna, hydromechaniczna.

Podstawową przyczyną rozwoju elektryfikacji była znacznie większa sprawność tego typu trakcji. Mniejsze były też koszty utrzymania taboru. Wzrost pracy przewozowej (liczonej jako iloczyn przewożonej masy i drogi przewozu ładunku) zmuszał do zwiększenia prędkości jazdy, a zatem i mocy pojazdów. Warunek zapewnienia odpowiedniego bezpieczeństwa jazdy wymagał stosowania automatycznego sterowania jazdą, co doprowadziło do budowy układów przenoszenia sygnałów o stanie drogi kolejowej do układu sterowania układem napędowym i pozwoliło na całkowitą automatyzację procesu jazdy. Budowane układy przekształcania energii wymagały dość złożonych systemów sterowania i kontroli pracy przekształtników i maszyn trakcyjnych. Doprowadziło to do stosowania technik komputerowych w systemach sterowania układami napędowymi pojazdów i diagnostyki układów elektrycznych pojazdów. Prowadzone równoległe prace nad mechaniczną konstrukcją pojazdu, a zwłaszcza częścią biegową, doprowadziły do zwiększenia prędkości pojazdów i zapewnienia wysokiego komfortu jazdy. Obecne kolejowe pojazdy szynowe są obiektami technicznymi o złożonych układach mechanicznych, elektrycznych, elektronicznych i pneumatycznych, rozwijającymi duże prędkości maksymalne. Budowane są pojazdy uzyskujące, w warunkach ruchu pasażerskiego, prędkości 250 - 380 km/h oraz do 160 km/h w ruchu towarowym.

Podobny rozwój nastąpił w budowie tramwajów, trolejbusów i wagonów metra. Oprócz zwiększania maksymalnej prędkości jazdy i przyspieszenia rozruchu, co jest związane ze wzrostem mocy układu napędowego i zmniejszaniem masy pojazdu, konstruktorzy elektrycznych pojazdów komunikacji miejskiej położyli główny nacisk na funkcjonalność nowych rozwiązań a zwłaszcza na znaczne zmniejszenie wysokości podłogi nad poziomem jezdni. Doprowadziło to z kolei do zmiany koncepcji napędu wagonów, rezygnacji z klasycznych wózków z silnikami i stosowania silników trakcyjnych montowanych w kołach wagonów. Opracowywane są również koncepcje nowych, niekonwencjonalnych pojazdów o bardzo dużych prędkościach jazdy, poruszających się po wydzielonych, zwykle umieszczonych na estakadach, torowiskach. Pojazdy te są napędzane przy wykorzystaniu silników liniowych i unoszone nad torowiskiem za pomocą „poduszek magnetycznych”.

Oto ważniejsze daty i wydarzenia związane z rozwojem elektrycznych pojazdów trakcyjnych i ich układów napędowych:

- 1879 r. - pierwsza lokomotywa elektryczna,
- 1881 r. - pierwszy tramwaj elektryczny na linii Berlin - Lichterfelde,
- 1882 r. - pierwsza lokomotywa kopalniana zasilana z sieci dwuprzewodowej,
- 1892 r. - pierwsze próby z silnikami prądu przemiennego dla napędu tramwaju w Lugano,
- 1895 r. - pierwsza lokomotywa pasażerska prądu stałego na linii Baltimore - Ohio w USA,
- 1897 r. - pierwsza lokomotywa prądu przemiennego na linii Burgdorf - Thum w Szwajcarii,
- 1903 r. - pierwszy notowany rekord prędkości (210 km/h¹) - elektryczny zespół trakcyjny z silnikami prądu przemiennego na linii Marienfelde - Zossen),
- 1904 r. - próby z silnikami jednofazowymi prądu przemiennego 50 Hz zasilanymi przez prostownik, (Szwajcaria),
- 1917 r. - pierwsze lokomotywy z silnikami trójfazowymi zasilanymi z jednofazowej sieci prądu przemiennego i przetwornicą wirującą,

- 1928 r. - pierwszy pojazd z prostownikiem ręciovym wieloanodowym,
- 1949 r. - zastosowanie prostowników jednofazowych w pojazdach trakcyjnych,
- 1955 r. - rekord prędkości pojazdu szynowego - 331 km/h uzyskany przez spalinową lokomotywę francuską,
- 1957 r. - pierwsze próby z zastosowaniem prostowników krzemowych w pojazdach zasilanych z sieci prądu przemiennego,
- 1994 r. - 250,1 km/h - pendolino na CMK w Polsce,
- 2007 r. - rekord prędkości 574,1 km/h AGV, Francja,
- 2014 r. - 293 km/h pendolino na CMK,
- 2015 r. - 603 km/h – maglev, tor testowy, Japonia.

Przedstawione wydarzenia wskazują na dość wczesne zainteresowanie układami napędowymi pojazdów z zastosowaniem asynchronicznych silników prądu przemiennego. Istotny rozwój tych układów napędowych rozpoczął się po roku 1970 kiedy to opracowano pierwszą lokomotywę z asynchronicznymi silnikami prądu trójfazowego (lokomotywa DB120 eksploatowana przez koleje niemieckie). Podstawowym warunkiem bezpiecznej pracy pojazdów są niezawodne układy hamowania. Z tego powodu stosowane są zwykle dwa lub trzy niezależne systemy hamowania. Jest to wyraźnie widoczne w pojazdach transportu miejskiego, gdzie stosowane są hamulce: elektrodynamiczny, wykorzystujący prądnicową pracę silników trakcyjnych, mechaniczny współpracujący z hamulcem elektrycznym przy małych prędkościach oraz hamulec szynowy stosowany do hamowania awaryjnego. W pojazdach kolejowych stosowane są hamulce mechaniczne (pneumatyczne) współpracujące z układami hamowania elektrycznego.

W pojazdach zasilanych z sieci trakcyjnej regulacja prędkości kątowej i momentu obrotowego silników jest realizowana w układach przekształcania energii, budowanych w postaci układów stycznikowo-opornikowych lub jako układów półprzewodnikowych przekształtników statycznych. Są to zwykle przerywacze prądu stałego, prostowniki lub falowniki napięcia lub prądu.

W pojazdach spalinowo-elektrycznych, ze względu na niedogodne z punktu widzenia charakterystyki silnika spalinowego, konieczne jest stosowanie tzw. przekładni głównej. Przekładnie te budowane są jako przekładnie mechaniczne o zmiennym przełożeniu (dla małych mocy pojazdów), a zwłaszcza jako przekładnie hydrauliczne, hydromechaniczne, elektromechaniczne, elektrohydrauliczne, a najczęściej jako przekładnie elektryczne. W przekładni elektrycznej silnik spalinowy napędza prądnicę prądu stałego lub przemiennego zasilającą elektryczne silniki trakcyjne. Regulacja momentu obrotowego napędzającego osie pojazdu, jest prowadzona w prądnicę. Podstawowym zagadnieniem jest dopasowanie charakterystyki prądnicę do charakterystyk silnika spalinowego.

W pojazdach zasilanych z baterii akumulatorowych regulację prędkości prowadzi się najczęściej za pomocą półprzewodnikowych przekształtników, przy czym jednym z podstawowych warunków poprawnej pracy takich układów jest stosowanie hamowania odzyskowego zwiększającego okres jazdy między ładowaniem baterii akumulatorów.

Pojęcie „system traktacji elektrycznej” odnosi się zwykle do taboru trakcyjnego oraz stosowanego układu zasilania i określa rodzaj energii elektrycznej doprowadzanej do taboru trakcyjny. Obecnie są znane i eksploatowane następujące systemy zasilania:

- system prądu przemiennego 15 kV, 16,7 Hz,
- system prądu przemiennego 25 kV, 50 Hz,

- system prądu stałego o napięciach: 600 V, 750 V, 800 V, 1500 V, 3000 V.

Zastosowanie wyższego napięcia umożliwia znaczne zmniejszenie wartości prądu pobieranego przez pojazdy i spadków napięcia w sieci trakcyjnej, co z kolei pozwala na zwiększenie odległości między podstacjami trakcyjnymi. Innym sposobem zmniejszenia spadków napięć jest powiększanie przekroju sieci trakcyjnej. Prowadzi to z kolei do zwiększenia masy przewodów sieci trakcyjnej.

Transport elektryczny – stan istniejący

Pojazdy elektryczne we współczesnym świecie stanowią podstawę w systemach lądowego transportu zbiorowego, ale także coraz częściej i indywidualnego (choć przecież pierwsze samochody elektryczne pojawiły się przed wynalezieniem silnika spalinowego), a rola zelektryfikowanego transportu jest nie do przecenienia. Ze względu na dużą liczbę wykorzystywanych rozwiązań i systemów w transporcie zelektryfikowanym w zależności od rodzaju trasy i pojazdów stosujemy podział na:

- transport drogowy (trolejbusy, samochody osobowe i dostawcze, autobusy),
- transport szynowy (koleje naziemne, miejska kolej podziemna – metro, lekki transport szynowy, tramwaj, koleje przemysłowe),
- niekonwencjonalne systemy transportu (kolej magnetyczna, kolej podwieszana, systemy zautomatyzowanego transportu na dedykowanych trasach, transport przemysłowy).

Po znaczącym spadku udziału transportu kolejowego w przewozach lądowych w latach poprzednich, szczególnie w transporcie pasażerskim, obecnie nastąpił jego wzrost. I tak w 2016 r. (dane statystyczne źródło – EUROSTAT) udział przewozów kolejowych (mierzony w pasażerokilometrach) w krajach europejskich był zróżnicowany w zależności od kraju i wynosił w Polsce ok. 7%, (wartość zbliżona do średniej EU-28), ponad 10% w Holandii czy Austrii, do 20% w Szwajcarii. W przewozach towarowych udział (liczonych w tonokilometrach) wynosił w 2017 r. (przy średniej na poziomie 5% dla EU-28) od ułamka procenta w Irlandii do ponad 60 % na Litwie i ponad 70% na Łotwie ze względu na duży udział przewozów tranzytowych do Rosji, w Polsce wynosił ponad 20%). Aktualnie wdrażane są ustalenia DYREKTYWY PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2012/34/UE z dnia 21 listopada 2012 r. w sprawie utworzenia jednolitego europejskiego obszaru kolejowego, której celem jest wyeliminowanie barier utrudniających osiągnięcie jednolitego europejskiego obszaru kolejowego. Służąc temu mają zmiany o charakterze rynkowym (rozporządzenia o otwarciu rynku krajowych usług kolejowego transportu pasażerskiego do dyrektywy ustanawiającej jednolity europejski obszar kolejowy) oraz technicznym (zmiana: rozporządzenia o Europejskiej Agencji Kolejowej, dyrektywy o interoperacyjności systemu kolejowego w UE oraz dyrektywy o bezpieczeństwie kolei). W odniesieniu do podsystemu infrastruktury energetycznej istotne są:

- DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej
- ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) nr 1301/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności (TSI) podsystemu „Energia” kolei w Unii,
- ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności (TSI) podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej.

Zalety szynowego transportu elektrycznego

Istotnymi i niekwestionowanymi zaletami transportu szynowego są:

- wyższe bezpieczeństwo,
- mniejsza zajętość terenu, transport szynowy wymaga (przy porównywalnych przewozach) zajęcia mniejszej powierzchni na torowisko niż transport drogowy (ok. 3 razy), a ze względu na prowadzenie ruchu na wydzielonych torach zapewnia jazdę bardziej regularną i niezależną od transportu drogowego uzależnionego od zatorów i zakłóceń ruchowych – mniejsza wrażliwość na warunki atmosferyczne, gdyż pojazdy elektryczne są mniej podatne na zakłócenia pochodzące od warunków pogodowych (temperatura, opady, mgła),
- transport zelektryfikowany odciąża zatłoczone drogi, gdyż przeniesienie ruchu z dróg, po których porusza się ciągle zwiększająca się liczba samochodów, na szyny, co pozwoliłoby zmniejszyć obciążenie dróg oraz związane z tym straty czasu i wypadkowość. Budowa nowych autostrad nie rozwiązuje bowiem problemu wjazdu do centrów miast, a transport szynowy dowozi pasażerów do dworców, które zwykle umiejscowione są w centrach miast.

Z punktu widzenia technicznego zastosowanie silnika elektrycznego pozwala na uzyskanie lepszych parametrów pojazdów z napędem elektrycznym w porównaniu do pojazdów z silnikiem spalinowym gdyż:

- maszyna elektryczna może być krótkotrwale przeciążona (tj. uzyskujemy większą moc niż moc znamionowa), pozwala to na uzyskiwanie większej siły napędu w okresie np. rozruchu, stopień i czas trwania przeciążenia zależy od możliwości chłodzenia, tej właściwości nie ma silnik spalinowy,
- maszyna elektryczna może pracować odwracalnie, tj. albo jako silnik napędzający pojazd (przetwarzanie energii elektrycznej w mechaniczną) lub jako generator (przetwarzanie energii mechanicznej w elektryczną przy hamowaniu), co pozwala na odzysk energii (hamowanie rekuperacyjne) i zmniejszenie jej zużycia, pod warunkiem, że znajdzie się odbiornik tej energii w trakcie hamowania. W efekcie daje to także mniejsze zużycie hamulców mechanicznych oraz zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska,
- napęd elektryczny pozwala na łatwe stosowanie wielosilnikowego napędu rozłożonego (większa liczba osi napędnych z silnikami o mniejszej mocy) i sterowanie ukrotnione w zespołach trakcyjnych (zestawach kilku wagonów z napędem),
- trwałość napędów elektrycznych jest wielokrotnie większa niż napędów spalinowych.

Trakcja elektryczna sieciowa umożliwia także, dzięki dostawie energii z zewnętrznej sieci zasilającej i dużym mocom silników, uzyskiwanie większych prędkości (rekord: 574 km/h w 2008 r. – pociąg AGV we Francji, a w ruchu regularnym 380 km/h w Chinach) niż trakcja spalinowa (maksymalne prędkości powyżej 200 km/h) oraz zapewnieniu wyższego komfortu jazdy poprzez stosowanie w pociągu szeregu dodatkowych urządzeń wymagających zasilania, jak np. klimatyzacja (nie występuje ograniczenie mocy ze względu na moc znamionową silnika cieplnego napędzającego generator wytwarzający energię elektryczną). Czy to oznacza, że transport zelektryfikowany ma same zalety? Na pewno ma więcej zalet niż inne środki transportu, ale występują też pewne zjawiska negatywne:

- hałas, porównywalny lub większy niż w przypadku ruchu drogowego (szczególnie w ruchu towarowym i szybkich kolejach),

- konieczność budowy torowisk i uzależnienie od infrastruktury (system zasilania, sterowania, sygnalizacji),
- niższa sprawność, szczególnie przy przesyłach i wielokrotnym przetwarzaniu energii elektrycznej.

Trakcja elektryczna ciągle konkurencyjna

W tej chwili istotnym uzasadnieniem dla budowy nowych linii zelektryfikowanego transportu są:

- wysokie koszty zewnętrzne transportu drogowego w miastach,
- brak możliwości uzyskania odpowiedniej zdolności przewozowej transportu drogowego (liczba pasażerów i prędkość podróży),
- efektywne konkurencyjne z transportem lotniczym (linie kolei dużej prędkości w relacjach międzymiastowych na odległości do 1000 km).

Przez lata napędy trakcyjne były rozwijane dzięki rozwojowi nowych technologii, w szczególności energoelektroniki. Współczesne pojazdy trakcyjne muszą spełniać szereg wymagań dotyczących energooszczędności, ekologii, zużycia materiałów, ergonomii oraz komfortu podróży i personelu, a także parametrów eksploatacyjnych takich jak: wysoka niezawodność, podatność serwisowa i bezpieczeństwo, co związane jest ze stosowaniem systemów diagnostyki, rezerwowania kluczowych podsystemów i elementów. Dlatego współczesne elektryczne pojazdy trakcyjne to złożone obiekty techniczne wyposażone w najnowsze osiągnięcia elektromechaniki, elektroniki, informatyki i pneumatyki, szczególnie gdy osiągają duże prędkości jazdy sięgające 400 km/h w regularnym ruchu.

Elektromobilność - nowy etap rozwoju drogowej trakcji elektrycznej

W dniu 11 grudnia 2019 r. przewodnicząca KE Ursula von der Leyen zwróciła się do PE o zatwierdzenie *Zielonego Ładu* - planu zakładającego osiągnięcie przez Unię Europejską neutralności klimatycznej do 2050 roku. W ciągu 100 dni KE miała przedstawić pierwsze europejskie prawo klimatyczne, niestety pandemia COVID-19 zaburzyła te plany. Transport ma przejść duże zmiany w celu ograniczenia emisji gazów cieplarnianych o 90 procent. Rozwój gospodarczy i wzrost zamożności społeczeństw zwiększa zapotrzebowanie na usługi transportowe. Zelektryfikowany transport szynowy stosowany powszechnie w przewozach masowych ograniczony jest przebiegiem linii, co zmniejsza jego dostępność w przewozach, szczególnie pasażerskich i powoduje, że jest mniej konkurencyjny wobec bardziej dostępnego, ze względu na rozbudowaną sieć dróg, transportu kołowego. Stąd gwałtowny wzrost liczby pojazdów samochodowych w świecie: od 700 mln sztuk w 1998 r. do ponad 1 mld w 2012 r. przy szacowanej liczbie 2 mld w 2050 r. i związany z tym wzrost zużycia energii (90% energii zużywanej w transporcie pochłania transport drogowy, w tym samochody ok. 65%) [1, 2]. Stąd od lat próbuje się narzucić ostre wymagania wobec środków transportu, w celu uzyskania polityki zrównoważonego rozwoju. Zgodnie z „White Paper: European transport policy for 2010: time to decide” EC 2001” transport powinien:

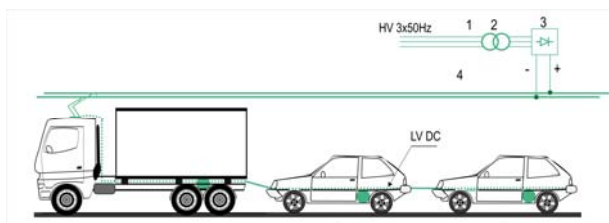
- zapewniać bezpieczną usługę bez wprowadzania zagrożeń dla zdrowia czy środowiska obecnych i następnych generacji,
- być efektywny i oferować możliwości wyboru środków transportowych aby utrzymać poziom rozwoju gospodarki lokalnie i globalnie,

- ograniczać emisję i odpady w taki sposób, aby były one możliwe do zaabsorbowania przez środowisko, wykorzystywać odnawialne źródła energii, minimalizować hałas i zajętość terenu.

Szczególnie istotna wydaje się tu DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2014/94/EU i KE z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury dla paliw alternatywnych. W praktyce powyższe wymagania mogą być spełnione jedynie przez zelektryfikowany transport publiczny oraz zamianę pojazdów z silnikami spalinowymi na pojazdy elektryczne i inne środki elektrycznego transportu indywidualnego, czyli wprowadzenie polityki *elektromobilności*. Jednakże należy tu zauważyć, że w odniesieniu do elektrycznych pojazdów drogowych powinno się uwzględnić ich wpływ na zatłoczenie dróg, powstawanie smogu ze względu na emisję PM10 i PM2,5 na skutek zużycia opon, okładzin hamulcowych (nawet 50%) i unoszenia kurzu ulicznego [3]. Ponadto należy uwzględnić nakład energii i zużycie materiałów niezbędnych do wytworzenia i recykling zasobników energii stosowanych w pojazdach elektrycznych. Dlatego transport sieciowy ma tu przewagę, przy wszystkich swoich ograniczeniach, tj. konieczności budowy kosztownej infrastruktury i ograniczeniu do dedykowanych tras, aczkolwiek autobusy elektryczne o charakterze hybrydowego trolejbusu z możliwością doładowywania sieciowego (w tym w ruchu - „mobile charging”) mają istotne zalety, szczególnie w mniejszych miastach, ze względu na ograniczone pojemności zasobników energii i zasięg jazdy. Wysokie koszty zasobników stanowią dominujący udział w koszcie e-pojazdu, mimo znacznego spadku cen w ostatnich latach (koszt 1 kWh akumulatora w 2019 r. stanowił jedynie 17% kosztu z 2010 r.) [4]. Szacunki wskazują już obecnie na niższe koszty eksploatacji e-pojazdów w porównaniu do pojazdów spalinowych, nawet w USA, gdzie ceny paliw płynnych są niższe niż w Europie [4,5]. Oczywiście koszty te będą zależne od relacji cena energii elektrycznej/koszt paliwa. Statystyki z lat poprzednich wskazują na duże fluktuacje ceny ropy naftowej, przy zasadniczo stopniowym, ale stałym wzroście cen energii elektrycznej, szczególnie jeśli jest wytwarzana w elektrowniach węglowych, tak jak w Polsce. Zwiększenie udziału energetyki odnawialnej może spowolnić lub zatrzymać ten trend. Np. cena energii elektrycznej dla gospodarstw domowych w Niemczech zwiększyła się o 24% od 2010 r. i wyniosła 0,3 euro/kWh w 2018 r. [5], podczas gdy światowe ceny ropy naftowej wahały się od 17,3 USD/baryłkę w listopadzie 1998 r. do 162 USD/baryłkę w czerwcu 2008 r., 54 USD w styczniu 2019 r. czy 30 USD w kwietniu 2020 r. [6]. Relacje te powinny być analizowane w dłuższym okresie, gdyż będą miały wpływ na koszty eksploatacji i decyzje zakupowe klientów. W 2018 r. sprzedaż samochodów typu plug-in (PEV) przekroczyła 2 mln sztuk, przy 70% udziale samochodów elektrycznych z akumulatorami (BEV) i 30% udziale hybryd (PHEV), co stanowiło 2% wszystkich sprzedanych samochodów [4,5]. Rządy wielu krajów wprowadziły regulacje w celu zachęcania do zakupu e-samochodów. Większość samochodów elektrycznych, ponad 5 mln sztuk (w 2018 r.) była zarejestrowana w Chinach, które są największym producentem pojazdów elektrycznych [7,8]. Określane są tam mianem NEV (*ang. new energy vehicles*), z uwzględnieniem alternatywnych źródeł energii. Rząd chiński prowadzi politykę „oszczędność energii i pojazdy elektryczne”, do czego służy promocja innowacji technologicznych i rozwoju przemysłu samochodowego, co wymaga stworzenia systemu wsparcia tego przemysłu zaczynając od pozyskiwania surowców, kluczowych technologii po produkcję pojazdów i ich

sprzedaż. Opracowane krótko- i długoterminowe strategie [8] obejmują wykorzystanie lokalnych przewag ekonomicznych, regulowaną konkurencję cenową, przyspieszenie produkcji pojazdów, zwiększenie wykorzystania nowych technologii i materiałów (szczególnie w obszarze zasobników energii i sterowania) oraz nowych modeli biznesowych. Wszystko to odbywa się, co wydaje się kluczowe, przy wsparciu i pod nadzorem władz.

W Europie krajem najbardziej zaangażowanym w e-mobilność jest Norwegia. W działaniach promujących politykę e-mobilności [2] istotne okazały się: likwidacja 25 % podatku VAT, dostęp do bus-pasów czy brak opłat za korzystanie z autostrad, a motywacje klientów wybierających e-pojazdy to przede wszystkim: ochrona środowiska (38%), czynniki ekonomiczne (29%) i inne powody praktyczne (28%). Inne kraje też aktywnie wprowadzają działania promujące e-pojazdy, takie jak wprowadzanie w miastach stref bez pojazdów spalinowych czy też zapowiadają zakończenie ich sprzedaży (Norwegia - 2025 r., Indie - 2030 r., Francja i UK - 2040 r. [1,4]. Wadą e-pojazdów jest ich zasięg (obecnie sięgający kilkuset km), ograniczony pojemnością źródła energii, co wymaga częstego ładowania i dostępności punktów ładowania. Powoduje to, że ich wykorzystanie ma sens przede wszystkim przy podróżach na krótkie dystanse, gdy ładowanie nocne z domowej ładowarki małej mocy zapewni energię na ruch następnego dnia, jednocześnie niezbyt obciążając sieć zasilającą nN. Dla ładowarek o większych mocach np. do ładowania e-busów możliwe wydaje się np. wykorzystanie podstacji trakcji kolejowej, tramwajowej czy trolejbusowej, które w warunkach Polski mają rezerwy zdolności przesyłowej [9], co będzie istotne przy zwiększaniu liczby e-pojazdów. Ciekawą koncepcją jest wprowadzenie rozwiązań umożliwiających ładowanie w ruchu („mobile charging”) z wykorzystaniem istniejących sieci trakcyjnych (np. trolejbusowych) czy dedykowanych systemów dla e-samochodów, takich jak przedstawiono na rys. 2. [10].

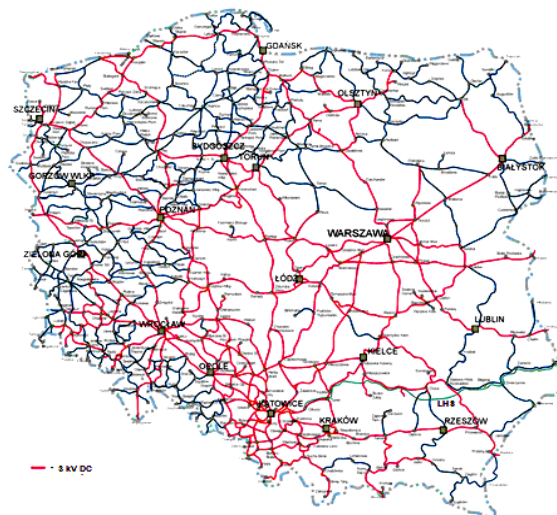


Rys. 2 Proponowany system konwojów drogowych do ładowania mobilnego. [9]

W proponowanym rozwiązaniu [9] samochody łączone są w konwoje drogowe poprzez automatyczny sprzęg umożliwiający dołączenie i odłączenie pojazdu bez zmniejszania prędkości jazdy w dowolnym punkcie drogi. Konwój jest prowadzony przez pilota – pojazd wyposażony w górną odbierak prądu przyłączony do sieci zasilającej DC i sprzęgi elektryczne umożliwiające transfer energii z sieci zasilającej 2-biegunowej (typu trolejbusowego) do pojazdów w konwoju. Jako pilot może być wykorzystywany pojazd ciężarowy lub autobus wyposażony w centralną jednostkę sterującą umożliwiającą transmisję danych pomiędzy pilotem i pojazdami oraz sterowanie konwojem oraz udostępniającą informacje dotyczące dostępności miejsca w konwoju do dołączenia kolejnych pojazdów. Wszystkie pojazdy chcące dołączyć do konwoju muszą być wyposażone w odpowiednie sprzęgi z przodu i z tyłu oraz odpowiedni hardware i software. Proponowane rozwiązanie ma następujące zalety w porównaniu do niezależnego ruchu e-pojazdów:

- mniejsze zużycie energii,
- zwiększony zakres jazdy i czas życia baterii (baterie wykorzystywane są na krótkich odcinkach dojazdowych, w trakcie jazdy w konwoju bateria jest doładowywana, a energia do ruchu pobierana z sieci zasilającej),
- większe bezpieczeństwo (uporządkowanie ruchu grupy pojazdów w konwoju),
- większa przepustowość pasa ruchu, po którym porusza się konwój,
- mniejsze zmęczenie kierowców,
- mniejsze koszty jednostkowe transportu e-pojazdów,
- mniejsze oddziaływanie na środowisko.

Do wad tego rozwiązania należy konieczność budowy infrastruktury zasilającej, podstacji i sieci trakcyjnej nad przynajmniej jednym, dedykowanym pasem drogi oraz wyposażenie wszystkich pojazdów, które mają łączyć się w konwoje w zunifikowane sprzęgi, umożliwiające automatyczne dołączanie i odłączanie pojazdów znajdujących się w odległości poniżej 1 m od siebie pod nadzorem centralnego sterowania bezprzewodowego z pojazdu-pilota.



Rys. 3 Sieć kolejowa w Polsce (źródło: PKP PLK S.A.)

Strategiczna rola trakcji elektrycznej w Polsce - kraju bez własnych zasobów ropy naftowej

Strategiczna rola trakcji elektrycznej w krajach, takich jak Polska, nie posiadających własnych złóż ropy naftowej, może wynikać z możliwości zapewnienia funkcjonowania gospodarki [11], w przypadku braku dostaw paliw płynnych z zagranicy, gdy energia elektryczna może być wytwarzana z innych źródeł (węgiel, źródła odnawialnych, elektrowni jądrowych). Dość rozległa sieć 12 tys. kilometrów zelektryfikowanych linii kolejowych (rys.3), 15 systemów tramwajowych, 3 systemy trolejbusowe w miastach, 2 linie metra w Warszawie oraz WKD (rys.4) stanowi istotny element infrastruktury strategicznej transportu masowego, który może stanowić alternatywę dla transportu drogowego i ograniczyć paraliż gospodarki w warunkach nadzwyczajnych. Dlatego utrzymywanie i rozbudowa systemów infrastruktury i środków transportu elektrycznego, wspieranie przemysłu elektrotrakcyjnego, wdrażanie nowych rozwiązań i technologii ma charakter strategiczny i nie powinno być rozpatrywane jedynie z punktu widzenia aktualnych kosztów, ale ochrony możliwości funkcjonowania państwa w warunkach braku paliw dla transportu drogowego.



Rys. 4 Systemy miejskiej trakcji elektrycznej w Polsce (T-tramwaje, TR-trolejbusy)

Trakcja sieciowa

Sieciowa trakcja elektryczna ciągle stanowi najbardziej efektywny sposób dostawy dużej mocy do prowadzenia ruchu i pozwala na osiągnięcie dużych prędkości jazdy do 350-380 km/h. W Polsce należy podkreślić następujące aspekty trakcji sieciowej, biorąc pod uwagę jej strategiczną rolę w gospodarce:

- zelektryfikowanie 12000 km linii kolejowych w systemie 3 kV DC (rys. 3) stanowi olbrzymie osiągnięcie Polski po II wojnie światowej, a stosowany system zasilania pozwala na dalsze zwiększenie prędkości jazdy do 220-250 km/h,
- istotne jest przygotowanie przemysłu, operatorów infrastruktury kolejowej i przewoźników do wprowadzenia na wybranych odcinkach systemu 2x25 kV 50 Hz, jako odpowiedniego dla kolei dużych prędkości czy zasilania dotychczas nieelektryfikowanych odcinków przygranicznych (np. z Litwą, gdzie stosowany jest ten system) lub technicznie wydzielonych z systemu kolei normalnotorowej (LHS) oraz dużych planów budowy nowych linii do obsługi CPK.

Wprowadzenie powyższego będzie wymagać:

- odpowiedniego rozwoju elektroenergetyki sieci wysokich napięć,
- przetestowania nowych rozwiązań i technologii (np. na pilotażowym odcinku systemu 2x25 kV 50 Hz lub na Torze Doświadczalnym IK w Żmigrodzie),
- istotnego wspierania lokalnego przemysłu elektrotrakcyjnego,
- działań promujących energooszczędność (zwiększenie wykorzystania energii hamowania odzyskowego, ECO-driving, zmniejszenie strat),
- poprawę niezawodności, odporności sieci trakcyjnych i pojazdów na negatywne oddziaływania środowiskowe (oblodzenie, szadź).

Trakcja elektryczna w miastach

W transporcie miejskim z 15 systemami tramwajowymi (rys. 4), tramwaj może stanowić podstawę szybkiego transportu [9] pod warunkiem wprowadzenia odcinkami tzw. tramwaju szybkiego o charakterze pre-metra. Finansowanie tych inwestycji ze środków UE stwarza szanse na rozwój tych systemów, czy budowę nowych systemów (Olsztyn). Wykorzystanie hamowania odzyskowego najbardziej jest efektywne w transporcie miejskim, a rozwój technologii

zasobnikowych do stosowania na pojazdach lub w układzie zasilania [12,13,14]. Pozwalają one uzyskać możliwości przejazdu odcinków bez zasilania z sieci trakcyjnej (np. na mostach) lub przy zaniku napięcia w sieci. Stwarzają także możliwości integracji energetyki systemów transportu szynowego, ładowarek pojazdów elektrycznych i lokalnych źródeł energii odnawialnej, co zmniejsza zapotrzebowanie na moc przyłączeniową z sieci elektroenergetycznej. Alternatywę dla zasobnika w układzie zasilania stanowi falownik, który nadwyżkę energii transformuje do zasilającej sieci 3-fazowej, szczególnie istotne na liniach kolei miejskiej i podmiejskiej o gęstym ruchu zespołów trakcyjnych. Na II linii metra warszawskiego na stacji Stadion Narodowy zainstalowany został zasobnik superkondensatorów. Przeprowadzone pomiary wykazały oszczędności ok. 2 MWh w dni robocze [13]. Dane z Tramwajów Warszawskich, gdzie eksploatowane są tramwaje z zasobnikami o pojemności energetycznej 1 kWh wskazują na zmniejszenie zużycia energii dzięki stosowaniu zasobników o 8-9%, przy zwrocie energii bezpośrednio do sieci trakcyjnej na poziomie ok 24% [14]. Taka modernizacja wszystkich tramwajów w Polsce pozwoliłaby na uzyskanie oszczędności na poziomie ponad 100 tys. MWh rocznie i odpowiednie zmniejszenie spalania węgla oraz emisji CO₂[15]. Działania w tym kierunku powinny być wsparte również poprzez odpowiednie uregulowania prawne. O ile wprowadzono pro-konsumenckie uregulowania prawne i programy zachęcające do rozwoju elektromobilności drogowej czy zakładania prywatnych mikroinstalacji fotowoltaicznych („Mój prąd”) to brak zdecydowanych działań wsparcia dla trakcji szynowej. Ostatnie podwyżki cen energii elektrycznej dotknęły przede wszystkim trakcję szynową. Należy prowadzić działania w celu dostrzeżenia przez ustawodawców ekologicznego charakteru energii rekuperacji. Jest to energia, która powstaje z przekształcenia energii kinetycznej w trakcie hamowania (przekształconej wcześniej z pobranej energii elektrycznej przy rozruchu) i jeśli nie zostanie wykorzystana przez innych odbiorców lub zgromadzona w zasobniku, to zostanie wytracona w rezystorze hamowania lub hamulcach mechanicznych, zwiększająca efekt cieplarniany i zanieczyszczenie środowiska. Jest zatem uzasadnione, aby energia rekuperacji miała status 'zielonej' (odnawialnej) energii, bo de facto jest to energia odpadowa – czyli energia bezużytecznie odprowadzana do otoczenia, pomimo tego, że nadaje się do dalszego wykorzystania w sposób ekonomicznie opłacalny. Podobnie jak generacja energii elektrycznej z wykorzystaniem odpadów (biomasa), która jest traktowana jak generacja ze źródeł odnawialnych.

Trolejbusy mają obecnie raczej niszowy charakter w transporcie miejskim, ale rozwój zasobników energii dał im drugie życie i pozwolił na hybrydyzację umożliwiającą z jednej strony zjazd poza odcinki z siecią trakcyjną (szacuje się, że wystarczy zainstalować sieć na 30-40% trasy [16] a z drugiej strony ładowanie zasobników w ruchu („mobile charging”), co daje im przewagę nad e-busem, wymagającym ładowania na postoju i baterii o większej pojemności. Poza Warszawą, gdzie rozważa się budowę III linii metra zasadniczo jedynie Kraków bierze pod uwagę jako alternatywę dla tramwaju w tunelu budowę kolei podziemnej. W szeregu obszarach zurbanizowanych, gdzie istniały rozbudowane linie kolejowe można rozważyć ich modernizację i ewentualnie elektryfikację (lub zastosowanie taboru niskoemisyjnego bez elektryfikacji) w celu stworzenia kolei miejskiej. Ważna jest, aby do każdego przypadku podchodzić niestandardowo i wykorzystywać lokalne uwarunkowania i potrzeby [15].

Drogowa trakcja elektryczna – kierunek: elektromobilność

Polski rząd ogłosił Program rozwoju elektromobilności [17] (*Dz.U. 2018 poz. 317 Ustawa z dnia 11 stycznia 2018 r. o elektromobilności i paliwach alternatywnych*). Przewidywano, że do 2025 r. w miastach będzie użytkowanych 1500 elektrycznych autobusów, a na drogach pojawi się 1 mln samochodów elektrycznych. Już w 2020 r. miało być użytkowanych w 32 wybranych obszarach miejskich 50 tys. BEV (battery electric vehicles) z możliwością ładowania przez 6 000 typowych ładowarek i 400 ładowarek dużej mocy. Program elektromobilności ma być oparty na budowie pojazdów w Polsce. Powołana została do tego celu dedykowana spółka celowa ElectroMobility Poland, a w marcu 2019 r. wybrano technicznego partnera EDAG, jako integratora przygotowań do produkcji 100 tys. samochodów akumulatorowych (BEV) rocznie. Akumulatory będą produkowane w Polsce w fabrykach wiodących firm, np. LG Chem buduje największą w Europie fabrykę akumulatorów Li-Ion z docelową produkcją roczną 100 tys. akumulatorów o pojemności 40÷60 kWh. Zdefiniowane obszary polityki elektromobilności obejmowały [17,18]:

- zmiana podejścia potencjalnych użytkowników samochodów,.
- określone korzyści dla potencjalnych użytkowników e-samochodów,
- rozwój przemysłu na rzecz elektromobilności,
- zmiany w prawie,
- rozbudowa zasilającego systemu elektroenergetycznego i dystrybucyjnego z inteligentnymi punktami ładowania umożliwiającymi funkcje V2G.

Jest to o tyle istotne, że np. jednoczesne ładowanie 1 mln e-samochodów nawet minimalną mocą 3 kW spowoduje obciążenie systemu elektroenergetycznego mocą 3 000 MW, co stanowi ok 10% obecnego poziomu mocy szczytowej (w lutym 2018 r. był to poziom 26 000 MW). Z drugiej strony akumulatory zainstalowane w e-samochodach, gdy są włączone w trybie V2G w okresie szczytu zapotrzebowania na moc, mogą stanowić rozłożoną rezerwę wspierającą system elektroenergetyczny. W grudniu 2019 r. w miastach Polski jeździło 216 e-busów [19] , a w lutym 2019 r. liczba samochodów elektrycznych sięgnęła 10 tys. [20], z czego 5700 to były samochody w pełni elektryczne (BEV), a reszta to pojazdy hybrydowe z możliwością ładowania (PHEV). Jeśli porównamy powyższe ze sprzedażą w 2019 r. ponad 108 tys. nowych samochodów w Niemczech albo miesięczną sprzedażą ponad 50 tys. w USA czy 200 tys. w Chinach [21,22] nie wygląda to imponująco. Wnioski z raportu [21] też nie są zachęcające. To nie ustawa o elektromobilności powoduje zainteresowanie zakupem pojazdów elektrycznych (kupują przede wszystkim firmy, a nie osoby prywatne), choć niewątpliwie pewne zachęty występują: bezpłatne parkowanie, wykorzystywanie bus-pasów czy dopłaty obniżające cenę sprzedaży, wyższe niż w innych krajach Europy (np. we Francji 6 000 euro), ale niższe niż w Chinach (10 000 USD). Ciągłe większość nabywców samochodów w Polsce wybiera zakup tańszych samochodów używanych z silnikiem spalinowym (średnia cena na poziomie 4 000 euro) niż nadal zbyt kosztownych elektryków. Szacunki wskazują, że cena nowych samochodów elektrycznych ładowalnych (PEV) zrównają się z ceną nowych samochodów z silnikiem spalinowym ok. 2029-2030 r. gdy znacząco spadną ceny akumulatorów [18]. Proponowane wcześniej rządowe subsydia [17] dotyczyły nie tylko samochodów PEV, ale również innych

pojazdów z napędem alternatywnym (zasilanych gazem czy wodorem), w tym także łodzi z napędem na bio-paliwo, gaz czy energię elektryczną. Poziom tych dopłat [17] zależał od rodzaju pojazdu:

- dla e-samochodów do 30% ceny, nie więcej niż 8 400 euro,
- dla pojazdów do usług komunalnych do 30% cen (maksimum 35 000 euro),
- dla pojazdów zasilanych gazem lub wodorem do 30 % ceny, nie więcej niż 17 400 euro,
- dla eko-łodzi/jachtów do 30% ceny, nie więcej niż 232 000 euro.

a)



b)



Rys. 5 a) E-bus wyposażony w system szybkiego ładowania
b) gniazdo stacjonarnej ładowarki

Istotną częścią planu rozwoju elektromobilności są e-busy (rys. 5). W Polsce funkcjonuje dojrzały rynek producentów, takich jak Solaris (dominujący), Volvo (Ursus, niestety ostatnio wypaść z tego rynku ze względu na niezrealizowane zamówienia). To powoduje, że zrealizowanie planów 1 500 e-busów do 2023 r. jest dość prawdopodobne [18,19]. Przetarg w 2019 r. na dostawę 130 zespolonych e-busów dla Warszawy wygrał Solaris z ceną ok. 772 000 euro za pojazd. Dodatkowo można zauważyć wykorzystywanie szansy na rewitalizację systemów trolejbusowych, funkcjonujących, mimo różnych wcześniejszych trudności w trzech miastach: Lublinie, Sopocie i Tychach. W styczniu 2019 r., 85 eksploatowanych trolejbusów było wyposażonych w akumulatory pozwalające na wyjazd poza obszar sieci trakcyjnej, która umożliwia także na doładowanie tychże baterii w trakcie jazdy 'pod siecią'.

Elektromobilność rozwijana jest pod hasłem niskoemisyjności. Rzeczywiście w miejscu użytkowania e-pojazdów emisja jest niska, jeśli nie zerowa. Ale musimy pamiętać o zużywaniu się opon okładzin hamulców pojazdów drogowych oraz wzniesieniu kurzu z dróg, co ma znaczący udział w powstawaniu zanieczyszczeń powietrza w miastach. Musimy także uwzględnić, że większość energii elektrycznej w Polsce (77%) generowana jest w elektrowniach węglowych, co powoduje że efekt niskoemisyjności e-pojazdów jest ograniczony w porównaniu do krajów, które w większym stopniu wykorzystują OZE. Oddzielnym problemem jest kwestia kosztów energii elektrycznej, które w 2019 r. zostały

znacząco podniesione (m. in. na skutek opłat za emisję CO₂). W szczególności szokować mogą podawane przewidywane ceny energii w komercyjnych ładowarkach, co zmniejszyło zainteresowanie wymianą pojazdów spalinowych na elektryczne. Wprawdzie dla e-pojazdów drogowych została przygotowana specjalna niższa taryfa, ale nie objęła on dość dobrze w Polsce rozwiniętego elektrycznego transportu szynowego [23], który stanowić powinien już istniejący komplementarny szkielet uzupełniający politykę *elektromobilności*. Realizacja tej polityki to kosztowny i długotrwały proces wymagający globalnej strategii obejmującej wiele obszarów. W szczególności dotyczy to innowacyjnych rozwiązań w technologii zasobników energii. Wymaga to dostępu do odpowiednich surowców i technologii. Ważne jest też posiadanie alternatywnych źródeł paliw, opanowanie konstrukcji pojazdów i budowa sieci łatwo dostępnych inteligentnych ładowarek. Istotne będzie odpowiednie oprogramowanie i szybka transmisja danych tak, aby łatwo było zaplanować podróż elektrycznych środkiem transportu.

100 lat dydaktyki, nauki i wdrożeń w zakresie trakcji elektrycznej w Politechnice Warszawskiej

Kształcenie w zakresie Trakcji Elektrycznej w Politechnice Warszawskiej nierozdzielnie wiąże się z kształceniem na kierunku Elektrotechnika [24,25]. Wprowadzanie programów kształcenia w zakresie tych zagadnień związane było z potrzebami rozwijającej się gospodarki szczególnie w Warszawie. Projektowana już w końcu XIX wieku pierwsza linia tramwaju elektrycznego dla Warszawy potrzebowała specjalistów od zagadnień elektrycznych w zakresie projektowania, badań, eksploatacji. Oprócz tego fachowców z dziedziny elektrotechniki potrzebował rozwijający się przemysł. Już w XIX wieku powstawały pierwsze projekty elektryfikacji linii tramwajowych dla Warszawy. W czerwcu 1898 r. powołano Warszawski Instytut Politechniczny. W 1901 r. nowo wybudowany gmach mechaniki zajął wydział Mechaniczny, w którego skład wchodziła Katedra Elektrotechniczna. Zajęcia dydaktyczne obejmowały wykład z elektrotechniki oraz projekty z urządzeń elektrycznych i maszyn elektrycznych. Zagadnienia trakcji elektrycznej nie były wtedy jeszcze wydzielone z ogólnych zagadnień elektrotechnicznych. Specjaliści pracujący w powstałych zakładach związanych z tramwajami elektrycznymi swoje wykształcenie często uzyskali w innych krajach. Niestety już w latach 1905-1908 zostało zawieszono działanie Warszawskiego Instytutu Politechnicznego jako następstwo strajku polskich studentów. Później Instytut działał przez 7 lat. W czerwcu 1915 r. Instytut ewakuowano do Rosji. W miejsce Instytutu w listopadzie 1915 r. nastąpiła inauguracja Politechniki Warszawskiej. Wydzielenie zajęć ukierunkowanych na *trakcję elektryczną* rozpoczyna się w roku akademickim 1919/1920. Specjalistyczne kształcenie w Politechnice Warszawskiej zapoczątkował, wtedy jeszcze inżynier Roman Podoski, wykładem „Tramwaje i koleje elektryczne”. Kształcenie w zakresie kolejnictwa elektrycznego i tramwajów odbywało się w oparciu o Katedrę Urządzeń Elektrycznych, której inżynier Roman Podoski był pracownikiem. W 1921 r. elektrotechnikę w Politechnice Warszawskiej studiowało 463 studentek i studentów. Program studiów w 1921 r. obejmował zajęcia wykładowe i projektowe, które prowadzone były dla wszystkich studentów powstałego Wydziału Elektrotechnicznego: - Koleje elektryczne (wykłady 45) - Projektowanie kolei elektrycznych (projekt 60). Studia tak jak obecnie były podzielone na 2 semestry w roku po 15 tygodni zajęć dydaktycznych. Od 1922 r. wykłady uzupełnione zostały 2 tomową książką autorstwa Romana

Podoskiego pod tytułem *Tramwaje i koleje elektryczne* oraz napisano pierwsze prace dyplomowe. W 1924 r. powstały w ramach Wydziału Elektrycznego dwa Oddziały. Katedra Koleje Elektryczne znalazła się w Oddziale Prądów Silnych. Ówczesny układ strukturalny Wydziału przetrwał do 1970 r. Od roku 1924 następował również podział przebiegu studiów, pojawiło się różnicowanie w toku kształcenia. Oprócz Oddziałów pojawiły się w 1937 r. specjalistyczne Sekcje, na które podzielony został Oddział Prądów Silnych. Na starszych latach studiów przestawał obowiązywać studentów wspólny program. Skala rozdziału zajęć na starszych latach nie była zbyt duża, gdyż uznawano, że absolwenci powinni stosunkowo łatwo zmieniać swą specjalność. Dlatego też studenci mieli dużo zajęć, a liczba godzin wzrastała z upływem lat. I tak w latach 1928/1929 program obejmował 40 godzin zajęć tygodniowo. Do tego dochodziła praca własna studentów. Przeciętnie zdolny student musiał poświęcić pięcioletnim studiom prawie 10000 godzin pracy. Był to około dwa razy większy nakład pracy niż obecnie! Wysokie obciążenie nauką i wysokie wymagania prowadziły do małej sprawności kształcenia. Znacznie mniej niż połowa studentów uzyskiwała dyplom. Do 1939 r. na Wydziale Elektrycznym wydano 933 dyplomy. Ci którzy je otrzymali cechowali się wysokim poziomem wiedzy inżynierskiej i bardzo dobrą pozycją zawodową. Kształcenie w zakresie *trakcji elektrycznej* zawsze było bezpośrednio związane z łączeniem teorii z praktyką. Absolwenci Wydziału Elektrycznego przyczynili się do budowy i później znaleźli zatrudnienie przy pierwszej zelektryfikowanej linii kolejowej z Warszawy do Milanówka i Grodziska Mazowieckiego powstałej w 1927 r. - dzisiejszej WKD. W latach 1940-1944 działalność Politechniki jako instytucji była zawieszona, ale Wydział Elektryczny działał w ramach średniej szkoły zawodowej Państwowej Szkoły Elektrycznej II stopnia z oddziałem Prądów Silnych od 1941 r., a później Wyższej Szkoły Technicznej od 1942 r. Zajęcia w tej szkole prowadził również profesor dr inż. Roman Podoski - dzięki czemu mogło odbywać się tajne kształcenie na poziomie wyższych studiów. W latach 1945-1948 ze względu na braki kadrowe, jak też brak bazy laboratoryjnej, ćwiczeniowej program studiów został okrojony. Nie było specjalizowanego kształcenia w zakresie *trakcji elektrycznej*, mimo obecności na Uczelni specjalistów. W latach pięćdziesiątych liczba godzin zajęć dydaktycznych wzrosła aż do 50 tygodniowo. Dodatkowo dochodziły prace własne studentów. Przywrócenie zajęć specjalistycznych nastąpiło później. Dopiero w latach 1948-1952 studenci kształcili się na Oddziale Prądów Silnych na kierunku dyplomowania Kolejnictwo Elektryczne. W latach 1952-1958 pojawiła się sekcja *trakcja elektryczna* zamiast kierunku dyplomowania *kolejnictwo elektryczne*. W latach 1958-1968 kształcenie określone było nazwą: kierunek *trakcja elektryczna*. W latach 1968-1981 istniała na studiach dziennych specjalność Trakcja Elektryczna. Kształcenie odbywało się na studiach magisterskich i inżynierskich. W 1972 r. przeprowadzona została ostatnia rekrutacja na studia inżynierskie. Od 1973 r. kształcono studentów na studiach magisterskich 5-cioletnich. W latach 1974-1981 wprowadzono jednolite 4,5 roczne studia magisterskie. Trakcja Elektryczna występowała jako jedna z 5-ciu specjalności, podobnie na prowadzonych od 1969 r. 5-cioletnich studiach zaocznych i wieczorowych. Lata siedemdziesiąte i osiemdziesiąte były okresem największego rozwoju kształcenia studentów w zakresie *trakcji elektrycznej*. Wiązało się to również z szerokim zakresem elektryfikacji linii kolejowych w Polsce. Od roku akademickiego 1975/76 kształcenie magisterskie na Wydziale obejmowało 13 specjalności. Specjalność trakcja elektryczna obejmowała dwie specjalizacje: Energetyka

Trakcyjna oraz Tabor. Obecnie studenci w zakresie *trakcji elektrycznej* kształceni są w ramach studiów I stopnia - inżynierskich, II stopnia - magisterskich w ramach specjalności *Elektromechatronika Pojazdów i Maszyny Elektryczne*.

W zakresie *trakcji elektrycznej* prowadzone są również dwusemestralne studia podyplomowe (od lat 70-tych XX w.) oraz specjalistyczne kursy. Studia podyplomowe ukończyło ponad 200 słuchaczy. Nie będzie dydaktyki i przygotowania zawodowego absolwentów na odpowiednim poziomie bez prac naukowo-badawczych i wdrożeniowych pracowników w zakresie wykładanej specjalności. Prace prowadzone w Zakładzie Trakcji Elektrycznej obejmowały zagadnienia od teoretycznych, dotyczących opracowania metod i modeli matematycznych opisujących zjawiska w systemie trakcji elektrycznej po ich implementację w postaci modeli symulacyjnych i programów obliczeniowych. Należy tu wymienić opracowane metody analiz i obliczeń oraz projektowania układów zasilania trakcji tramwajowej i kolejowej oraz ich wdrożenie w postaci pakietów programów do obliczeń, które następnie wykorzystywane były w analizie i pracach studialnych oraz koncepcjach i projektach technicznych konkretnych linii kolejowych. Na szczególną uwagę zasługuje udział Zakładu Trakcji Elektrycznej w realizacji w latach 90. XX w. dwóch projektów uzyskanych w wyniku przetargu z funduszu PHARE we współpracy z włoską firmą ITALFERR. Opracowania i koncepcje były wdrażane na linii E-20 przygotowywanej do prędkości jazdy 160 km/h., linii E-65, E-30 oraz linii CMK, dla której opracowano rozwojowy układ zasilania i rozwiązania konstrukcyjne sieci trakcyjnej na 200-250 km/h, co pozwoliło na wprowadzenie do ruchu pociągów z platformy pendolino w 2015 r. Efektem tych prac było m.in. uruchomienie w 1998 r. zmodernizowanej PT Huta Zawadzka wyposażonej w prostowniki trakcyjne z transformacją jednostopniową 110kV/3kV z transformatorem czterouzwojeniowym i nową generacją filtrów wygładzających typu Gamma (po okresie próbnej eksploatacji i uzyskaniu pozytywnych wyników w trakcie przeprowadzonych pomiarów uruchomieniowych. Dalsze podstacje wg tej koncepcji powstały w Barłogach oraz na odcinku linii E-20: Mińsk Maz. - Siedlce oraz w Przemyślu i Łosiosowie na linii E-30, obecnie funkcjonuje ich kilkadziesiąt. Wdrożono również stosownie najpierw na linii E65 nowej wersji sieci trakcyjnej przewidzianej dla prędkości do 250 km/h. W analizach studialnych i projektowych wymagane jest stosowanie odpowiednich narzędzi i programów symulacyjnych. Zakład Trakcji Elektrycznej PW opracowywał metodykę projektowania, która jest wdrażana w postaci pakietu programów symulacyjnych do analiz i projektowania podsystemu *Energia i Tabor* z uwzględnieniem wszystkich wymaganych kryteriów i Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności (TSI). Zwiększone obciążenia układu zasilania stwarzają nowe zagrożenia i wymagają wprowadzania nowych rozwiązań w zakresie ochrony od zwarć, w tym doziemnych i ochrony przeciwporażeniowej. Poświęcona temu zagadnieniu była praca, w której opracowano nowy system uszynień grupowych dla trakcji prądu stałego 3 kV (1994). Rozwiązanie to pozwala na skuteczną ochronę od zwarć, szczególnie doziemnych przy jednoczesnym utrzymaniu separacji szyn od ziemi i zmniejszonym oddziaływaniu na obwody sygnalizacji i sterowania. System ten jest obecnie powszechnie stosowany na liniach PKP PLK SA.

Zwiększone prędkości i moce pociągów oznaczają zwiększenie wymagań wobec najbardziej zawodnego elementu w obwodzie dostawy energii do pociągów, tj. sieci trakcyjnej. Pracownicy Zakładu Trakcji Elektrycznej brali udział w realizacji projektu celowego zamawianego na

rzec PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. prowadzonego przez AGH, Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa dotyczącego opracowania nowej generacji sieci trakcyjnej z miedzi srebrzej o zwiększonej obciążalności i mniejszym zużyciu. W ostatnich latach szeroko analizowane plany budowy w Polsce linii kolejowych dużych prędkości do 350 km/h. Będzie to zdecydowana zmiana jakościowa i prawdziwa rewolucja technologiczna na kolei, tak w zakresie taboru trakcyjnego jak i układów zasilania. Zakład Trakcji Elektrycznej opracował ekspertyzę dla PKP PLK S.A. dotyczącą modernizacji konstrukcji wsporczych dla odcinka testowego sieci dużych prędkości na linii CMK. Następnym etapem było określenie wytycznych i wymagań technicznych dla układów zasilania trakcyjnego nowego w warunkach Polski systemu prądu przemiennego 25 kV 50 Hz dla dużych prędkości jazdy (we współpracy z firmą Kolprojekt) i opracowanie koncepcji budowy pilotażowej podstacji i odcinka sieci trakcyjnej na linii E75 odcinek Suwałki - granica RP z Litwą. W lipcu 2020 r. konsorcjum Torprojekt sp. z o.o. – Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej, w strukturze którego funkcjonuje obecnie Zakład Trakcji Elektrycznej, wygrało przetarg i rozpoczęło prace nad koncepcją rozwiązania zasilania elektroenergetycznego dla sieci nowych linii kolejowych w ramach projektu Centralnego Portu Komunikacyjnego. W ostatnich latach znacznie wzrosły koszty energii, dlatego oszczędności energii poświęca się wiele uwagi, pojawiają się nowe inicjatywy jak Centrum Efektywności Energetycznej Kolei (CEEK). Zakład Trakcji Elektrycznej już w latach 90. XX w. był jednostką koordynującą projekt badawczy zamawiany dotyczący racjonalizacji zużycia energii w transporcie kolejowym, przy czym pod pojęciem racjonalizacji rozumiano nie tylko zmniejszenie zużycia energii, ale również ponoszonych kosztów. Opracowano m.in. założenia i wytyczne dla podjęcia działań racjonalizacyjnych krótko i długoterminowych z uwzględnieniem nie tylko efektywności technicznej, ale również finansowej projektów z zastosowaniem metody CBA. Dokonano także analizy porównawczej, z uwzględnieniem tzw. kosztów zewnętrznych (w tym kosztów oddziaływania na środowisko) trakcji spalinowej i trakcji elektrycznej. Podobne zagadnienie podjęte zostało w odniesieniu do systemów trakcji elektrycznej dużych aglomeracji miejskich oraz w odniesieniu do nowego taboru dla Metra Warszawskiego z rekuperacją energii w warunkach istniejącego układu zasilania, który projektowany był dla taboru klasycznego, a także opracowaniu koncepcji zasilania centralnego odcinka II-giej linii Metra Warszawskiego, w której zaproponowano zastosowanie podstacji zasobnikowej. Tematem trakcji miejskiej, w szczególności problemem zasilania poświęcone były m.in. prace w których szczególną uwagę zwrócono na identyfikację zwarć i prawidłową konfigurację sieci powrotnej, co jest szczególnie istotne ze względu na zagrożenie korozyjne od prądów błędnych, których efektem jest zwiększona awaryjność infrastruktury podziemnej, obserwowana w wielu miastach, w tym w Warszawie. Rozwój komunikacji tramwajowej w Warszawie, w tym zakup nowoczesnego taboru i rozbudowa linii spowodowały zlecenie Zakładowi Trakcji Elektrycznej opracowania koncepcji zasilania nowych linii na trasie Mostu Północnego i studium układu zasilania istniejących i projektowanych nowych linii tramwajowych, w tym Dworzec Zachodni - Wilanów. Analizie układu zasilania modernizowanej linii WKD poświęcona była praca, w której dokonano porównania możliwości modernizacji istniejącego systemu o napięciu 660 V DC z systemem 3kV DC, wskazując na efektywności i celowość zastosowania tego ostatniego, co zostało zrealizowane. Innym elementem

oddziaływania systemów zelektryfikowanego transportu na infrastrukturę techniczną są zakłócenia wprowadzane do sieci elektroenergetycznych wyższe harmoniczne i wahania obciążeń. Opracowano metody analiz możliwych do wystąpienia oddziaływań, środki zaradcze, jak również przeprowadzono pomiary tych oddziaływań. W dobie zwiększonego zainteresowania sprawami jakości energii elektrycznej i wprowadzenia Prawa Energetycznego jest to niezmiernie istotne. Bowiem odbiorca energii (eksploatator podstacji trakcyjnej) ma nie tylko obowiązek spełnienia wymagań niezakłócenia sieci w punkcie wspólnego przyłączenia, ale również prawa: energia dostarczona do podstacji powinna być określonej jakości. Ważny jest także odpowiedni poziom jakości energii dostarczanej do pojazdów i rezerwowanie źródeł zasilania sieci trakcyjnej 3kV DC, wymagane przez Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności (TSI) dla kolejowego podsystemu „Energia” co przekłada się na koszty inwestycyjne i wymaga uregulowań na styku dostawca-odbiorca energii. Zagadnienia kompatybilności systemów trakcji elektrycznej, w tym oddziaływania obwodów silnoprądowych i pojazdów na obwoły sygnalizacji i sterowania poruszane były w szeregu pracach, a ponadto podjęto zagadnienia związane ze sterowaniem pojazdami trakcyjnymi, w tym wyposażonymi w napędy przekształtnikowe i komputery pokładowe z uwzględnieniem poślizgu kół i drgań mechanicznych. Prowadzone od wielu lat prace naukowo-badawcze miały w większości przypadków charakter wdrożeniowy w procesie modernizacji systemów trakcji elektrycznej w Polsce. Wykonywane we współpracy z innymi instytucjami krajowymi (Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa obecnie Instytut Kolejnictwa, Biuro Studiów i Projektów "Kolprojekt" obecnie Torprojekt sp. z o.o., inne biura projektowe), dostawcami urządzeń (Adtranz, ABB, Bombardier, PESA, Elester PKP), na rzecz Polskich Kolei Państwowych (PKP PLK S.A., PKP Energetyka S.A.) i przedsiębiorstw komunikacji miejskiej (Tramwaje Warszawskie, Metro, WKD) ze środków instytucji zamawiających, Komitetu Badań Naukowych, funduszy PHARE i środków własnych Politechniki Warszawskiej. Nie należy tu pominąć istotnego zakresu zagranicznej współpracy naukowej i technicznej pracowników Zakładu Trakcji Elektrycznej w zakresie tak konkretnych projektów, jak też wzajemnych wizyt naukowych i wymiany doświadczeń z firmą ITALFERR (Włochy), ADTRANZ (Szwajcaria), Uniwersytetem "La Sapienza" w Rzymie (Włochy), Uniwersytetem w Genui (Włochy), Uniwersytetem w Bath (W. Brytania), Uniwersytetem Transportu w Rostowie i Moskwie (Rosja), Uniwersytetem w Żilinie (Słowacja), Institution of Electrical Engineers (W. Brytania). Zakład Trakcji Elektrycznej od początku lat osiemdziesiątych organizował krajową konferencję naukową, która w 1993 roku przekształciła się w konferencję międzynarodową "Modern Electric Traction" odbywającą się w latach nieparzystych, z udziałem Zakładu Inżynierii Elektrycznej Transportu Politechniki Gdańskiej. Konferencja ta stanowi ważne forum wymiany doświadczeń i dyskusji specjalistów trakcji elektrycznej z całego świata (w 2015 r. odbyła się w Trogirze-Chorwacja). W latach 2003-2005 Zakład Trakcji Elektrycznej wraz z Zakładem Maszyn Elektrycznych IME tworzył Centrum Doskonałości ESEEMC współfinansowane z 5. Programu Ramowego Unii Europejskiej. Innym projektem z 5. Programu był udział w realizacji projektu we współpracy z Uniwersytetem w Genui oraz firmami Bombardier i Enotrac. Liczba publikacji autorstwa pracowników Zakładu Trakcji Elektrycznej obejmuje kilkaset pozycji (pełną listę można znaleźć w bazach danych). Należy podkreślić rolę wydawanych publikacji książkowych, szczególnie w

renomowanych wydawnictwach zagranicznych jak 22 tomowa Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineers (Wiley&Sons, USA), w której opublikowano monografię dotyczącą systemów zelektryfikowanego transportu naziemnego, artykuły w czasopismach z listy JCR jak również publikacje konferencyjne. Z wydawnictw krajowych wymienić trzeba dział poświęcony trakcji elektrycznej w Poradniku Inżyniera Elektryka, oraz książki monograficzne i podręczniki akademickie, Pracownicy Zakładu Trakcji są autorami wielu patentów i zgłoszeń patentowych (w latach 1981-2020 Urząd Patentowy RP udzielił ponad 30 patentów pracownikom Zakładu (liderem jest tu dr hab. T. Maciołek prof. PW) wdrożonych przez szereg firm. Obejmują one rozwiązania przydatne zarówno w układach zasilania trakcji elektrycznej jak i urządzeniach taborowych pojazdów szynowych.

Spośród największych osiągnięć Zakładu Trakcji Elektrycznej w ostatnich 10 latach można wymienić:

- opracowanie projektu konstrukcyjnego dwóch typów sieci trakcyjnych nowej generacji C150-2CS150, C120-2CS150, udział w ich wdrożeniu w PKP – Nagroda Premiera RP II stopnia za osiągnięcia naukowo-techniczne w 2010 r. (A.Szeląg, T.Maciołek),
- wykonanie kilkudziesięciu opracowań, ekspertyz i wdrożeń rozwiązań poprawiających efektywność, funkcjonowania zasilania trakcji kolejowej i miejskiej,
- opracowanie koncepcji modernizacji układu zasilania 3 kV DC linii E - 65 CMK i Warszawa - Gdańsk oraz Koniecpol - Opole do ruchu pociągów typu pendolino,
- analizy i koncepcje oraz uwarunkowania wprowadzenia systemu 25 kV 50 Hz na kolei w Polsce,
- opracowanie koncepcji zmiany napięcia na linii WKD na 3kV,
- koncepcje zasilania nowych linii tramwajowych w Warszawie, w tym na odcinku Dworzec Zachodni-Wilanów,
- opracowanie koncepcji zasilania II linii Metra Warszawskiego,
- we współpracy z Instytutem Elektrotechniki w Międzyzlesiu – prototypowy zasobnik energii dla trakcji, miejskiej – nagrodzony przez PARP wyrób przyszłości w 2011 r.,
- Adam Szeląg, Zygmun Giziński [Instytut Elektrotechniki), Paweł Giziński (Instytut Elektrotechniki) – „eCO2 innowacja”, nagroda specjalna ufundowana „przez Ministra Gospodarki dla produktu o największym potencjale w zakresie redukcji emisji gazów, cieplarnianych – XIV edycja Konkursu Polski Produkt Przyszłości, 2011 r.,
- opracowanie wynalazków – Rozwiązania w zakresie odciążania sieci trakcyjnych (T. Maciołek) – oraz wdrożenie przez sprzedaż licencji i następnie patentów, 2018 i 2020 r.

Absolwenci Zakładu Trakcji Elektrycznej w trakcie studiów zdobywają wykształcenie w zakresie inżynierii elektrycznej ze znajomością zagadnień dotyczących elektrycznych pojazdów indywidualnych, jak i transportu miejskiego (tramwaj, metro, autobus elektryczny) i kolejowego. Absolwenci dyplomujący się w Zakładzie są wysoko cenieni na rynku pracy. Od szeregu lat w Zakładzie prowadzone są studia podyplomowe z zagadnień związanych z energetyką trakcyjną i pojazdami. Zachowane dokumenty historyczne wskazują, że od 1936 r. do chwili obecnej wypromowano ponad 870 absolwentów, których dyplomy powiązane są z szeroko pojętą trakcją elektryczną.

Podsumowanie

Rozwój trakcji elektrycznej rozpoczął się w końcu XIX wieku wraz z rozwojem elektrotechniki i stanowił odpowiedź na zapotrzebowania na sprawny transport w szybko rozwijających się miastach i dla przewozów na większe odległości. Rozwój drogowych pojazdów elektrycznych akumulatorowych został zablokowany poprzez pojawienie się pozwalających na przejazd na większe odległości pojazdów z silnikiem spalinowym, które zdominowały transport drogowy. Dopiero zatłoczenie miast, zanieczyszczenie środowiska i wysokie ceny oraz trudności z dostępem do paliw płynnych (od lat 70 XX wieku) zwiększyły zainteresowanie transportem elektrycznym, w zakresie którego dydaktyka, prace naukowo-badawcze i wdrożeniowe prowadzone są na Wydziale Elektrycznym od ponad 100 lat. Zwrot w kierunku **elektromobilności** wydaje się stanowić krok w dobrym kierunku w celu zmniejszenia problemów środowiskowych w obszarach zurbanizowanych w transporcie na krótsze odległości, gdyż ciągle jeszcze podstawowym problemem jest pojemność zasobnika energii elektrycznej i zasięg e-pojazdu. Ponadto jeśli zastąpimy samochód z silnikiem spalinowym, samochodem z silnikiem elektrycznym to ciągle będzie to pojazd powodujący zatłoczenie dróg. Dlatego niezbędne jest uzupełnienie **polityki elektromobilności** rozumianej jako rozwój transportu drogowego o wykorzystanie i wspieranie rozwiniętych dość dobrze systemów sieciowego transportu elektrycznego szynowego. **To powinny być środki i systemy komplementarne, a nie konkurencyjne.** Transport na duże odległości koleją elektryczną, na krótkie dystanse w obszarach mniej zaludnionych e-busem, samochodem elektrycznym (najlepiej wypożyczonym), e-skuterem, w bardziej zurbanizowanych, metrem, tramwajem, trolejbusem, ‘ostatnią milę’ – e-hulajnogą, rowerem, ale najzdrowiej pieszo.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Adam Szeląg, adam.szela@ien.pw.edu.pl, dr hab. inż. Mirosław Lewandowski profesor uczelni, miroslaw.lewandowski@ien.pw.edu.pl, dr hab. inż. Tadeusz Maciołek profesor uczelni, tadeusz.maciolek@ien.pw.edu.pl, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Trakcji Elektrycznej, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa.

LITERATURA

- [1] International Energy Agency implementing agreement for co-operation on hybrid and electric vehicle technologies and programmes, April 2015. Available from: www.ieahev.org.
- [2] Figenbaum E. and Kolbenstvedt M. Electromobility in Norway - experiences and opportunities with electric vehicles. Institute of Transport Economics, TØI report 1281/2013, Oslo, Norway, November 2013.
- [3] Grigoratos T. and Martini G. Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM. Literature review, Report EUR 26648 EN, 2014.
- [4] Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/electric_car (access: 28.03.2019).
- [5] Eurostat. Electricity price statistics. Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics (access: 29.03.2019).
- [6] Macrotrends. Crude Oil Prices - 70 year Historical Chart. Available from: <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart> (access: 29.03.2019).
- [7] Yantai C. et al. Policy evaluation on the development of China's new energy vehicle industry based on two-stage model. *Science Research Management*, 2013, pp.167-174.
- [8] Wang X. et al. Strategic Choices of China's New Energy Vehicle An Analysis Based on ANP and SWOT. *Energies* 2017, 10(4), 537; DOI: 10.3390/en10040537.

- [9] Szelaż A., Maciołek T. Power supply of trams in Poland – current state and perspectives of development. MATEC Web of Conferences 180(2018), MET'2017, DOI: 10.1051/mateconf/201818003005.
- [10] Maciołek T. A mobile catenary power supply system for automotive vehicles. MATEC Web of Conferences 180(2018), DOI: 10.1051/mateconf/201818001001.
- [11] Bartosik, M. et al. Bezpieczeństwo elektroenergetyczne dla pokoleń. Przegląd Elektrotechniczny, 92(8) 2016, 9 pp. 268-282 Available from: <http://pe.org.pl/articles/2016/8/69.pdf>. Polish
- [12] Radu P. V., Szelaż A. and Steczek M. On-Board Energy Storage Devices with Supercapacitors for Metro Trains Case Study Analysis of Application Effectiveness. Energies, 12 (2019), DOI: 10.3390/en12071291.
- [13] Radu P. V., Szelaż A. Modelling of operation of a stationary energy storage device in metro rail transport for selection of its parameters. MATEC Web of Conferences 180 (2018) - 13th International Conference Modern Electrified Transport Met'2017; DOI: 10.1051/mateconf/201818002011.
- [14] Szelaż A., Drażek Z. and Maciołek T. Elektroenergetyka miejskiej trakcji elektrycznej INW Spatium, Radom, 2017.
- [15] Dyr T. et al. - Effectiveness of application alternative drive vehicles in public transport, MATEC Web of Conferences 18 (2018), DOI: 10.1051/mateconf/201818001002.
- [16] Bartłomiejczyk, M., Practical application of in motion charging: Trolleybuses service on bus lines. In *2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* (pp. 1-6). IEEE, May 2017
- [17] Electromobility Development Plan in Poland 'ENERGY FOR THE https://www.gov.pl/documents/33372/436746/dit_pre_en.pdf/3d2ca928-3097-2b11-84c9-7a5b546932a7 (access 19.03.2019).
- [18] Special report 2018. Elektromobilność w transporcie publicznym Przewodnik - praktyczne aspekty wdrażania, raport specjalny 2018.
- [19] <http://www.infobus.pl/ebus> (dostęp 4 czerwca 2020)
- [20] Polish EV Outlook 2019 Polskie Stowarzyszenie Paliw Alternatywnych (PSPA) i firmę doradczą Frost & Sullivan.
- [21] <https://www.thefirstnews.com/article/close-to-10000-electric-vehicles-in-poland-at-end-february-11424> (dostęp 4 czerwca 2020)
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country (dostęp; 4 czerwca 2020)
- [23] <https://ceek.pl/>
- [24] Szelaż A., M. Lewandowski M., Steczek M.O, Maciołek T.- *From trams to high-speed trains and electromobility – 140 years of development of electric traction*, Proceedings of the International Scientific Conference "The Science and Development of Transport", ZIRP'2019, Opatija, Croatia, 9-10 May 2019.
- [25] Barlik R., Czajewski J., Dołowy M., Drażek Z., Flisowski Z., Hering M., Kaźmierkowski M.P., Koczara W., Lewandowski M., Maciołek T., Maksymiuk J., Mazur J., Mikołajuk K., Myrcha M., Niestępski S., Pochanke A., Szelaż A., Tomaszewicz E., Urbański W., Żagan W., Wójciak.-Historia zakładów oraz współczesna fotografia Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej w roku Jubileuszu 90-lecia, Wydział Elektryczny, 2012.