

C. INNOWACYJNA GOSPODARKA TRANSPORTOWA

C.6 TRANSPORT TRAMWAJOWY

C.6.4 INNOWACYJNY TRAMWAJ; WSPÓŁCZESNE TRENDY W BUDOWIE I EKSPLOATACJI TRAMWAJÓW; ROLA TRAMWAJU W MIEŚCIE XXI WIEKU

dr hab. inż. Bartosz Firlik, prof. PP

1. Wprowadzenie

Wg UITP (International Association of Public Transport) tramwaj jest jedynym miejskim środkiem transportu zdolnym do zapewnienia wysokiej zdolności przewozowej przy zachowaniu wysokiej jakości oraz niskich kosztów budowy i eksploatacji sieci. Największym i najbardziej niedocenionym obecnie w Polsce wyzwaniem jest przewidywana długość życia tramwaju, która wynosi ok. 30 lat. Popatrzmy na to od innej strony: **Tramwaj będzie elementem krajobrazu miasta przez następne 30-40 lat!** Spójrzmy, jak wyglądało nasze miasto 40 lat temu, a jak wygląda teraz? Czy możemy sobie wyobrazić, jak będzie wyglądało za 40 lat? Albo jak chcemy, żeby wyglądało?

Jeśli teraz kupimy tramwaj, tańszy w zakupie, ale gorszy technologicznie i o wyglądzie już nieco przestarzałym, to już za 20 lat nie wytrzyma on konkurencji z nowoczesnymi samochodami, a nawet autobusami, których długość życia jest znacznie krótsza, a więc częściej wymienia się je na nowe.

Dobrym przykładem są kupione przez miasto Poznań w 2002 roku tramwaje Siemens Combino. Były to wówczas najnowocześniejsze tramwaje na świecie. Na decydentów spadła fala krytyki, że za tą samą kwotę można było kupić większą liczbę tramwajów wysokopodłogowych produkcji Konstal, np. typu 105N2k/2000 lub częściowo niskopodłogowych typu 116Nd. Gdyby zapadła taka decyzja, te tramwaje w roku 2024 nie wytrzymałyby już konkurencji z nowszymi konstrukcjami. A tramwaje Siemens Combino przechodzą obecnie naprawę główną i po jej przeprowadzeniu nie ustępują w niczym współcześnie produkowanym tramwajom niskopodłogowym – będą więc służyć mieszkańcom Poznania przez następne 20-30 lat.

Warto więc, a nawet należy, przy zakupie nowych tramwajów kierować się nie tylko najniższą ceną zakupu, ale innowacyjnością oferowanych rozwiązań. Spójrzeć na nie przez pryzmat przyszłości miasta, trendów techniki, a także rosnących oczekiwań podróżujących. Innowacyjne rozwiązania w tramwajach są kluczowe dla poprawy efektywności energetycznej, komfortu pasażerów oraz zwiększenia bezpieczeństwa jazdy. Wprowadzenie nowoczesnych technologii, takich jak systemy odzyskiwania energii, jazdy autonomicznej, innowacyjne materiały, systemy sterowania, czy zarządzania ruchem, może przyczynić się do zwiększenia atrakcyjności tramwajów jako zrównoważonego i efektywnego środka transportu.

Ważna jest nie tylko innowacyjność, ale i wygląd tramwaju. Wiele wysokorozwiniętych miast personalizuje tramwaj, dopasowując go do krajobrazu miasta. Wprowadza się pojęcie „tramwaju inspirowanego miastem”. Przykładem może być opracowany przez Ponti Design Studio autorski projekt autonomicznego, piętrowego tramwaju ISLAND dla Hongkongu. Jego wygląd inspirowany jest strzelistymi budynkami miasta. Traktowaniu tramwaju jako wizytówki miasta jest również powszechnie praktykowane np. we Francji.

2. Rozwój w zakresie pudeł wagonów

Różnorodność konstrukcji i konfiguracji tramwajów, a także wzrost wymagań funkcjonalnych spowodowały intensywny rozwój pudeł tramwajowych. Analizując współczesne rozwiązania możemy wyróżnić następujące aspekty:

- poprawa parametrów funkcjonalnych tramwaju, takich jak niska podłoga, jednoprzestrzenność, czy dostęp do transportu zbiorowego dla osób o ograniczonej mobilności,
- poprawa oddziaływania tramwaju z torem poprzez zmniejszanie nacisków koła na szynę,
- poprawa bezpieczeństwa, wynikająca z ujednoczenia wymagań związanych z wprowadzeniem jednolitych norm wytrzymałościowych (np. PN-EN 12663).

Powyższe aspekty sprawiają, że pudła tramwajów na przełomie XX i XXI wieku projektowane i budowane były nie tylko w oparciu o stal, ale również aluminium, odlewy oraz połączenia powyższych materiałów, jak również coraz częściej tworzywa sztuczne.

W latach 1980 do 2000 do budowy tramwajów wykorzystywana była głównie stal J235, zaliczana była do stali konstrukcyjnych ogólnego przeznaczenia. Stale te charakteryzują się stosunkowo wysoką odpornością na obciążenia zmienne oraz dobrą spawalnością. Jej wadą były słabe własności wytrzymałościowe. Z uwagi na rosnące wymagania, m.in. wytrzymałościowe, w tramwajach zaczęto stosować stale o wysokich własnościach wytrzymałościowych jak S355, 650MC, 750MC. Dzięki temu możliwe było również zoptymalizowanie ilości użytej stali, a co za tym idzie, zmniejszenie masy pojazdów.

W zakresie konstrukcji, najbardziej popularnym rozwiązaniem jest połączenie konstrukcji ramowej i samonośnej, gdzie część sił przenoszona jest przez ramę a część przez konstrukcję nadwozia i poszycie. Drugim równie często spotykanym rozwiązaniem jest zastosowanie konstrukcji samonośnej z przyklejonym poszyciem, które samo w sobie nie jest nośne. Przykładem zastosowania tej technologii jest tramwaj Solaris Tramino S110B (Braunschweig), w którym do konstrukcji nośnej nadwozia wklejony został dach wykonany z materiału warstwowego składającego się z profili i blach aluminiowych oraz spienionego tworzywa sztucznego. Jego zadaniem jest również przenoszenie sił.

W szczególnych przypadkach, np. ze względu na eksploatację tramwaju w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych (duże zasolenie powietrza w wyniku bliskości morza lub duża wilgotność powietrza) do projektowania i budowy konstrukcji stalowej stosuje się stal nierdzewną. Przykładem takiej konstrukcji jest tramwaj Tramlink (Vossloh Rail Vehicles).

Zastosowanie aluminium w konstrukcjach pudeł tramwajów ma na celu głównie obniżenie masy, co może mieć duży wpływ na osiągnięte parametry eksploatacyjne w tym zużycie energii elektrycznej przez tramwaj. Przykładem takiego rozwiązania jest tramwaj Siemens Combino. Istotną wadą konstrukcji wykonanych z aluminium jest ich koszt naprawy, w szczególności

naprawy powypadkowej. Wymaga ona specjalistycznego oprzyrządowania, co w znacznym stopniu podnosi koszty eksploatacji tramwajów i wyłącza je z eksploatacji na dłuższy czas.

3. Rozwój w zakresie bezpieczeństwa biernego i czynnego

Kolejnym istotnym wyzwaniem stawianym współczesnym tramwajom jest konieczność spełnienia restrykcyjnych norm bezpieczeństwa jazdy, mających na celu ochronę pasażerów i prowadzącego pojazd przed negatywnymi skutkami kolizji i wypadków drogowych z innymi uczestnikami ruchu drogowego. Wymagania odporności zderzeniowej określono w normie PN EN 15227, która szczegółowo opisuje jakie scenariusze przyjąć podczas projektowania tramwaju.

Bezpieczeństwo pasażerów oraz motorniczego zapewniają odpowiednio zaprojektowane strefy absorpcji energii zderzenia, które chronią przed skutkami kolizji dzięki zmniejszeniu przeciążeń oddziaływujących. Strefa absorpcji umieszczona jest w części czołowej tramwaju i chroni przed zderzeniami czołowymi, bocznymi i czołowobocznymi, pozwalając na zmniejszenie uszkodzeń oraz zniekształceń konstrukcji pojazdu przy zderzeniu.

Nowoczesne tramwaje posiadają kilka stopni absorpcji energii zderzenia, każdy dla innej prędkości jazdy. Przy niewielkiej prędkości zderzenia odkształceni ulegają jedynie gumowe elementy zderzaków, a dopiero przy większej sile odkształcają się absorbery stopnia drugiego. Konstrukcyjnie rozwiązanie to oparte jest na kontrolowanym zgniataniu specjalnie do tego celu zaprojektowanych absorberów, zakończonych belką zderzną z jednej strony, a zintegrowanych z konstrukcją stalową nadwozia z drugiej strony. Mogą być one wyposażone np. w elementy skrawające, pochłaniające energię poprzez skrawanie odpowiednio wyprofilowanych tulei. Stosuje się również tzw. plastry miodu, w których energia rozpraszana jest poprzez ich odkształcenie.

Ważną rolę w bezpieczeństwie odgrywają też **systemy ostrzegania przed kolizją**. Można tu wyróżnić kilka rozwiązań:

- przedni system ostrzegania przed kolizją, który wykrywa przeszkody przed tramwajem i alarmuje motorniczego,
- przedni system ostrzegania przed kolizją, który wykrywa przeszkody przed tramwajem, alarmuje motorniczego, a następnie uaktywnia hamulec awaryjny,
- boczny system ostrzegania przed kolizją, który zapobiega kolizjom podczas skręcania tramwaju jak również w przypadku pojazdu skręcającego przed tramwajem.

Systemy ostrzegania przed kolizją są obecnie powszechnie wpisywane do specyfikacji przetargowych w Europie jako wymóg. Taki system zamontowany będzie m. in. w nowym tramwaju Skody dla Kassel, którego produkcja rozpocznie się pod koniec 2024 r. Zasada działania systemu opiera się na utworzeniu wirtualnego tunelu przed tramwajem. System czujników (w tym LiDAR) odpowiada ze trójwymiarowe odwzorowanie w zasięgu 100-150 m w poziomym i pionowym polu widzenia i wykrywa w nim wszystkie przeszkody statyczne, a także dynamiczne. W bazowej wersji ostrzega on tylko motorniczego o możliwości kolizji, a w wersji zaawansowanej połączony jest z układem hamulcowym tramwaju.

Wprowadzanie takich systemów do tramwaju jest już pierwszym krokiem w kierunku jazdy autonomicznej, o której będzie mowa w dalszej części tego opracowania.

Kolejnym istotnym dla bezpieczeństwa jazdy tramwaju systemem jest system monitorowania kondycji motorniczego, który wykrywa senność lub rozproszenie uwagi na podstawie pozycji głowy, ruchu gałek ocznych, czasu trwania i częstotliwości mrugania, geometrii twarzy i powierzchni skóry. System taki wykrywa również stany krytyczne, np. zasłabnięcie prowadzącego pojazd.

Kolejną innowacją, wprowadzaną obecnie przez producentów tramwajów jest system ochrony pieszego przed skutkami potrącenia przez tramwaj – oczywiście mowa tu o niewielkiej prędkości jazdy, np. podczas ruszania z przystanku. Systemy takie dzielą się na dwie główne kategorie:

- odpowiednie ukształtowanie dolnej części czoła tramwaju,
- zastosowanie poduszki powietrznej pod tramwajem.

Ukształtowanie dolnej części czoła tramwaju w specjalny dziób, lub nawet jak w przypadku konstrukcji japońskich, specjalną ławkę, ma na celu uniknięcie wciągnięcia pieszego pod tramwaj. Pieszy potrącony przez pojazd niejako „przysiada” na dziobie pojazdu i jest następnie spychany z toru. W tramwajach eksploatowanych w Polsce takie rozwiązania nie są niestety spotykane.

Zastosowanie poduszki powietrznej pod tramwajem jako pierwszy zaprezentował Bombardier podczas targów Innotrans 2014 w Berlinie. System połączony jest z systemem antykolizyjnym: w przypadku wykrycia pieszego leżącego na torach, uaktywnia się przed pierwszym wózkiem tramwaju ogromna poduszka powietrzna, która uniemożliwia dostanie się pieszego pod koła pojazdu. Dodatkowo następuje samoczynne hamowanie awaryjne.

4. Rozwój w zakresie konstrukcji wózków i układów biegowych

Rozwój wózków i układów biegowych jest nierozzerwalnie związany z rozwojem tramwajów. Zmieniające się wymagania stawiane tramwajom, w tym m. in. dążenie do obniżenia poziomu podłogi oraz zwiększanie przestrzeni wewnątrz tramwaju wymuszają na konstruktorach ciągle poszukiwanie nowych rozwiązań.

Wybrane rozwiązanie dotyczące konstrukcji wózka, w tym rodzaju u sprężynowania I i II stopnia, ma bezpośredni wpływ na własności biegowe pojazdu, zarówno w aspekcie bezpieczeństwa przed wykołaceniem, jak również kosztów obsługi i eksploatacji zarówno pojazdu, jak i infrastruktury. Wybrana koncepcja ma więc wpływ na całość kosztów życia pojazdu, często trudnych do określenia na etapie formułowania specyfikacji przetargowej. Dlatego podczas definiowania koncepcji nowego pojazdu, należy wziąć pod uwagę następujące kwestie, szczególnie istotne dla współpracy pojazdu z torem:

- Rodzaj i liczbę wózków (wózki obrotowe oraz nieobrotowe),
- Rodzaj osadzenia kół (klasyczne zestawy kołowe, koła swobodne czy oś portalowa),
- Średnica kół.

Klasycznym rozwiązaniem, stosowanym w tramwajach wysokopodłogowych jest wózek skrętny z klasycznymi zestawami kołowymi, silnikami trakcyjnymi umieszczonymi wewnątrz ramy wózka i gniazdem czopa skrętu, umożliwiającym zarówno obrót wózka jak i przeniesienie

siły trakcyjnej z wózka na pudło tramwaju. Alternatywnie do czopa skrętu w nowszych wariantach wózków klasycznych można też spotkać łożysko wielkogabarytowe.

Zaletą wózków obrotowych (skrętnych) jest to, że mają duży zakres obrotu w stosunku do pudła pojazdu. Dzięki temu mogą lepiej wpisać się w łuki o małych promieniach, skręcając się pod pojazdem wcześniej, podczas gdy obrót pudła w łuku wymuszany jest dopiero później. Powoduje to mniejsze siły poprzeczne, a tym samym zmniejsza zużycie koła i szyny. Wózki sztywne natomiast, z uwagi na niewielką podatność skrętną, skręcają się w łuku prawie równocześnie z obrotem pudła, powodując występowanie większych sił poprzecznych.

Aby możliwe było obniżenie podłogi w tramwaju, konieczne było zastąpienie klasycznego wózka obrotowego z gniazdem czopa skrętu pośrodku, wózkiem z silnikami i przekładnią umieszczonymi na zewnątrz wózka. Oparcie nadwozia na wózku realizowane jest poprzez wielkogabarytowe sprężyny typu flexicoil lub miechy pneumatyczne. Wadą tego rozwiązania jest stosunkowo niewielki kąt obrotu wózka względem pudła, a przez to możliwe zwiększone oddziaływanie dynamiczne z torem podczas wjazdu w łuk.

Zastosowanie w wózku klasycznych zestawów kołowych uniemożliwia poprowadzenie w 100% niskiej podłogi, bez ramp i pochyłeń w obszarze wózka. W celu uzyskania całkowicie płaskiej podłogi w przestrzeni pasażerskiej (bez pochyłeń), konieczne staje się zastąpienie klasycznych osi zestawu kołowego osią portalową, lub też kołami niezależnymi. Jest to rozwiązanie stosowane w Europie zachodniej od wielu lat, nie tylko sprawdzone, ale również cały czas udoskonalane. Niestety polscy operatorzy nadal podchodzą do niego bardzo sceptycznie, w wielu postępowaniach przetargowych wręcz narzucając zastosowanie klasycznych zestawów kołowych.

W aspekcie napędu nowoczesnych wózków tramwajowych, dominują dwa główne rozwiązania. Pierwsze z nich, to dwa silniki trakcyjne na wózek, jeden po każdej stronie wózka. Silnik umieszczony po stronie lewej przekazuje napęd na obydwa koła z lewej strony, a silnik umieszczony po stronie prawej przekazuje napęd na obydwa koła z prawej strony wózka. Przykładem takiego rozwiązania jest wózek tramwaju Siemens Combino.

Bardziej zaawansowana koncepcja zakłada, że na wózku umieszczone są cztery silniki, każdy napędza jedno koło. Jest to układ dający najwięcej możliwości sterowania momentem obrotowym kół w zależności od warunków jazdy. Rozwiązanie takie można znaleźć np. w nowych tramwajach firmy Bombardier (obecnie Alstom). Wykorzystanie zalet elektronicznych systemów sterowania oraz konfiguracji układu napędowego z kołami indywidualnymi stwarza możliwość regulacji i dostosowywania wartości prędkości obwodowej każdego z kół. Przykładowo, podczas jazdy w łuku można zmieniać prędkość obrotową koła zewnętrznego i wewnętrznego, tak aby zapewnić toczenie bez poślizgu. Z kolei podczas jazdy na prostym odcinku toru, można uzyskać tzw. oś elektryczną, poprzez wyrównanie prędkości kątowych obydwu kół. Takie rozwiązanie ma znaczny wpływ na współpracę koła z szyną, zmniejszając tym samym poziom oddziaływań dynamicznych tramwaju na tor i zapewniając w konsekwencji mniejsze zużycie kół i toru tramwajowego.

W przypadku układów biegowych, ważnym trendem jest zastosowanie silników chłodzonych cieczą, w miejsce klasycznych silników chłodzonych powietrzem. Silniki chłodzone cieczą są mniejsze, tak więc łatwiej zabudować je na wózku. Charakteryzują się również niższym poziomem hałasu. Niestety, podobnie jak w przypadku zestawów kołowych, operatorzy

tramwajowej komunikacji miejskiej w polskich miastach niechętnie zamawiają tramwaje z silnikami chłodzonymi cieczą, często preferując w postępowaniach przetargowych rozwiązania klasyczne, a więc silniki chłodzone powietrzem.

Odrębną kwestią jest zmniejszenie masy nieusprężynowanej w danym pojeździe. Im jest ona wyższa, tym większe oddziaływanie dynamiczne pojazdu z torem, a w konsekwencji intensywniejsze może powodować zużycie infrastruktury. Dlatego też coraz częściej dąży się do zmniejszenia masy kół, poprzez np. wykorzystanie koła bosego z aluminium, podczas gdy obręcz, z uwagi na wymagania normatywne, pozostaje stalowa.

W przypadku decyzji o zakupie nowych pojazdów, powinno się również dążyć do zmniejszania maksymalnych nacisków zestawu kołowego na oś do wartości znacznie poniżej normatywnych 100 kN. Można to osiągnąć poprzez zmianę technologii wykonania pudła lub też zwiększenie liczby wózków (a więc zmianę koncepcji kinematycznej pojazdu). Oczywiście im lżejszy pojazd, tym wyższa może być finalnie jego cena (opracowanie i skonstruowanie takiego pojazdu wymaga większych nakładów pracy inżynierskiej) jednak w konsekwencji zmniejszy się zużycie zarówno na styku koła i szyny, jak również zużycie energii. Dlatego rzeczywiste wartości nacisków na oś powinny być istotnym kryterium oceny ofert w postępowaniach przetargowych.

5. Rozwój w zakresie komfortu jazdy

Komfort jazdy pasażera tramwaju jest zależny od bardzo wielu czynników, spośród których do najważniejszych możemy zaliczyć:

- komfort w zakresie drgań i hałasu,
- komfort w zakresie temperatury,
- komfort w zakresie ergonomii wnętrza pojazdu.

Zgodnie z Rozporządzeniem z dnia 2 marca 2011 roku, tramwaj w Polsce w zakresie hałasu musi spełniać następujące wymagania:

- poziom dźwięku nie może przekraczać 80 dB przy stałej prędkości 50 km/h, na torowisku wydzielonym z podkładami żelbetowymi na tłuczniu, w odległości 7,5 metra od osi toru, na wysokości $1,2 \pm 0,2$ metra od główki szyny, a w przypadku tramwaju wyprodukowanego przed wejściem rozporządzenia dopuszcza się poziom dźwięku A nie wyższy niż 85 dB,
- poziom dźwięku nie przekraczać 64 dB na postoju, w odległości 6 m od ściany nadwozia, na wysokości $1,2 \pm 0,2$ metra od główki szyny, a w przypadku wyposażonego w układ jazdy automatycznej, dla którego źródłem energii jest silnik spalinowy, dopuszcza się, aby poziomo dźwięku A mierzony na postoju nie przekraczał 80 dB.

Powyższe wymagania nie są wygórowane i nie motywują producentów do projektowania cichych pojazdów. Dlatego też istotna jest zmiana podejścia do problemu hałasu tramwajowego i wydane nowszych wytycznych w tym zakresie. Niezależnie od stopnia uszczegółowienia przepisów dotyczących sposobu i warunków dokonania pomiaru podstawą oceny pojazdu z punktu widzenia generowanego dźwięku jest równoważny poziom dźwięku korygowany krzywą ważącą A. Miara ta, choć powszechnie przyjęta i obowiązująca, nie jest dobrą miarą oceny efektów akustycznych pojazdu operującego w centrum miasta. Jest to miara ilościowa

ciśnienia akustycznego uwzględniająca własności fizjologiczne ucha ludzkiego. Natomiast ze względu na znaczący udział tramwaju w kreowaniu klimatu akustycznego obszarów silnie zurbanizowanych, należałoby oceniać aspekt psychoakustyczny oddziaływania tramwaju. W tym przypadku należy mówić o jakości dźwięku, a więc jego natężeniu w danym przedziale częstotliwości, z uwzględnieniem uciążliwości dla człowieka.

Wobec braku takich wytycznych, operatorzy zamawiając tramwaje wpisują w Specyfikacje Istotnych Warunków Zamówienia indywidualne wymagania dotyczące hałasu, różne dla każdego miasta.

Komfort cieplny definiowany jest jako „stan środowiska cieplnego, który u ludzi wywołuje zadowolenie i jest przez nich akceptowany”. Istotnym problemem związanym z komfortem zarówno w lecie jak i w zimie jest utrzymanie stałego rozkładu temperatur. Duża powierzchnia przeszklona, duża ilość drzwi, a także częste postoje na przystankach w celu wymiany pasażerów utrudniają utrzymanie prawidłowej temperatury w przestrzeni pasażerskiej.

Zarządy miast, które są organizatorami transportu publicznego, narzucają operatorom wytyczne w zakresie utrzymania odpowiedniej temperatury powietrza odpowiednio w okresie jesienno-zimowym oraz w okresie wiosennoletnim. Żeby utrzymać jednolitość rozkładu temperatury, należy zlikwidować miejsca niepożądanych strat cieplnych już na etapie projektowania i produkcji, wykorzystując doświadczenia i badania wykonane wcześniej. Do istotnych innowacji w tym zakresie zaliczyć można np. podgrzewaną podłogę w tramwajach, lub też wykorzystanie pomp ciepła.

Kolejną istotną cechą komfortu podczas podróżowania tramwajem jest ergonomia wnętrza w tramwaju. Do głównych aspektów należą:

- rozmieszczenie foteli,
- przestrzeń dla pasażerów stojących,
- rozmieszczenie poręczy, – układ podłogi w tramwaju,
- łatwość wejścia do tramwaju z poziomu wysepki przystankowej, a także z poziomu ulicy.

Wielu operatorów nie przywiązuje wagi kwestii rozmieszczenia foteli w pojazdach, a także wynikających z niej przestrzeni na nogi dla osób siedzących. W konsekwencji, większość polskich konstrukcji tramwajów jest skonstruowanych w taki sposób, że miejsca siedzące nie zapewniają komfortowej podróży. Tymczasem szczegółowe wytyczne w zakresie odległości foteli między sobą znaleźć można znaleźć np. w Regulaminie nr 107 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów kategorii M2 i M3 w zakresie ich budowy ogólnej [2018/237]. Dokument ten nie jest niestety przeważnie przywoływany w przetargach tramwajowych, a producenci nie biorą pod uwagę wymogów w nim zawartych. Nie chcę tutaj wskazywać konkretnych przykładów, wspomnę tylko, że wykonana została szczegółowa analiza w tym zakresie dla różnych tramwajów polskiej i niemieckiej produkcji i w zakresie komfortu wnętrza mamy niestety w Polsce bardzo wiele do zrobienia.

W obecnych czasach za miarę komfortu można również uznać dostęp do WiFi, innowacyjne systemy emisji reklam, bezgotówkowe automaty biletowe a także wiele innych urządzeń pomocniczych w które wyposażane są nowoczesne tramwaje – np. systemy dostosowania

barwy oświetlenia wnętrza tramwaju do temperatury panującej na zewnątrz, tak aby stworzyć wrażenie większego komfortu cieplnego.

6. Systemy jazdy autonomicznej

Autonomiczność w tramwajach odnosi się do zdolności tramwaju do poruszania się bez udziału kierującego pojazdem, bądź też z minimalnym jego udziałem (w zależności od zastosowanego poziomu jazdy autonomicznej). Technologia jazdy autonomicznej ma na celu zautomatyzowanie eksploatacji tramwaju, co może przynieść wiele korzyści, takich jak zwiększenie bezpieczeństwa, poprawa efektywności operacyjnej oraz zminimalizowanie ryzyka błędu ludzkiego.

Najważniejsze cechy systemu jazdy autonomicznej:

- przewidywalność (zadanie ustalonego taktu ruchu, prędkości), – zwiększenie płynności, efektywności ruchu,
- zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa (poprzez zastosowanie technologii multisensorowych),
- szybka reakcja na zdarzenia losowe,
- minimalizacja ryzyka kolizji i wypadków.

Wdrożenie systemu jazdy autonomicznej wiąże się z koniecznością opracowania dedykowanego systemu wyższego poziomu w zakresie zarządzania flotą, a także przepływem i gromadzeniem danych.

Pierwszy na świecie autonomiczny tramwaj zaprezentowany został podczas targów InnoTrans 2018 w Berlinie przez Siemens Mobility, we współpracy z Verkehrsbetriebe Potsdam GmbH (ViP). W ramach projektu Spółka ViP dostarczyła tramwaj Siemens Combino. Ten eksperymentalny pojazd jest wyposażony w systemy LiDAR, radar oraz kamery, które służą jako „cyfrowe oczy” rejestrując ruch uliczny wokół pojazdu. Dzięki temu możliwa jest prognoza sytuacji na drodze i włączenie odpowiednich systemów w tramwaju. Sztuczna inteligencja reaguje na sygnalizację tramwajową, zatrzymuje pojazd na przystankach i reaguje automatycznie w przypadku wykrycia zagrożeń, takich jak piesi na torowisku lub przejściu dla pieszych oraz inne pojazdy na kursie tramwaju. Siemens Mobility jest pierwszą firmą której udało się opracować i przetestować w celach badawczych autonomiczny tramwaj.

W 2020 r. pierwszy w Polsce tramwaj autonomiczny, bez motorniczego w kokpicie, przejechał trasę z przystanku Muzeum Narodowe do Cichego Kącika w Krakowie. W ramach realizowanego projektu badawczo-rozwojowego został zaprojektowany i wykonany układ sterowania autonomicznego wagonu tramwajowego typu 126N produkcji Newag SA, który komunikuje się z głównym sterownikiem tramwaju umożliwiając jazdę bez motorniczego w kabinie. System zapewnia precyzyjne sterowanie prędkością, sterowanie drzwiami, dzwonkiem oraz nadrzędnością sygnałów z pokładu pojazdu, np. hamulca bezpieczeństwa, czy hamowania nagłego.

7. Ekologiczne źródła zasilania

Stosowanie ekologicznych źródeł zasilania staje się coraz bardziej popularne z uwagi na wzrastające zanieczyszczenie środowiska oraz potrzebę redukcji emisji gazów cieplarnianych. Tramwaj elektryczny jest jednym z najbardziej ekologicznych pojazdów w systemach transportu miejskiego. Jednakże dostarczanie energii z sieci trakcyjnej jest tylko jednym z wielu sposobów zasilania pojazdu. Poniżej przedstawiono kilka alternatyw, rozwijanych obecnie przez czołowych europejskich producentów.

Wodorowe ogniwa paliwowe

Wodorowe ogniwa paliwowe są jednym z najbardziej obiecujących ekologicznych źródeł zasilania w tramwajach. Działają one poprzez reakcję chemiczną między wodorem i tlenem, wytwarzając energię elektryczną, a jedynym produktem ubocznym jest czysta woda. Stosowanie wodorowych ogniw paliwowych eliminuje emisję szkodliwych substancji do atmosfery i przyczynia się do poprawy jakości powietrza w miastach.

Według wielu ekspertyz optymalnym rozwiązaniem układu napędowego tramwaju wodorowego jest implementacja w konstrukcji pojazdu akumulatorów, super kondensatorów oraz wodorowych ogniw paliwowych. Umożliwia to wykorzystanie potencjału każdego z wymienionych podzespołów i minimalizację wpływu ich ograniczeń.

Cechy napędów wodorowych w tramwaju:

- zwiększony zasięg w porównaniu z pojazdami bateryjnymi,
- niezależność tramwaju od energii z sieci trakcyjnej (możliwość wyeliminowania sieci trakcyjnej z krajobrazu miasta),
- odzysk energii w konkretnych fazach ruchu pojazdu,
- dobrze rokująca perspektywa rozwoju napędu wodorowego.

Do głównych wyzwań należą:

- konieczność budowy infrastruktury do tankowania wodoru,
- konieczność zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa w transporcie i magazynowaniu wodoru. Innowacyjną technologię wykorzystuje m.in. tramwaj opracowywany przez Hyundai Rotem, w którym połączono zalety wodorowych ogniw paliwowych oraz akumulatorów, tworząc hybrydowy system napędowy. Wodorowe ogniwo paliwowe w tramwaju przekształca dostarczany z zbiornika wodór w energię elektryczną. Jednocześnie, system magazynowania energii, czyli akumulator, gromadzi nadmiar energii, aby można ją było wykorzystać w późniejszym czasie. Dzięki temu hybrydowemu podejściu tramwaj może efektywnie wykorzystywać energię elektryczną zarówno podczas jazdy, jak i w momencie, gdy zapotrzebowanie na energię jest mniejsze. To połączenie pozwala na zoptymalizowanie działania tramwaju, zwiększenie efektywności energetycznej oraz ograniczenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery.

Akumulatory elektryczne

Akumulatory elektryczne są powszechnie stosowane jako dodatkowe źródło zasilania w tramwajach elektrycznych, np. podczas jazdy przez ściśle centrum miasta, na odcinkach

bez napowietrznej sieci trakcyjnej. Tramwaje zasilane akumulatorami są wolne od emisji spalin i mogą być ładowane z odnawialnych źródeł energii, takich jak energia słoneczna czy wiatrowa. Ponadto, akumulatory elektryczne mogą również współpracować z innymi źródłami energii, takimi jak wodorowe ogniwa paliwowe, w celu zapewnienia hybrydowego i bardziej zrównoważonego systemu zasilania. Należy jednak pamiętać, że akumulatory w znacznym stopniu zwiększają masę tramwaju, a co za tym idzie, również naciski na oś.

Odnawialne źródła energii

Tramwaje mogą być zasilane energią elektryczną pochodzącą z odnawialnych źródeł energii, takich jak energia słoneczna, wiatrowa, wodna czy geotermalna. Wykorzystanie takich źródeł energii pozwala na zmniejszenie negatywnego wpływu transportu publicznego na środowisko, poprzez redukcję emisji gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń.

Przykładem tramwaju zasilanego energią odnawialną jest japoński tramwaj Lightline, łączący dwa japońskie miasta - Tochigi z miastem Haga. Również jeden z ostatnio zmodernizowanych w Poznaniu tramwajów Siemens Combino ma w ramach pilotażu zamontowane na dachu panele fotowoltaiczne.

Systemy magazynowania energii:

Coraz powszechniej pojazdy tramwajowe wyposażane są w tzw. moduły dojazdowe. Wykorzystują one najczęściej zestawy akumulatorów lub układy łączone tj. akumulatory + superkondensatory. Jest to rozwiązanie optymalne dla dedykowanych, ściśle wyznaczonych linii dla tego rodzaju pojazdów.

Cechy systemów magazynowania energii on-board:

- możliwość prowadzenia pojazdu np. w przypadku awarii sieci trakcyjnej,
- ładowanie akumulatorów może odbywać się poprzez rekuperację energii w fazie hamowania lub podczas postoju pojazdu w strefie ładowania, zabudowanej w ramach przystanku/pętli,
- przy aktualnie dostępnej technologii koszt życia napędów bateryjnych jest zwiększony (obecnie dąży się do rozwoju technologii i redukcji kosztów jej wdrożenia, utrzymania i utylizacji).

Do głównych minusów tego rozwiązania należą:

- wrażliwość akumulatorów i superkondensatorów na niskie i wysokie wartości temperatur,
- konieczność stosowania dedykowanych systemów grzewczo
- klimatyzacyjnych.

Systemy diagnostyczne w tramwajach:

Diagnostyka w tramwajach to proces monitorowania, identyfikowania i diagnozowania ewentualnych problemów technicznych, które mogą wystąpić podczas jazdy, zarówno w samym pojeździe, jak i na infrastrukturze torowo-sieciowej. Jest to kluczowy element utrzymania sprawnego funkcjonowania taboru tramwajowego oraz zapewnienia bezpieczeństwa pasażerów i pracowników. Tramwaje mogą być wyposażone w zaawansowane systemy monitorowania, które stale zbierają dane na temat pracy różnych podsystemów, takich

jak silniki, układy hamulcowe, systemy elektryczne, układy zawieszenia itp. Te systemy pozwalają na ciągłe monitorowanie kluczowych parametrów pracy tramwaju i identyfikowanie ewentualnych nieprawidłowości.

W przypadku wykrycia problemów, systemy diagnostyczne mogą generować komunikaty alarmowe i ostrzeżenia dla operatorów tramwaju lub personelu technicznego. Dzięki temu można szybko zareagować na potencjalne zagrożenia i podjąć działania naprawcze.