



---

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**

---

Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

mgr inż. Artur Gołowicz

---

ROZPRAWA DOKTORSKA

---

„Systemy zarządzania energią  
hamowania pojazdów elektrycznych  
i hybrydowych”

Promotor:

dr hab. inż. Andrzej Wojciechowski, prof. AGH

Poznań  
marzec 2022 r.

## PODZIĘKOWANIA

*Dzięki kilku osobom, które miały wpływ na powstanie i ostateczny kształt mojej pracy doktorskiej chciałbym w tym miejscu serdecznie podziękować.*

*Składam serdeczne wyrazy wdzięczności przede wszystkim, na ręce mojego Promotora dr hab. inż. Andrzeja Wojciechowskiego, prof. AGH za całą przekazaną mi przez te lata wiedzę i nieocenioną pomoc, zawsze chętnie poświęcając czas oraz niezliczone godziny konsultacji kolejnych wersji rozprawy doktorskiej, za dokonane poprawki oraz uwagi, które pozytywnie wpłynęły na końcowy kształt. Ponadto dziękuję za wspólne opracowywanie artykułów naukowych, megabajty klasycznej informacji przesyłanej pomiędzy nami za pomocą Internetu oraz wiele minut rozmów telefonicznych.*

*Szczególne podziękowania składam prof. dr hab. inż. Andrzejowi Świderskiemu, któremu chciałbym podziękować za koleżeństwo, motywację, zrozumienie i wszelką pomoc.*

*Jestem również ogromnie wdzięczny moim Przełożonym i Kolegom z Instytutu Transportu Samochodowego, w którym miałem niebywałą przyjemność współpracować w zakresie realizacji dysertacji.*

*Wreszcie – bardzo dziękuję Rodzicom – za silne emocjonalne i pozytywne wsparcie, na których zawsze mogłem liczyć, którzy mnie wspierali na co dzień oraz niejednokrotnie odciążali mnie w moich obowiązkach domowych oraz rodzicielskich.*

*Słowa podziękowania należą się także moim przyjaciołom, którzy także mnie wspierali w szczególności Ryszardowi Michalskiemu.*

*Ponadto składam podziękowania za wszelką pomoc, życzliwość i zrozumienie pracownikom Politechniki Poznańskiej z Instytutu Silników Spalinowych i Napędów w szczególności prof. dr hab. inż. Jerzemu Merkiszowi.*

*Bardzo Wam Wszystkim Dziękuję!*

# 1 SPIS TREŚCI

<b>1.</b>	<b>WSTĘP</b> .....	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>POJAZDY ELEKTRYCZNE I HYBRYDOWE</b> .....	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>HOMOLOGACJA POJAZDÓW</b> .....	<b>10</b>
3.1.	REGULACJE PRAWNE – RODZAJE HOMOLOGACJI .....	10
3.2.	HOMOLOGACJA TYPU UE CAŁEGO POJAZDU (EUWVTA) .....	11
3.3.	HOMOLOGACJA TYPU UE DLA POJAZDÓW PRODUKOWANYCH W MAŁYCH SERIACH (EUSSTA).....	12
3.4.	KRAJOWA HOMOLOGACJA TYPU DO POJAZDÓW PRODUKOWANYCH W MAŁYCH SERIACH (NSSTA) .....	12
3.5.	UNIJNE INDYWIDUALNE DOPUSZCZENIE POJAZDU (EUIVA).....	13
3.6.	KRAJOWE INDYWIDUALNE DOPUSZCZENIE POJAZDU (NIVA).....	14
3.7.	WIELOSTOPNIOWA HOMOLOGACJA TYPU UE (MSTA) .....	14
3.8.	HOMOLOGACJA POJAZDÓW AUTONOMICZNYCH W OPARCIU O WYŁĄCZENIA DLA NOWYCH TECHNOLOGII .....	15
3.9.	KATEGORIE POJAZDÓW W PROCESIE HOMOLOGACJI.....	16
3.10.	KLASYFIKACJA POJAZDÓW HYBRYDOWYCH W ŚWIETLE PRZEPISÓW HOMOLOGACYJNYCH .....	18
<b>4.</b>	<b>WYMAGANIA HOMOLOGACYJNE POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH I AUTOBUSÓW W ZAKRESIE HAMOWANIA</b> .....	<b>20</b>
4.1.	TYPY BADAŃ HOMOLOGACYJNYCH ZGODNIE Z REGULAMINEM ONZ NR 13 .....	20
4.2.	BADANIE TYPU 0 .....	22
4.3.	BADANIE TYPU I .....	23
4.4.	BADANIE TYPU II I IIA.....	25
4.5.	WYMAGANIA HOMOLOGACYJNE DLA TESTÓW TYPU III .....	27
<b>5.</b>	<b>CEL I ZAKRES PRACY</b> .....	<b>28</b>
<b>6.</b>	<b>METODA BADAŃ POJAZDÓW ZGODNIE Z TESTAMI TYPU II I IIA</b> .....	<b>34</b>
<b>7.</b>	<b>OBLICZENIA ENERGII POJAZDU W TESTACH TYPU II I IIA NA PODSTAWIE NORMY ISO 12161:2006 ORAZ REGULAMINU ONZ NR 13</b> .....	<b>40</b>
<b>8.</b>	<b>STOSOWANE OBECNIE UKŁADY HAMOWANIA DŁUGOTRWAŁEGO</b> .....	<b>42</b>
8.1.	ZALETY STOSOWANIA UKŁADÓW HAMOWNIA DŁUGOTRWAŁEGO .....	42
8.2.	ZWALNIACZE HYDRODYNAMICZNE .....	46
8.3.	ZWALNIACZE ELEKTROMAGNETYCZNE .....	47
8.4.	ZWALNIACZE SILNIKOWE .....	49
<b>9.</b>	<b>ROZWÓJ SAMOCHODÓW ELEKTRYCZNYCH, W TYM CIĘŻAROWYCH I AUTOBUSÓW</b> .....	<b>50</b>
9.1.	RYNEK POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH I INFRASTRUKTURA DROGOWA .....	50
9.2.	ANALIZA ROZWOJU AUTONOMICZNYCH POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH W TYM CIĘŻAROWYCH I AUTOBUSÓW .....	55
9.3.	ROZWÓJ POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH W TYM CIĘŻAROWYCH I AUTOBUSÓW .....	59
<b>10.</b>	<b>UKŁADY ODZYSKIWANIA ENERGII W UKŁADACH HAMULCOWYCH</b> .....	<b>63</b>
10.1.	RODZAJE UKŁADÓW ODZYSKIWANIA ENERGII I SPOSOBY JEJ MAGAZYNOWANIA .....	63
10.2.	ELEKTRYCZNE UKŁADY ODZYSKIWANIA ENERGII I JEJ MAGAZYNOWANIE W AKUMULATORACH .....	64
10.3.	ELEKTRYCZNE UKŁADY ODZYSKIWANIA ENERGII I JEJ MAGAZYNOWANIE W KONDENSATORACH .....	67
10.4.	MECHANICZNE I ELEKTROMECHANICZNE UKŁADY ODZYSKIWANIA ENERGII I JEJ MAGAZYNOWANIE W POSTACI ENERGII MECHANICZNEJ.....	67
10.5.	CIŚNIENIOWE UKŁADY ODZYSKIWANIA ENERGII I MAGAZYNOWANIE I JEJ MAGAZYNOWANIE W POSTACI SPRĘŻONEGO MEDIUM .....	72

<b>11.</b>	<b>UKŁADY NAPĘDOWE I ŹRÓDŁA ENERGII W POJAZDACH ELEKTRYCZNYCH I HYBRYDOWYCH.....</b>	<b>74</b>
11.1.	OBECNIE STOSOWANE ROZWIĄZANIA UKŁADÓW NAPĘDOWYCH W POJAZDACH ELEKTRYCZNYCH I HYBRYDOWYCH .....	74
11.2.	STOSOWANE SILNIKI W POJAZDACH ELEKTRYCZNYCH I HYBRYDOWYCH.....	78
11.3.	STOSOWANE ROZWIĄZANIA AKUMULATORÓW W POJAZDACH ELEKTRYCZNYCH I HYBRYDOWYCH .....	85
11.4.	STOSOWANE ŹRÓDŁA ENERGII I GŁÓWNE ODBIORNIKI W AUTOBUSACH ELEKTRYCZNYCH.....	90
<b>12.</b>	<b>PROBLEMY HOMOLOGACYJNE AKUMULATOROWYCH POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH W ZAKRESIE HAMOWANIA DŁUGOTRWALEGO .....</b>	<b>94</b>
<b>13.</b>	<b>KALKULACJA ENERGII POJAZDU NA PODSTAWIE TESTÓW TYPU II I IIA .....</b>	<b>96</b>
13.1.	KALKULACJA MOCY WYNIKAJĄCEJ Z ENERGII POTENCJALNEJ CIĘŻKOŚCI .....	96
13.2.	MOŻLIWOŚCI I STOSOWANE STRATEGIE SYSTEMÓW ODZYSKIWANIA ENERGII W POJAZDACH ELEKTRYCZNYCH .....	99
13.3.	BILANS ENERGETYCZNY GŁÓWNYCH ODBIORNIKÓW PRĄDU STOSOWANYCH W AUTOBUSACH ELEKTRYCZNYCH .....	104
13.4.	PODSUMOWANIE .....	107
<b>14.</b>	<b>ALTERNATYWNE WYMAGANIA DLA AKUMULATOROWYCH POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH.....</b>	<b>108</b>
<b>15.</b>	<b>OSZACOWANIE STANU NAŁADOWANIA AKUMULATORÓW POJAZDU .....</b>	<b>110</b>
15.1.	WSKAŹNIK STOSOWANY W CELU OCENY STANU NAŁADOWANIA AKUMULATORÓW POJAZDU.....	110
15.2.	OKREŚLENIE STANU NAŁADOWANIA AKUMULATORÓW ELEKTRYCZNYCH I ELEKTROCHEMICZNYCH .....	111
15.3.	METODY OBLICZANIA SoC AKUMULATORÓW LITOWO-JONOWYCH .....	113
15.5.	METODY OBLICZANIA POZOSTAŁEJ ENERGII W PRZYPADKU AKUMULATORÓW ENERGII MECHANICZNEJ LUB SPRĘŻONEGO MEDIUM.....	114
<b>16.</b>	<b>MATERIAŁY STOSOWANE W HAMULCACH CIERNYCH POJAZDÓW .....</b>	<b>116</b>
16.1.	WYMAGANIA STAWIANE MATERIAŁOM .....	116
16.2.	MATERIAŁY CIERNE .....	117
16.3.	SKŁAD MATERIAŁÓW CIERNYCH STOSOWANYCH W HAMULCACH POJAZDÓW .....	119
16.4.	MATERIAŁY STOSOWANE NA TARCZE I BĘBNY HAMULCOWE .....	123
<b>17.</b>	<b>WPŁYW CZYNNIKÓW ZEWNĘTRZNYCH NA WSPÓŁCZYNNIK TARCIA MATERIAŁÓW STOSOWANYCH W HAMULCACH CIERNYCH POJAZDÓW.....</b>	<b>128</b>
17.1.	ZALEŻNOŚĆ WSPÓŁCZYNNIK TARCIA OD WILGOTNOŚCI POWIETRZA .....	128
17.2.	ZALEŻNOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA OD ZMIAN CIŚNIENIA W UKŁADZIE HAMULCOWYM .....	129
17.3.	ZALEŻNOŚĆ WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA OD ZMIAN TEMPERATURY POWIERZCHNI ROBOCZEJ TARCZY LUB BĘBNA HAMULCOWEGO.....	136
<b>18.</b>	<b>ESTYMATOR HAMOWANIA .....</b>	<b>138</b>
18.1.	ZARYS ALGORYTMU STEROWANIA .....	138
18.2.	PROPOZYCJA TECHNICZNEGO ROZWIĄZANIA I WDROŻENIA ZAPROPONOWANEGO ROZWIĄZANIA.....	144
<b>19.</b>	<b>PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE .....</b>	<b>149</b>
	<i>Bibliografia: .....</i>	<i>152</i>
	<i>Spis rysunków .....</i>	<i>159</i>
	<i>Spis tabel .....</i>	<i>161</i>
	<i>Spis użytych w pracy skrótów .....</i>	<i>162</i>
	<i>Streszczenie .....</i>	<i>165</i>
	<i>Abstract .....</i>	<i>167</i>

## 1. Wstęp

W XXI wieku zwiększyło się zainteresowanie pojazdami elektrycznymi (EV), jako obiecujące rozwiązanie problemów związanych z globalną emisją gazów cieplarnianych. W najbliższych latach nastąpi znaczna potrzeba zastąpienia pojazdów z silnikami spalinowymi przez pojazdy elektryczne. Pojazdy elektryczne w tym rozwiązania napędu hybrydowego (HEV) czy pojazdy tzw. „mild-hybrid” często określane jako „łagodne hybrydy”, pojazdy hybrydowe typu plug-in oraz pojazdy czysto elektryczne (PEV) i pojazdy elektryczne z ogniwami paliwowymi (FCEV) coraz częściej znajdują nabywców. Pojazdy elektryczne w emitują niewielkie ilości zanieczyszczeń powietrza w miejscach ich eksploatacji oraz powodują zmniejszenie emisji hałasu z elementów w których występują skojarzenia tarciove (opona-jezdni, układ hamulcowy, układ napędowy). Pojazdy elektryczne emitują mniej hałasu niż pojazdy wyposażone w silnik spalinowy. Pojazdy elektryczne oferują możliwość zastąpienia paliw ropopochodnych (węglowodorowych) energią elektryczną wytwarzaną z odnawialnych źródeł energii. Poprzez szerokie wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (OZE) możliwe jest wyprodukowanie czystej energii.

Pojazdy niskoemisyjne są przyjazne dla środowiska, autonomizacja, rozwój transportu miejskiego oraz wspólne użytkowanie pojazdów są dla branży motoryzacyjnej nie lada problemem, gdyż nowe rozwiązania muszą zostać usankcjonowane poprzez akty prawne, a nowe technologie muszą być zaakceptowane nie tylko przez rządy państw (polityków), ale przede wszystkim przez klientów (społeczeństwo).

Przemysł motoryzacyjny znajduje się w takiej sytuacji, gdzie prawne wymagania dotyczące emisji określa Komisja Europejska, które w przypadku Dyrektyw muszą zostać zaimplementowane do krajowego ustawodawstwa przez poszczególne państwa. W przypadku Rozporządzeń Komisji Unii Europejskiej akty prawne są automatycznie wiążące w całej UE. Wprowadzane restrykcje w znacznym stopniu mają poprawić kondycje naszego środowiska oraz pozwolić społeczeństwu na większy komfort życia w lepszych warunkach środowiskowych. Kolejne ograniczenia emisji, czy hałasu pojazdów są wprowadzane w bardzo szybkim tempie przez polityków UE. Producenci w celu sprostania nowym wymaganiom zostali zobligowani do produkowania pojazdów o napędzie elektrycznym. Obecnie produkcja pojazdów elektrycznych nie jest nastawiona tylko na produkcję samochodów osobowych. Producenci widzą potrzebę rynku do wprowadzenia pojazdów elektrycznych innych kategorii, jak autobusy międzymiastowe, turystyczne czy samochody ciężarowe. W miastach gdzie jest rozbudowana sieć transportu publicznego realizowanego głównie przez autobusy, rozwijana jest koncepcja transportu oparta o elektryczne pojazdy akumulatorowe (BEV). Takie rozwiązanie transportu miejskiego zapewnia większy komfort życia mieszkańców, poprzez ograniczenie emisji szkodliwych związków chemicznych oraz ograniczenie hałasu.

Autobusy o napędzie akumulatorowym (BEV), mają w przeciwieństwie do tramwajów czy trolejbusów, które mogą jedynie poruszać się po wyznaczonych poprzez trakcję trasach, możliwość poruszania się po dowolnie wyznaczonej trasie. Pewnego rodzaju nowością są tzw. trolejbusy akumulatorowe, które z uwagi na brak sztywnej definicji, klasyfikuje się do tej grupy jeżeli mogą pokonać odcinek ponad 1 km za pomocą energii zgromadzonej w akumulatorach trakcyjnych. Akumulatorowe autobusy elektryczne są coraz częściej stosowane nie tylko w centrach miast, ale również na strefach tzw. podmiejskich. Znane firmy produkujące autobusy takich marek jak: MAN, SCANIA czy SOLARIS oraz wiele innych posiadają już w swojej ofercie autobusy miejskie, a nawet podmiejskie wyposażone w napęd czysto

akumulatorowy. Wymagania rynku wprowadzania pojazdów elektrycznych w szczególność ciężarowych i autobusów innych niż miejskie, wymaga też pewnych zmian prawnych, które w tym przypadku nie nadążają za nowoczesnymi konstrukcjami pojazdów. Takim przykładem jest Regulamin ONZ nr 13 Organizacji Narodów Zjednoczonych (ONZ) odnoszący się do jednolitych przepisów dotyczących homologacji pojazdów kategorii M, N i O w zakresie procesu hamowania. Zawarte tam wymagania w szczególności testy pojazdów na zgodność układu hamulcowego z wymaganiami dla hamowania długotrwałego (testy II i IIA) zostały opracowane dla pojazdów wyposażonych w silnik spalinowy. Takie pojazdy musiały być (z pewnymi wyjątkami) wyposażone w dodatkowe urządzenie tzw. zwalniacz (retarder). W pojazdach ciężarowych i autobusach konieczne było zastosowanie dodatkowych urządzeń ponieważ opór ruchu stawiany jedynie przez silnik spalinowy nie generował odpowiedniego i wystarczającego momentu hamującego podczas testów hamowania długotrwałego (testu II lub IIA).

W przypadku wymagań zawartych w Regulaminie ONZ nr 13 przed wprowadzeniem dodatku 18 dla pojazdów elektrycznych, podczas testów homologacyjnych typu II i IIA akumulatory trakcyjne musiały być naładowane do co najmniej 95% pojemności. Takie wymaganie uniemożliwiało podczas badań homologacyjnych odzyskanie energii podczas hamowania przez układ napędowy, zgromadzenia jej w akumulatorach i ponownego jej wykorzystania. Energia odzyskana podczas hamowania nie mogła zostać zgromadzona w akumulatorach trakcyjnych z powodu braku wystarczającej pojemności akumulatora wynikający z konieczności naładowania akumulatora do 95% podczas tego testu. Energia musiała zostać rozproszona w postaci ciepła, co najczęściej odbywało się za pomocą rezystora. Znaczna masa takich rezystorów i bardzo rzadkie ich wykorzystanie, powoduje konieczność zmniejszenia ładowności pojazdu, a więc zanika aspekt ekonomiczny wykorzystania pojazdów elektrycznych (mniejsza ładowność tj. mniejsza liczba pasażerów, mniejsza masa ładunku). Ponadto, rezystory hamowania są urządzeniami, które czasami wymagają dodatkowych systemów np. chłodzenia cieczą, chłodzenia wymuszonego.

Prawie zawsze występuje zjawisko - „coś kosztem czegoś” i dlatego w pracy oszacowano możliwości zastosowania mniejszych rezystorów hamowania o mniejszych masach, a część energii odzyskanej poprzez elektryczny układ napędowy rozproszyć nie tylko w rezystorze hamowania ale także za pomocą urządzeń peryferyjnych dostępnych w autobusach. Urządzenia stosowane w szczególności w autobusach takie jak układ klimatyzacji przestrzeni pasażerskiej, przestrzeni kierowcy, układ ogrzewania i chłodzenia akumulatorów czy wspomaganie układu kierowniczego. Takie zarządzanie energią pozwoli rozproszyć część energii za pomocą tych urządzeń, a pozostałą część w rezystorze hamowania. Takie rozwiązanie zarządzania energią pozwoli na zastosowanie mniejszego rezystora, a więc również o mniejszej masie. Takie rozwiązanie poprawi ekonomię i efektywność wykorzystania elektrycznych autobusów oraz pojazdów ciężarowych. W pracy zajęto się obecnie stosowanymi w pojazdach rozwiązaniami umożliwiającymi hamowanie długotrwałe, przeprowadzono obliczenia ilości energii, jaką należy rozproszyć podczas testu typu II i IIA oraz określono możliwości rozproszenia tej energii poprzez urządzenia znajdujące się w typowym autobusie.

W pracy zajęto się również aspektem opracowania wytycznych dla estymatora hamowania. Takie rozwiązanie jest preferowane przez przemysł i popierane przez ekspertów. Urządzenie będzie wymagało zmian prawnych w postaci zmian do Regulaminu ONZ nr 13 i jednocześnie opracowania założeń do tego rozwiązania.

W pracy podjęto opracowanie wytycznych dla wdrożenia takiego rozwiązania. Estymator hamowania powinien uwzględniać wiele czynników zarówno wynikających z mechaniki tarcia skojarzenia materiału układu hamulcowego pojazdów, stanu pojemności akumulatorów jak i kontrolę otoczenia oraz ukształtowania terenu po którym będzie przemieszczał się pojazd. Kontrolę nad ukształtowaniem terenu na drodze pojazdu umożliwią czujniki (montowane w pojazdach autonomicznych) oraz systemy pozycjonowania (GPS Navstar, Glonass, Galileo, Compass), które w połączeniu z odpowiednimi mapami umożliwią analizę ukształtowania terenu i profilu drogi po której będzie poruszał się pojazd. Można uwzględnić również działania czujników w które wyposażone są nowoczesne a w przyszłości autonomiczne samochody oraz przekazywanie na bieżąco informacji poprzez bezprzewodowe transmisje danych pomiędzy pojazdem a infrastrukturą oraz między pojazdami realizujące potrzeby bezpieczeństwa ruchu drogowego.

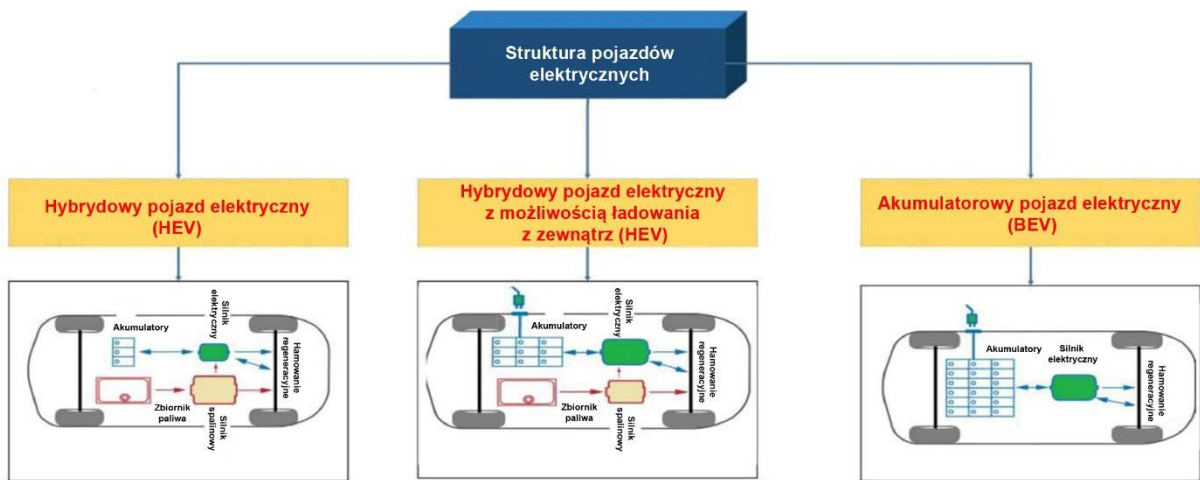
Główne czynniki mające wpływ na parametry hamowania pojazdu wynikają przede wszystkim z czynników środowiskowych jakie występują w węźle tarcia hamulca oraz kontaktu opony z nawierzchnią. Jednocześnie parametry te muszą być to łatwe do zmierzenia poprzez ogólnodostępne czujniki mierzące proste parametry fizyczne. Na podstawie publikacji niewątpliwie takim czynnikiem jest temperatura na powierzchni współpracy materiału okładziny ciernej z tarczą lub bębniem hamulcowym. Drugim bardzo istotnym czynnikiem jest występująca wilgotność powietrza, trzecim ciśnienie medium w elementach wykonawczych układu hamulcowego, które wpływa na siłę docisku okładziny ciernej do tarczy lub bębna hamulcowego. Te parametry powinny być w prosty i łatwy sposób mierzone poprzez czujniki zamontowane na pojeździe. Dodatkowo w pracy zaproponowano założenia do algorytmu oceny możliwej (pozostałej) skuteczności hamowania pojazdu.

## 2. Pojazdy elektryczne i hybrydowe

Istnieje różnica pomiędzy określeniami ogólnie przyjętymi takimi jak pojazdy elektryczne, hybrydowe pomiędzy ogólnie stosowanym nazewnictwem w porównaniu do stosowanego w procesie homologacji pojazdów. W ogólnym nazewnictwie pojazdy elektryczne dzielimy na:

- hybrydowe (HEV – hybrid electric vehicle),
- hybrydowe z możliwością ładowania z zewnętrznych źródeł energii (PHEV – plug-in hybrid electric vehicle ),
- pojazdy akumulatorowe (BEV – Battery Electric Vehicle).

W procesie homologacji dla tych pojazdów używa się określenia PEV (Pure Electric Vehicle). Podział pojazdów elektrycznych przedstawiony jest na Rys. 2.1.



Rys. 2.1 Podział pojazdów elektrycznych z uwzględnieniem zasilania

Źródło: Foad H. Gandoman, Abdollah Ahmadi, Peter Van den Bossche, Joeri Van Mierlo, Noshin Omar, Ali Esmaeel Nezhad, Hani Mavalizadeh, Clément Mayet, *Status and future perspectives of reliability assessment for electric vehicles*, Reliability Engineering & System Safety, Volume 183, 2019, s 1-16, ISSN 0951-8320.

W przypadku hybrydowych pojazdów elektrycznych (HEV) zgodnie z definicją zawartą w aktach prawnych odnoszących się do homologacji pojazdów, energia do napędu pojazdu pochodzi z dwóch źródeł energii z których jeden służy do magazynowania energii elektrycznej (akumulator, kondensator) lub układu magazynowania energii przetwarzanej na energię elektryczną. Układ napędowy HEV składa się z 2 typów układu napędowego najczęściej z silnika spalinowego oraz co najmniej jednego silnika elektrycznego. W przypadku pojazdów elektrycznych z ogniwami paliwowymi (FCEV) często poza tylko ogniwami paliwowymi stosuje się również rozwiązania zawierające akumulatory i ogniwa paliwowe. Źródłem energii dla do napędu pojazdu jest czysty wodór. W ogniwach paliwowych na skutek reakcji chemicznej wodoru z tlenem powstaje energia elektryczna, wynikiem tej reakcji jest woda. Woda następnie odprowadzana jest układem wydechowym, a energia elektryczna zasila niewielki akumulator oraz silnik elektryczny. Dzięki zastosowaniu wodoru jako paliwa, tankowanie jest znacznie szybsze niż ładowanie akumulatorów, a napęd pozostaje „bezemisyjny”, podobnie jak w pojazdach typu BEV. Niestety ten rodzaj napędu jest najbardziej skomplikowany i drogi, a stacji tankowania wodoru brakuje (najbliższa dla polskich terenów znajduje się w Warszawie). Z tego powodu obecnie na rynku jest najmniej



tych samochodów w zasadzie jest to tylko Toyota Mirai, Hyundai Nexa i Honda Clarity Fuel Cell.

W ostatnim czasie z uwagi na udogodnienia dla kierowców pojazdów hybrydowych (HEV), rośnie zainteresowanie takimi pojazdami. Udogodnienia są w postaci możliwości korzystania z pasów dla komunikacji miejskiej (tzw. bus-pasów) oraz darmowego postoju w miastach, tam gdzie obowiązują opłaty. Wprowadzono podgrupę pojazdów komercyjnie nazywaną MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicle). W języku polskim nie ma wprost tłumaczenia takich pojazdów najczęściej stosowaną nazwą jest „łagodny układ hybrydowy”<sup>1</sup> lub „miękką hybryda”<sup>2</sup>. Z technicznego podejścia często takie pojazdy określa się jako pojazdy hybrydowe ze wspomaganiem akumulatorowym (BAHV – Battery Assist Hybrid vehicle) lub pojazdy hybrydowe ze wspomaganiem (Power Assist Hybrid Vehicle)<sup>3</sup>. Pojazdy MHEV to pojazdy, które spełniają warunki zakwalifikowania ich do pojazdów elektrycznych hybrydowych. Są to pojazdy z silnikiem spalinowym, wyposażone w urządzenie elektryczne. Najczęściej spełnia zadania rozrusznika, alternatora i silnika elektrycznego. W tym rozwiązaniu, tak jak w pojazdach HEV, w czasie hamowania pojazdu wykorzystuje się odzysk energii (hamowanie regeneracyjne) w celu ładowania akumulatora lub zasilania różnych urządzeń elektrycznych w pojeździe. Energia zgromadzona w akumulatorze jest wykorzystywana poprzez urządzenie elektryczne do wspomagania silnika spalinowego. W tym rozwiązaniu pojazd nie może poruszać się tylko za pomocą napędu z silnika elektrycznego.

Pomimo ograniczonej funkcjonalności, miękkie hybrydy mają swoje zalety. To stosunkowo prosty, jak również skuteczny sposób na minimalizację negatywnych skutków rozwoju transportu na środowisko. Przyjmuje się, że rozwiązania MHEV pozwalają zaoszczędzić ok. 10 do 15% paliwa co za tym idzie również zmniejszenie emisji zanieczyszczeń. Nie ma dokładnej granicy pomiędzy MHEV a HEV. W przypadku MHEV stosuje się najczęściej akumulatory o napięciu 48V, urządzenie elektryczne o napięciu znamionowym 48V oraz przetwornicę DC/DC.

Pojazdy należące do grupy pojazdów PHEV to hybrydowe pojazdy elektryczne, którego akumulator można ładować, podłączając go do zewnętrznego źródła energii elektrycznej, a także za pomocą silnika spalinowego i generatora. Większość pojazdów typu PHEV to samochody osobowe, ale istnieją również wersje PHEV pojazdów użytkowych, samochodów dostawczych, autobusów, pociągów, motocykli, skuterów i pojazdów wojskowych.

Zaletą pojazdów PHEV jest możliwość ładowania akumulatorów trakcyjnych z sieci elektrycznej na przykład domowego gniazda elektrycznego i/lub stacji szybkiego ładowania. Pojazdy PHEV posiadają akumulatory o większej pojemności niż pojazdy MHEV, które umożliwiają przejechanie odległości rzędu 30-50 km bez użycia silnika spalinowego. W założeniu konstruktorów wystarczy to do codziennej jazdy do pracy lub szkoły bez zużycia paliwa i emitowania spalin. Silnik benzynowy jest w tym założeniu uruchamiany tylko poza miastem, do realizacji dłuższych przejazdów. Takie rozwiązanie łączy ze sobą zalety pojazdu elektrycznego z pojazdem o konwencjonalnym napędzie za pomocą silnika spalinowego, jak

---

<sup>1</sup> <https://www.skoda-auto.pl/news/skoda-aktualnosci/co-oznacza-skroty-mhev-hev-phev-i-bev> [październik 2020]

<sup>2</sup> <https://www.seat.pl/o-nas/hybrydy.html> [październik 2021]

<sup>3</sup> <https://hybridautopart.com/blog/mhev-guide/> [październik 2020]

również posiada zalety (poza wymiarem ekologicznym) również ekonomiczne z uwagi na niższe koszty ładowania pojazdu ze źródeł zewnętrznych niż za pomocą silnika spalinowego.

Ostatnią grupą pojazdów elektrycznych to pojazdy akumulatorowe (BEV) są to pojazdy które nie posiadają silnika spalinowego, a ich jedyne źródło napędu to energia elektryczna zgromadzona w akumulatorach trakcyjnych. Pojazd jest w pełni elektryczny wykorzystuje silnik lub silniki elektryczne i zestaw akumulatorów, które dostarczają energię. Pojemność akumulatora może być bardzo różna, od kilkunastu kWh to nawet blisko 100 kWh jak w samochodach Tesli. Oczywiście im większy pakiet akumulatorów, tym auto jest cięższe a akumulatory zajmują więcej miejsca, ale zapewniają też tym samym większy zasięg. Największą wadą tego rozwiązania to czas ładowania, nawet w przypadku zastosowania szybkich ładowarek, trudno naładować akumulator pojazdu w czasie krótszym niż 5 minut energią potrzebną do przejechania 100 km. Jest to istotna wada tych pojazdów. Przykładowe auta elektryczne to Tesla Model 3, Renault Zoe czy Nissan Leaf. W procesie homologacji takie pojazdy określane są jako PEV (Pure Electric Vehicle) a popularnie BEV.

W pojazdach akumulatorowych stosowane są również systemy odzyskiwania energii podczas hamowania.

## 3. Homologacja pojazdów

### 3.1. Regulacje prawne – rodzaje homologacji

Bezpieczeństwo ruchu drogowego (BRD) oraz ochrona środowiska jest bardzo istotnym zagadnieniem z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju społeczno-gospodarczego transportu. Homologacja i opracowanie wymagań dla pojazdów wyposażonych w napędy hybrydowe, a w szczególności pojazdy elektryczne są jednym z kluczowych działań w Organizacji Narodów Zjednoczonych i Komisji Europejskiej. W ramach opracowania przepisów homologacyjnych pojazdów uwzględnia się zapisy Regulaminów ONZ oraz Rozporządzeń KE, a proces homologacji pojazdów opiera się na aktualnych wymaganiach.

Początkowo wszystkie kraje stosowały tzw. krajowe homologacje typu pojazdu. Wymagania prawne były opracowywane na podstawie przepisów europejskich i implementowane do prawa krajowego. Jednocześnie trwały prace w UE mające na celu zharmonizowanie przepisów dotyczących homologacji pojazdów kategorii M, N, O w Unii Europejskiej. W 2007 roku przyjęto Dyrektywę 2007/46/WE<sup>4</sup> Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 września 2007 r. ustanawiającą ramy dla homologacji pojazdów silnikowych i ich przyczep oraz układów, części i oddzielnych zespołów technicznych przeznaczonych do tych pojazdów. W 2018 roku weszło w życie Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/858<sup>5</sup> z dnia 30 maja 2018 r. w sprawie homologacji i nadzoru rynku pojazdów silnikowych i ich przyczep oraz układów, komponentów i oddzielnych zespołów technicznych przeznaczonych do tych pojazdów, zwane Rozporządzeniem Ramowym (UE). Rozporządzenie to w pełni zastąpiło Dyrektywę 2007/46/WE i dokładnie, jak ona odnosi się do homologacji pojazdów kategorii pojazdów M, N, O. Dyrektywa 2007/46/WE, która utraciła moc z dniem 1 września 2020 r. rozumieniu wydawania świadectw homologacji dla **nowych typów pojazdów** a we wrześniu 2021 roku **dla istniejących typów pojazdów**.

Filarami systemu homologacji w oparciu o Rozporządzenie Ramowe 2018/858 jest ujednoczenie wszystkich technicznych przepisów w wszystkich państwach członkowskich. Przepisy powinny być ukierunkowane na cel i obojętne technologicznie dla producentów, badania i kontrole muszą być przeprowadzane przez niezależne podmioty (jednostki techniczne) wyznaczone przez władzę homologacyjną w danym państwie Członkowskim. Homologację są udzielane przez władzę homologacyjną danego państwa, która podejmuje ostateczną decyzję o udzieleniu homologacji. Nadal pozostaje wzajemne uznawanie homologacji między państwami. Rozporządzenie ma być stale dostosowywane do zmian w zakresie konstrukcji z pojazdów. Producent pojazdu ma obowiązek posiadania certyfikatu zgodności produkcji (COP) oraz zapewnić, że każdy pojazd jest zbudowany w zgodności z Rozporządzeniem Ramowym poprzez wystawienie dla każdego pojazdu świadectwa zgodności pojazdu (COC). Producenci po uzyskaniu homologacji europejskiej typu pojazdu w jednym państwie członkowskim, mogą sprzedawać pojazdy w całej UE ze bez konieczności dalszych badań.

---

<sup>4</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02007L0046-20180331> [wrzesień 2021]

<sup>5</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02018R0858-20210926&from=EN>  
[wrzesień 2021]

Zgodnie z Rozporządzeniem Ramowym 2018/858 wyróżniamy następujące rodzaje homologacji typu pojazdu (patrz Rys. 3.1):

- Homologacja typu UE całego pojazdu (EUWVTA);
- Homologacja typu UE dla pojazdów produkowanych w małych seriach (EUSSTA);
- Krajowa Homologacja typu do pojazdów produkowanych w małych seriach (NSSTA);
- Unijne indywidualne dopuszczenie pojazdu (EUIVA);
- Krajowe Indywidualne dopuszczenie pojazdu (NIVA);
- Wielostopniowa Homologacja typu UE (MSTA);



Rys. 3.1 Rodzaje homologacji typu pojazdu – Rozporządzenie Ramowe 2018/858

### 3.2. Homologacja typu UE całego pojazdu (EUWVTA)

Homologacja EUWVTA jest odpowiednikiem homologacji ECWVTA wydawanej zgodnie z Dyrektywą 2007/46, umożliwia homologację typu pojazdu w celu sprzedaży, rejestracji i dopuszczenia do eksploatacji pojazdu we wszystkich państwach członkowskich w UE. EUWVTA jest skierowana przede wszystkim do producentów pojazdów i nadwozi produkujących co roku dużą liczbę tego samego typu pojazdu lub produktu. Może być stosowana do pojazdów kompletnych, niekompletnych lub skompletowanych (homologacja wieloetapowa). W celu uzyskania takiej homologacji przez producenta pojazd musi spełniać wszystkie wymagania zawarte w Rozporządzeniu Ramowym, a otrzymanie przez producenta pojazdu EUWVTA oznacza, że producent może sprzedawać produkt na dowolnym rynku UE bez potrzeby przeprowadzania dodatkowych testów krajowych w innym państwie członkowskim UE. Tak samo jak w przypadku Dyrektywy 2007/46/WE dopuszczone są różne rodzaje procedury homologacyjnej: homologacja typu krok po kroku, jednoetapowa homologacja typu, mieszana homologacja typu.

Dopóki nie wszystkie niezbędne wymogi dotyczące homologacji typu całego pojazdu zostały objęte zaległymi aktami delegowanymi i wykonawczymi rozporządzenia, zastosowanie mają wymagania Dyrektywy 2007/46/WE.

### 3.3. Homologacja typu UE dla pojazdów produkowanych w małych seriach (EUSSTA)

EUSSTA została opracowana wyłącznie dla producentów samochodów produkujących pojazdy w małej ilości i podobnie jak EUWVA umożliwia im sprzedaż pojazdów w całej UE. EUSSTA zawiera mniej restrykcyjne wymagania techniczne i administracyjne, które są dostosowane do mniejszych przedsiębiorstw. Liczba pojazdów jednego typu pojazdu, które mogą być rejestrowane, sprzedawane lub oddawane do użytku w UE rocznie, jest ograniczona zgodnie z danymi przedstawionymi w

Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Liczba pojazdów jednego typu które mogą zostać zarejestrowane, sprzedane lub dopuszczone do ruchu zgodnie z EUSSTA

Kategoria pojazdu	Liczba pojazdów (limit)
M <sub>1</sub>	1500
M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub>	0
N <sub>1</sub>	1500
N <sub>2</sub> , N <sub>3</sub>	0 do czasu wprowadzenia delegowanych aktów zgodnie z Artykułem 41
	1500 – po wprowadzeniu aktów delegowanych
O <sub>1</sub> , O <sub>2</sub> ,	0
O <sub>3</sub> , O <sub>4</sub>	0

Źródło: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/858.

W celu uniknięcia czasochłonnnych i drogich badań, wystarczające jest tylko spełnienie przez pojazdy wymagań technicznych określonych w dodatku 1 do części I Załącznika II (brak badań niszczących) do Rozporządzenia UE 858/2018.

### 3.4. Krajowa homologacja typu do pojazdów produkowanych w małych seriach (NSSTA)

Zgodnie z art. 42 i załącznikiem V do Rozporządzenia UE 858/2018 „Limity dla małych serii i końcowej partii produkcji” liczba pojazdów jednego typu pojazdu, które mogą być rejestrowane, sprzedawane lub dopuszczane do eksploatacji w UE rocznie, jest ograniczona zgodnie z danymi w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Liczba pojazdów jednego typu które mogą zostać zarejestrowane, sprzedane lub dopuszczone do ruchu zgodnie z NSSTA

Kategoria pojazdu	Liczba pojazdów (limit)
M <sub>1</sub>	250
M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub>	250
N <sub>1</sub>	250
N <sub>2</sub> , N <sub>3</sub>	250

O <sub>1</sub> , O <sub>2</sub> ,	500
O <sub>3</sub> , O <sub>4</sub>	250

Źródło: Źródło: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/858.

W porównaniu z odpowiednią tabelą zgodną z Dyrektywą 2007/46/WE, roczny limit dla pojazdów kategorii M<sub>1</sub> został zwiększony w Rozporządzeniu Ramowym z 100 do 250 szt.

Liczba pojazdów jednego typu, które mogą być zarejestrowane, udostępnione na rynku lub dopuszczone do użytku corocznie w państwie członkowskim, jest określana przez państwo członkowskie, ale nie może przekraczać liczby wskazanej dla danej kategorii pojazdu w powyższej tabeli. Z uwagi na to, że homologacja jest krajowa państwa członkowskie mogą zwolnić każdy typ pojazdu z obowiązku spełnienia jednego lub większej liczby wymagań niniejszego Rozporządzenia Ramowego lub jednego lub więcej wymagań określonych w aktach prawnych wymienionych w załączniku II do Rozporządzenia Ramowego<sup>6</sup>, pod warunkiem, że te państwa członkowskie ustanowiły odpowiednie alternatywne wymagania. (niższe wymagania). Krajowe świadectwo homologacji typu pojazdów produkowanych w małych seriach musi mieć niepowtarzalny numer w celu identyfikacji.

Dokładnie, jak w przypadku Dyrektywy, ważność homologacji typu pojazdu jest ograniczona do terytorium państwa członkowskiego, które udzieliło homologacji. Organy udzielające homologacji państw członkowskich akceptują krajową homologację typu chyba, że mają uzasadnione podstawy sądzić, że krajowe wymagania techniczne, zgodnie z którymi homologowano typ pojazdu, nie są równoważne z ich własnymi.

### **3.5.Unijne indywidualne dopuszczenie pojazdu (EUIVA)**

Unijne dopuszczenie jednostkowe pojazdu (homologacja indywidualna pojazdu UE – EUIVA)) nie zostało ujęte w Dyrektywie Ramowej 2007/46/WE i jest nowym rodzajem homologacji wprowadzonym dopiero Rozporządzeniem Ramowym 858/2018. Unijnemu Dopuszczeniu Jednostkowemu pojazdów mogą podlegać jedynie pojazdy kompletne i skompletowane (ostatni etap homologacji wieloetapowej). Homologacji indywidualnej UE pojazdu można udzielić na pojazd, który spełnia wymogi określone w dodatku 2 części I lub pojazdom specjalnego przeznaczenia zgodnie z wymaganiami określonymi w dodatku 2 części III załącznika II do Rozporządzenia Ramowego. Podczas przeprowadzania badań pojazdu nie przeprowadza się badań niszczących w celu ustalenia, czy pojazd spełnia wymagania, ale zamiast tego wykorzystuje się wszelkie informacje dostarczone w tym celu przez wnioskodawcę. Zgodnie z tym, na przykład nie muszą być przeprowadzone badania zderzenia czołowego zgodnie z Regulaminem ONZ nr 94. Zamiast tego, wnioskodawca przedkłada oświadczenie producenta (lub - w przypadku gdy oświadczenie o zgodności powoduje niepewność - od producenta dowód, w tym raport z badań), stwierdzające, że dany pojazd, o określonym VIN, spełnia co najmniej jedno z alternatywnych wymagań np. wymagania norm FMVSS (USA), JSRRV (Japonia), CISPR, SAE lub równoważne przepisy krajowe.

<sup>6</sup> Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/858.

### **3.6. Krajowe indywidualne dopuszczenie pojazdu (NIVA)**

Krajowa indywidualna homologacja pojazdu (krajowe dopuszczenie jednostkowe pojazdu) jest krajowym systemem homologacji i umożliwia zarejestrowanie w ramach uproszczonej procedury homologacji pojedynczych pojazdów lub pojazdów wyprodukowanych w bardzo ograniczonej liczbie. Zgodnie z Artykułem 45 państwa członkowskie mogą podjąć decyzję o zwolnieniu określonego pojazdu, niezależnie od tego, czy jest on szczególny (niepowtarzalny), czy nie, z obowiązku spełnienia jednego lub więcej wymagań niniejszego rozporządzenia lub jednego lub więcej wymagań określonych w aktach prawnych wymienionych w załączniku II do Rozporządzenia Ramowego 858/2018 pod warunkiem, że zastosowano odpowiednie alternatywne wymagania. W ramach NIVA nie przeprowadza się badań niszczących w celu ustalenia czy pojazd spełnia alternatywne wymagania. Krajowe świadectwo homologacji indywidualnej pojazdu musi otrzymać niepowtarzalny numer w celu identyfikacji państwa członkowskiego, które udzieliło homologacji, oraz w celu określenia wymagań, z którymi pojazd jest zgodny. Ważność krajowej homologacji indywidualnej pojazdu jest ograniczona do terytorium państwa członkowskiego, które udzieliło indywidualnej homologacji pojazdu. Jednak na wniosek podmiotu, który chce udostępnić na rynku, zarejestrować lub wprowadzić do eksploatacji w innym państwie członkowskim pojazd z indywidualną krajową homologacją pojazdu, państwo członkowskie, które udzieliło homologacji, udostępnia dokumenty potwierdzające spełnienie przez pojazd wymagań technicznych, na podstawie których pojazd uzyskał homologację. Inne państwo członkowskie może odmówić uznania homologacji indywidualnej pojazdu tylko wtedy, gdy ma uzasadnione podstawy, sądzić, że odpowiednie alternatywne wymagania, na podstawie których pojazd został homologowany, nie są równoważne z jego własnym lub że pojazd nie spełnia tych wymagań.

### **3.7. Wielostopniowa homologacja typu UE (MSTA)**

Wielostopniowa homologacja typu oznacza procedurę, w wyniku której jeden lub więcej organów udzielających homologacji zaświadcza, że w zależności od stanu kompletacji pojazdu (niekompletny lub skompletowany) typ pojazdu spełnia odpowiednie przepisy administracyjne i wymagania techniczne. Zgodnie z tą procedurą jeden lub więcej producentów homologuje niekompletny lub skompletowany typ pojazdu zgodnie ze stanem kompletacji pojazdu. W przypadku wielostopniowej homologacji typu każdy producent jest odpowiedzialny za homologację i zgodność produkcji układów, komponentów lub oddzielnych zespołów technicznych dodanych na tym konkretnym etapie kompletacji pojazdu.

Konieczne jest sprawdzenie, czy na uprzednio udzielone homologacje typu nie mają wpływu (unieważnienia) układów, części lub oddzielnych zespołów technicznych dodanych na późniejszym etapie kompletacji. Wiele pojazdów buduje się w ramach procesu wielostopniowego (MSB – multi stage bulding), w którym pojazd podstawowy (zwykle podwozie lub podwozie z kabiną) jest produkowany i zatwierdzany jako „pojazd niekompletny” a inny producent (zwykle producent nadwozia lub zabudowy) następnie kończy pojazd (doposaża tak aby stał się „pojazdem skompletowanym”) spełniającym wszystkie wymagania. Czasami w procesie homologacji wielostopniowej powstają pojazdy skompletowane zbudowane poprzez zmiany pojazdu kompletnego. Takim przykładem jest przekształcenie pojazdu ciężarowego o nadwoziu van w autobus lub przebudowa samochodu

osobowego na ciężarowy. W procesie MSB zawsze będą istnieć co najmniej dwa etapy a każdy z producentów jest odpowiedzialny tylko za parametry i zgodność produkcji jego etapu budowy pojazdu. W kolejnych etapach należy określić stan pojazdu zabudowanego na poprzednim etapie, określić, czy jakiegokolwiek uzupełnienia lub modyfikacje dokonane na bieżącym etapie zabudowy wpłyną na ważność homologacji z poprzedniego etapu budowy pojazdu. Taka procedura dotyczy wszystkich kolejnych etapów pośrednich. Producenci nadwozi i zabudów będą zazwyczaj wymagają dostępu do informacji o homologacji producenta pojazdu podstawowego.

Producenci, którzy modyfikują części, układy lub oddzielne zespoły techniczne już zatwierdzone na wcześniejszych etapach, muszą przekazać producentom kolejnego etapu informacje dotyczące wszelkich zmian, które mogą wpłynąć na ich homologacje. Przykładem może być producent nadwozia który zmienia pojazd ciężarowy kategorii N<sub>2</sub> (> 5 t) w autobus kategorii M<sub>3</sub>. W wyniku takiej zmiany zgodnie z Regulaminem ONZ nr 13, odnoszącym się do hamowania pojazdu, doposażyć pojazd w system hamowania długotrwałego.

### **3.8. Homologacja pojazdów autonomicznych w oparciu o wyłączenia dla nowych technologii**

Możliwa jest homologacja UE typu pojazdu dla pojazdów zautomatyzowanych, autonomicznych oraz połączonych w oparciu o wyłączenia dla homologacji UE dla nowych technologii i koncepcji. Bez wątplenia taką technologią jest automatyzacja funkcji kierowania pojazdu. Zapisy dotyczące możliwości homologowania typu UE pojazdów zgodnie z procedurą wyłączenia są zapisane w artykule 39 Rozporządzenia (UE) 2018/858 „Wyłączenia dla nowych technologii lub nowych koncepcji”. Zgodnie z zawartymi tam zapisami Producent może wystąpić o homologację typu UE w odniesieniu do typu pojazdu, układu, komponentu lub oddzielnego zespołu technicznego, w których zastosowane są nowe technologie lub nowe koncepcje niezgodne z jednym lub większą liczbą aktów prawnych wymienionych w załączniku II. Organ udzielający homologacji udziela homologacji typu UE, w przypadku, gdy spełnione są wszystkie następujące warunki:

- a) we wniosku o homologację typu UE wymieniono przyczyny, dla których zastosowanie danych nowych technologii lub nowych koncepcji skutkuje brakiem zgodności danych pojazdów, układów, komponentów lub oddzielnych zespołów technicznych z jednym lub większą liczbą aktów prawnych wymienionych w załączniku II;
- b) we wniosku o homologację typu UE opisano wpływ nowych technologii lub nowych koncepcji na bezpieczeństwo i środowisko oraz środki przyjęte, aby zapewnić poziom bezpieczeństwa i ochrony środowiska co najmniej równoważny wymogom, w odniesieniu do których wystąpiono o wyłączenie;
- c) przedstawiono opis badań wraz z wynikami, które wykazują spełnienie wymogów określonych w lit. b).

Należy podkreślić, że przyznanie homologacji typu UE pojazdom na podstawie wyłączenia dla nowych technologii lub nowych koncepcji wymaga zezwolenia Komisji Europejskiej. Komisja Europejska podejmuje decyzję o udzieleniu lub odrzuceniu udzielenia homologacji. W oczekiwaniu na decyzję, organ udzielający homologacji może udzielić tymczasowej homologacji typu UE, ważnej wyłącznie na terytorium państwa członkowskiego organu



udzielającego homologacji, w odniesieniu do typu pojazdu objętego wnioskiem wyłączeniem. Organ udzielający homologacji niezwłocznie informuje o tym Komisję oraz pozostałe państwa członkowskie, przekazując im dokumentację zawierającą informacje, o zastosowanej technologii, jej wpływie na bezpieczeństwo i środowisko oraz potwierdzenia spełnienia co najmniej równoważnych wymagań.

Na tymczasowy charakter i ograniczoną ważność terytorialną homologacji typu UE musi wyraźnie wskazywać nagłówek świadectwa homologacji typu UE i nagłówek świadectwa zgodności. Organy udzielające homologacji innych państw członkowskich mogą podjąć decyzję o akceptacji na swoim terytorium tymczasowej homologacji typu UE, pod warunkiem że informują o tym na piśmie organ udzielający homologacji, który udzielił tymczasowej homologacji typu UE. Ważność takiej homologacji może podlegać ograniczeniom ilościowym lub czasowym. Władza homologacyjna określa czy zezwolenie podlega jakimkolwiek ograniczeniom, w szczególności w odniesieniu do maksymalnej liczby pojazdów objętych homologacją (dopuszczeniem do użytku). W każdym przypadku homologacja typu UE jest ważna przez co najmniej 36 miesięcy. Jeżeli Komisja przyjmuje akty wykonawcze, w celu odmowy wydania zezwolenia, organ udzielający homologacji niezwłocznie informuje właściciela tymczasowej homologacji typu UE, że tymczasowa homologacja typu UE zostanie cofnięta po upływie sześciu miesięcy od daty wydania aktów wykonawczych. **Należy zwrócić uwagę, że w państwach członkowskich, które zaakceptowały tymczasową homologację typu UE, pojazdy, które wyprodukowano zgodnie z tymczasową homologacją typu UE przed upływem jej ważności, mogą być wprowadzane do obrotu, rejestrowane i dopuszczane do ruchu.**

Podobne zapisy są też w Dyrektywie 2007/46/WE w Artykule 20. Wyłączenia zgodnie z powyższymi artykułami umożliwiają homologację typu tych pojazdów, które nie są zgodne z obowiązującymi przepisami wymienionymi w załączniku IV do Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 661/2009.

### 3.9. Kategorie pojazdów w procesie homologacji

Do celów homologacji występują następujące kategorie pojazdów<sup>7</sup>:

- 1) kategoria **M**: obejmuje pojazdy silnikowe zaprojektowane i zbudowane głównie do przewozu pasażerów i ich bagażu podzielone na:
  - i) **M1**: pojazdy silnikowe mające nie więcej niż osiem miejsc siedzących poza miejscem siedzącym kierowcy i niemające miejsc dla pasażerów stojących, niezależnie od tego, czy liczba miejsc siedzących jest ograniczona do miejsca siedzącego kierowcy;
  - ii) **M2**: pojazdy silnikowe o masie maksymalnej nieprzekraczającej 5 ton, mające więcej niż osiem miejsc siedzących poza miejscem siedzącym kierowcy, niezależnie od tego, czy w tych pojazdach silnikowych mogą znajdować się miejsca dla pasażerów stojących;
  - iii) **M3**: pojazdy silnikowe o masie maksymalnej przekraczającej 5 ton, mające więcej niż osiem miejsc siedzących poza miejscem siedzącym kierowcy niezależnie od

---

<sup>7</sup> Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/858.

tego, czy w tych pojazdach silnikowych mogą znajdować się miejsca dla pasażerów stojących.

- 2) kategoria N obejmuje pojazdy silnikowe zaprojektowane i zbudowane głównie do przewozu towarów podzielone na:
  - i) N<sub>1</sub>: pojazdy silnikowe o masie maksymalnej nieprzekraczającej 3,5 tony;
  - ii) N<sub>2</sub>: pojazdy silnikowe o masie maksymalnej przekraczającej 3,5 tony, ale nieprzekraczającej 12 ton;
  - iii) N<sub>3</sub>: pojazdy silnikowe o masie maksymalnej przekraczającej 12 ton,
- 3) kategoria o obejmuje przyczepy podzielone na:
  - i) O<sub>1</sub>: przyczepy o masie maksymalnej nieprzekraczającej 0,75 tony;
  - ii) O<sub>2</sub>: przyczepy o masie maksymalnej przekraczającej 0,75 tony, ale nieprzekraczającej 3,5 tony;
  - iii) O<sub>3</sub>: przyczepy o masie maksymalnej przekraczającej 3,5 tony, ale nieprzekraczającej 10 ton;
  - iv) O<sub>4</sub>: przyczepy o masie maksymalnej przekraczającej 10 ton.

W przypadku pojazdów kategorii M<sub>2</sub> i M<sub>3</sub> (autobusów) należy uwzględnić jeszcze klasy autobusów, gdyż wymagania w zakresie przeprowadzanych testów hamowania uwzględniają klasę pojazdu. Klasy pojazdów są zdefiniowane w Regulaminie ONZ nr 107<sup>8</sup> - Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów kategorii M<sub>2</sub> i M<sub>3</sub> w zakresie ich budowy ogólnej. Zgodnie z definicjami zawartymi w powyższym Regulaminie ONZ rozróżniamy:

- klasa I są to pojazdy, w których konstrukcji przewidziano przestrzeń dla pasażerów stojących, umożliwiającą częste przemieszczanie się pasażerów. Do tej klasy należą autobusy komunikacji miejskiej.
- klasa II są to pojazdy przeznaczone zasadniczo do przewozu pasażerów siedzących, o konstrukcji umożliwiającej przewóz pasażerów stojących w przejściach lub na powierzchni nie większej niż powierzchnia przeznaczona dla dwóch siedzeń podwójnych; Do tej klasy zaliczane są autobusy międzymiastowe.
- klasa III: pojazdy przeznaczone wyłącznie do przewozu pasażerów siedzących. Do tej klasy zaliczamy autobus turystyczny.

W przypadku pojazdów o pojemności nie większej niż 22 pasażerów, poza kierowcą, występują dwie klasy pojazdów:

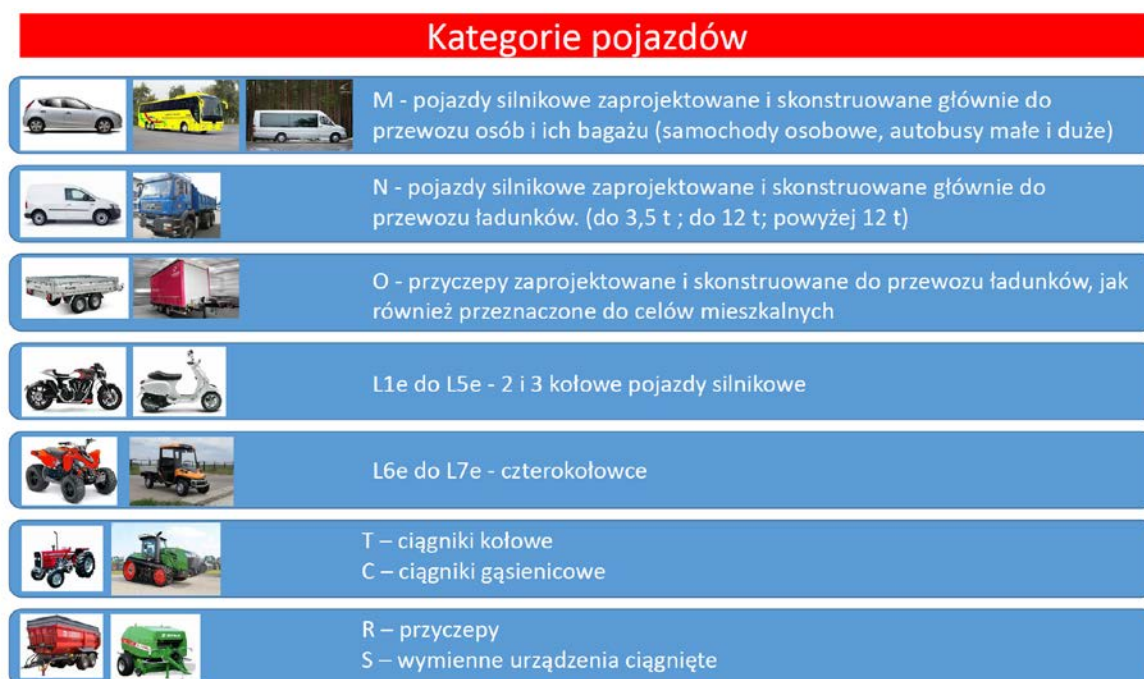
- klasa A: pojazdy przeznaczone do przewozu pasażerów stojących; pojazd tej klasy posiada siedzenia i przestrzeń dla pasażerów stojących;
- klasa B: pojazdy nieprzeznaczone do przewozu pasażerów stojących; pojazd tej klasy nie ma przestrzeni dla pasażerów stojących;

Ponadto homologacji występuje jeszcze kategoria pojazdów L (z podgrupami) są to pojazdy dwu- lub trzykołowe oraz czterokołowe. Dodatkowo występują również kategorie homologacyjne T, C, R i S odnoszące się do pojazdów rolniczych i leśnych (ciągniki, przyczepy i wymienne urządzenia ciągnięte) W niniejszej pracy te kategorie pojazdów nie będą rozważane.

Na Rys. 3.2 przedstawiono typy i przedstawicieli poszczególnych kategorii pojazdów.

---

<sup>8</sup> Na podstawie 8 serii poprawek do Regulaminu – Data wejścia w życie: 16 października maja 2018 r.



Rys. 3.2 Przegląd kategorii pojazdów

### 3.10. Klasyfikacja pojazdów hybrydowych w świetle przepisów homologacyjnych

Przepisy homologacyjne definiują samochody hybrydowe w Rozporządzeniu Komisji (UE) 2017/1151 z dnia 1 czerwca 2017 r. uzupełniające rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów, zmieniające dyrektywę 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 i rozporządzenie Komisji (UE) nr 1230/2012 oraz uchylające rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008. W przypadku definicji pojazdów hybrydowych i elektrycznych nazewnictwo pojazdów różni się pomiędzy ogólnie przyjętymi a stosowanymi w homologacji pojazdów. Zgodnie z oficjalnym tłumaczeniem Rozporządzenia Komisji (UE) 2017/1151:

- Hybrydowy pojazd elektryczny (HEV) oznacza pojazd hybrydowy, w którym jeden z przetworników energii napędowej jest urządzeniem elektrycznym.
- Hybrydowy pojazd elektryczny niedoładowywany zewnątrz (NOVC-HEV) oznacza hybrydowy pojazd elektryczny, który nie może być doładowywany ze źródła zewnętrznego.
- Hybrydowy pojazd elektryczny doładowywany zewnątrz (OVC-HEV) oznacza hybrydowy pojazd elektryczny, który może być doładowywany ze źródła zewnętrznego.
- Pojazd elektryczny (PEV) oznacza pojazd wyposażony w mechanizm napędowy obejmujący wyłącznie urządzenia elektryczne jako przetworniki energii napędowej oraz wyłącznie układy magazynowania energii elektrycznej wielokrotnego ładowania jako układy magazynowania energii napędowej.
- Pojazd zasilany ogniwami paliwowymi (FCV) oznacza pojazd wyposażony w mechanizm napędowy obejmujący wyłącznie ogniwo (ogniwa) paliwowe oraz

urządzenie (urządzenia) elektryczne jako przetwornik (przetworniki) energii napędowej.

- Pojazd hybrydowy zasilany ogniwami paliwowymi (FCHV) oznacza pojazd zasilany ogniwami paliwowymi wyposażony w mechanizm napędowy obejmujący co najmniej jeden układ przechowywania paliwa oraz co najmniej jeden układ magazynowania energii elektrycznej wielokrotnego ładowania jako układ magazynowania energii napędowej.
- Pojazd hybrydowy zasilany ogniwami paliwowymi nieładowany zewnątrz (NOVC-FCHV) oznacza hybrydowy pojazd zasilany ogniwami paliwowymi, który nie może być doładowywany ze źródła zewnętrznego.
- Pojazd hybrydowy zasilany ogniwami paliwowymi ładowany zewnątrz (OVC-FCHV) oznacza hybrydowy pojazd zasilany ogniwami paliwowymi, który może być doładowywany ze źródła zewnętrznego.

Zgodnie z powyższym widoczna jest różnica w nazewnictwie pojazdów elektrycznych i hybrydowych pomiędzy ogólnie przyjętymi a zawartymi w przepisach prawnych odnoszących się do homologacji pojazdów.

## 4. Wymagania homologacyjne pojazdów ciężarowych i autobusów w zakresie hamowania

### 4.1. Typy badań homologacyjnych zgodnie z Regulaminem ONZ nr 13

Przepisy homologacyjne pojazdów w odniesieniu do procesu hamowania wymagają zgodności wprowadzanych do użytkowania pojazdów z Regulaminem ONZ nr 13<sup>9</sup>. Powyższy dokument określa dokładnie wymagania stawiane układom hamulcowym pojazdów oraz komponentom układów hamulcowych. Zawiera też wytyczne odnośnie działania elektronicznych układów takich, jak układ zapobiegający blokowaniu kół podczas hamowania, tj. ABS. W przypadku badań pojazdów w zakresie hamowania najważniejszym parametrem jest skuteczność hamowania pojazdu. Regulamin opisuje dokładnie testy oraz jakie wymagania powinny spełniać pojazdy poszczególnych kategorii. W ramach przepisów homologacyjnych testowane są też elementy elektroniczne systemu i kontrolki (sygnalizacje świetlne przekazywane kierowcy np. wł./wył. funkcji układów hamulcowych, informacje o awarii, itp.).

Skuteczności hamowania pojazdu określana jest poprzez średnie w pełni rozwinięte opóźnienie hamowania ( $d_m$ ). Sposób badania i obliczania tego parametru są opisane w Regulaminie ONZ nr 13 w załączniku 4. Określenie  $d_m$  może być wykonane wprost poprzez bezpośredni pomiar opóźnienia hamowania i prędkości pojazdu lub metodą pośrednią (częściej stosowaną) poprzez pomiar drogi hamowania i prędkości pojazdu a następnie wyliczona na podstawie poniższego wzoru. Droga hamowania jest drogą przebytą przez pojazd od momentu, gdy kierowca zaczyna uruchamiać sterowanie układu hamulcowego, aż do zatrzymania pojazdu, a prędkość początkowa jest prędkością w chwili, gdy kierowca zaczyna uruchamiać sterowanie układu hamulcowego. Rzeczywista prędkość początkowa hamowania podczas badań nie może być mniejsza niż 98 procent prędkości początkowej wymaganej dla odpowiedniej kategorii pojazdu. Średnie w pełni rozwinięte opóźnienie hamowania ( $d_m$ ) w metodzie pośredniej wyznacza się ze wzoru:

$$d_m = \frac{V_b^2 - V_e^2}{25,92(S_e - S_b)} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

gdzie:

- $V_o$  - prędkość początkowa pojazdu w km/h,
- $V_b$  - prędkość pojazdu odpowiadająca  $0,8 V_o$  w km/h,
- $V_e$  - prędkość pojazdu odpowiadająca  $0,1 V_o$  w km/h,
- $S_b$  - droga przebyta między  $V_o$  i  $V_b$  w metrach,
- $S_e$  - droga przebyta między  $V_o$  i  $V_e$  w metrach.

W przypadku pojazdów o napędzie silnikowym przystosowanych do ciągnięcia przyczepy bez hamulców, minimalną skuteczność wymaganą dla odpowiedniej kategorii pojazdu w badaniu typu 0 z odłączonym silnikiem należy uzyskać pojazdem silnikowym obciążonym do maksymalnej masy deklarowanej przez producenta połączonego z przyczepą obciążoną do uzyskania maksymalnej masy deklarowanej przez producenta pojazdu. Skuteczność

<sup>9</sup> Obecnie ostatnim wydaniem tego Regulaminu jest 11 seria poprawek z dodatkiem 18, Data wejścia w życie: 30 września 2021 r.

hamowania zespołu pojazdów sprawdza się metodą obliczeniową z wykorzystaniem rzeczywistej maksymalnej skuteczności hamowania osiągniętej tylko przez pojazd silnikowy (obciążony) w badaniu typu 0 z odłączonym silnikiem, przy użyciu następującego wzoru (nie wymaga się badań pojazdu razem z niehamowaną przyczepą):

$$d_{M+R} = d_M \cdot \frac{P_M}{P_M + P_R} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

gdzie:

$d_{M+R}$  - obliczone średnie w pełni rozwinięte opóźnienie pojazdu silnikowego sprzęgniętego z niehamowaną przyczepą, w  $m/s^2$ ,

$d_M$  - maksymalne średnie w pełni rozwinięte opóźnienie samego pojazdu silnikowego uzyskane w badaniu typu 0 z odłączonym silnikiem, w  $m/s^2$ ,

$P_M$  - maksymalna masa niehamowanej przyczepy, która może być sprzężona zgodnie z deklaracją producenta pojazdu silnikowego.

W przypadku pojazdów kategorii O (przyczep) wyposażonych w układy hamulcowe określa się wskaźnik hamowania przyczepy  $Z_R$ , który jest wyliczany na podstawie pomiaru uzyskanego opóźnienia hamowania zespołu pojazdów przeliczonego na wskaźnik skuteczności hamowania zespołu pojazdów  $Z_{R+M}$ . Wskaźnik skuteczności hamowania pojazdu (zespołu pojazdów) określamy za pomocą zmierzonego opóźnienia pojazdu (zespołu pojazdów) odniesionego do przyspieszenia ziemskiego wyrażonego w procentach.

W badaniu tym zespół pojazdów jest hamowany jedynie za pomocą hamulców badanej przyczepy. Uzyskaną wartość wskaźnika hamowania zespołu pojazdów przelicza się według poniższego wzoru na wskaźnik hamowania przyczepy zgodnie z poniższym wzorem:

$$Z_R = (Z_{R+M} - R) \cdot \frac{P_M + P_R}{P_R} + R$$

gdzie:

$Z_R$  - wskaźnik skuteczności hamowania przyczepy,

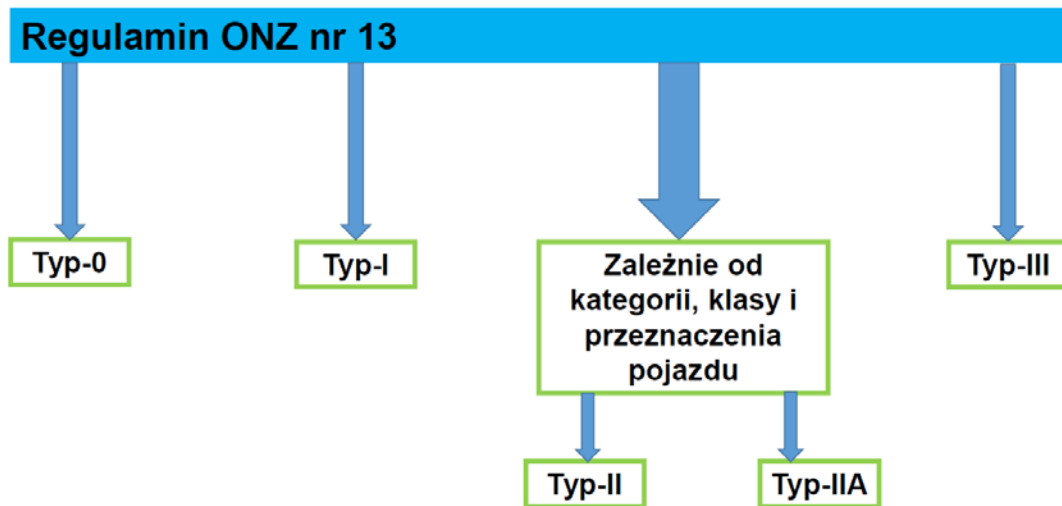
$Z_{R+M}$  - wskaźnik skuteczności hamowania pojazdu ciągnącego z przyczepą,

$P_R$  - całkowita normalna statyczna reakcja nawierzchni drogi na wszystkie koła przyczepy

$P_M$  - całkowita normalna statyczna reakcja nawierzchni drogi na wszystkie koła pojazdu ciągnącego przyczepę.

$R$  – opór toczenia =0,01

Wykaz typów badań drogowych przeprowadzanych na podstawie badań opóźnienia przedstawiono na Rys. 4.1.



Rys. 4.1 Przegląd typów badań hamulców zgodnie z Regulaminem ONZ nr 13

## 4.2. Badanie typu 0

Test typu 0 jest podstawowym badaniem średniego w petni rozwiniętego opóźnienia hamowania, które wykonuje się w warunkach „na zimno” zarówno w układzie z odłączonym silnikiem od układu napędowego jak i w układzie, kiedy silnik jest złączony z układem napędowym pojazdu. To badanie wykonuje się na prostej i płaskiej drodze asfaltowej lub betonowej. Koła nie mogą być blokowane podczas testu, prędkość początkowa badań oraz wymagania są określone w zależności od kategorii pojazdu i przedstawione są w

Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Zestawienie wymagań dla badań typu 0

	<b>Kategoria pojazdu</b>	<b>M<sub>2</sub></b>	<b>M<sub>3</sub></b>	<b>N<sub>1</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>3</sub></b>
	Typ badania	0-I	0-I-II lub IIA	0-I	0-I	0-I-II lub IIA
<b>Badanie typu 0 z odłączonym silnikiem</b>	$V_o$	60 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	60 km/h
	$S \leq$	$0,15v + \frac{v^2}{130}$				
	$d_m \geq$	$5 \text{ m/s}^2$				
<b>Badanie typu 0 z podłączonym silnikiem</b>	$V_o = 0,80 V_{\max}$ nieprzekraczająca	100 km/h	90 km/h	120 km/h	100 km/h	90 km/h
	$S \leq$	$0,15v + \frac{v^2}{103,5}$				
	$d_m \geq$	$4 \text{ m/s}^2$				
	$F \leq$	$70 \text{ daN}$				

Źródło: Regulamin ONZ nr 13.

W przypadku pojazdów kategorii O oceniany jest wskaźnik skuteczności hamowania i w zależności od rodzaju przyczepy (naczepy) musi wynosić co najmniej 50% dla przyczepy zwykłej (z obrotnicą) i przyczepy centralnoosiowej, 45% dla naczepy. W takim przypadku

wykonuje się kilku hamowań zespołu pojazdów z wykorzystaniem hamulców tylko przyczepy (lub naczepy) z prędkości początkowej 60 km/h. podczas prób dokonuje się pomiaru w pełni rozwiniętego opóźnienia hamowania zespołu pojazdów  $d_{R+M}$ . Na podstawie zmierzonej wartości  $d_{R+M}$  oblicza się wskaźnik hamowania zespołu pojazdów z według wzoru:

$$z_{R+M} = \frac{d_{R+M}}{g}$$

gdzie:

$g$  – przyspieszenie ziemskie (przyjmuje się  $9,81 \text{ m/s}^2$ )

Na podstawie obliczonego  $z_{R+M}$  oblicza się wskaźnik hamowania przyczepy  $Z_R$  zgodnie ze wzorem powyżej.

### 4.3.Badanie typu I

Badanie typu I nazwane badaniem zaniku przeprowadza się dla pojazdów o napędzie silnikowym, wykonuje się je poprzez wielokrotne hamowanie obciążonego pojazdu, zgodnie z przedstawionymi w tabeli 4.2 warunkami.

Tabela 4.2. Zestawienie wymagań dla badań typu I dla pojazdów silnikowych

Kategoria pojazdu	Warunki			
	$V_1$ [km/h]	$V_2$ [km/h]	$\Delta t$ [s]	n
M <sub>2</sub>	$80\% V_{\max} \leq 100$	$\frac{1}{2} V_1$	55	15
N <sub>1</sub>	$80\% V_{\max} \leq 120$	$\frac{1}{2} V_1$	55	15
M <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> , N <sub>3</sub>	$80\% V_{\max} \leq 60$	$\frac{1}{2} V_1$	60	20

Źródło: Regulamin ONZ nr 13.

gdzie:

$V_1$  - prędkość początkowa na początku hamowania,

$V_2$  - prędkość na końcu hamowania,

$V_{\max}$  - maksymalna prędkość pojazdu,

n - liczba uruchomień hamulca,

$\Delta t$  - czas trwania cyklu hamowania: czas upływający między początkiem jednego uruchomienia hamulca a początkiem następnego.

Przed wykonaniem poszczególnych procesów hamowania należy za każdym razem przeznaczyć 10 sekund na ustabilizowanie prędkości pojazdu odpowiadającej prędkości początkowej hamowania  $V_1$ . W testach siła przyłożona do zespołu sterującego hamulcami pojazdu jest tak dobrana, aby podczas pierwszego uruchomienia hamulca osiągnąć średnie w pełni osiągnięte opóźnienie wynoszące  $3 \text{ m/s}^2$ . Siła ta musi być stała podczas kolejnych uruchomień hamulca.

W przypadku pojazdów wyposażonych w pneumatyczny układ hamulcowy i urządzenia do automatycznej regulacji hamulców, regulacja hamulców musi zostać wykonana przed badaniem.



W przypadku pojazdów wyposażonych w hydrauliczne hamulce bębnowe regulacji hamulców należy dokonać w sposób określony przez producenta. W przypadku pojazdów wyposażonych w elektryczny układ hamulcowy z odzyskiem energii kategorii B stan akumulatorów pojazdów na początku badania powinien być taki, aby siła hamowania zapewniona przez elektryczny układ hamulcowy z odzyskiem energii nie przekraczała minimum gwarantowanego przez konstrukcję układu. Ten wymóg uważa się za spełniony, jeżeli stan naładowania akumulatorów wynosi 100% zgodnie z dokumentacją pojazdu lub w przypadku braku takich danych nie mniejszy niż 95% lub poziom maksymalny wynikający z automatycznego urządzenia sterowania ładowaniem akumulatorów w pojeździe. W przypadku, kiedy badania są prowadzone bez udziału systemu odzysku energii w czasie hamowania stan naładowania akumulatorów można pominąć.

Drugim sposobem przeprowadzenia badania typu I jest metoda ciągłego hamowania. Metoda ta stosowana jest w przypadku przyczep i naczep kategorii O<sub>2</sub> i O<sub>3</sub> (jeśli przyczepa O<sub>3</sub> nie przeszła alternatywnego badania typu II). W trakcie badania wymagane jest, aby przy obciążonym pojeździe energia doprowadzona do hamulców była równoważna odnotowanej w tym samym okresie czasu energii obciążonego pojazdu poruszającego się z prędkością 40 km/h na spadku o nachyleniu 7% i na odcinku o długości 1,7 km. Badanie przeprowadza się z przyczepą ciągniętą przez pojazd po poziomej drodze. Siła przyłożona do zespołu sterującego musi być tak dobrana, aby wskaźnik hamowania przyczepy był na stałym poziomie wynoszącym 7% dla maksymalnego całkowitego statycznego obciążenia osi przyczepy. Jeżeli energia potrzebna do ciągnięcia nie jest wystarczająca, badanie można przeprowadzić przy mniejszej prędkości, ale na dłuższym odcinku drogi, jak przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Zestawienie dystansu w zależności od prędkości jazdy dla pojazdów kategorii O<sub>2</sub> i O<sub>3</sub>.

<b>Prędkość [km/h]</b>	<b>Odcinek drogi [metry]</b>
40	1700
30	1950
20	2500
15	3100

Źródło: Regulamin ONZ nr 13.

Po tej próbie przeprowadza się test skuteczności „na gorąco” roboczego układu hamulcowego przy stałej sile sterującej nie większej niż średnia siła rzeczywiście użyta jak w badaniu typu 0 przy odłączonym silniku (warunki temperaturowe mogą być inne).

W przypadku pojazdów o napędzie silnikowym taka skuteczność na gorąco nie może być mniejsza niż 80% skuteczności wymaganej dla danej kategorii pojazdu i nie mniejsza niż 60% wartości odnotowanej w badaniach typu 0 przy odłączonym silniku.

W przypadku pojazdów wyposażonych w elektryczny układ hamulcowy z odzyskiem energii kategorii A podczas użycia hamulca należy cały czas stosować najwyższy bieg i nie można używać żadnego elektrycznego urządzenia z odzyskiem energii. W przypadku pojazdów wyposażonych w elektryczny układ hamulcowy z odzyskiem energii kategorii B, po przeprowadzeniu cykli nagrzewania zgodnie z Tabelą 4.2, badanie skuteczności na gorąco należy wykonać przy maksymalnej prędkości, jaką pojazd może osiągnąć pod koniec cykli nagrzewania hamulców, jeżeli nie można osiągnąć prędkości określonej w

Tabela 4.1. Dla porównania badanie typu 0 przy zimnych hamulcach powinno być powtórzone przy takiej samej prędkości i z podobnym udziałem hamowania z odzyskiem energii elektrycznej, ustalonym w wyniku odpowiedniego stanu naładowania akumulatora dostępnego podczas badania skuteczności na gorąco. Badania mogą być prowadzone bez udziału układu hamowania z odzyskiem energii. W takim przypadku nie stosuje się wymagań odnośnie stanu naładowania akumulatorów.

W przypadku przyczep siła hamowania przy nagranych hamulcach w badaniu przy prędkości 40 km/h nie może być mniejsza niż 36% maksymalnego statycznego obciążenia kół, ani mniejsza niż 60% wartości odnotowanej w badaniu typu 0 przy takiej samej prędkości.

Jeżeli pojazd o napędzie silnikowym, który spełnia wymaganie 60% skuteczności wartości odnotowanej w badaniach typu 0 przy odłączonym silniku, ale nie może spełnić wymagania 80% skuteczności, można przeprowadzić dalsze badanie skuteczności na gorąco z zastosowaniem siły sterującej nieprzekraczającej 70 daN.

Po zakończeniu badań hamulce pojazdów należy schłodzić do temperatury właściwej dla hamulców zimnych (tj.  $\leq 100^{\circ}\text{C}$ ) i sprawdzić, czy koła obracają się swobodnie (tj. można je obrócić ręką) lub czy asymptotyczna temperatura elementów hamulca (bębna hamulcowego/tarczy) przy stałej prędkości jazdy przyczepą  $v = 60$  km/h ze zwolnionymi hamulcami, nie wzrasta o więcej niż  $80^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.4. Badanie typu II i IIA

**Badanie typu II (badanie zachowania się na długich spadkach terenu)** przeprowadza się dla pojazdów kategorii  $M_3$  i  $N_3$  (poza wyjątkami w których obowiązkowo muszą być przeprowadzone badania typu IIA) obciążonych do technicznie dopuszczalnej masy pojazdu i badane w taki sposób, aby energia doprowadzona do hamulców była równoważna energii odnotowanej w tym samym czasie w odniesieniu do pojazdu poruszającego się z prędkością 30 km/h na spadku o nachyleniu 6% na odcinku 6 km z włączonym odpowiednim biegiem i układem hamulcowym o długotrwałym działaniu, jeżeli pojazd jest w taki wyposażony. Należy włączyć taki bieg, aby prędkość obrotowa silnika ( $\text{min}^{-1}$ ) nie przekroczyła maksymalnej wartości zalecanej przez producenta.

W przypadku pojazdów, w których energia jest pochłaniana w wyniku hamowania samym silnikiem, w odniesieniu do średniej prędkości jazdy, dopuszcza się tolerancję  $\pm 5$  km/h z włączonym biegiem umożliwiającym stabilizację prędkości na poziomie jak najbardziej zbliżonym do 30 km/h na torze o nachyleniu 6%. Jeżeli określenie skuteczności hamowania samym silnikiem następuje przy pomocy pomiaru opóźnienia, wystarczy, aby mierzone średnie opóźnienie wynosiło co najmniej  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

Po przeprowadzonym badaniu należy zmierzyć skuteczność roboczego układu hamulcowego „na gorąco” w takich samych warunkach jak dla badania typu 0 z odłączonym silnikiem (warunki temperaturowe mogą być inne). Określenie „na gorąco” odnosi się do sytuacji, w której elementy cierne hamulca mają temperaturę powyżej  $100^{\circ}\text{C}$ . Analogicznie hamulce za zimne uważa się jeżeli temperatura ich elementów nie przekracza  $100^{\circ}\text{C}$ . Zmierzone średnie w pełni rozwinięte opóźnienie hamowania ( $d_m$ ) „na gorąco” powinno wynosić przy zastosowaniu siły sterującej nieprzekraczającej 70 daN co najmniej:

- dla pojazdów kategorii  $M_3$  :  $d_m \geq 3,75 \text{ m/s}^2$ ;
- dla pojazdów kategorii  $N_3$  :  $d_m \geq 3,3 \text{ m/s}^2$

Wymagania dla testu typu II przedstawiono na Rys. 4.2.

**Zakres stosowania:**

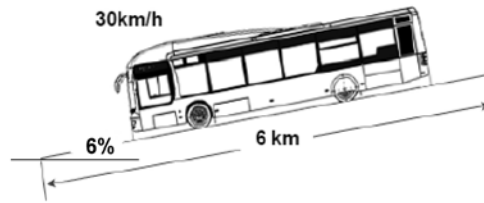
pojazdy kategorii  $M_3$  i  $N_3$   
Z wyłączeniem pojazdów przewidzianych  
do badań typu IIA.

**Hamulce robocze:**

nie ma ograniczenia co do używania.

**Kryteria spełnienia wymagań:**

średnia prędkość podczas testu  
30 km/h +/- 5km/h.  
Minimalna wartość  $d_m$  „na gorąco” po  
teście typu II (wartości minimalne)  
 $N_3$ : 3.3 m/s<sup>2</sup>  
 $M_3$ : 3.75 m/s<sup>2</sup>



Rys. 4.2. Przegląd wymagań dla testów typu II.

Badanie typu IIA (skuteczność hamowania układu hamowania długotrwałego) jest obowiązkowe dla pojazdów kategorii  $M_3$  należących do klasy II, III lub B, pojazdów kategorii  $N_3$ , które są dopuszczone do ciągnięcia przyczepy kategorii  $O_4$  oraz pojazdów przeznaczonych do przewozu towarów niebezpiecznych objętych umową ADR. W przypadku pojazdów kategorii  $N_3$ , które są dopuszczone do ciągnięcia przyczepy kategorii  $O_4$ , których technicznie dopuszczalna masa przekracza 26 ton, masa pojazdu w trakcie badań ograniczona jest do 26 ton, lub w przypadku, gdy masa nieobciążonego pojazdu przekracza 26 ton (pojazdy specjalne, np. żurawie samojezdne), masę tę należy uwzględnić w obliczeniach.

Skuteczność układu hamulcowego o długotrwałym działaniu jest badana przy technicznie dopuszczalnej masie pojazdu lub zespołu pojazdów. Obciążone pojazdy muszą być badane w taki sposób, aby energia doprowadzona do hamulców była równoważna energii dla pojazdu poruszającego się z prędkością 30 km/h po torze (drodze) o nachyleniu 7% na odcinku 6 km. Podczas badania nie mogą być wykorzystywane układy hamulcowe awaryjne i postojowe. Podczas badań należy zastosować taki bieg, aby prędkość obrotowa silnika nie przekroczyła maksymalnej wartości określonej przez producenta. Można zastosować zintegrowany układ hamulcowy o długotrwałym działaniu pod warunkiem, że jest on zsynchronizowany w taki sposób, aby nie zadziałał roboczy układ hamulcowy. Weryfikacji można dokonać poprzez pomiar temperatury elementów ciernych układu hamulca roboczego. Jeżeli te elementy pozostają zimne uznaje się, że hamulec roboczy nie był używany. W przypadku pojazdów, w których energia jest pochłaniana w wyniku hamowania samym silnikiem, w odniesieniu do średniej prędkości dopuszcza się tolerancję  $\pm 5$  km/h z włączonym biegiem umożliwiającym stabilizację prędkości na poziomie jak najbardziej zbliżonym do 30 km/h na torze o nachyleniu 7%. Jeżeli określenie skuteczności hamowania długotrwałego realizowanego za pomocą oporów silnika jest określane przy pomocy pomiaru opóźnienia, wystarczy, aby mierzone średnie opóźnienie wynosiło co najmniej 0,6 m/s<sup>2</sup>.

Wymagania dla testu typu IIA przedstawiono na Rys. 4.3.

**Zakres stosowania:**

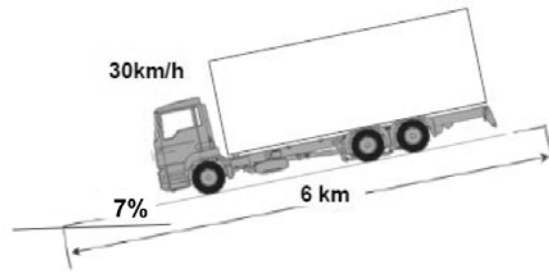
pojazdy kategorii M<sub>3</sub> (klasy II, III i B),  
 N<sub>3</sub> - przystosowane do ciągnięcia  
 przyczep kategorii O<sub>4</sub>,  
 N<sub>3</sub> – objęte ADR

**Hamulce robocze:**

zakazane używanie.

**Kryteria spełnienia wymagań:**

średnia prędkość podczas testu  
 30 km/h +/- 5km/h



Rys. 4.3. Przegląd wymagań dla testów typu IIA.

### 4.5. Wymagania homologacyjne dla testów typu III

Badanie typu III przeprowadza się w następujących warunkach drogowych: na płaskim odcinku drogi, w cyklu 20 uruchomień hamulca, czas trwania cyklu hamowania 60 sekund przy prędkości początkowej 60 km/h. Siła/energia przykładana do urządzenia sterującego musi być taka, żeby w czasie pierwszego uruchomienia hamulca osiągnąć średnie w pełni osiągnięte opóźnienie hamowania równe  $3 \text{ m/s}^2$ . Po przeprowadzeniu pierwszej części testu bada się skuteczność układu hamulcowego „na gorąco” zgodnie z warunkami badania typu 0 dla prędkości początku hamowania wynoszącej 60 km/h. Przy nagrzanym hamulcach siła hamowania na obwodach kół nie powinna być mniejsza niż 40% maksymalnego statycznego obciążenia koła, ani nie mniejsza niż 60% wartości odnotowanej w badaniu typu 0 przy takiej samej prędkości. Trzecim etapem jest sprawdzenie dla hamulców zimnych (tj.  $\leq 100^\circ\text{C}$ ) możliwości swobodnego przemieszczania przyczepy. Weryfikacja tego warunku polega na sprawdzeniu czy koła obracają się swobodnie (tj. można je obrócić ręką) lub czy asymptotyczna temperatura elementów hamulca (bębna hamulcowego/tarczy) przy stałej prędkości jazdy przyczepą  $v = 60 \text{ km/h}$  ze zwolnionymi hamulcami, nie wzrasta o więcej niż  $80^\circ\text{C}$ .

## 5. Cel i zakres pracy

Genezą pracy były wypadki autokarów w górach występujące na skutek awarii układów hamulcowych lub niewłaściwego ich użycia, co najczęściej doprowadzało do utraty kontroli nad pojazdem i w konsekwencji do poważnego wypadku. Przykładem takich wypadków są m.in.:

1. 16 kwietnia 2013 roku w Alpe d'Huez (alpy francuskie – niedaleko Grenoble), awaria hamulca doprowadziła do uderzenia autobusu w skały na zakręcie nr 21 na zjeździe z Alpe d'Huez. Po zderzeniu autobus zapalił się, brytyjski kierowca stracił życie w wypadku, a wielu pasażerów zostało rannych, kilku poważnie<sup>10</sup>.
2. 22 lipca 2007 w miejscowości Vizille na południe od Grenoble. Na skutek przegrzania hamulców doszło do wypadku polskiego autokaru. Zginęło 26 osób z 50 pasażerów i obsługi. Autokar pokonując stromy odcinek górskiej trasy pomiędzy Gap a Grenoble, wyjechał z drogi na ostrym zakręcie, po czym runął z mostu w 15-metrową przepaść, a następnie stanął w płomieniach. Kierowca naruszył zakaz wjazdu autobusów na niebezpieczną, górską drogę oraz w krytycznym momencie użył niewłaściwego hamulca – wyłącznie roboczego zamiast hydraulicznego retardera (hamulca długotrwałego działania), co spowodowało, że hamowanie nie było skuteczne, a hamulce uległy uszkodzeniu<sup>11</sup>. Najprawdopodobniej doszło do przegrzania elementów roboczego układu hamulcowego.

Szczególnie ta ostatnia tragedia i emocje spowodowane wypadkiem polskiego autokaru we Francji w 2007 roku oraz rozwój pojazdów elektrycznych miały ogromny wpływ na moje zainteresowanie i realizację prac w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego. W wypadku autokaru pod Grenoble kierowca naruszył zakaz wjazdu dla autokarów na tą niebezpieczną drogę. Główną przyczyną wypadku można uznać, że był brak doświadczenia oraz brak umiejętności prawidłowego użycia hamulca długotrwałego działania. Taki hamulec służy do długotrwałego hamowania pojazdu, który używa się w celu kontroli prędkości pojazdu podczas zjazdu ze wzniesienia, bez używania hamulców ciernych które w takich warunkach przy nieumiejętnym używaniu ulegają przegrzaniu i w konsekwencji tego tracą możliwość skutecznego zatrzymania pojazdu.

Wypadek polskiego autokaru pod Grenoble nie był pierwszym wypadkiem w tym miejscu. Na drodze w okolicach Grenoble zginęło już ponad 200 osób. W wyniku śledztwa ustalono, że kierowca nie używał hamulca długotrwałego działania (retardera) w trybie ciągłym w jaki wyposażony był pojazd. Retardery stosuje się głównie w samochodach ciężarowych o dużej ładowności i autobusach, gdzie podczas zjazdu ze wzniesienia może dojść do szybkiego przegrzania elementów ciernego hamulca roboczego i spadku skuteczności hamowania pojazdu. Ponadto retardery ograniczają zużycie elementów roboczego układu hamulcowego. Oba systemy (hamulec roboczy i zwalniacz) mogą być używane zarówno osobno jak i razem. Domyślnie układ działa w trybie zintegrowanym, hamulec długotrwałego działania wspomaga roboczy układ hamulcowy w momencie jego użycia. W pojazdach kierowca ma dodatkowo możliwość włączenia i regulacji siły hamowania retardera niezależnie od działania hamulca roboczego.

---

<sup>10</sup> <https://www.seealpedhuez.com/events/news/brits-in-alpe-d-huez-coach-crash> [luty 2022]

<sup>11</sup> [https://pl.wikipedia.org/wiki/Katastrofa\\_polskiego\\_autokaru\\_w\\_Vizille](https://pl.wikipedia.org/wiki/Katastrofa_polskiego_autokaru_w_Vizille) [luty 2022]

W wypadku pod Grenoble kierowca najprawdopodobniej nie włączył retardera w tryb działania ciągłego (niezależnego od działania hamulca roboczego), używał hamulców w trybie zintegrowanym. Taki tryb pracy spowodował używanie hamulca ciernego podczas zjazdu co spowodowało przegrzanie ciernych hamulców roboczych i utratę możliwości zatrzymania pojazdu. Kierowca nie dysponował, żadną informacją o możliwości utraty siły hamowania przez pojazd na skutek wzrostu temperatury elementów roboczych hamulców ciernych. Nie miał żadnego ostrzeżenia o możliwej utracie siły hamowania. Ten splot wydarzeń doprowadził do tragicznego w skutkach wypadku. Zdjęcia wypadku zamieszczono poniżej na Rys. 5.1.



Rys. 5.1. Wypadek polskiego autokaru w miejscowości Vizille (nieдалeko Grenoble).

Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Katastrofa\\_polskiego\\_autokaru\\_w\\_Vizille](https://pl.wikipedia.org/wiki/Katastrofa_polskiego_autokaru_w_Vizille).

Należy zauważyć, że w podobnym wypadku, który zdarzył się 16 kwietnia 2013 roku niedaleko Grenoble również doszło do utraty kontroli nad pojazdem i niekontrolowanego wzrostu prędkości pojazdu podczas zjazdu ze wzniesienia, w konsekwencji tego doszło do kolejnego wypadku. Do utraty siły hamowania w pojazdach ciężkich najczęściej dochodzi na terenach górskich, w konsekwencji tego najczęściej dochodzi do wypadku. Takie wypadki są szczególnie tragiczne, jeżeli do utraty siły hamowania dochodzi w autobusach. Jest wiele przykładów tragicznych w skutkach awarii układów hamulcowych w autobusach, które powodują wiele ofiar. Na przestrzeni lat doszło do wielu innych wypadków autobusów turystycznych (autokarów) w górach, gdzie głównym czynnikiem powodującym wypadek była utrata siły hamowania, najczęściej poprzez przeciążenie cieplne roboczego układu hamulcowego. Bardzo często powodem było wspomaganie działania hamulca długotrwałego działania roboczym układem hamulcowym (ciernym), wykorzystywanie hamulca długotrwałego działania w trybie zintegrowanym z hamulcem roboczym lub nawet zastępowanie działania hamulca długotrwałego, hamulcem roboczym. Dlatego w celu zmniejszenia możliwości wystąpienia takich wypadków oraz dzięki prawnej możliwości wprowadzenia układu estymatora skuteczności hamowania do przepisów homologacyjnych dotyczących hamowania pojazdu tj. Regulaminu ONZ nr 13 dla pojazdów elektrycznych, postanowiono szerzej zająć się tym zagadnieniem. W przyszłości możliwe, że zmiany w powyższym regulaminie ONZ dopuszcza stosowanie estymatora hamowania w pojazdach spalinowych jako element systemu bezpieczeństwa. Należy podkreślić, że rozwój pojazdów autonomicznych i automatycznych również będzie wymagał rozwijania możliwości oceny

przez pojazd zdolności hamowania. W tym celu przeanalizowano działanie układów hamulcowych pojazdu oraz spróbowano w przypadku pojazdów elektrycznych wykorzystać system odzyskiwania energii w celu wykorzystania go jako systemu hamowania długotrwałego. Wymagania zawarte w przepisach uniemożliwiały w przypadku pojazdów elektrycznych na takie działanie. Jednocześnie wprowadziły w przypadku pojazdów elektrycznych możliwość wprowadzenia estymatora skuteczności hamowania. Zadaniem takiego układu byłoby ostrzeżenie kierowcy przed możliwością zmniejszenia skuteczności hamowania pojazdu, umożliwiając kierowcy w sposób bezpieczny zatrzymanie autobusu przed wystąpieniem utraty siły hamowania i w konsekwencji bardzo często wypadku z ofiarami śmiertelnymi. W tym celu przeanalizowano czynniki wpływające na skuteczność hamulców ciernych, przeanalizowano możliwości pomiaru takich parametrów i montażu czujników w pojeździe.

Pojazdy elektryczne wyposażone są w układy odzyskiwania energii, który może technicznie służyć jako hamulec długotrwałego działania. Przepisy homologacyjne zawarte w Regulaminie ONZ nr 13 dotyczące homologacji pojazdów kategorii M, N i O w zakresie hamowania nie umożliwiały wykorzystania układu odzyskiwania energii w formie hamulca długotrwałego działania bez zamontowania dodatkowych urządzeń. Przeszkodą były zapisy w Regulaminie ONZ, które wymagały, aby przed badaniami typu II lub IIA (hamowanie długotrwałe) akumulatory trakcyjne były naładowane do minimum 95%. Te bariery prawne powodowały, że pojazdy musiały być wyposażone w urządzenia, które rozpraszają odzyskaną energię elektryczną, najczęściej w formie ciepła poprzez rezystory. Takie rozwiązanie wymaga zastosowania rezystora, który waży ok. 300 kg i tym samym w przypadku samochodów ciężarowych ogranicza ładowność a w przypadku autobusów ilość przewożonych pasażerów. To przekłada się na opłacalność i efektywność transportu pojazdami elektrycznymi.

W pracy dokonano analizy możliwości rozpraszania tej energii poprzez odbiorniki będące na wyposażeniu pojazdów elektrycznych. Przeprowadzono wstępną ocenę tego rozwiązania oraz podjęto próbę rozwiązania tego problemu poprzez symulację i obliczenia bilansu energetycznego. W pojeździe elektrycznym jest wiele komponentów i urządzeń zużywających energię elektryczną (kompresor, światła, układy klimatyzacji, itd.). W pracy przeanalizowano możliwość wykorzystania tych urządzeń do rozpraszania energii pochodzącej z hamowania pojazdu układem odzyskiwania energii, w celu wykorzystania tej strategii w badaniach homologacyjnych typu II i IIA pojazdów. Analiza ta miała na celu sprawdzenie, czy w pojazdach elektrycznych możliwe jest w pełni zastąpienie rezystora hamowania poprzez odpowiednią strategię rozpraszania energii poprzez urządzenia pojazdu.

W drodze dyskusji wewnątrz grupy roboczej GRVA (w której jestem uczestnikiem) zaproponowano kolejne rozwiązanie, możliwe do zastosowania jedynie w pojazdach elektrycznych. Wprowadzając możliwość używania hamulców ciernych w badaniach typu IIA jedynie dla pojazdów elektrycznych. Jednocześnie taki pojazd musiał być wyposażony w tzw. „estymator skuteczności hamowania” funkcja, która umożliwiłaby oszacowanie możliwości hamowania pojazdu za pomocą hamulców ciernych poprzez analizę warunków pracy hamulców ciernych. Takie rozwiązanie zostało opracowane i dopuszczone do wprowadzenia w pojazdach za pomocą zmiany 18 do 11 serii poprawek do Regulaminu ONZ nr 13.

W pracy za cel postawiono opracowanie teoretycznych podstaw takiego algorytmu i zasady działania estymatora hamowania, który będzie mógł być także wykorzystany w pojazdach z klasycznym układem napędowym. System będzie automatycznie ostrzegał kierowcę przed możliwą utratą siły hamowania przez pojazd. Takie rozwiązanie umożliwi

kierowcy bezpieczne zatrzymanie pojazdu przed całkowitą utratą siły hamowania. Taki system pozwoli ostrzeżenie kierowcy przed wystąpieniem takiego niebezpieczeństwa, przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa transportu osób i towarów. Wypadki z udziałem autobusów, są zawsze tragiczne w skutkach, dlatego podjęto próbę poprawy bezpieczeństwa na drogach i zapobiegania wypadkom takim jak opisano powyżej pod Grenoble. Kierowca nieświadomie doprowadził do przegrzania roboczego układu hamulcowego, a w konsekwencji utracił zdolność panowania i możliwość zatrzymania pojazdu.

Jednocześnie jest prawdopodobne, że gdyby kierowca otrzymał odpowiednia informację o możliwej utracie siły hamowania zatrzymałby pojazd, lub zmienił taktykę jazdy, a w konsekwencji nie doprowadził do katastrofy.

Aby osiągnąć wyznaczony cel opracowania algorytmu działania estymatora hamowania dokonano analizy obecnie stosowanych materiałów tarcz hamulcowych, układów hamowania oraz rozwiązań konstrukcyjnych. Przeprowadzono analizę wiedzy literaturowej dotyczącej wpływu różnych czynników zewnętrznych na parametry ciernie hamulców roboczych pojazdów. Skorzystano również z wcześniej prowadzonych doświadczeń w tym zakresie i dokonano przeglądu możliwości pomiaru najistotniejszych parametrów pracy układu cierniego hamulców pojazdów wpływających na ich skuteczność.

Przy realizacji pracy podjęto działania związane z odpowiedzią na hipotetyczne pytania:

### **1) Jakie czynniki w sposób istotny wpływają na proces hamowania i jakie są możliwości łatwego pomiaru ich czujnikami łatwymi do instalacji w pojazdach ?.**

Na podstawie doświadczeń i szerokiej wiedzy literaturowej, głównym elementem wpływającym na wartość współczynnika tarcia pomiędzy okładziną hamulca a tarczą lub bębniem hamulcowym jest temperatura. Wzrost temperatury w parze cierniej hamulców pojazdów jest zjawiskiem normalnym i powszechnym. Zazwyczaj początkowo wzrost temperatury powoduje wzrost współczynnika tarcia, jednak po przekroczeniu temperatury charakterystycznej dla materiału cierniego następuje spadek wartości tego współczynnika. Dalszy wzrost temperatury powoduje dalsze zmniejszanie współczynnika tarcia i ograniczenie możliwości hamowania pojazdu. Po przekroczeniu temperatury degradacji materiału okładziny cierniej następuje zjawisko „fadingu” objawiające się nagłą utratą siły hamowania. Prowadzi to do bardzo niebezpiecznych sytuacji mogących wpływać na bezpieczeństwo transportu, często kończących się katastrofą w ruchu lądowym.

Poza temperaturą na podstawie danych literaturowych stwierdzono, że wilgotność powietrza w obszarze pracy hamulca cierniego wpływa na współczynnik tarcia pomiędzy okładziną ciernią a elementem wykonawczym (tarczą lub bębniem hamulcowym). Zmiana jest związana ze składem materiału cierniego, a więc i jego rodzajem.

Ostatnim czynnikiem wpływającym na drogę hamowania i możliwe do uzyskania opóźnienie hamowania to warunki drogowe. Wiadomym jest, że warunki drogowe takie jak opady atmosferyczne, czy rodzaj nawierzchni oddziałują na współczynnik tarcia pomiędzy oponą a nawierzchnią. Praktyka pokazuje, że najgroźniejsze są opady szczególnie śniegu, który w niesprzyjających warunkach zamienia się w lód powodując spadek wartości współczynnika tarcia z około 0,8 dla nawierzchni asfaltowej suchej, do około 0,7 dla nawierzchni asfaltowej



mokrej, a w przypadku lodu nawet poniżej około 0,15.<sup>12</sup> Z tego względu ostrzeżenie kierowcy przed wystąpieniem niekorzystnych warunków atmosferycznych powinno odbyć się możliwie wcześniej. Współczesne możliwości wymiany danych pomiędzy pojazdem a infrastrukturą i możliwość sprawdzenia pogody na planowanej trasie przejazdu umożliwi, poprzez wdrożenie przedstawionego procesu, zwiększenie bezpieczeństwa.

Monitorowanie temperatury elementów ciernych nie jest procesem złożonym i wymaga odpowiedniego montażu czujnika temperatury w celu pomiaru temperatury tarczy hamulcowej, a więc w sposób pośredni możliwość wyznaczenia temperatury pary ciernej.

## **2) Czy informacja przekazana przez wdrożony do pojazdu system ostrzegający o możliwych do wystąpienia zagrożeniach na drodze i pełnej funkcjonalności układu hamulcowego wpłynie na bezpieczeństwo ?**

Ostrzeżenie kierowcy przed utratą przez pojazd możliwości skutecznego hamowania umożliwiło by, możliwość zatrzymania przez kierowcę pojazdu przed wystąpieniem tego zjawiska. Zatrzymanie umożliwiłoby obniżenie temperatury układu hamulcowego i dalszą jazdę w bezpiecznych warunkach. Z punktu bezpieczeństwa ruchu drogowego możliwość ostrzeżenia kierowcy pozwoliłoby uniknąć wielu wypadków autokarów o tragicznych w skutkach i ofiarach śmiertelnych.

Powyżej opisane wypadki są przykładem, że awaria hamulców poprzez ich nieumiejętne używanie podczas długich zjazdów może doprowadzić do niekontrolowanego wzrostu temperatury, a w konsekwencji utraty możliwości zatrzymania pojazdu. Dlatego należy bezwzględnie opracować i wdrożyć estymator hamowania w celu ostrzeżenia kierowcy przed możliwością utraty siły hamownia.

Przy podjęciu realizacji pracy pt. "Systemy zarządzania energią hamowania pojazdów elektrycznych i hybrydowych" przyjęto następujące założenia warunkujące jej wykonalność:

- Występuje w stopniu wystarczającym do realizacji podejmowanej pracy przygotowanie w zakresie oceny możliwości wdrożenia skutecznej procedury automatycznego powiadamiania kierowców o występujących zagrożeniach i włączeniu optymalnych mechanizmów bezpieczeństwa.
- Występuje poprzez wdrożenie przez GRVA i zatwierdzenie przez WP.29 zmian do przepisów możliwość wdrożenia tego rozwiązania do pojazdów.
- Występuje wystarczające przygotowanie bazy laboratoryjnej w zakresie metod badawczych i oceny tego rozwiązania w zakresie badań homologacyjnych pojazdu w celu dopuszczenia go do ruchu.

Plan pracy przedstawiono na poniższym Rys. 5.2. Plan pracy, gdzie uwzględniono główne obszary działań z uwzględnieniem chronologii działań. Podstawowym celem pracy było wykazanie możliwości zastosowania bezpiecznych rozwiązań do realizacji w przemyśle motoryzacyjnym w szczególności w autokarach turystycznych. Przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa w zakresie ruchu drogowego i przewozu pasażerów. Obecnie opracowane

---

<sup>12</sup> D. Łomako, T.Stańczyk, J.Grzyb, *Pneumatyczne układy hamulcowe w pojazdach samochodowych*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002 r., s.139.

i zatwierdzone przepisy homologacyjne gwarantują wzrost bezpieczeństwa ruchu drogowego autobusów.

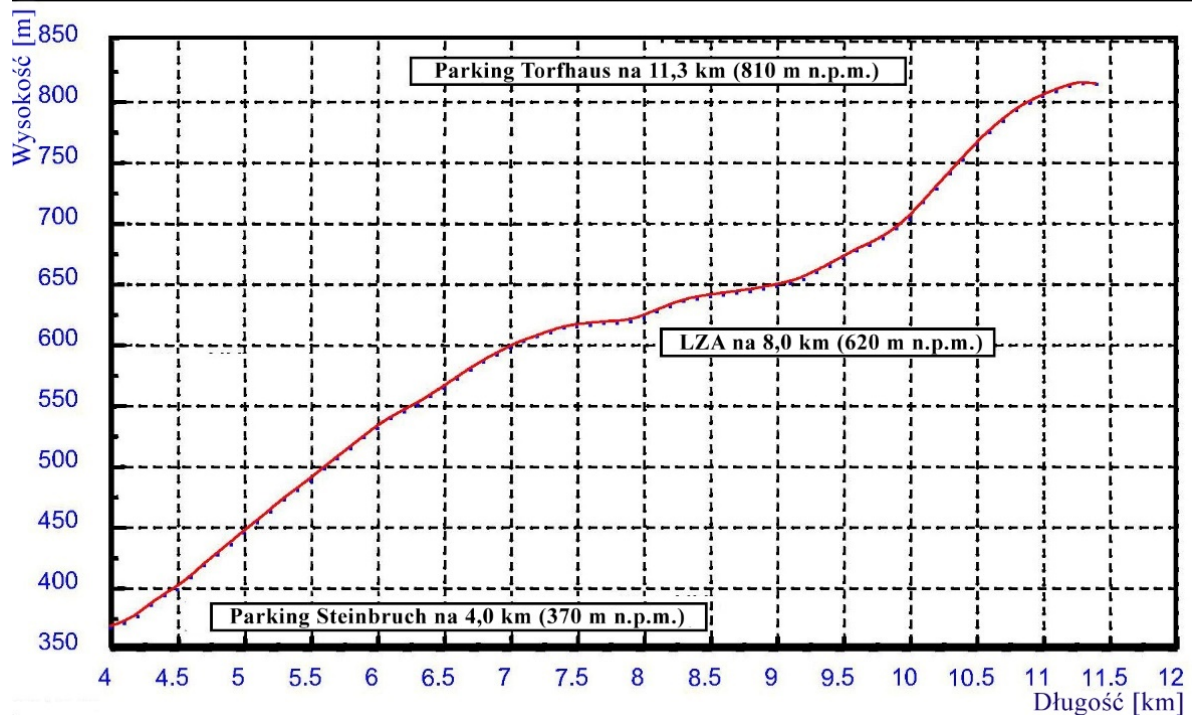
Funkcja rozdziału	Tytuł rozdziału i zawartość	Numer rozdziału
Wstęp i geneza pracy	<p style="text-align: center;"><b>Wstęp</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Określenie podstawowych pojęć i wprowadzenie do procesu homologacji z zakresie hamowania pojazdów w tym z napędem konwencjonalnym, elektrycznym i hybrydowym.</li> <li>- Geneza pracy w kontekście zmian w przepisach homologacyjnych dla pojazdów elektrycznych.</li> </ul>	1
Analiza stanu wiedzy i postawienie problemu	<p style="text-align: center;"><b>Pojazdy elektryczne; Homologacja pojazdów; Wymagania homologacyjne pojazdów ciężarowych i autobusów w zakresie hamowania</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Definicje, klasyfikacja i rodzaje pojazdów elektrycznych i hybrydowych.</li> <li>- Przedstawienie procedury homologacji pojazdów z uwzględnieniem podziału na kategorie pojazdu.</li> <li>- Opis wymagań homologacji pojazdów w zakresie hamowania.</li> <li>- Omówienie szczegółowe wymagań homologacyjnych w zakresie hamowania długotrwałego dla pojazdów ciężarowych i autobusów.</li> </ul>	2 3 4
Teza pracy	<p style="text-align: center;"><b>Cel i zakres pracy</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Określenie istoty problemu technicznego, potrzeby rozwiązania problemu rozpraszania energii w czasie hamowania długotrwałego oraz analiza rozwiązań alternatywnych opracowanych przez GRVA dla pojazdów elektrycznych.</li> <li>1. Określenie możliwości rozpraszania energii elektrycznej z uzyskanej podczas hamowania długotrwałego poprzez odbiorniki energii zamontowane w pojeździe.</li> <li>2. Opracowanie założeń algorytmu estymatora hamowania.</li> </ul>	5
Analiza rozwiązań pod kątem rozwiązania problemu Badania analityczne rozwiązań i eksperymentalne.	<p style="text-align: center;"><b>Metoda badań pojazdów zgodnie z testami typu II i IIA; Bilans energii pojazdu w testach II i IIA; Rozwój elektrycznych i hybrydowych układów napędu i źródeł energii.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Opis metod badania pojazdów w zakresie hamowania długotrwałego.</li> <li>- Wstępne określenie bilansu energetycznego pojazdu i możliwości rozpraszania energii w sposób niekonwencjonalny.</li> <li>- Zestawienie i wstępna analiza wyników badań analitycznych.</li> </ul>	6 do 11
Analiza rozwiązań pod kątem rozwiązania problemu Badania analityczne rozwiązań i eksperymentalne.	<p style="text-align: center;"><b>Analizy problemu i rozwiązań oraz badania eksperymentalne</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalkulacja energii do rozproszenia podczas testów hamowania długotrwałego.</li> <li>- Określenie problemu homologacji pojazdów elektrycznych w zakresie hamowania długotrwałego.</li> <li>- Zestawieni i wstępna analiza rozwiązań oraz wyników badań eksperymentalnych.</li> <li>- Odrzucenie pierwotnego rozwiązania.</li> </ul>	12 do 16
Weryfikacja możliwości wdrożenia takiego rozwiązania	<p style="text-align: center;"><b>Opracowane alternatywne rozwiązanie Algorytm dla estymatora hamowania. Propozycja technicznego rozwiązania i wdrożenia zaproponowanego rozwiązania.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analiza proponowanego przez GRVA rozwiązania.</li> <li>- Analiza głównych cech mających wpływ na parametry hamowania.</li> <li>- Analiza możliwości wdrożenia zaproponowanego rozwiązania w praktyce</li> <li>- Opracowanie głównych założeń estymatora hamowania.</li> </ul>	17 18
Wnioski	<p style="text-align: center;"><b>Podsumowanie i kierunki dalszych badań</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wnioski</li> <li>- Kierunki dalszych badań i rozwoju rozwiązania.</li> </ul>	19

Rys. 5.2. Plan pracy.

## 6. Metoda badań pojazdów zgodnie z testami typu II i IIA

Opisane procedury badań typu II i IIA w Regulaminie ONZ nr 13 są ogólne, bez wskazania innych alternatywnych metod. Wprost opisana jest jedynie metoda pomiarów drogowych tj. na torze (drodze) o odpowiednim nachyleniu (6% lub 7% w zależności od typu badania i długości 6 km). W Europie nie ma takiej drogi zjazdowej, która miałaby dokładnie wymagane nachylenie i długość 6 km. Problemem jest zarówno długość odcinka drogi jak i zachowanie wymaganego profilu (nachylenia). Jedynym miejscem, w którym droga ma zbliżone parametry do badań hamowania długotrwałego jest droga B4 znajdująca się w okolicach miasta Torfhaus (Niemcy). Droga (tor badawczy) posiada profil i długość umożliwiającą przeprowadzenie takich badań.. Profil drogi uwzględniający wysokość jej nad poziomem morza w funkcji odległości przedstawiono na Rys. 6.1.

### Profil wysokości rzeczywistego toru badawczego



Rys. 6.1. Profil drogi B4 Torfhouse (Niemcy).

Źródło: Dokument GRRF-55-23.

Zapisy Regulaminu zezwalają na alternatywną metodę badań na podstawie zapisów w paragrafach 1.6.1 w Załączniku 4 do Regulaminu ONZ nr 13

„1.6.1. Obciążone pojazdy o napędzie silnikowym muszą być badane w taki sposób, aby energia doprowadzona do hamulców była równoważna energii odnotowanej w tym samym czasie w odniesieniu do pojazdu poruszającego się z prędkością 30 km/h na spadku o nachyleniu 6% na odcinku 6 km z włączonym odpowiednim biegiem i układem hamulcowym o długotrwałym działaniu, jeżeli pojazd jest weń wyposażony. Należy włączyć taki bieg, aby prędkość obrotowa silnika ( $\text{min}^{-1}$ ) nie przekroczyła maksymalnej wartości zalecanej przez producenta.” oraz paragrafu 1.8.2.2. tego Załącznika do Regulaminu ONZ nr 13.

„1.8.2.2. Obciążone pojazdy muszą być badane w taki sposób, aby energia doprowadzona do hamulców była równoważna energii odnotowanej w odniesieniu do pojazdu poruszającego się z prędkością 30 km/h na spadku o nachyleniu 7% na odcinku 6 km. Podczas badania nie

*mogą działać układy hamulcowe awaryjne i postojowe. Należy włączyć taki bieg, aby prędkość obrotowa silnika nie przekroczyła maksymalnej wartości określonej przez producenta. Można zastosować zintegrowany układ hamulcowy o długotrwałym działaniu pod warunkiem, że jest on zsynchronizowany w taki sposób, aby nie zadziałał układ hamulcowy roboczy; można to zweryfikować sprawdzając, czy hamulce pozostają zimne zgodnie z pkt 1.4.1.1 niniejszego załącznika.”*

Podstawą badań typu II i IIA w zakresie badań hamulców długotrwałego działania jest norma ISO 12161:2006. Regulamin ONZ nr 13 wprost nie wskazuje metody badania hamulców długotrwałego działania jedynie wskazuje wytyczne. Takie zapisy w Regulaminie zezwalają na użycie alternatywnych metod badania zgodnych z normą ISO 12161:2006. Norma ISO przewiduje 3 rodzaje badań:

- drogowe,
- ciągnięcia (holowania) – alternatywne,
- stanowiskowe – alternatywne.

W przypadku badań drogowych z uwagi na trudności wspomniane wyżej trudności ze znalezieniem odpowiedniej drogi lub toru do przeprowadzenia takich badań, ISO zezwala na pewne odchylenia od wymagań. Nominalne warunki do przeprowadzenia badań typu II i IIA zestawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Nominalne warunki do przeprowadzenia badań typu II i IIA

	jednostka	Badanie typu II	Badanie typu IIA
Nachylenie toru - $\text{tg } \alpha$	-	0,06	0,07
Nachylenie toru - $\text{tg } \alpha$	%	6	7
Prędkość pojazdu - V	km/h	30	30
Długość odcinka badawczego - l	km	6	6
Różnica wysokości - $\Delta H$	m	360	420

Źródło: ISO 12161:2006.

W przypadku badań drogowych różnica wysokości pomiędzy punktami toru badawczego musi być określona z tolerancją do  $\pm 0,5\%$ . Zakładając nominalne nachylenie drogi wymagane w testach jako  $\text{tg } \alpha$ , lokalne odchylenia pochylenia drogi ( $\text{tg } \alpha_{\text{loc}}$ ) nie mogą przekraczać  $\pm 50\% \text{tg } \alpha$ . Długość odcinka testowego wynosi  $l = 6\text{km} = 6000 \text{ m}$ .

$$\text{tg } \alpha = \frac{\Delta H}{l}$$

Na drodze (torze testowym) dopuszczalne jest maksymalnie 5 zakrętów lub przeszkód, które wymagają krótkiego zmniejszenia prędkości pojazdu ale do prędkości nie mniejszej niż 10 km/h. Takie sytuacje wymagające krótkotrwałego użycia hamulca roboczego muszą zostać zrekompensowane poprzez wydłużenie drogi badania o długość wynikającą z różnicy

wysokości wynoszącej  $7m^{13}$ , wymaga to wydłużenia czasu testu o 12s za każdym razem użycia hamulca roboczego.

Jeżeli tor testowy ma wymaganą długość (6 km) ale nachylenie toru jest różne od nominalnego (różna od nominalnej różnica wysokości) kompensuje się to masą pojazdu lub zespołu pojazdów. Kompensacja masą pojazdu lub zespołu jest realizowana zgodnie z wzorem:

$$m' = m \cdot \left( \frac{\Delta H - 0,01 \cdot l}{\Delta H' - 0,01 \cdot l} \right) [\text{kg}]$$

gdzie:

$\Delta H$  – nominalna różnica wysokości

$\Delta H'$  – dostępna na badanym odcinku drogi różnica wysokości

$l$  – nominalna (dostępna) długość toru.

Tak obliczona masa zapewnia dostarczenie do układu energii równoważnej warunkom wzorcowym (nominalnym).

W przypadku, gdy tor testowy zapewnia wymaganą różnicę wysokości ale nie posiada wymaganej długości, a więc jednocześnie nie zapewnia wymaganego nachylenia. Takie odstępstwa od warunków nominalnych można skompensować za pomocą ustalenia nowej średniej prędkości badania. Wyznaczenie prędkości następuje w oparciu o zasadę równoważnej energii i nominalnej masy pojazdu.

Do wyznaczenia potrzebna będzie nachalnie rzeczywiste drogi:

$$v' = v \cdot \left( \frac{(\text{tg } \alpha) - 0,01}{(\text{tg } \alpha)' - 0,01} \right) \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

gdzie:

$v'$  - skorygowana średnia prędkość badania pojazdu

$v$  - nominalna średnia prędkość badania pojazdu (30 km/h).

Ze względu na to, że zmieniono prędkość średnią w czasie pomiaru, a czas pomiaru jest określony należy obliczyć nową długość drogi testowej

$$l' = l \cdot \frac{v'}{v} [\text{m}]$$

W rezultacie różnica wysokości będzie wynosić

$$\Delta H' = l' \cdot (\text{tg } \alpha)' [\text{m}]$$

Należy podkreślić, że zgodnie z ISO obliczona skorygowana średnia prędkość badania nie może różnić się więcej niż  $\pm 20\%$  od nominalnej średniej prędkości badania, tj. 30 km/h.

Jeżeli skorygowana średnia prędkość badania przekracza zakres tolerancji oznaczają to, że nie jest możliwe wykonanie badań pojazdu lub zespołu pojazdu przy masie nominalnej. W takim przypadku należy zastosować kompensację niewłaściwego nachylenia drogi

---

<sup>13</sup> Wartość ta została ustalona doświadczalnie przez Automotive Institute of the University of Hannover, Germany.

badawczej w stosunku do nominalnej za pomocą zmiany masy pojazdu lub zespołu pojazdów oraz prędkości w czasie badania.

Jeżeli dostępna do badań droga ma wymaganą różnicę wysokości, ale nie posiada odpowiedniego nachylenia, a jednocześnie długość drogi jest taka, że obliczona prędkość przekracza tolerancję wynoszącą 20% można skorygować masę pojazdu lub zespołu pojazdu tak, żeby energia dostarczona do układu hamulcowego pojazdu była równoważna energii wynikającej z nominalnych warunków badań.

Masę oblicza się na podstawie średniego nachylenia toru badawczego, a średnia prędkość badania tak, aby skorygowana średnia prędkość badania ( $v'$ ) zawierała się w tolerancji.

$$v' = v \cdot \left( \frac{(\operatorname{tg} \alpha) - 0,01}{(\operatorname{tg} \alpha)' - 0,01} \right) \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Jeżeli obliczona  $v'$  przekracza tolerancję założyć inną prędkość  $v''$ , która zawiera się w zakresie tolerancji ( $\pm 20\% v$ ). Na tej podstawie oblicza się nową masę pojazdu lub zespołu pojazdów wymaganą w badaniach

$$m'' = m \cdot \frac{v'}{v''} \text{ [kg]}$$

Biorąc pod uwagę czas testu tj. 12 minut, zmiana prędkości wymaga określenia nowej długości odcinka potrzebnego do wykonania badania, który obliczany jest na podstawie wzoru:

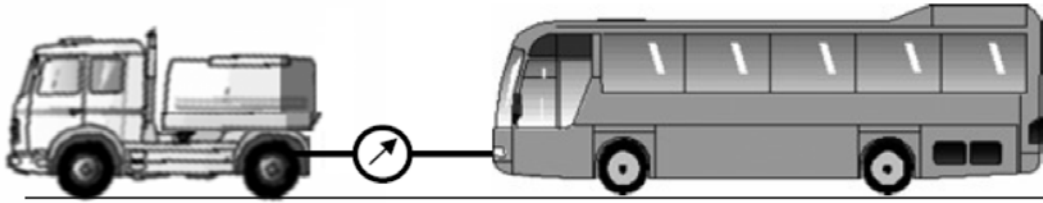
$$l'' = l \cdot \frac{v''}{v} \text{ [m]}$$

W rezultacie oblicza się wymaganą różnicę wysokości toru badawczego

$$\Delta H'' = l'' \cdot (\operatorname{tg} \alpha)' \text{ [m]}$$

Jeżeli obliczona różnica wysokości nie jest możliwa do zrealizowania przez tor (drogę) oznacza to, że ta droga nie jest odpowiednia do przeprowadzenia testów drogowych.

W alternatywnej metodzie wykonywanej za pomocą ciągnięcia (holowania) badanego pojazdu na płaskiej drodze z prędkością 30 km/h na odcinku 6 km, pomiar i rejestracja parametrów musi odbywać się przez co najmniej 12 minut. Rejestrowane parametry to: siła hamowania badanego pojazdu (rejestracja siły pomiędzy pojazdami), jego prędkość i przebyta droga. W późniejszej obróbce zarejestrowanych danych oblicza się, czy energia pojazdu, która została rozproszona przez hamulce o długotrwałym działaniu jest równoważna energii pojazdu jaka należy rozproszyć podczas testu drogowego odpowiedniego typu. W czasie rzeczywistych badań rejestruje się siłę pomiędzy pojazdami, zarejestrowana wartość siły między pojazdami zawiera też siłę wynikającą z oporów ruchu pojazdu. W obliczeniach energii dostarczanej do układu hamowania odejmuje się energię wynikającą z oporów ruchu. Jeżeli wartość energii rozproszonej przez hamulec długotrwałego działania jest co najmniej równa energii pojazdu wymaganej podczas próby drogowej, wymagania dla pojazdu uznaje się za spełnione.



Rys. 6.2. Alternatywna metoda badań typu II i IIA (metoda ciągnięcia)

Źródło: Dokument GRRF-55-23.

Prędkość badania dobiera się, uwzględniając możliwości akwizycji danych przez urządzenie, w ten sposób, żeby możliwie maksymalnie zbliżyć się do czasu nominalnego tj. 12 minut. Jednak jeżeli przeszkodę stanowi bufor urządzenia, możliwe jest zwiększenie prędkości badania w celu zapewnienia rejestracji wszystkich próbek. Zmiana prędkości możliwa jest tylko w zakresie do dopuszczalnej tolerancji  $\pm 20\%$ . W praktyce nie stosuje się takich rozwiązań, gdyż współczesne urządzenia pomiarowe pozwalają na rejestrację danych z wystarczającą częstotliwością przez czas 12 minut.

Wartość średniej siły między pojazdami określa się ze wzoru:

$$F = \sum_{i=1}^N F_i \frac{1}{N} \text{ [N]}$$

gdzie:

N – ilość zarejestrowanych próbek

$F_i$  – zarejestrowana siła (pojedyncza próbka)

Wartość średniej prędkości oblicza się w analogiczny sposób:

$$v = \sum_{i=1}^N v_i \frac{1}{N} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

gdzie:

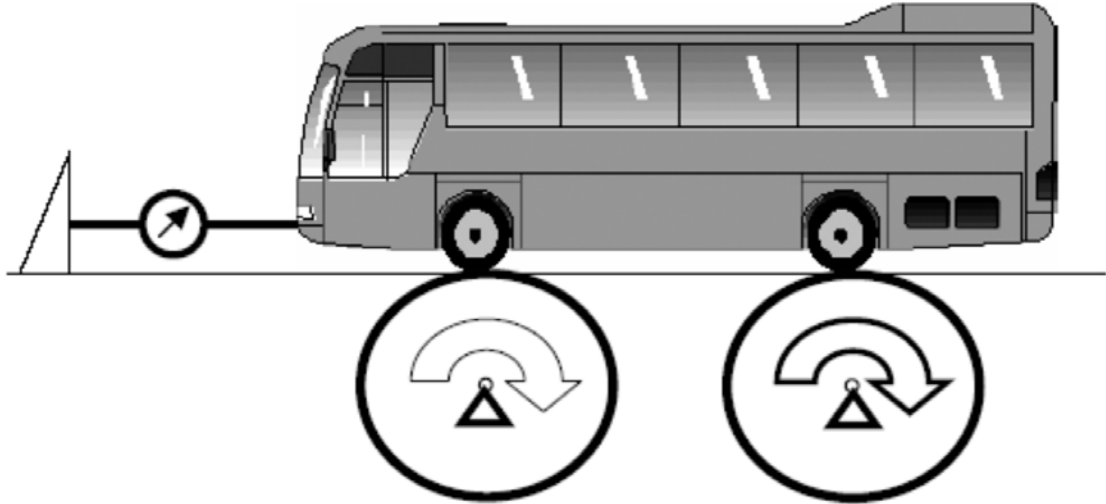
N – ilość zarejestrowanych próbek

$V_i$  – zarejestrowana prędkość pojazdu (pojedyncza próbka).

Kolejną metodą jest wykonanie badania na specjalnym stanowisku rolkowym które symuluje prędkość pojazdu wynoszącą 30 km/h. Podczas 12 minutowego testu w którym koła pojazdu są napędzane prędkością odpowiadającą jeździe pojazdu z prędkością 30km/h używa się urządzenia do hamowania długotrwałego. W trakcie testu w sposób ciągły rejestrowana jest siła hamowania pojazdu lub moment hamowania na kołach pojazdu. Stanowisko za pomocą pomiaru prędkości obrotowej rolek utrzymuje stałą prędkość pojazdu oraz jednocześnie dokonuje pomiaru momentu obrotowego bębnow stanowiska. W celu określenia oporów ruchu wykonuje się dodatkowe badanie na stanowisku, które określa opory ruchu pojazdu. Na podstawie przebiegu wartości siły (lub momentu) hamowania określa się czy energia

dostarczona do układu hamowania długotrwałego jest co najmniej równa energii wymaganej podczas próby drogowej. Jeżeli ilość energii dostarczonej do układu hamulcowego jest co najmniej równa energii wymaganej podczas próby drogowej, wymagania dla pojazdu uznaje się za spełnione.

Ilustracja tej metody badań jest przedstawiona na Rys. 6.3.



Rys. 6.3. Alternatywna metoda badań typu II i IIA (metoda stanowiskowa).

Źródło: Dokument GRRF-55-23.

Analogicznie jak poprzednio prędkość badania dobiera się, uwzględniając możliwości akwizycji danych przez urządzenia, w ten sposób, żeby możliwie maksymalnie zbliżyć się do czasu nominalnego tj. 12 minut. Jednak jeżeli przeszkodę stanowi bufor urządzenia, możliwe jest zwiększenie prędkości badania w celu zapewnienia rejestracji wszystkich próbek. Zmiana prędkości możliwa jest tylko w zakresie do dopuszczalnej tolerancji  $\pm 20\%$ .

Obliczenia średniej prędkości postępowej pojazdu podczas badania określa się w analogiczny sposób jak przy metodzie holowania.

Jeżeli rejestracji podlega siła jak na Rys. 6.3 to wartość średnią siły wylicza się analogicznie jak w przypadku metody holowania pojazdu. Wartość średnią momentu hamującego określa się na podstawie zależności:

$$M = \sum_{i=1}^N M_i \frac{1}{N} \text{ [Nm]}$$

gdzie:

$M_i$  – pojedyncza próbka zawierająca sumę momentów hamowania zmierzonych na wszystkich rolkach stanowiska.

Należy zwrócić uwagę, że norma ISO nie przewiduje w badaniach typu II po wykonaniu testu hamowania długotrwałego pomiaru opóźnienia hamowania typu ) „na gorąco”. Takie wymaganie znajduje się tylko w Regulaminie ONZ nr 13.



## 7. Obliczenia energii pojazdu w testach typu II i IIA na podstawie normy ISO 12161:2006 oraz Regulaminu ONZ nr 13

Tak jak wspomniano poprzednio norma ISO 12161:2006 i Regulamin ONZ nr 13 zawiera wymagania dotyczące hamowania długotrwałego pojazdów. W obu dokumentach wymagane jest, aby do układu hamowania pojazdu dostarczyć porównywalną energię do zarejestrowanej w czasie zjazdu obciążonego pojazdu z prędkością średnią 30 km/h po torze o nachyleniu 6 lub 7% i długości 6 km. Obliczenia mocy i energii różnią się w zależności od zastosowanej metody pomiaru.

W przypadku testów drogowych obliczenia energii pojazdu dostarczonej do hamulców i urządzeń hamowania długotrwałego pojazdu ograniczają się do podstawowych wzorów fizycznych wynikających z energii potencjalnej ciężkości oraz energii rozpraszanej (oporów ruchu). Dla ułatwienia przyjęto wartość oporów ruchu pojazdu wynikających z oporu toczenia zgodnie z poniższym wzorem.

$$W_{\text{diss}} = W_{\text{pot}} - W_{\text{rr}}$$

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot \Delta H$$

$$W_{\text{rr}} = m \cdot g \cdot \left( \frac{\Delta H}{\text{tg } \alpha} \cdot 0,01 \right) \text{ [J]}$$

gdzie:

$W_{\text{pot}}$  – energia potencjalna pojazdu

$W_{\text{rr}}$  – energia oporów ruchu pojazdu

$W_{\text{diss}}$  – energia do rozproszenia podczas testów hamowania długotrwałego

Na tej podstawie obliczana jest moc równoważna, która ma zostać rozproszona podczas badań na zgodność pojazdu z Regulaminem ONZ nr 13 w testach II i IIA.

$$P_{\text{ret}} = \frac{W_{\text{diss}}}{T} \text{ [W]}$$

gdzie:

$P_{\text{ret}}$  – moc do rozproszenia podczas testów hamowania długotrwałego

$T$  – czas testu.

Zgodnie z powyższymi wzorami energia rozpraszana podczas testu rodzaju II i IIA wynosi w zależności od rodzaju testu:

$$W_{\text{dissII}} = m \cdot g \cdot l \cdot (0,06 - 0,01)$$

$$W_{\text{dissIIA}} = m \cdot g \cdot l \cdot (0,07 - 0,01)$$

gdzie:

$W_{\text{dissII}}/W_{\text{dissIIA}}$  – moc do rozproszenia podczas testów hamowania długotrwałego typu II / IIA.

W przypadku badań na stanowisku rolkowym energię dostarczoną do układu hamulcowego wylicza się zakładając siłę oporu toczenia  $F_{\text{rr}}$  wynoszącą 1% siły ciężkości badanego pojazdu.

$$F_{\text{rr}} = 0,01 \cdot m \cdot g$$

Energię Rozproszona podczas testów hamowania długotrwałego  $W_{\text{diss}}$  oblicza się z poniższego wzoru:

$$W_{\text{diss}} = \sum_{i=1}^N F_i \cdot v_i \cdot \Delta t - (F_{\text{rr}} \cdot v_{\text{aver}} \cdot T)$$

gdzie:

$F_{\text{rr}}$  – siła oporu toczenia

$F_i$  – siła zarejestrowana w między pojazdami

$v_{\text{aver}}$  – średnia prędkość badanego pojazdu.

W przypadku badań stanowiskowych na rolkach energię oporu toczenia wyznacza się podczas oddzielnego badania na stanowisku wykonanego przy symulacji takiej samej prędkości pojazdu. wynosi:

$$W_{\text{rr}} = \sum_{i=1}^N F_{\text{rr}} \cdot v_i \cdot \Delta t$$

Moc oporów:

$$P_{\text{rr}} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{\text{rr}} \cdot v_i \cdot \Delta t}{T}$$

$$W_{\text{diss}} = \sum_{i=1}^N M_i \cdot \frac{v_i}{r} \cdot \Delta t - N \Delta t \cdot P_{\text{rr}}$$

gdzie:

$P_{\text{rr}}$  – moc oporu toczenia

$M_i$  – moment hamowania zarejestrowany na rolkach

$v_{\text{aver}}$  – prędkość linowa pojazdu badanego

$\Delta t$  – okres wynikający z częstotliwości próbkowania.

Moc hamowania wyliczamy analogicznie jak poprzednio.

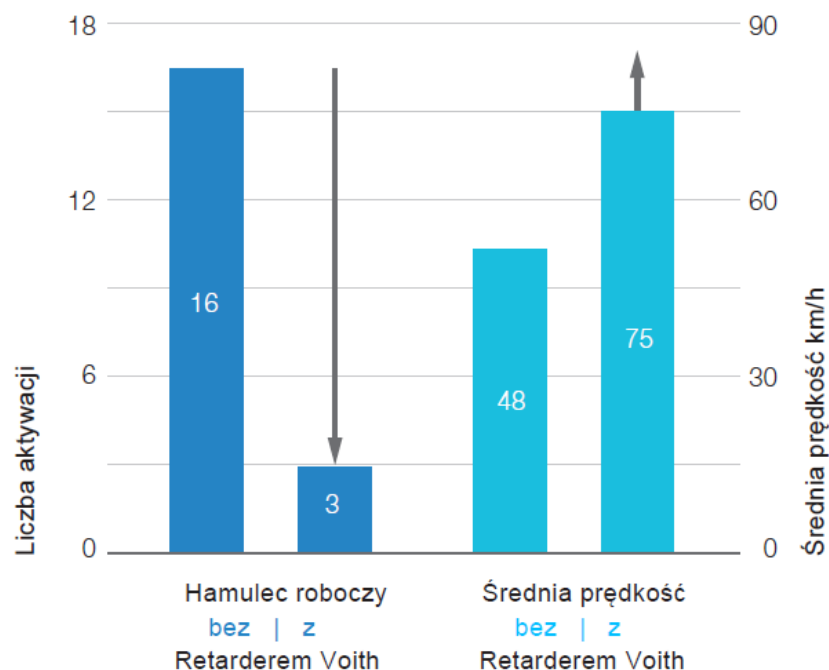
$$P_{\text{ret}} = \frac{W_{\text{diss}}}{T} \text{ [W]}$$

## 8. Stosowane obecnie układy hamowania długotrwałego

### 8.1. Zalety stosowania układów hamowania długotrwałego

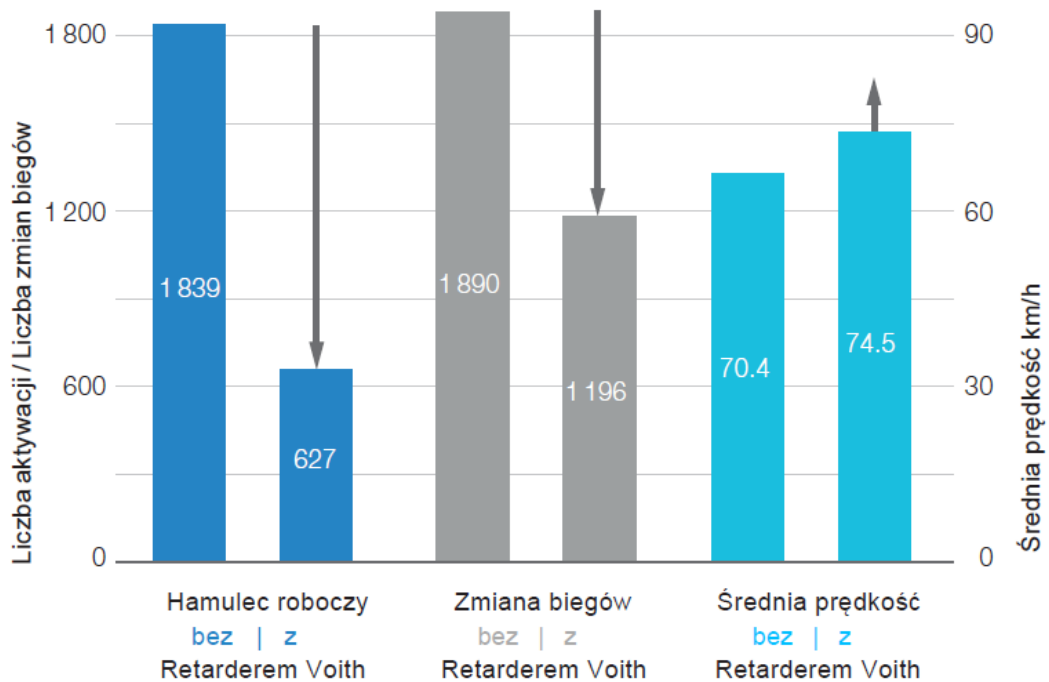
Układy hamowania długotrwałego tzw. zwalniacze lub inaczej retardery lub intardery<sup>14</sup> często są urządzeniami znanymi nie tylko w przemyśle samochodowym, ale i używane w pojazdach szynowych. W przypadku pojazdów spalinowych urządzenia takie są powszechnie zastosowane w autobusach i pojazdach ciężarowych. Układy takie mogą być zintegrowane z układem roboczym hamulca lub jako urządzenia sterowane niezależnie. Takie rozwiązanie jest wymagane w przypadku pojazdów które muszą podlegać obowiązkowemu badaniu typu IIA. W tym badaniu, zabronione jest korzystanie z roboczego układu hamulcowego, wobec czego musi być możliwość aktywacji tylko układu długotrwałego hamowania. W układzie zintegrowanym rozwiązanie jest powszechnie stosowane w pojazdach, gdyż wykorzystanie podczas hamowania pojazdów jednocześnie hamulców ciernych i układów hamowania długotrwałego przyczynia się do zmniejszenia zużycia elementów ciernych układu hamulcowego oraz bezpieczeństwa ruchu drogowego. Na podstawie analizy głównych producentów układów hamowania długotrwałego, przyjmuje się że takie układy używane podczas normalnych hamowań przyczyniają się znacznie do zmniejszenia zużycia elementów ciernych układu hamulcowego. Różnice przedstawione są na Rys. 8.1, zawierają porównanie parametrów na 2 trasach.

#### Droga testowa\* 4.8 km: Guadix do Granada (Hiszpania)



<sup>14</sup> Określenie używane dla układów zintegrowanych ze skrzynią biegów w których medium (np. olej jest wspólny dla przekładni i retardera).

## Droga testowa\* 3 164 km: Włochy do Niemiec

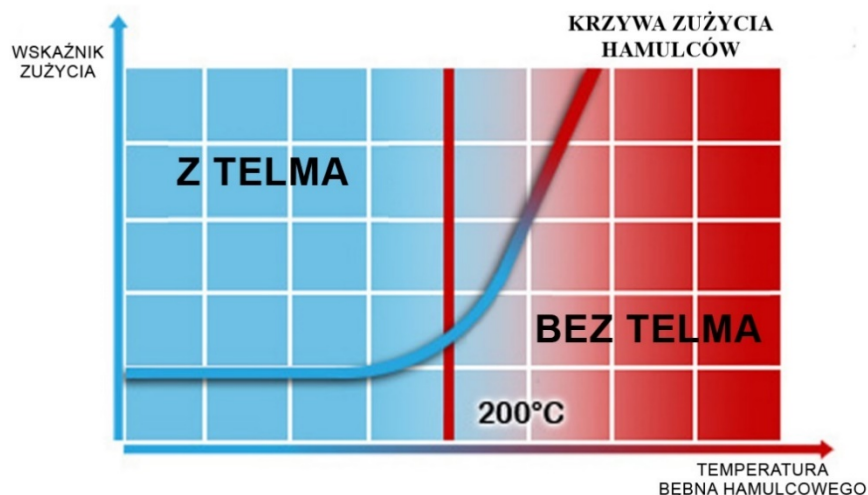


Rys. 8.1. Porównanie zużycia elementów ciernych hamulca roboczego i średniej prędkości na trasach wykonanych pojazdami wyposażonymi w zwalniacz i bez tego urządzenia.

Źródło: Enhanced safety, efficiency and sustainability Voith Retarders.

Firma TELMA, lider w produkcji zwalniaczy elektrodynamicznych, również wskazuje się w swoich materiałach marketingowych ograniczenie temperatury pracy materiałów ciernych hamulców przyczyniając się do zmniejszenia ich zużycia. Zgodnie z przedstawionym na Rys. 8.2. Takie wnioski zawarte są też w wielu publikacjach naukowych.

## NA DŁUGICH TRASACH ZJAZDOWYCH

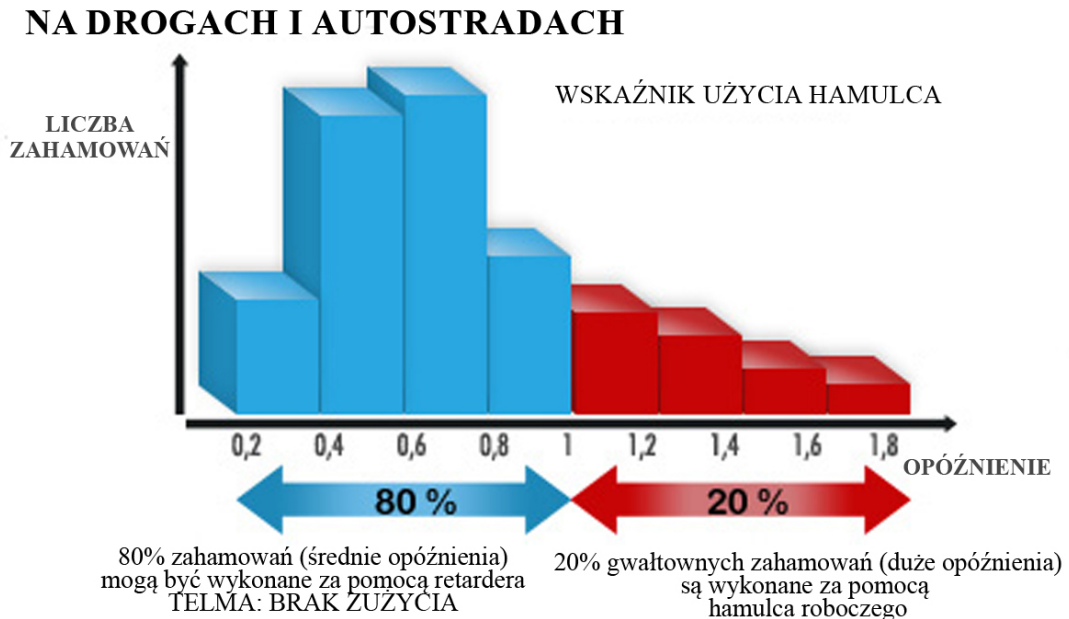


Rys. 8.2. Zależność zużycia materiałów ciernych stosowanych w hamulcach ciernych pojazdów w zależności od temperatury pracy.

Źródło: <https://www.telma.com/produits/avantage-economique>

Zgodnie z wyliczeniami i badaniami przeprowadzonymi przez firmę TELMA (Francja) zastosowanie zwalniaczy może powodować nawet do 8-krotnego wydłużenia czasu między

wymianami elementów ciernych hamulców roboczych<sup>15</sup>. Z uwagi na fakt, że większość procesów hamowania pojazdu odbywa się w zakresie niewielkich opóźnień są one realizowane przez retardery. Na podstawie badań przeprowadzonych przez TELMA hamowania z opóźnieniem do  $1 \text{ m/s}^2$  stanowią nawet 80% wszystkich hamowań pojazdów ciężarowych i autobusów. Na Rys. 8.3 przedstawiono rozkład częstotliwości hamowania w funkcji opóźnienia hamowania takich pojazdów. Zastosowanie zwalniaczy powoduje, że w zakresie opóźnień hamowania pojazdu o wartości do  $1 \text{ m/s}^2$ , które stanowią ok. 80% hamowań pojazdu, może być realizowane przez zwalniacze.



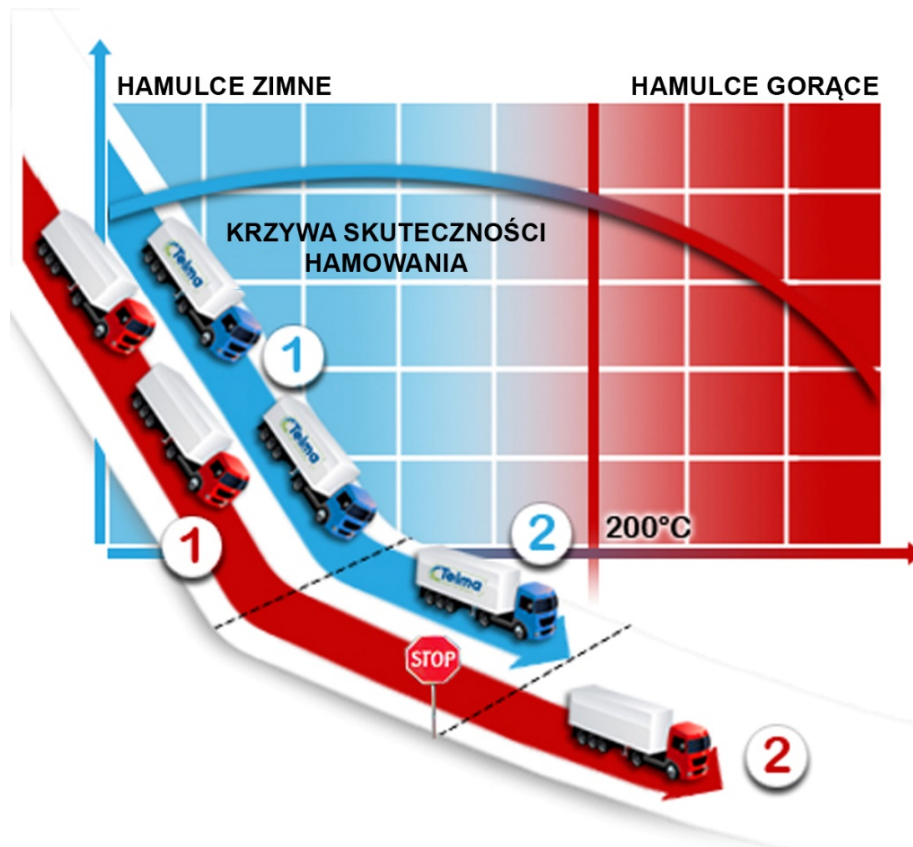
Rys. 8.3. Rozkład częstotliwości występowania hamowania w funkcji opóźnienia hamowania

Źródło: <https://www.telma.com/produits/avantage-economique>

Ponadto, stosowanie układów hamowania długotrwałego (tzw. zwalniacza) przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa ograniczając zjawisko fadingu w hamulcach pojazdów ciężkich. W rezultacie znacznie skracając drogę hamowania w sytuacji, kiedy na długim zjeździe następuje z konieczności wykonania nagłego hamowania za pomocą hamulców ciernych. Taka sytuacja została zaprezentowana na Rys. 8.4. Pojazd oznaczony na niebiesko wykonywał zjazd z użyciem zwalniacza, więc w sytuacji awaryjnej jego hamulce miały niższą temperaturę, a więc i skuteczność hamowania była zdecydowanie większa. Przykładem niebezpiecznej sytuacji opisanej powyżej jest wypadek polskiego autokaru pod Grenoble (Francja) w 2007 roku. Zgodnie z opinią specjalistów z Instytutu Ekspertyz Sądowych w Krakowie niewłaściwe użycie hamulców było jedną z przyczyn katastrofy polskiego autokaru<sup>16</sup>. Według krakowskich ekspertów kierujący nadmierne i zbyt długo używał hamulca roboczego zamiast zwalniacza hydraulicznego, tzw. retardera. W ten sposób doprowadził do znacznego wzrostu temperatury elementów hamulca ciernego, jednocześnie zmniejszając skuteczność działania tych hamulców. To z kolei uniemożliwiło skuteczne hamowanie pojazdu, co doprowadziło do katastrofy.

<sup>15</sup> <https://www.telma.com/produits/avantage-economique> [maj 2021]

<sup>16</sup> <https://www.rmfm24.pl/fakty/polska/news-zla-technika-hamowania-przyczyna-wypadku-pod-grenoble,nld,80547> [maj 2021]



Rys. 8.4. Porównanie drogi hamowania w przypadku konieczności nagłego zatrzymania w przypadku używania zwalniacza i nieużywania zwalniacza.

Źródło: <https://www.telma.com/produits/avantage-economique>

Charakterystyka zwalniaczy nie pozwala na całkowite zatrzymanie pojazdu, ponieważ niezależnie od rodzaju skuteczność takich systemów obniża się wraz ze zmniejszeniem prędkości. Zwykle nie są one w stanie zatrzymać pojazdów, a hamowanie w ostatniej fazie zatrzymania jest realizowane praktycznie tylko przez hamulce cierne. Z tego też względu takie urządzenia są stosowane głównie w celu ograniczenia prędkości pojazdu podczas zjazdu ze wzniesienia przy jednoczesnym ograniczeniu lub wyeliminowaniu konieczności używania hamulców ciernych.

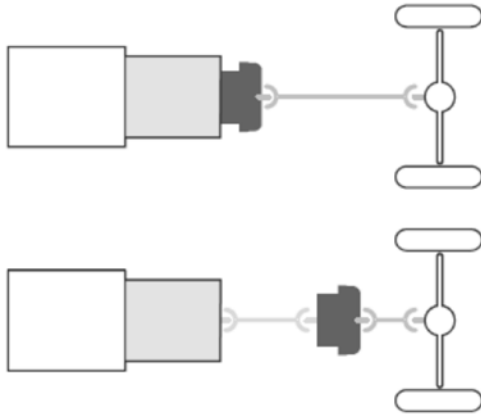
Wśród zwalniaczy rozróżniamy kilka grup zwalniaczy z uwagi na zasadę działania:

- Cierne;
- Hydrodynamiczne;
- Silnikowe:
  - opory własne silnika (przepustnica, odcięcie paliwa);
  - pracy sprężarkowej (Jacobs brake lub Jake brake);
- Wydechowe;
- Elektromagnetyczne;
- Elektryczne – odzysk energii.

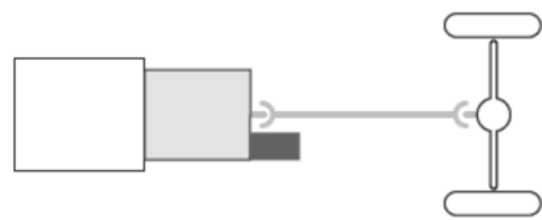
Dodatkowo można podzielić na zwalniacze hydrodynamiczne na zewnętrzne i wewnętrzne w zależności od położenia oraz w zależności od połączenia z układem napędowym. Rozróżnia się retardery montowane szeregowo (tzw. „in line”), kiedy retarder jest zamontowany pomiędzy skrzynią biegów a osią napędową. Może być zamontowany na wale napędowym lub w sposób bezpośredni (pomiędzy wyjściem ze skrzyni biegów a wyjściem wału napędowego). Drugi sposób montażu zwalniaczy to montaż równoległy (tzw. „off-line”), w takim rozwiązaniu

retarder jest napędzany poprzez koła zębate (np. skrzyni biegów) a nie przez wał wyjściowy ze skrzynki biegów. przykładniowej tzw. Różnice pomiędzy rozwiązaniami przedstawione są na Rys. 8.5.

a) montaż szeregowy („in-line”)



b) montaż równoległy („off-line”)



Rys. 8.5. Różnica pomiędzy szeregowym (in-line) a równoległym (off-line) montażem zwalnicza.

Źródło: Enhanced safety, efficiency and sustainability Voith Retarders <http://voith.com/corp-en/braking-systems/retarders-trucks.html>

## 8.2. Zwalniacze hydrodynamiczne

Zwalniacze hydrodynamiczne są powszechnie stosowane w samochodach ciężarowych i autobusach. Zaletą takiego rozwiązania jest zwartość konstrukcji i jednocześnie niewielka masa. Szacuje się, że masa takich urządzeń waha się od 59 do 113 kg przy maksymalnym momencie hamowania nawet do 4000 Nm<sup>17</sup>. Budowa tego rodzaju zwalniczy jest przybliżona do budowy sprzęgła hydrokinetycznego. Wirnik połączony jest z wałem napędowym a obudowa pozostaje nieruchoma (tzw. stator). W momencie uruchomienia najczęściej poprzez ciśnienie powietrza wprowadzana jest pomiędzy wirniki ciecz hydrauliczna, którą może być olej lub woda. Zwalniacz działa na zasadzie hydrokinetycznego sprzęgania wirnika połączonego z wałem napędowym z nieobracającym się korpusem zwalnicza. Wypełnienie przestrzeni roboczej cieczą roboczą powoduje połączenie hydrokinetyczne z nieruchomą obudową w proporcji odpowiadającej ilości cieczy w urządzeniu.

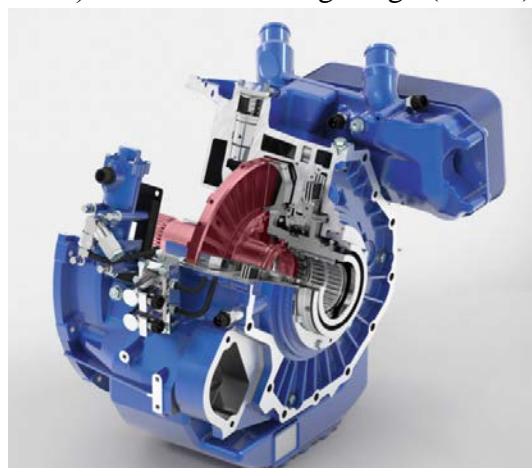
Budowę takiego zwalnicza przedstawiono na Rys. 8.6. Kolorem czerwonym zaznaczono ruchomy wirnik zwalnicza. W rozwiązaniu równoległym wirnik jest napędzany za pomocą koła zębatego połączonego z kołami zębatymi skrzyni biegów. W przypadku montażu równoległego wirnik zwalnicza połączony jest z wałem napędowym lub bezpośrednio z wałem wyjściowym skrzyni biegów.

<sup>17</sup> D. Łomako, T. Stańczyk, J. Grzyb, *Pneumatyczne układy hamulcowe w pojazdach samochodowych*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002 r., s.139.

a) do montażu równoległego (off-line)



b) do montażu szeregowego (in-line)



Rys. 8.6. Zdjęcia zwalniacza do pracy w układzie: a) równoległym, b) szeregowym.

Źródło: Enhanced safety, efficiency and sustainability Voith Retarders <http://voith.com/corp-en/braking-systems/retarders-trucks.html>

W zależności od oczekiwanej intensywności i skuteczności hamowania retardera reguluje się ilość cieczy krążącej pomiędzy statorem a wirnikiem. Krążąca ciecz odbiera energię kinetyczną obracającego się wirnika, w wyniku tego energia kinetyczna zamieniana jest na ciepło, które odprowadzane jest do układu chłodzenia. Zaletą zwalniaczy hydrodynamicznych jest cicha praca oraz brak zjawiska znaczącej utraty siły hamowania w czasie długiej pracy.

### 8.3. Zwalniacze elektromagnetyczne

Zwalniacze elektromagnetyczne są również często stosowane w pojazdach samochodowych charakteryzują się większą masą niż zwalniacze hydrodynamiczne o podobnych parametrach, masa ich wynosi od 65 do 337 kg, przy zapewnieniu momentu hamującego od 340 do 4000 Nm<sup>18</sup>. Z uwagi na brak medium nie ma zagrożenia wycieku płynów, który w przypadku zwalniaczy hydrodynamicznych powoduje utratę zdolności hamowania zwalniacza. Zwalniacze elektromagnetyczne działają w oparciu o zjawisko prądów wirowych Foucaulta. Prądy te powstają, jeżeli tarcza o małym współczynniku koercji znajduje się w polu magnetycznym, wtedy zaindukowane w tarczy prądy powodują w stosunku do pola magnetycznego, moment reakcji który przeciwdziała obrotowi tarczy. Konstrukcja takiego zwalniacza zawiera stator połączony z obudową i elementami stałymi podwozia pojazdu. Stator wyposażony jest w kilka od 3 do 5 par cewek (elektromagnesów) które wytwarzają pole magnetyczne. Drugim elementem jest jeden (lub więcej) rotor połączony z wałem napędowym. Takie zwalniacze montowane są najczęściej w układzie szeregowym. Zamontowane są na wale pomiędzy skrzynią biegów a przekładnią główną lub bezpośrednio połączone ze skrzynią biegów. Rzadko stosuje się układ zintegrowany z przekładnią główną. Przykład budowy takiego zwalniacza firmy Telma (Francja) przedstawiono na Rys. 8.7.

<sup>18</sup> D. Łomako, T. Stańczyk, J. Grzyb, *Pneumatyczne układy hamulcowe w pojazdach samochodowych*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002 r., s.143.





Rys. 8.7. Zwalniacz elektromagnetyczny do montażu szeregowego (on-line).

Źródło: <https://norwoodequipment.com/telma>

Tego typu zwalniacz nie wymaga chłodzenia cieczą, wystarczające chłodzenie jest zapewnione przez wymuszony przepływ powietrza przez zwalniacz wywołany przez obracające się rotory. Taki układ chłodzenia powoduje łatwą zabudowę urządzenia w pojazdach i przyczepach. Drugą istotną cechą zwalniczy elektromagnetycznych jest zmniejszenie momentu hamującego wraz ze zmniejszeniem prędkości obrotowej rotorów. W przypadku zatrzymania rotora moment hamujący zwalnicza elektromagnetycznego całkowicie zanika. Ma to istotne znaczenie dla działania układu ABS.

Niestety zwalniacze elektromagnetyczne posiadają również wadę. Ciągła praca zwalnicza powoduje nagrzewanie elementów nawet do temperatury ok. 400°C mimo wymuszonego przepływu powietrza. W takiej temperaturze następują zmiany przewodności i przenikliwości magnetycznej rotora oraz obniżenia wartości strumienia magnetycznego. Z tego powodu przy takiej temperaturze wartość momentu hamującego zwalnicza zmniejsza się o połowę, przyjmuje się, że taki stan osiąga się po ok. 20 min ciągłej pracy. Z uwagi na brak jakiegokolwiek kontaktu bezpośredniego lub pośredniego za pomocą medium pomiędzy częściami wykonawczymi zwalnicza praca zwalniczy elektromagnetycznych jest wyjątkowo cicha.

## 8.4. Zwalniacze silnikowe

W zwalniaczach tego typu moment hamujący pochodzi od oporów wewnętrznych silnika spowodowanych tarcieniem oraz sprężaniem. Najprostszym sposobem uzyskania efektu hamowania silnikiem jest w silnikach o zapłonie iskrowym (ZI) zamknięcie przepustnicy lub w przypadku silników o zapłonie samoczynnym (ZS) odcięcie dopływu paliwa. Hamowanie jest realizowane poprzez tarcie wewnętrzne silnika oraz opory sprężania wynikające z normalnej pracy układu rozrządu silnika. Z uwagi na niewielkie momenty hamowania takich rozwiązań nie stosuje się w pojazdach ciężarowych. Jedynie w małych autobusach o maksymalnej masie do 5500 – 5800 kg.

Jedną z odmian hamulców silnikowych jest hamulec kompresyjny, polega on przestawieniu silnika w prace sprężarkową. Takie rozwiązania były powszechnie stosowane w silnikach ZS w USA. Rozwiązanie to nazywa się hamulcem Jacobsa (Jacobs brake lub Jake brake). Rozwiązanie to polega na przesterowaniu układu sterowania zaworem wydechowym w silniku w taki sposób aby nastąpiło otwieranie zaworów wydechowych w górnej części suwu sprężania. W takim rozwiązaniu duża ilość energii zmagazynowanej w sprężonym powietrzu w cylindrze uwalniana jest do atmosfery, a nie jest zwracana poprzez tłok do wału korbowego. Takie rozwiązanie ma poważną wadę, gdy hamulec działa, sprężone powietrze jest nagle uwalniane do atmosfery w końcu suwu sprężania silnika. To nagłe uwolnienie sprężonego powietrza powoduje powstanie hałasu i z tego względu w części stanów w USA używanie tego hamulca jest zabronione. Zaletą tego hamulca jest duża skuteczność.

Kolejnym rodzajem silnikowego hamowania długotrwałego jest hamowanie za pomocą dławienia wylotu gazów wydechowych z silnika. Zasada działania tego zwalniacza polega na sprężaniu powietrza (gazów wylotowych) poprzez zamknięcie przepływu w rurze wydechowej. Zamknięcie jest realizowane za pomocą sterowanej przepustnicy motylkowej lub zasuwki.

Skuteczność takiego rozwiązania jest 2-krotnie większa niż przy hamowaniu silnikiem bez dodatkowych urządzeń, a moc hamowania przy zdławionym układzie wydechowym wynosi 75-85% wartości mocy nominalnej silnika<sup>19</sup>. Moment hamujący wzrasta wraz z prędkością obrotową, a maksymalna wartość przypada na ok. 60% wartości nominalnej prędkości obrotowej silnika. Sterowanie przepustnicą jest realizowane poprzez siłownik pneumatyczny sterowany mechanicznie lub elektromagnetycznie. Skuteczność tego typu rozwiązań jest mniejsza niż zwalniaczy hydrodynamicznych czy elektromagnetycznych. Zastosowanie takiego zwalniacza ma pewne ograniczenia wynikające z dość powszechnego stosowania turbosprężarek w silnikach.

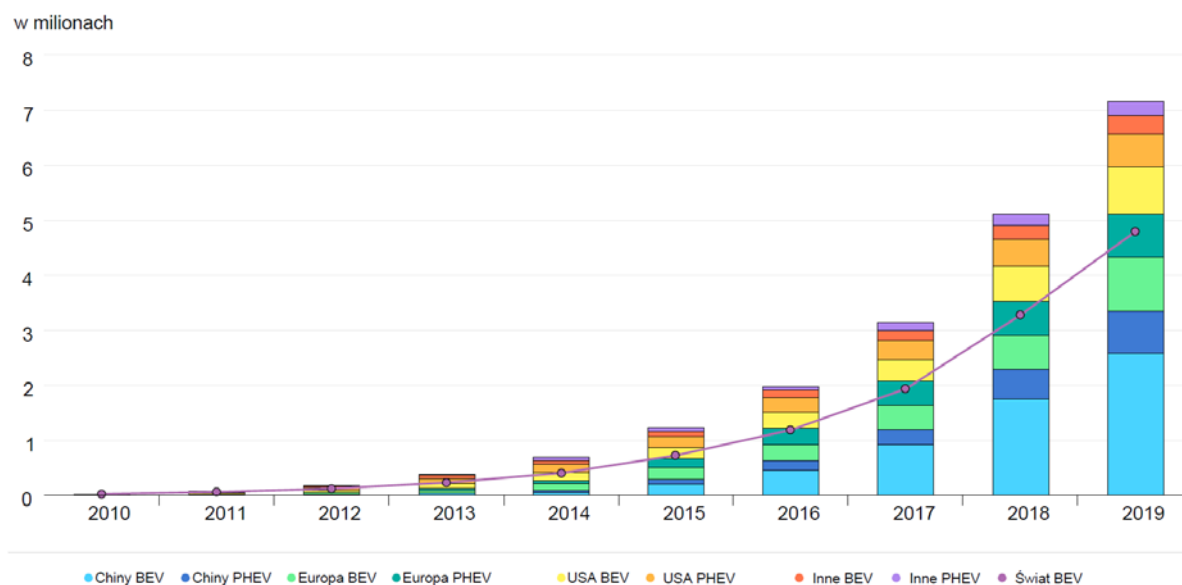
---

<sup>19</sup> D. Łomako, T. Stańczyk, J. Grzyb, *Pneumatyczne układy hamulcowe w pojazdach samochodowych*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002 r. s.134

## 9. Rozwój samochodów elektrycznych, w tym ciężarowych i autobusów

### 9.1. Rynek pojazdów elektrycznych i infrastruktura drogowa

Obecnie na świecie obserwujemy duży wzrost liczby zarejestrowanych elektrycznych samochodów osobowych. Corocznie zwiększa się na świecie liczba zarejestrowanych pojazdów elektrycznych zgodnie z przedstawionymi danymi na Rys. 9.1. Na osi pionowej liczba zarejestrowanych pojazdów elektrycznych w mln.



Rys. 9.1. Liczba zarejestrowanych na Świecie elektrycznych i hybrydowych pojazdów.

Źródło: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-stock-2010-2019> [maj 2021]

Na podstawie danych przedstawionych przez Polskie Stowarzyszenie Paliw Alternatywnych<sup>20</sup> pod koniec grudnia 2020 r. po polskich drogach jeździło 18 875 elektrycznych samochodów osobowych, z których 53% stanowiły pojazdy w pełni elektryczne (BEV, ang. battery electric vehicles) – 10 041, a pozostałą część hybrydy typu plug-in (PHEV, ang. plug-in hybrid electric vehicles) – 8 834. Liczba elektrycznych samochodów dostawczych i ciężarowych w analizowanym okresie zwiększyła się do 839. W dalszym ciągu rośnie też liczba elektrycznych motorowerów i motocykli, która na koniec grudnia osiągnęła 8 941.

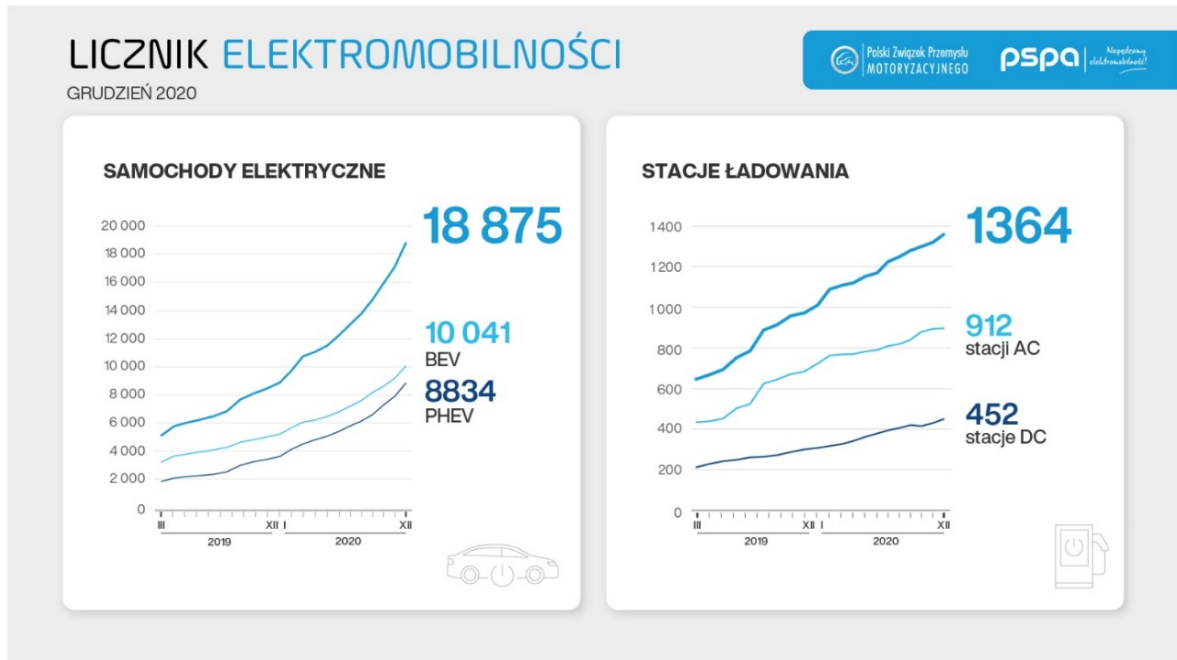
Pod koniec 2020 roku w Polsce było zarejestrowanych 430 autobusów elektrycznych (Rys. 9.2). W okresie od stycznia do grudnia 2020 r. liczba autobusów elektrycznych zwiększyła się o 201 pojazdów. W porównaniu z rokiem 2019 oznacza to zmianę o 253% r/r<sup>21</sup>.

Wraz ze wzrostem liczby pojazdów z napędem elektrycznym, rozwija się również infrastruktura ładowania. Pod koniec grudnia 2020 r. w Polsce funkcjonowały 1 364 ogólnodostępne stacje ładowania pojazdów elektrycznych wyposażone w 2 641 punktów ładowania. 33% z nich stanowiły szybkie stacje ładowania prądem stałym (DC), a 67% wolne

<sup>20</sup> <https://pspa.com.pl/> [maj 2021]

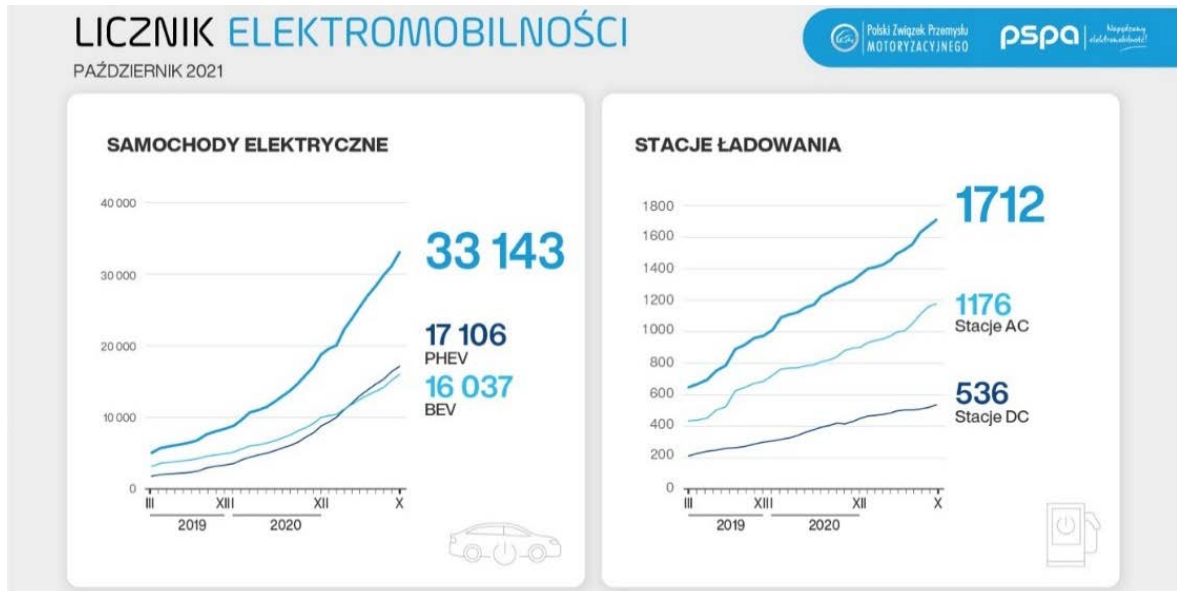
<sup>21</sup> <https://pspa.com.pl/2021/informacja/licznik-elektromobilnosci-rok-2020-rekordowy-na-polskim-ryнку-samochodow-elektrycznych/> [maj 2021]

ładowarki prądu przemiennego (AC) o mocy mniejszej lub równej 22 kW. W grudniu uruchomiono 40 nowych, ogólnodostępnych stacji ładowania (109 punktów).



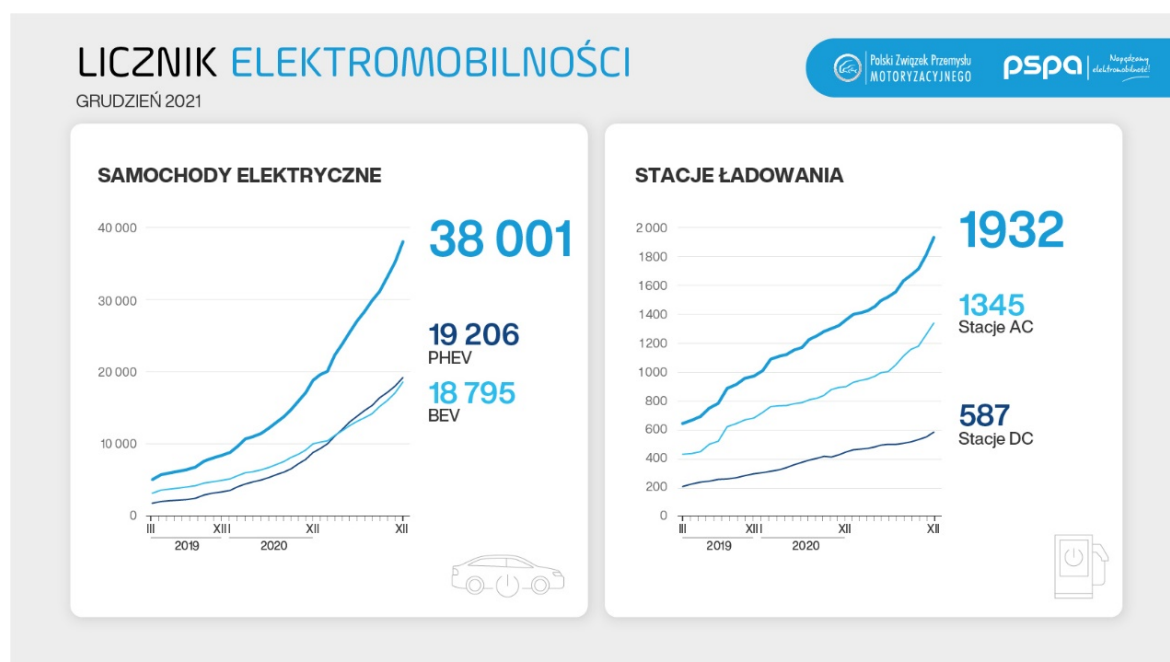
Rys. 9.2. Liczba zarejestrowanych samochodów elektrycznych i hybrydowych oraz liczba stacji ładowania (grudzień 2020r.)

Źródło: <https://pspa.com.pl/2021/informacja/licznik-elektromobilnosci-rok-2020-rekordowy-na-polskim-ryнку-samochodow-elektrycznych/>



Rys. 9.3. Liczba zarejestrowanych samochodów elektrycznych i hybrydowych oraz liczba stacji ładowania (październik 2021 r.)

Źródło: <https://pspa.com.pl/2021/informacja/licznik-elektromobilnosci-wzrost-rejestracji-samochodow-elektrycznych-mimo-niedoboru-polprzewodnikow/>



Rys. 9.4. Liczba zarejestrowanych samochodów elektrycznych i hybrydowych oraz liczba stacji ładowania (grudzień 2021 r.)

Źródło: <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-rosnie-liczba-stacji-ladowania-w-polsce/>

Pod koniec października 2021 r. po polskich drogach jeździły 33 143 elektryczne samochody osobowe. Pojazdy w pełni elektryczne (BEV) stanowiły 48% (16 037) wszystkich zarejestrowanych w Polsce samochodów elektrycznych, a pozostałą część (52%) stanowiły hybrydy typu plug-in (PHEV) – 17 106. Liczba elektrycznych samochodów dostawczych i pojazdów ciężarowych wynosił 1 412. W dalszym ciągu rośnie też liczba elektrycznych motorowerów i motocykli, która na koniec października wynosiła 10 601, liczba osobowych i dostawczych aut hybrydowych, zwiększyła się do 303 393. Do października 2021 r. zarejestrowanych w Polsce było 633 autobusów elektrycznych, a w rozważanym okresie nastąpił wzrost o 202 zeroemisyjne pojazdy. W porównaniu z analogicznym okresem w 2020 r., kiedy to zarejestrowano 154 takie autobusy, oznacza to wzrost o 31% r/r. Mimo kryzysu na rynku motoryzacyjnym, przez pierwsze 10 miesięcy 2021 r. liczba rejestracji osobowych BEV wzrosła o 78% r/r, a PHEV o 132% r/r. Mimo zwiększonej dynamiki rozwoju rynku e-mobility, niedobór półprzewodników ogranicza lub opóźnia dostępność egzemplarzy szeregu modeli z napędem elektrycznym<sup>22</sup>.

Według danych z końca grudnia 2021 r., w Polsce było zarejestrowane łącznie 38 001 elektrycznych samochodów osobowych. W stosunku do 2020 r. liczba elektrycznych samochodów osobowych zwiększyła się o 20 253, tj. o 93%. Pod koniec grudnia 2021 r. po polskich drogach jeździło 38 001 elektrycznych samochodów osobowych. Pojazdy w pełni elektryczne (BEV) stanowiły 49% (18 795), a pozostałą część (51%) stanowiły hybrydy typu plug-in (PHEV) – 19 206. Liczba elektrycznych samochodów dostawczych i ciężarowych wynosiła 1 657 i zwiększyła się w stosunku do 2020 r o 818 pojazdy. W dalszym ciągu wzrasta też liczba elektrycznych motorowerów i motocykli, która na koniec grudnia 2021 r.

<sup>22</sup>

<https://pspa.com.pl/2021/informacja/licznik-elektromobilnosci-wzrost-rejestracji-samochodow-elektrycznych-mimo-niedoboru-polprzewodnikow/> [maj 2021]

wynosiła 10 650, jak również liczba elektrycznych i hybrydowych samochodów osobowych i dostawczych, która powiększyła się do 325 136. Pod koniec października 2021 r. liczba elektrycznych autobusów w Polsce wynosiła 651, od stycznia do grudnia 2021 r. liczba autobusów elektrycznych wzrosła o 220 zeroemisyjnych pojazdów<sup>23</sup>.

Wraz ze wzrostem liczby pojazdów z napędem elektrycznym, rozwija się również infrastruktura ładowania co zostało przedstawione na Rys. 9.2, Rys. 9.3 i Rys. 9.4. Pod koniec października w Polsce funkcjonowało 1 712 ogólnodostępnych stacji ładowania pojazdów elektrycznych wyposażonych w 3 337 punktów, 31% z nich stanowiły szybkie stacje ładowania prądem stałym (DC), a 69% – wolne ładowarki prądu przemiennego (AC) o mocy mniejszej lub równej 22 kW.

Wraz ze wzrostem liczby pojazdów z napędem elektrycznym, rozwija się również infrastruktura ładowania. Pod koniec grudnia 2021 r. W Polsce funkcjonowały 1 932 ogólnodostępne stacje ładowania pojazdów elektrycznych (3 784 punkty). 30% z nich stanowiły szybkie stacje ładowania prądem stałym (DC), a 70% – wolne ładowarki prądu przemiennego (AC) o mocy mniejszej lub równej 22 kW<sup>24</sup>.

Zakłada się, że w najbliższych latach rejestracje pojazdów elektrycznych i hybrydowych osiągną poziom kilkunastu – a może nawet kilkudziesięciu tysięcy sztuk rocznie. Należy podkreślić duży wzrost liczby przyjaznych środowisku autobusów. Jeśli ten trend się utrzyma, to możemy mieć nadzieję, że w ciągu najbliższych kilkunastu lat przeważająca liczba autobusów, które będą jeździły w miastach będą to pojazdy elektryczne lub nawet wodorowe. Taki rozwój pojazdów sugeruje rozwój autobusów elektrycznych klasy II oraz elektrycznych samochodów ciężarowych krótkiego i zasięgu.

Biorąc pod uwagę strukturę rejestracji samochodów w Polsce i na świecie obserwowany jest znaczny wzrost zainteresowania autobusami elektrycznymi oraz wzrost rejestracji elektrycznych samochodów ciężarowych. Na Rys. 9.5 widoczny jest w Polsce znaczny wzrost rejestracji elektrycznych autobusów, w Polsce wzrost ten wyniósł 253%, podobny trend jest obserwowany na świecie.

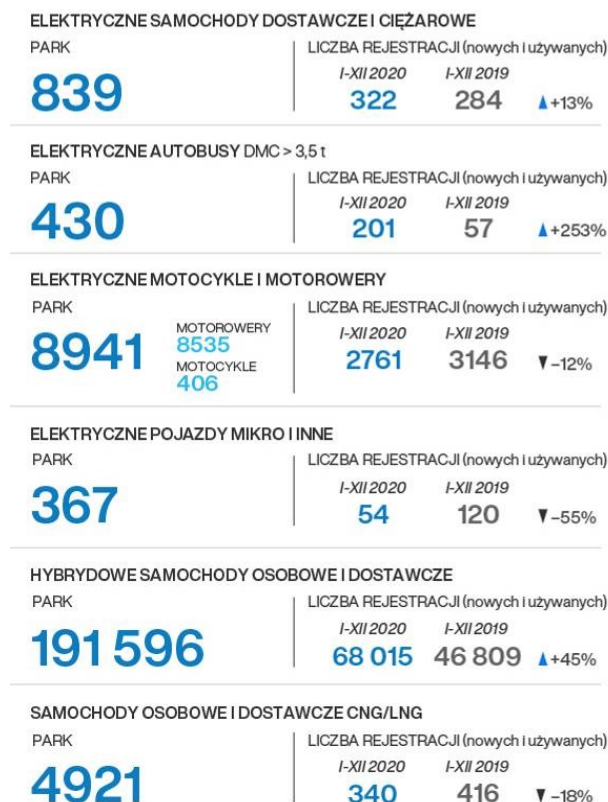
Na podstawie danych zawartych na Rys. 9.5 i Rys. 9.6 zauważalny jest znaczny wzrost rejestracji w 2021 roku samochodów dostawczych i ciężarowych z napędem elektrycznym niż w tym samym okresie roku 2020. Liczba pojazdów użytkowych zwiększa się bardzo dynamicznie, bo z jednej strony niemal wszyscy producenci oferują już elektryczne pojazdy dostawcze i rośnie liczba producentów, którzy w swojej ofercie mają również elektryczne pojazdy ciężarowe do 16t<sup>25</sup>.

---

<sup>23</sup> <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-w-2021-r-na-polskie-drogi-wyjechalo-ponad-20-tys-samochodow-z-napedem-elektrycznym/> [styczeń 2022]

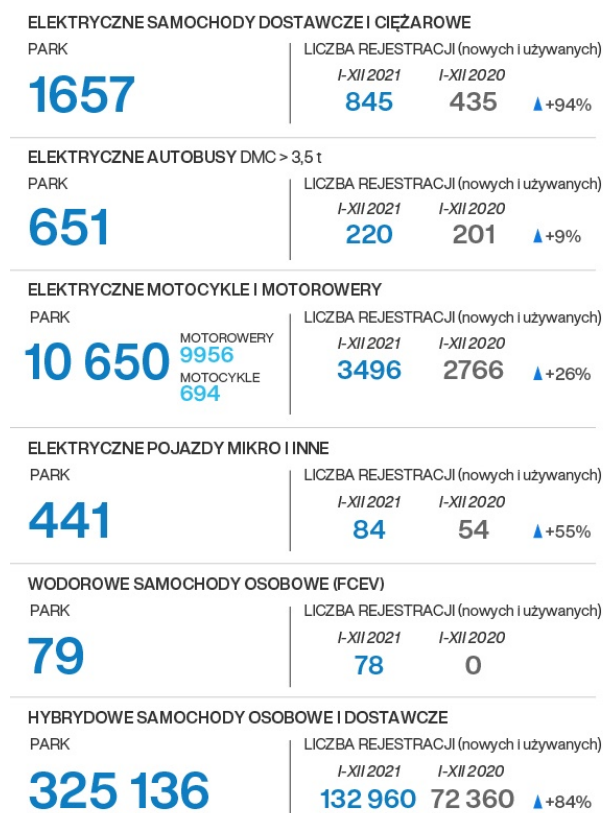
<sup>24</sup> <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-w-2021-r-na-polskie-drogi-wyjechalo-ponad-20-tys-samochodow-z-napedem-elektrycznym/> [styczeń 2022]

<sup>25</sup> <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-rosnie-liczba-stacji-ladowania-w-polsce/> [luty 2022]



Rys. 9.5. Liczba zarejestrowanych w Polsce samochodów elektrycznych i hybrydowych (porównanie roku 2019 z 2020).

Źródło: <https://pspa.com.pl/2021/informacja/licznik-elektromobilnosci-rok-2020-rekordowy-na-polskim-ryнку-samochodow-elektrycznych/>



Rys. 9.6. Liczba zarejestrowanych w Polsce samochodów elektrycznych i hybrydowych (porównanie roku 2020 z 2021).

Źródło: <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-rosnie-liczba-stacji-ladowania-w-polsce/>

## 9.2. Analiza rozwoju autonomicznych pojazdów elektrycznych w tym ciężarowych i autobusów

Pojazdy autonomiczne, jako przewidywana przyszłość transportu posiadają dobre strony, ale również nie należy zapominać o możliwych niebezpieczeństwach i ryzyku związanym z funkcjonowaniem takiego nowoczesnego transportu, gdzie bezwzględnie i na porządku dziennym będzie zastosowany system odzysku energii m.in z procesów hamowania.

Aby sprostać problemom związanym z wdrożeniem pojazdów autonomicznych do ruchu drogowego przedstawiono większość możliwych i zidentyfikowanych problemów oraz ryzyka współpracy nowoczesnych środków transportu z obecnymi. Przeprowadzona analiza problemów prawno-ekonomicznych wskazuje na szereg trudności wdrożenia pojazdów autonomicznych, które mogą spowodować, poza ewidentnymi pozytywnymi rozwiązaniami, również duże ryzyko w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz konieczność dostosowania obecnych aktów prawnych.

Transport realizowany za pomocą pojazdów elektrycznych pojazdów autonomicznych, będzie odgrywać w niedalekiej przyszłości kluczową rolę. Obecnie jest to jedną z najszybciej rozwijających się nowoczesnych technologii. Pojazdy autonomiczne znajdują się wciąż na etapie badawczo-rozwojowym, dlatego też niełatwo jest jednoznacznie określić dokładny scenariusz przebiegu ich wdrażania do powszechnego użytku.

Cały proces wdrażania pojazdów autonomicznych do ruchu spotyka się z wieloma wyzwaniem technologicznymi, prawnymi, ekonomicznymi, a także społecznymi, które stały się głównymi ograniczeniami w powszechnym wdrożeniu pojazdów autonomicznych. Zanim autonomiczny transport wejdzie w życie, można jedynie spekulować nad szansą jego powszechnego wdrożenia, opierając się na szeregu badań, testów i analiz. Jednak śmiało można stwierdzić, iż taka sytuacja będzie miała miejsce za sprawą wielu ośrodków badawczo-rozwojowych zaangażowanych w rozwój tych technologii. Ponieważ autonomiczne pojazdy pozostają wciąż w fazie testów, długoterminowy wpływ mobilności bezzałogowej (bez kierujących) na system transportu, gospodarkę, środowisko czy rynek pracy, pozostają w większości nieznane.

Od lat na całym świecie obserwuje się postęp w kwestii zwiększenia bezpieczeństwa na drogach i zmniejszenia liczby wypadków. Jednak to autonomiczność pojazdów mogłaby ten współczynnik zbliżyć ku oczekiwanemu „0 wypadków z ofiarami śmiertelnymi”. Obecnie w użyciu są technologie bezpieczeństwa biernego i czynnego jak np. poduszki powietrzne, systemy ABS (Anti-Lock Braking System), BAS (Brake Assist System), ESP (Electronic Stability Program), CAS (Collision Avoidance System) czy też AEBS (Advanced Emergency Braking System), kontrolowane strefy zgniotu, czujniki odległości, miniradary, lidary itd. Niestety proces wprowadzania tych rozwiązań od samochodów luksusowych do standardowych trwa około 10 lat, co – w skali rozwoju technologii – jest żmudnym i długotrwałym procesem. Pojazdy autonomiczne będą wyposażone w wiele więcej technicznych systemów, np. asystenta wykrywania martwych pól, adaptacyjne światła pojazdu, które powinny przełożyć się na mniejszą liczbę wypadków oraz nagłych zdarzeń losowych na drogach. Wszystko to dzięki technicznej przewadze autonomicznych pojazdów nad człowiekiem – szybciej reagują, nie meczą się, nie ulegają rozproszeniu uwagi, a także nie wykazują brawurowych zachowań.

Automatyzacja pojazdów miałaby duże znaczenie w kontekście transportu towarów. Zostałyby wyeliminowane konieczności postojów i ryzyko wypadków, jakimi są aktualnie



obciążeni kierowcy samochodów ciężarowych pokonujący długie i wyczerpujące trasy. Ponadto, koszty ubezpieczeń pojazdu i parkowania znacząco by spadły, gdyż autonomiczny pojazd po skończonej podróży sam udałby się w poszukiwaniu bezpłatnego parkingu lub miejsca załadunku.

Zaletą wprowadzenia autonomicznych pojazdów jest zmniejszenie kongestii na drogach, co związane jest z ograniczeniem kosztów utrzymania bezpieczeństwa ruchu drogowego. Prawdopodobnie zmniejszy się liczba użytkowanych pojazdów, przez co przepustowość na drogach wzrośnie, a opóźnienia spowodowane ewentualnymi kolizjami/wypadkami przestaną mieć istotne znaczenie (szybka zmiana pojazdu). Za sprawą implementacji autonomicznego transportu możliwa jest redukcja kongestii poprzez ciągły monitoring otoczenia, w tym ruchów innych pojazdów, czy też dostosowania przyspieszenia, hamowania oraz odpowiednich odstępów pomiędzy pojazdami w ruchu drogowym. Wymienione rozwiązania poprawiłyby znacząco bezpieczeństwo, w szczególności w miejscach, gdzie natężenie ruchu bywa największe. Dzięki autonomiczności pojazdów poprawi się efektywność jazdy bez zbędnych zatrzymań i ruszania pojazdu.

Idea autonomicznych pojazdów ma również wady. Cały jej proces wdrożenia jest skomplikowany i niesie za sobą dużo problemów, szczególnie dotyczących bezpieczeństwa użytkowania. Jest to technologia nie do końca rozpoznana, zawierająca szereg wyzwań, z których nie wszystkie da się łatwo oszacować. Z powodu braku odpowiedniej współpracy międzynarodowej dotyczącej ustalania regulacji prawnych w sprawie bezpieczeństwa użytkowania pojazdów autonomicznych, cały proces ujednoczenia i zharmonizowania praw jest zaburzony oraz znacznie spowolniony. W przyszłości muszą wejść w życie odpowiednie przepisy i regulacje prawne, aby społeczeństwo mogło poruszać się w sposób bezpieczny autonomicznymi środkami transportu. Współpraca międzynarodowa jest głównym wymogiem idei autonomicznego transportu przyszłości, ponieważ niedopracowanie odpowiednio zharmonizowanych aktów prawnych nie będzie pozwalało na poruszanie się pojazdów autonomicznych po drogach na całym świecie.

Efekty ekonomiczne (koszty) związane z wdrożeniem pojazdów autonomicznych do ruchu drogowego to jeden z istotniejszych i w miarę łatwych do oszacowania argumentów, które przemawiają przeciwko tej przyszłościowej technologii. Najbardziej korzystne scenariusze zmiany w infrastrukturze drogowej zmierzające do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa i funkcjonalności w procesie wdrażania generują bardzo wysokie koszty, na które wiele krajów – w tym Polska – mogą nie być gotowe. To samo dotyczy cen pojazdów autonomicznych – w początkowych fazach wdrożeniowych będą mogli sobie pozwolić jedynie przedstawiciele wyższych klas społecznych. Może minąć dużo czasu zanim transport przyszłości zacznie być oszczędniejszy w porównaniu z obecnym. Tańsze projekty oparte na ulepszeniu i mniejszych zmianach w obecnej infrastrukturze generują więcej niebezpieczeństw, ale może to od nich trzeba zacząć – udoskonalać je, szukając tym samym nowych, korzystniejszych rozwiązań, co doprowadzi do znalezienia złotego środka w całym procesie.

Problemem może być także, paradoksalnie, niezawodność technologii stosowanych w autonomicznych pojazdach. Przykładem mogą być śmiertelne wypadki z udziałem samochodów marki Tesla (cztery do grudnia 2019 r.). Przy włączonym autopilocie - zarówno systemy pojazdu, jak i kierowca nie dostrzegł zagrożenia. Wspomniane pojazdy kwalifikowały się do drugiego poziomu autonomiczności, a zatem można stwierdzić, że technologia nawet na tym poziomie ma niedoskonałości, stwarzające ogromne niebezpieczeństwo dla pasażerów i kierowcy.

Aby zapewnić niezawodność oraz pełne bezpieczeństwo, wszystkie podzespoły, np. czujniki, radary, muszą prawidłowo działać niezależnie od warunków atmosferycznych panujących na drodze, takich jak: znaczne opady śniegu, grad, mgła, pył. Dodatkowy kłopot stanowią nieoczekiwane sytuacje drogowe, np. nadjeżdżający pojazd uprzywilejowany, policjant zarządzający ruchem, roboty drogowe, czy też nagłe pojawienie się zwierzęcia na drodze. Aby w takich sytuacjach pojazd autonomiczny odpowiednio zareagował, potrzebny jest znaczny postęp w funkcjonowaniu sztucznej inteligencji. Zbyt duża ilość danych zbieranych przez czujniki i kwestia ich selekcji stwarzają kolejne problemy, gdyż to system a nie człowiek będzie musiał zinterpretować szybko i bezbłędnie wszystkie informacje. W przeciwnym razie nieodpowiednia reakcja pojazdu może skutkować niebezpieczeństwem, które miało być zniwelowane właśnie przez autonomiczną technologię.

Kolejnym problemem jest odpowiedzialność prawna w przypadku wypadku z udziałem pojazdów autonomicznych. Kwestią nierozstrzygniętą jest wyznaczenie odpowiedniego podmiotu, który poniesie konsekwencje w takim wypadku i zapłaci za wyrządzone straty, gdyż na terenie Unii Europejskiej przepisy mówiące o odpowiedzialności, gdy szkodę spowodował pojazd, nie istnieją. Pojazdy z taką technologią będą w stanie działać schematycznie i "uczyć się" nowych zachowań wobec niestandardowych sytuacji podczas jazdy. Poziom automatyzacji pojazdu określa się zgodnie z normą SAE J3016, zgodnie z tym standardem występuje 6 poziomów automatyzacji. Poziom 0 oznacza brak automatyzacji, poziom 1 oznacza, że pojazd jest wyposażony w systemy wspomaganie kierowcy np. aktywny tempomat, czy system krótkotrwałej korekcji toru ruchu pojazdu w celu zapobiegania niezamierzonej zmianie pasa ruchu. Systemy automatyczne kontrolują ruch pojazdu tylko w kierunku wzdłużnym lub poprzecznym. W przypadku pojazdów autonomicznych poziomu 2, pojazdy takie są wyposażone w systemy częściowej automatyzacji jazdy. Do takich systemów należą zaawansowane systemy wspomaganie kierowcy (ADAS - Advanced Driver Assistance Systems), które umożliwiają jednoczesną kontrolę pojazdu w kierunku wzdłużnym i poprzecznym. Nie ma jednoznacznego podziału pomiędzy pojazdami automatycznymi a autonomicznymi. Przyjmuje się, że pojazdy od poziomu 3, są autonomiczne (nie wymagają ingerencji kierowcy), w określonych warunkach ruchu. Obecnie podczas wypadku z udziałem pojazdów o pierwszym lub drugim poziomie autonomiczności, kwestią sporną jest określenie przyczyny wypadku – to znaczy, czy zawinił kierowca, czy przyczyną była awaria/niesprawność autonomicznego pojazdu. Jeżeli człowiek przestanie w jakikolwiek sposób kontrolować pojazd o wyższym poziomie autonomiczności niż trzeci, to kto powinien ponieść konsekwencje? Czy producent pojazdów, czy może producent oprogramowania sterującego? Wielu specjalistów proponuje pomysł założenia funduszy odszkodowawczych dla osób uczestniczących w wypadkach z udziałem pojazdów autonomicznych, które ucierpiały z winy innowacyjnej technologii.

Przeszkodą we wdrażaniu technologii autonomicznych pojazdów jest również niezgodność z ogólnymi przepisami prawa ruchu drogowego. Międzynarodowym traktatem, który określa zasady ruchu drogowego w 73 krajach, jest Konwencja Wiedeńska z 1968 r. Zgodnie z artykułem 8 każdy pojazd, który porusza się, musi mieć kierowcę, który powinien być sprawny psychicznie i fizycznie oraz być zdolny do kierowania pojazdem. Taka osoba musi posiadać umiejętności i odpowiednią wiedzę, które są niezbędne do kierowania pojazdem, oraz – co ważne – stale panować nad kierowanym pojazdem. Bez regulacji tego prawa autonomiczne pojazdy nie pojawią się na naszych drogach. Testy takich pojazdów mogą w niektórych krajach

odbywać się w sposób legalny, np. w Stanach Zjednoczonych, które nie zatwierdziły Konwencji Wiedeńskiej.

Autonomiczny transport przyszłości to nie tylko potencjalne szanse i nadzieje, które ludzie pokładają w nowoczesnej technologii, ale również wiele zagrożeń. Często owe czynniki, są dla wielu wystarczającymi argumentami przemawiającymi za odejściem od pomysłu wprowadzania tak zrewolucjonizowanej koncepcji autonomicznego świata.

Po zniknięciu konwencjonalnych pojazdów, ludzie przestaną zwracać tak bardzo uwagę na to, kto jakim pojazdem się porusza, przez co obniży się popyt na prywatne środki transportu. Wygląd i osiągi w przypadku wyboru pojazdu zejda na dalszy plan, to wyposażenie i komfort wnętrza będzie decydował o decyzji nabywcy. Zwłaszcza samochody sportowe przestaną być tak popularne, ponieważ odczucia z jazdy nie będą takie same jak obecnie. Rynek prestiżowych pojazdów znanych marek może się załamać. Prywatne pojazdy będzie można wynajmować w czasie, gdy nie będą wykorzystywane przez właściciela, czerpiąc z tego dochody. W rezultacie staną się one częścią wspólnie użytkowanego przez społeczeństwo transportu, dodatkowo rozbudowanego przez firmy wynajmujące pojazdy ze swoją liczną flotą.

Przemysł motoryzacyjny nie byłby jedynym sektorem gospodarczym (w sensie ekonomicznym), który ucierpiałby po wprowadzeniu pojazdów autonomicznych. Zagrożeniem jest to, że wiele osób pracujących w zawodach ściśle związanych z prowadzeniem samochodu straci pracę, a ich fach stanie się zbędny lub w dużym stopniu ograniczony. Autonomiczne pojazdy poziomu czwartego i piątego w większości warunków ruchu nie wymagają obecności kierowcy podczas przejazdu, stąd kierowcy ciężarówek, autobusów, kurierzy, taksówkarze itp. byłiby zmuszeni do przebranżowienia się.

Jednym z głównych zagrożeń będzie kwestia przetwarzania i magazynowania danych przez sztuczną inteligencję, szczególnie tych wrażliwych na ataki cybernetyczne, których liczba wzrasta proporcjonalnie do rozwoju technologicznego. Przepływ danych musi być odpowiednio zabezpieczony, a dokładniej połączenie pomiędzy centralnym serwerem a systemem pojazdu. Po wykradnięciu przez osoby niepowołane danych takich jak m.in.: przebieg podróży, cele spotkań, informacje o pasażerach, miejscu zamieszkania użytkownicy mogą być np. szantażowani. Szczególnie pojazdy przewożące wartościowe ładunki mogą być narażone na ataki, także o charakterze terrorystycznym. Utrata danych w tym przypadku to nie jedyny problem związany z działaniami hakerów. Mogliby oni również spowodować wypadek z udziałem autonomicznego pojazdu poprzez zakłócenie działania różnego rodzaju czujników czy też przejęcia kontroli nad nim. Bez odpowiednich prawnych uwarunkowań, które odpowiadałyby za ochronę danych użytkowników oraz rozwoju technologii zabezpieczeń przed tego rodzaju atakami, autonomiczna przyszłość jest niepewna i stwarza obecnie ogromne zagrożenie dla bezpieczeństwa informacyjnego.

Prawdopodobnie największym zagrożeniem będzie fakt, iż przez trudny do określenia okres czasu pojazdy autonomiczne będą musiały dzielić drogi z konwencjonalnymi pojazdami. Rodzi to wiele problemów, gdyż pojazd autonomiczny może mieć kłopoty z reagowaniem i przewidywaniem działań osób kierujących konwencjonalnymi pojazdami, szczególnie w sytuacjach zagrożenia. System w autonomicznym pojeździe współpracuje z innymi tego typu pojazdami tworząc sieć, dzięki czemu są one odpowiednio skomunikowane ze sobą i przewidują reakcję drugiej maszyny. Równoczesne uczestniczenie w ruchu pojazdów autonomicznych i konwencjonalnych oraz zaistniałe różnice w komunikacji i zachowaniu kierowców, czy w braku współpracy systemu mogłyby prowadzić do wielu kolizji oraz poważnych wypadków, w których ciężko byłoby jednoznacznie ustalić sprawcę. Poza tym

kierowcy konwencjonalnych pojazdów mogliby poznać schematy działania systemów jazdy autonomicznej i wykorzystywać tę wiedzę na swoją korzyść. Nagminnie miałyby miejsce łamanie przepisów ruchu drogowego przez kierowców nieustępujących pierwszeństwa takim pojazdom, ponieważ wiedzieliby oni, że maszyny ustąpią, gdyż zostały tak zaprogramowane, aby zminimalizować ryzyko wypadków. Z drugiej strony, inni kierowcy mogą mieć trudności z przewidzeniem tego, co zrobi pojazd autonomiczny, np. nagłe zatrzymanie, niespodziewana próba wyprzedzenia. Takie sytuacje mogą ich zaskoczyć, ponieważ kierowcy polegają w dużej mierze na zbiorze wskazówek, które odczytują z zachowania innych uczestników ruchu drogowego, w tym pieszych. Opiszana sytuacja dodatkowo potęgowałaby ryzyko wypadków, które byłoby możliwe do znacznego obniżenia dopiero po wykluczeniu wchodzenia w interakcję pojazdów autonomicznych z pojazdami konwencjonalnymi. Przytoczone zagrożenia i kwestie z nimi związane zdecydowanie opóźnią datę, kiedy będzie można w pełni wykorzystać pozytywne aspekty pojazdów autonomicznych. Dlatego najbezpieczniejszym procesem wdrażania autonomicznego transportu będzie ten, który będzie najkrótszy, tak aby w sposób płynny wyeliminować z użytku konwencjonalne pojazdy. Jednak nie jest to łatwy do zrealizowania cel i wciąż pozostaje duże prawdopodobieństwo opóźnienia się tego procesu. Powodem tego jest m.in. fakt, że współcześni konsumenci czekają około dekady, aby zmienić pojazd na nowy, więc jest bardzo prawdopodobne, że nie będą skłonni wymienić jeszcze sprawnego, dobrze funkcjonującego dotychczasowego środka transportu na pojazd autonomiczny.

Związany bezpośrednio z wyżej opisanym zagrożeniem jest kolejne, dotyczące kwestii etycznej, a dokładniej sposobu zaprogramowania pojazdów autonomicznych do reagowania w sytuacji, gdy kolizja lub wypadek okazują się wysoce prawdopodobne lub nieuniknione. Tak długo, jak pojazdy autonomiczne będą poruszały się w ruchu drogowym razem z konwencjonalnymi do takich sytuacji będzie nieuchronnie dochodzić, a na wiele pytań natury etycznej z tym związanych powinno już znaleźć się odpowiedzi. Na przykład, w jaki sposób mają być zaprogramowane te pojazdy, czy priorytetem powinno być zawsze zminimalizowanie liczby zgonów w wypadku, czy ochrona za wszelką cenę przewożonych pasażerów. Problemem jest ustalenie odpowiednich zasad moralnych w tej kwestii, aby stworzyć odpowiedni algorytm bez błędów i podejmujący właściwe decyzje, który działałby w przypadku niebezpiecznych zdarzeń. Jest to duże wyzwanie, bo nieodpowiednie rozwiązanie tej kwestii może spotkać się z dezaprobatą społeczeństwa w kwestii autonomicznej technologii<sup>26</sup>.

### **9.3. Rozwój pojazdów elektrycznych w tym ciężarowych i autobusów**

Producenci autobusów tacy jak: Iveco, KamAZ, Mercedes-Benz, SCANIA, Solaris, SOR, Temsa, URSUS VDL Bus & Coach, Volvo, Van Hool posiadają w swojej ofercie autobusy elektryczne. Z krajowych głównych producentów to Solaris posiada w swojej ofercie autobusy miejskie URBINO 8.9, 12 i 18 które mogą być ładowane z zewnątrz (plug-in) oraz za pomocą

---

<sup>26</sup> A. Wojciechowski, A. Gołowicz, *Krytyczna analiza problemów prawno-ekonomicznych w zakresie bezpieczeństwa użytkowania pojazdów autonomicznych*, Instytut Mechaniki Precyzyjnej Inżynieria Powierzchni vol. 25, nr 3/2020 (3-4): s.31-43; DOI: 10.5604/01.3001.0014.7002.

pantografów lub nawet indukcyjnie. W swojej ofercie Iveco posiada model Europolis. SCANIA produkuje Citivide BEV, VanHool CX45E.

Przykład takiego autobusu używanego przez MZA Warszawa przedstawiono na Rys. 9.7.



Rys. 9.7. Autobus elektryczny SOLARIS URBINO 12 w Warszawie.

Źródło: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solaris\\_Urbino#/media/File:Solaris\\_Urbino\\_12\\_electric\\_\(2\),\\_Warszawa,\\_2015-08-06.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Solaris_Urbino#/media/File:Solaris_Urbino_12_electric_(2),_Warszawa,_2015-08-06.jpg) [maj 2021]

W ślad za rozwojem autobusów elektrycznych rozwija się rynek elektrycznych samochodów ciężarowych takich jak Mercedes-Benz eActros, czy elektryczne samochody ciężarowe produkowane przez firmę SCANIA oraz Volvo. Należy też uwzględnić samochód ciężarowy marki Tesla nie będący jeszcze w sprzedaży model SEMI. Zdjęcia wspomnianych elektrycznych pojazdów ciężarowych zamieszczono na Rys. 9.8.





Rys. 9.8. Przegląd elektrycznych pojazdów ciężarowych.

Źródło: <https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/battery-electric-truck.html> [maj 2021]  
[https://roadstars.mercedes-benz-trucks.com/pl\\_PL/magazine/transport/03-2018/heavy-distribution-traffic-locally-emission-free-eactros.html](https://roadstars.mercedes-benz-trucks.com/pl_PL/magazine/transport/03-2018/heavy-distribution-traffic-locally-emission-free-eactros.html) [maj 2021] <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/trucks/volvo-fh/volvo-fh-electric.html> [maj 2021]

Kluczowym parametrem dla elektrycznych samochodów ciężarowych jest zasięg oraz czas ładowania akumulatorów. Coraz lepsze możliwości i wydajność akumulatorów umożliwiają już uzyskiwanie przez takie pojazdy zasięgu na poziomie 250 – 300 km i możliwości pełnego naładowania akumulatorów w czasie do 10 h przy ładowarkach prądu przemiennego o mocy 43 kW oraz w czasie do 2,5 h dla ładowarek prądu stałego o mocy 250 kW<sup>27</sup>. Producent pojazdów Tesla deklaruje zasięg swojej ciężarówki do 300 mil (ok. 480 km) z opcją umożliwiającą zwiększenie go nawet do 500 mil (ok. 800 km). Zasięg już nawet na poziomie

<sup>27</sup> <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/trucks/volvo-fh/volvo-fh-electric.html> [maj 2021]

300 km wymaga akumulatorów o znacznej pojemności energii ok. 320 do 340 kWh, których masa wynosi ok. 1600 do 1700 kg. To powoduje znaczne ograniczenie ładowności pojazdu.

W celu zachęty do stosowania w samochodach ciężarowych paliw alternatywnych takich jak energia elektryczna, wodór, CNG, LNG, LPG, zgodnie z Dyrektywą Rady 96/53/WE z dnia 25 lipca 1996 r. z późniejszymi zmianami ustanawiającą dla niektórych pojazdów drogowych poruszających się na terytorium Wspólnoty maksymalne dopuszczalne wymiary w ruchu krajowym i międzynarodowym oraz maksymalne dopuszczalne obciążenia w ruchu międzynarodowym, zezwolono na zwiększenie maksymalnych dopuszczalnych mas pojazdów zasilanych paliwem alternatywnym lub pojazdów bezemisyjnych. Maksymalna dopuszczalna masa pojazdu może zostać zwiększona odpowiednio o dodatkową masę z racji technologii paliwa alternatywnego lub technologii bezemisyjnej wynoszącą maksymalnie 1 tonę i maksymalnie 2 tony.

Należy tu podkreślić, że ciężkie pojazdy bezemisyjne to pojazdy nieposiadające silnika spalinowego lub posiadające silnik spalinowy, z którego emisje określone zgodnie z rozporządzeniem (WE) nr 595/2009 i środkami wykonawczymi do niego nie przekraczają 1 g CO<sub>2</sub>/kWh lub z którego emisje określone zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 715/2007 i środkami wykonawczymi do niego nie przekraczają 1 g CO<sub>2</sub>/km;

Takie rozwiązania zapewniają, że ładowność pojazdu nie ulega zmniejszeniu na skutek zastosowania technologii paliw alternatywnych lub technologii bezemisyjnych. To sprawia, że elektryczne ciężarowe pojazdy i autobusy są atrakcyjne w transporcie drogowym oraz umożliwia szybki wzrost liczby takich pojazdów na drogach całego świata.

## 10. Układy odzyskiwania energii w układach hamulcowych

### 10.1. Rodzaje układów odzyskiwania energii i sposoby jej magazynowania

Regulamin ONZ nr 13 definiuje elektryczne układy hamulcowe z odzyskiem energii jako układy hamulcowe, które podczas hamowania pojazdu przetwarzają energię kinetyczną pojazdu w energię elektryczną. W skład układu hamulcowego z odzyskiem energii wchodzi urządzenie do zamiany energii kinetycznej pojazdu na energię elektryczną oraz zespołu sterującego, które pozwala na modulację działania elektrycznego układu hamulcowego z odzyskiem energii. W ramach systemów odzyskiwania energii rozróżniamy 2 rodzaje takich układów:

- elektryczny układ hamulcowy z odzyskiem energii kategorii A, który nie stanowi części układu hamulcowego roboczego,
- kategorii B, który stanowi część roboczego układu hamulcowego.

Zdolność skutecznego hamowania pojazdu jest jedną z ważniejszych cech pojazdu mającą wpływ na bezpieczeństwo w ruchu drogowym. Klasyczny układ hamulcowy z hamulcami ciemnymi, ma wadę polegającą bezpowrotnym traceniu energii poruszającego się pojazdu poprzez przekształcanie jej w ciepłą i rozpraszanie jej. Zmniejsza to ogólną sprawność wykorzystania energii, jednocześnie wpływając na zwiększone zużycie paliwa. W jeździe miejskiej, z uwagi na specyfikę ruchu (częste zatrzymania), hamulce w pojazdach używane są częściej niż w czasie jazdy po autostradzie, z tego względu w ruchu miejskim straty energii są większe niż w ruchu autostradowym.

W przypadku pojazdów hybrydowych i elektrycznych praktycznie zawsze stosuje się układy hamulcowe z odzyskiem energii w celu ograniczenia bezzwrotnego rozpraszania jej w postaci ciepła. Z uwagi na charakterystyki takich układów, nie możliwe jest odzyskanie całej energii kinetycznej pojazdu, jedynie część energii kinetycznej można przekształcić w energię elektryczną i zmagazynować w akumulatorze lub superkondensatorze<sup>28</sup>. Odzyskana energia zmniejsza zużycie paliwa w pojazdach hybrydowych lub energii elektrycznej w przypadku pojazdów akumulatorowych. Odzyskiwanie energii skutecznie zwiększa zasięg pojazdów elektrycznych.

Rozwój układów odzyskiwania energii swój rozwój zawdzięczają elektrycznym pojazdom szynowym, w których często stosuje się układy odzyskiwania energii. Przykładem mogą być lokomotywy elektryczne oraz tramwaje. Różnica pomiędzy pojazdami szynowymi a hybrydowymi i elektrycznymi jest głównie w sposobie magazynowania energii. Elektryczne pojazdy szynowe z racji ciągłego kontaktu z linią zasilającą mogą oddawać energię elektryczną przekształconą z energii mechanicznej poruszającego się pojazdu wprost do sieci. W drogowych pojazdach elektrycznych i hybrydowych odzyskaną energię gromadzi się głównie w akumulatorach lub ostatnio coraz częściej stosowanych superkondensatorach ewentualnie w przypadku niektórych pojazdów w tym bolidów Formuły 1 w postaci energii

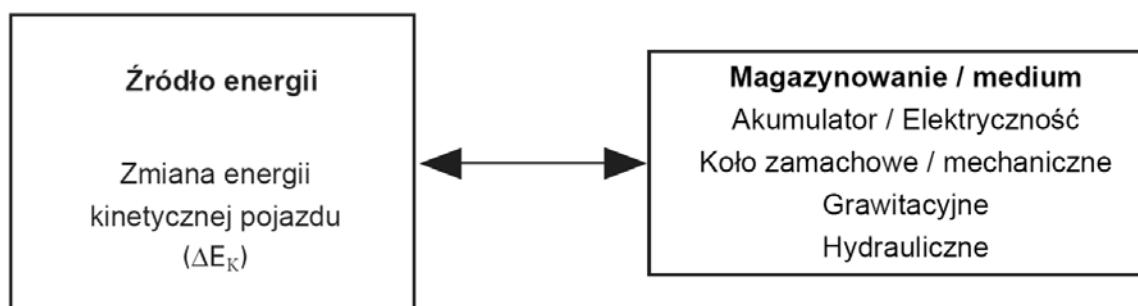
---

<sup>28</sup> <https://circuitdigest.com/article/how-regenerative-braking-works-in-electric-vehicles> [maj 2021]



kinetycznej wirującej masy (KERS – Kinetic Energy Recovery System)<sup>29</sup>. Oczywiście możliwe jest stosowanie innych systemów magazynowania energii np. w akumulatorach hydraulicznych ale nie mają one praktycznego szerokiego zastosowania w pojazdach.

Wraz z postępującym wzrostem liczby hybrydowych pojazdów, muszą powstać alternatywne źródła napędu wykorzystujące alternatywne źródła energii w tym także dodatkowe urządzenie magazynujące energię. Te komponenty napędów pojazdów hybrydowych i elektrycznych są połączone tak, aby magazynowały i wykorzystywały energię, która byłaby tracona w procesie hamowania z użyciem hamulców ciernych. Układy odzysku energii są w pierwotnej formie systemami dwukierunkowego przesyłania energii pomiędzy urządzeniem magazynowania energii a źródłem zasilania i odbiornikiem<sup>30</sup> zgodnie ze schematem zamieszczonym na Rys. 10.1. W tym przypadku źródłem energii jest energia kinetyczna pojazdu, a zmiana tej energii może być przekazana i zmagazynowana w różnej postaci, a proces jest odwracalny. Regeneracyjne układy hamulcowe mają zazwyczaj charakter mechaniczny, elektryczny lub hydrauliczny. Są też inne metody przechowywania energii przykładem może być londyńskie metro, w którym wiele stacji jest zbudowanych na niewielkim wzniesieniu. Takie usytuowanie oznacza, że pociąg zwalniając przed stacją część energii kinetycznej zamienia na energię potencjalną ciężkości, która przekształcana jest ponownie na energię kinetyczną w momencie odjazdu ze stacji.



Rys. 10.1. Schemat blokowy hamowania z odzyskiem energii

Źródło: P.Tawadros, N.Zhang, A.Boretti, P. Tawadros, N. Zhang, A. Boretti, *Integration and performance of regenerative braking and energy recovery technologies in vehicles*, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, Woodhead Publishing, 2014.

## 10.2. Elektryczne układy odzyskiwania energii i jej magazynowanie w akumulatorach

Podstawą systemów odzyskiwania energii pojazdu podczas hamowania i przekształcania jej na energię elektryczną jest maszyna elektryczna w postaci silnika, która pełni też rolę generatora. Napędzana jest ona w fazie hamowania pojazdu energią kinetyczną poruszającego się pojazdu, a wytworzona energia elektryczna jest magazynowana w akumulatorach,

<sup>29</sup> J.Chibulka., *Kinetic Energy Recovery System by means of Flywheel Energy Storage*, Advanced Engineering Vol. 3, No. 1, s. 27 -38, 1998.

<sup>30</sup> P.Tawadros, N.Zhang, A.Boretti, P. Tawadros, N. Zhang, A. Boretti, *Integration and performance of regenerative braking and energy recovery technologies in vehicles*, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, Woodhead Publishing, 2014, <https://doi.org/10.1533/9780857097422.2.541>.

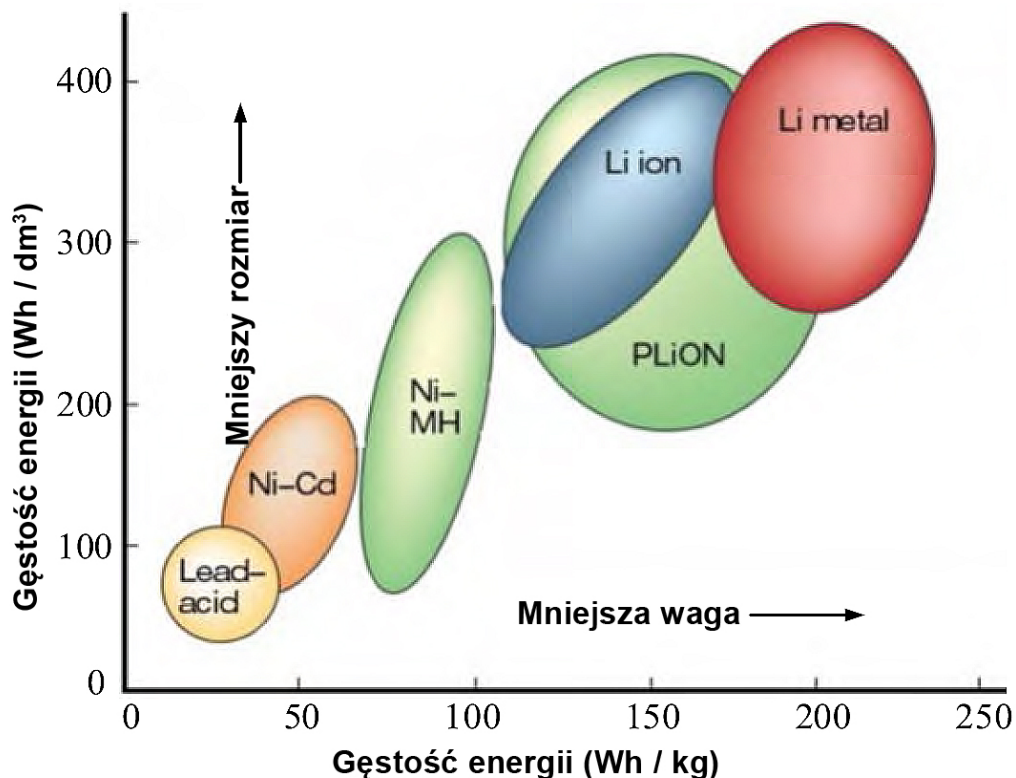
a następnie przekazywana z powrotem do maszyny, która pracuje jako silnik w fazie przyspieszania pojazdu. Energia kinetyczna pojazdu jest przekształcana na energię elektryczną, a następnie w energię chemiczną magazynowaną w akumulatorach. Podczas przyspieszania pojazdu następuje przekazanie energii w przeciwnym kierunku. Ze względu na dużą liczbę konwersji energii sprawność układu odzyskiwania energii elektrycznej jest stosunkowo niska i bardzo uzależniona od rozmiaru, rodzaju pod względem chemicznym akumulatora. Sprawność takiego rozwiązania jest znacznie gorsza niż dla hydraulicznych lub mechanicznych układów magazynowania energii. Jednak specyfika i łatwość magazynowania energii elektrycznej jest mniej skomplikowana niż energii hydraulicznej. Zaletą magazynowania energii w postaci elektrycznej jest łatwości przesyłania jej między generatorem a akumulatorem. Ponadto takie rozwiązanie jest proste i łatwe do zastosowania w każdym pojeździe elektrycznym lub hybrydowym. W pojazdach w pełni elektrycznych transfer mocy jest odwracany w całej wydajności układu napędowego, podczas gdy w pojazdach hybrydowych przepływ mocy jest odwracany tylko przez część układu napędowego (elektryczny zespół napędowy). W takim rozwiązaniu silnik lub silniki pojazdu pracują w trybie pracy generatora. Generator przekształca energię kinetyczną pojazdu na elektryczną jednocześnie doprowadzając do zmniejszenia prędkości pojazdu. W przypadku pojazdów elektrycznych i hybrydowych wytworzona energia elektryczna jest przesyłana do akumulatorów i tam magazynowana. W pojazdach zasilanych paliwami ciekłymi lub gazowymi wytworzona energia elektryczna może być użyta do zasilania elektroniki w pojeździe lub przesłana do akumulatora. Zgromadzona w akumulatorze energia elektryczna będzie mogła być wykorzystana w razie potrzeby przez silnik trakcyjny pojazdu lub poprzez wykorzystanie jej w niewielkim silniku elektrycznym wspomagającym pracę silnika spalinowego tak jak jest to to w pojazdach tzw. mild-hybrid.

W bolidach Formuły 1 oprócz rozwiązań magazynowania energii w postaci energii kinetycznej, stosuje się też magazynowanie energii elektrycznej. Elementem przewarzającym energię kinetyczną pojazdu na elektryczną jest silnik/generator elektryczny, a energia magazynowana jest w akumulatorach lub superkondensatorach.

Zapewnienie odpowiedniego zasięgu pojazdu przy ograniczonej masie i objętości akumulatorów spowodowało konieczność poszukiwania wydajnych magazynów energii elektrycznej. Obecnie najbardziej pospolitą metodą magazynowania energii elektrycznej są akumulatory elektrochemiczne różnego typu. To spowodowało rozwój technologii magazynowania energii elektrycznej i umożliwiło opracowanie akumulatorów o większych gęstościach energii. Mniejsza masa i objętość akumulatorów korzystnie wpłynie na użyteczność (ładowność) elektrycznych samochodów ciężarowych. Rozwój akumulatorów jest też niezbędny dla potrzeb przemysłu motoryzacyjnego w tym rozwoju pojazdów czysto elektrycznych. Zwiększenie gęstości energii w akumulatorach przyczyni się do zwiększenia zasięgu pojazdów oraz możliwości stosowania w nich silników o większej mocy. Właśnie zasięg i czas uzupełniania energii jest obecnie największym ograniczeniem w rozwoju i upowszechnianiu pojazdów elektrycznych, w szczególności pojazdów użytkowych takich jak samochody ciężarowe czy autobusy.

Najbardziej powszechnie stosowane w pojazdach konwencjonalnych są akumulatory kwasowo-ołowiowe. Akumulator oparty jest na ogniwach galwanicznych zbudowanych z elektrody ołowiowej, elektrody z ditlenku ołowiu ( $PbO_2$ ) oraz ok. 37% roztworu wodnego kwasu siarkowego, spełniającego funkcję elektrolitu.

Taki akumulator występuje w niemal wszystkich samochodach konwencjonalnych jako źródło energii dla elektrycznych urządzeń pomocniczych, a także wielu innych pojazdach (m.in. Melex), wózkach akumulatorowych jako akumulator trakcyjny. Akumulatory elektrochemiczne są znane od 1854 r. i ewoluowały pod względem budowy. Akumulatory nikielowo-kadmowe (Ni-Cd) powstały około 1920 roku, a nad akumulatorami nikielowo-metalowo-wodorkowymi (NiMH) rozpoczęto prace w Genewie w 1967 roku. Zainteresowanie tymi akumulatorami znacznie wzrosło w latach 70 w związku z komercjalizacją akumulatorów do zastosowań satelitarnych. Ostatnią grupą są ogniwa litowe (w tym litowo-jonowe, litowo-polymerowe i litowe) skomercjalizowane w roku 1991. Rodzaje akumulatorów stosowane w przemyśle samochodowym przedstawiono na Rys. 10.2, gdzie przedstawiono je w funkcji gęstości energii.



Rys. 10.2. Rodzaje akumulatorów w zależności od rodzaju w funkcji gęstości energii

Źródło: M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof and P. J. Ker, *State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations*, in IEEE Access, vol. 6, s. 19362-19378, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2817655.

Zgodnie z Rys. 10.2 najmniejszą gęstość energii mają akumulatory kwasowo ołowiowe, kolejno nikielowo-kadmowe, nikielowo wodorkowe i ostatnią grupę stanowi grupa akumulatorów litowych. W grupie akumulatorów litowych rozróżniamy następujące rodzaje: litowe (z anodą litową), litowo-jonowe (z anodą węglową) oraz rzadko stosowane litowo-metaliczne. Ostatni rodzaj był niestabilny podczas ładowania, jednak prace badawcze prowadzone przez Tesla Motors pozwoliły na opracowanie akumulatora litowo-metalicznego, który działa stabilnie.

### 10.3. Elektryczne układy odzyskiwania energii i jej magazynowanie w kondensatorach

W grupie elementów pozwalających na magazynowanie energii w postaci energii elektrycznej wyróżnić można opisane w punkcie 10.1 akumulatory, które gromadzą energię elektryczną w postaci chemicznej. Drugą grupą są kondensatory oraz ich rozbudowane wersje w postaci super-kondensatorów lub inaczej nazwanych ultrakondensatorami. Takie urządzenia służą głównie do magazynowania dużych energii w krótkim czasie i na krótki czas. Z uwagi na wspomniane parametry są doskonałymi elementami do stosowania w układach odzyskiwania energii. Są wyprodukowane w oparciu o technologię dwuwarstwowych kondensatorów umożliwiające znaczne zwiększenie pojemności<sup>31</sup> nawet do rzędu faradów (obecnie nawet do 3000 F). Super kondensatory charakteryzują się wysoką mocą właściwą (ponad 6 kW/kg), wysoką sprawnością energetyczną (ponad 95%), praktycznie nieograniczony cykl życia (ponad 1 milion cykli), proste ładowanie i prosta kontrola możliwości magazynowania energii. Wadami kondensatorów, czy superkondensatorów jest niska energia właściwa (około 6 Wh/kg), niskie maksymalne napięcie wynoszące 2 do 3 V oraz bardzo wysoki koszt wynoszący od 30 do 100 USD/Wh.

Ze względu na niskie maksymalne napięcie pojedynczego kondensatora łączy się je szeregowo, aby uzyskać odpowiednią dla potrzeb pojazdów wartość napięcia. Z uwagi na sposób połączenia wymagane jest wyrównanie napięcia między kondensatorami. Napięcie w kondensatorze zmniejsza się proporcjonalnie do stanu jego rozładowania, co powoduje. Wadą pracy kondensatorów jest znaczny spadek napięcia podczas wyładowania dla tego niezbędny jest konwerter DC-DC.

### 10.4. Mechaniczne i elektromechaniczne układy odzyskiwania energii i jej magazynowanie w postaci energii mechanicznej

Mechaniczne układy odzyskiwania energii w czasie hamowania są instalowane w zespołach napędowych pojazdu lub stanowią odrębne urządzenia połączone z kołami napędowymi pojazdu. Takie rozwiązania pozwalają na odbieranie energii kinetycznej pojazdu która w rozwiązaniu z klasycznymi hamulcami ciernymi zostałaaby przekształcona na energię cieplną i stracona. Układy odzyskiwania energii mają ograniczenia wynikające ze zdolności ich do jej odbierania, z tego też względu pojazdy w przypadku nagłych hamowań z dużymi opóźnieniami muszą wspomagać hamowanie z odzyskiem energii hamowaniem za pomocą hamulców ciernych. Układy odzysku energii podczas hamowania są powszechnie stosowane w prawie wszystkich pojazdach elektrycznych i hybrydowych pojazdach elektrycznych a także w pojazdach Formuły 1. Podczas hamowania takie układy magazynują energię odzyskaną w postaci energii kinetycznej (mechanicznej) i znane są jako M-KERS lub KERS ((Mechanical) Kinetic Energy Recovery System). Takie układy odzyskaną podczas hamowania pojazdu energię zamieniają i magazynują w postaci energii kinetycznej obracającego się z dużą prędkością koła zamachowego. Energia kinetyczna pojazdu jest wykorzystywana do rozpędzenia koła zamachowego powodując zmniejszenie prędkości pojazdu. Następnie koło

---

<sup>31</sup> M. Ehsani, *Conventional fuel/hybrid electric vehicles*, Woodhead Publishing, USA, s.668-669.

zamachowe odłączone jest od źródła napędu i swobodnie obraca się. W fazie przyspieszania pojazdu, energia zawarta w obracającym się kole zamachowym jest wykorzystywana do przyspieszania pojazdu. Mechaniczne magazynowanie energii w postaci energii kinetycznej w porównaniu z innymi typami charakteryzuje się znaczną sprawnością. Mechaniczne sprzężenie koła zamachowego z obracającym się układem napędowym powoduje brak nadmiernych strat związanych z konwersją energii. Mechaniczny nośnik energii i mocy, ma również znacznie większą gęstość energii (kJ/kg) i wysoką wartość stosunku mocy do masy (kW/kg) niż inne typy systemów magazynowania energii. Inną odmianą tego rozwiązania jest rozwiązanie bez mechanicznego połączenia kół napędowych z kołem zamachowym. W takim rozwiązaniu energia kinetyczna pojazdu zostaje zamieniona na energię kinetyczną koła zamachowego w sposób pośredni, poprzez energię elektryczną. Takie rozwiązanie zastosowano w żyrobusie.

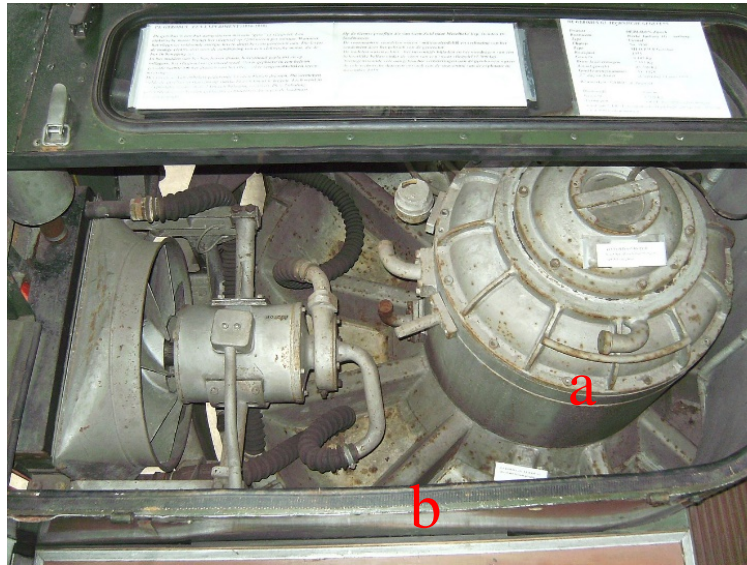
Układ magazynowania energii w postaci mechanicznej był zastosowany po raz pierwszy w pojeździe w tzw. żyrobusie przedstawionym na Rys. 10.3. Żyrobus był to autobus elektryczny w którym energia służąca do napędu pojazdu pochodziła z koła zamachowego. Pierwsze żyrobusy zostały zbudowane w Szwajcarii przez Maschinenfabrik Oerlikon (MFO) już w latach pięćdziesiątych i działały do 1960 roku. W latach dziewięćdziesiątych XX wieku żyrobusy marki MAN były używane w Monachium i Bremie<sup>32</sup>.

Żyrobus na stacjach końcowych przed rozpoczęciem kursu i na niektórych przystankach pośrednich podłączany był do sieci elektrycznej za pomocą trójramiennego pantografu. Pojazd zasilany był trójfazowym prądem przemiennym o napięciu 500 V, a silnik trójfazowy rozpędzał koło zamachowe w którym magazynowana była energia. Silnik z magazynem energii przedstawiony jest na Rys. 10.4. W trakcie hamowania żyrobus odzyskiwał energię kinetyczną pojazdu, podobnie jak współczesne autobusy elektryczne i hybrydowe za pomocą silnika trakcyjnego pracującego w trybie generatora. Wytworzona w ten sposób energia elektryczna zasilala silnik przedstawiony na Rys. 10.4 (a), który rozpędzał koło zamachowe, obracające się w obudowie (b). W ten sposób energia elektryczna była zamieniana na energię kinetyczną zmagazynowaną w wirującym kole zamachowym. W pełni naładowany układ zapewniał możliwość przejechania od 6 do 8 km. Rozpędzanie i dostarczanie energii do układu magazynowania zajmowało do 5 minut. Stacje ładowania ustawiano zazwyczaj co około 4 km.



<sup>32</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Gyrobus> [czerwiec 2021]

Rys. 10.3. Żyrobus z 1955 roku na przystanku podczas uzupełniania energii

Źródło: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gyrobus>

a – silnik/generator połączony z kołem zamachowym; b – obudowa koła zamachowego

Rys. 10.4. Akumulator energii żyrobusu (widoczny silnik oraz część obudowy koła zamachowego)

Źródło: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gyrobus>

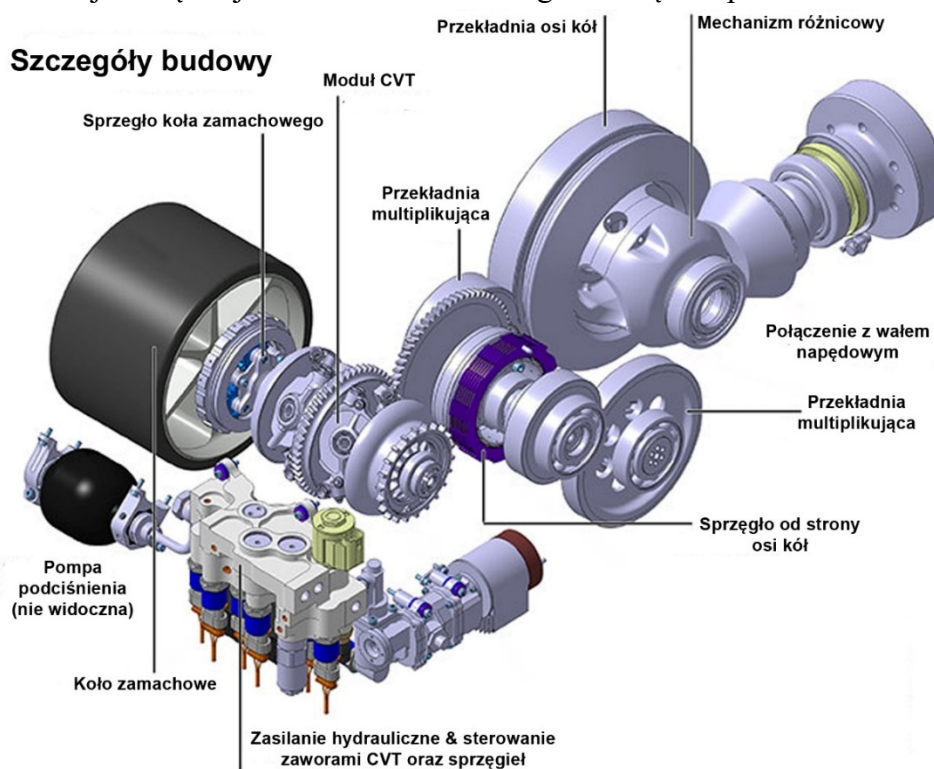
Podczas jazdy energia kinetyczna wirującego koła zamachowego była zamieniana przez generator na energię elektryczną, która była wykorzystywana przez silnik trakcyjny.

Zastosowanie żyrobusów już wtedy miało na celu wprowadzenie ekologicznego transportu poprzez ograniczenie ilości emisji spalin w miastach. Ponadto żyrobus powodował mniej hałasu w porównaniu do autobusów wyposażonych w silnik spalinowy. W przeciwieństwie do trolejbusów nie wymagał sieci trakcyjnej, co oznacza, nie musiał poruszać się po trasach wyznaczonych przez sieć trakcyjną, a jedynie dostępu do stacji ładowania. Niewątpliwą wadą tego rozwiązania napędu była masa koła zamachowego, która dla autobusu o pojemności ok. 20 pasażerów poruszającego się na trasie o długości ok. 20 km wymagała koła zamachowego o masie około 1500 kg. Zastosowanie takiego rozwiązania wymaga specjalnych środków bezpieczeństwa. Prędkość obwodowa koła o średnicy 1,6 m przy prędkości obrotowej 3000 obr/min wynosi około 900 km/h. W celu zmniejszenia oporów ruchu obracającego się koła zamachowego znajdowało się ono w zamkniętej obudowie wypełnionej wodorem o obniżonym ciśnieniu (prawie próżni). Takie rozwiązanie ograniczało utratę zmagazynowanej energii na skutek zmniejszenia prędkości obrotowej koła zamachowego na skutek oporów ośrodka. Te wymagania powodowały, że układ zwiększał masę pojazdu o ok. 3 tony w porównaniu do analogicznego pojazdu wyposażonego w silnik spalinowy o ZS. Kolejną wadą tego rozwiązania jest zachowanie pojazdu, gdyż efekt żyroskopowy powstały od wirującej masy powoduje problemy z kierownością pojazdu. Efekt ten można zniwelować stosując 2 koła o przeciwnych kierunkach obrotu. Dodatkowo autobusy napędzane silnikami spalinowymi miały większy zasięg bez konieczności tak częstego kłopotliwego ładowania energii jak w przypadku żyrobusu, a więc były bardziej uniwersalne w eksploatacji. Na skutek wymienionych wad, zaniechano dalszych prac wykorzystania takiego rozwiązania w pojazdach. Dopiero rozwój pojazdów elektrycznych i dopuszczenie takiego rozwiązania w bolidach Formuły 1 oraz poszukiwania alternatywnych źródeł magazynowania energii poza ogniwami elektrochemicznymi spowodował wznowienie prac nad tym rozwiązaniem.

Nowoczesne koła zamachowe wykonane z nawiniętego tworzywa sztucznego wzmocnionego włóknem węglowym mogą pracować przy wyższych prędkościach obrotowych, są lżejsze i zmniejszyłyby masę żyrobusego rozwiązując problem małej liczby przewożonych pasażerów z powodu dużej masy własnej pojazdu.

Opisane rozwiązanie stosowane w żyrobuse jest szczególne z uwagi, że jest to układ elektryczno-mechaniczny. Takie zestawienie to hybrydowy system odzyskiwania energii mechanicznej, w którym energia kinetyczna pojazdu jest przetwarzana na energię elektryczną, a ta nie jest magazynowana w akumulatorach elektrochemicznych czy kondensatorach, tylko ponownie zamieniana na energię mechaniczną. W tym rozwiązaniu koło zamachowe wykorzystywane jest jako akumulator energii<sup>33</sup>. Takie rozwiązanie w porównaniu z akumulatorów litowo-jonowych jest lepszą metodą magazynowania energii<sup>34</sup>. Rozwiązania elektryczne (hybrydowe) są mniej skomplikowane, jednak z uwagi na 2-krotną zamianę energii mają mniejszą sprawność.

Rozwiązanie z magazynowaniem energii w postaci mechanicznej stosowane jest w bolidach Formuły 1. Takie systemy występują w dwóch rodzajach: mechaniczno-elektryczne tzw. hybrydowe lub mechaniczne. Rozwiązanie czysto mechaniczne mimo pewnego skomplikowania jest częściej stosowane. Schemat tego rozwiązania przedstawiono na Rys. 10.5.



Rys. 10.5. Mechaniczne układy odzyskiwania energii kinetycznej

Źródło: <https://www.wired.com/2010/10/flywheel-hybrid-system-for-premium-vehicles/> [wrzesień 2020 r.]

System składa się z koła zamachowego połączonego za pomocą bezstopniowej przekładni CVT z układem napędowym. Układ sterowany przekładnią bezstopniową (CVT) kontroluje

<sup>33</sup> B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, *Flywheel energy and power storage systems*, *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, vol. 11, No. 2, Feb. 2007., s. 235–258.

<sup>34</sup> J. Li, E. Murphy, J. Winnick, and P. a Kohl, *Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge–discharge cycling*, *Journal of Power Sources*, vol. 102, no. 1–2, Dec. 2001., s. 294–301.

przełożenie i zmienia je w zależności od kierunku przepływu energii. Układ sterowania przekładnią dobiera wartość przełożenia celu uzyskania przez koło zamachowe możliwie najwyższej prędkości obrotowej podczas przekazywania energii do koła zamachowego i optymalnego wykorzystania tej energii przy przekazywaniu jej do kół napędowych. Sprzęgło ma za zadanie odłączyć koło zamachowe od napędu, jeśli obroty koła zamachowego przekraczają obroty maksymalne. System ten nazywany jest Flybrid, i jest urządzeniem małym i wystarczająco lekkim, co zapewnia, że ma częściej zastosowanie w bolidach Formuły 1. W celu osiągnięcia wysokiej gęstości magazynowanej energii przy niewielkiej masie maksymalna prędkość koła zamachowego może wynosić do 64 500 obr/min<sup>35</sup>. Taka prędkość pozwala na zastosowanie mniejszego i lżejszego koła zamachowego, ale również oznacza, że w przypadku awarii musi ono być umieszczone w bardzo solidnej konstrukcji. Wysoka prędkość obrotowa powoduje straty wynikające z oporów ruchu koła w ośrodku, które powodują straty energii, dlatego koło zamachowe umieszczone jest w szczelnej obudowie w warunkach próżni.

W opisanych rozwiązaniach stosuje się pompę próżniową, która ma na celu utrzymanie warunków niskiego ciśnienia w obudowie koła zamachowego. Nowoczesne koło zamachowe ma zazwyczaj konstrukcję kompozytową, kompaktowe wymiary i obraca się na łożyskach bezstykowych (magnetycznych) w hermetycznie zamkniętej komorze. Typowe koło zamachowe stosowane w Formule 1 jest wykonane ze stalowej piasty z obręczą wykonaną z węglowego materiału kompozytowego o masie ok. 5 kg. Taka konstrukcja wynika z dużej wytrzymałości na rozciąganie kompozytu węglowego, co zapobiega dezintegracji koła podczas pracy przy dużych prędkościach obrotowych. Koła mogą przechowywać moc do 60 kW, jednak z uwagi na dużą prędkość obrotową ich moment bezwładności jest relatywnie niewielki około 18 Nm<sup>36</sup>. Dla pojazdów startujących w innych wyścigach, np. 24h Le Mans, systemy magazynowania energii osiągają już moc około 100 kW, a masa koła dochodzi nawet do 18 kg.

Szczególnym rozwiązaniem jest rozwiązanie hybrydowe, początkiem tego rozwiązania jest wspomniany żyrobust. Idea takiego rozwiązania została ponownie użyta w Formule 1 przez zespół Williamsa. Jest to elektromechaniczne urządzenie obecnie stosowane w niektórych hybrydowych i elektrycznych pojazdach znanych marek jak Audi R18 e-tron, czy Jaguar Flywheel Hybrid XF. Konstrukcja urządzenia składa się z dwóch połączonych maszyn elektrycznych, które pełnią rolę silnika i generatora. Energia mechaniczna pojazdu jest przekształcana w energię elektryczną, przesyłaną do drugiej maszyny, gdzie ponownie przekształcana jest w energię mechaniczną. Koło zamachowe stanowi wirnik drugiej maszyny silnika/generatora elektrycznego. Stojan silnika spełnia jednocześnie funkcję obudowy koła zamachowego. Podczas hamowania pojazdu silnik trakcyjny działa w trybie generatora i wytwarza energię elektryczną, która jest wykorzystywana do przyspieszania koła zamachowego – wirnika drugiej maszyny. W razie potrzeby następuje proces odwrotny, energia koła zamachowego (wirnika) jest przekształcana na energię elektryczną, która przesyłana jest z powrotem do silnika trakcyjnego. Układ sterowania bezstopniowej przekładni dobiera przełożenie w zależności od kierunku przepływu energii, a układy elektroniczne kontrolują moment obrotowy maszyn poprzez zmianę napięcia lub natężenia prądu dostarczanego do nich. Takie rozwiązanie elektromechaniczne ma zaletę łatwej zabudowy i elastyczności położenia

---

<sup>35</sup> <https://www.racecar-engineering.com/articles/the-basics-of-f1-kers/> [wrzesień 2020]

<sup>36</sup> id.



elementów w pojeździe ze względu na brak sztywnych połączeń mechanicznych<sup>37</sup>. Taki sposób gromadzenia energii nazwany jest akumulatorem elektromechanicznym (EMB – Electro-Mechanical Battery). System hybrydowy (elektromechaniczny) został dopracowany przez zespół F1 Williams, ma sprawność i efektywność transferu energii w obie strony porównywalną z systemami czysto mechanicznymi.

### 10.5. Ciśnieniowe układy odzyskiwania energii i magazynowanie i jej magazynowanie w postaci sprężonego medium

Odzyskiwana energia może być magazynowana za pomocą ciśnienia gazów lub płynów, chociaż ze względu na ściśliwość powietrza, to medium jest rzadko stosowane w układach napędu pojazdów oraz w układach odzyskiwania energii. Zastosowanie gazów ma zastosowanie w zwalniaczach, w których ta energia jest nieodnawialna (tracona).

Jednym z pojazdów w którym zastosowano akumulator energii w postaci zbiornika ze sprężonym powietrzem to TATA One CAT, przedstawiony na Rys. 10.6.



Rys. 10.6. Pojazd napędzany sprężonym powietrzem

Źródło: <https://ecofriend.com/good-bad-ugly-compressed-air-powered-cars.html> [wrzesień 2020 r.]

W przypadku pojazdów z układem odzyskiwania energii podczas hamowania układ hamulcowy z odzyskiem energii wykorzystuje zbiornik niskociśnieniowy, urządzenie

---

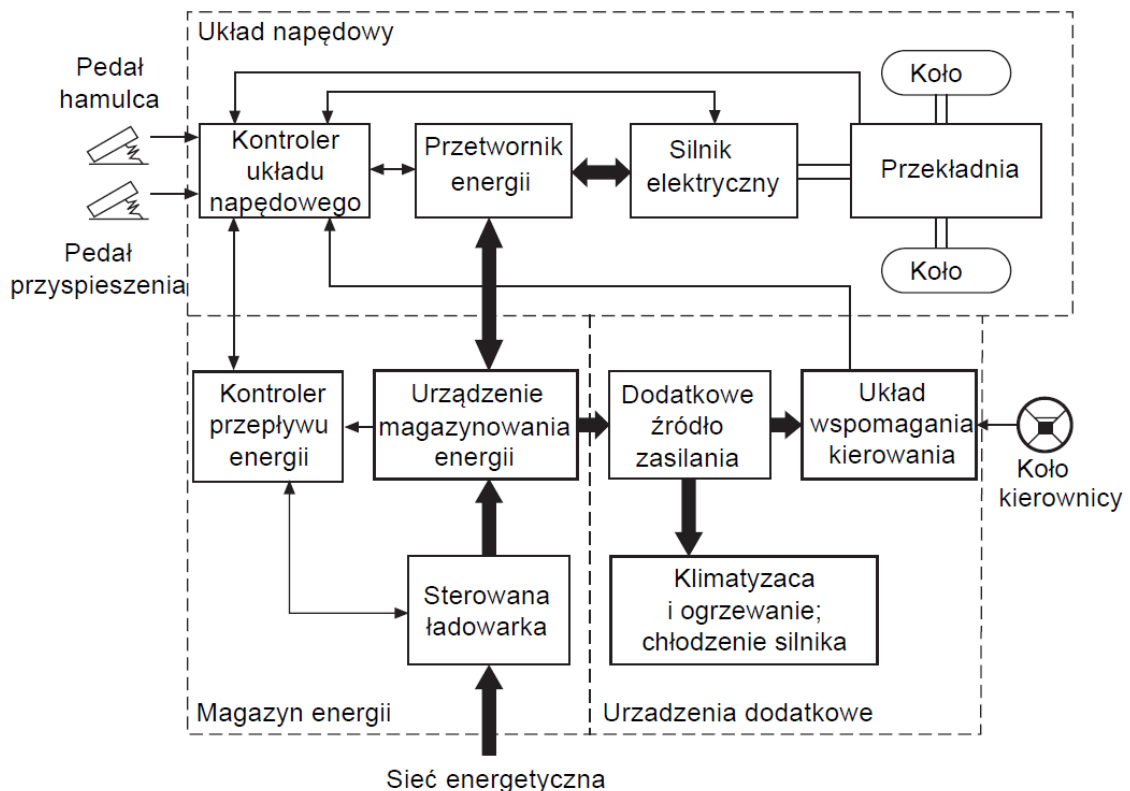
<sup>37</sup> K.R. Pullen and A. Dhand, *Mechanical and electrical flywheel hybrid technology to store energy in vehicles*, *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, Towards Zero Carbon Transportation*; 2014, s 476-504.

hydrauliczne (pompe/silnik hydrauliczny) i akumulatory wysokociśnieniowe do magazynowania energii w postaci ciśnienia cieczy. Podczas hamowania urządzenie działa jako pompa hydrauliczna jest napędzana od kół pojazdu poprzez układ napędowy pojazdu i przepompowuje płyn ze zbiornika niskiego ciśnienia do akumulatora wysokociśnieniowego. W fazie ruszania maszyna hydrauliczna pracuje jako silnik hydrauliczny. Hydrauliczne systemy odzyskiwania energii są dość tanie, jednak niepozbawione wad. Układy takie są ciężkie i charakteryzują się niewielką gęstością energii, dodatkowo wymagają częstej konserwacji i obsługi w porównaniu z układami mechanicznymi lub elektrycznymi. Układy takie mają również dużą liczbę ruchomych części, wynikających z zastosowania wielobiegowej przekładni i sprzęgła, które łączy pompe/silnik z układem napędowym pojazdu. Z powodu wspomnianych wad takie rozwiązania konstrukcyjne magazynowania energii odzyskanej podczas hamowania pojazdu nie były dalej rozwijane i z tego powodu nie są stosowane obecnie w pojazdach.

## 11. Układy napędowe i źródła energii w pojazdach elektrycznych i hybrydowych

### 11.1. Obecnie stosowane rozwiązania układów napędowych w pojazdach elektrycznych i hybrydowych

Na przestrzeni lat znacznie rozwinęła się technologia w zakresie pojazdów o napędzie tylko elektrycznym (pojazdy EV) oraz hybrydowym. W pojazdach elektrycznych, do których zaliczają się również pojazdy elektryczne akumulatorowe, stosuje się różne konfiguracje układu napędowego. W rozdziale przedstawiono obecnie stosowane do napędu takich pojazdów różne konfiguracje układów napędowych stosowanych w takich pojazdach, w tym również najnowocześniejsze rozwiązania. Ogólna budowa pojazdów elektrycznych oparta jest o 3 główne obszary: magazyn energii, układ napędowy oraz urządzenia dodatkowe (pomocnicze), ogólny schemat budowy takich pojazdów przedstawiono na Rys. 11.1. Grubymi strzałkami zaznaczone są połączenia elektryczne, cienkimi strzałkami zaznaczono połączenia sterujące, a podwójną linią zaznaczono połączenia mechaniczne.



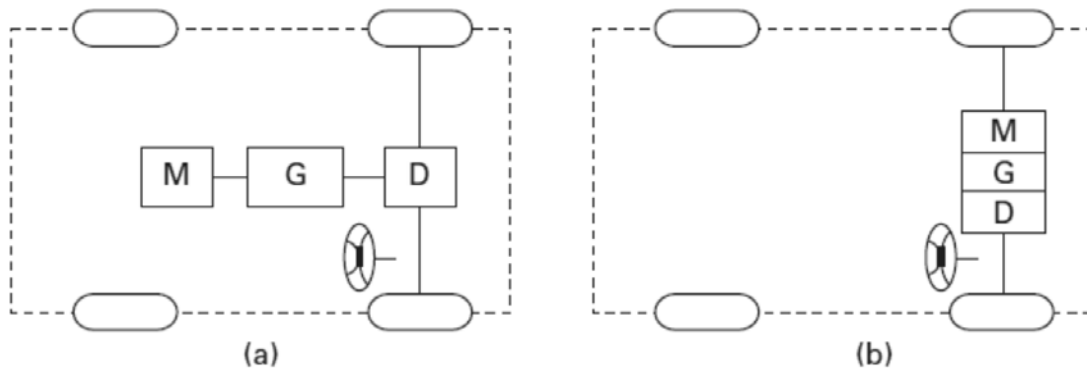
Rys. 11.1. Ogólny schemat pojazdu elektrycznego

Źródło: K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.656.

Przedstawiony na schemacie układ napędowy składa się z kontrolera układu napędowego, który steruje przetwornikiem energii. Sygnałami sterującymi tego kontrolera są położenie pedału przyspieszenia i hamowania. Przetwornik energii elektrycznej steruje przepływem energii do silnika elektrycznego. Moment obrotowy generowany przez silnik elektryczny jest przenoszony poprzez skrzynie biegów i mechanizm różnicowy na koła napędowe pojazdu. Magazyn energii zawiera urządzenie do przechowywania energii, kontroler przepływu energii

i sterowaną kontrolerem ładowarkę. W skład urządzeń dodatkowych, które najczęściej zasilane są inną wartością napięcia niż układ napędowy, wchodzi układy np. wspomaganie kierownicy, chłodzenia silnika, klimatyzacji i ogrzewania oraz inne układy peryferyjne w pojeździe (np. sprężarka powietrza).

Na Rys. 11.2 przedstawiono różne konfiguracje układu napędowego stosowanego w pojazdach elektrycznych. W takich pojazdach stosuje się, analogicznie jak w pojazdach z konwencjonalnym układem napędowym, układ napędowy wzdłużny (a) oraz poprzeczny (b).



Oznaczenia:

M – silnik elektryczny,

G – przekładnia,

D – mechanizm różnicowy.

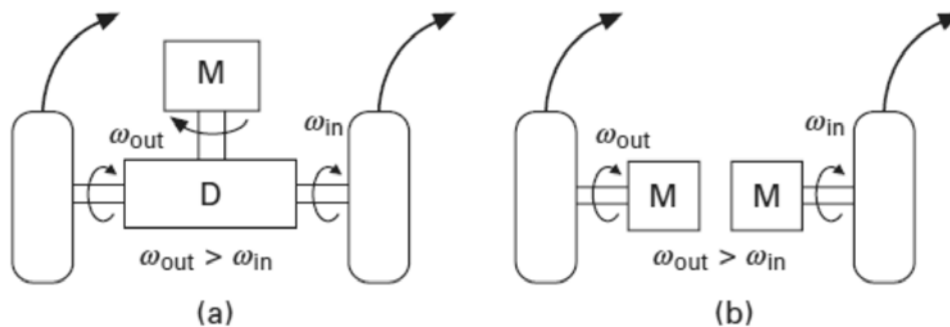
Rys. 11.2. Konfiguracja układu napędowego w pojazdach elektrycznych

Źródło: K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.658.

Wzdłużna konfiguracja układu napędowego pojazdu elektrycznego wyposażonego w jeden silnik trakcyjny pokazana na Rys. 11.2 (a) rzadko jest stosowana w samochodach osobowych, takie rozwiązanie często stosuje się w pojazdach ciężarowych i autobusach. Przekładnia jest zazwyczaj o stałym przełożeniu. Takie rozwiązanie możliwe jest dzięki charakterystyce momentu obrotowego silnika trakcyjnego. Zastosowanie przekładni o jednym przełożeniu powoduje, że budowa takiej przekładni jest mniej skomplikowana, lżejsza i tańsza. Jednak z punktu widzenia sprawności układu napędowego, lepszym rozwiązaniem jest poprzeczny układ napędowy przedstawiony na Rys. 11.2 (b). Takie rozwiązanie zapewnia mniejsze straty w transmisji energii na koła napędowe i posiada kompaktową budowę. W rzeczywistości to poprzeczny układ napędowy jest częściej stosowany w nowoczesnych samochodach osobowych i ciężarowych do 3,5 t.

W pojazdach elektrycznych, tak samo jak w pojazdach z konwencjonalnym układem napędowym, niezbędny jest mechanizm różnicowy, który umożliwi zachowanie założonego toru ruchu pojazdu podczas jazdy po torze krzywoliniowym. W przypadku pojazdów elektrycznych stosuje się dwa rozwiązania, co zaprezentowane jest na Rys. 11.3. W rozwiązaniu klasycznym, przedstawionym na Rys. 11.3 (a), silnik elektryczny połączony jest z mechanizmem różnicowym, który przenosi odpowiednio prędkość obrotową na koła osi napędowej pojazdu. Takie rozwiązanie ma wady, jest ciężkie, skomplikowane i posiada niską sprawność. W przypadku pojazdów elektrycznych można zrezygnować z mechanicznego mechanizmu różnicowego poprzez zastosowanie dwóch silników napędzających poszczególne

koła. Rozwiązanie zaprezentowane na Rys. 11.3 (b) jest to tzw. elektroniczny układ różnicowy. Stosowany najczęściej w układach napędowych pojazdów z silnikami w piastach kół. Poprzez zastosowanie dwóch silników połączonych osobno z kołami napędowymi pojazdu, umożliwia niezależne sterowanie prędkością każdego w zależności od zakładanego toru ruchu pojazdu, zastępując w ten sposób działanie mechanicznego mechanizmu różnicowego. To rozwiązanie powoduje zmniejszenie masy układu napędowego oraz zapewnia większą sprawność tego układu. Dodatkowo, poprzez elektroniczne sterowanie silnikami można kontrolować prędkości obrotową kół, co pozwala na korygowanie toru jazdy pojazdu. Wadą takiego rozwiązania jest koszt wynikający z zastosowania dwóch silników zamiast jednego, dwóch kontrolerów silnika oraz czujnika kąta skrętu koła kierownicy. Takie rozwiązanie wzbudza obawy dotyczące bezpieczeństwa oraz niezawodności układu elektronicznego sterującego silnikami.



Rys. 11.3. Rozwiązania układu różnicowego w pojazdach z napędem elektrycznym

Źródło: K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.659.

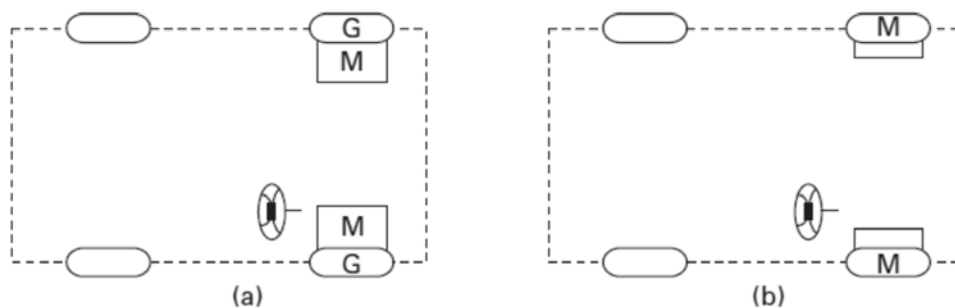
Oznaczenia:

M – silnik elektryczny,

D – mechanizm różnicowy,

$\omega_{in}$  /  $\omega_{out}$  – prędkość kątowna koła wewnętrznego / zewnętrznego względem toru ruchu.

W przypadku zastosowania silników w piastach kół napęd może być przekazywany pośrednio przekładnie o stałym przełożeniu (patrz Rys. 11.4 (a)) lub bezpośrednio poprzez wirnik silnika do kół (patrz Rys. 11.4 (b)).



Rys. 11.4. Rozwiązania układu napędowego w przypadku rozwiązań z silnikami w kołach

Źródło: K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.660.

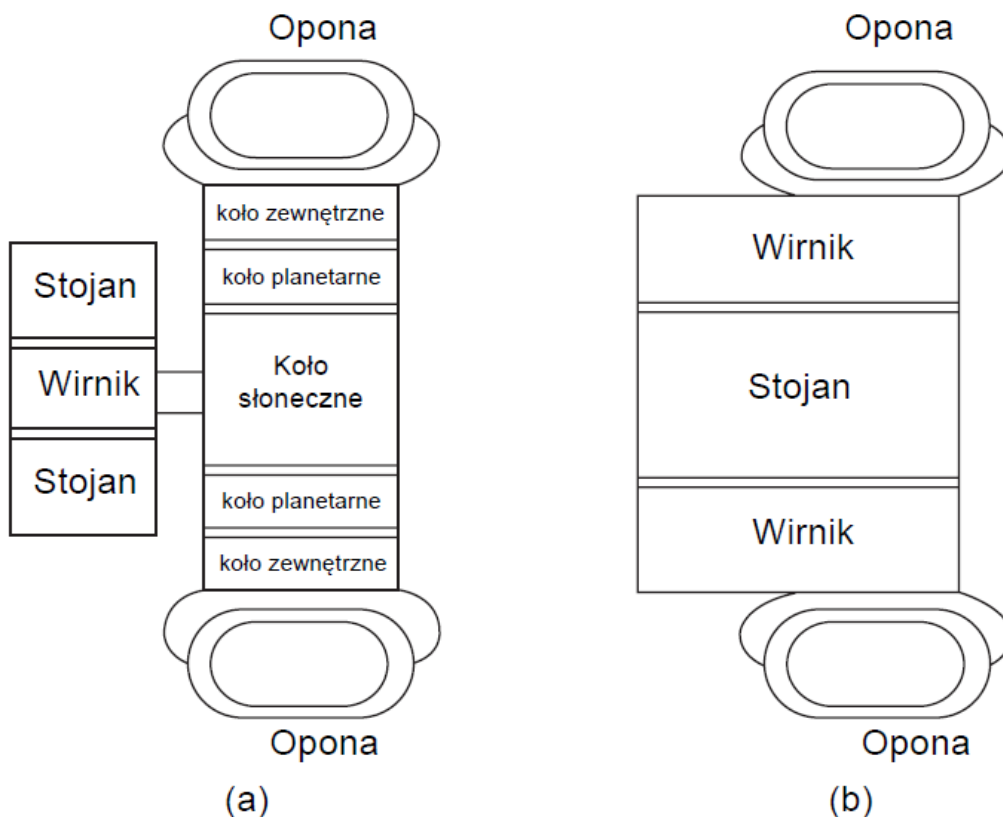
Oznaczenia:

M – silnik elektryczny,

G – przekładnia.

Rozwiązanie stosowania silników w piastach kół pojazdu znacznie zmniejsza liczbę elementów układu napędowego przenoszących moment obrotowy z silnika na koła pojazdu, to powoduje, że takie rozwiązanie ma większą sprawność.

Zastosowanie przekładni w piaście koła ma na celu zredukowanie prędkości obrotowej wirnika silnika elektrycznego przenoszonej na koło pojazdu. W konwencjonalnym pojeździe jest to realizowane przez skrzynie biegów, przekładnie główną oraz zwolnice, stosowane czasami w pojazdach terenowych. Opisane rozwiązanie z przekładnią planetarną przedstawiono na Rys. 11.5 (a), natomiast połączenie bezpośrednie silnika z kołem pojazdu pokazano na Rys. 11.5 (b).



Rys. 11.5. Schemat rozwiązań z przekładnią (a) i bez przekładni (b) w kołach

Źródło: K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.660.

W przypadku rozwiązań z przekładnią planetarną stosuje się silnik wysokoobrotowy o mniejszym momencie obrotowym. Silniki wysokoobrotowe stosowane w pojazdach elektrycznych zaprojektowane są do pracy z prędkością obrotową przekraczającą 10 000 obr/min. Przekładnia planetarna ma na celu ograniczenie prędkości koła i zwiększenie momentu obrotowego koła pojazdu. W celu uzyskania prędkości obrotowej koła nieprzekraczającej 1000 obr/min stosuje się najczęściej przełożenie 10:1<sup>38</sup>. Takie rozwiązanie nie jest pozbawione wad z uwagi na zastosowanie przekładni planetarnej, która jest elementem podatnym na zużycie i wymaga konserwacji. Sprawność przekładni planetarnej wynosi od 0,96 do 0,99 co powoduje straty w przenoszeniu momentu napędowego. W celu zrezygnowania

<sup>38</sup> K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.660.

z przekładni planetarnej redukującej prędkość obrotową silnika możliwe jest zastosowanie wewnątrz koła wolnoobrotowego silnika elektrycznego z zewnętrznym wirnikiem (patrz Rys. 11.5 (b)). Zastosowanie rozwiązania bez przekładni wymusza wolnoobrotową konstrukcję silnika, zwykle o prędkości obrotowej do 1000 obr/min dysponującego większym momentem obrotowym. Taki silnik jest większy i ma większą masę.

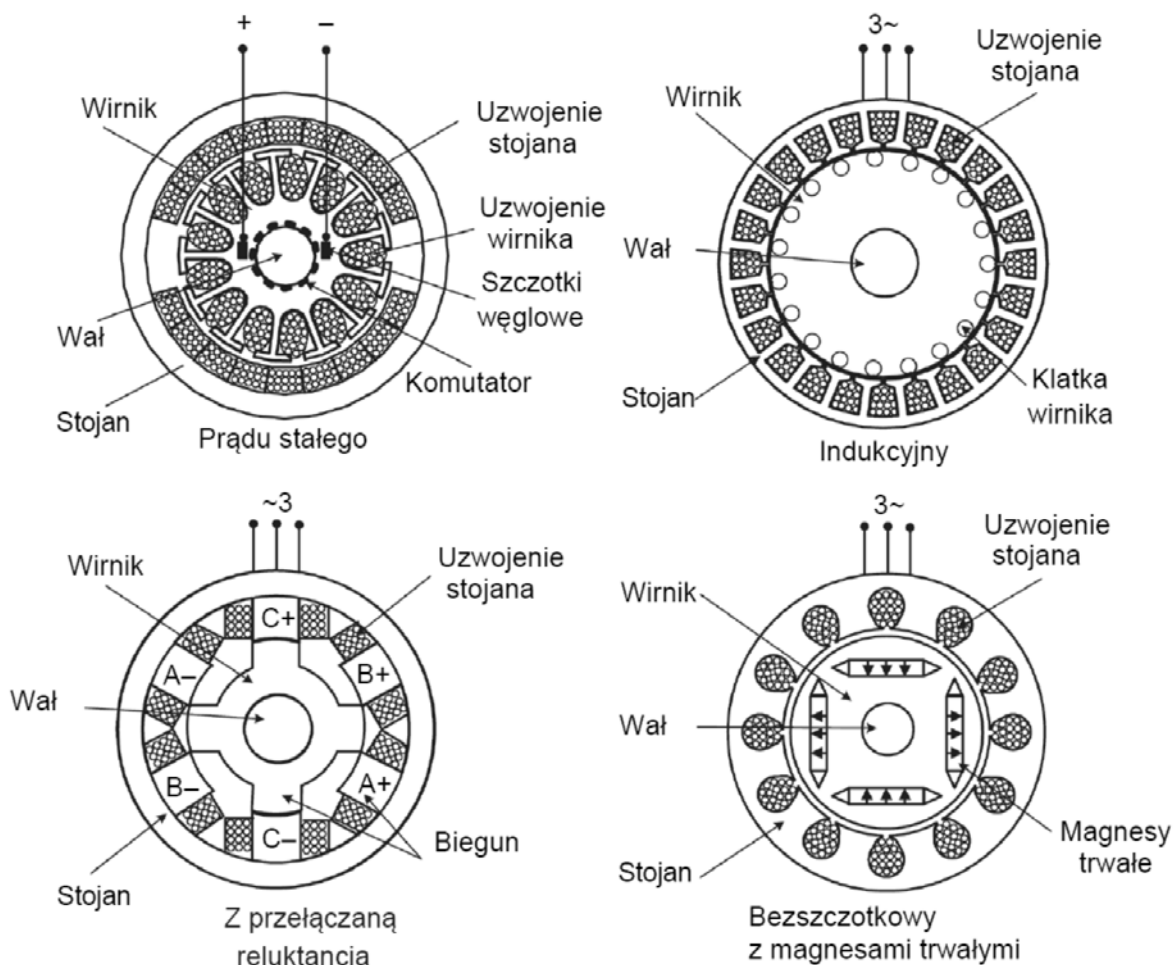
## 11.2. Stosowane silniki w pojazdach elektrycznych i hybrydowych

Silniki elektryczne standardowo stosowane w przemyśle różnią się od stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych. Silniki stosowane do napędu pojazdów elektrycznych muszą zapewniać wysoki moment obrotowy, wysoki stosunek mocy do masy, wysoką sprawność w szerokim zakresie momentu obrotowego i prędkości obrotowej, dobrą sterowalność, wysoką niezawodność i brak konieczności nadmiernej konserwacji.

Obecnie stosowane silniki pojazdów elektrycznych (EV) obejmują 4 rodzaje:

- prądu stałego (DC);
- indukcyjne (Induction);
- z przełączaną reluktancją (SR);
- bezszczotkowy z magnesami trwałymi (BLPM)

Silniki posiadają różną budowę co zostało przedstawione na Rys. 11.6.



Rys. 11.6. Budowa silników stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych

Źródło: K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.660.

### **Silniki prądu stałego**

Silniki prądu stałego (DC) były dawniej powszechnie stosowane w pojazdach elektrycznych. Silniki prądu stałego dzielimy ze względu na sposób wzbudzania pola magnetycznego na:

- obcowzbudny, jest to silnik prądu stałego z magnesami trwałymi lub z elektromagnesami, tj. z osobnym uzwojeniem wzbudzenia w stojanie zasilanym z oddzielnego źródła zasilania niż obwód twornika;
- samowzbudny jest to silnik z elektromagnesem w stojanie, może mieć połączone uzwojenia stojana i wirnika szeregowo, równoległe (bocznikowo) lub w sposób mieszany;
- szeregowy, jest to silnik o uzwojeniu wzbudzenia w stojanie połączonym szeregowo z uzwojeniem twornika;
- bocznikowy, jest to silnik o uzwojeniu wzbudzenia w stojanie połączonym równoległe z uzwojeniem twornika;
- szeregowo-bocznikowy, jest to silnik o uzwojeniu wzbudzenia w stojanie połączonym z uzwojeniem twornika w sposób mieszany (część szeregowo, a część równoległe).

Wszystkie silniki prądu stałego (wymienione powyżej) mają wadę w postaci częstego zużycia komutatorów i szczotek. Te elementy wymagają konserwacji i okresowego przeglądu, co powoduje, że takie silniki nie nadają się do pracy bezobsługowej i są mniej niezawodne. Komutatory powodują tętnienia momentu obrotowego silnika i ograniczają maksymalną prędkość obrotową silnika, praca szczotek silnika powoduje tarcie i zakłócenia elektromagnetyczne.

Główne zalety silników DC to ich prosta konstrukcja, jednak ze względu na ich stosunkowo niską sprawność (ok. 0,8 do 0,92) i potrzebę konserwacji nie są one obecnie stosowane do napędu pojazdów elektrycznych.

### **Silnik indukcyjny**

Obecnie technologia silników indukcyjnych jest najlepiej rozwinięta. Istnieją dwa rodzaje silników indukcyjnych: z uzwojonym wirnikiem i z wirnikiem klatkowym. Ze względu na wysokie koszty, konieczność konserwacji, silnik indukcyjny z uzwojonym wirnikiem jest rzadziej stosowany niż silnik indukcyjny z wirnikiem klatkowym. Silnik indukcyjny z wirnikiem klatkowym ma charakterystykę niskim kosztem, prostą budowę, dużą niezawodnością i dużą sprawnością wynoszącą od 0,92 do 0,95. Silnik posiada dwa tryby pracy. Kiedy prędkość obrotowa jest poniżej prędkości bazowej silnik pracuje w trybie stałego momentu obrotowego (zmiennej mocy), dalsze zwiększanie prędkości obrotowej do maksymalnej prędkości obrotowej powoduje zmniejszenie dostępnego momentu obrotowego i pracę silnika ze stałą mocą. Sterowanie prędkością obrotową silników indukcyjnych jest znacznie bardziej skomplikowane niż dla silników prądu stałego.



W silnikach indukcyjnych stosuje się dwie strategie kontroli prędkości obrotowej silnika<sup>39</sup>:

- sterowanie zmianą napięcia i zmianą częstotliwości (variable-voltage variable-frequency - VVVF),
- sterowanie poprzez zmianę wektora strumienia pola (field-oriented control – FOC).

### **Silnik z przełączaną reluktancją**

Silnik z przełączaną reluktancją (SR) to synchroniczny silnik prądu przemiennego, bez uzwojeń wzbudzenia. Wirnik silnika wykonany jest z materiału ferromagnetycznego oraz posiada specyficzny kształt, posiada wystające bieguny. Stojan silnika zawiera uzwojenia zasilane prądem przemiennym. Silnik wykorzystuje w ruchu zjawisko zmiany oporności magnetycznej obwodu magnetycznego (magnetowodu), czyli reluktancji w zależności od położenia wirnika. Wadą tych silników jest duże tętnienie wytwarzanego momentu obrotowego oraz głośna praca.

Silnik o przełączanej reluktancji ma charakterystykę umożliwiającą zastosowanie ich w napędach pojazdów elektrycznych. Głównymi zaletami tych silników jest duży moment obrotowy przy minimalnej prędkości ruchu, możliwość przeciążeń w całym zakresie prędkości obrotowej, łatwa kontrola momentu obrotowego również w fazie odzyskiwania energii, łatwa zmiana kierunku obrotów, bezobsługowa eksploatacja.

Silniki SR mają zasadniczo dwa tryby pracy. Kiedy prędkość obrotowa jest poniżej prędkości bazowej silnik pracuje w trybie stałego momentu obrotowego (zmiennej mocy), a po przekroczeniu tej prędkości obrotowej do prędkości maksymalnej silnik pracuje w trybie stałej mocy (zmiennego momentu obrotowego).

### **Silnik bezszczotkowy z magnesami trwałymi**

Bezczotkowe silniki z magnesami trwałymi (PM) są coraz częściej stosowane w pojazdach elektrycznych. Pole magnetyczne o dużym natężeniu jest wytwarzane przez magnesy trwałe umieszczone w wirniku silnika, umożliwia uzyskiwanie przez te silniki dużego momentu obrotowego i wysoki stosunek mocy do masy silnika. Sprawność takich silników jest duża i wynosi 0,95 do 0,97, charakteryzuje się on dużą niezawodnością i pracą nie wymaga częstej konserwacji i skomplikowanej obsługi. Silnik pracuje w szerokim zakresie prędkości obrotowej w trybie stałego momentu obrotowego.

Wadami silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi jest wysoki koszt wynikający z zastosowania magnesów z metali ziem rzadkich, brak kontroli strumienia magnetycznego magnesów trwałych oraz konieczność stosowania skomplikowanych kontrolerów takich silników. W takich silnikach podczas pracy z dużym obciążeniem może wystąpić brak stabilności prędkości obrotowej silnika. To zjawisko można ograniczyć poprzez zwiększanie liczby uzwojeń stojana, co przekłada się na bardziej skomplikowane sterowanie, powodujące wyższe koszty.

Magnes trwały, który ma znaczny udział w kosztach takich silników składa się z metali ziem rzadkich (REE) takich jak neodym (Nd) - ok. 18%, prazeodym (Pr) - ok. 6%, dysproz (Dy) - ok. 9%. Kolejną wadą jest

---

<sup>39</sup> K.T. Chau, *Pure electric vehicles*, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, Woodhead Publishing, 2014, s.662.

Szacuje się, że na jeden pojazd EV/HEV przypada 1,4 kg magnesów neodymowych. Rozróżniamy dwa typy silników bezszczotkowych:

- silnik bezszczotkowy prądu przemiennego PM AC (BLAC);
- silnik bezszczotkowy prądu stałego PM DC (BLDC).

Należy dodać, że problemy wynikające z pracy szczotek zostały wyeliminowane w bezszczotkowych silnikach prądu stałego, poprzez zastosowanie elektronicznie sterowanego komutatora, który odpowiednio steruje włączaniem i wyłączaniem zasilania cewek w stojanie. Moment obrotowy w tego typu silniku jest następstwem oddziaływania pól magnetycznych magnesów trwałych wirnika i elektromagnesów stojana. Silniki z magnesami trwałymi stanowią stosunkowo nowy typ silnika, powstał w 1962 r. i bardzo szybko został uznany za rewolucyjny<sup>40</sup>.

Silnik bezszczotkowy prądu przemiennego (BLAC) jest zwykle nazywany silnikiem synchronicznym, wytwarza mniejszy moment obrotowy niż silnik bezszczotkowy prądu stałego (BLDC). Mniejszy moment obrotowy wytwarzany przez silnik BLAC wynika z zasilania elektromagnesów stojana prądem o przebiegu sinusoidalnym w przeciwieństwie do silnika BLDC, w którym elektromagnesy zasilane są prądem o przebiegu prostokątnym. Jednocześnie silniki BLDC mają znaczną pulsację momentu obrotowego, podczas gdy silnik BLAC wytwarza zasadniczo stały chwilowy moment obrotowy.

### **Podsumowanie**

W celu podsumowania i oceny opisanych powyżej typów silników pod kątem zastosowania w pojazdach elektrycznych, porównano je pod względem wartości stosunku mocy do masy, sprawności, łatwości sterowania, niezawodności, dopracowania konstrukcji, kosztów, hałasu i potrzeby konserwacji oraz obsługi. Zastosowano system ocen punktowych (od 1 do 5 punktów), w którym 1 jest najgorszy, a 5 jest najlepszy. Jak pokazano w tabeli 11.1.

---

<sup>40</sup> [Silniki bezszczotkowe: Bez szczotek, ale z innymi zaletami \(elektrotechnikautomatyk.pl\)](http://elektrotechnikautomatyk.pl) [styczeń 2021]

Tabela 11.1. Porównanie podstawowych parametrów silników elektrycznych stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych<sup>41</sup>

Cecha	Silnik prądu stałego	Silnik indukcyjny	Silnik z przełączaną reluktancją (SR)	PM BLAC (PM synchroniczny)	PM BLDC
Stosunek mocy do masy	2	3	3,5	4,5	5
Sprawność	2	3	3,5	4,5	5
Łatwość sterowania	5	4	3	4	4
Niezawodność	3	5	5	4	4
Dopracowanie konstrukcji	5	5	4	5	4
Koszt	4	5	4	3	3
Poziom hałasu	3	5	2	5	5
Obsługa	1	5	5	5	5
SUMA	25	35	30	35	35

Źródło: K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.664.

Największą wadą komutatorowych silników prądu stałego jest potrzeba regularnej konserwacji, podczas gdy największą wadą silników z przełączaną reluktancją jest hałas. Największą zaletą silnika indukcyjnego jest niski koszt, podczas gdy kluczowymi zaletami bezszczotkowych napędów PM jest możliwość uzyskiwania dużych mocy przy małych rozmiarach, wysokiego stosunku mocy do masy silnika oraz wysokiej sprawności. Na podstawie tej analizy można stwierdzić, że komutatorowe silniki prądu stałego nie są optymalnym rozwiązaniem do napędu pojazdów elektrycznych. Są konstrukcjami przestarzałymi, rzadko stosowanymi w napędach pojazdów elektrycznych a ich stosowanie ograniczone do pojazdów małych, wymienionych w tabeli 11.2. Silniki z przełączaną reluktancją (SR) również są rzadko stosowane przed wszystkim z uwagi głośną pracę. Silniki indukcyjne i silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi są najlepsze do aplikacji w układach napędowych pojazdów elektrycznych, z uwagi na swoje cechy. Takie silniki są najczęściej stosowane w układach napędowych pojazdów elektrycznych i hybrydowych, a ich udział w rynku takich pojazdów jest praktycznie jednakowy.

<sup>41</sup> K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.664.

Tabela 11.2. Zastosowanie istniejących napędów do flagowych pojazdów elektrycznych<sup>42</sup>.

Rodzaj silnika	Zastosowanie w pojazdach
Silnik prądu stałego	Fiat Panda Elettra, Citroën Berlingo Electrique, Reva G-Wiz DC
Silnik indukcyjny	Chloride Lucas
Silnik z przełączaną reluktancją (SR)	GM EV1, BMW Mini E, Tesla Roadster, Reva G-Wiz
PM BLAC (PM Synchroniczny)	Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, Ford Focus Electric, Citroën C-Zero, Peugeot iOn,
PM BLDC	Smart Fortwo ED

Źródło: K.T. Chau, *Pure electric vehicles*, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, Woodhead Publishing, 2014, s.664

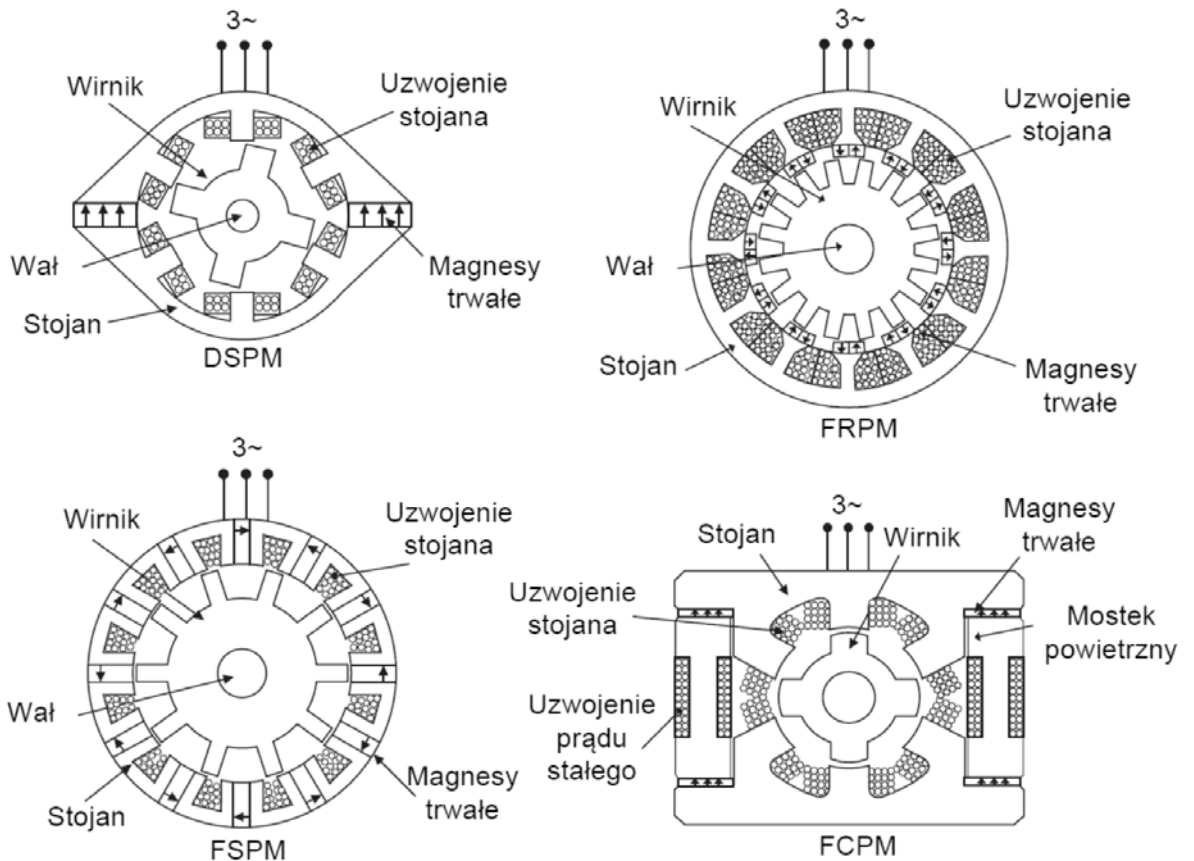
W niedalekiej przyszłości z powodu coraz większej troski o ochronę środowiska, a tym samym dążenia producentów do najmniejszego zużycia energii przez ich pojazdy, przewiduje się, że silniki indukcyjne będą wycofywane z rynku i zastępowane przez silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi.

### Zaawansowane silniki do pojazdów elektrycznych

W silnikach bezszczotkowych z magnesami trwałymi, magnesy znajdują się w wirniku, co stanowi problem z uwagi na integralność mechaniczną i stabilność termiczną. W ostatnich latach w silnikach elektrycznych odchodzi się od rozwiązań z magnesami trwałymi umieszczonymi w wirniku, a stosuje się magnesy trwałe w stojanie. W takich rozwiązaniach wirnik nie ma ani uzwojeń ani magnesów trwałych, przez co konstrukcja staje się dużo prostsza i mniej zawodna, dzięki czemu doskonale nadaje się do zastosowań w pojazdach elektrycznych. Pod względem rozmieszczenia magnesów trwałych (głównie neodymowych) w stojanie rozróżnia się konstrukcje przedstawione na Rys. 11.7.

Przedstawiono cztery główne konstrukcje silników z magnesami trwałymi umieszczonymi w stojanie: silnik doubly-salient (DSPM), silnik z odwróceniem strumienia magnetycznego (FRPM), silnik z przełączaniem strumienia magnetycznego (FSPM) oraz silnik ze sterowanym strumieniem magnetycznym (FCPM).

<sup>42</sup> K.T. Chau, *Pure electric vehicles*, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, Woodhead Publishing, 2014, s.664.



Rys. 11.7. Budowa silników z magnesami trwałymi w stojanie stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych

Źródło: K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.665.

Silnik o rozwiązaniu DSPM jest najbardziej rozwiniętą i dopracowaną konstrukcją. Silnik taki pozwala na osiągnięcie dużych momentów obrotowych przy niewielkich rozmiarach. Takie rozwiązanie charakteryzuje się wyższym stosunkiem wartości momentu obrotowego do wymiarów silnika niż silniki z przełączaną reluktancją (SR)<sup>43</sup>.

W przypadku silnika z magnesami trwałymi z odwróceniem strumienia FRPM, który umożliwia uzyskanie jeszcze większego momentu obrotowego niż silnik DSPM przy zachowanych rozmiarach. Jednak, z uwagi na zamocowanie magnesów trwałych powierzchni zębów stojana są bardziej podatne na częściowe rozmagnesowanie. Co w konsekwencji może prowadzić do znacznego obniżenia sprawności silnika. W silnikach z magnesami trwałymi oraz przełączaniem strumienia FSPM każdy ząb stojana składa się z uzwojenia i sąsiadującym z nim magnesem trwałym. Podobnie jak we wszystkich silnikach, których stojan zawiera magnesy trwałe występują problemy z kontrolą strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej. W celu zapobiegania temu negatywnemu zjawisku opracowano silnik z magnesami trwałymi sterowany strumieniem magnetycznym FCPM. W takim silniku stojan zawiera dwa rodzaje uzwojeń, a uzwojenie zasilane prądem trójfazowym i uzwojenie zasilane prądem stałym oraz

<sup>43</sup> K.T. Chau, *Pure electric vehicles, Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, s.665.

magnesy trwałe. Zmieniając polaryzację i wielkość prądu w uzwojeniach prądu stałego, można w sposób łatwy kontrolować gęstość strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej. Taki silnik może rozwijać bardzo duży moment obrotowy praktycznie od zatrzymania, a przy wysokich prędkościach obrotowych zapewnia pracę w warunkach stałej mocy. Wadą tego rozwiązania jest jego stojan, który jest stosunkowo duży, a uzwojenie jest ciągle wzbudzone przez prąd stały, co obniża sprawność takiego silnika.

Wszystkie zaawansowane silniki z magnesami trwałymi PM umieszczonymi w stojanie mają swoje zalety i wady. Dobierane są w zależności od aplikacji w pojazdach elektrycznych. Silnik DSPM jest stosowany do najnowszych konstrukcji pojazdów elektrycznych, jest konstrukcją dobrą i najbardziej z nich rozwiniętą. Silnik FSPM jest dobrym wyborem dla zastosowania w pojazdach elektrycznych, z uwagi na dobre osiągnięcia. Silnik FCPM jest dobrym rozwiązaniem dla pojazdów, które wymagają napędów o stałej mocy.

### 11.3. Stosowane rozwiązania akumulatorów w pojazdach elektrycznych i hybrydowych

Na przykładzie prekursora samochodów hybrydowych, tj. Toyoty Prius, można przedstawić ewolucję w stosowanych rodzajach akumulatorów w pojazdach hybrydowych i elektrycznych. Pojazdy hybrydowe posiadają dwa zestawy akumulatorów:

- akumulator 12 V określany mianem akumulatora niskiego napięcia (LV) do obsługi systemów pojazdu,
- akumulator wysokiego napięcia (HV) wykorzystywany jako akumulator trakcyjny.

W pojazdach pierwszej generacji akumulator trakcyjny był szczelnym 38-modułowym akumulatorem nikielowo-metalowo-wodorkowym (NiMH) o napięciu 273,6 V, i pojemności 6,5 Ah produkcji japońskiej. Masa akumulatora wynosiła 53,3 kg<sup>44</sup>. Zwykle akumulator w przypadku pojazdów hybrydowych ładowany jest do 40-60% pojemności w celu wydłużenia czasu pracy akumulatora pomiędzy wymianami oraz zapewnienia zapasu pojemności na hamowanie regeneracyjne. Akumulator niskiego napięcia w pojazdach hybrydowych jest niezbędny do uruchomienia samochodu i zapewnienia początkowej energii jednostce sterującej.

W pojazdach drugiej generacji Toyoty Prius zastosowano akumulator trakcyjny o energii 1,310 kWh, złożony z 28 modułów. Każdy moduł akumulatorowy składa się z 6 pojedynczych pryzmatycznych ogniw NiMH o napięciu 1,2 V i pojemności 6,5 Ah połączonych szeregowo, tworzących moduł 7,2 V i 6,5 Ah o gęstości energii 46 Wh/kg i gęstości mocy wyjściowej 1,3 kW/kg<sup>45</sup>. Każdy moduł zawiera własny kontroler ładowania. Te 28 modułów jest połączonych szeregowo tworząc akumulator trakcyjny o napięciu 201,6 V i pojemności 6,5 Ah. Sterowany komputerowo proces ładowania i zarządzania utrzymuje akumulator w stanie naładowania między 38% a 82% pojemności przy zapewnieniu średniego stanu naładowania akumulatora na poziomie około 60% pojemności. Poprzez takie zarządzanie tylko niewielka część jego zmagazynowanej w nim energii (około 400 Wh) jest dostępna do wykorzystania przez elektryczną część hybrydowego układu napędowego pojazdu. Takie zarządzanie energią

<sup>44</sup> <http://www.cleangreencar.co.nz/page/prius-battery-pack> [wrzesień 2020]

<sup>45</sup> <https://www.peve.jp/en/product/np2/index.html> [wrzesień 2020]

w sposób znaczący wydłuża czas pracy akumulatora między wymianami. Moduł ładowania zapewnia kontrolę temperatury akumulatora w cyklu ładowania. Akumulator jest wyposażony w aktywne chłodzenie poprzez wymuszony obieg powietrza oraz chłodzenie pasywne dzięki metalowej obudowie akumulatora. Takie rozwiązanie zarządzania energią akumulatora przynosi znaczne korzyści odnośnie czasu eksploatacji akumulatorów.

W przypadku samochodów elektrycznych obecnie najczęściej stosowanym ogniwem są akumulatory litowo-jonowe, które są też powszechnie stosowane w różnych urządzeniach elektrycznych. W samochodach elektrycznych marki Tesla również stosowane są akumulatory litowo-jonowe, jednocześnie prowadzone są prace badawcze nad opracowaniem bezpiecznych w eksploatacji akumulatorów metaliczno-litowych. Parametry akumulatorów litowo-jonowych w zależności od konstrukcji przedstawiono w tabeli 11.3.

Tabela 11.3. Podstawowe parametry akumulatorów litowo-jonowych<sup>46,47</sup>

Parametr	Wartość	Uwagi
Napięcie pojedynczego ogniwa	Wysoka 3,7 – 3,8 V	3 x więcej niż Ni-Cd i Ni-MH
Stosunek energii do masy akumulatora	100 do 250 Wh/kg typowo 150 – 170 Wh/kg – dla pojazdów (cały akumulator z obudową) <sup>48</sup>	3 do 4 x więcej niż Ni-Cd i 2 do 3 x Ni-MH
Stosunek energii do objętości akumulatora	250 do 680 Wh/dm <sup>3</sup>	---
Cykl życia	500 – 1000 cykli (nawet do 2000 cykli)	---
Samorozładowanie	ok. 2% na miesiąc (w temperaturze ok. 20°C)	25-30% dla Ni-Cd i 30-35% dla Ni-MH.
Możliwość szybkiego ładowania	Nawet do 80% pojemności w 30 min a nawet w 45 min do 100%	---
Temperatury pracy	-25 do 45°C	---

Źródło: <https://www.large.net/news/99u43hv.html> [wrzesień 2020]

[https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery) [wrzesień 2020]

Przykładowo, akumulator w samochodzie Tesla Model S składa się z kilku tysięcy cylindrycznych ogniw o rozmiarze pojedynczego ogniwa: średnicy 18 mm i wysokości 65 mm. Nominalne napięcie ogniwa to 3,7 V, a typowa pojemność pojedynczego ogniwa to 1500 do 3500 mAh<sup>49</sup>.

W 2012 roku dla modelu Tesla S stosowano akumulator o energii 60 kWh oraz opcjonalnie akumulator o energii 85 kWh. Według producenta pojazdu Tesla Model S ma akumulator o dwukrotnie większej energii niż Nissan Leaf (ok 40kWh), ale różnica w zasięgu nie jest ponad dwukrotnie większa. Nissan Leaf wyposażony w akumulator o pojemności energii 40kWh ma

<sup>46</sup> <https://www.large.net/news/99u43hv.html> [wrzesień 2020]

<sup>47</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery) [wrzesień 2020]

<sup>48</sup> <https://elektrowoz.pl/auta/bateria-tesla-model-3-pojemnosc-masa-gestosc-dane-techniczne/>

<sup>49</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_battery\\_sizes](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_battery_sizes) [październik 2020]

zasięg ok. 270 km, a Tesla Model S wyposażona w akumulator o pojemności energii 85 kWh ma zasięg ok. 480 km. Takie różnice wynikają też z innych czynników, takich jak współczynnik oporu powietrza, masa pojazdu, sprawność silnika i opór toczenia.

Akumulator o pojemności energii stosowany w Tesla Model S o pojemności energii 85 kWh waży 540 kg i zawiera 7 104 ogniw litowo-jonowych w 16 modułach połączonych szeregowo (14 w płaskiej sekcji i dwa ułożone z przodu pojazdu). Każdy moduł zawiera 6 grup po 74 ogniwa połączone równolegle; 6 grup jest następnie połączonych szeregowo w module. Akumulatory litowo-jonowe działają najlepiej w określonych temperaturach pracy. Temperatura silnika samochodu Tesla Model S, sterownika i akumulatora są kontrolowane przez obwód chłodzenia i ogrzewania za napełniony cieczą. Ciepło szczątkowe silnika ogrzewa akumulator w niskich temperaturach. Akumulator można wstępnie podgrzać za pomocą wewnętrznego podgrzewacza o mocy 6 kW albo energią z akumulatora lub z ładowarki.

W 2015 roku Tesla wprowadziła akumulator 70 kWh w celu zastąpienia istniejących akumulatorów 60 kWh. Kolejnym krokiem było wprowadzenie w sierpniu 2016 r. nowego akumulatora o pojemności energii 100 kWh o zasięgu 315 mil (507 km). Akumulator P100D posiada masę o wadze 625 kg przy objętości 0,40 m<sup>3</sup>. Taki akumulator ma stosunek energii akumulatora do jego masy wynoszący 160 Wh / kg, a stosunek energii akumulatora do objętości wynosi 0,25 kWh / dm<sup>3</sup>.

Obecnie tylko akumulator o pojemności energii 100 kWh jest dostępny w samochodach Tesla Model S jako wersja 100D i P100D<sup>50</sup>.

Przykład akumulatora złożonego z ogniw litowo-jonowych połączonych w pakiety przedstawiono na Rys. 11.8.



Rys. 11.8. Ogniwa połączone w sekcje jako elementy składowe akumulatorów.

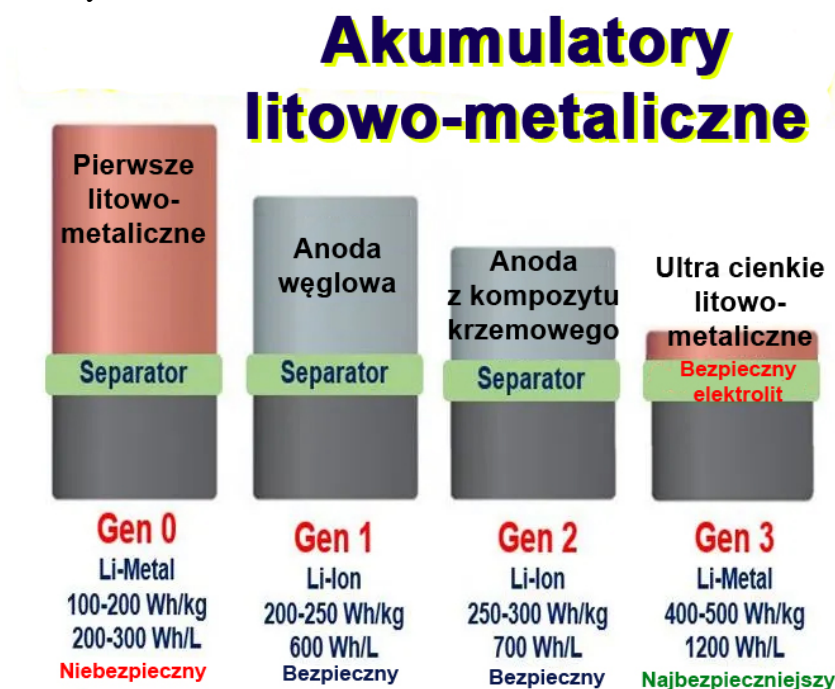
Tesla Corporation rozwija technologię akumulatorów litowych opartych na akumulatorach litowo-metalicznych. Ponadto, Tesla przedstawiła wyniki testów nowego ogniwa akumulatorowego, które może wytrzymać eksploatację w pojeździe elektrycznym na dystansie ponad miliona kilometrów. Zespół badawczy z Tesla Corporation nad zwiększeniem stosunku energii akumulatora / do masy oraz wydłużeniem czasu eksploatacji ogniw akumulatorowych przy jednoczesnym obniżeniu kosztów ich produkcji. W 2019 roku Tesla opatentowała „bezanodowe ogniwo litowo-metaliczne”, które, może być kolejnym przełomem w technologii akumulatorów do pojazdów elektrycznych.

<sup>50</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Model\\_S](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S) [listopad 2020]



Opracowane przez Tesla akumulatory litowo-metaliczne są bezpieczne i mają zalety w porównaniu z tradycyjnymi akumulatorami litowo-jonowymi, przewaga polega na tym, że mają większy stosunek energii do masy wynoszący ok. 0,4 kWh/kg oraz stosunek energii do objętości wynoszący 1,2 kWh/dm<sup>3</sup>. Takie rozwiązania wymagały opracowania nowych elektrolitów, które umożliwią akceptowalną liczbę cykli ładowania takich akumulatorów, a tym samym wytworzenie akumulatorów, które będą mogły być stosowane w pojazdach.

Rozwój kolejnych generacji akumulatorów litowo-metalicznych z parametrami przedstawiono na Rys. 11.9.



Rys. 11.9. Akumulatory litowo-metaliczne (kolejne generacje).

Źródło: <http://marketbusinessnews.com/lithium-metal-battery-twice-lifetime-coming-soon-say-mit-scientists/142322>  
[wrzesień 2020 r.]

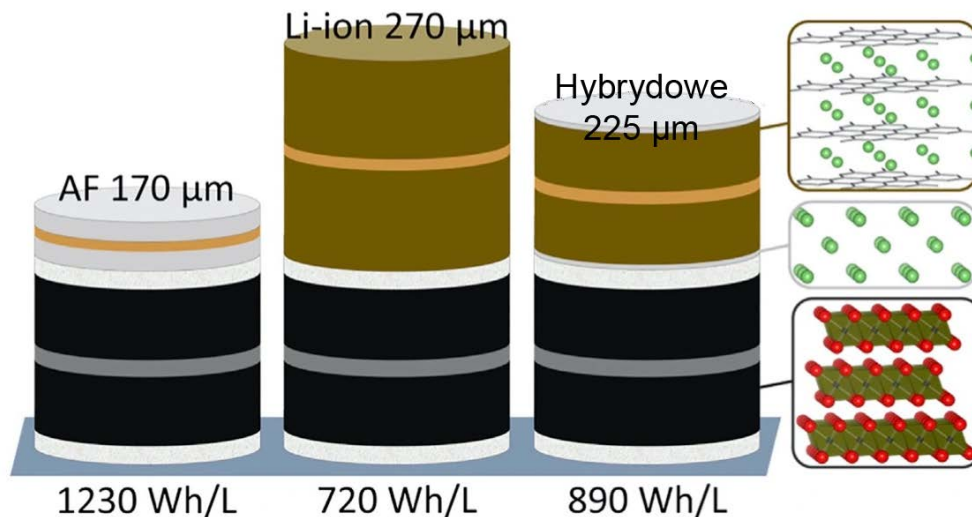
Rozwój akumulatorów litowo-metalowych nakierowany jest obecnie na zwiększenie liczby cykli ładowania. We wniosku patentowym Tesla Co. publikuje wyniki testów przedstawiając prace nad poprawą w utrzymywaniu pojemności akumulatorów w kolejnych cyklach ładowania. Opracowane akumulatory mają możliwości eksploatacji do 50 cykli ładowania. Trwają prace nad zwiększeniem liczby cykli ładowania, aby nadawały się do komercjalizacji<sup>51</sup>. Akumulatory w technologii litowo-metalicznej posiadają bardzo dobre właściwości magazynowania energii, ale wymagają dopracowania w zakresie czasu eksploatacji (ilości cykli ładowania). W Tesli rozważa się też stosowanie takich akumulatorów w układach hybrydowych. Układ hybrydowy będzie polegał na tym, że część pakietu akumulatorów będą stanowiły akumulatory litowo-jonowe a część litowo-metaliczne. Takie hybrydowe akumulatory będą wykorzystywane w samochodach elektrycznych jako „range extender”<sup>52</sup>. Obecnie najczęściej stosuje się do zwiększenia zasięgu pojazdu elektrycznego

<sup>51</sup> <https://electrek.co/2020/07/09/tesla-patents-lithium-metal-or-anode-free-battery/> [wrzesień 2020]

<sup>52</sup> „range extender” – zwiększenie zasięgu.

mały silnik spalinowy połączony z generatorem prądu, który służy do ładowania akumulatora<sup>53</sup>. Przykładem takiego rozwiązania może być samochód BMW i3 Rex, który został wyposażony w pakiet akumulatorów zapewniający zasięg 203 kilometrów, który można zwiększyć do 320 km za pomocą opisanego rozwiązania.

Grupa badaczy z Kanady opracowała dla firmy Tesla koncepcję utworzenia hybrydowych ogniw litowo-jonowo-metalicznych przedstawionych na Rys. 11.10.



Rys. 11.10. Koncepcja rozwoju akumulatorów hybrydowych litowo-jonowo-metalicznych.

Źródło: <https://electrek.co/2020/05/04/tesla-hybrid-battery-electric-car-range-extender/> [październik 2020]

Zwiększenie gęstości energii akumulatorów obniży koszt produkcji pojazdów elektrycznych i umożliwi osiąganie większego zasięgu jazdy. Zastąpienie anody grafitowej w konwencjonalnych ogniwach litowo-jonowych litem metalicznym znacznie zwiększa gęstość energii osiągając poziom 1,230 kWh/dm<sup>3</sup>, co oznaczono jako AF na Rys. 11.10. Jednak zastosowanie w ogniwie anody litowo-metalicznej powoduje szybką utratę i krótki czas eksploatacji wynikający z małej możliwej liczby cykli ładowania takiego ogniwa. W celu opracowania ogniwa hybrydowego połączono technologię ogniwa litowo-jonowego z technologią ogniwa litowo-metalicznego tworząc hybrydowe ogniwo litowo-jonowo-metaliczne. Uzyskano to poprzez nałożenie warstwy metalicznego litu na anodę grafitową tak jak pokazano na Rys. 11.10. Ponieważ akumulatory w pojazdach elektrycznych przez większość czasu ich eksploatacji, nie są poddawane cyklowi pełnego rozładowania ogniwa hybrydowe działają w trybie litowo-jonowym z niewielką degradacją przez większość ich żywotności, z okresowymi cyklami pełnego naładowania dla zwiększenia pojemności.

Takie rozwiązanie daje wymierne korzyści, pojazd elektryczny z konwencjonalnym akumulatorem litowo-jonowym może osiągnąć zasięg 400 km, wówczas ogniwa hybrydowe mogłyby zapewnić zasięg 480 km. Na podstawie badań dystansu pokonywanego elektrycznymi pojazdami wykazano, że tylko 1% codziennych podróży przekracza średnio dystans 325 km. Z tego względu ogniwa hybrydowe pracowałyby przez większość czasu eksploatacji w trybie

<sup>53</sup> <https://electrek.co/2020/05/04/tesla-hybrid-battery-electric-car-range-extender/> [październik 2020]

litowo-jonowym umożliwiającym zasięg do 300 km. Tylko na sporadycznie występujących trasach o długości powyżej 400 km używana byłaby część litowo-metaliczna akumulatora.

#### **11.4. Stosowane źródła energii i główne odbiorniki w autobusach elektrycznych**

Analizując produkcję autobusów elektrycznych na przykładzie znanych producentów zaprezentowano stosowane w nich najczęściej komponenty. W przypadku autobusów elektrycznych jednobryłowych (nie przegubowych) klasy I (autobusów miejskich) dla autobusów o długości 12 – 15 m stosuje się akumulatory o pojemności energii od 252 kWh do 330 kWh, a nawet w przypadku niektórych producentów do 480 kWh<sup>54</sup>. Do napędu takich autobusów stosowane są silniki asynchroniczne o mocy chwilowej do 300 kW a mocy ciągłej określanej z godnie z Regulaminem ONZ nr 85 ok. 250 kW<sup>55,56</sup>. Stosowane są też rozwiązania z silnikami asynchronicznymi w piastach kół o łącznej mocy analogicznie jak w przypadku rozwiązań z silnikiem centralnym. Rozwiązanie z silnikami w piastach kół jest dość powszechnie stosowane przez firmę Mercedes – Benz. W przeciwieństwie do silnika spalinowego istnieje dość duża dowolność w kwestii umiejscowienia silnika elektrycznego w pojeździe. Mercedes-Benz zdecydował się na kompaktową konstrukcję - sprawdzoną oś napędzaną ZF AVE 130 z silnikami przy piastach kół. Na każdym kole tej elektrycznej osi portalowej zamontowany jest silnik chłodzony cieczą. Każdy z silników ma moc 125 kW, i dysponuje momentem obrotowym podczas ruszania ze stanu całkowitego zatrzymania wynoszącym 485 Nm. Zastosowana w piastach przekładnia umożliwia osiągnięcie momentu obrotowego wynoszącego 11 000 Nm na każdym kole. Przestrzeń zwolniona przez silnik spalinowy i skrzynię biegów jest wykorzystywana zamontowania akumulatora.

W celu oszczędności energii autobusy często wyposażane są w system kontroli przyspieszenia, który umożliwia ruszenie pojazdu zawsze z jednakową dynamiką, niezależnie od stanu obciążenia pojazdu. Dzięki modułowej technologii wykonania autobusu możliwa jest łatwa wymiana akumulatora oraz zmiana ich na akumulator nowego typu. Firma Mercedes planuje w niedługim czasie wprowadzenie drugiej generacji akumulatorów litowo-manganowo-kobaltowych (NMC). Kompaktowy pakiet akumulatorów stosowany w autobusach firmy MAN, podobny konstrukcyjnie do pakietu stosowanego w autobusach marki Mercedes-Benz pojazdach przedstawiono na Rys. 11.11. Moduł akumulatora składa się z połączonych ze sobą pakietów ogniw oraz urządzenia do zarządzania akumulatorem (BMS), oraz układu chłodzenia i ogrzewania ogniw.

---

<sup>54</sup> Dane na podstawie folderów informacyjnych producentów autobusów.

<sup>55</sup> [https://www.bus.man.eu/man/media/en/content\\_medien/doc/business\\_website\\_bus\\_master\\_1/emobility\\_1/br MAN eMobility 2020 de screen.pdf](https://www.bus.man.eu/man/media/en/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/emobility_1/br_MAN_eMobility_2020_de_screen.pdf) [luty 2021]

<sup>56</sup> <https://www.scania.com/content/dam/scaniaoe/market/master/products-and-services/buses-and-Coaches/novali/brochures/technical-specification-scania-citywide-bev.pdf> [luty 2021]



Rys. 11.11. Modułowy akumulator stosowany w autobusach

Źródło: [https://www.bus.man.eu/man/media/en/content\\_medien/doc/business\\_website\\_bus\\_master\\_1/emobility\\_1/br\\_MAN\\_eMobility\\_2020\\_de\\_screen.pdf](https://www.bus.man.eu/man/media/en/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/emobility_1/br_MAN_eMobility_2020_de_screen.pdf) [luty 2021]

Typowe rozmieszczenie akumulatorów i komponentów elektrycznych w autobusie elektrycznym przedstawiono na Rys. 11.12.

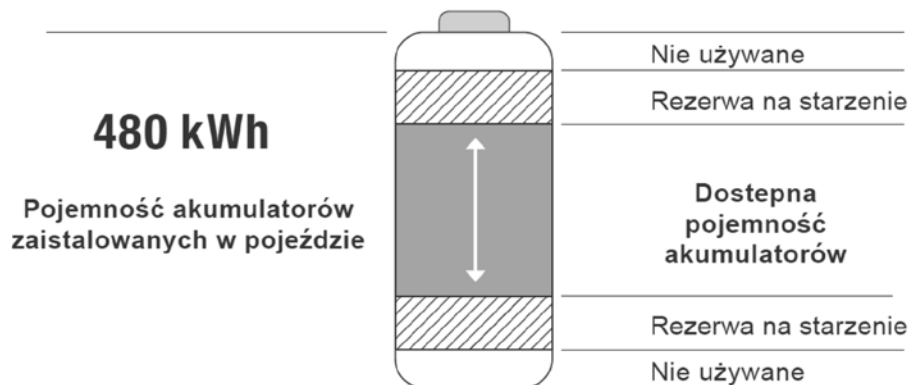


Rys. 11.12. Rozmieszczenie komponentów w autobusie elektrycznym

Źródło: [https://www.bus.man.eu/man/media/en/content\\_medien/doc/business\\_website\\_bus\\_master\\_1/emobility\\_1/br\\_MAN\\_eMobility\\_2020\\_de\\_screen.pdf](https://www.bus.man.eu/man/media/en/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/emobility_1/br_MAN_eMobility_2020_de_screen.pdf) [luty 2021]

Akumulatory stosowane w autobusach elektrycznych i samochodach ciężarowych nie są wykorzystywane w pełnej pojemności. Wynika to z faktu, że ogniwa nie wykorzystywane w 100% swojej pojemności mają dłuższy czas eksploatacji. Jest to często stosowany zabieg przez producentów w celu wydłużenia czasu eksploatacji akumulatorów w pojazdach elektrycznych i hybrydowych. Ponadto, w akumulatorach producenci często pozostawiają tzw. rezerwową pojemność energii, która jest wykorzystywana w celu zrekompensowania utraty pojemności na skutek eksploatacji. Oczywistym jest fakt, że w miarę upływu czasu akumulatory tracą pojemność. W celu zapewnienia przez okres umowy (ustalany najczęściej z odbiorcą pojazdu lub na podstawie gwarancji) odpowiedniego zasięgu pojazdu i pojemności

akumulatorów producenci pojazdów często stosują tzw. rezerwową pojemność energii, która jest stopniowo wykorzystywana poprzez system zarządzania akumulatorami. Stopniowo ogniwa, które są wyeksploatowane są wyłączane z użytkowania i zastępowane przez ogniwa z rezerwy. Takie zarządzanie umożliwia zapewnienie odpowiedniej pojemności energetycznej akumulatora przez określony czas eksploatacji. Takie rozwiązania są powszechnie stosowane w zarządzaniu miejscem w klasycznych dyskach komputerowych lub SSD. Wykorzystanie pojemności typowego akumulatora w pojazdach elektrycznych przedstawia Rys. 11.13.



Rys. 11.13. Wykorzystanie pojemności akumulatora w pojazdach elektrycznych

Źródło: [https://www.bus.man.eu/man/media/en/content\\_medien/doc/business\\_website\\_bus\\_master\\_1/emobility\\_1/br\\_MAN\\_eMobility\\_2020\\_de\\_screen.pdf](https://www.bus.man.eu/man/media/en/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/emobility_1/br_MAN_eMobility_2020_de_screen.pdf) [luty 2021]

Zarządzanie pojemnością akumulatora przedstawione jest na Rys. 11.14. W miarę postępu „starzenia” się akumulatora, pojemność rezerwowa jest wykorzystywana a zarządzanie procesem jest sterowane i kontrolowane poprzez układ zarządzania akumulatorem. Zasadę wykorzystania pojemności rezerwowej przedstawiono na Rys. 11.14.

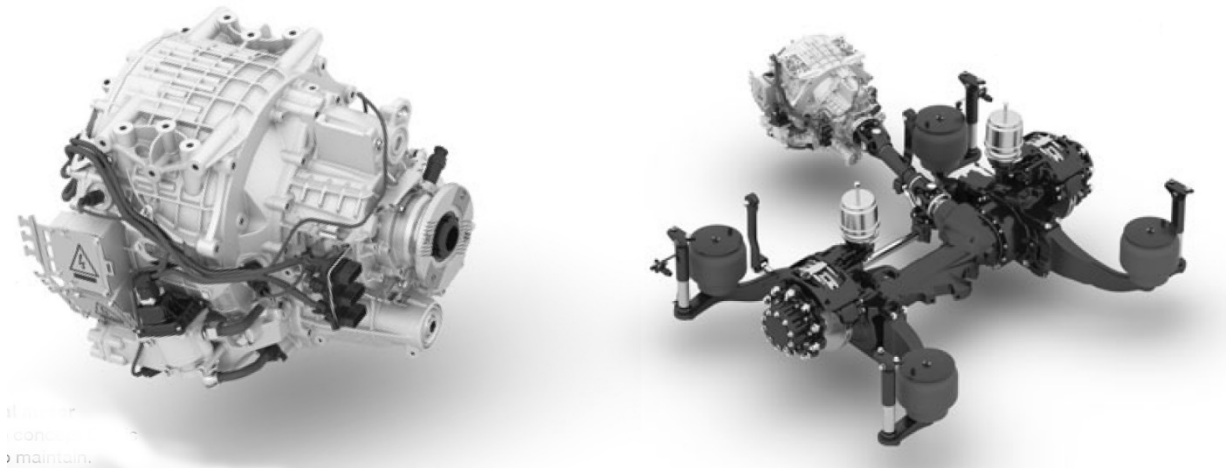


Rys. 11.14. Wykorzystanie pojemności rezerwowej akumulatora w celu zapewnienia zakładanej pojemności podczas cyklu życia akumulatora.

Źródło: [https://www.bus.man.eu/man/media/en/content\\_medien/doc/business\\_website\\_bus\\_master\\_1/emobility\\_1/br\\_MAN\\_eMobility\\_2020\\_de\\_screen.pdf](https://www.bus.man.eu/man/media/en/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/emobility_1/br_MAN_eMobility_2020_de_screen.pdf) [luty 2021]

Głównymi odbiornikami energii elektrycznej w autobusach elektrycznych są silnik trakcyjny, systemy ogrzewania, klimatyzacji i przewietrzania przestrzeni pasażerskiej, układ chłodzenia silnika trakcyjnego oraz akumulatorów, elektryczny układ wspomagania układu kierowniczego, sprężarka powietrza.

W układach napędowych elektrycznych autobusów marki MAN stosuje się rozwiązania z jednym lub dwoma silnikami centralnymi. W przypadku autobusu jednobryłowego stosuje się napęd tylnej osi pojazdu lub w przypadku pojazdów przegubowych napęd poprzez dwa silniki centralne osi drugiej i trzeciej. Silnik oraz oś napędową połączoną z silnikiem centralnym przedstawiono na Rys. 11.15.



Rys. 11.15. Układ napędowy stosowany w autobusie MAN Lion`s City 12E.

Źródło:[https://www.bus.man.eu/man/media/en/content\\_medien/doc/business\\_website\\_bus\\_master\\_1/emobility\\_1/br\\_MAN\\_eMobility\\_2020\\_de\\_screen.pdf](https://www.bus.man.eu/man/media/en/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/emobility_1/br_MAN_eMobility_2020_de_screen.pdf) [luty 2021]

Takie rozwiązanie umożliwia łatwiejszy dostęp do silnika trakcyjnego niż w przypadku rozwiązania z silnikami w piastach kół. To jest korzystne pod względem konserwacji i kosztów eksploatacji i obsługi tzw. koszty cyklu życia pojazdu (LCC). Zastosowanie 2 osi napędzanych zamiast jednej istotnie zwiększa możliwości hamowania pojazdu poprzez hamowanie z odzyskiwaniem energii oraz zwiększa możliwości odzyskiwania energii z hamowania.

W przypadku autobusów miejskich, które poruszają się z niewielką prędkością z częstym zatrzymywaniem się, to hamowanie bez użycia hamulców ciernych jest korzystne z uwagi na ograniczenie zużycia elementów ciernych hamulców i jednocześnie zmniejszenia kosztów eksploatacji.

## 12. Problemy homologacyjne akumulatorowych pojazdów elektrycznych w zakresie hamowania długotrwałego

Pojazdy dopuszczane do ruchu muszą spełniać szereg wymagań homologacyjnych w tym przepisy związane z hamowaniem pojazdu. Wymagania w tym zakresie są ujęte w Regulaminie ONZ nr 13. Dla pojazdów kategorii M<sub>1</sub> (samochody osobowe) stosuje się Regulamin ONZ nr 13H, który zawiera wyższe wymagania niż dla pojazdów pozostałych kategorii, jednak w drodze wyjątku Regulamin ONZ nr 13H może być stosowany do pojazdów kategorii N<sub>1</sub>.

Zgodnie z wymaganiami prawnymi homologacji, czy innej formy dopuszczenia pojazdów samochodowych i ich przyczep do ruchu, pojazdy ciężarowe i autobusy muszą spełniać wymagania Regulaminu ONZ nr 13. W zakresie hamowania długotrwałego obecne przepisy zawierają nierealne dla pojazdów o napędzie elektrycznym wymagania odnośnie hamowania długotrwałego. Wymagają one zastosowania w pojazdach innych urządzeń, tj. retarderów lub rezystorów rozpraszających energię potencjalną i kinetyczną pojazdu. Na skutek zawartych w tym Regulaminie wymagań energia w czasie długotrwałego zjazdu, która mogłaby zostać odzyskana i zmagazynowana w akumulatorach, musi być bezpowrotnie utracona albo wykorzystana w innym celu niż do zasilania silnika trakcyjnego. Zgodnie z opisanymi wymaganiami pojazdy kategorii M<sub>3</sub> i N<sub>3</sub> muszą spełnić wymagania badania typu II lub IIA, jednocześnie spełniając warunek badań pojazdu pod warunkiem tzw. „najgorszego przypadku”. W przypadku pojazdów elektrycznych wyposażonym w układ odzyskiwania energii najgorszy przypadek podczas testów hamowania długotrwałego wymaga w pełni naładowanego akumulatora trakcyjnego. W przypadku testów typu IIA nie dozwolone jest wspomaganie hamulcami roboczymi. Definicja stanu naładowania akumulatora znajduje się w Regulaminie ONZ nr 13:

2.21.4. *„Stan naładowania elektrycznego” oznacza chwilowy stosunek ilości energii elektrycznej zmagazynowanej w akumulatorze trakcyjnym do maksymalnej ilości energii elektrycznej, która może być w nim zmagazynowana.*

2.21.5. *„Akumulator trakcyjny” oznacza zespół akumulatorów stanowiący urządzenie do przechowywania energii używanej do napędzania silnika(-ów) trakcyjnego(-ych) pojazdu.*

*W załączniku 4 do Regulaminu nr 13 ONZ jest w punkcie 1.4.1.2.2. doprecyzowanie odnośnie stanu w pełni naładowanego akumulatora.*

1.4.1.2.2. *W przypadku pojazdu wyposażonego w układ hamulcowy z odzyskiem energii wymagania zależą od kategorii tego układu:*

*Kategoria A: Jeżeli elektryczny układ hamulcowy z odzyskiem energii jest wyposażony w oddzielny zespół sterujący, to zespołu tego nie można używać podczas badań typu 0.*

*Kategoria B: Wkład elektrycznego układu hamulcowego z odzyskiem energii w wytworzoną siłę hamowania nie może przekroczyć minimalnego poziomu gwarantowanego przez konstrukcję układu.*

*Wymaganie to uznaje się za spełnione, jeśli akumulatory są w jednym z następujących poziomów stanu naładowania, gdzie stan naładowania jest określony metodą przedstawioną w dodatku do niniejszego załącznika:*

- a) maksymalny stan naładowania, który jest zalecany przez producenta w dokumentacji pojazdu; lub*
- b) poziom nie niższy niż 95% pełnego poziomu naładowania, gdy producent nie podaje żadnych szczególnych zaleceń; lub*

- c) poziom maksymalny, który wynika z samoczynnego sterowania ładowaniem w pojeździe;  
lub d) jeżeli badania są prowadzone bez udziału hamowania z odzyskiem energii niezależnie od stanu naładowania akumulatorów.*

Biorąc pod uwagę powyższe zapisy oraz fakt, że badania pojazdu na zgodność z Regulaminem ONZ nr 13 muszą być prowadzone w najgorszym przypadku, co jest realizowane dla pojazdów elektrycznych wyposażonych w układy odzyskiwania energii podczas hamowania, poprzez stan w pełni naładowanego akumulatora trakcyjnego. Pojazd może wykorzystać w czasie testów hamowania długotrwałego układ odzyskiwania energii podczas hamowania, jednak na skutek zapisów wymagających stanu naładowania akumulatora, nie może spełnić wymagań badań typu II i IIA bez dodatkowych urządzeń. Energia, która została odzyskana podczas hamowania długotrwałego nie może zostać zmagazynowana w akumulatorach trakcyjnych tylko musi zostać rozproszona w urządzeniach, które mają wpływ na masę pojazdu oraz jego koszt lub zmagazynowana w akumulatorach zasilających inne urządzenia (akumulatorach pomocniczych). Do hamowania długotrwałego pojazdu może być zastosowany mechaniczny retarder lub w przypadku używania hamowania z odzyskiem energii rezystory, jeżeli pojazd posiada układ odzyskiwania energii hamowania w postaci energii elektrycznej. Odzyskana podczas hamowania energia elektryczna może zostać rozproszona w postaci ciepła w oporniku, który często posiada też własny układ chłodzenia. Możliwe jest też zastosowanie dodatkowych akumulatorów, których zgromadzona energia nie jest używana do napędu silnika trakcyjnego pojazdu. Zastosowanie każdego z tych rozwiązań powoduje znaczne zwiększenie masy pojazdu, co powoduje ograniczenie ładowności pojazdu lub w przypadku autobusów zmniejszenie liczby przewożonych pasażerów. To w konsekwencji powoduje zmniejszenie opłacalności użytkowania takich elektrycznych pojazdów. Biorąc pod uwagę ryzyko zagrożenia opłacalności eksploatacji tych bezemisyjnych pojazdów, przemysł proponuje alternatywę dla badania typu IIA, tworząc nowe wymagania specjalnie dla pojazdów elektrycznych.



## 13. Kalkulacja energii pojazdu na podstawie testów typu II i IIA

### 13.1. Kalkulacja mocy wynikającej z energii potencjalnej ciężkości

W celu określenia ilości energii która musi zostać rozproszona w trakcie testu hamowania długotrwałego wykonano obliczenia w oparciu o normę ISO 12161:2006 na podstawie której wprowadzono wymagania testu typu II i IIA do Regulaminu ONZ nr 13. Do obliczeń przyjęto pojazdy kategorii M<sub>3</sub> o technicznie dopuszczalnej masie całkowitej od 5 000 kg do 19 000 kg. Na podstawie zawartych w normie ISO wzorów do obliczeń energii i mocy oraz z uwzględnieniem oporów ruchu pojazdu wyliczono energie i moc pojazdu generowaną podczas testu przeprowadzonego na torze o odpowiednim nachyleniu przy zachowaniu zakładanej prędkości pojazdu. Do obliczeń przyjęto parametry badań wynikające z zapisów Regulaminu ONZ nr 13 tj. prędkość, dystans i nachylenie toru. Zgodnie z wymaganiami przyjęto: prędkość pojazdu podczas testu  $V = 30 \text{ km/h}$  ( $8,33 \text{ m/s}$ ), dystans 6000 m, nachylenie toru 6% lub 7% ( $\text{tg } \alpha = 0,06 \text{ lub } 0,07$ ) w zależności od rodzaju testu.

Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 13.1 i

Tabela 13.2.

Tabela 13.1. Moc generowane przez pojazd w wyniku testu typu II wynikająca z energii potencjalnej ciężkości (masy)

Technicznie dopuszczalna masa pojazdu [kg]	Moc całkowita test typu II [kW]	Moc tracona test typu II [kW]	Moc do rozproszenia - badanie typu II [kW]
5200	25,5	3,6	21,9
7000	34,3	4,9	29,4
10000	49,1	7,0	42,1
12000	58,9	8,4	50,5
15000	73,6	10,5	63,1
18000	88,3	12,6	75,7
19000	93,2	13,3	79,9

Tabela 13.2. Moc generowane generowana przez pojazd w wyniku testu typu IIA wynikająca z energii potencjalnej ciężkości (masy)

Technicznie dopuszczalna masa pojazdu [kg]	Moc całkowita test typu IIA [kW]	Moc tracona test typu IIA [kW]	Moc do rozproszenia - badanie typu IIA [kW]
5200	28,6	4,1	24,5
7000	40,1	5,7	34,4
10000	57,2	8,2	49,0
12000	68,7	9,8	58,9
15000	85,8	12,3	73,5
18000	103,0	14,7	88,3
19000	108,7	15,5	93,2

Energię rozpraszaną  $W_{diss}$  obliczono na podstawie różnicy energii pojazdu wynikającej z energii potencjalnej ciężkości  $W_{pot}$  i energii przyjętych oporów ruchu pojazdu  $W_{rr}$ .

$$W_{diss} = W_{pot} - W_{rr}$$

Do obliczeń przyjęto energię wynikającą z energii potencjalnej ciężkości i energii oporów ruchu pojazdu wyliczonej zgodnie ze poniższymi wzorami:

$$W_{pot} = m \cdot g \cdot \Delta H$$

$$W_{rr} = m \cdot g \cdot \left( \frac{\Delta H}{tg \alpha} \cdot 0.01 \right)$$

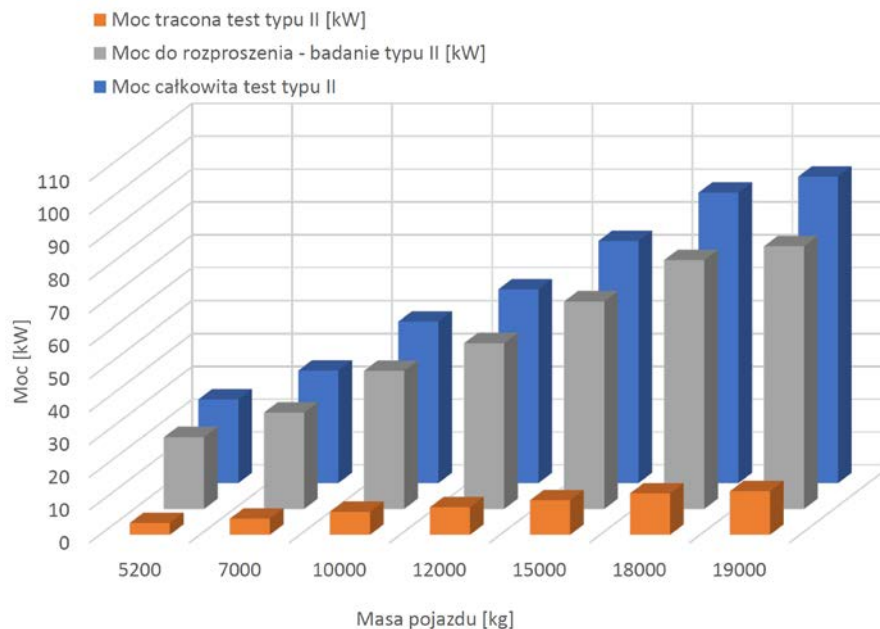
Czas testu  $T$  obliczono na podstawie wyniku z długości toru 6000 m i średniej prędkości pojazdu wynoszącej 30 km/h (8,33 m/s):

$$T = \frac{L}{V_{sr}} = \frac{6000 \text{ m}}{30 \frac{\text{km}}{\text{h}}} = \frac{6000 \text{ m}}{8,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 720 \text{ s}$$

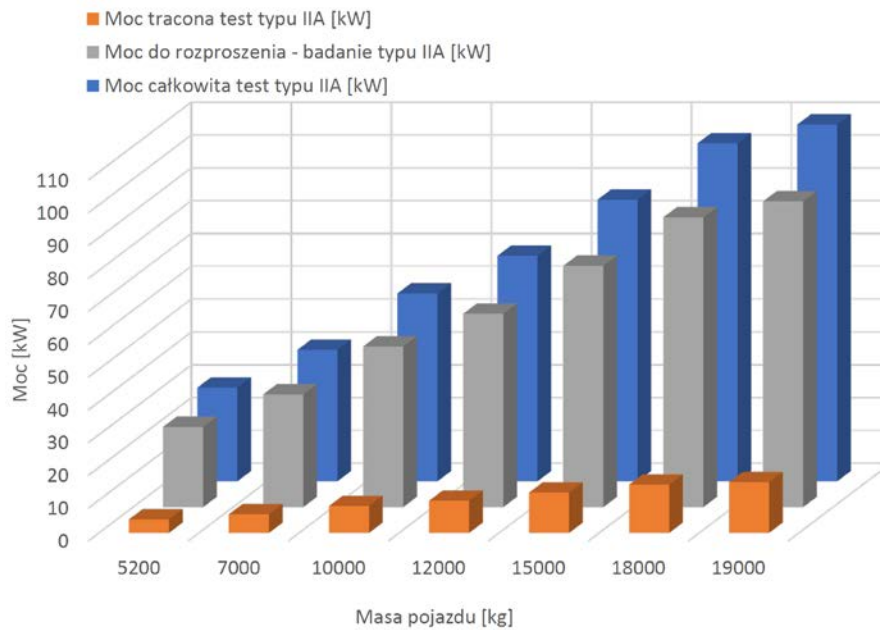
Moc obliczono zgodnie z poniższym wzorem:

$$P_{diss} = \frac{W_{diss}}{T}$$

Wyniki obliczeń mocy przedstawiono na rys. 13.1 i rys. 13.2.



Rys. 13.1. Kalkulacja mocy podczas testu II wymagającej rozproszenia poprzez hamulec długotrwałego hamowania w zależności od technicznie dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu



Rys. 13.2. Kalkulacja mocy podczas testu IIA wymagającej rozproszenia poprzez hamulec długotrwałego hamowania w zależności od technicznie dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu

W celu weryfikacji przeprowadzono wspólnie z producentem autobusów analizę oporów ruchu pojazdu uwzględniającą opory toczenia i opory powietrza. Przyjęto rzeczywiste wartości dla pojazdu o masie 18 000 kg i typowej budowie autobusu klasy II kategorii M<sub>3</sub>. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 13.3 oraz Tabela 13.4.

Całkowite opory ruchu przedstawiono w tabeli 13.5. Dane oporu toczenia przyjęto na podstawie danych literaturowych, a dane dotyczące oporu powietrza na podstawie danych literaturowych i danych producenta pojazdu<sup>57</sup>. Opory ruchu obliczono dla pojazdu poruszającego się po nawierzchni asfaltowej / betonowej. W obliczeniach pominięto zmiany wilgotności, i temperatury powietrza w funkcji zmiany wysokości. Przyjęto typowe warunki atmosferyczne.

Tabela 13.3. Dane wejściowe do obliczeń oporu toczenia

Opór toczenia	Dane:	
Stały współczynnik oporów toczenia opon - asfalt	$f_{to}$	0,01
Prędkość [km/h]	V	30
masa pojazdu [kg]	m	18000
Ciężar pojazdu [N] $G = M \cdot g$	G	176580
Opór toczenia $F_t = f_{to} \cdot G$ [N]		
	V [km/h]	$F_t$ [N]
	30	1766

<sup>57</sup> Leon Prochowski, *Mechanika ruchu*, WKŁ Warszawa 2005, s. 59

Tabela 13.4. Dane wejściowe do obliczeń oporu powietrza.

Opór powietrza	Dane:		
Gęstość powietrza [kg/m <sup>3</sup> ]	q	1,226	
Współczynnik oporów powietrza	C <sub>x</sub>	0,7	
Powierzchnia czołowa [m <sup>2</sup> ]	A	7,75	
Siła oporu powietrza $F_p = C_x \cdot A \cdot q \cdot \frac{v^2}{2}$	F <sub>p</sub>		
	V [m/s]	F <sub>p</sub> [N]	V [km/h]
	8,33	231	30

Tabela 13.5. Dane wejściowe do obliczeń całkowitych oporów ruchu.

	V [km/h]	F <sub>t</sub> [N]	F <sub>p</sub> [N]
Całkowity opór na płaskiej drodze	30	1766	231
<b>SUMA</b>		1997 N	

Moc tracona wynikająca z oporów toczenia.

$$P_t = \frac{F_t \cdot V}{1000} = \frac{1766 \cdot 8,33}{1000} = 14,71 \text{ kW}$$

Moc tracona wynikająca z oporów powietrza:

$$P_p = \frac{F_p \cdot V}{1000} = \frac{231 \cdot 8,33}{1000} = 1,92 \text{ kW}$$

Całkowita moc tracona:

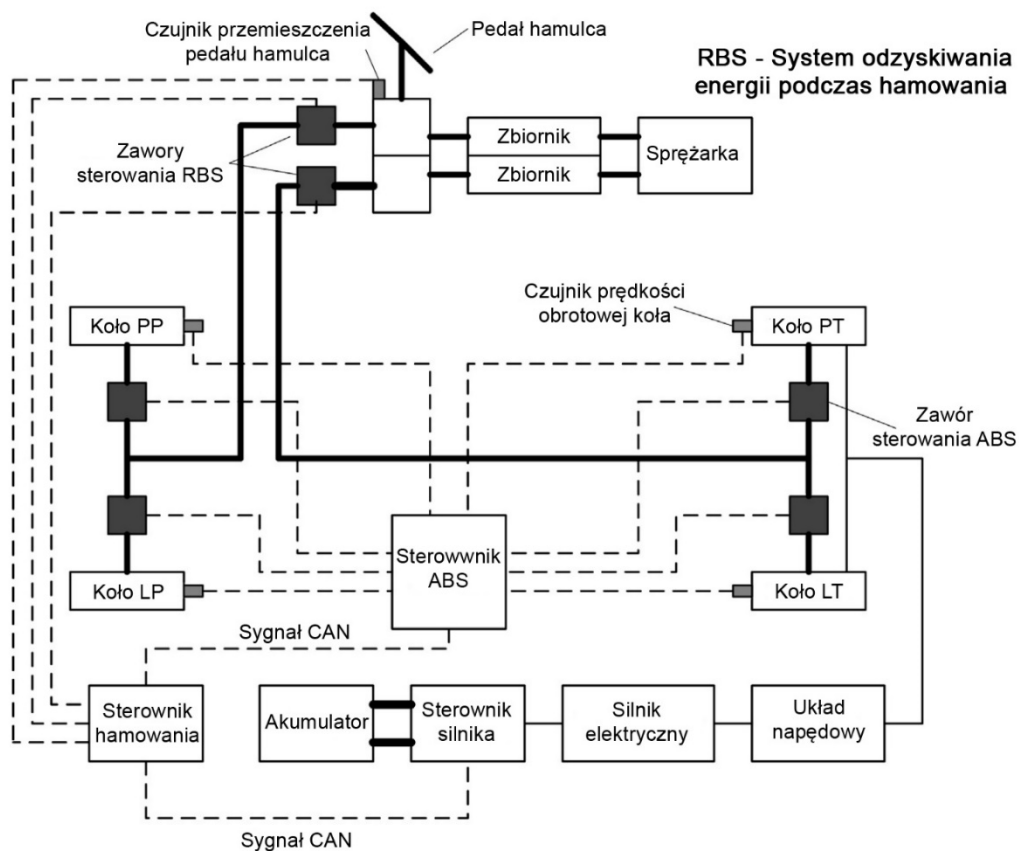
$$P_c = P_t + P_p = 16,63 \text{ kW}$$

Regulamin ONZ nr 13 uwzględnia jedynie opory toczenia a nie uwzględnia oporów pojazdu wynikających z oporów powietrza. Zatem metoda obliczania mocy do rozproszenia zgodnie z Regulaminem ONZ nr 13 jest zawyżona w stosunku do rzeczywistej o wartość oporów powietrza pojazdu.

## 13.2. Możliwości i stosowane strategie systemów odzyskiwania energii w pojazdach elektrycznych

Odzyskiwanie energii w autobusach i samochodach ciężarowych opierają się na współdziałaniu układu napędowego pracującego w trybie odzyskiwania energii i pneumatycznego układu hamulcowego. Na przykładzie układu hamulcowego elektrycznego autobusu miejskiego przedstawiono główne składowe współdziałających układów napędowego i hamulcowego. Schemat takiego systemu przedstawiono na Rys. 13.3. Kontrola nad rozdziałem siły hamowania tylnej osi pojazdu uzyskanej poprzez hamowanie z odzyskiwaniem

energii (regeneracja), a realizowane poprzez hamulce cierne jest realizowana przez sterownik hamowania. Na podstawie czujnika przemieszczenia pedału hamulca znajdującego się w głównym zaworze hamowania, określa wartość oczekiwaną opóźnienia pojazdu. Na tej podstawie w zależności od strategii odzyskiwania energii steruje ciśnieniem w układzie pneumatycznym poprzez sterowanie zaworami RBS. Sterownik ABS analizuje prędkości obrotowe kół i w razie potrzeby interwencji steruje zaworami ABS znajdującymi się bezpośrednio przy kołach pojazdu, analogicznie jak w przypadku konwencjonalnych pneumatycznych układów hamulcowych. Zawory RBS modulujące umożliwiają rozdzielanie zapotrzebowania na hamowanie kół pomiędzy osie pojazdu. W przypadku osi napędowej dodatkowo zawory RBS regulują udział siły hamowania uzyskiwanej przez hamulce cierne w ogólnej sile hamowania osi napędowej.



Rys. 13.3. Schemat układu hamulcowego elektrycznego autobusu z odzyskiwaniem energii.

Źródło: Junzhi Zhang, Chen Lv, Mingzhe Qiu, Yutong Li, Dongsheng Sun, *Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus*, Energy Conversion and Management 76 (2013) s.1117–1124.

Na powyższym schemacie oczekiwane przez kierowcę opóźnienie jest mierzone poprzez skok pedału hamulca. W hamulcach pneumatycznych skok pedału hamulca jest proporcjonalny do ciśnienia powietrza w elementach wykonawczych układu hamulcowego. Charakterystyka układu hamulcowego pojazdu zawiera korelacje pomiędzy ciśnieniem w elementach wykonawczych układu hamulcowego i generowaną przez układ hamulcowy siłą hamowania. Nowoczesne sterowniki układów hamulcowych pojazdów ciężarowych i analizują ciśnienie w układzie zawieszenia poszczególnych osi (w przypadku pojazdów wyposażonych w pneumatyczny układ zawieszenia) oraz ugięcia zawieszenia (w przypadku pojazdów wyposażonych w mechaniczny układ zawieszenia) i na tej podstawie określają masę

przypadającą na każdą oś pojazdu. Na podstawie tych wartości możliwe jest na podstawie drugiej zasady dynamiki Newtona określenie oczekiwanej wartości opóźnienia.

Taka informacja jest przekazywana poprzez CAN do kontrolera hamowania który przesyła sygnały sterujące do kontrolera ABS oraz kontrolera elektrycznego silnika trakcyjnego.

W strategiach odzyskiwania energii podczas hamowania kluczowym jest sterowanie pomiędzy rozdziałem siły hamowania na siłę hamowania uzyskaną poprzez układ odzyskiwania energii (RBF), uzyskiwaną poprzez hamowanie silnikiem działającym w trybie generatora, i siłę hamowania uzyskaną przez hamulce cierne (FBF).

Wyróżnia się dwa rodzaje stosowanej strategii rozdziału siły hamowania pomiędzy RBF a FBF: równoległa i skoordynowana.

Strategia równoległa jest strategią prostą i łatwą do sterowania, polega na jednoczesnym wykorzystywaniu w stałej proporcji hamowania z odzyskiem energii i hamulców ciernych obu osi. W przypadku strategii skoordynowanej siła hamowania pojazdu najpierw realizowana jest tylko poprzez układ odzyskiwania energii a po osiągnięciu przez niego maksymalnych możliwości, rozpoczyna się dodatkowo hamowanie pojazdu za pomocą hamulców ciernych osi przedniej. Dalszy wzrost zapotrzebowania na opóźnienie pojazdu powoduje wzrost ciśnienia w elementach wykonawczych osi przedniej pneumatycznego układu hamulcowego, a następnie realizowane jest też hamowanie za pomocą tylnej osi. Siła hamowania uzyskana za pomocą hamulców osi tylnej pojazdu sumuje się z siłą hamowania wytwarzaną przez układ odzyskiwania energii podczas hamowania. Dane literaturowe wskazują, że w przypadku autobusów i samochodów ciężarowych strategia skoordynowana pozwala na odzyskanie większej ilości energii z hamowania przy zapewnieniu bezpieczeństwa hamowania. Oczekiwaną przez kierowcę siłą hamowania  $F_{tgt}$  można wyrazić wzorem:

$$F_{\mu f} + F_{\mu r} + F_{mot} = F_{tgt}$$

gdzie:

$F_{\mu f}$  – jest siłą wywieraną przez hamulce cierne na koła osi przedniej;

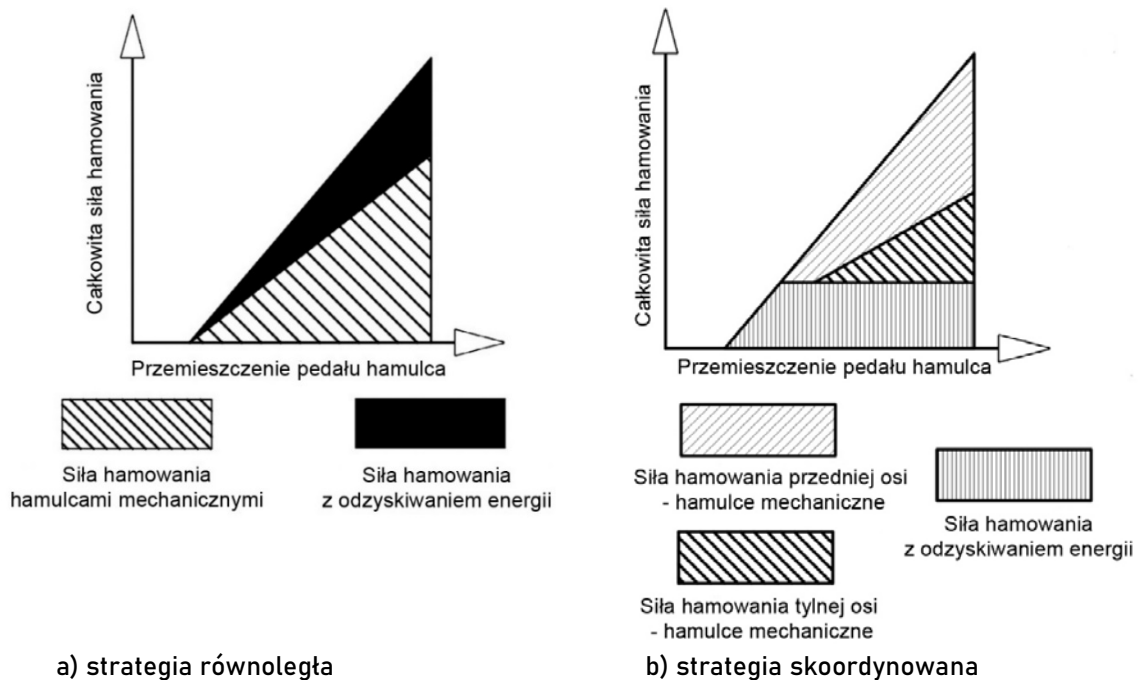
$F_{\mu r}$  – jest siłą wywieraną przez hamulce cierne na koła osi tylnej;

$F_{mot}$  – jest siłą wywieraną przez silnik/generator (siła hamowania regeneracyjnego) na koła tylne;

$F_{tgt}$  – jest oczekiwaną przez kierowcę siłą hamowania.

Na Rys. 13.4 przedstawiono rozdział siły hamowania w zależności strategii hamowania. Przedstawiono na tym rysunku zakresy pracy, w których realizowane są hamowania przez poszczególne rodzaje hamulców rozmieszczonych na osiach pojazdu. Rodzaj strategii przyjmuje się w zależności od przewidywanych warunków eksploatacji pojazdu i związanych z tym opóźnień hamowania. Strategia skoordynowana w autobusach miejskich umożliwia duże oszczędności okładzin ciernych, gdyż większość hamowań będzie wykonane przez układ hamowania z odzyskiem energii, co powoduje zmniejszenie zużycia elementów ciernych hamulców, a jednocześnie obniżenie kosztów eksploatacji. Różnice w strategiach odzyskiwania energii przedstawiono na Rys. 13.4. W strategii równoległej przedstawionej na Rys. 13.4 a) hamowanie od najniższych wartości opóźnienia hamowania pojazdu odbywa się z jednoczesnym wykorzystaniem hamulców ciernych pojazdu i hamowania z odzyskiwaniem energii. Strategia ta uniemożliwia efektywnego odzysku energii, co wynika z faktu, że zawsze część energii mechanicznej pojazdu jest rozpraszana poprzez hamulce cierne i bezpowrotnie

tracona. Z tego powodu taka strategia nie jest stosowana w ciężkich pojazdach jak autobusy czy samochody ciężarowe. Stosuje ją się przeważnie w lekkich samochodach elektrycznych i hybrydowych.



a) strategia równoległa  
 b) strategia skoordynowana  
 Rys. 13.4. Przedstawiający strategie rozdzielenia siły hamowania pomiędzy siłą hamowania z odzyskiem energii a siłą hamowania hamulców ciernych

Źródło: Junzhi Zhang, Chen Lv, Mingzhe Qiu, Yutong Li, Dongsheng Sun, *Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus*, Energy Conversion and Management 76 (2013) s.1117–1124.

W przypadku strategii skoordynowanej w zakresie hamowań z niewielkim opóźnieniem (do opóźnienia  $1 \text{ m/s}^2$ ) wykorzystuje się maksymalne możliwości hamowania z odzyskiem energii zgodnie z żądaniem kierowcy. Hamowanie odbywa się z maksymalnym wykorzystaniem hamowania regeneracyjnego jak pokazano na Rys. 13.4 b).

W przypadku tej strategii układ hamulcowy wyposażony w hamulce cierne jest aktywowany dopiero kiedy oczekiwana przez kierowcę siła hamowania przekroczy siłę hamowania uzyskiwaną przez hamowanie z odzyskiem energii.

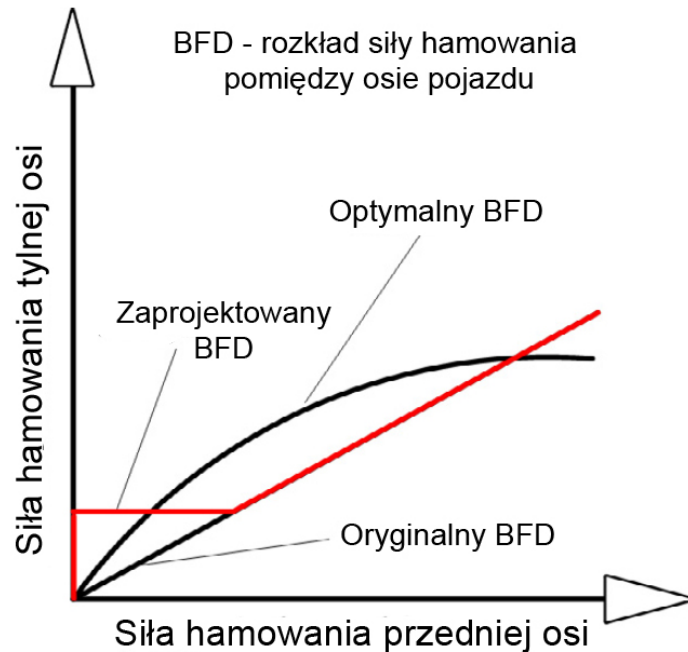
Na podstawie przeprowadzonych badań dla dwuosiowego autobusu miejskiego o długości 12 m i maksymalnej masie 18 000 kg wyposażonego w silnik elektryczny prądu przemiennego o mocy ciągłej 100 kW, a mocy chwilowej 180 kW i maksymalnym momencie obrotowym 1121 Nm w zależności od strategii odzyskiwania energii otrzymano wyniki przedstawione w **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..**

Tabela 13.6. Porównanie ilości odzyskanej energii w wyniku zastosowania w autobusie miejskim różnych strategii odzyskiwania energii

Strategia odzyskiwania energii podczas hamowania	Odzyskana energia (kJ)
Równoległa	2200
Skoordynowana	5100

Źródło: Junzhi Zhang, Chen Lv, Mingzhe Qiu, Yutong Li, Dongsheng Sun, *Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus*, Energy Conversion and Management 76 (2013) s.1117–1124.

Rys. 13.5 przedstawia rozkłady siły hamowania pomiędzy oś przednią i tylną pojazdu: optymalny, oryginalny oraz zaprojektowany (kolorem czerwonym) pozwalający na odzyskanie większej energii poprzez hamowanie z odzyskiem energii.



Rys. 13.5. Wykres przedstawiający rozkłady siły hamowania pomiędzy oś przednią a tylną.

Źródło: Junzhi Zhang, Chen Lv, Mingzhe Qiu, Yutong Li, Dongsheng Sun, *Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus*, Energy Conversion and Management 76 (2013) s.1117–1124.

Optymalny rozkład siły hamowania pomiędzy osie jest wyznaczany na podstawie dynamiki i parametrów geometrycznych pojazdu. Zwykle takie rozwiązania nie są realizowane poprzez układ hamulcowy autobusu (pojazdu). Układ hamulcowy zazwyczaj realizuje rozkład siły pomiędzy osie w stałej proporcji siłę pomiędzy osie pojazdu, a także hamowanie z odzyskiwaniem energii i hamowanie realizowane przez hamulce cierne pojazdu.

Zaprojektowany na potrzeby skoordynowanej strategii hamowania z odzyskiem energii rozkład siły hamowania pomiędzy osie pojazdu zaznaczony na Rys. 13.5 linią czerwoną wskazuje dla małych opóźnień hamowania realizację go tylko kołami tylnej osi. Gwarantuje utrzymanie stabilności ruchu podczas hamowania pojazdu.

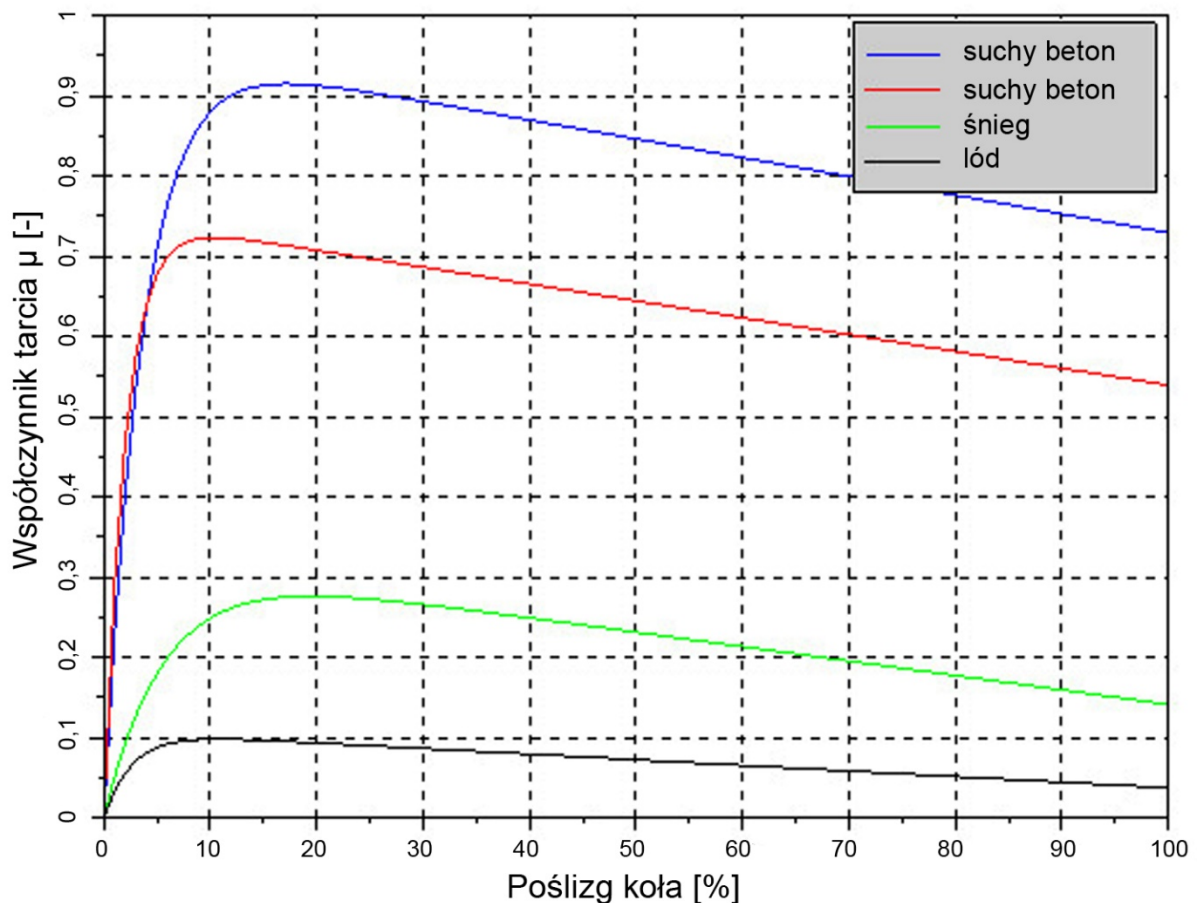
W strategii skoordynowanej w pierwszej kolejności jest wykorzystywana siła i możliwości hamowania poprzez układ odzysku energii osi tylnej. Pojazd hamuje jedynie kołami osi tylnej aż do granicy możliwości hamowania regeneracyjnego lub przyczepności kół w zależności, który stan wystąpi pierwszy. Sterownik ABS ma możliwość komunikacji ze sterownikiem silnika trakcyjnego pojazdu i w przypadku wykrycia poślizgu kół tylnych, zmiany siły hamowania z odzyskiem energii powodując zmniejszenie siły hamowania kół tylnych. Celem układu ABS jest utrzymywanie poślizgu kół na poziomie maksymalnej wartości współczynnika tarcia w zależności od poślizgu. Utrzymywanie takich parametrów powoduje uzyskanie maksymalnych sił wzdłużnych na styku koła z podłożem, nie zależnie od warunków drogowych.

Zależność wartości współczynnika tarcia a oponą w zależności od rodzaju nawierzchni przedstawiono na Rys. 13.6. Na podstawie tego rysunku można stwierdzić, że najwyższe siły hamowania są osiągnięte dla wartości poślizgu wzdłużnego opony o wartości od 10 do 20%.

Zazwyczaj j poślizg tylnych kół pojazdu podczas hamowania z odzyskiem energii przekraczają wartość 15 - 20% sterownik silnika elektrycznego zmniejsza moment hamujący



silnika jednocześnie ograniczając siłę hamowania z odzyskiem energii<sup>58</sup>, a w celu skutecznej kontroli poślizgu kół realizuje hamowanie za pomocą hamulców ciernych sterowanych za pomocą ABS.



Rys. 13.6. Zależność współczynnika tarcia pomiędzy oponą a nawierzchnią od poślizgu koła.

Źródło: <https://x-engineer.org/anti-lock-braking-system-abs-modeling-simulation-xcos/>

### 13.3. Bilans energetyczny głównych odbiorników prądu stosowanych w autobusach elektrycznych

Bilans energetyczny autobusu przeprowadzono przy współpracy z polskim producentem autobusów klasy I i II. Przeprowadzono analizę zapotrzebowania mocy głównych odbiorników mocy elektrycznej w autobusie kategorii M<sub>3</sub> klasy II, dwuosowym o maksymalnej masie 18 000 kg i długości 12 m. Głównymi odbiornikami prądu są układy klimatyzacji stosowane w pojazdach elektrycznych regulujące temperaturę wewnątrz przestrzeni pasażerskiej i kabinie kierowcy, sprężarka powietrza, dodatkowe urządzenia grzewcze przestrzeni pasażerskiej, urządzenia chłodzenia i podgrzewania akumulatorów.

Najważniejsze pod względem komfortu pasażerów są temperatura i wilgotność powietrza oraz zawartość CO<sub>2</sub> w kabinie pasażerskiej. Systemy klimatyzacji są już na standardowym wyposażeniu każdego nowego autobusu. Kabina kierowcy często wyposażona jest

<sup>58</sup> Zhang, Junzhi & Lu, Xin & Xue, Junliang & Li, Bos. (2008). *Regenerative Braking System for Series Hybrid Electric City Bus*, World Electric Vehicle Journal. 2, 2008.

w niezależny układ klimatyzacji, który zapewnia komfort pracy oraz bezpieczeństwo jazdy kierowcy. System klimatyzacji zapewnia chłodzenie, ogrzewanie i wentylację kabiny pasażerskiej i kierowcy w tym, w autobusach elektrycznych. Dodatkowy układ chłodzenia i ogrzewania akumulatorów pojazdów elektrycznych, jest niezbędny ze względu na możliwości pracy ogniw akumulatorów w określonym zakresie temperatur. Zarządzanie temperaturą ogniw jest konieczne, aby zapobiec przedwczesnemu starzeniu i utracie zdolności gromadzenia energii. Kontrola i regulacja temperatury ogniw i zdolność odprowadzania energii cieplej na zewnątrz są dużym wyzwaniem dla układów chłodzenia ogniw<sup>59</sup>.

Na podstawie danych producentów autobusów i danych katalogowych producentów urządzeń przygotowano zestawienie głównych odbiorników prądu stosowanych w autobusach elektrycznych. Wartości oszacowano dla autobusu o długości 12 m. Zestawienie wybranych urządzeń jako odbiorników energii występujących w autobusach elektrycznych przedstawiono w tabeli 13.7.

Tabela 13.7. Główne odbiorniki energii elektrycznej w autobusie

Urządzenie	Moc pobierana min - max
<b>Klimatyzacja przestrzeni pasażerskiej i kierowcy</b>	
- KingClima330E <sup>60</sup>	10 - 12kW
- CLING typ EZDS-06 <sup>61</sup>	11 – 12 kW
- klimatyzator przestrzeni kierowcy <sup>62</sup>	1,5 – 2 kW
<b>Sprężarka powietrza</b>	
- HYDROVANE 1822-414-10-001 (moc silnika 4 kW) (autobus wyposażony w zawieszenie pneumatyczne)*	5 - 10 kW
<b>Dodatkowe urządzenie grzewcze przestrzeni pasażerskiej</b>	
- SPHEROS AC200 (hybrydowe) <sup>63</sup>	9 kW
- THERMO AC/DC 200 (elektryczne) <sup>64</sup>	20 kW
<b>Układ chłodzenia i ogrzewania akumulatorów i silnika</b>	
Pompa układu chłodzenia silnika i akumulatorów EMP WP29 z kontrolerem*	0,5 – 0,7 kW
Wentylatory chłodzenia ok. 4 szt. wentylatory*	1,5 kW
<b>Oświetlenie LED*</b>	0,3 – 0,5 kW

<sup>59</sup> F. A. Wyczalek, *Heating and cooling battery electric vehicles-the final barrier*, in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 8, no. 11, 1993, s. 9-14, doi: 10.1109/62.242054

<sup>60</sup> <https://www.kingclima.com/products/bus-air-conditioner/all-electric-bus-air-conditioner/7.html#Technical> [styczeń 2021]

<sup>61</sup> <http://www.clingac.com/d/files/ezds-specificalton-2018.pdf> [styczeń 2021]

<sup>62</sup> <https://www.kingclima.com/products/bus-air-conditioner/all-electric-bus-air-conditioner/7.html#Technical> [styczeń 2021]

<sup>63</sup> [https://www.valeo-thermalbus.com/media/Document/3491/EBA\\_Thermo\\_H\\_DE\\_EN\\_2020\\_11\\_11123240D.pdf](https://www.valeo-thermalbus.com/media/Document/3491/EBA_Thermo_H_DE_EN_2020_11_11123240D.pdf) [styczeń 2021]

<sup>64</sup> [https://www.valeo-thermalbus.com/media/Document/3528/EBA\\_Thermo\\_DC\\_200\\_EN\\_2020\\_12\\_11118910E.pdf](https://www.valeo-thermalbus.com/media/Document/3528/EBA_Thermo_DC_200_EN_2020_12_11118910E.pdf) [styczeń 2021]

<b>Wspomaganie kierownicy*</b>	3,5 - 7 kW
<b>Podgrzewanie szyb*</b>	1,2 kW
<b>Centralne smarowanie *</b>	1 kW
<b>Sterowniki silnika i BMS*</b>	0,15 – 0,3 kW
POZOSTAŁE INNE (radio tachograf inne) *	2 kW
<b>SUMA (w zależności od wyposażenia)</b>	<b>45 – 55 kW</b>

\* dane uzyskane bezpośrednio od producenta bez wskazania typu urządzenia

Źródło: Materiały pozyskane od polskiego producenta autobusów elektrycznych oraz dane katalogowe dostawców i producentów komponentów do autobusów elektrycznych (wymienione powyżej).

Układy klimatyzacji stosowane w pojazdach elektrycznych różnią się od układów klimatyzacji stosowanych w pojazdach z silnikiem spalinowym. Główną różnicą jest sposób napędu kompresora klimatyzacji. W konwencjonalnym napędzie silnikiem spalinowym, kompresor napędzany jest od silnika spalinowego, w przypadku pojazdów elektrycznych napęd kompresora realizowany jest przez 3 fazowy silnik prądu przemiennego.

Drugim urządzeniem stosowanym w autobusach elektrycznych pod względem zapotrzebowania na energię elektryczną stanowi ogrzewanie. W przypadku takich urządzeń stosuje się dwa rodzaje systemów, tj. hybrydowe oraz elektryczne. W przypadku tego pierwszego ciepło otrzymywane jest ze spalania paliwa ciekłego oraz energii elektrycznej. W przypadku urządzeń elektrycznych całość generowanego ciepła jest z energii elektrycznej. Hybrydowe ogrzewanie jest oferowane jako opcjonalne w elektrycznych autobusach miejskich m.in. firmy Solaris i wielu innych. W elektrycznych autobusach żeby uzyskać brak emisji stosuje się tylko elektryczne układy ogrzewania zamiast hybrydowych. Wynika to też z uproszczenia konstrukcji np. brak konieczności zastosowania zbiornika paliwa i poprowadzenia przewodów paliwowych do grzejnika). Zastosowanie ogrzewacza tylko elektrycznego pozwala na uproszczenie konstrukcji poprzez zastosowanie tylko jednego źródła energii.

Kolejnym urządzeniem w autobusie elektrycznym o dużym zapotrzebowaniu na energię elektryczną jest sprężarka powietrza. Podobnie, jak w przypadku autobusów konwencjonalnych energia sprężonego powietrza jest stosowana do napędu wielu podzespołów w pojeździe. Energia ta jest wykorzystywana w siłownikach hamulcowych, w układach otwierania drzwi, układzie zawieszenia. W przypadku pojazdów z silnikiem spalinowym energia sprężonego powietrza wykorzystywana jest do wspomaganie zmiany przełożeń w skrzyni biegów, jeżeli pojazd wyposażony w ręczną skrzynię biegów, wspomaganie pracy sprzęgła. Sprężarki powietrza do autobusów elektrycznych są produkowane przez kilka firm a ich parametry są zbliżone do siebie. W pracy przedstawiono dane często stosowanej w autobusach elektrycznych sprężarki napędzanej 3 fazowym silnikiem prądu przemiennego 400VD/690 VY o mocy nawet do 5,5 kW<sup>65</sup>.

Wspomaganie układu kierowniczego obecnie jest hydrauliczne, realizowane jest przez pompę hydrauliczną, która pracuje w sposób ciągły, napędzana silnikiem elektrycznym.

Czołowe firmy produkujące komponenty do pojazdów elektrycznych w tym autobusów prowadzi badania nad konstrukcjami opartymi o wspomaganie elektryczne. Takie rozwiązania znane są z samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych. Opracowanie takich

<sup>65</sup> Dane katalogowe sprężarki Hydrovane model T310-0001.

rozwiązań ma na celu wdrożenie systemów ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems), które w przyszłości będą kontrolowały kąty skrętu kół podczas jazdy automatycznej.

Układy podgrzewania i chłodzenia akumulatorów i silnika trakcyjnego poza zapewnieniem odpowiednich warunków pracy ogniw akumulatorów jest połączony z układem ogrzewania wnętrza pojazdu ciepłem z akumulatorów i silnika, jeżeli jest chłodzony cieczą.

Należy uwzględnić również wentylatory układu chłodzenia niewykorzystane ciepło na zewnątrz. Zazwyczaj jest to kilka wentylatorów o mocy ok. 350 do 500 W każdy. W autobusie elektrycznym przyjmuje się około 1,5 kW na wentylatory układu chłodzenia.

Pozostałe komponenty i systemy sterowania i kontroli pojazdu stanowią niewielki udział w zapotrzebowaniu na całkowitą energię pojazdu.

#### **13.4. Podsumowanie**

Na podstawie analizy szacuje się, że dla typowego autobusu dwuosiowego o długości 12 m i maksymalnej masie 18 000 kg, za pomocą urządzeń elektrycznych przy założeniu, że wszystkie nie pracują z mocą znamionową. Przy założeniu, że pracują z mocą 80% mocy znamionowej to możliwe jest wykorzystanie przez odbiorniki prądu zainstalowane w autobusie ok. 40 do 50 % mocy wynikającej z testów na podstawie Regulaminu ONZ nr 13 typu II i IIA.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można wywnioskować, że nie jest możliwe rozproszenie całej energii powstającej w czasie hamowania długotrwałego w czasie badań pojazdu na zgodność z Regulaminem ONZ nr 13 badaniem typu II i IIA.

## 14. Alternatywne wymagania dla akumulatorowych pojazdów elektrycznych

W wyniku prac Grupy Roboczej ds. Pojazdów Autonomicznych i połączonych dyskutowano nad różnymi rozwiązaniami problemu testów hamowania długotrwałego elektrycznych pojazdów akumulatorowych. Grupa robocza ONZ ds. pojazdów autonomicznych i połączonych (GRVA) w wyniku prowadzonych prac, opracowała i przedstawiła rozwiązanie w postaci zmian do Regulaminie ONZ nr 13, które umożliwiają odstępstwa w testach hamowania długotrwałego dla akumulatorowych pojazdów elektrycznych. Zmiany zostały przyjęte

Dokument nieformalny GRVA-05-39 omawiany podczas 5 sesji GRVA w marcu 2020 roku zawiera propozycję ekspertów z Międzynarodowej Organizacji Producentów Pojazdów Samochodowych (OICA) dotyczącą alternatywnego podejścia do wymagań Regulaminu ONZ nr 13 w odniesieniu do akumulatorowych pojazdów elektrycznych. Propozycja zawiera projekt nowych wymagań dla pojazdów o napędzie tylko elektrycznym. Zmiany zostały zaakceptowane i przyjęte w formie dodatku (suplementu) 18 do 11 serii poprawek do Regulaminu ONZ nr 13.

Zmiany w Regulaminie wprowadzają definicję estymatora skuteczności hamowania oznaczającą funkcję będącą w stanie oszacować pozostałe dostępne możliwe do osiągnięcia opóźnienie pojazdu możliwe do uzyskania za pomocą hamulca ciernego uwzględniające wpływ temperatury elementów ciernych podczas pracy przez modele uwzględniające dane wejściowe, takie jak na przykład rodzaj i działanie hamulców, liczbę i intensywność uruchomień hamulców, prędkość pojazdu lub temperatura otoczenia. Wprowadzone zmiany zezwalają dla pojazdów o napędzie tylko elektrycznym na używanie hamulca roboczego podczas testów typu IIA. Jednocześnie wymagają sprawdzenia opóźnienia hamowania pojazdu hamulcami roboczymi po teście typu IIA, a minimalne opóźnienie pojazdu po teście IIA nie może być mniejsze niż  $5 \text{ m/s}^2$ .

W przypadku pojazdów wyposażonych w elektryczny układ hamulcowy z odzyskiwaniem energii kategorii B stan akumulatorów pojazdu na początku badania musi być taki, aby udział siły hamowania zapewniany przez elektryczny układ hamulcowy z odzyskiem energii, nie przekraczał minimum gwarantowanego przez zaprojektowany układ. Wymaganie to uważa się za spełnione, jeżeli stan naładowania akumulatorów wynosi nie mniej niż 95%.

Proponuje wdrożenie „inteligentnych strategii ładowania”, które są w stanie przewidzieć potencjalne zjazdy na trasie pojazdu, np. w oparciu o wysokość, topologię dróg „wokół” pojazdu. Pojazd musi odpowiednio możliwości absorpcji lub rozproszenia energii równoważnej energii potencjalnej obliczonej dla badania zgodnie z Regulaminem ONZ nr 13, w celu zapewnienia opóźnienia pojazdu do pokonania zbliżającego się zjazdu. W przypadku pojazdów w których system hamowania długotrwałego oparty jest tylko o system hamowania z odzyskiwaniem energii, przed momentem, w którym siła hamowania układu hamowania z odzyskiem energii nie może zapewnić wystarczającej możliwości hamowania (np. gdy akumulator jest w pełni naładowany), kierowca musi zostać poinformowany o sytuacji (np. za pomocą informacji: o pozostałej zdolności hamowania pojazdu, zmniejszeniu siły hamującej).

W odniesieniu do przeprowadzania testów w przypadku pojazdów wyposażonych w układ hamulcowy o długotrwałym działaniu obejmujący elektryczne układy hamulcowe z odzyskiem energii oraz w przypadku, gdy układ hamulcowy roboczy jest używany, a nie jest możliwe

zgromadzenie energii w akumulatorze trakcyjnym tylko z powodu wysokiego stanu naładowania, należy przeprowadzić dwa testy.

Pierwszy test wykonać przy niskim stanie naładowania akumulatora, bez używania roboczego układu hamulcowego na torze o pochyleniu odpowiednim do badanego kategorii i przeznaczenia pojazdu.

Drugi test jest przeprowadzany jest przy stanie naładowania akumulatorów wynoszącym minimum 95%, na torze z nachyleniem co najmniej 7%. Podczas testu możliwe jest używanie roboczego układu hamulcowego, który może być wspomagany przez układ hamulcowy o długotrwałym działaniu (np. elektryczny układ hamulcowy z odzyskiem energii, dodatkowy hamulec o długotrwałym działaniu, taki jak chłodzony rezystor). Po tym teście, biorąc pod uwagę, że hamulce robocze nie mogą znacząco ostygnąć, przeprowadza się dodatkowe badanie skuteczności hamowania za pomocą roboczego układu hamulcowego, a średnie w pełni rozwinięte opóźnienie hamowania pojazdu nie może być niższe niż 5 m/s<sup>2</sup>.

Ostatecznie zmiana została zatwierdzona przez WP.29 weszła do Regulaminu ONZ w postaci dodatku 18 do 11 serii poprawek do Regulaminu ONZ nr 13<sup>66</sup> 25 listopada 2021 r.

---

<sup>66</sup> <https://unece.org/sites/default/files/2021-12/R013r8am8e%20.pdf> [listopad 2021]

## 15. Oszacowanie stanu naładowania akumulatorów pojazdu

### 15.1. Wskaźnik stosowany w celu oceny stanu naładowania akumulatorów pojazdu

W pojazdach elektrycznych i hybrydowych stosuje się wskaźniki naładowania akumulatorów, które w procentach określają stan naładowania dostępnej (użytkowej) pojemności akumulatora (SoC), jak przedstawiono na Rys. 11.13. Stan naładowania akumulatora wynoszący 100% oznacza, że dostępna pojemność akumulatora jest całkowicie naładowana, a 0% SoC oznacza, że w zakresie dostępnej użytkowej pojemności akumulatora jest całkowicie rozładowany. Stopień naładowania użytkowej pojemności akumulatora lub pakietu akumulatorów jest obliczany według prostego wzoru podanego poniżej. Obliczany jest jako stosunek ładunku elektrycznego obecne zmagazynowanego w użytkowej części pojemności akumulatora ( $Q_t$ ) do ładunku możliwego do zmagazynowania w tym obszarze pojemności akumulatora ( $Q_n$ ).

$$\text{SoC} = \frac{Q_t}{Q_n} \cdot 100 [\%]$$

gdzie:

$Q_t$  – chwilowa wartość ładunku zmagazynowana użytkowej części pojemności akumulatora;

$Q_n$  – maksymalna wartość ładunku zmagazynowana użytkowej części pojemności akumulatora.

Dokładny pomiar tego parametru jest niezwykle ważny, gdyż z jednej strony umożliwia dokładne określenie pozostałej w akumulatorze energii, więc i pozostałego możliwego do przejechania dystansu do rozładowania akumulatora. Dokładne określenie pozostałej do wykorzystania energii w akumulatorze ma zapobiegać zatrzymaniu pojazdu spowodowane brakiem energii przed punktem ładowania lub celem podróży. Z drugiej strony umożliwia dokładną kontrolę procesu ładowania akumulatora.

W przypadku magazynowania innych rodzajów energii również możliwe jest oszacowanie pozostałej w akumulatorze energii – stanu naładowania akumulatora (SoC). W przypadku magazynowania energii elektrycznej w super kondensatorach monitorowane jest napięcie w obwodzie otwartym super kondensatora (metoda napięciowa). Występuje praktycznie liniowa zależność pomiędzy wartością napięcia mierzoną w obwodzie otwartym a stopniem naładowania kondensatora.

W przypadku akumulatorów magazynujących energię mechaniczną lub hydrauliczną możliwości oszacowania stanu naładowania takiego akumulatora może być łatwo określona za pomocą pomiaru podstawowych wartości fizycznych. W przypadku magazynowania energii mechanicznej w postaci energii kinetycznej. W takim przypadku wartość zgromadzonej energii zależy od prędkości obrotowej koła zamachowego.

Wartość chwilowej energii kinetycznej zmagazynowanej w akumulatorze określa się za pomocą wzoru:

$$E_{kt} = \frac{I \cdot \omega_t^2}{2}$$

gdzie:

$\omega_t$  – chwilowa prędkość obrotowa koła zamachowego;

$I$  – moment bezwładności koła zamachowego względem osi obrotu.

Wartość maksymalnej możliwej do zmagazynowania w akumulatorze energii określa się za pomocą wzoru:

$$E_{kn} = \frac{I \cdot \omega_n^2}{2}$$

gdzie:

$\omega_n$  – maksymalna prędkość obrotowa koła zamachowego;

$I$  – moment bezwładności koła zamachowego względem osi obrotu.

Stopień naładowania akumulatora energii mechanicznej określa porównując chwilową energię zmagazynowaną w akumulatorze do maksymalnej energii możliwej do zmagazynowania, zgodnie z poniższym wzorem:

$$\text{SoC} = \frac{E_{kt}}{E_{kn}} \cdot 100 [\%]$$

gdzie:

$E_{kt}$  – chwilowa energia kinetyczna zmagazynowana w akumulatorze;

$E_{kn}$  – maksymalna energia kinetyczna możliwa do zmagazynowania przez akumulator.

## 15.2. Określenie stanu naładowania akumulatorów elektrycznych i elektrochemicznych

Określenie stanu naładowania akumulatora (SoC) elektrycznego i elektrochemicznego jest procesem złożonym. Skomplikowane procesy chemiczne zachodzące w akumulatorach elektrochemicznych nie pozwalają na dokładne określenie stanu naładowania akumulatora SoC w każdych warunkach. Czasami stosuje się określenie głębokości rozładowania akumulatora (DoD), które stanowi odwrotność SoC.

Najczęściej w celu określenia stanu naładowania akumulatorów elektrycznych stosuje się trzy metody<sup>67</sup>:

- (a) Metoda zliczania ładunku;
- (b) Metoda pomiaru napięcia spoczynkowego;
- (c) Pomiar gęstości elektrolitu

Metoda zliczania ładunku jest jedną z najczęściej używanych metod, stosowana do określania stanu naładowania akumulatora zarówno w urządzeniach przenośnych jak i samochodach elektrycznych. Metoda ta polega na szacowaniu ilości ładunku zgromadzonego w akumulatorze na podstawie ciągłej kontroli jego przepływu, dokładnym pomiarze prądu ładowania i rozładowania. Błędy pomiaru w tej metodzie wynikają z dwóch głównych powodów: niedokładnego pomiaru prądu i strat energii podczas ładowania. Metoda nie uwzględnia również prądu samorozładowania akumulatora. Z tego powodu nie jest zalecana do pracy z akumulatorami o dużym współczynniku samorozładowania (np. kwasowo-olowiowymi). W celu zapewnienia zachowania dokładności tej metody konieczna jest

<sup>67</sup> <https://www.bacancytechnology.com/blog/state-of-charge-calculation-for-battery-energy> [lipiec 2021]



okresowa kalibracja układu<sup>68</sup>. Wiele innych czynników, takich jak temperatura ogniw, zastosowanie akumulatora, cykl życia i warunki pracy akumulatora, wahania napięcia akumulatora, utrata pojemności, ilość cykli ładowania i rozładowania itp., należy wziąć pod uwagę wraz z metodą zliczania ładunków, aby uzyskać dokładniejsze obliczenia SoC. Zaletą tej metody jest, że dokładny pomiar nie wymaga spoczynku akumulatora. Mimo, że pomiar prądu odbywa się za pomocą precyzyjnego rezystora, mogą wystąpić niewielkie błędy pomiarowe, związane z częstotliwością próbkowania. Aby skorygować te marginalne błędy, licznik ładunku jest kalibrowany przy każdym cyklu. Pomiar stanu naładowania akumulatora litowo-jonowego metodą zliczania ładunku pozwala na błąd pomiaru mniejszy niż 1%, co pozwala na bardzo dokładne wskazanie energii pozostałej w akumulatorze<sup>69</sup>. Zaletą tej metody jest to, że jest niezależna od zmiany mocy pobieranej z akumulatora powodującej spadki napięcia akumulatora oraz, że dokładność pomiaru pozostaje stała niezależnie od zużycia akumulatora.

Metoda pomiaru napięcia spoczynkowego jest to najprostsza metoda, wykorzystująca zależność napięcia na zaciskach akumulatora od stanu naładowania (napięcie akumulatora rozładowanego jest zawsze niższe niż naładowanego). Jej dokładność może być dość wysoka, ale muszą być spełnione określone warunki. Wiarygodne wyniki są otrzymywane przy całkowicie nieobciążonym akumulatorze. Metoda pomiaru napięcia jest najbardziej odpowiednia dla ogniw kwasowo-ołowiowych, lub kondensatorów ponieważ posiadają one liniową charakterystykę zależności stanu naładowania akumulatora od napięcia. W przypadku innego typu ogniw napięcie akumulatora jest przekształcane na równoważną wartość SoC przy użyciu wstępnie zdefiniowanej krzywej rozładowania akumulatora (napięcie w funkcji SoC). W przypadku ogniw litowo-jonowych napięcie rozładowania jest praktycznie niezmiennie w dużym zakresie SoC, co utrudnia dokładny pomiar stanu naładowania akumulatora z ogniwami litowo-jonowymi. Dodatkowo temperatura akumulatora wpływa na wartość napięcia akumulatora. Zmiany środowiskowe muszą być skorygowane w celu określenia SoC akumulatora. Metoda napięciowa jest jednak trudna do wdrożenia oraz z powodu swoich wad nie stosowana w pojazdach elektrycznych i hybrydowych, jedynie w prostych aplikacjach jak elektryczne wózki golfowe, hulajnogi, wózki inwalidzkie.

Kolejną metodą pomiaru stanu naładowania akumulatora jest pomiar ciężaru właściwego elektrolitu. Metoda ta może być stosowana tylko do akumulatorów kwasowo-ołowiowych i niklowo-kadmowych z ciekłym elektrolitem. Na skutek reakcji chemicznych zachodzących w akumulatorze ciężar właściwy elektrolitu zmniejsza wprost proporcjonalnie do stanu naładowania akumulatora. Podczas ładowania zachodzą odwrotne reakcje, ciężar właściwy elektrolitu zwiększa się. Ciężar właściwy elektrolitu dla typowego akumulatora ołowiowo-kwasowego zmienia się w przedziale od 1,3 g/cm<sup>3</sup> przy pełnym naładowaniu do 1,1 g/cm<sup>3</sup> przy pełnym rozładowaniu. Pomiaru gęstości elektrolitu dokonuje się za pomocą areometru.

---

<sup>68</sup> Rudnicki Tomasz, Wójtowicz Stefan, Metody wyznaczania stanu naładowania akumulatorów stosowane w pojazdach elektrycznych, urządzeniach przenośnych i w laboratorium, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska. Tom 4, 2014, s. 68-70. DOI:10.5604/20830157.11213814

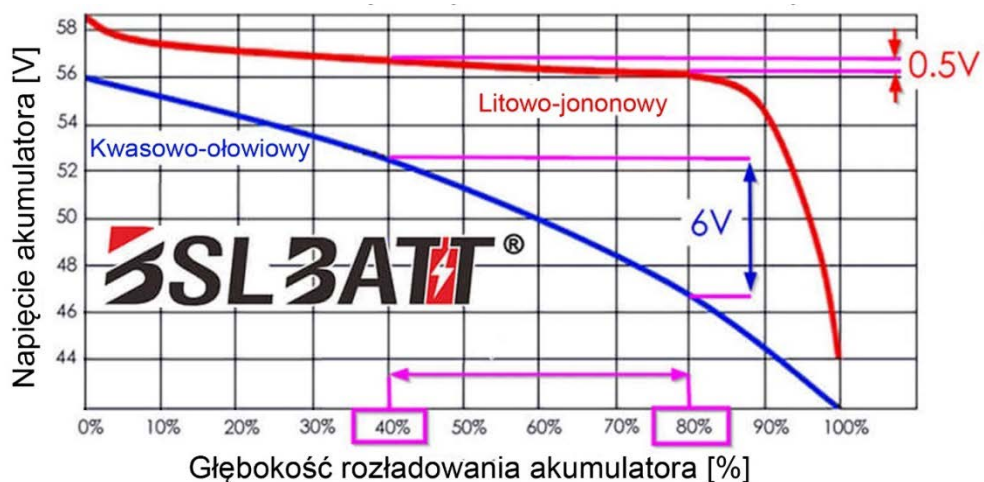
<sup>69</sup> <https://www.lithium-battery-factory.com/lithium-battery-state-of-charge/> [lipiec 2021]

W celu zapewnienia dokładnych wartości SoC super kondensatora przeprowadza pomiar napięcia, prądu i temperatury<sup>70</sup>. Istnieje związek między napięciem obwodu otwartego a stopniem rozładowania super kondensatora. Istnieją w przybliżeniu liniowe zależności między napięciem super kondensatora, a SoC. W przypadku super kondensatorów w celu określenia SoC, stosuje się często metodę pomiaru napięcia spoczynkowego.

### 15.3. Metody obliczania SoC akumulatorów litowo-jonowych

Dokładny pomiar stanu naładowania akumulatorów z ogniwami litowo-jonowymi, jak napisano powyżej wymaga zastosowania metody zliczania ładunku i jest powszechnie stosowany w pojazdach elektrycznych i hybrydowych. W celu odpowiedniego zarządzania energią akumulatora, zapewnienia jego efektywnego wykorzystania akumulatora i dłuższą żywotność, stosowane są systemy zarządzania akumulatorem (BMS).

W przypadku akumulatorów litowo-jonowych stan naładowania akumulatora litowo-jonowego (SoC) lub głębokości rozładowania (DoD) możliwy jest jedynie metodą zliczania ładunku lub metodą pomiaru napięcia spoczynkowego<sup>71</sup>. Napięcie na zaciskach akumulatora jest zależne od stan jego naładowania. Napięcie będzie najwyższe, gdy akumulator jest w pełni naładowany, a najniższe, gdy jest rozładowany. Krzywa zależność między napięciem a SoC zależy bezpośrednio od zastosowanej technologii akumulatora. Dla przykładu na Rys. 15.1 przedstawiono porównanie krzywych rozładowania między akumulatorem kwasowo-ołowiowym, a akumulatorem litowo-jonowym. Akumulatory litowo-jonowe mają znacznie bardziej płaską krzywą rozładowania, co oznacza, że w szerokim zakresie pracy napięcie na zaciskach akumulatora zmienia się bardzo nieznacznie, to bardzo utrudnia oszacowanie DoD lub SoC na podstawie prostego pomiaru napięcia. Różnica napięć między dwiema wartościami DoD lub SoC może być tak mała, że nie jest możliwe tą metodą dokładne oszacowanie głębokości rozładowania akumulatora. Różnice pokazano na Rys. 15.1.



Rys. 15.1. Zależność pomiędzy zmianami napięcia w akumulatorze kwasowym a litowo-jonowym.

Źródło: <https://www.lithium-battery-factory.com/lithium-battery-state-of-charge/> [lipiec 2021]

<sup>70</sup> Guo Yifenga, *Analysis and Design of the Super Capacitor Monitoring System of Hybrid Electric Vehicles*, Procedia Engineering Volume 15, 2011, s.90-94.

<sup>71</sup> <https://www.lithium-battery-factory.com/lithium-battery-state-of-charge/> [lipiec 2021]

Można zauważyć, że akumulatory kwasowo-ołowiowe mają charakterystykę rozładowania taką, że metoda pomiaru napięcia spoczynkowego umożliwia dokładne określenie głębokości rozładowania akumulatora.

Na Rys. 15.1 przedstawiono różnice napięcia spoczynkowego między wartością DoD 40% a 80% dla 2 rodzajów 15.4. akumulatorów. W akumulatorze kwasowo-ołowiowym o napięciu nominalnym 48 V różnica napięcia spoczynkowego pomiędzy głębokością rozładowania 40% a 80% wynosi około 6,0 V. W przypadku akumulatora litowo-jonowego, różnica ta wynosi tylko 0,5 V. To powoduje, że metoda pomiaru napięcia spoczynkowego w przypadku takich akumulatorów jest mało dokładna. Nawet precyzyjny pomiar napięcia spoczynkowego w połączeniu z modelowaną krzywą rozładowania akumulatorów litowo-jonowych pozwala na pomiary stopnia naładowania akumulatora metodą napięcia spoczynkowego z dokładnością od 10 do 15%.

Dokładniejszą metodą określenia SoC jest metoda zliczania ładunków, która wymaga kontroli przepływu energii z i do akumulatora. Realizowane jest to poprzez dokładny pomiar głównie natężenia prądu. Stan naładowania akumulatora jest obliczany za pomocą całki prądu po czasie jego przepływu:<sup>72</sup>

$$\text{SoC} = \text{SoC}_0 + \frac{1}{Q_{zn}} \int_{t_0}^t (I_a - I_s) dt$$

gdzie:

$\text{SoC}_0$  – początkowy stan naładowania,

$Q_{zn}$  – pojemność znamionowa akumulatora,

$I_a$  – prąd pobierany lub dostarczany do akumulatora,

$I_s$  – prąd strat.

W przeciwieństwie do metody pomiaru napięcia swobodnego akumulatora, metoda zliczania ładunku umożliwia określenie stanu naładowania akumulatora podczas użytkowania akumulatora, a dokładny pomiar nie wymaga spoczynku akumulatora i może być przeprowadzany podczas pracy akumulatora. Mimo, że pomiar prądu odbywa się za pomocą precyzyjnego rezystora, mogą wystąpić niewielkie błędy pomiarowe, związane z częstotliwością próbkowania. Pomiar stanu naładowania akumulatora litowo-jonowego przeprowadzony za pomocą metody zliczania ładunku, pozwala na uzyskanie dokładności pomiaru poniżej 1%, a dokładność pozostaje stała niezależnie od zużycia akumulatora.

## 15.5. Metody obliczania pozostałej energii w przypadku akumulatorów energii mechanicznej lub sprężonego medium

Określenie stanu naładowania akumulatorów stosuje się również w przypadku akumulatorów innych niż elektryczne lub elektrochemiczne. W przypadku zmagazynowania energii w postaci energii kinetycznej lub energii ciśnienia gazu lub cieczy.

---

<sup>72</sup> Rudnicki Tomasz, Wójtowicz Stefan, Metody wyznaczania stanu naładowania akumulatorów stosowane w pojazdach elektrycznych, urządzeniach przenośnych i w laboratorium, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska. Tom 4, 2014, s. 68-70. DOI:10.5604/20830157.11213814

Stan naładowania akumulatora energii kinetycznej stosowanej w akumulatorach z kołem zamachowym określa się poprzez pomiar prędkości obrotowej tego koła. W przypadku takich rozwiązań energia chwilowa zgromadzona w urządzeniu wynosi zgodnie z równaniem:

$$E_{kt} = \frac{I_0 \cdot \omega_t^2}{2}$$

Z powyższego równania wynika, że ilość energii zgromadzonej w takim akumulatorze jest zależna od prędkości obrotowej koła zamachowego. Na podstawie stosunku kwadratów prędkości obrotowej koła zamachowego: chwilowej ( $\omega_t$ ) i odpowiadającej w pełni naładowanemu akumulatorowi ( $\omega_n$ ).

$$SoC = \frac{\omega_t^2}{\omega_n^2} \cdot 100 [\%]$$

W przypadku energii potencjalnej zmagazynowanej w postaci ciśnienia gazu lub cieczy, rzadko stosowanej w motoryzacji. Stan naładowania akumulatora oblicza się na podstawie pomiaru ciśnienia.

## 16. Materiały stosowane w hamulcach ciernych pojazdów

### 16.1. Wymagania stawiane materiałom

Kontakt między powierzchnią cierną tarczy lub bębna hamulcowego nie jest dokładnie opisany w literaturze. Badania prowadzone przez Mikela Erikssona i Steffana Jacobson<sup>73</sup> oraz Andrzeja Wojciechowskiego, Jerzego Sobczaka zawarte w monografii „Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych”<sup>74</sup> opisują współpracę materiału ciernego z powierzchnią elementów współpracujących w hamulcach ciernych pojazdów drogowych. Generalnie przyjmuje się, że powierzchnia tarczy hamulcowej jest raczej płaska, błyszcząca. Eriksson oraz Wojciechowski w swoich badaniach posłużyli się wieloma nowoczesnymi metodami, takimi jak mikroskop skaningowy, optyczny profilometr, metalograficzny mikroskop optyczny wyposażony w komputerową analizę obrazu oraz makrofotografia. W monografii Wojciechowski, Sobczak zawarto porównania w warunkach eksploatacyjnych wszystkich rodzajów tarcz hamulcowych (zastosowany materiał, geometria, konstrukcja itp.) także w zakresie bezpieczeństwa ich użytkowania.

Materiały cierne stosowane w hamulcach pojazdów są przedmiotem prac badawczych wielu czołowych producentów materiałów ciernych. Celem opracowania jest taki dobór materiału ciernego okładziny i materiału stosowanego na tarczę hamulcową lub bęben hamulcowy, która zapewni bezpieczeństwo eksploatacji, istotne zagadnienie stanowi utrzymanie wysokiej i stabilnej wartości współczynnika tarcia niezależnie od stopnia zużycia elementów, czy warunków eksploatacji. W szczególności należy zwrócić uwagę na zjawisko zaniku lub też istotnego zmniejszenia siły hamowania popularnie nazwanego “fading”. Producenci materiałów ciernych i elementów wykonawczych hamulców poprzez dobór odpowiednich par materiałów współpracujących (materiału ciernego i materiału tarczy lub bębna hamulcowego) starają się te negatywne zjawisko ograniczyć.

Hamulce cierne stosowane są od początku historii pojazdów. Umożliwiają kierowcy kontrolę prędkości jazdy, zatrzymanie i zapobieganie niekontrolowanemu stoczeniu się pojazdu ze wzniesienia. W hamulcach ciernych następuje zamiana energii kinetycznej pojazdu w energię cieplną. Podczas hamowania w pierwszym momencie energia cieplna wyzwała się na powierzchniach ciernych, czyli powierzchni pracy tarczy hamulcowej lub bębna hamulcowego oraz powierzchni okładziny cierniej hamulca. Następnie jest przenoszona w głąb materiału tarczy oraz nakładki cierniej oraz na inne komponenty układu hamulcowego i pojazdu (zaciski hamulcowe, piast kół, obręcze kół itp.). Część tej energii jest rozpraszana do otoczenia. Wymagania stawiane materiałom ciernym stosowanym w hamulcach pojazdów to zapewnienie:

- wysokiej wartości współczynnika tarcia przy współpracy z tarczą hamulcowym lub bębniem hamulcowym;
- ograniczenia emisji szkodliwych pyłów powstałych ze zużycia materiału ciernego i materiału tarczy lub bębna hamulcowego;

<sup>73</sup> Mikael Eriksson, *Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal*, Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology 537, ACTA Universitatis Upsaliensis, 2000.

<sup>74</sup> A. Wojciechowski, J. Sobczak, *Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych* Publikacja 2001 r. Instytut Transportu Samochodowego, s. 1-162. ISBN 83-913045-6-6.

- możliwie najmniejszych zmian wartości współczynnika tarcia przy wysokich temperaturach pary ciernej;
- stabilnej wartości współczynnika tarcia niezależnie od prędkości poślizgu.

## 16.2. Materiały cierne

Materiały cierne obecnie stosowane w okładzinach hamulcowych pojazdów dzielą się w zależności od stosowanych w nich komponentów (składników) zgodnie z tabelą 16.1.

Tabela 16.1 Materiały cierne obecnie stosowane w hamulcach <sup>75 76 77</sup>

Rodzaj materiału ciernego	Składniki
Sintered (Metaliczne)	Przewaga materiałów metalowych takich jak: włókna stalowe, włókna miedzi, włókna mosiądzu i inne metaliczne
Semi-metalic (Półmetaliczne)	Materiały metalowe występują w zbliżonych proporcjach wagowych ze składnikami organicznymi
Non Asbestos Organic – NAO (Organiczne bezazbestowe)	Przewaga wagowa materiałów organicznych takich jak włókna mineralne, grafit, fibra, guma i inne organiczne
Ceramic (Ceramiczne)	Włókna głównie miedzi oraz związki w postaci tlenków metali, węglików głównie krzemu
Ceramic matrix composites CMC (Kompozytowe o osnowie ceramicznej)	Materiały kompozytowe węgiel-węgiel (C/C) i/lub węgiel-węgiel krzemu (C/SiC)

Materiał semimetaliczny (półmetaliczny). Zawiera on wagowo od 30 do 65% (70%)<sup>78</sup> dodatków metalicznych. W celu uzyskania wysokiej i stabilnej wartości współczynnika tarcia, stosuje się wiele rodzajów metali m.in. stopy miedzi, stal itd. Pozostała część składa się wypełniaczy, modyfikatorów i innych substancji opisanych poniżej. Ten rodzaj materiału ciernego jest obecnie niezwykle popularny wśród producentów pojazdów i komponentów układów hamulcowych pojazdów, z uwagi na fakt, że posiada dobre właściwości zarówno w warunkach jazdy codziennej, jak i dynamicznej<sup>79</sup>.

Półmetaliczne materiały cierne różnią się od metalicznych zawartością dodatków metalicznych. Dla metalicznych materiałów ciernych przyjmuje się zawartość wagową dodatków metalicznych powyżej 65% lub 70% masy materiału ciernego. Metaliczne materiały cierne (sintered) stosowane są przy aplikacjach wymagających dużej odporności na temperatury przy zapewnieniu małego zużycia materiału ciernego. Metaliczne materiały cierne

<sup>75</sup> <https://kor-pak.com/semi-metallic-brake-pads-vs-sintered-brake-pads-whats-difference/> [grudzień 2021]

<sup>76</sup> <https://www.bridgestonetire.com/learn/maintenance/ceramic-vs-metallic-brake-pads/> [grudzień 2021]

<sup>77</sup> <https://www.6thgearautomotive.com/2016/11/07/overview-brake-pads-materials-organic-ceramic-and-semi-metallic/> [grudzień 2021]

<sup>78</sup> <https://www.bridgestonetire.com/learn/maintenance/ceramic-vs-metallic-brake-pads/> [grudzień 2021]

<sup>79</sup> <https://www.6thgearautomotive.com/2016/11/07/overview-brake-pads-materials-organic-ceramic-and-semi-metallic/> [grudzień 2021]

zapewniają wyższą wartość współczynnika tarcia w znacznie szerszym zakresie temperatur i warunków eksploatacji. Dodatkowo dodatki metaliczne zapewniają dobre przewodnictwo cieplne materiału ciernego, co powoduje, większą odporność na utratę siły hamowania w wyniku wzrostu temperatury. Jednocześnie umożliwiają skuteczne odprowadzenie ciepła z obszaru współpracy. Wadą metalicznych okładzin ciernych jest większy hałas w momencie kontaktu z tarczą lub bębniem hamulcowym w porównaniu do półmetalicznych, organicznych czy ceramicznych materiałów ciernych. Dodatkowo duży masowy udział dodatków metali powoduje większe zużycie tarcz i/lub bębniów hamulcowych.

Ceramiczne materiały cierne zawierają dodatki w postaci materiałów ceramicznych najczęściej węgla krzemu. Materiały zawierają także włókna miedzi, które stanowią wzmocnienie materiału przy jednoczesnym zwiększeniu przewodności cieplnej. Ceramiczne materiały cierne charakteryzują się cichą pracą podczas kontaktu z materiałem tarczy lub bębna hamulcowego a jednocześnie w porównaniu z organicznymi materiałami ciernymi, emitują mniej pyłów podczas pracy. Materiał ceramiczny zapewnia praktycznie stałą wartość współczynnika tarcia w szerokim zakresie temperatur i warunków atmosferycznych w porównaniu do materiałów organicznych. Ceramiczne materiały mają porównywalną wartość współczynnika tarcia w funkcji temperatury, jak materiały o dużej zawartości metali. Wynika to z faktu, że metaliczne materiały cierne posiadają większą przewodność cieplną w stosunku do materiałów ceramicznych.

Wadą ceramicznych materiałów ciernych jest ich duży koszt, który jest kilkakrotnie wyższy niż innych powszechnie stosowanych materiałów ciernych (z wyłączeniem kompozytowych opartych na osnowie ceramicznej).

Obecnie organiczne materiały cierne nie zawierające azbestu i zwykle zużywają się szybciej niż twardsze materiały półmetaliczne, czy metaliczne. Organiczne materiały cierne charakteryzują się cichą pracą oraz najniższym kosztem produkcji w porównaniu do kosztów produkcji pozostałych typów materiału ciernego. Organiczne materiały cierne nie zawierają dodatków z materiałów metalowych ani ceramicznych.

Organiczne materiały cierne są powszechnie stosowane pojazdach samochodowych przeznaczonych do jazdy miejskiej, skuterach oraz rowerach i hulajnogach. Zawierają najczęściej takie składniki jak:

- węgiel/grafit;
- elastomery/gumę;
- włókna polimerowe w tym kewlarowe;
- włókno szklane,
- włókna naturalne.

Kompozytowe materiały cierne o osnowie ceramicznej np. C/SiC są przewidziane do współpracy z kompozytowymi materiałami tarcz hamulcowych C/C lub C/SiC, które ze względu na swoją skuteczność i koszt obecnie znajdują zastosowanie w sportach motorowych lub samochodach drogowych i sportowych. luksusowych. Charakteryzują następującymi właściwościami, takimi jak:

- niski ciężar właściwy ( $<2 \text{ g/cm}^3$ );
- wyjątkowe właściwości tribologiczne bardzo dobra odporność na zużycie;
- stabilna i wysoka wartość współczynnika tarcia (nawet ok. 0,64) w zakresie wysokich temperatur nawet do  $800^\circ\text{C}$ ;

- bardzo duża odporność na zużycie (nawet do przebiegu powyżej 300 tys km, 5 razy więcej niż żeliwna tarcza hamulcowa)<sup>80</sup>.

Wadą takich materiałów ciernych jest stosunkowo wysoki koszt oraz przeciętne wartości współczynnika tarcia dla temperatur w parze ciernej uzyskiwanej podczas normalnej eksploatacji pojazdu do 300°C.

### 16.3. Skład materiałów ciernych stosowanych w hamulcach pojazdów

W zależności od zastosowania i wymaganych właściwości wyrobu z materiału ciernego do jego wykonania niezbędne jest użycie 15 do 25 komponentów. Zastosowane komponenty można podzielić na 5 podstawowych grup przedstawionych w tabeli 16.2.

Tabela 16.2. Komponenty stosowane w materiałach ciernych stosowanych w hamulcach pojazdów<sup>81</sup>

Grupa komponentów	Funkcja
Włókna wzmacniające	Wzmocnienie materiału ciernego, zapewnienie wytrzymałości mechanicznej materiału ciernego
Spoiwo	Utrzymanie integralności materiału ciernego pod wpływem naprężenia mechanicznych i termicznych
Wypełniacze	Obniżają koszty produkcji materiałów ciernych
Materiały ściernie	Pomagają utrzymać czystość powierzchni cierniej, zwiększają współczynnik tarcia
Smary	Stabilizacja rozwiniętego współczynnika tarcia podczas hamowania, szczególnie w wysokich temperaturach

#### Włókna wzmacniające

Celem zastosowania włókien wzmacniających w materiałach ciernych jest zapewnienie im wytrzymałości mechanicznej. Prowadzone badania przez Mikaela Erkißsona wykazały, że na powierzchni kontaktu materiałów ciernych obciążenie jest przenoszone przez małe płaszczyzny („płaskowycze”), które się wznoszą na powierzchni materiału. Te powierzchnie są utworzone przez włókna wzmacniające otoczone materiałem o niższej twardości. W materiałach ciernych zazwyczaj jest kilka rodzajów włókien wzmacniających, których właściwości fizyczne się

<sup>80</sup> Opel, T, Langhof, N, Krenkel, W., *Development and tribological studies of a novel metal-ceramic hybrid brake disc*, International Journal of Applied Ceramic Technology, 2021, 19, s.62– 74.  
<https://doi.org/10.1111/ijac.13826>.

<sup>81</sup> Mikael Eriksson, Filip Bergman, Staffan Jacobson, *On the nature of tribological contact in automotive brakes*, Wear, Volume 252, Issues 1–2, 2002 s. 26-36.



wzajemnie uzupełniają<sup>82</sup>. Wykaz wybranych materiałów stosowanych na włókna wzmacniające przedstawiono w tabeli 16.3.

Tabela 16.3. Wybrane materiały stosowane na włókna wzmacniające w materiałach ciernych<sup>83</sup>.

Material	Zalety	Wady
Szkło	Dobra wytrzymałość termiczna, temperatura topnienia 1430 °C, od 600 °C następuje zmiana twardości	Duża kruchość
Metale	Dobra wytrzymałość na temperatury, stal i miedź temperatura topnienia powyżej 1000 °C	powoduje nadmierne zużycie tarczy lub bębna; koroduje
Aramid	Duża sztywność przy małej masie, bardzo dobra wytrzymałość na temperaturę, duża odporność na zużycie	Mała twardość, nie może być używany bez innych włókien
Tytanian potasu (materiał ceramiczny)	Dobra wytrzymałość na temperaturę (temperatura topnienia 1371 °C, bardzo twardy duża odporność na zużycie	Trujący
Sepiolit (minerał z gromady krzemianów)	Dobra wytrzymałość na temperaturę (temperatura topnienia 1550 °C, pochłania pyny	Szkodliwy
Materiały ceramiczne	Dobra wytrzymałość na temperaturę (temperatura topnienia 1700 – 2040 °C, duża sztywność przy małej masie	Duża kruchość

### Spoiwo

Celem stosowania spoiwa jest utrzymanie integralności materiału ciernego pod wpływem naprężeń mechanicznych i termicznych. Spoiwo utrzymuje wszystkie składniki materiału ciernego razem i zapobiega ich wykruszaniu. Właściwości wybranych spoiw przedstawiono w tabeli 16.4.

<sup>82</sup> Mikael Eriksson, Filip Bergman, Staffan Jacobson, *On the nature of tribological contact in automotive brakes*, Wear, Volume 252, Issues 1–2, 2002 s. 26-36.

<sup>83</sup> Mikael Eriksson, Filip Bergman, Staffan Jacobson, *On the nature of tribological contact in automotive brakes*, Wear, Volume 252, Issues 1–2, 2002 s. 26-36.

Tabela 16.4. Spoiwa stosowane w materiałach ciernych<sup>84</sup>.

Spoiwo	Zalety	Wady
Żywica fenolowa	Tania i łatwa w produkcji	Krucha, mała udarność, silnie toksyczna, rozkłada się w niskich temperaturach ok. 450 °C
Żywica fenolowa modyfikowana silikonami	Lepsza udarność większa wytrzymałość termiczna i chemiczna w stosunku do żywicy fenolowej	Bazą jest nadal żywica fenolowa, silnie toksyczna
Żywica cyjanoestrowa	Dobra wytrzymałość na temperaturę, chemicznie obojętna, tłumi drgania	Krucha, mała udarność
Żywica fenolowa modyfikowana epoksydami	Lepsza wytrzymałość na temperaturę niż żywica fenolowa	Bazą jest nadal żywica fenolowa, silnie toksyczna
Żywica poliamidowa termoplastyczna	Odporna na ścieranie, nie wykazuje fadingu	Przewodność cieplna 3-krotnie mniejsza niż żywicy fenolowej

Źródło: Opracowanie własne.

Właściwy dobór spoiwa do materiałów ciernych jest niezwykle ważny, spoiwo musi zapewnić nienaruszoną strukturę materiału ciernego także w czasie cyklu hamowania. Wszelkie pęknięcia struktury materiału ciernego powodują jego dezintegrację i wykruszania materiału lub innych składników (np. włókien wzmacniających), co wiąże się ze zmniejszeniem wartości współczynnika tarcia, czy odporności na ścieranie. W związku z tym, spoiwo musi posiadać odporność na wysokie temperatury w celu zapewnienia integralności materiału ciernego nawet w wysokich temperaturach.

### Wypełniacze

Wypełniacze stosowane są głównie w celu zmniejszenia kosztów produkcji. Jednym z często używanych wypełniaczy są krzemiany metali (twarde, cząstki ściernie), które pełnią też funkcję materiałów ściernych. Wypełniacze można podzielić na dwie grupy: organiczne i nieorganiczne. Wybrane związki chemiczne stosowane w materiałach ciernych jako wypełniacze wymienione są w tabeli 16.5.

<sup>84</sup> Mikael Eriksson, Filip Bergman, Staffan Jacobson, *On the nature of tribological contact in automotive brakes*, Wear, Volume 252, Issues 1–2, 2002 s. 26-36.

Tabela 16.5. Wypełniacze stosowane w materiałach ciernych<sup>85</sup>.

Związek chemiczny	Opis / funkcja
Siarczan baru	Poprawia stabilność termiczną i charakterystykę cierną
Węglan wapnia	Poprawia stabilność termiczną
Mika	Zmniejsza hałas, struktura warstwowa o małej wytrzymałości
Wermikulit	Zmniejsza hałas, mała odporność na temperaturę
Tytanian metalu alkalicznego	Poprawia stabilność współczynnika tarcia
Trójtlenek molibdenu	Zapobiega zjawisku fadingu i pękaniu materiału ciernego w wysokiej temperaturze
Kauczuk – sproszkowany i inne dodatki organiczne	Zmniejszają hałas

### Materiały ścierne

Materiały ścierne są to składniki dodawane do materiałów ciernych hamulca, w celu utrzymania czystości powierzchni roboczych tarczy lub bębna hamulcowego. Materiały te utrzymują odpowiedni stan powierzchni współpracujących. Usuwają z powierzchni tlenki żelaza i inne niepożądane związki lub warstwy utworzone na powierzchni roboczej. Materiały ścierne mają zazwyczaj twardość 7-8 stopni w skali Mohsa i poprzez swoje właściwości ścierne przyczyniają się do zwiększenia zużycia powierzchni tarczy hamulcowej wykonanej najczęściej z żeliwa szarego. Materiały poprzez swoje właściwości ścierne powodują zwiększenie wartości współczynnika tarcia. Zwiększenie ilości dodatków ściernych powoduje wzrost wartości współczynnika tarcia, ale jednocześnie i jego duże zmiany pod wpływem temperatury. W związku z tym ważne jest, aby osiągnąć kompromis między ilością materiałów ciernych i smarami. Najczęściej stosowane materiały ścierne to krzemiany i tlenki metali takie jak: tlenek cyrkonu, krzemian cyrkonu, tlenek glinu, tlenek chromu i inne.

### Smary

Główną funkcją smarów jest stabilizacja wartości współczynnika tarcia szczególnie w wyższych temperaturach. Najczęściej używanymi związkami chemicznymi jest grafit oraz siarczki metali.

Grafit stosowany w materiałach ciernych może być pochodzenia naturalnego lub syntetyczny. W materiałach ciernych stosowany jest w dwóch postaciach: pudru (drobnego proszku) lub płatkowej. Zastosowanie grafitu w materiałach ciernych ma dwie funkcje smarowania i zapewnienia odpowiedniej przewodności cieplnej materiału ciernego.

Grafit w postaci płatków posiada lepsze właściwości smarne, natomiast w postaci sproszkowanej charakteryzuje się lepszym przewodnictwem cieplnym. Stosowany najczęściej w postaci sproszkowanej w celu łatwego rozproszenia i przenoszenia ciepła w parze cierniej

<sup>85</sup> Mikael Eriksson, Filip Bergman, Staffan Jacobson, *On the nature of tribological contact in automotive brakes*, Wear, Volume 252, Issues 1–2, 2002 s. 26-36.

ułatwiają rozpraszanie ciepła. Jednak dobra przewodność cieplna może w pewnych warunkach doprowadzić do nagrzania elementy układu hamulcowego zawierające płyn hamulcowy, doprowadzić do jego wrzenia i w konsekwencji spowodować utratę lub zanik siły hamowania. Po połączeniu grafitu z żywicą fenolową tworzy mieszaninę o niskiej wytrzymałości mechanicznej, powoduje to przyspieszone zużycie materiału ciernego.

Siarczki, takie jak siarczek antymonu są obecnie bardzo często stosowane w materiałach ciernych, ponieważ zapewniają dobre smarowanie i posiadają mniejszą przewodność cieplną niż grafit, więc ograniczają przewodzenie ciepła i wzrost temperatury innych elementów układu hamulcowego. Stosuje się poza siarczkiem antymonu, siarczki innych metali jak: miedzi, cyny ołowiu. Siarczki ołowiu i antymonu to związki posiadające właściwości rakotwórcze, dlatego lepszym rozwiązaniem jest stosowanie siarczków miedzi lub cyny.

#### 16.4. Materiały stosowane na tarcze i bębny hamulcowe

Obecnie żeliwo jest najczęściej stosowanym materiałem na tarcze i bębny hamulcowe do pojazdów ciężarowych, autobusów, przyczep do nich i samochodów osobowych przewidzianych do codziennej eksploatacji. Żeliwo jest materiałem tanim o wystarczających parametrach do zastosowania go w pojazdach przewidzianych do codziennej eksploatacji. Materiały stosowane na tarcze hamulcowe w pojazdach zmieniły się w małym stopniu, często stosuje się różne żeliwa o zbliżonych strukturach<sup>86</sup>.

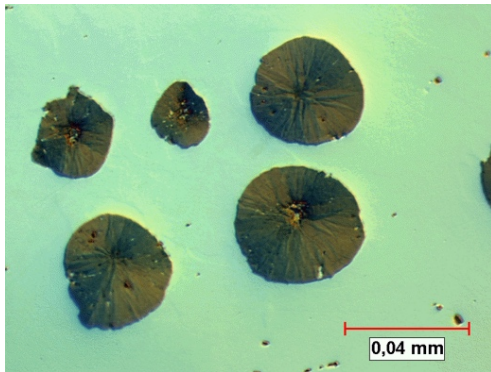
W przypadku szczególnych pojazdów stosuje się zamiast żeliwa metalowe materiały kompozytowe (MMC) jak również najnowocześniejsze ceramiczne materiały kompozytowe (CMC) oparte o technologie węgiel-węgiel (C/C) lub węgiel-węgiel krzemu (C/SiC).

Największy udział materiałów stosowanych na tarcze i bębny hamulcowe pojazdów samochodowych ma żeliwo szare. Najczęściej na tarcze hamulcowe stosuje się dwa rodzaje żeliwa szarego z grafitem: sferoidalnym (żeliwo sferoidalne) oraz płatkowym (żeliwo płatkowe)<sup>87</sup>. Na rysunku 16.1 przedstawiono różnice w budowie strukturalnej poszczególnych rodzajów żeliwa.

---

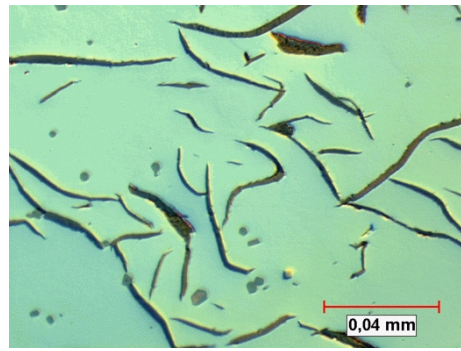
<sup>86</sup> A. Wojciechowski, R. Michalski, A. Gołowicz, A. Eminger, Badanie procesów tarcowych na urządzeniu T-11 metodą trzpień-tarcza wybranych skojarzeń ciernych stosowanych w hamulcach tarczowych pojazdów samochodowych, *Tribologia*. 2012, s. 231–241.

<sup>87</sup> Gołowicz, A., *Wpływ postaci węgla w żeliwie szarym stosowanym na tarcze hamulcowe na współczynnik tarcia*, *Transport Samochodowy*, 2, Instytut Transportu Samochodowego, 2018, s. 45–54.



**a) z grafitem sferoidalnym**

światło zwykłe, pow. 500x,  
stan nie trawiony



**b) z grafitem płatkowym**

kontrast fazowy, pow. 500x,  
stan nie trawiony

Rys. 16.1. Żeliwo szare a) z grafitem sferoidalnym, b) z grafitem płatkowym

Źródło: Wojciechowski, A., Michalski, R., Gołowicz, A., Eminger, A., *Badanie procesów tarcziowych na urządzeniu T-11 metodą trzpień-tarcza wybranych skojarzeń ciernych stosowanych w hamulcach tarczowych pojazdów samochodowych*, *Tribologia*. 2012, s. 231–241.

Po raz pierwszy metalowe materiały kompozytowe (MMC) zostały zastosowane na tarcze hamulcowe w 1995 roku przez amerykańską firmę DurAlcan, w samochodzie marki Lotus w modelu Elise<sup>88</sup>. Firma DurAlcan produkowała również do innych pojazdów tarcze w oparciu o materiały MMC np. do Chrysler Prowler. Zdjęcie takiej tarczy przedstawiono na rysunku 16.2.



Rys. 16.2. Tarcza kompozytowa MMC wykonana przez DURALCAN do samochodu Chrysler Prowler

Źródło: Andrzej Wojciechowski, Jerzy Sobczak „Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych” Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2001. s. 1-162.

Często stosowanym materiałem kompozytowym w układach hamulcowych są stopy aluminium zbrojone w sposób dyspersyjny cząsteczkami lub włóknami np. węgla krzem, tlenków aluminium lub popiołów lotnych z elektrocieplowni o wielkości cząsteczek 10  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$ <sup>89</sup>. Zastosowanie takich materiałów zmniejsza masę pojazdu oraz poprawia właściwości jezdne i zawieszenia pojazdu poprzez zmniejszenie masy nieresorowanej pojazdu.

<sup>88</sup> Andrzej Wojciechowski, Jerzy Sobczak, *Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych*, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2001. s. 1-162. ISBN 83-913045-6-6.

<sup>89</sup> Andrzej Wojciechowski, Jerzy Sobczak, *Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych*, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2001. s. 1-162. ISBN 83-913045-6-6.

Materiały MMC są stosowane w pojazdach nie tylko w układach hamulcowych ale także w innych układach takich jak: napędowym (w tym elementy silnika) i zawieszenia (np. wahacze). Materiały MMC charakteryzują się:

- małą gęstością,
- dobrymi właściwościami mechanicznymi,
- dobrymi właściwościami tribologicznymi (w tym odporność na zatarcie i zużycie),
- zdolnością do tłumienia drgań,
- dobrą przewodnością cieplną,
- prawie bezodpadową produkcją<sup>90, 91</sup>.

Przykładem takich rozwiązań są tarcze wykonane w odlewni w Starachowicach z materiałów kompozytowych na bazie stopów aluminium ze zbrojeniem z węglika krzemu i popiołów lotnych: F3S.20S, F3S.30S, kompozytów ALFA. Porównanie właściwości materiałów kompozytowych przedstawiono w Tabeli 16.6<sup>92</sup>.

Tabela 16.6. Wybrane właściwości żeliwa, stopu AK12 oraz kompozytów MMC

Właściwość Material	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Maksymalna temp. pracy [°C]	Moduł Younga [GPa]	Twardość Brinella [HB]
AK12	290-320	2,72	300	72	do 80
F3S.20S (stop AL+20% obj. SiC)	359(317)	2,77	350	99	105
F3S.30S (stop AL+20% obj. SiC)	225	2,89	480	127	120
ALFA <sup>®</sup> (AK 9 + 20% obj. FA)	280-360	2,64	300	90-95	85
Żeliwo szare	100-400	6,9-7,4	800	80-150	150-230

Źródło: Jerzy Sobczak „Kompozyty metalowe” Instytut Odlewnictwa, Instytut Transportu Samochodowego Kraków, Warszawa 2001.

Kompozytowe tarcze hamulcowe na bazie stopów aluminium (Al) zbrojone węglikiem krzemu (SiC) w ilości 20% i 30% objętości mogą znaleźć zastosowanie w pojazdach samochodowych o niewielkich masach, quadach.

Materiały kompozytowe ceramiczne (C/C, C/SiC) stosowane na tarcze hamulcowe pierwotnie przewidziane były do zastosowań w samochodach wyścigowych oraz sportowych

<sup>90</sup> A. Wojciechowski; R. Michalski; A. Gołowicz; A. Eminger, *Zmiana współczynnika tarcia w funkcji temperatury tarczy hamulcowej kompozytowej w badaniach stanowiskowych*, IX Międzynarodowa Konferencja Hamulcowa „Forum Rozwoju Bezpieczeństwa Pojazdów”, Materiały Konferencyjne (CD), Łódź 2009 r.

<sup>91</sup> Andrzej Wojciechowski, Jerzy Sobczak, *Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych*, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2001. s. 1-162. ISBN 83-913045-6-6.

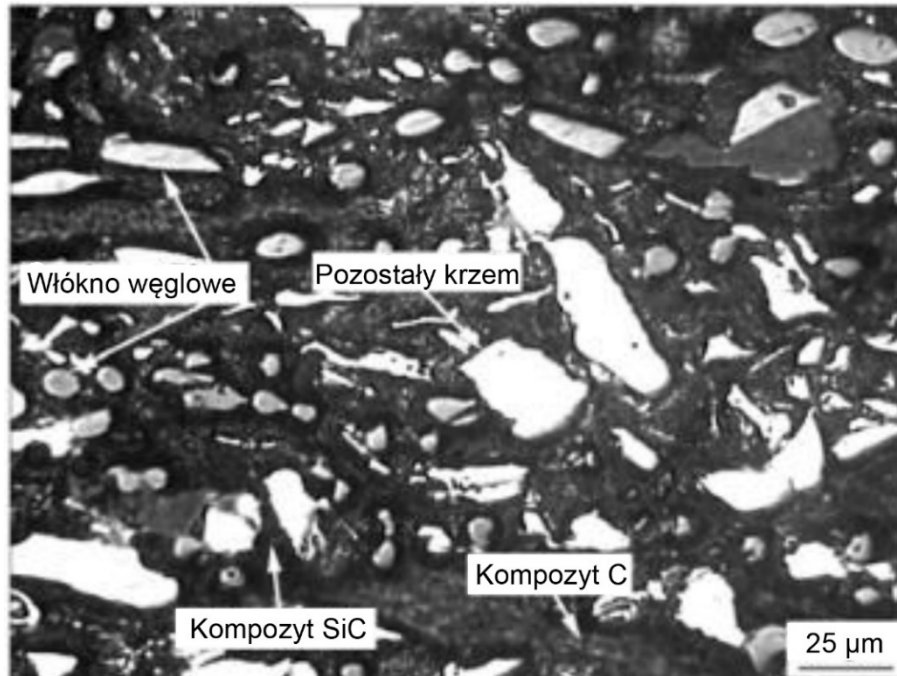
<sup>92</sup> Jerzy Sobczak, *Kompozyty metalowe*, Wydawnictwo Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego, Kraków-Warszawa 2001

z uwagi na dużą odporność tego materiału na obciążenia cieplne i wysokie temperatury. Kompozyty ceramiczne w postaci C/C lub częściej stosowane C/SiC posiadają wiele zalet: mały ciężar właściwy i znaczną odporność cieplną na szoki temperaturowe. Niestety produkcja tarcz hamulcowych z takich materiałów jest kosztowna, czasochłonna i energochłonna. Skomplikowanie procesów produkcyjnych powoduje często powstawanie materiałów zawierających wady, co dyskwalifikuje taką tarczę do eksploatacji. Dodatkowo nie ma możliwości recyklingu takich tarcz. Można je rozdrobnić i wykorzystać jako dodatek do asfaltów.

Cechą szczególną ceramicznego materiału kompozytowego (CMC) typu C/SiC stosowanego na tarcze hamulcowe jest ich charakter ceramiczny wykonany z węglowo-ceramicznego korpusu tarczy hamulcowej i warstw ciernych nałożonych na każdą stronę tarczy zawierającą węglík krzemu (SiC), krzem (Si) oraz wzmocnienie w postaci włókien węglowych (C). Węglík krzemu (SiC) i krzem pierwiastkowy (Si) to główne składniki powierzchni ciernych a wzmocnienie struktury materiału zapewniają włókna węglowe. Węglík krzemu, zapewnia dużą twardość materiału kompozytowego i odporność na ścieranie. Włókna węglowe zapewniają wysoką wytrzymałość mechaniczną i zapewniają odpowiednią wytrzymałość na pękanie. Materiały CMC zapewniają jej odporność na duże obciążenia termiczne, zużycie.

Materiały CMC zawierające węglík krzemu wzmocniony włóknem węglowym łączą zatem użyteczne właściwości węgla wzmocnionego włóknem węglowym (C/C) i ceramiki polikrystalicznego węglíka krzemu<sup>93</sup>.

Struktura materiału kompozytowego zawierającego węglík krzemu w osnowie włókien węglowych przedstawiona jest na rysunku 16.3.



Rys. 16.3. Mikrostruktura materiału CMC

Źródło: Rancsó, Bence, Manufacture and examination of carbon ceramic brakes, 2015.

<sup>93</sup> Rancsó, Bence, Manufacture and examination of carbon ceramic brakes, 2015.

Porównanie właściwości fizycznych kompozytu ceramicznego C/SiC z najczęściej stosowanym na tarcze hamulcowe materiałem - żeliwem szarym GG20 przedstawiono w tabeli 16.7.

Żeliwo GG20 jest żeliwem szarym o płatkowej postaci grafitu. Zawiera 3,2 do 3,4 % węgla (C), 0,5 do 0,8 % manganu (Mn), 2,1 do 2,3 % krzemu (Si), do 0,4% fosforu (P) i 0,12% siarki (S)<sup>94</sup>.

Tabela 16.7. Porównanie właściwości żeliwa szarego GG2 z kompozytem C/SiC

Właściwość	C/SiC materiał na tarcze hamulcowe	Zeliwo szare płatkowe GG20
Gęstość [ $\text{g}/\text{cm}^{-3}$ ]	2,45	7,25
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	20 – 40	200 – 250
Moduł sprężystości [GPa]	30	90 – 110
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	50 – 80	150 – 250
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	0,3	0,3 – 0,8
Odporność na szoki termiczne (drugi współczynnik cieplny) [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	> 27 000	< 5 400
Stabilność termiczna [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1350	ok. 700
Maksymalna temperatura pracy [ $^{\circ}\text{C}$ ]	900	700
Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej [ $\text{K}^{-1}$ ]	2,6 – 3,0	9 - 12
Przewodność cieplna [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	40	54
Ciepło właściwe [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	0,8	0,5

Źródło: Rancsó, Bence, Manufacture and examination of carbon ceramic brakes, 2015.

Jak wynika z powyższej danych materiały CMC stanowią bardzo dobry materiał na tarcze hamulcowe posiadają ok. 3 razy mniejszą gęstość niż żeliwo szare i ok 5 razy wyższą odporność na szoki termiczne. Produkcja tarcz z takich kompozytów jest droga, dlatego tarcze z takiego materiału stosowane jedynie w przypadku pojazdów sportowych w których układy hamulcowe podlegają bardzo dużym obciążeniom cieplnym.

<sup>94</sup> Taslicukur Ozturk Z., Polat S., Atapek, S., Characterization of microstructure and fracture behavior of GG20 and GG25 cast iron materials used in valves, 2012.

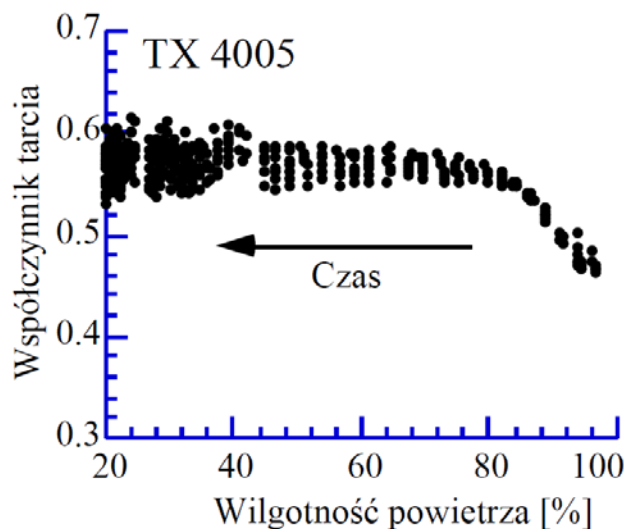


## 17. Wpływ czynników zewnętrznych na współczynnik tarcia materiałów stosowanych w hamulcach ciernych pojazdów

### 17.1. Zależność współczynnik tarcia od wilgotności powietrza

Badania prowadzone przez nad wpływem wilgotności powietrza na współczynnik tarcia w skojarzeniu ciernym układu hamulcowego były prowadzone przez Mikaela Erikssona i opisane w publikacji „Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal”<sup>95</sup>. Na podstawie tam przeprowadzonych badań stwierdzono, że wszystkie testowane klocki hamulcowe zachowują stabilną wartość współczynnika tarcia w zakresie wilgotności powietrza od 20 do 60%. Powyżej wartości wilgotności powietrza wynoszącej 60% występuje zazwyczaj obniżenie wartości współczynnika tarcia. Wynika to z tworzenia się na styku materiału ciernego i powierzchni pracy tarczy hamulcowej różnych tribofilmów. W przypadku tarcia statycznego zaobserwowano wyższy współczynnik tarcia przy niższych wilgotnościach powietrza. W przypadku tarcia dynamicznego nie zaobserwowano istotnej zmiany wartości współczynnika tarcia do wartości 60% wilgotności powietrza. Niektóre materiały cierne zachowują stabilną wartość współczynnika tarcia nawet do 80% wilgotności powietrza. Wyniki tych badań zaprezentowano na rysunku 17.1.

Badania były prowadzone na różnych materiałach okładzin ciernych. Materiał oznaczony TX4005 jest to standardowy materiał cierny używany jako oryginalny materiał okładzin i klocków hamulcowych do samochodu Volvo 850/S70<sup>96</sup>. Powyżej 80% wilgotności powietrza obserwowane jest wyraźne zmniejszenie wartości współczynnika tarcia.



Rys. 17.1. Zależność pomiędzy wilgotnością powietrza a współczynnikiem tarcia w materiale ciernym hamulców o oznaczeniu TX 4005.

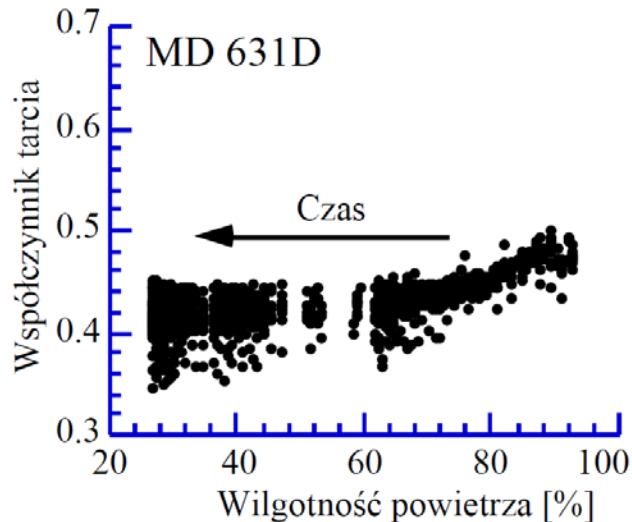
Źródło: Mikael Eriksson, *Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal*, Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology 537, ACTA Universitatis Upsaliensis, 2000, s.39.

<sup>95</sup> Mikael Eriksson, *Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal*, Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology 537, ACTA Universitatis Upsaliensis, 2000, s.38.

<sup>96</sup> Mikael Eriksson, *Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal*, Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology 537, ACTA Universitatis Upsaliensis, 2000, s.14.

Drugim badanym materiałem był oznaczony MD 631D, również standardowy materiał cierny stosowany w hamulcach pojazdów z dodatkiem 8% siarczku miedzi ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ).

W przypadku tego materiału obserwuje się stabilną wartość współczynnika tarcia do wilgotności powietrza wynoszącej 60% a nawet 70%. Natomiast w przeciwieństwie do materiały TX 4005 obserwowany jest wzrost wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem wilgotności powietrza. Zależność ta przedstawiona jest na rysunku 17.2.



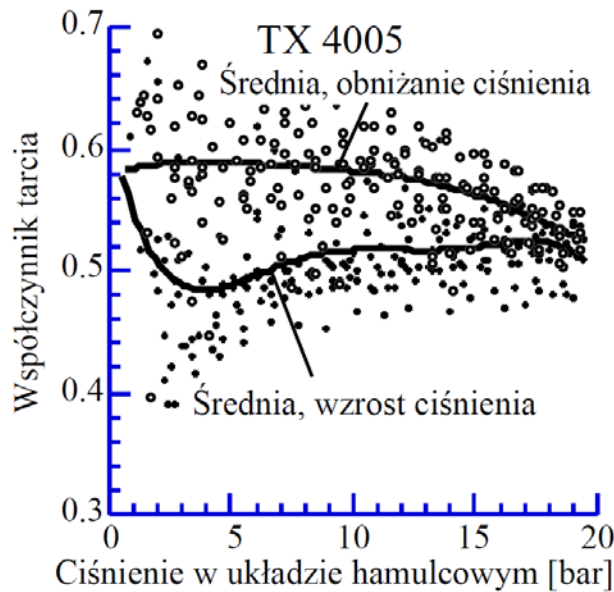
Rys. 17.2. Zależność pomiędzy wilgotnością powietrza a współczynnikiem tarcia w materiale ciernym hamulców o oznaczeniu MD631D (materiał MD600 z dodatkiem 8%  $\text{Cu}_2\text{S}$ )

Źródło: Mikael Eriksson, *Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal*, Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology 537, ACTA Universitatis Upsaliensis, 2000, s.39.

Na podstawie przeprowadzonych badań można uznać, że dla wartości wilgotności powietrza występujących w normalnym użytkowaniu pojazdu (do 70% wilgotności powietrza) parametr ten może zostać pominięty, z uwagi na niewielkie jego zmiany w takich warunkach. Należy podkreślić, że podczas jazdy w warunkach znacznych opadów atmosferycznych warunki pracy mechanizmów hamulcowych w odniesieniu do wilgotności powietrza mogą przekraczać 80%. Przy takiej wartości wilgotności powietrza należy uwzględnić wpływ jej w algorytmie estymatora hamowania, z uwagi na zmianę współczynnika tarcia o około 20%.

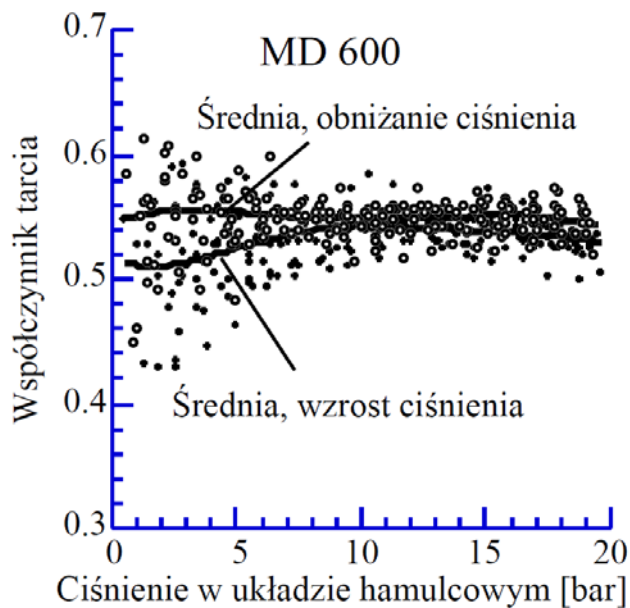
## 17.2. Zależność współczynnika tarcia od zmian ciśnienia w układzie hamulcowym

W przypadku zmiany ciśnienia występuje histereza pracy, a zaobserwowane zmiany wynikają z procesów zachodzących na powierzchni kontaktu tarczy z materiałem ciernym. Zmiany zostały przedstawione na rysunku 17.3 oraz rysunku 17.4.



Rys. 17.3. Zależność pomiędzy zmianami ciśnienia w układzie hamulcowym a współczynnikiem tarcia w materiale ciernym hamulców o oznaczeniu TX 4005

Źródło: Mikael Eriksson, *Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal*, Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology 537, ACTA Universitatis Upsaliensis, 2000, s.38.



Rys. 17.4. Zależność pomiędzy zmianami ciśnienia w układzie hamulcowym a współczynnikiem tarcia w materiale ciernym hamulców o oznaczeniu MD 600

Źródło: Mikael Eriksson, *Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal*, Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology 537, ACTA Universitatis Upsaliensis, 2000, s.38.

Podobne wyniki otrzymano podczas badań na stanowisku bezwładnościowym znajdującym się w Laboratorium Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej i zamieszczone w pracy magisterskiej<sup>97</sup>. W stanowisku bezwładnościowym do badań materiałów ciernych i hamulców pojazdów elementem gromadzącym energię jest wirująca masa. Energia kinetyczna zgromadzona w wirującej masie odpowiada energii kinetycznej pojazdu odniesionej do jednego koła. Energia kinetyczna wirującej masy była

<sup>97</sup> Adam Pietrzak, Artur Gołowicz, *Praca magisterska: Badanie wpływu modyfikacji powierzchni cierniej tarczy hamulcowej na parametry hamowania*, Politechnika Warszawska, Warszawa 2004.

rozpraszana w wyniku procesu tarcia w hamulcach, tak jak ma to miejsce w rzeczywistości. Prawie cała energia kinetyczna zamieniana jest na ciepło, z którego część jest gromadzona w tarczy hamulcowej i innych elementach układu, a pozostała część ciepła rozpraszana poprzez oddawanie go do otoczenia.

Stanowisko, na którym przeprowadzono badanie posiadało układ hamulcowy od samochodu Ford Transit i do tego pojazdu oraz obciążenia osi dostosowaną masę wirującą (o odpowiednim momencie bezwładności). Komputer sterujący i rejestrujący wyniki posiadał kartę pomiarową oraz specjalnie napisany program do obsługi stanowiska. Program pozwalał oprócz rejestracji i zapisu wyników na podgląd przebiegów temperatury, prędkości obrotowej, i momentów hamujących dla hamulca tarczowego i bębnowego. Zdjęcia stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 17.5.



Rys. 17.5. Widok ogólny stanowiska badawczego.

Prędkość obrotowa stanowiska wynosi do 500 obr/min co odpowiada prędkości pojazdu kategorii  $N_1$  wynoszącej około 60 km/h. Stanowisko umożliwia badania skuteczności działania mechanizmów hamulcowych w szczególności skojarzenia ciernego. Natomiast czujniki zamontowane na stanowisku umożliwiały pomiar następujących wielkości:

- siły reakcji hamulca przeliczanej na moment hamujący mechanizmu hamulca,
- ciśnienia w układzie uruchamiania (przeliczone na ciśnienie hydrauliczne w układzie hamulcowym),
- prędkości obrotowej,
- temperatury pracy tarczy hamulcowej.

Na stanowisku można było także badać wpływ charakterystyki narastania siły na pedale hamulca, powodującej wzrost ciśnienia w układzie hamulcowym oraz wpływ tych zmian przebieg parametrów. Na podstawie zmierzonych wielkości można było wyznaczyć w sposób pośredni współczynnik tarcia w funkcji pozostałych parametrów. Stanowisko było również wykorzystane do badań zużycia okładzin ciernych lub wkładek ciernych w procesie sterowanego hamowania.

Zacisk hamulca tarczowego i tarcza kotwiczna hamulca bębnowego osadzone były obrotowo, niezależnie od siebie. Podczas hamowania powstawały momenty reakcyjne, które były przenoszone za pomocą dźwigni na ramę stanowiska. Dźwignie na końcu posiadają czujniki siły, co w połączeniu ze znaną długością ramienia pozwala zmierzyć moment hamujący.

Nacisk na tłoczek hydraulicznej pompy hamulcowej realizowany był poprzez siłownik pneumatyczny. Ciśnieniem w siłowniku i charakterystyką napełniania siłownika sterował

zawór proporcjonalny. Pozwalał na utrzymywanie stałego ciśnienia w siłowniku, a więc i stałego nacisku na tłoczek pompy hamulcowej. Rozwiązanie takie pozwalało również utrzymywać ciśnienie hydrauliczne w układzie hamulcowym na stałym poziomie, więc i stałego nacisku materiału ciernego do tarczy hamulcowej.

Pomiar prędkości obrotowej odbywał się za pomocą czujnika indukcyjnego. Na wale napędowym pomiędzy silnikiem a masą bezwładną umieszczona była tarcza sygnałowa. Dodatkowo mierzona była temperatura tarczy za pomocą metody bezstykowej – pirometru. Mierzona w ten sposób temperatura jest temperaturą średnią na mierzonej części powierzchni ślizgowej (roboczej).

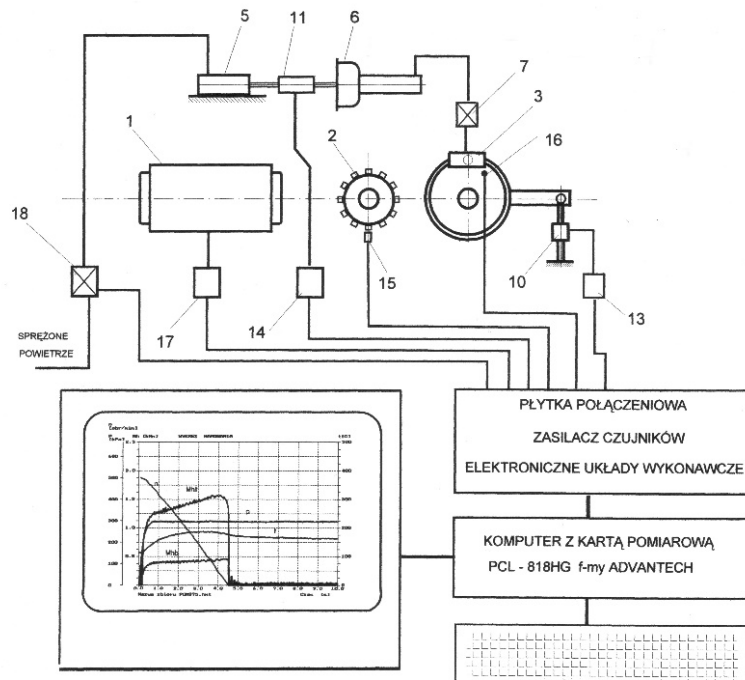
Stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 17.6 jest w pełni zautomatyzowane, a głównym elementem sterującym i rejestrującym był komputer PC, przebiegi mierzonych wartości przedstawiane są na bieżąco na ekranie monitora, w postaci wykresów w funkcji czasu.

Zakres możliwych do zadania parametrów pracy stanowiska takich jak prędkość obrotowa, ciśnienie pneumatyczne w siłowniku wynosił:

- prędkość obrotowa 0 – 500 obr/min,
- ciśnienie w układzie pneumatycznym 0 – 0,5 MPa.

Układ sterujący włączał silnik elektryczny i po rozpedzeniu stanowiska do obrotów ok 10% wyższych niż zadane następowało wyłączenie zasilania silnika i oczekiwanie na spadek prędkości obrotowej do wartości zadanej. Wtedy następowało wystereowanie zaworu proporcjonalnego siłownika pneumatycznego, który naciskał na tłoczek pompy hamulcowej.

Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 17.6.



1 – silnik elektryczny, 2 – koło zębate, 3 – hamulec tarczowy, 5 – siłownik pneumatyczny, 6 – pompa hamulcowa, 7 – ręczny zawór odcinający, 10 – czujnik siły, 13 – wzmacniacz pomiarowy, 15 – czujnik prędkości obrotowej, 16 – pirometr, 19 – elektropneumatyczny zawór proporcjonalny

Rys. 17.6. Schemat ogólny stanowiska badawczego

Pomiary współczynnika tarcia pomiędzy materiałem ciernym a tarczą hamulcową wykonywano w oparciu o pomiar momentu hamującego  $M_h$  przeliczonego na siłę obwodową działającą na tarcze  $T_h$  na efektywnym promieniu tarcia  $r_e$  przedstawiony graficznie na Rys. 17.7. W oparciu o wymiary geometryczne układu hamulcowego oraz ciśnienie w układzie sterowania tłokiem pompy hamulcowej (tj. ciśnienie w układzie hydraulicznym oraz średnicę tłoczka w zacisku hamulcowym określono siłę nacisku klocka hamulcowego na tarcze hamulcową  $F$ .

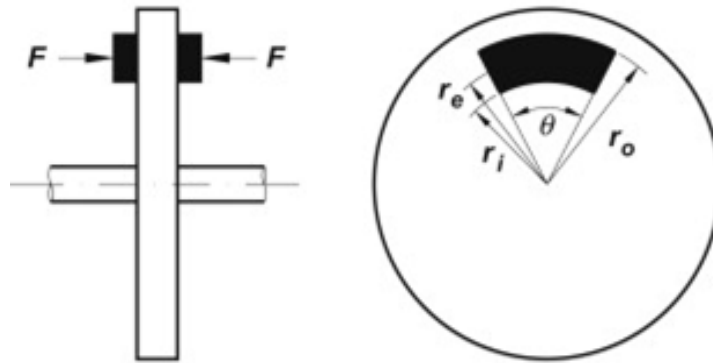
$$T_h = F\mu$$

$$M_h = F\mu r_e$$

Zgodnie z literaturą efektywny promień tarcia  $r_e$  oblicza się następującej zależności:

$$r_e = \frac{2(r_o^3 - r_i^3)}{3(r_o^2 - r_i^2)}$$

gdzie:



Rys. 17.7. Efektywny promień tarcia

Źródło: Peter R.N.Childs, *Chapter 13 - Clutches and Brakes*, Mechanical Design Engineering Handbook, 2014, s.513-564.

Na podstawie wartości ciśnienia w siłowniku sterowania tłoczkiem pompy hamulcowej z uwzględnieniem wymiarów geometrycznych tłoka siłownika pneumatycznego oraz tłoczka pompy hamulcowej wyliczono ciśnienie w układzie hydraulicznym hamulca. Średnica tłoczka w zacisku hamulcowym była znana, więc obliczono siłę nacisku materiału ciernego  $F$  na tarczę hamulcową. Na tej podstawie wyznaczono wartość średniego współczynnika tarcia.

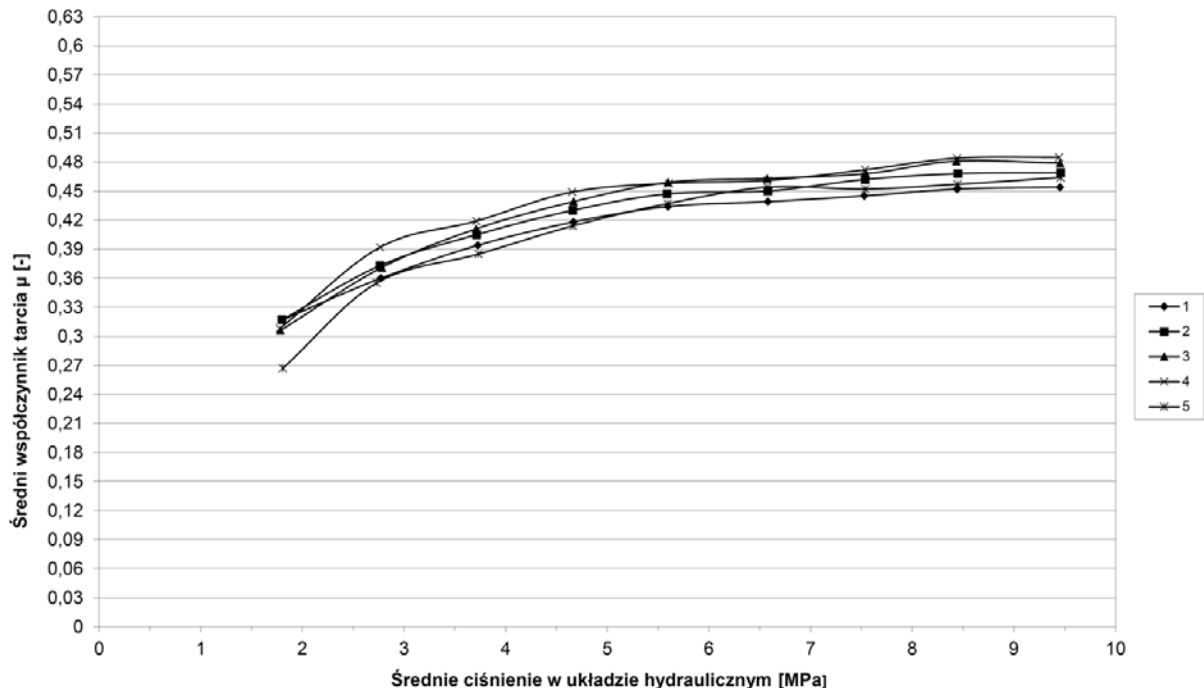
Każde badanie powtarzano 5 razy. Wyniki otrzymano dla standardowego materiału ciernego zgodnego z Regulaminem ONZ nr 90 znanego producenta oraz standardową tarczą hamulcową wykonaną z żeliwa tego samego producenta. Należy dodać, że tarcza hamulcowa i materiał cierny były wyprodukowane przez jednego z czołowych producentów materiałów i elementów układów hamulcowych do pojazdów użytkowych i sportowych.

Badanie to miało na celu sprawdzenie zachowania się pary ciekiej w funkcji zmiany ciśnienia hydraulicznego w układzie hamulcowym (cylinderku hamulcowym). Wykonanie takiej charakterystyki pozwoliło na sprawdzenie czy wzrost momentu hamującego wynika tylko ze wzrostu nacisków jednostkowych, czy na ten wzrost wpływają inne czynniki zależne od nacisku.

Badanie wykonane było poprzez serie hamowań przy następujących parametrach pracy stanowiska:

- prędkość początkowa  $n = 300$  obr/min, co odpowiadało prędkości pojazdu 36 km/h,
- temperatura początkowa tarczy hamulcowej przed każdym hamowaniem wynosiła około  $100^{\circ}\text{C}$ ,
- ciśnienie w siłowniku pneumatycznym było zmieniane od 100 kPa do 500 kPa co 50 kPa odpowiadało ciśnieniu w hydraulicznym układzie hamulcowym od 1,8 MPa do 9,5 MPa.

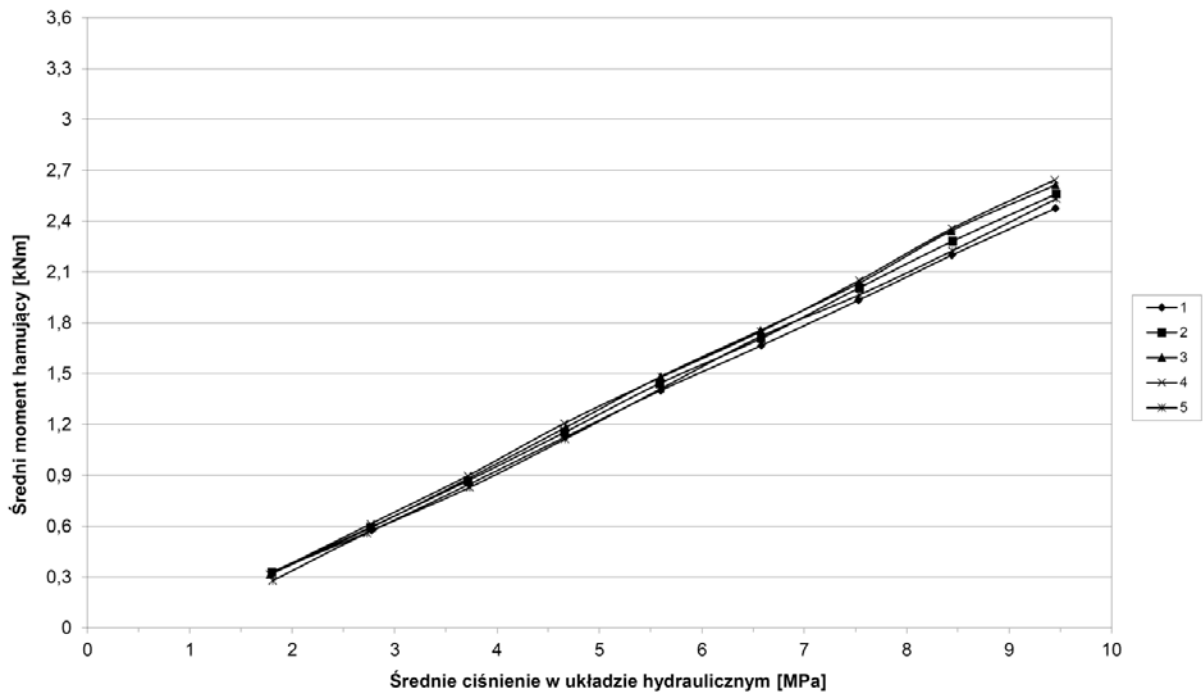
Seria składała się z 9 hamowań. Kolejno przy coraz wyższym ciśnieniu w siłowniku do wartości ciśnienia hydraulicznego 9,5 MPa. Uśredniano wartość ciśnienia średnią arytmetyczną, nie brano pod uwagę spadku prędkości podczas narastania siły hamowania<sup>98</sup>. Wyniki zamieszczono na rysunku 17.8 i rysunku 17.9.



Rys. 17.8. Wyniki badań współczynnika tarcia w hamulcu tarczowym w funkcji ciśnienia

W celu lepszego przedstawienia praktycznie liniowej w skali makro charakterystyki momentu hamującego w funkcji ciśnienia w układzie hamulcowym dla hamulców tarczowych sporządzono wykres zależności momentu hamującego hamulca w funkcji ciśnienia w układzie hydraulicznym. Wyniki zamieszczono na rysunku 17.9.

<sup>98</sup> Adam Pietrzak, Artur Gołowicz, *Praca magisterska: Badanie wpływu modyfikacji powierzchni ciernej tarczy hamulcowej na parametry hamowania*, Politechnika Warszawska, Warszawa 2004.

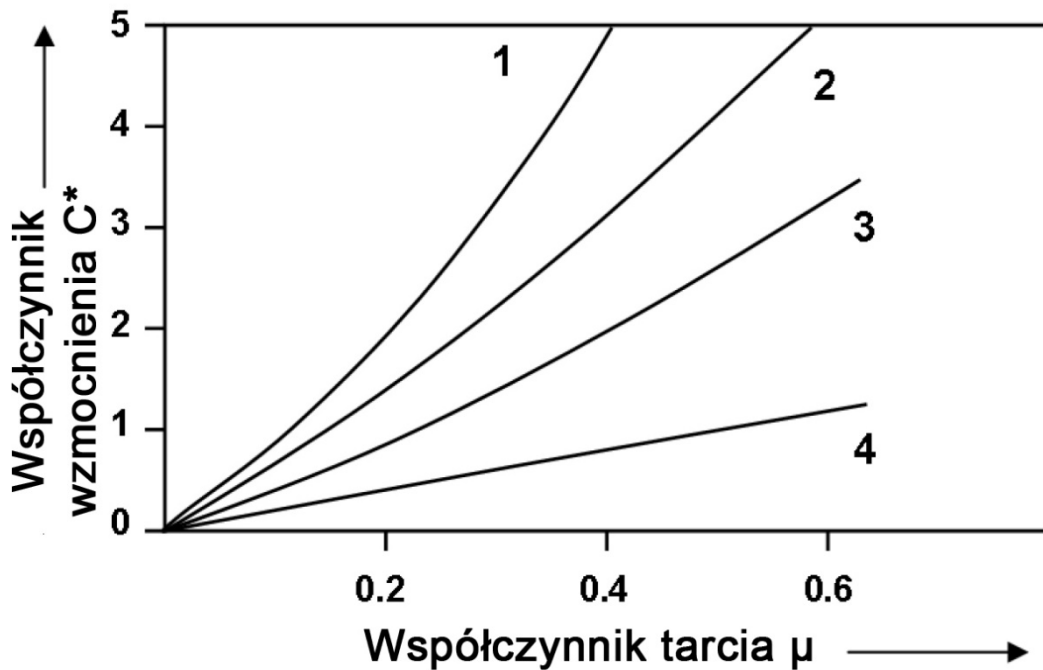


Rys. 17.9. Wyniki badań momentu hamowania hamulca tarczowego w funkcji ciśnienia w układzie hamulcowym dla hamulca tarczowego

Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że w zakresie wysokich ciśnień w układzie hamulcowymi nacisków jednostkowych powyżej 6 MPa do 9,5 MPa współczynnik tarcia materiału ciernego w hamulcach jest praktycznie stały. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w skali rzeczywistej dla hamulców tarczowych moment hamowania jest praktycznie wprost proporcjonalny (liniowy) do nacisku materiału ciernego na tarczę hamulcową.

Bębnowe mechanizmy hamulcowe stosowane w samochodach ciężarowych i autobusach oraz na tylnej osi samochodów osobowych i ciężarowych o maksymalnej masie do 3 500 kg mają z uwagi na konstrukcję różne charakterystyki. W przypadku autobusów rozwiązania z hamulcami bębnowymi stosuje się rzadko jednak w przypadku samochodów ciężarowych są nadal stosowane szczególnie dla pojazdów pracujących w trudnych warunkach terenowych. Obecnie w pojazdach praktycznie stosuje się hamulce bębnowe o konstrukcji typu Simplex z krzywką. To rozwiązanie charakteryzuje się najbardziej zbliżoną do liniowej charakterystyką wzmocnienia (współczynnika  $C^*$ ). Inne rozwiązania układu hamulców bębnowych są nie stosowane właśnie z uwagi na ich znaczną nieliniowość. Zależność tą potwierdza wykres przedstawiony na rysunku 17.10, gdzie przedstawiono schematycznie współczynnik wzmocnienia hamulca w zależności od wartości współczynnika tarcia pomiędzy materiałem ciernym a bębniem hamulcowym. Numerem 4 oznaczono charakterystykę hamulca tarczowego, która jak wykazano poprzednio jest liniowa. Charakterystyka oznaczona numerem 3 odnosi się do hamulca bębnowego o konstrukcji typu Simplex.





Charakterystyki mechanizmów hamulcowych: 1 – Duo-servo; 2 – Duplex; 3 – Simplex; 4 – hamulec tarczowy  
Rys. 17.10. Współczynnik wzmocnienia hamulca bębnowego w zależności od jego typu

Źródło: Pevec Miha, Oder Grega, Potrč Iztok, Šraml Matjaž, *Detailed analysis of drum brake squeal using complex eigenvalue analysis*, Journal of Vibroengineering, Vol. 15, Issue 3, 2013, s. 1365-1377

Liniowa charakterystyka jest ważna w przypadku sterowania układem hamulcowym i regulacją siły hamowania przez układ ABS. Z tego też powodu w pojazdach stosuje się hamulce bębnowe typu Simplex.

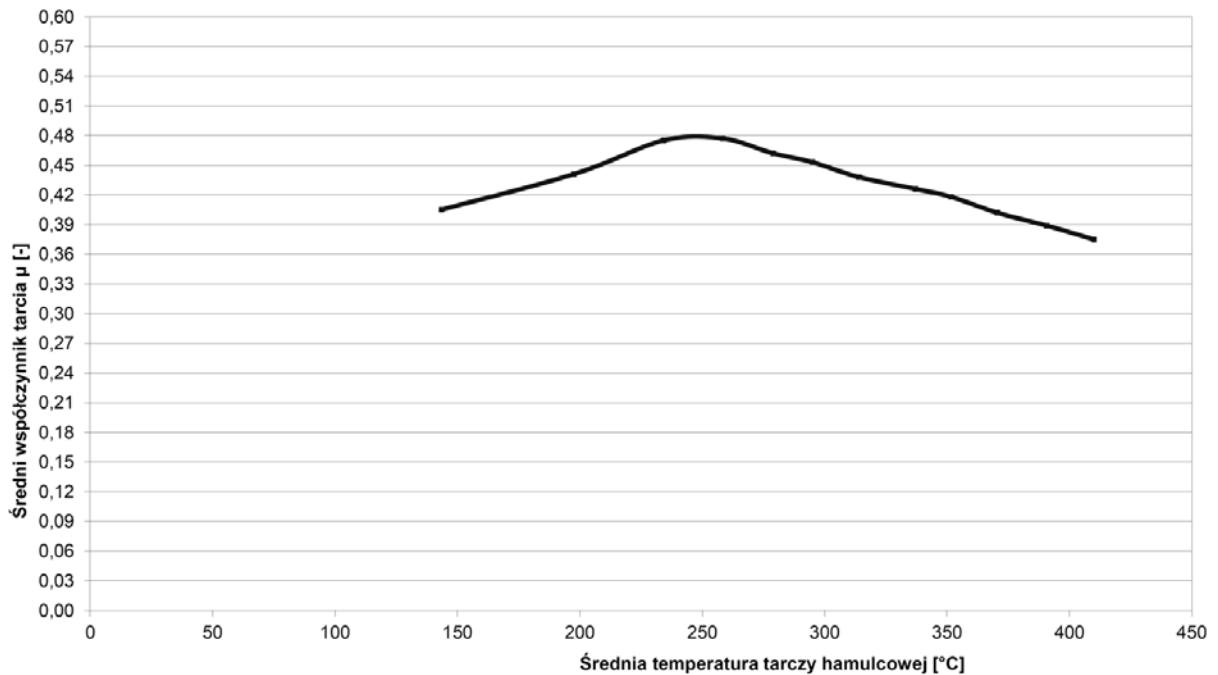
### 17.3. Zależność wartości współczynnika tarcia od zmian temperatury powierzchni roboczej tarczy lub bębna hamulcowego

W ramach prowadzonych badań wykonano również badania charakterystyki materiału w funkcji temperatury pracy tarczy hamulcowej. Takie badania przeprowadza się również w ramach badań homologacyjnych tzw. oryginalnych materiałów ciernych układów hamulcowych pojazdów (Regulamin ONZ nr 13 i 13 H) oraz dla zamiennych (nieoryginalnych) materiałów ciernych na zgodność z Regulaminem ONZ nr 90.

Badania tak jak poprzednio przeprowadzono na stanowisku bezwładnościowym na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych. Badania rozpoczynano w momencie, kiedy temperatura tarczy hamulcowej była niższa niż 100°C. Następnie wykonywano kolejno 13 hamowań przy pełnej prędkości obrotowej stanowiska i maksymalnym ciśnieniu w układzie uruchamiania hamulców co odpowiadało ciśnieniu w hydraulicznym układzie uruchamiania hamulca wynoszącym 9,5 MPa. Takie ciśnienie jest w układzie hamulcowym w momencie hamowania pojazdu z maksymalnym opóźnieniem.

Na podstawie otrzymanych wyników określono zależność wartości współczynnika tarcia materiałów ciernych od temperatury. W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano wyraźnie zmniejszenie współczynnika tarcia materiału ciernego stosowanego dla hamulca tarczowego przy temperaturze około 200 – 250°C, po przekroczeniu tej temperatury następuje dość nagle zmniejszenie wartości współczynnika tarcia. Podobne zachowanie obserwuje się dla

materiałów ciernych stosowanych w hamulcach bębnowych pojazdów ciężarowych. Uśrednione wyniki badań zamieszczono w formie wykresu na rysunku 17.11.



Rys. 17.11. Średnia wartość współczynnika tarcia w hamulcu tarczowym w funkcji średniej temperatury tarczy hamulcowej

Na podstawie przeprowadzonych badań można jednoznacznie stwierdzić, że niezbędne jest uwzględnienie charakterystyki temperaturowej materiału ciernego dla estymatora hamowania. Podczas długotrwałego używania hamulców ciernych można zauważyć zmniejszenie wartości momentu hamującego hamulca pojazdu wynikające głównie ze zmniejszenia wartości współczynnika tarcia materiału ciernego na skutek wzrostu temperatury. Jest to zjawisko dobrze znane w przypadku hamulców nazywane często zjawiskiem zaniku (fadingu). W ramach badań homologacyjnych materiałów ciernych taka charakterystyka jest wyznaczana zgodnie z Regulaminem ONZ nr 13, 13H oraz 90. Regulamin ONZ stosowany jest dla zamiennych materiałów ciernych hamulców hamulcowych, a Regulamin ONZ nr 13 i 13H ma zastosowanie do pojazdów i oryginalnych materiałów ciernych. Regulamin ONZ nr 90 dopuszcza odchylenia wartości momentu hamującego okładzin zamiennych OEM lub OEQ w stosunku do oryginalnych (OE).

## 18. Estymator hamowania

### 18.1. Zarys algorytmu sterowania

Sposób działania estymatora hamowania wprowadzonego za pomocą dodatku 18 do 11 serii poprawek do Regulaminu ONZ nr 13 nie jest określony prawnie. To powoduje pełną dowolność producentów realizacji tej funkcji i brak jednoznacznej procedury oceny jego działania przez jednostki techniczne przeprowadzające testy homologacyjne. Jednocześnie nie jest wskazany sposób realizacji tej funkcji. W pracy postanowiono nakreślić podstawy działania takiego estymatora i parametry pracy układu hamulcowego jakie powinny być uwzględnione w celu oszacowania zdolności uzyskania opóźnienia przez pojazd. Takie rozwiązanie pozwoli ostrzec kierowcę o możliwej utracie siły hamowania oraz może być wykorzystane w systemach ADAS samochodów autonomicznych.

Pojazd może być wyposażony w okładziny cierne różnych marek. Materiał cierny wykazany w badaniach homologacyjnych pojazdu na zgodność z Regulaminem ONZ nr 13, deklaruje producent pojazdu jako wyposażenie oryginalne (OE). Natomiast homologacja zamiennych okładzin hamulcowych jest udzielana na zgodność z Regulaminem ONZ nr 90. Zgodnie z zapisami Regulaminu ONZ nr 90 dla okładzin badanych przeprowadza się ocenę i badanie skuteczności hamowania „na zimno” badanie typu 0 oraz badanie czułości na prędkość oraz badanie typu I i II. Zgodnie z wymaganiami Regulaminu ONZ nr 90 różnica w parametrach dla badania skuteczności „na zimno” nie może różnić się o więcej niż 15% od wartości uzyskanych przy zastosowaniu oryginalnego zespołu okładzin hamulcowych lub oryginalnej okładziny hamulca bębnowego. W przypadku badań tzw. „czułość na prędkość” średnie wartości pełnego opóźnienia hamowania pojazdu zarejestrowane podczas 3 badań hamowania: z prędkości 40 km/h do 20 km/h, z prędkości 60 km/h do 40 km/h oraz z prędkości 80 km/h do 60 km/h przy temperaturze hamulców  $\leq 100^{\circ}\text{C}$ . Wartość zarejestrowanego opóźnienia hamowania pojazdu dla prędkości najwyższej nie może się różnić o więcej niż 25% od wartości zarejestrowanej podczas hamowania z niższymi prędkościami.

Na podstawie analizy literatury i badań własnych wytypowano parametry jakie należy uwzględnić w algorytmie estymatora hamowania. Parametrem najważniejszym, który najbardziej wpływa na zmianę momentu tarcia w hamulcach pojazdu jest temperatura oraz wilgotność powietrza. Ostatnia wartość szczególnie ma znaczenie dla wilgotności powyżej 80% (m.in. opady atmosferyczne).

Biorąc po uwagę zaproponowane podczas prac nad systemami ALKS (Automated Lane Keeping Systems) w jednej z propozycji system miał utrzymywać pas ruchu, a w celu zapewnienia bezpieczeństwa osób także wykrywać trudne warunki jazdy np. opady deszczu. Wykrycie opadów deszczu miało być realizowane przez czujnik deszczu, jeżeli pojazd jest wyposażony lub poprzez zarejestrowanie uruchomienia przez kierowcę wycieraczek. ALKS jest to system zautomatyzowanej jazdy już dopuszczony prawnie<sup>99</sup>. Działanie systemu umożliwia automatyczną i długotrwałe utrzymywanie pasa ruchu jednak tylko

---

<sup>99</sup> Regulamin ONZ nr 157 Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems (E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.156, Date of entry into force: 22 January 2021).

w autostradowych warunkach jazdy. Jednocześnie ze względów bezpieczeństwa ograniczono maksymalną prędkość pojazdu podczas korzystania z tego systemu do 60 km/h.

Zgodnie z wytycznymi dotyczącymi stosowanych systemów bezpieczeństwa w pojazdach w procesie homologacji pojazdy kategorii M<sub>1</sub> i N<sub>1</sub> od 6 lipca 2022 r. muszą być wyposażone w rejestrator zdarzeń (Event Data Recorder) tzw. „czarna skrzynkę”. Wymaganie to wynika z **Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/2144 z dnia 27 listopada 2019 r. W sprawie wymogów dotyczących homologacji typu pojazdów silnikowych i ich przyczep oraz układów, komponentów i oddzielnych zespołów technicznych przeznaczonych do tych pojazdów, w odniesieniu do ich ogólnego bezpieczeństwa oraz ochrony osób znajdujących się w pojeździe i niechronionych uczestników ruchu drogowego, zmieniające rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/858 oraz uchylające rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 78/2009, (WE) nr 79/2009 i (WE) nr 661/2009 oraz rozporządzenia Komisji (WE) nr 631/2009, (UE) nr 406/2010, (UE) nr 672/2010, (UE) nr 1003/2010, (UE) nr 1005/2010, (UE) nr 1008/2010, (UE) nr 1009/2010, (UE) nr 19/2011, (UE) nr 109/2011, (UE) nr 458/2011, (UE) nr 65/2012, (UE) nr 130/2012, (UE) nr 347/2012, (UE) nr 351/2012, (UE) nr 1230/2012 i (UE) 2015/166.**

Zgodnie z tym Rozporządzeniem UE wprowadza się zakaz rejestracji pojazdów nie wyposażonych w EDR tzw. „czarną skrzynkę” dla pojazdów kategorii M<sub>1</sub> i N<sub>1</sub> od 7 lipca 2024 roku. Dla pojazdów pozostałych kategorii w procesie homologacji jest to 7 stycznia 2026 roku, a zakaz rejestracji od 7 stycznia 2029 r.

Wymagania techniczne dotyczące rejestratora zdarzeń znajdują się w przyjętym 21 października 2021 Regulaminie ONZ nr 160<sup>100</sup>. Dokument zawiera wytyczne odnośnie rejestrowanych danych. Urządzenie EDR rejestruje m.in. użycie hamulca roboczego, prędkość pojazdu, zmianę prędkości wzdłużnej i poprzecznej pojazdu. Urządzenie jest wyposażone również w akcelerometr w kierunku poprzecznym i wzdłużnym. Rejestrowane jest też opóźnienie pojazdu. Układy hamulcowe określają masę pojazdu wyposażonego w zawieszenie pneumatyczne (na podstawie ciśnienia w poduszkach zawieszania) lub w przypadku zawieszenia mechanicznego (na podstawie ugięcia zawieszania). Dodatkowo moduł sterowania hamulcami monitoruje ciśnienie w zbiornikach powietrza układu hamulcowego oraz ciśnienie w układzie sterowania i uruchamiania hamulców. Ciśnienie w układzie uruchamiania to jest wprost proporcjonalne do zadanego opóźnienia hamowania.

Te dane rejestrowane przez EDR oraz układy hamulcowe mogą być wykorzystane jako dane wejściowe do estymatora hamowania. Na podstawie tych algorytm będzie mógł oszacować maksymalne możliwe do osiągnięcia przez pojazd opóźnienie hamowania uzyskane za pomocą hamulców ciernych. Opracowany algorytm stanowi zarys i wstępny projekt takiego rozwiązania. Przesłanki prawne nie określają sposobu realizacji działania estymatora hamowania, jedynie określają funkcje jakie ma pełnić. Rozwój systemu EDR w pojazdach powoduje, że pojazdy będą musiały być wyposażone w czujniki, których pomiary będą mogły być też wykorzystane do funkcji szacującej pozostałe możliwe do uzyskania przez pojazd opóźnienie hamowania.

---

<sup>100</sup> Regulamin ONZ nr 160, Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Event Data Recorder, (E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.159, Date of entry into force: 21 October 2021).

Na podstawie przeprowadzonej analizy wytypowano parametry jakie należy uwzględnić w algorytmie. W obliczeniach trzeba uwzględnić charakterystykę hamowania pojazdu, rozkład nacisków kół pojazdu oraz geometrię układu hamulcowego.

Jedną z podstawowych jest zależność siły hamowania pojazdu od temperatury. Do uzyskania takiej charakterystyki wystarczy przekształcenie charakterystyki wartości współczynnika tarcia materiału ciernego w funkcji temperatury. Takie charakterystyki są otrzymywane podczas badań homologacyjnych materiałów ciernych i na tej podstawie możliwe jest uzyskanie zbioru dyskretnego  $\mu(T)$ . Charakterystyka będzie stanowiła dane wejściowe do określenia pozostałej siły hamowania. Taka charakterystyka mogłaby być łatwo wprowadzana do urządzenia podczas każdej wymiany elementów układu hamulcowego. Bardzo często układy ABS stosowane w różnych pojazdach są takie same, jednak z uwagi na różną budowę układu hamulcowego wymagają innej charakterystyki pracy. Charakterystyka jest wprowadzana przez producenta modułu w zależności od modelu pojazdu w którym dany moduł będzie zamontowany. Dobrym przykładem są producenci przyczep i naczep. Producent pojazdu stosuje moduł modulatora hamowania zintegrowany z ABS, który nie posiada wprowadzonej charakterystyki. W zależności do jakiej kompletacji pojazdu go zamontuje (liczba osi, rodzaj i typ zawieszenia, typ mechanizmu hamulcowego, rozmiar ogumienia), producent pojazdu wprowadza w niego odpowiednią charakterystykę (program) dostarczony przez producenta modułu na podstawie obliczeń wykonanych przez producenta układu modułu.

Na podstawie wartości współczynnika tarcia oraz charakterystykami mechanizmu hamulcowego: wymiarami, wartością współczynnika wzmocnienia ( $C^*$ ) i można w sposób stosunkowo obliczyć moment hamowania a uwzględniając rozmiar ogumienia obliczyć siłę hamowania.

Układy sterowania hamulcami pojazdów ciężarowych i autobusów mają kontrolę aktualnego obciążenia pojazdu. Pomiar masy przypadającej na poszczególne osie ma znaczenie dla ustalania ciśnienia podczas hamowania w elementach wykonawczych pneumatycznego układu hamulcowego. W przypadku autobusów i samochodów ciężarowych wyposażonych w pneumatyczny układ zawieszenia szacowanie obciążenia pojazdu (jego masy) jest przeprowadzane w oparciu o ciśnienie w elementach zawieszenia – poduszkach powietrznych. Natomiast w pojazdach wyposażonych w mechaniczny układ zawieszenia pomiar masy pojazdu jest realizowany poprzez pomiar ugięcia zawieszenia.

Prędkość poślizgu materiału ciernego wynika wprost i jest proporcjonalna do prędkości obrotowej kół mierzonej za pomocą czujników systemu ABS pojazdu, przeliczona poprzez proste zależności z prędkości obrotowej koła na prędkość liniową wynikającego z efektywnego promienia tarcia hamulca. Jednak jak wynika z przeprowadzonych badań prędkość poślizgu ma niewielki wpływ na współczynnik tarcia materiału ciernego mechanizmu hamulca więc może być pominięta.

Algorytm estymatora hamowania powinien posiadać funkcje uczenia maszynowego tzw. „self-learning algorithm”, który umożliwia „naukę automatyczną” poprzez doświadczenie, czyli ekspozycję na dane. Algorytmy uczenia maszynowego budują model matematyczny na podstawie przykładowych danych, zwanych zbiorem uczącym, w celu prognozowania lub podejmowania decyzji bez bycia zaprogramowanym przez człowieka do tego celu.

Algorytm uczenia maszynowego można by wykorzystać do określenia zależności opóźnienia hamowania pojazdu w zależności od pozostałych zmiennych i na tej podstawie określać możliwe do uzyskania przez pojazd opóźnienie hamowania pojazdu. Parametry jakie powinien uwzględniać algorytm uczenia maszynowego to opóźnienie pojazdu w funkcji

ciśnienia i temperatury w elementach wykonawczych układu hamulcowego, obciążenia pojazdu i wilgotności powietrza. W stosunku do ostatniej wartości można jedynie uwzględnić korektę dla wartości wilgotności powietrza powyżej 80%. Pojazd, na podstawie analizy uzyskiwanego opóźnienia hamownia w zależności od wyżej wymienionych parametrów dokonywałby regresji<sup>101</sup>. Na podstawie analizy dostarczonych danych mogłoby zostać przeprowadzone oszacowanie możliwego do uzyskania przez pojazd opóźnienia zgodnie z algorytmem przedstawionym na schemacie blokowym na rysunku 18.2.

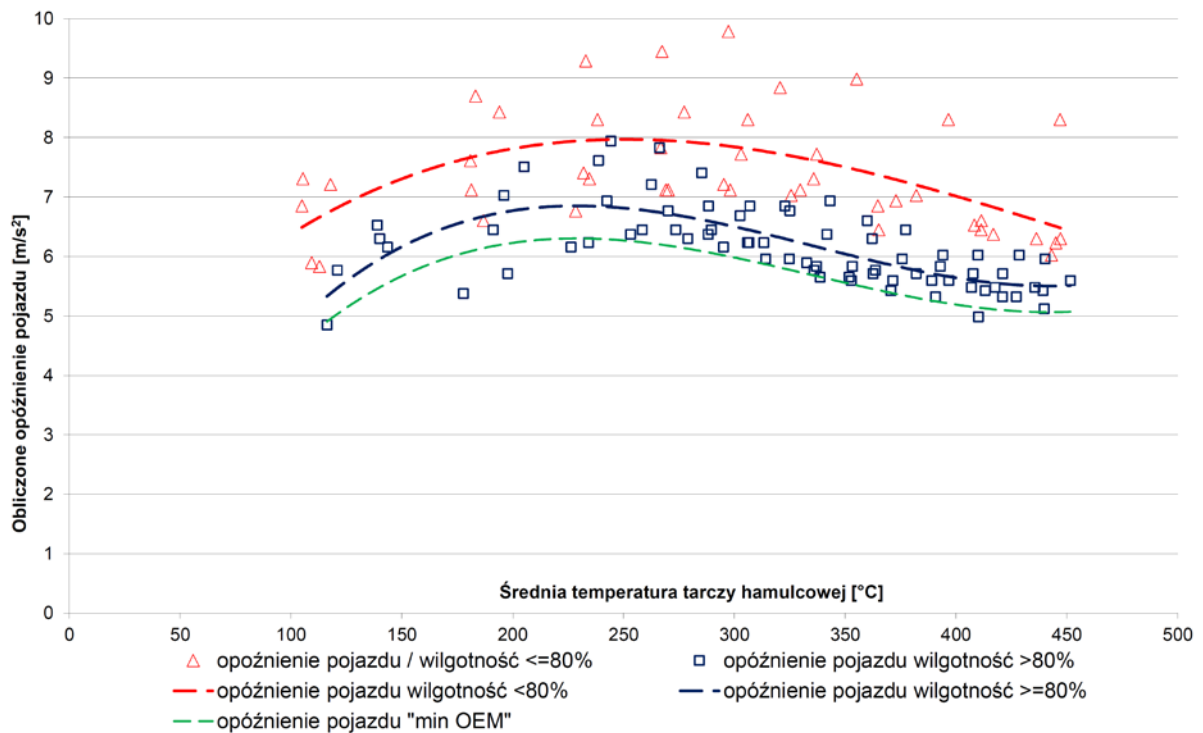
Proces uczenia mógłby przebiegać w postaci analizy uzyskanych w przeszłości opóźnień hamowania pojazdu w funkcji temperatury pracującej pary ciernej. Opóźnienie pojazdu może być mierzone za pomocą (np. czujnika przyspieszeń zamontowanego w pojeździe, danych z czujników ABS dotyczących prędkości obrotowej kół).

Z drugiej strony takie opóźnienie mogłoby być uwagi na praktycznie liniową zależność pomiędzy ciśnieniem w układzie hamulcowym, a uzyskiwanym opóźnieniem pojazdu dla hamulców tarczowych oraz praktycznie liniową charakterystyką dla bębnowych mechanizmów hamulcowych typu Simplex powszechnie stosowanych w pojazdach, na podstawie kilku punktów możliwe jest wykonanie interpolacji opóźnienia pojazdu w funkcji ciśnienia w układzie hamulcowym. Umożliwi to określenie opóźnienia pojazdu przy maksymalnym ciśnieniu w układzie wykonawczym układu hamulcowego. Na tej podstawie możliwe byłoby wykonanie interpolacji oraz eksploracji danych.

Jako przykład posłużymy się zbiorem wartości teoretycznego opóźnienia hamowania pojazdu obliczonego na podstawie danych ze stanowiska bezwładnościowego przedstawionych na rysunku 18.1. W wyniku kilkunastu hamowań uzyskano chmurę punktów reprezentujących próbki zbioru uczącego. Przyjmując, że chmura punktów zaznaczonych a kolorem czerwonym to opóźnienia hamowania uzyskane dla hamowań pojazdu w środowisku o wilgotności od 0 do 80%, a kolorem niebieskim opóźnienie hamowania pojazdu dla hamowań wykonanych przy wilgotności powietrza powyżej 80%. Przyjęto, zgodnie z literaturą, że współczynnik tarcia materiału ciernej zmniejsza wartość po przekroczeniu wilgotności powietrza 80% tak jak opisano powyżej.

---

<sup>101</sup> metoda statystyczna pozwalająca na opisanie współzmienności kilku zmiennych przez dopasowanie do nich funkcji. Umożliwia przewidywanie nieznanych wartości jednych wielkości na podstawie znanych wartości innych.



Rys. 18.1. Oszacowane wartości opóźnienia pojazdu w funkcji średniej temperatury tarczy hamulcowej i wilgotności powietrza

Funkcja estymatora hamowania korzystając z regresji dokonywała by interpolacji wartości możliwego do uzyskania opóźnienia pojazdu. Na podstawie doświadczeń uzyskanych na stanowisku przyjęto, że użycie funkcji wielomianowej stopnia trzeciego dobrze oddaje przebieg wartości opóźnienia hamowania w funkcji temperatury.

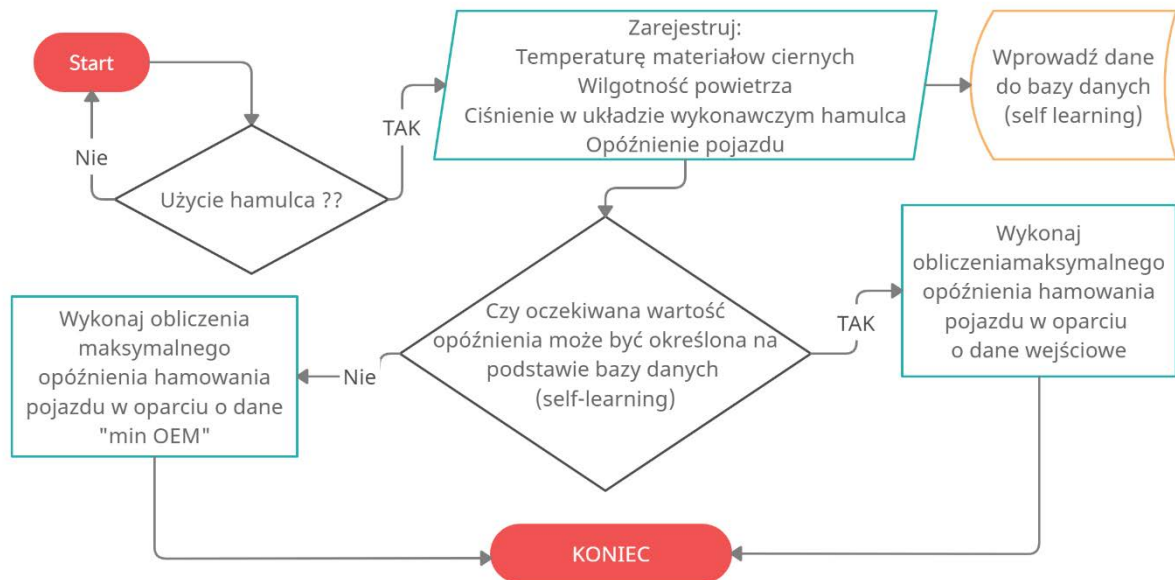
Na początku procesu uczenia maszynowego przy małej ilości próbek, rzeczywiste możliwe do uzyskania opóźnienie hamowania może znacznie różnić się od oszacowanej przez funkcje estymatora. Ze względów bezpieczeństwa w takim przypadku przewidywane jest działanie systemu w oparciu o strategię zastępczą działania systemu. W nowym pojeździe producent pojazdu zaimplementuje charakterystykę opóźnienia pojazdu w funkcji np. temperatury w parze ciernej hamulca przypisana do materiałów ciernych OE (Original Equipment) pomniejszoną o maksymalną wartość odchylenia przewidzianą dla zespołów okładzin hamulcowych OEM (Original Equipment Manufacturer) lub OEQ (Original Equipment Quality).

Skuteczność hamowania pojazdu wyposażonego w zamienne homologowane zgodnie z Regulaminem ONZ nr 90 zamienne zespoły okładziny nie może różnić się o więcej niż 15%.

Przykład takiej charakterystyki zastępczej przedstawiono na rysunku 18.1 i zaznaczono kolorem zielonym, wartości wynikają, z minimalnych wartości współczynnika tarcia dla zamiennych zespołów okładzin hamulcowych. Badania nad wpływem temperatury na wartość współczynnika tarcia materiału ciernego stosowanego na okładziny hamulcowe są prowadzone w ramach homologacji komponentów układów hamulcowych, oryginalnych tj. zgodnie z Regulaminem ONZ nr 13 lub zamiennych okładzin hamulcowych zgodnie z Regulaminem ONZ nr 90. W obu przypadkach oceniana jest skuteczność hamowania „na zimno” i „na gorąco”.

Zarys algorytmu wyznaczania oczekiwanego maksymalnego opóźnienia hamowania pojazdu w funkcji temperatury będzie uwzględniał zebrane dane z poszczególnych hamowań

pojazdu. Ze względów bezpieczeństwa nie będzie wykonywana ekstrapolacji danych. W przypadku braku danych funkcja będzie dokonywała oszacowania opóźnienia hamowania pojazdu w oparciu o dane „min OEM” zaznaczone kolorem zielonym na rysunku 18.1. Jednocześnie zmierzone rzeczywiste opóźnienie pojazdu będzie wykorzystane do uczenia maszynowego i interpolacji.



Rys. 18.2. Algorytm działania szacowania oczekiwanego opóźnienia hamowania pojazdu w oparciu o dane ze zbiory uczącego (poprzednie doświadczenia)

Zgodnie z tym algorytmem na podstawie danych zebranych z czujników zamontowanych w pojeździe w tym także tj. temperatury w elementach ciernych układu hamulcowego, wilgotności powietrza, ciśnienia w elementach wykonawczych funkcja szacująca (estymator hamowania) zakładając praktycznie liniową charakterystykę opóźnienia hamowania pojazdu w funkcji ciśnienia w elementach wykonawczych układu hamulcowego możliwa jest określenie maksymalnej siły hamowania możliwej do osiągnięcia przez pojazd po osiągnięciu maksymalnego ciśnienia w układzie hamulcowym tj. dla pneumatycznych układów hamulcowych ok 800 do 850 kPa.

Jednym z podstawowych parametrów jest temperatura pary ciernej. Zapisy prawne wskazują, że algorytm może szacować temperaturę pary ciernej na podstawie siły, czasu użycia hamulców oraz prędkości pojazdu. Z uwagi na dość dużą ilość zmiennych, które mają wpływ na chłodzenie tarczy hamulcowej lub bębna hamulcowego zaproponowane rozwiązanie jest obarczone nazbyt dużym błędem szacowania. Lepszym rozwiązaniem będzie pomiar temperatury, a nie szacowanie.

Zdolność hamowania pojazdu zależy też od warunków panujących na jezdni np. oblodzenia czy pokrycia jej śniegiem, błotem pośniegowym itp. ale należy podkreślić, że nie ma aktualnie możliwości technicznych oceny poprzez pojazd tego typu zjawisk (np. oblodzenia jezdni). Układ ABS podczas hamowania dokonuje poprzez pierwsze cykle pracy podczas hamowania wstępnej oceny wartości współczynnika tarcia pomiędzy opona a nawierzchnią, jest to układ sterowania nadążny ze sprzężeniem zwrotnym, działający w oparciu o bieżące dane. Przewidywanie warunków drogowych, które mogą wystąpić na przewidywanej trasie poruszania się pojazdu, to również problemem dla systemów jazdy autonomicznej. Ocena



warunków drogowych metodami optycznymi za pomocą kamer jest nie wystarczająca dla prawidłowej oceny warunków na jezdni. Można wykrywać opady atmosferyczne za pomocą dostępnych obecnie w pojazdach czujników opadów, natomiast nie ma możliwości oceny warunków na jezdni np. zalegającego śniegu, błota pośniegowego.

W celu prawidłowej oceny warunków panujących na planowanej drodze pojazdu niezbędna będzie komunikacja pojazdu z innymi pojazdami, wymiana informacji z infrastrukturą lub chmurą danych. W przypadku pojazdów autonomicznych takie rozwiązania są opracowywane. Pojazd w takim rozwiązaniu powinien być wyposażony w urządzenie GPS umożliwiające określenia położenia i kierunku ruchu pojazdu oraz zaplanowanej trasy. Przesłane informacje umożliwiają przesłanie do pojazdu informacji o przewidywanych warunkach na drodze i profilu drogi na planowanej trasie przejazdu, informację te mogą być przekazane ze stacji meteorologicznych, czujników stacjonarnych przy drodze, oraz wymiany informacji pomiędzy pojazdami. Dodatkowo dane te mogłyby być gromadzone „w chmurze” i udostępniane innym pojazdom zgodnie z ich bieżącym położeniem i przewidywaną trasą przejazdu.

## **18.2. Propozycja technicznego rozwiązania i wdrożenia zaproponowanego rozwiązania**

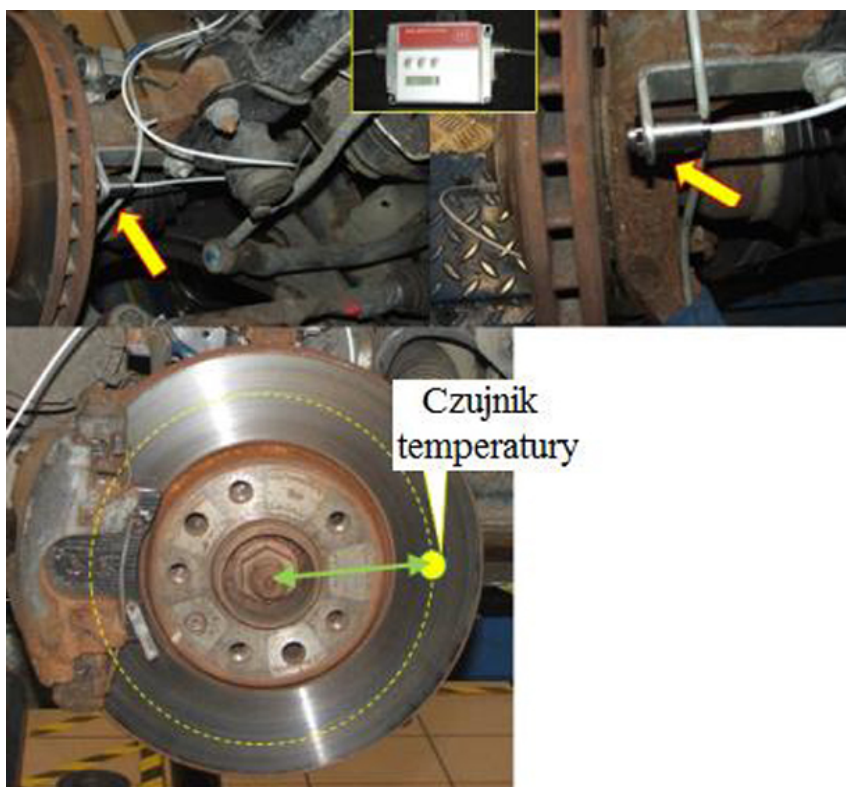
Głównym założeniem wszystkich nowych systemów w pojazdach jest ograniczenie niezbędnych zmian konstrukcyjnych do minimum tak, żeby wdrożenie było jak najmniej dotkliwe technologicznie dla producentów pojazdów. Podczas opracowania wytycznych i algorytmu działania estymatora hamowania kierowano się możliwościami maksymalnego wykorzystania czujników już zainstalowanych w pojazdach lub przewidzianych do montażu w najbliższym czasie w pojazdach. Rozwiązanie można podzielić na dwa etapy.

Pierwszym etapem jest określenie parametrów niezbędnych do określenia pozostałego możliwego do osiągnięcia opóźnienia pojazdu uwzględniając jedynie warunki pracy mechanizmów hamulcowych.. W tym etapie należy poprzez ocenę parametrów, self-learning oraz interpolację eksploracje danych z innych czujników oszacować możliwe do uzyskania opóźnienie hamowania. W tym celu zgodnie z wiedza literaturową i przeprowadzonymi badaniami, pojazd należy wyposażyc w czujnik do pomiaru temperatury pary ciernej. Pomiar temperatury jest łatwy i wykonany w sposób bezstykowy za pomocą pirometru lub kontaktowo za pomocą zainstalowanej termopary. Przykładem takich rozwiązań były badania temperatury tarczy hamulcowej podczas ruchu miejskiego zostały wykonane na samochodzie osobowym przez pracowników Politechniki Poznańskiej. Do pomiaru temperatury tarczy hamulcowej użyto bezstykowego czujnika temperatury CTM-3SF22-C3 firmy MicroEpsilon określającego temperaturę obiektu poprzez bezkontaktowy pomiar promieniowania podczerwonego emitowanego przez jego powierzchnię. Detektor przetwarza przychodzące promieniowanie podczerwone na sygnał elektryczny. Wynikiem jego działania jest wartość temperatury, która może być wykorzystana do dalszego przetwarzania<sup>102</sup>. Czujnik zamontowano w odległości 15 mm od powierzchni wewnętrznej strony tarczy w połowie szerokości jej powierzchni czynnej

---

<sup>102</sup> J. Kupiec, H. Pikosz H., G. Ślaski, *Parametry pracy hamulców samochodu osobowego w badaniach eksploatacyjnych*, Autobusy 12/2018, s. 500-507.

(odległość od osi obrotu tarczy wynosiła 111 mm). Ze względu na brak jednoznacznych danych odnośnie współczynnika emisyjności badanych tarcz hamulcowych, wyznaczono ją, zgodnie z zaleceniami firmy MicroEpsilon, drogą eksperymentalną. Dla fragmentu badanej tarczy hamulcowej wykonano jednoczesny pomiar temperatury termometrem stykowym TES-1312 z termoelementem TP-K03 oraz bezstykowym czujnikiem temperatury. Sposób montażu przedstawiono na rysunku 18.3.



Rys. 18.3. Montaż bezstykowego czujnika temperatury do pomiaru temperatury tarczy hamulcowej w samochodzie Opel Astra

Źródło: J. Kupiec, H. Pikoś H., G. Ślaski, *Parametry pracy hamulców samochodu osobowego w badaniach eksploatacyjnych*, Autobusy 12/2018, s. 500-507.

Czujniki do bezstykowego pomiaru temperatury nie są drogie i zostały przewidziane do różnych zakresów mierzonych temperatur. Przykładowy bezstykowy miernik temperatury przedstawiono na rysunku. 18.4.



Rys. 18.4. Przykładowy bezstykowy czujnik temperatury

Źródło: Dane katalogowe thermoMETER CTRatio



Rys. 18.5. Przykładowy czujnik wilgotności powietrza

Źródło: Dane katalogowe ETE Connectivity typ: HS1101LF.

Bezstykowy sposób pomiaru umożliwia w sposób łatwy monitorowanie i pomiar temperatury elementów wykonawczych mechanizmów hamulcowych takich jak temperatura bębna lub tarczy hamulcowej. Temperatura elementów ciernych oraz jej zmiana (wzrost) w trakcie hamowania w połączeniu z charakterystyką materiałów ciernych hamulców umożliwia oszacowanie z wyprzedzeniem możliwości hamowania pojazdu za pomocą hamulców roboczych w czasie długotrwałego procesu hamowania.

Drugim etapem jest ocena warunków środowiskowych dla kontaktu opony z nawierzchnią drogi. Wilgotność powietrza poza wpływem na wartość współczynnika tarcia pary czarnej, wpływa na wartość współczynnika tarcia pomiędzy oponą a nawierzchnią drogi. Wartość tego współczynnika zależy od warunków panujących na powierzchni jezdni i ma również znaczny wpływ na możliwe do osiągnięcia przez pojazd maksymalne opóźnienie hamowania.

Obecnie pojazdy są wyposażone w czujnik temperatury zewnętrznej i ostrzegają kierowcę przed możliwym oblodzeniem jezdni jedynie na podstawie temperatury zewnętrznej (niezależnie od wilgotności powietrza). Połączenie pomiaru wilgotności powietrza z pomiarem temperatury zewnętrznej może sugerować kierowcy warunki jakie mogą wystąpić na jezdni. Połączenie pomiaru temperatury z pomiarem wilgotności powietrza pozwala na określenie możliwe jest określenie tzw. „punktu rosy”. Przekroczenie temperatury „punktu rosy” powoduje osadzanie się na jej powierzchni wilgoci, a w przypadku temperatur ujemnych (poniżej 0°C) szronu czy oblodzenia jezdni.

Warunki atmosferyczne jak np. występowanie opadów będą mogły być rejestrowane przez powszechnie już stosowane w pojazdach tzw. czujniki deszczu lub poprzez rejestracje faktu załączenia przez kierowcę wycieraczek.

W przyszłości wraz ze rozwijaniem komunikacji pojazd-pojazd i pojazd-infrastruktura, która jest wdrażana dla systemów jazdy automatycznej i będzie niezbędna dla pojazdów autonomicznych, będzie mogła być też wykorzystywana przez pojazdy konwencjonalne. Pojazdy automatyczne obecnie dostępne na rynku posiadają możliwość bezprzewodowej komunikacji w celu np. aktualizacji oprogramowania lub danych dotyczących drogi, wypadków i innych sytuacji niebezpiecznych występujących w czasie rzeczywistym.

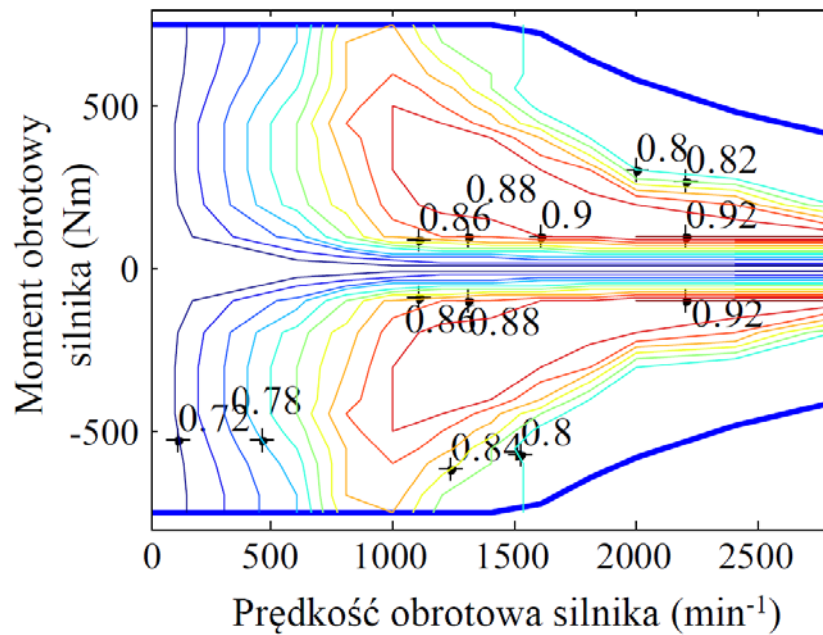
Obecnie pojazdy są wyposażone w odbiornik GPS umożliwiający określenie pozycji pojazdu i kierunku ruchu. Dodatkowo połączenie tego systemu określania pozycji z nawigacją pojazdu pozwoli wyznaczyć dokładny przebieg trasy. Na podstawie danych uzyskanych z łączności bezprzewodowej pojazdu z bazą danych możliwe będzie też dostarczanie do pojazdu informacji o ukształtowaniu terenu, stromych zjazdach i innych występujących niebezpieczeństwach, warunkach atmosferycznych występujących na obszarze przebiegu trasy i pozycji pojazdu w tym także na jezdni. Te informacje będą pozwalały określić możliwość występowania na jezdni lodu czy śniegu oraz na podstawie map GPS z określoną rzeźbą terenu przewidywać i ostrzegać kierowcę przed niebezpiecznymi zjazdami oraz przed stromymi podjazdami.

W przypadku rozwiązań opartych o hamulce długotrwałego działania, które będą realizowane poprzez proces hamowania z odzyskiem energii poza strategią zmniejszenia prędkości istotną kwestią jest możliwość oszacowania SoC akumulatora przed wystąpieniem hamowania długotrwałego w celu określenia czy stan akumulatora pozwoli na zgromadzenie energii uzyskanej podczas hamowania długotrwałego na danym odcinku drogi. Mapy topograficzne zainstalowane w pojeździe mogą zawierać odpowiednie dane dotyczące różnicy wysokości co w połączeniu z masą pojazdu (w oparciu o dane z układów zawieszenia) pozwoli określić zapotrzebowanie na moment hamujący pojazdu i pozwoli określić czy hamowanie długotrwałe będzie mogło być realizowane w całości poprzez układy odzyskiwania energii, czy hamowanie będzie musiało być uzupełnione działaniem hamulców ciernych.

Na podstawie charakterystyki sprawności układu odzyskiwania energii i danych dostarczonych za pomocą map na podstawie przewidywanej trasy pojazdu układ odzyskiwania energii sterując pracą układu tj. przełożeniem najczęściej stosowanej bezstopniowej skrzyni biegów (CVT - Continuously Variable Transmission) może dobierać efektywność odzyskiwania energii przy zachowaniu wymaganego momentu hamującego sterując odpowiednio przełożeniem w skrzyni biegów. Zmieniając przełożenia w celu uzyskania prędkości obrotowej silnika przy zachowaniu niezbędnego do hamowania pojazdu momentu hamującego.

Dla wyjaśnienia tego procesu na rysunku 18.5 przedstawiono efektywny rozkład pracy silnika trakcyjnego autobusu, który określa przykładową charakterystykę silnika z magnesami trwałymi. Parametry silnika przedstawiono w następujący sposób: maksymalny moment obrotowy wynosi 750 Nm; moc nominalna wynosi 94 kW; moc szczytowa wynosi 121 kW. Na podstawie analizy danych można wyciągnąć wnioski, że sprawność odzyskiwania energii jest od 0,7 do 0,92.

W przypadku braku możliwości zgromadzenia całej energii wynikającej z profilu drogi w akumulatorach można zastosować algorytm minimalizujący odzysk energii przy zachowaniu zakładanego momentu hamowania, celem maksymalizacji wykorzystania bezpiecznego hamowania długotrwałego za pomocą układu odzysku energii, przy ograniczonej pojemności energii akumulatorów wynikających z ich wysokiego stanu naładowania.

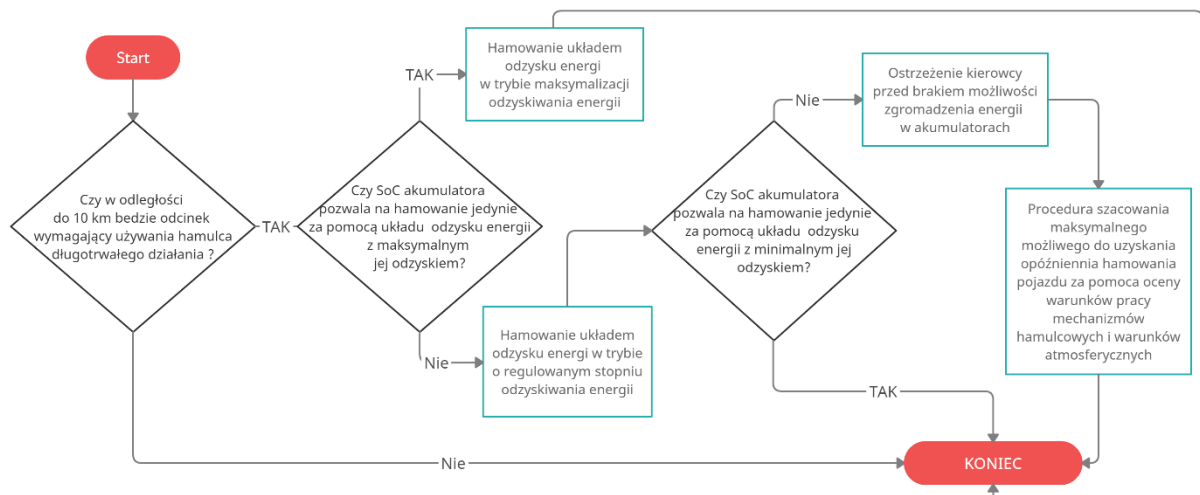


Rys. 18.6. Przykładowy rozkład efektywności silnika trakcyjnego autobusu.

Źródło: LiangLi, YuanboZhan, Chao Yang, Bingjie Ya, C.Marina Martinez, *Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus*, Energy Conversion and Management, Volume 111, 1 March 2016, s. 303.

Takie rozwiązanie w połączeniu z danymi z GPS zawierającymi profil terenu i drogi może przed zjazdem zwrócić uwagę (ostrzec!) kierowcę przed odcinkiem wymagającym hamowania długotrwałego oraz niewystarczającą możliwością przeprowadzenia tego hamowania tylko układem hamowania długotrwałego. Ocena tego będzie przeprowadzona po oszacowaniu stanu naładowania akumulatora i przewidywanej ilości energii odzyskanej podczas tego zjazdu.

Schemat takiego algorytmu zamieszczono na rysunku 18.7.



Rys. 18.7. Algorytm działania szacowania oczekiwanego opóźnienia hamowania pojazdu w oparciu o dane z GPS i map dotyczące profilu drogi na założonej trasie przejazdu pojazdu

Zaproponowany zarys algorytmu działania ma na celu dostarczenie kierowcy informacji o możliwości wykorzystania hamowania z odzyskiwaniem energii, strategii działania systemu odzyskiwania energii w zależności od SoC akumulatora, ostrzeżenia kierowcy o konieczności uzupełnienia hamowania długotrwałego hamulcami ciemnymi.

## 19. Podsumowanie i wnioski końcowe

Zaproponowane w pracy rozwiązanie zawiera zarys algorytmu działania estymatora hamowania, który może być stosowany w pojazdach elektrycznych podczas hamowania długotrwałego. Zmiany w przepisach wprowadzone przez dodatek 18 do 11 serii poprawek do Regulaminu ONZ nr 13 dotyczącego hamowania pojazdów umożliwiły wprowadzenie dla pojazdów elektrycznych estymatora hamowania. Przepisy nie określają sposobu realizacji działania takiego estymatora a jedynie określa go jako **funkcję szacującą**, będącą w stanie oszacować pozostałe dostępne możliwe do osiągnięcia opóźnienie pojazdu możliwe do uzyskania za pomocą hamulca ciernego uwzględniające wpływ temperatury elementów ciernych podczas pracy przez modele uwzględniające dane wejściowe, takie jak na przykład rodzaj i działanie hamulców, liczbę i intensywność uruchomień hamulców, prędkość pojazdu lub temperaturę otoczenia. Regulamin nie definiuje sposobu rozwiązania procesu szacowania skuteczności hamowania. Odrzucono taka możliwość, jedynie pomiar bezpośredni temperatury umożliwia określenie z odpowiednią dokładnością temperatury w parze cierniej hamulca.

W pracy doktorskiej dokonano analizy literatury dostępnej w zakresie konstrukcji pojazdów hybrydowych i elektrycznych. W oparciu o stosowane w takich pojazdach rozwiązania i obowiązkowe wyposażenie pojazdów jakie musi być instalowane w nowych typach pojazdów, zaproponowano zarys algorytmu działania estymatora hamowania. Wykorzystano wyniki badań z wcześniej realizowanych prac badawczych prowadzonych w zakresie badań materiałów ciernych i wpływu różnych czynników na wartość opóźnienia pojazdu podczas hamowania.

W rozprawie przeanalizowano parametry i wpływające na działanie estymatora hamowania i uwzględniono je w wstępnych algorytmach działania. Podczas opracowania algorytmu działania kierowano się możliwością łatwego wdrożenia tego rozwiązania. Na podstawie analizy danych z badań materiałów ciernych i problematyki często stosowanego w pojazdach elektrycznych procesu hamowania z odzyskiem energii zauważono, że w przypadku hamulców ciernych nie ma możliwości oceny w sposób pośredni temperatury elementów wykonawczych układu hamulcowego pojazdu. Uwzględniając parametry takie jak ilość hamowań, czas użycia hamulców nie jest możliwe wystarczająco dokładne określenie temperatury elementów ciernych, która w znaczny sposób wpływa na wartość współczynnika tarcia, a więc i możliwość skuteczności hamowania lub zatrzymania pojazdu. W przedstawionym rozwiązaniu zaproponowano pomiar temperatury elementów hamulca ciernego i jednocześnie wykorzystanie pomiaru temperatury do oceny możliwości hamowania pojazdu. Takie rozwiązanie daje lepszą skuteczność oszacowania możliwego do uzyskania przez pojazd opóźnienia hamowania. Bezstykowy pomiar temperatury, jest łatwy do wdrożenia w pojazdach.

Na podstawie danych literaturowych zauważono również występujący znaczny wpływ wilgotności powietrza na wartość współczynnika tarcia materiałów ciernych hamulców i dlatego zaproponowano zastosowanie pomiarów z wykorzystania czujnika wilgotności. Czujniki wilgotności z uwagi na swoje niewielkie wymiary mogłyby być zintegrowane z czujnikiem do pomiaru temperatury elementów roboczych hamulców ciernych pojazdu.

Takie rozwiązania są łatwe do wdrożenia i nie ingerujące zbyt w strukturę, czy konstrukcje pojazdu. Należy podkreślić, że problematyka szacowania możliwego do osiągnięcia przez pojazd opóźnienia hamowania, nie dotyczy tylko pojazdów badanych w zakresie hamowania długotrwałego. Pojazdy autonomiczne, które będą poruszały się bez

kierowcy, również będą musiały być wyposażone w funkcję oceny warunków drogowych. Obecnie w pojazdach zautomatyzowanych to kierowca dokonuje takiej oceny. Z rozwojem pojazdów autonomicznych będzie musiała być rozwijana sieć komunikacji, takich pojazdów z innymi pojazdami, infrastrukturą, czy też serwerami zawierającymi aktualizacje oprogramowania. Korzystając z tej sieci możliwa by było przesyłanie informacji do pojazdu dotyczącymi warunków drogowych czy ostrzeżeń o drogach o znacznym spadku. Stosowane kamery oraz coraz bardziej powszechnej łączności bezprzewodowej. Poruszono kwestię możliwości wykorzystania urządzeń do akwizycji danych z czujników temperatury i wilgotności powietrza do oceny możliwości występowania warunków na drodze. Rozwój systemów GPS oraz możliwości wymiany danych z różnymi bazami danych umożliwiłoby ich pozyskiwanie przez pojazd oraz na tej podstawie przewidywanie warunków drogowych na założonej, deklarowanej trasie przejazdu.

W pracy zwrócono również uwagę, że ostrzeżenie kierowcy przed utratą siły hamowania może pozytywnie wpłynąć na bezpieczeństwo. Katastrofy autobusów w terenach górski bardzo często są z powodu uszkodzenia lub przegrzania hamulców. Jednocześnie ze wzrostem temperatury pracy pary cierniej hamulców, może wystąpić w sposób nagły utrata siły hamowania w skutek niepożądanego i niebezpiecznego zjawiska fadingu lub brake fade. Rozwiązanie, szacowanie pozostałego możliwego do osiągnięcia opóźnienia przyczynie się do zwiększenia bezpieczeństwa. Przykładem mogą być wypadki autokarów w górach, szczególnie wypadek pod Grenoble, gdzie kierowca nie był świadomy, że poprzez hamowanie też hamulcami ciernymi doprowadzi do utraty kontroli nad pojazdem. Propozycja realizacji szacowania skuteczności hamowania bezwzględnie wpłynie na bezpieczeństwo ruchu drogowego. W ten sposób została potwierdzona hipoteza: Czy skuteczność hamowania pojazdów wpłynie na bezpieczeństwo oraz będzie skuteczna wraz z informacją zwrotną od strony pojazdu tj. przez wdrożony system ostrzegający o możliwych zagrożeniach na drodze i pełnej funkcjonalności układu hamulcowego?. Niewątpliwie tak, ostrzeżenie otrzymane wcześniej najprawdopodobniej doprowadziło by do zmiany strategii jazdy przez kierowcę lub zatrzymania pojazdu celem ochłodzenia hamulców.

Zastosowanie odpowiednich map i algorytmów w połączeniu z ostrzeganiem pojazdu przed zjazdami, szacowania niezbędnej wartości SoC w celu bezpiecznego zjazdu pojazdu ze wznesienia oraz odniesienie się do warunków atmosferycznych w postaci występowania deszczu lub osadu w postaci lodu lub np. błota pośniegowego zwiększy bezpieczeństwo ruchu drogowego.

Rozwój samochodów elektrycznych wymaga również innego podejścia do procesu hamowania długotrwałego i sposobu badań homologacyjnych takich pojazdów. Pojazdy elektryczne wyposażone są w systemy odzyskiwania energii które mogą być wykorzystywane w charakterze urządzeń długotrwałego działania. Zmiany w przepisach umożliwiły korzystanie z systemów odzysku energii w pojazdach elektrycznych jako urządzeń długotrwałego hamowania, jednak pod warunkiem wyposażenia pojazd w estymator hamowania.

Należy też podkreślić, że pojazdy autonomiczne, poruszające się bez kierowcy powinny ze względu bezpieczeństwa być wyposażone w estymator hamowania.

Poruszona w pracy problematyka jest nowa z uwagi na znaczny rozwój pojazdów elektrycznych oraz rozwój pojazdów autonomicznych. Rozwiązania zawarte w pracy są jedynie wytycznymi i wymagają dalszego rozwijania, badań na prototypie. Zaproponowane w pracy rozwiązanie miało być łagodne technologicznie tj. opracowane tak, żeby nie wymagało znacznych zmian w konstrukcji pojazdu oraz wykorzystywało w największym stopniu czujniki

już zamontowane w pojazdach. Wykorzystano w rozwiązaniu rozwijaną dopiero technologię komunikacji pomiędzy pojazdami i pojazdem a infrastrukturą. Wykorzystano tą łączność w celu przekazywania informacji także o niebezpieczeństwach na drodze takich, jak strome zjazdy, złe warunki drogowe, opady. Pojazdy autonomiczne będą musiały korzystać z informacji zewnętrznych, ponieważ obecne systemy analizy obrazu czy wszelkiego rodzaju radary nie są w stanie wykryć i prawidłowo ocenić takich warunków. Obecne systemy jazdy automatycznej nie uwzględniają jeszcze problemu utraty siły hamowania przez pojazd na skutek długiego używania hamulców ciernych.

Propozycja rozwiązania wprowadza też dodatkową strategię działania odzyskiwania energii podczas hamowania. Strategie odzyskiwania energii podczas hamowania pojazdów elektrycznych skupiają się głównie na maksymalizacji odzyskania energii, celem zapewnienia jak największego zasięgu. W pracy poruszono możliwość zastosowania innej strategii w przypadku wysokiego stanu energii w akumulatorach elektrycznych oraz potrzeby hamowania długotrwałego celem ograniczenia wspomaganie tego hamowania hamulcami ciernymi. W projekcie rozwiązania wprowadzono strategię odzyskiwania energii podczas hamowania która ogranicza odzysk energii przy zachowaniu oczekiwanego momentu hamującego.

Opracowany algorytm stanowi pierwszy krok do opracowania i dalszego rozwijania rozwiązania tego problemu technicznego. Rozwój samochodów elektrycznych a w szczególności autonomicznych, będzie wymagał zastosowania w nich funkcji określającej pozostałe możliwe do uzyskania opóźnienie hamowania. Z całą pewnością rozwój takiej funkcji przyczyni się do poprawy bezpieczeństwa na drogach i bezpieczeństwa przewożonych pasażerów zarówno w pojazdach konwencjonalnych jak i autonomicznych.



---

## Bibliografia:

1. **Zhang, Junzhi i inni.** *Regenerative Braking System for Series Hybrid Electric City Bus*. 2008, World Electric Vehicle Journal. 2.
2. **Yifenga, Guo.** Analysis and Design of the Super Capacitor Monitoring System of Hybrid Electric Vehicles, *Procedia Engineering Volume 15*. 2011, s. 90-94.
3. **Wyczalek, F. A.** *Heating and cooling battery electric vehicles-the final barrier*. 1993, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 8, no. 11, s. 9-14.
4. **Wojciechowski, Andrzej i inni.** *XXX Ogólnopolska Konferencja Tribologiczna „Zaawansowana Tribologia”*. Nałęczów, 2009. Zjawisko fadingu – destrukcja materiału okładziny ciernej. s. 157-165.
5. **Wojciechowski, Andrzej i inni.** *Optymalizacja materiałów w węzle tarcia hamulca tarczowego kompozytowego w samochodzie kategorii M<sub>1</sub>*. Warszawa : Instytut Transportu Samochodowego, 2009.
6. **Wojciechowski, Andrzej i Sobczak, Jerzy.** *Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych*. Warszawa : Instytut Transportu Samochodowego, 2001.
7. **Wojciechowski, Andrzej i inni.** *IX Międzynarodowa Konferencja Hamulcowa „Forum Rozwoju Bezpieczeństwa Pojazdów”*. Łódź , 2009. Zmiana współczynnika tarcia w funkcji temperatury tarczy hamulcowej kompozytowej w badaniach stanowiskowych.
8. **Wojciech, Gis.** Electromobility and hydrogenization of the motor transport in Poland now and in the future. *Journal of KONES 25(4)*. 2018, s. 95-101.
9. **Wadhawani, Paridhi and Vara, Vrushal.** *Bacancy Systems. How to Calculate State of Charge(SOC)? Battery & Energy Technologies*. [Online] lipiec 2021. <https://www.bacancytechnology.com/blog/state-of-charge-calculation-for-battery-energy>.
10. **Traczyk, Wojciech.** *Elektro technik . Silniki BLDC: Bez szczotek, ale z innymi zaletami*. [Online] styczeń 2021. <https://elektrotechnikautomatyk.pl/artykuly/silniki-bezsztotkowe-bez-szczotek-ale-z-innymi-zaletami>.
11. **Thomas, Vik.** *Hybrid Autopart. MHEV – A Guide [New Guide]*. [Online] październik 2020. <https://hybridautopart.com/blog/mhev-guide/>.
12. **Tawadros, Peter, Zhang, Nong i Boretti, Alberto.** Integration and performance of regenerative braking and energy recovery technologies in vehicles. Richard Folkson. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2014, s. 541-563.
13. **Szałek, Andrzej, Pielecha, Ireneusz and Cieślak, Wojciech.** Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Energy Flow Analysis in Real Driving Conditions (RDC). *Engines, Vol.14, Nr 4*. 2021, s. 5018-1 - 5018-17.
14. **Sobczak, Jerzy i inni.** *Ocena własności trybologicznych kompozytowych tarcz hamulcowych*. 2002, KOMPOZYTY, Rocznik 2, Nr 4, s. 223-228.
15. **Rancsó, Bence.** *Manufacture and examination of carbon ceramic brakes*. 2015.
16. **Pullen, Keith Robert and Dhand, Aditya.** Mechanical and electrical flywheel hybrid technology to store energy in vehicles. Richard Folkson. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, 476-504*. Towards Zero Carbon Transport, 2014, s. 476-504.
17. **Prochowski, Leon.** *Mechanika ruchu*. Warszawa : WKŁ, 2005.

- 
18. **Pielecha, Ireneusz i Merkisz, Jerzy.** *Współczesne możliwości zastosowań chemicznych źródeł prądu.* Pałac Mierzęcin Wellness & Wine Resort, 2016. Problematyka ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych. s. 1-7.
  19. **Pielecha, Ireneusz i inni.** Ultracapacitors and fuel cells in rail vehicle drive systems. *Pojazdy Szynowe, Numer 2.* 2019, s. 9-19.
  20. **Pielecha, Ireneusz, Cieślik, Wojciech and Szalek, Andrzej.** Operation of Hybrid Propulsion Systems in Conditions of Increased Supply Voltage. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 18, Iss.11.* 2017, s. 1633-1639.
  21. Operation of electric hybrid drive systems in varied driving conditions. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, Vol. 20, Nr 1.* 2018, s. 16-23.
  22. **Pielecha, Ireneusz, Cieślik, Wojciech i Szalek, Andrzej.** *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 214. No. 1., 2019. Energy recovery potential through regenerative braking for a hybrid electric vehicle in a urban conditions.
  23. **Pielecha, Ireneusz.** Energy management system of the hybrid ultracapacitor-battery electric drive vehicles. *Archives of Transport, Vol.58, Nr 2.* 2021, s. 47-62.
  24. **Pielecha, Ireneusz and Sz wajca, Filip.** Cooperation of a PEM fuel cell and a NiMH battery at various states of its charge in a FCHEV drive. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, Vol. 23, Nr 3.* 2021, s. 468-475.
  25. **Pielecha, Ireneusz, Fluder, Kinga and Cieślik, Wojciech.** Analysis of the use of a hybrid drive system in urban traffic conditions. *Journal of Mechanical and Transport Engineering, Vol.70, Nr 3.* 2018, s. 67-77.
  26. **Pielecha, Ireneusz, Cieślik, Wojciech and Merkisz, Jerzy.** Analysis of the electric drive mode use and energy flow in hybrid drives of SUVs in urban and extra-urban traffic conditions. *Journal of Mechanical Science and Technology, 33 Issue 10.* październik 01, 2019, s. 50043-5050.
  27. **Opel, Thorsten, Langhof, Nico and Krenkel, Walter.** Development and Tribological Studies of a Novel Metal-Ceramic Hybrid Brake Disc. *International Journal of Applied Ceramic Technology.* 06 2021, s. 62-74.
  28. **Nordqvist, Christian.** Market Buisness News. *Lithium metal battery with twice lifetime coming soon say MIT scientists.* [Online] wrzesień 2020.  
<http://marketbusinessnews.com/lithium-metal-battery-twice-lifetime-coming-soon-say-mit-scientists/142322>.
  29. **Nestler, Daisy i inni.** *An innovative production method for a C/C-SiC brake disc, suitable for large-scale production.* 2015.
  30. *Detailed analysis of drum brake squeal using complex eigenvalue analysis.* **Miha, Pevec i inni.** 2013, *Journal of Vibroengineering, Vol. 15, Issue 3,* s. 1365-1377.
  31. **Wojciechowski, Andrzej i inni.** Change of the friction coefficient as a function of the composite brake disc temperature In the test RIG trials. *Journal of KONES, Vol. 17, No. 1.* 2010, s. 489-497.
  32. **Wojciechowski, Andrzej i inni.** Badanie procesów tarciovych na urządzeniu T-11 metodą trzpień–tarcza wybranych skojarzeń ciernych stosowanych w hamulcach tarczowych pojazdów samochodowych. *Tribologia, v43, nr 5 (245).* 2012, s. 231–241.
  33. **Merkisz, Jerzy and Siedlecki, Maciej.** Use of hydraulic hybrid drivetrain. *Journal of Mechanical and Transport Engineering, Vol. 67 No. 4.* 2015, s. 51-57.

- 
34. **Merkisz, Jerzy and Gis, Wojciech.** The development status of electric (BEV) and hydrogen (FCEV) passenger cars park in the world and new research possibilities of these cars in real traffic conditions. *Combustion Engines*, 178(3). 2019, s. 144-149.
  35. **Merkisz, Jerzy i inni.** Comparative analysis of novel electric energy storage technologies for vehicles. *Journal of Mechanical and Transport Engineering*, Vol. 69 No. 2. 2017, s. 29-37.
  36. **Merkisz, Jerzy and Pielecha, Ireneusz.** *Alternatywne napędy pojazdów*. Poznań : Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006.
  37. *2010 International Conference on Electric Vehicle.*, **Merkisz, Jerzy i inni.** Warszawa , 2010. Alternative powertrains of city Buses.
  38. **Łomako, Dmitrij M., Stańczyk, Tomasz Lech and Grzyb, Jarosław.** *Pneumatyczne układy hamulcowe w pojazdach samochodowych*. Kielce : Politechnika Świętokrzyska, 2002.
  39. **Lv, Chen i inni.** Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus. *Energy Conversion and Management*, Volume 76. 2013, s. 1117-1124.
  40. **Liang, Li i inni.** Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus. *Energy Conversion and Management*, Volume 111. 2016, s. 299-314.
  41. **Li, Jun i inni.** Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge–discharge cycling. *Journal of Power Sources*, vol. 102, no. 1–2, s. 294–301, grudzień 2001, s. 294-301.
  42. **Lambert, Fred.** Electrek. *Tesla researchers publish work on hybrid battery enabling all-electric car range extender*. [Online] październik 2020. <https://electrek.co/2020/05/04/tesla-hybrid-battery-electric-car-range-extender/>.
  43. Electrek. *Tesla patents new technology for lithium metal/anode-free battery cells*. [Online] wrzesień 2020. <https://electrek.co/2020/07/09/tesla-patents-lithium-metal-or-anode-free-battery/>.
  44. **Kupiec, Jerzy, Pikosz, Hubert and Ślaski, Grzegorz.** Parametry pracy hamulców samochodu osobowego w badaniach eksploatacyjnych. *Autobusy : technika, eksploatacja, systemy transportowe*, Nr 12. 2018, s. 500-507.
  45. **Khoury, Georges i Clodic, Denis.** *Method of Test and Measurements of Fuel Consumption Due to Air Conditioning Operation on the New Prius II Hybrid Vehicle*. 2005.
  46. **Karthik, Sri Hari.** CircuitDigest. *How Regenerative Braking Works in Electric Vehicles*. [Online] maj 2021. <https://circuitdigest.com/article/how-regenerative-braking-works-in-electric-vehicles>.
  47. **Januszkiewicz, Adrian.** Motofaktor. *Licznik elektromobilności: wzrosły rejestracje EV mimo niedoboru półprzewodników*. [Online] październik 2021. <https://www.motofaktor.pl/licznik-elektromobilnosci-wzrosly-rejestracje-ev-mimo-niedoboru-polprzewodnikow/>.
  48. **Hannan, Mahammad A. i inni.** *State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations*. 2018, IEEE Access, vol. 6, s. 19362-19378.
  49. **Gołowicz, Artur.** Wpływ postaci węgla w żeliwie szarym stosowanym na tarcze hamulcowe na współczynnik tarcia. *Transport Samochodowy*, Wydanie 2. 2018, s. 45-54.
  50. **Gołowicz, Artur i Pietrzak, Adam.** *Praca magisterska „Badanie wpływu modyfikacji powierzchni czarnej tarczy hamulcowej na parametry hamowania”*. Warszawa, 2004.

- 
51. **Gołowicz, Artur i Wojciechowski, Andrzej.** Krytyczna analiza problemów prawno-ekonomicznych w zakresie bezpieczeństwa użytkowania pojazdów autonomicznych. *Inżynieria Powierzchni*; vol.25 Nr.3. 2020, s. 31-43.
  52. **Gołowicz, Artur i Wojciechowski, Andrzej.** Fuels from waste for energy source diversification. *Polityka Energetyczna - Energy Policy Journal*; Tom.23, Zeszyt 2. 2020, s. 139-156.
  53. **Gandoman, Foad H.i inni.** Status and future perspectives of reliability assessment for electric vehicles. *Reliability Engineering & System Safety*. marzec 2019, Vol. Volume 183, s. 1-16.
  54. **Eriksson, Mikael.** *Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal*. ACTA Universitatis Upsaliensis, 2000, 2000.
  55. **Ehsani, Mehrdad Mark.** Conventional fuel/hybrid electric vehicles. Richard Folkson. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2014, s. 632-654.
  56. **Cune, Ron.** 6th gear Automotive Solutions. *Overview brake pads materials: Organic, Ceramic, Semi-Metallic*. [Online] grudzień 2021. <https://www.6thgearautomotive.com/2016/11/07/overview-brake-pads-materials-organic-ceramic-and-semi-metallic/>.
  57. **Cibulka, J.** Kinetic Energy Recovery System by means of Flywheel Energy Storage. *Advanced Engineering Vol. 3, No. 1*. 1998, s. 27-38.
  58. **Childs, Peter R.N.** Chapter 13 - Clutches and Brakes. *Mechanical Design Engineering Handbook*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014, s. 513-564.
  59. **Chau, Kam Tim.** Pure electric vehicles. Richard Folkson. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2014, s. 655-684.
  60. **Bernhoff, Hans, Leijon, Mats and Bolund, Björn.** Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. luty 2007, s. 235–258.
  61. **Bergman, Filip, Eriksson, Mikael and Jacobson, Staffan.** On the nature of tribological contact in automotive brakes. *Wear, Volume 252, Issues 1–2*. 2002, s. 26-36.
  62. X-engineer. *Anti-lock braking system (ABS) modeling and simulation (Xcos)*. [Online] styczeń 2021. <https://x-engineer.org/anti-lock-braking-system-abs-modeling-simulation-xcos/>.
  63. Wired. *KERS Comes to Cars as Jaguar Tests Flywheel Hybrid*. [Online] wrzesień 2020. <https://www.wired.com/2010/10/flywheel-hybrid-system-for-premium-vehicles/>.
  64. Wikipedia. *Lotus Elise*. [Online] grudzień 2021. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Lotus\\_Elise](https://pl.wikipedia.org/wiki/Lotus_Elise).
  65. Wikipedia. *Gyrobuss*. [Online] czerwiec 2021. <https://de.wikipedia.org/wiki/Gyrobuss>.
  66. Wikipedia. *Solaris Urbino 12 electric*. [Online] maj 2021. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Solaris\\_Urbino\\_12\\_electric](https://pl.wikipedia.org/wiki/Solaris_Urbino_12_electric).
  67. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Model\\_S](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S). [Online] listopad 2020. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Model\\_S](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S).
  68. Wikipedia. *List of battery sizes*. [Online] październik 2020. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_battery\\_sizes](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_battery_sizes).
  69. Wikipedia. *Lithium-ion battery*. [Online] wrzesień 2020. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery).
  70. Volvo Trucks. *Volvo FH Electric. From city to city in comfort*. [Online] maj 2021. <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/trucks/volvo-fh/volvo-fh-electric.html>.

- 
71. Voith Retarders. *Enhanced safety, efficiency and sustainability - Voith Retarders*. [Online] maj 2021.  
<https://d2euiryrvxi8z1.cloudfront.net/asset/445934742530/4e5e6734a5e78fa64af82e159fa60a01/vt0272-english.pdf>.
  72. Valeo Thermalbus. *Heating systems THERMO DC 200 Instalation and operating instruction*. [Online] styczeń 2021. [https://www.valeo-thermalbus.com/media/Document/3528/EBA\\_Thermo\\_DC\\_200\\_EN\\_2020\\_12\\_11118910E.pdf](https://www.valeo-thermalbus.com/media/Document/3528/EBA_Thermo_DC_200_EN_2020_12_11118910E.pdf).
  73. Valeo Thermalbus. *Heating systems THERMO H Instalation and operating instructions*. [Online] styczeń 2021. [https://www.valeo-thermalbus.com/media/Document/3491/EBA\\_Thermo\\_H\\_DE\\_EN\\_2020\\_11\\_11123240D.pdf](https://www.valeo-thermalbus.com/media/Document/3491/EBA_Thermo_H_DE_EN_2020_11_11123240D.pdf).
  74. UNECE. *Regulation No. 157 Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems*. [Online] styczeń 22, 2021.  
<https://unece.org/sites/default/files/2021-03/R157e.pdf>.
  75. UNECE. *Regulamin ONZ nr 160, Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Event Data Recorder*. [Online] październik 21, 2021.  
[https://unece.org/sites/default/files/2021-10/R160e%20\\_0.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-10/R160e%20_0.pdf).
  76. UNECE. *Supplement 18 do Regulaminu ONZ nr 13 zmienionego 11 seria poprawek*. [Online] wrzesień 2021. <https://unece.org/sites/default/files/2021-12/R013r8am8e%20.pdf>.
  77. UNECE. *Informal document GRVA-07-73 Rev. 1. Proposal for amendments to ECE/TRANS/WP.29/GRVA/2020/36*. [Online] listopad 2020.  
<https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2020/wp29grva/GRVA-07-73r1e.pdf>.
  78. UNECE. *Formal document ECE-TRANS-WP29-GRVA-2020-36*. [Online] listopad 2020.  
<https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2020/wp29grva/ECE-TRANS-WP29-GRVA-2020-36e.pdf>.
  79. UNECE. *Regulamin ONZ nr 107 zmieniony 08 seria poprawek*. [Online] październik 2018.  
<https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2018/R107r7am3e.pdf>.
  80. UNECE. *Informal document GRRF-55-23*. [Online] 2004.  
<https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2004/wp29grrf/TRANS-WP29-GRRF-55-inf23e.pdf>.
  81. The Clean Green Car Company. *Toyota Prius II Battery Pack*. [Online] wrzesień 2020.  
<https://web.archive.org/web/20080225234612/http://www.cleangreencar.co.nz/page/prius-battery-pack>.
  82. Telma. *Telma means savings!* [Online] maj 2021.  
<https://www.telma.com/produits/avantage-economique>.
  83. Skoda Polska. *Skoda aktualnosci: Co oznaczaja skróty MHEV, HEV, PHEV i BEV*. [Online] luty 2021. <https://www.skoda-auto.pl/news/skoda-aktualnosci/co-oznaczaja-skroty-mhev-hev-phev-i-bev>.
  84. Scania Trucks. *Battery electric truck*. [Online] maj 2021.  
<https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/battery-electric-truck.html>.
  85. Scania. *Fully electric low floor bus Scania Citywide*. [Online] luty 2021.  
<https://www.scania.com/content/dam/scaniaoe/market/master/products-and-services/buses-and-Coaches/novali/brochures/technical-specification-scania-citywide-bev.pdf>.

- 
86. RMF FM. *Zła technika hamowania przyczyną wypadku pod Grenoble*. [Online] maj 2021. [https://www.rmf24.pl/fakty/polska/news-zla-technika-hamowania-przyczyna-wypadku-pod-grenoble,nId,80547#crp\\_state=1](https://www.rmf24.pl/fakty/polska/news-zla-technika-hamowania-przyczyna-wypadku-pod-grenoble,nId,80547#crp_state=1).
  87. Racecar engineering. *The basics of F1 KERS*. [Online] wrzesień 2020. <https://www.racecar-engineering.com/articles/the-basics-of-f1-kers/>.
  88. PSPA. *Licznik elektromobilności: rok 2020 rekordowy na polskim rynku samochodów elektrycznych*. [Online] grudzień 2020. <https://pspa.com.pl/2021/informacja/licznik-elektromobilnosci-rok-2020-rekordowy-na-polskim-ryнку-samochodow-elektrycznych/>.
  89. Primearth EV Energy Co., Ltd. *Battery Module NP2*. [Online] wrzesień 2020. <https://www.peve.jp/en/product/np2/index.html>.
  90. Norwood Equipment. *Telma Axial Series Retarders*. [Online] maj 2021. <https://www.norwoodequipment.com/telma>.
  91. Micro-epsilon. *Basics of non contact temperature measurement*. [Online] październik 2021. <http://www.micro-epsilon.pl/download/dat--infrared-basics--en.pdf>.
  92. Mercedes-Benz Trucks. *Emission Free eActros*. [Online] maj 2021. [https://roadstars.mercedes-benz-trucks.com/pl\\_PL/magazine/transport/03-2018/heavy-distribution-traffic-locally-emission-free-eactros.html](https://roadstars.mercedes-benz-trucks.com/pl_PL/magazine/transport/03-2018/heavy-distribution-traffic-locally-emission-free-eactros.html).
  93. Measurement Specialties, Inc - MEAS France. *HS1101LF – Relative Humidity Sensor*. [Online] październik 2021. <https://www.application-datasheet.com/pdf/te-connectivity-measurement-specialties/hpp801a031.pdf>.
  94. Man Bus. *STEP INTO THE FUTURE OF MOBILITY. Your eMobility solutions from MAN*. [Online] luty 2021. [https://www.bus.man.eu/man/media/en/content\\_medien/doc/business\\_website\\_bus\\_master\\_1/emobility\\_1/br\\_MAN\\_eMobility\\_2020\\_de\\_screen.pdf](https://www.bus.man.eu/man/media/en/content_medien/doc/business_website_bus_master_1/emobility_1/br_MAN_eMobility_2020_de_screen.pdf).
  95. LARGE Custom Lithium ion Battery Pack. *What is the difference between lithium metal battery and lithium ion battery?* [Online] wrzesień 2020. <https://www.large.net/news/99u43hv.html>.
  96. King Clima. *King Clima E-series Electric Bus Conditioner Technical data*. [Online] styczeń 2021. <https://www.kingclima.com/products/bus-air-conditioner/all-electric-bus-air-conditioner/7.html#Technical>.
  97. ISO 12161:2006. International Organization for Standardization, 2006.
  98. IEA. *Global electric car stock, 2010-2019*. [Online] maj 2021. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-stock-2010-2019>.
  99. Hydrovane. *Truck and bus compressor*. [Online] styczeń 2021. <https://www.gardnerdenver.com/en/hydrovane/products/truck-and-bus-compressor-tx02>.
  100. Goodyear Brakes. *Brake Pad Friction Material: Organic*. [Online] grudzień 2021. <https://www.goodyearbrakes.com/brake-pads/material/organic/>.
  101. Eur-Lex Baza aktów prawnych Uni Europejskiej. *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/858*. [Online] 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0858>.
  102. Elektrowóz. *Bateria Tesla Model 3 – pojemność, masa, gęstość [DANE TECHNICZNE]*. [Online] październik 2020. <https://elektrowoz.pl/auta/bateria-tesla-model-3-pojemnosc-masa-gestosc-dane-techniczne/>.
  103. EcoFriend. *The good, the bad and the ugly: Compressed air-powered cars*. [Online] wrzesień 2020. <https://ecofriend.com/good-bad-ugly-compressed-air-powered-cars.html>.

- 
104. CLING Air Conditioning. *EZDS-06 Roof mounted Unit*. [Online] styczeń 2021. <http://www.clingac.com/d/files/ezds-specificaiton-2018.pdf>.
105. BSL Batt. *Lithium-Ion State of Charge (SoC) measurement*. [Online] lipiec 2021. <https://www.lithium-battery-factory.com/lithium-battery-state-of-charge/>.
106. Bridgestone. *Ceramic vs. Semi Metallic Brake Pads, What's The Difference?* [Online] grudzień 2021. <https://www.bridgestonetire.com/learn/maintenance/ceramic-vs-metallic-brake-pads/>.
107. PSPA. *Licznik elektromobilności: wzrost rejestracji samochodów elektrycznych mimo niedoboru półprzewodników*. [Online] październik 2021. <https://pspa.com.pl/2021/informacja/licznik-elektromobilnosci-wzrost-rejestracji-samochodow-elektrycznych-mimo-niedoboru-polprzewodnikow/>.
108. PSPA. *Licznik elektromobilności: w 2021 r. na polskie drogi wyjechało ponad 20 tys. samochodów z napędem elektrycznym*. [Online] styczeń 2022. <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-w-2021-r-na-polskie-drogi-wyjechalo-ponad-20-tys-samochodow-z-napedem-elektrycznym/>.
109. PSPA. *Licznik elektromobilności: rośnie liczba stacji ładowania w Polsce*. [Online] luty 2022. <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-rosnie-liczba-stacji-ladowania-w-polsce/>.
110. **Nicholson, Sophie**. See ALPEDHUEZ. *Serious Bus Crash in Alpe d'Huez, Brake Failure on Coach Carrying British Seasonnaires Home from the Alps*. [Online] luty 2022. <https://www.seealpedhuez.com/events/news/brits-in-alpe-d-huez-coach-crash>.
111. Wikipedia. *Katastrofa polskiego autokaru w Vizille*. [Online] luty 2022. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Katastrofa\\_polskiego\\_autokaru\\_w\\_Vizille](https://pl.wikipedia.org/wiki/Katastrofa_polskiego_autokaru_w_Vizille).
112. **Sobczak, Jerzy**. *Kompozyty metalowe*. Kraków, Warszawa : Instytut Odlewnictwa i Instytut Transportu Samochodowego, 2001.
113. **Wojcechowski, Andrzej**. *Praca doktorska: Wpływ obecności fazy zbrojącej kompozytu na bazie stopu aluminium na wybrane właściwości użytkowe tarczy hamulcowej*. Lublin, 2001.
114. SEAT. *Mądrzej, łatwiej, czyściej*. [Online] październik 2021. <https://www.seat.pl/onas/hybrydy.html>.
115. **Rudnicki, Tomasz and Wójtowicz, Stefan**. Metody wyznaczania stanu naładowania akumulatorów stosowane w pojazdach elektrycznych, urządzeniach przenośnych i w laboratorium. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2014, 4.
116. KOR-PAK Corporation. *Semi-metallic Brake Pads Vs. Sintered Brake Pads. What's The Difference?* [Online] grudzień 2021. <https://kor-pak.com/semi-metallic-brake-pads-vs-sintered-brake-pads-whats-difference/>.

---

## Spis rysunków

Rys. 2.1 Podział pojazdów elektrycznych z uwzględnieniem zasilania .....	7
Rys. 3.1 Rodzaje homologacji typu pojazdu – Rozporządzenie Ramowe 2018/858 .....	11
Rys. 3.2 Przegląd kategorii pojazdów .....	18
Rys. 4.1 Przegląd typów badań hamulców zgodnie z Regulaminem ONZ nr 13 .....	22
Rys. 4.2. Przegląd wymagań dla testów typu II. ....	26
Rys. 4.3. Przegląd wymagań dla testów typu IIA. ....	27
Rys. 5.1. Wypadek polskiego autokaru w miejscowości Vizille (niedaleko Grenoble). ....	29
Rys. 5.2. Plan pracy. ....	33
Rys. 6.1. Profil drogi B4 Torfhouse (Niemcy). ....	34
Rys. 6.2. Alternatywna metoda badań typu II i IIA (metoda ciągnięcia) .....	38
Rys. 6.3. Alternatywna metoda badań typu II i IIA (metoda stanowiskowa). ....	39
Rys. 8.1. Porównanie zużycia elementów ciernych hamulca roboczego i średniej prędkości na trasach wykonanych pojazdami wyposażonymi w zwalniacz i bez tego urządzenia. ....	43
Rys. 8.2. Zależność zużycia materiałów ciernych stosowanych w hamulcach ciernych pojazdów w zależności od temperatury pracy. ....	43
Rys. 8.3. Rozkład częstotliwości występowania hamowania w funkcji opóźnienia hamowania .....	44
Rys. 8.4. Porównanie drogi hamowania w przypadku konieczności nagłego zatrzymania w przypadku używania zwalniacza i nieużywania zwalniacza. ....	45
Rys. 8.5. Różnica pomiędzy szeregowym (in-line) a równoległym (off-line) montażem zwalniacza. ....	46
Rys. 8.6. Zdjęcia zwalniacza do pracy w układzie: a) równoległym, b) szeregowym. ....	47
Rys. 8.7. Zwalniacz elektromagnetyczny do montażu szeregowego (on-line). ....	48
Rys. 9.1. Liczba zarejestrowanych na Świecie elektrycznych i hybrydowych pojazdów. ....	50
Rys. 9.2. Liczba zarejestrowanych samochodów elektrycznych i hybrydowych oraz liczba stacji ładowania (grudzień 2020r.). ....	51
Rys. 9.3. Liczba zarejestrowanych samochodów elektrycznych i hybrydowych oraz liczba stacji ładowania (październik 2021 r.) .....	51
Rys. 9.4. Liczba zarejestrowanych samochodów elektrycznych i hybrydowych oraz liczba stacji ładowania (grudzień 2021 r.) .....	52
Rys. 9.5. Liczba zarejestrowanych w Polsce samochodów elektrycznych i hybrydowych (porównanie roku 2019 z 2020). ....	54
Rys. 9.6. Liczba zarejestrowanych w Polsce samochodów elektrycznych i hybrydowych (porównanie roku 2020 z 2021). ....	54
Rys. 9.7. Autobus elektryczny SOLARIS URBINO 12 w Warszawie. ....	60
Rys. 9.8. Przegląd elektrycznych pojazdów ciężarowych. ....	61
Rys. 10.1. Schemat blokowy hamowania z odzyskiem energii .....	64
Rys. 10.2. Rodzaje akumulatorów w zależności od rodzaju w funkcji gęstości energii. ....	66
Rys. 10.3. Żyrobuz z 1955 roku na przystanku podczas uzupełniania energii. ....	69
Rys. 10.4. Akumulator energii żyrobusa (widoczny silnik oraz część obudowy koła zamachowego) .....	69
Rys. 10.5. Mechaniczne układy odzyskiwania energii kinetycznej. ....	70
Rys. 10.6. Pojazd napędzany sprężonym powietrzem .....	72
Rys. 11.1. Ogólny schemat pojazdu elektrycznego. ....	74
Rys. 11.2. Konfiguracja układu napędowego w pojazdach elektrycznych. ....	75
Rys. 11.3. Rozwiązania układu różnicowego w pojazdach z napędem elektrycznym. ....	76
Rys. 11.4. Rozwiązania układu napędowego w przypadku rozwiązań z silnikami w kołach .....	76
Rys. 11.5. Schemat rozwiązań z przekładnią (a) i bez przekładni (b) w kołach. ....	77
Rys. 11.6. Budowa silników stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych. ....	78
Rys. 11.7. Budowa silników z magnesami trwałymi w stojanie stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych .....	84
Rys. 11.8. Ogniwa połączone w sekcje jako elementy składowe akumulatorów. ....	87
Rys. 11.9. Akumulatory litowo-metaliczne (kolejne generacje). ....	88



---

Rys. 11.10. Koncepcja rozwoju akumulatorów hybrydowych litowo-jonowe-metalicznych. ....	89
Rys. 11.11. Modułowy akumulator stosowany w autobusach .....	91
Rys. 11.12. Rozmieszczenie komponentów w autobusie elektrycznym .....	91
Rys. 11.13. Wykorzystanie pojemności akumulatora w pojazdach elektrycznych .....	92
Rys. 11.14. Wykorzystanie pojemności rezerwowej akumulatora w celu zapewnienia zakładanej pojemności podczas cyklu życia akumulatora.....	92
Rys. 11.15. Układ napędowy stosowany w autobusie MAN Lion`s City 12E.....	93
Rys. 13.1. Kalkulacja mocy podczas testu II wymagającej rozproszenia poprzez hamulec długotrwałego hamowania w zależności od technicznie dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu .....	97
Rys. 13.2. Kalkulacja mocy podczas testu IIA wymagającej rozproszenia poprzez hamulec długotrwałego hamowania w zależności od technicznie dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu .....	98
Rys. 13.3. Schemat układu hamulcowego elektrycznego autobusu z odzyskiwaniem energii. ....	100
Rys. 13.4. Przedstawiający strategię rozdzielenia siły hamowania pomiędzy siłę hamowania z odzyskiem energii a siłę hamowania hamulców ciernych .....	102
Rys. 13.5. Wykres przedstawiający rozkłady siły hamowania pomiędzy oś przednią a tylną. ....	103
Rys. 13.6. Zależność współczynnika tarcia pomiędzy oponą a nawierzchnią od poślizgu koła. ....	104
Rys. 15.1. Zależność pomiędzy zmianami napięcia w akumulatorze kwasowym a litowo- jonowym. ....	113
Rys. 16.1. Żeliwo szare a) z grafitem sferoidalnym, b)z grafitem płatkowym .....	124
Rys. 16.2. Tarcza kompozytowa MMC wykonana przez DURALCAN do samochodu Chrysler Prowler .....	124
Rys. 16.3. Mikrostruktura materiału CMC .....	126
Rys. 17.1.Zależność pomiędzy wilgotnością powietrza a współczynnikiem tarcia w materiale ciernym hamulców o oznaczeniu TX 4005. ....	128
Rys. 17.2. Zależność pomiędzy wilgotnością powietrza a współczynnikiem tarcia w materiale ciernym hamulców o oznaczeniu MD631D (materiał MD600 z dodatkiem 8% Cu <sub>2</sub> S).....	129
Rys. 17.3. Zależność pomiędzy zmianami ciśnienia w układzie hamulcowym a współczynnikiem tarcia w materiale ciernym hamulców o oznaczeniu TX 4005 .....	130
Rys. 17.4. Zależność pomiędzy zmianami ciśnienia w układzie hamulcowym a współczynnikiem tarcia w materiale ciernym hamulców o oznaczeniu MD 600 .....	130
Rys. 17.5. Widok ogólny stanowiska badawczego. ....	131
Rys. 17.6. Schemat ogólny stanowiska badawczego.....	132
Rys. 17.7. Efektywny promień tarcia .....	133
Rys. 17.8. Wyniki badań współczynnika tarcia w hamulcu tarczowym w funkcji ciśnienia.....	134
Rys. 17.9. Wyniki badań momentu hamowania hamulca tarczowego w funkcji ciśnienia w układzie hamulcowym dla hamulca tarczowego .....	135
Rys. 17.10. Współczynnik wzmocnienia hamulca bębnowego w zależności od jego typu .....	136
Rys. 17.11. Średnia wartość współczynnika tarcia w hamulcu tarczowym w funkcji średniej temperatury tarczy hamulcowej .....	137
Rys. 18.1. Oszacowane wartości opóźnienia pojazdu w funkcji średniej temperatury tarczy hamulcowej i wilgotności powietrza .....	142
Rys. 18.2. Algorytm działania szacowania oczekiwanego opóźnienia hamowania pojazdu w oparciu o dane ze zbioru uczącego (poprzednie doświadczenia) .....	143
Rys. 18.3. Montaż bezstykowego czujnika temperatury do pomiaru temperatury tarczy hamulcowej w samochodzie Opel Astra .....	145
Rys. 18.4. Przykładowy bezstykowy czujnik temperatury.....	145
Rys. 18.5. Przykładowy czujnik wilgotności powietrza .....	146
Rys. 18.5. Przykładowy rozkład efektywności silnika trakcyjnego autobusu.....	148
Rys. 18.7. Algorytm działania szacowania oczekiwanego opóźnienia hamowania pojazdu w oparciu o dane z GPS i map dotyczące profilu drogi na założonej trasie przejazdu pojazdu .....	148

---

## Spis tabel

Tabela 3.1 Liczba pojazdów jednego typu które mogą zostać zarejestrowane, sprzedane lub dopuszczone do ruchu zgodnie z EUSSTA .....	12
Tabela 3.2. Liczba pojazdów jednego typu które mogą zostać zarejestrowane, sprzedane lub dopuszczone do ruchu zgodnie z NSSTA .....	12
Tabela 4.1. Zestawienie wymagań dla badań typu 0 .....	22
Tabela 4.2. Zestawienie wymagań dla badań typu I dla pojazdów silnikowych .....	23
Tabela 4.3 Zestawienie dystansu w zależności od prędkości jazdy dla pojazdów kategorii O <sub>2</sub> i O <sub>3</sub> . .....	24
Tabela 6.1. Nominalne warunki do przeprowadzenia badań typu II i IIA .....	35
Tabela 11.1. Porównanie podstawowych parametrów silników elektrycznych stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych.....	82
Tabela 11.2. Zastosowanie istniejących napędów do flagowych pojazdów elektrycznych. ....	83
Tabela 11.3. Podstawowe parametry akumulatorów litowo-jonowych .....	86
Tabela 13.1. Moc generowane przez pojazd w wyniku testu typu II wynikająca z energii potencjalnej ciężkości (masy) .....	96
Tabela 13.2. Moc generowane generowana przez pojazd w wyniku testu typu IIA wynikająca z energii potencjalnej ciężkości (masy).....	96
Tabela 13.3. Dane wejściowe do obliczeń oporu toczenia .....	98
Tabela 13.4. Dane wejściowe do obliczeń oporu powietrza.....	99
Tabela 13.5. Dane wejściowe do obliczeń całkowitych oporów ruchu. ....	99
Tabela 13.6. Porównanie ilości odzyskanej energii w wyniku zastosowania w autobusie miejskim różnych strategii odzyskiwania energii.....	102
Tabela 13.7. Główne odbiorniki energii elektrycznej w autobusie .....	105
Tabela 16.1 Materiały cierne obecnie stosowane w hamulcach .....	117
Tabela 16.2. Komponenty stosowane w materiałach ciernych stosowanych w hamulcach pojazdów.....	119
Tabela 16.3. Wybrane materiały stosowane na włókna wzmacniające w materiałach ciernych. ....	120
Tabela 16.4. Sposoby stosowane w materiałach ciernych. ....	121
Tabela 16.5. Wypełniacze stosowane w materiałach ciernych. ....	122
Tabela 16.6. Wybrane właściwości żeliwa, stopu AK12 oraz kompozytów MMC .....	125
Tabela 16.7. Porównanie właściwości żeliwa szarego GG2 z kompozytem C/SiC .....	127

## Spis użytych w pracy skrótów

<b>Skrót</b>	<b>Tłumaczenie angielskie</b>	<b>Tłumaczenie polskie</b>
<b>ABS</b>	Anti-lock Braking System	System zapobiegający blokowaniu się kół podczas hamowania
<b>AC</b>	Alternating Current	Prąd przemienny
<b>ACC</b>	Adaptive Cruise Control	Adaptacyjny / inteligentny tempomat
<b>ADAS</b>	Advanced Driver-Assistance Systems	Zaawansowane systemy wspomagania kierowcy
<b>AEBS</b>	Advanced Emergency Braking System	Zaawansowany system hamowania awaryjnego
<b>BAHV</b>	Battery Assist Hybrid Vehicle	Hybrydowy pojazd ze wspomaganie akumulatorowym
<b>BAS</b>	Brake Assist System	system wspomagania nagłego hamowania
<b>BEV</b>	Battery Electric Vehicle	Akumulatorowy pojazd elektryczny
<b>BFD</b>	Braking Force Distribution	Rozdział siły hamowania
<b>BLAC</b>	Brush Less Alternating Current	Bezsztokowy prądu przemiennego
<b>BLDC</b>	Brush Less Direct Current	Bezsztokowy prądu stałego
<b>BLPM</b>	Brush Less Permanent Magnet	Bezsztokowy z magnesami trwałymi
<b>BMS</b>	Battery Management System	System zarządzania akumulatora
<b>BRD / RTS</b>	Road Traffic Safety	Bezpieczeństwo ruchu drogowego
<b>C/C</b>	Carbon / Carbon	węgiel / węgiel
<b>C/SiC</b>	Carbon / Silicon carbide	węgiel / węgiel krzemu
<b>CAS</b>	Collision Avoidance System	System ostrzegający przed kolizją
<b>CMC</b>	Ceramic matrix composites	Kompozyt z osnową ceramiczną
<b>COC</b>	Certificate of Conformity	Świadectwo zgodności
<b>COF</b>	Coefficient of friction	Współczynnik tarcia
<b>COP</b>	Conformity of Production	Zgodności produkcji
<b>CVT</b>	Continuously Variable Transmission	Przekładnia bezstopniowa
<b>DC</b>	Direct Current	Prąd stały
<b>DoD</b>	Depth of Discharge	Stopień rozładowania
<b>DSPM</b>	Doubly Salient Permanent Magnet	Podwójnie wydane magnesy trwałe
<b>ECWVTA</b>	European Community Whole Vehicle Type Approval	Homologacja typu WE całego pojazdu
<b>EDR</b>	Event Data Recorder	Rejestrator danych zdarzeń
<b>EKG ONZ / UNECE</b>	United Nations Economic Commission for Europe	Europejska Komisja Gospodarcza Organizacji Narodów Zjednoczonych
<b>EMB</b>	Electro-Mechanical Battery	Akumulator elektro-mechaniczny
<b>ESP</b>	Electronic Stability Control	Elektroniczny układ stabilizacji toru jazdy
<b>EUIVA</b>	European Union Individual Vehicle Approval	Unijne indywidualne dopuszczenie pojazdu

<b>Skrót</b>	<b>Tłumaczenie angielskie</b>	<b>Tłumaczenie polskie</b>
<b>EUSSTA</b>	European Union National Small Series Type Approval	Homologacja typu UE dla pojazdów produkowanych w małych seriach
<b>EUWVTA</b>	European Union Whole Vehicle Type Approval	Homologacja typu UE całego pojazdu
<b>EV</b>	Electric Vehicle	Pojazd elektryczny
<b>FBF</b>	Friction Braking Force	Siła hamowania hamulcem ciernym
<b>FCEV</b>	Fuel Cell Electric Vehicle	Pojazd elektryczny zasilany ogniwami paliwowymi
<b>FCHV</b>	Fuel Cell Hybrid Vehicle	Hybrydowy pojazd zasilany ogniwami paliwowymi
<b>FCPM</b>	Flux-controllable Permanent Magnet	Kontrolą strumienia i magnesami trwałymi
<b>FCV</b>	Fuel Cell Vehicle	Pojazd zasilany ogniwami paliwowymi
<b>FL</b>	Front left	Lewe przednie
<b>FOC</b>	Field-Oriented Control	Sterowanie zorientowane na pole
<b>FR</b>	Front right	Prawe przednie
<b>FRPM</b>	Flux-reversal Permanent Magnet	Odwroceniem strumienia i magnesami trwałymi
<b>FSPM</b>	Flux-switching Permanent Magnet	Przełączaniem strumienia i magnesami trwałymi
<b>GPS</b>	Global Positioning System	Globalny System Pozycjonowania
<b>GRVA</b>	Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles	Grupa robocza ONZ ds. pojazdów autonomicznych i połączonych
<b>HEV</b>	Hybrid Electric Vehicle	Hybrydowy Pojazd Elektryczny
<b>HV</b>	High Voltage	Wysokie napięcie
<b>IBFD</b>	Ideal Braking Force Distribution	Idealny rozkład sił hamowania
<b>KERS</b>	Kinetic Energy Recovery System	System odzyskiwania energii kinetycznej
<b>LCC</b>	Life Cycle Cost	Koszt cyklu życia
<b>Li-ion</b>	Lithium-ion	Litowo - jonowy
<b>MHEV</b>	Mild Hybrid Electric Vehicle).	„Łagodny” hybrydowy pojazd elektryczny lub „Miękka” hybryda
<b>MSTA</b>	Multi-stage Type Approval	Wielostopniowa Homologacja typu UE
<b>MMC</b>	Metal matrix composites	Kompozyt z osnową metalową
<b>NAO</b>	Non-asbestos Organic	Organiczne bezazbestowe
<b>Ni-Cd</b>	Nickel Cadmium	Niklowo-kadmowe
<b>NiMH</b>	Nickel-metal hydride	Niklowo metalowo - wodorkowe
<b>NIVA</b>	National Individual Vehicle Approval	Krajowe Indywidualne dopuszczenie pojazdu
<b>NMC</b>	Lithium Nickel Manganese Cobalt	Litowo-manganowo -kobaltowe

<b>Skrót</b>	<b>Tłumaczenie angielskie</b>	<b>Tłumaczenie polskie</b>
<b>NOVC-FCHV</b>	Not Off-Vehicle Charging Fuel Cell Hybrid Vehicle	Hybrydowy pojazd zasilany ogniwami paliwowymi nieładowany z zewnątrz
<b>NOVC-HEV</b>	Not Off-Vehicle Charging Hybrid Vehicle	Hybrydowy pojazd elektryczny nieładowany z zewnątrz
<b>NSSTA</b>	National Small Series Type Approval	Krajowa Homologacja typu do pojazdów produkowanych w małych seriach
<b>OCV</b>	Open Circuit Voltage	Napięcie otwartego obwodu
<b>OE</b>	Original Equipment	Oryginalne wyposażenie
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer	Producenta oryginalnego wyposażenia
<b>OEQ</b>	Original Equipment Quality	Jakości elementów oryginalnego wyposażenia
<b>ONZ / UN</b>	United Nations	Organizacja Narodów Zjednoczonych
<b>OVC-FCHV</b>	Off-Vehicle Charging Fuel Cell Hybrid Vehicle	Hybrydowy pojazd zasilany ogniwami paliwowymi ładowany z zewnątrz
<b>OVC-HEV</b>	Off-Vehicle Charging Hybrid Vehicle	Hybrydowy pojazd elektryczny ładowany z zewnątrz
<b>OZE / RES</b>	Renewable energy sources	Odnawialne źródła energii
<b>PEV</b>	Pure Electric Vehicle	Pojazd elektryczny
<b>PHEV</b>	Plug-in hybrid electric vehicle	Hybrydowy pojazd elektryczny z możliwością ładowania z zewnętrznych źródeł
<b>PM</b>	Permanent Magnet	Magnes trwały
<b>RBF</b>	Regenerative Braking Force	Siła hamowania regeneracyjnego (odzyskowego)
<b>REE</b>	Rare-Earth Elements	Metale ziem rzadkich / pierwiastki ziem rzadkich
<b>RL</b>	Rear left	Lewe tylne
<b>RR</b>	Rear right	Prawe tylne
<b>SoC</b>	State of Charge	Stopień naładowania akumulatora
<b>SR</b>	Switched Reluctance	Przełączana reluktancja
<b>SRM</b>	Switched Reluctance Motor	Silnik z przełączaną reluktancją
<b>UE / EU</b>	European Union	Unia Europejska
<b>VVVF</b>	Variable-Voltage Variable-Frequency	Zmienne napięcie zmienna częstotliwość
<b>WVTA</b>	Whole Vehicle Type Approval	Całopojazdowa homologacja typu pojazdu

---

## **„Systemy zarządzania energią hamowania pojazdów elektrycznych i hybrydowych”**

### **Streszczenie**

W pracy poruszono zagadnienia związane z rozwojem nowoczesnych pojazdów elektrycznych i autonomicznych. Przeprowadzono analizę prawną przepisów homologacyjnych oraz wprowadzonych zmian w Regulaminach ONZ zakresie nowych wymagań. Zmiana w postaci dodatku 18 do 11 serii poprawek do Regulaminu ONZ nr 13 odnoszącego się do hamowania pojazdów została zatwierdzona przez WP.29 we wrześniu 2021 r. Zmiana ta wprowadza pojęcie estymatora skuteczności hamowania, funkcji która miałaby oszacować pozostałe dostępne możliwe do osiągnięcia za pomocą hamulców ciernych opóźnienie pojazdu. Algorytm estymatora byłby wykorzystywany w trakcie hamowania długotrwałego. Dotychczasowe rozwiązania stosowane w pojazdach elektrycznych i hybrydowych są nie ekonomiczne i znacznie ograniczają ładowność oraz ekonomiczność takiego transportu. W pracy przeprowadzono analizę obecnie stosowanych rozwiązań w takich pojazdach. Przeprowadzono analizę obecnie stosowanych rozwiązań w zakresie hamulców ciernych stosowanych w pojazdach z uwzględnieniem najnowszych rozwiązań kompozytowych jak C/SiC oraz MMC. Na podstawie badań przeprowadzonych w pracy magisterskiej dotyczących wpływu różnych parametrów wejściowych na parametry skuteczności hamowania hamulców ciernych oraz dane literaturowe w tym zakresie możliwe było wybrać czynniki, które stanowią kluczowe parametry i istotnie wpływają na wartość współczynnika tarcia pomiędzy materiałem ciernym a elementem wykonawczym hamulca ciernego (tarczą lub bębniem hamulcowym). Doświadczenia przeprowadzone wcześniej wykazały, że takie parametry jak temperatura elementów ciernych hamulców istotnie wpływa na zmianę współczynnika tarcia doprowadzając przy znacznym jej wzroście do zjawiska fadingu, które występuje nagle oraz ze względu na brak istotnych symptomów jest trudne do przewidzenia przez kierowcę. W pracy wykazano też potrzebę rejestracji wilgotności powietrza, która zgodnie z danymi literaturowymi ma istotny wpływ na wartość współczynnika tarcia materiału ciernego o element wykonawczy hamulca.

W opracowaniu uwzględniono trendy producentów wykorzystywane w pojazdach automatycznych oraz technologię w nich stosowaną. Zwrócono uwagę na łatwość pomiaru temperatury elementów wykonawczych hamulców oraz temperatury i wilgotności powietrza na zewnątrz pojazdu. Takie rozwiązania są łatwe do wdrożenia, przyczyniając się do dokładniejszej oceny możliwości hamowania pojazdu. Biorąc pod uwagę bezprzewodową transmisję danych stosowaną w pojazdach automatycznych, możliwość określenia położenia pojazdu (za pomocą GPS) i jego przewidywana trasę, można przewidzieć warunki

---

atmosferyczne w jakich będzie poruszał się pojazd. Dodatkowo pomiar wilgotności powietrza w połączeniu z pomiarem temperatury i danymi meteorologicznymi dostarczonymi do pojazdu pozwala przewidzieć występowanie złych warunków na drodze tj. wilgoci lub oblodzenia jezdni. Warunki drogowe również mają zasadniczy wpływ na współczynnik tarcia pomiędzy oponą a nawierzchnią i przyczyniają się do obniżenia możliwości hamowania pojazdu.

Zastosowanie odpowiednich map i algorytmów w połączeniu z ostrzeganiem pojazdu przed zjazdami, szacowania niezbędnej wartości SoC akumulatorów w celu bezpiecznego zjazdu pojazdu ze wzniesienia z wykorzystaniem hamowania hamulcami ciernymi i układem odzyskiwania energii.

Na podstawie analizy danych z badań materiałów ciernych i problematyki stosowanego w pojazdach elektrycznych hamowania z odzyskiem energii zauważono, że w przypadku użycia hamulców ciernych nie ma możliwości oceny w sposób pośredni za pomocą analizy użycia takich hamulców, możliwości hamowania pojazdu. Uwzględniając parametry takie jak ilość zahamowań, czas użycia hamulców nie jest możliwe określenie temperatury elementów ciernych, która w sposób znaczny wpływa na wartość współczynnika tarcia, a więc i możliwość skutecznego hamowania. Wychodząc naprzeciw tej problematyce spróbowano zarysować rozwiązania, które mogą przyczynić się do dalszego rozwoju zagadnień związanych z hamowaniem pojazdu oraz takich które mogą być wykorzystane poprzez systemy jazdy autonomicznej.

---

## **„Electric and hybrid vehicles braking energy management systems”**

### **Abstract**

The paper deals with issues related to the development of modern electric and autonomous vehicles. A legal analysis of the type-approval provisions and the changes introduced to the UN Regulations in the field of new requirements was carried out. The amendment to Supplement 18 to the 11 series of amendments to UN Regulation No. 13 relating to vehicle braking was approved by WP.29 in September 2021. This amendment introduces the concept of the Brake performance Estimator, a function that would estimate the remaining deceleration achievable with friction brakes. The estimator algorithm would be used during endurance braking. Existing solutions used in electric vehicles and hybrid vehicles are not economical and significantly reduce the load capacity and economy of such transport. The paper presents an analysis of the solutions currently used in such vehicles. An analysis of the currently used solutions in the field of friction brakes used in vehicles was carried out, taking into account the latest composite solutions such as C / SiC and MMC. Based on the research carried out in the thesis on the influence of various input parameters on the braking performance parameters of friction brakes and literature information in this regard, it was possible to select factors that constitute the key parameters and significantly affect the value of the friction coefficient between the friction material and the friction brake component (brake disk or drum). The experiments carried out earlier have shown that parameters such as the temperature of brake friction elements significantly affect the change of the friction coefficient, leading with its significant increase to the phenomenon of fading, which occurs suddenly and due to the lack of significant symptoms, it is difficult to predict by the driver. The study also demonstrated the need to register air humidity, which, according to the literature data, has a significant impact on the value of the friction coefficient between friction elements of brake.

The study takes into account manufacturers' trends used in automatic vehicles and the technology used in them. Attention was paid to the ease of measuring the temperature of brake actuators as well as the temperature and humidity of the air outside the vehicle. Such solutions are easy to implement, contributing to a more accurate assessment of the vehicle's braking capability. Taking into account the on-air data transfers used in automatic vehicles, the possibility to determine the position of the vehicle (via GPS) and its predicted route, it is possible to predict the weather conditions in which the vehicle will move. Additionally, air humidity measurement in combination with temperature measurement and meteorological data supplied to the vehicle allows to predict the occurrence of bad road conditions, i.e. wetness or



---

icing of the road. Road conditions also have a major influence on the coefficient of friction between the tire and the road and contribute to decrease the vehicle's braking ability.

The use of appropriate maps and algorithms in conjunction with vehicle descent warning, estimation of the necessary battery SoC value for safe vehicle descent using friction brakes and an energy recovery system.

Based on data analysis of friction materials and applied issues in electric vehicles braking with energy regeneration, it has been noticed that in the case of using friction brakes, it is not possible to indirectly assess the braking capability of the vehicle by means of an analysis of the use of such brakes. Taking into account parameters such as the number of brakes, the time of using the brakes, it is not possible to determine the temperature of the friction elements, which significantly affects the value of the friction coefficient, and thus the possibility of effective braking. In order to meet this problem, an attempt was made to outline solutions that may contribute to the further development of related issues with vehicle braking and those that can be used by autonomous driving systems.