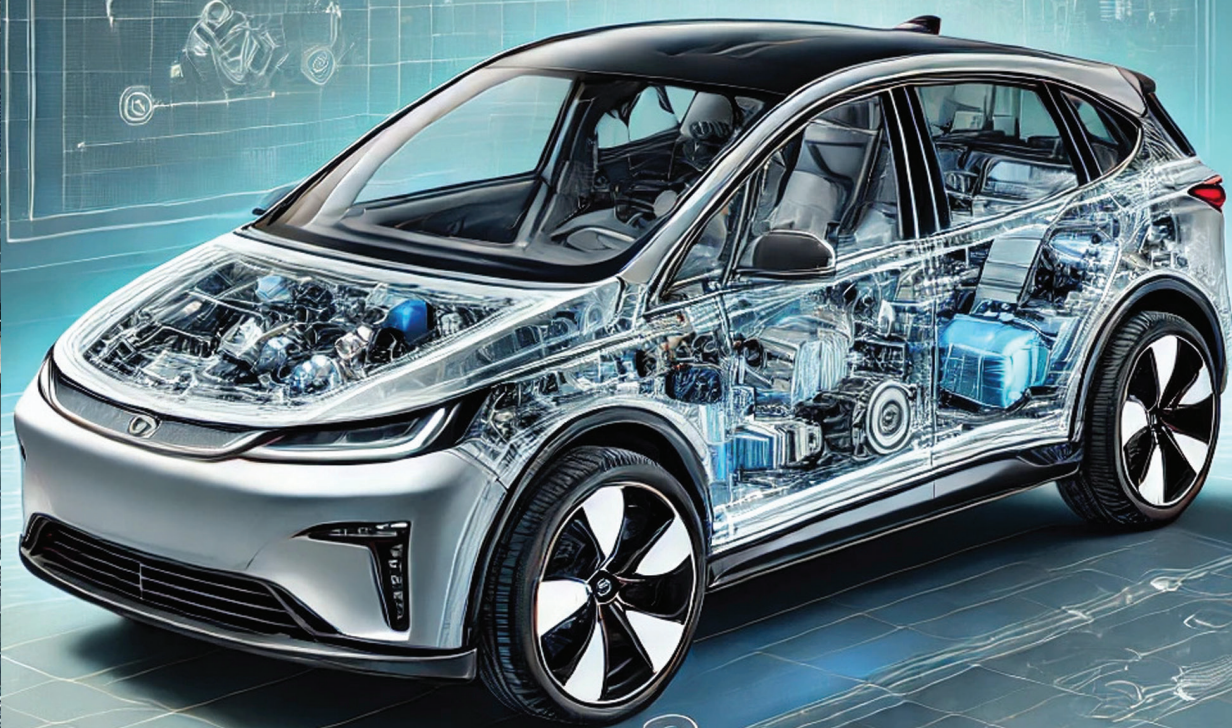


**Grzegorz Dzieniszewski
Norbert Pedryc
Paweł Radkowski**

NAPĘDY ELEKTRYCZNE I HYBRYDOWE W POJAZDACH SAMOCHODOWYCH



Kraków 2025

Napędy elektryczne i hybrydowe w pojazdach samochodowych

**Grzegorz Dzieniszewski, Norbert Pedryc
Paweł Radkowski**

Kraków 2025

Poradnik jest przeznaczony dla uczniów i studentów kierunków technicznych, których zainteresowania skupiają się na nowoczesnych systemach napędowych, transporcie ekologicznym i elektromobilności. Zawiera on podstawowe informacje dotyczące budowy, działania oraz eksploatacji pojazdów elektrycznych i hybrydowych, a także analizuje ich wpływ na współczesny rynek motoryzacyjny.

Autorzy:

dr inż. Grzegorz Dzieniszewski, prof. uczelni	- Politechnika Rzeszowska, PANS w Przemysłu
dr inż. Norbert Pedryc	- Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
mgr inż. Paweł Radkowski	- Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu

Recenzent:

dr hab. inż. Andrzej Kuranc, prof. uczelni	- Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
--	---------------------------------------

Skład wykonano z materiałów dostarczonych przez Autorów.

Wydawca nie ponosi odpowiedzialności za dostarczony materiał graficzny.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Publikowanie lub kopowanie w części lub całości wyłącznie za zgodą Wydawcy.

ISBN 978-83-64377-67-9

Przygotowanie do druku oraz projekt okładki

Zbigniew Szpila

Wydawca:

Wydawnictwo „Inżynieria Rolnicza”

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

Druk i oprawa:

NOVA SANDEC

ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz

tel. +48 (18) 547 45 45

e-mail: biuro@novasandec.pl; <http://www.novasandec.pl>

Ark. wyd. 7,85; ark. druk. 7,00

Nakład: 100 egz.

Spis treści:

1.	Wstęp.....	5
2.	Wprowadzenie	7
3.	Porównanie pojazdu elektrycznego z pojazdem z napędem spalinowym	13
4.	Rozwiązania konstrukcyjne pojazdów elektrycznych	19
	4.1. Rozwiązania konstrukcyjne pojazdów hybrydowych	28
5.	Rodzaje, budowa i charakterystyka silników elektrycznych stosowanych w pojazdach..	45
	5.1. Silnik bezszczotkowy prądu stałego (BLDC).....	50
	5.2. Silniki prądu przemiennego.....	52
	5.3. Istota sterowania silnikami elektrycznymi	65
6.	Rodzaje i charakterystyka magazynów energii elektrycznej.....	69
	6.1. Parametry akumulatorów w aspekcie zastosowań w pojazdach elektrycznych.....	82
	6.2. Superkondensatory.....	85
	6.3. Ładowanie akumulatorów	89
7.	Problemy bezpieczeństwa w eksploatacji pojazdów elektrycznych i hybrydowych...	93
	7.1. Bezpieczeństwo kierowcy i pasażerów pojazdów elektrycznych i hybrydowych.....	93
	7.2. Bezpieczeństwo personelu serwisującego pojazdy elektryczne i hybrydowe.....	94
8.	Zalety i wady elektromobilności	101
	Bibliografia	105

1. Wstęp

Elektromobilność to termin odnoszący się do wykorzystania pojazdów elektrycznych (EV), które napędzane są energią elektryczną zamiast paliw kopalnych. Jest to koncepcja związana z transformacją transportu w kierunku bardziej ekologicznego i zrównoważonego rozwoju, zmniejszając emisję spalin i hałasu, a także redukując zależność od paliw kopalnych.

Elektromobilność obejmuje nie tylko same pojazdy elektryczne, ale także infrastrukturę ładowania, systemy zarządzania energią, a także zmiany w politykach transportowych i energetycznych. W ramach elektromobilności promowane są także inne technologie, takie jak pojazdy hybrydowe, elektryczne rowery czy skutery.

Rozwój elektromobilności ma na celu poprawę jakości powietrza, zmniejszenie hałasu w miastach, zwiększenie efektywności energetycznej oraz walkę ze zmianami klimatycznymi poprzez ograniczenie emisji dwutlenku węgla (CO₂).

W wielu krajach wprowadza się systemy wspierające rozwój elektromobilności poprzez oferowanie dopłat i dotacji, ulg podatkowych, zwolnień z opłat za przejazdy płatnymi autostradami, jak również przywileje w postaci darmowego parkowania w płatnych strefach lub możliwości poruszania się buspasami. W dodatku koncerny motoryzacyjne wprowadzają do sprzedaży coraz więcej modeli, które na jednym ładowaniu pozwalają pokonać nawet do 700 km. To daje ogromną wolność poruszania się. W Polsce rozwój tej dziedziny wspiera Ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych, która przewiduje szereg udogodnień dla nabywców samochodów elektrycznych.

Ogromne znaczenie ma też fakt, że coraz częściej w miejscach ogólnodostępnych pojawiają się punkty ładowania pojazdów elektrycznych. W zasadzie jedyną przeszkodą na drodze do popularyzacji elektromobilności są wciąż wysokie ceny pojazdów elektrycznych.

2. Wprowadzenie

Normy i przepisy

Unia Europejska wprowadza szereg regulacji mających na celu promowanie elektromobilności i ograniczenia emisji zanieczyszczeń z sektora transportu. Poniższe regulacje mają na celu przyspieszenie transformacji rynku motoryzacyjnego w kierunku elektromobilności, poprawę jakości powietrza oraz zwiększenie bezpieczeństwa użytkowników dróg w Unii Europejskiej.

1. Zakaz sprzedaży nowych samochodów spalinowych od 2035 roku.

Od 2035 roku w UE będzie obowiązywał zakaz sprzedaży nowych samochodów osobowych i dostawczych emitujących CO₂. Oznacza to, że wszystkie nowe pojazdy wprowadzane na rynek będą musiały być zeroemisyjne, co ma przyczynić się do osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku.

2. Dyrektywa EPBD – Infrastruktura ładowania w budynkach.

Dyrektywa EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*) nakłada obowiązek instalacji punktów ładowania dla pojazdów elektrycznych w nowych i poddawanych gruntownym remontom budynkach.

3. Dyrektywa CAFE – Normy emisji CO₂ dla producentów.

Od 1 stycznia 2025 roku producenci muszą spełniać zaostatrzone limity emisji CO₂ dla nowych pojazdów, co ma na celu dalszą redukcję zanieczyszczeń i promowanie pojazdów nisko- oraz zeroemisyjnych.

Nowe normy

Tabela 1. Normy emisji CO₂

Rodzaj samochodów	2024	2025
Osobowe	120 g CO ₂ /km	93,6 g CO ₂ /km
Dostawcze	205,6 CO ₂ /km	153,9 g CO ₂ /km

Źródło: opracowanie własne na podstawie normy ISO

Kara za przekroczenie limitu emisji wynosi 95 Euro za każdy gram CO₂ powyżej limitu x liczba sprzedanych samochodów.

4. Rozporządzenie GSR2 – Nowe systemy bezpieczeństwa,

Od lipca 2024 roku w UE obowiązuje rozporządzenie GSR2, które wprowadza obowiązek wyposażenia nowych pojazdów w zaawansowane systemy bezpieczeństwa, takie jak np. System monitorujący uwagę kierowcy.

Nowe normy EURO 6e

Norma EURO 6e weszła w życie, aby zaostrzyć wymagania dotyczące emisji spalin. Kluczowe zmiany obejmują:

1. Testy RDE (*Real Driving Emissions*):
 - obniżenie maksymalnej emisji NOx do 60 mg/km dla samochodów benzynowych i 80 mg/km dla diesli,
 - testy przeprowadzane w szerszym zakresie temperatur: od -7°C do 35°C,
 - uwzględnienie dynamicznych zmian prędkości oraz rzeczywistego zużycia paliwa w testach drogowych.
2. Zmiany dla hybryd plug-in (PHEV):
 - uwzględnienie rzeczywistego zużycia paliwa i energii elektrycznej,
 - wprowadzenie limitów emisji przy niskim stanie naładowania akumulatora.
3. Obowiązki dla producentów:
 - stosowanie zaawansowanych filtrów cząstek stałych (DPF, GPF),
 - technologie redukcji NOx, takie jak SCR (*Selective Catalytic Reduction*).

Norma ta stanowi krok w kierunku neutralności klimatycznej w transporcie i ograniczenia zanieczyszczeń powietrza w miastach.

Planowana norma EURO 7

Norma EURO 7, w porównaniu z normą EURO 6, wprowadza nowe obowiązki, które muszą zostać spełnione przez producenta w celu wprowadzenia pojazdu na rynek, są to:

- wprowadza nowe limity emisji cząstek stałych oraz limit emisji podtlenku azotu (N₂O). Ograniczenie emisji cząstek stałych ma być rozłożone na kilka lat i dotyczyć ścieralności opon oraz hamulców,
- w założeniach norma dodatkowo ma określić trwałość akumulatorów w pojazdach elektrycznych oraz wydłużyć okres eksploatacji pojazdów. Aktualnie obowiązująca norma zakłada, że deklarowana emisyjność wynosi 5 lat lub 100 tys. km, norma EURO 7 przewiduje wydłużenie deklarowanej emisyjności odpowiednio na 10 lat lub 200 tys. km.

Wprowadzenie nowej normy pierwotnie planowano na lata 2025-2026, jednakże obecnie jest to odroczone i przewidywane daty wprowadzenia to lata 2029-2030.

Rodzaje samochodów hybrydowych i elektrycznych – budowa i charakterystyka

1. Samochody elektryczne (EV – *Electric Vehicles*):
 - budowa:
 - akumulator: np. litowo-jonowy o pojemności 50–100 kWh (zasięg 200–500 km),
 - silnik elektryczny: np. asynchroniczny (Tesla Model S) lub synchroniczny z magnesami trwałymi (BMW i3),
 - falownik: przekształca prąd stały z akumulatora na przemienny dla silnika,

- moduł zarządzania termicznego: utrzymuje optymalną temperaturę akumulatora i silnika.
 - charakterystyka:
 - brak emisji spalin podczas jazdy,
 - cicha praca i wysoka wydajność,
 - dłuższy czas ładowania: np. 8 godzin z domowego gniazdka (AC 230V) lub 30 minut na stacji DC o mocy 150 kW.
2. Hybrydy równoległe (HEV – *Hybrid Electric Vehicles*):
- budowa:
 - silnik spalinowy i elektryczny współdziałające równoległe,
 - akumulator: o małej pojemności (1–3 kWh),
 - przekładnia: umożliwia współpracę obu silników.
 - charakterystyka:
 - zużycie paliwa niższe o 20–30% w porównaniu do konwencjonalnych pojazdów,
 - krótki zasięg w trybie elektrycznym: 1–2 km.
3. Sterowanie pojazdami elektrycznymi i hybrydowymi:
- zarządzanie energią:
 - BMS (*Battery Management System*): monitoruje poziom naładowania akumulatora (SoC) oraz jego zdrowie (SoH),
 - rekuperacja energii: odzysk energii podczas hamowania (np. Toyota Prius odzyskuje do 30% energii),
 - zarządzanie temperaturą: układy chłodzenia cieczą lub powietrzem.
4. Diagnostyka pojazdów elektrycznych i hybrydowych:
- diagnostyka napędu:
 - OBD II: odczyt kodów błędów, analiza parametrów pracy silnika i akumulatora,
 - testy wysokiego napięcia: weryfikacja izolacji układu HV.

Tabela 2. Charakterystyczne błędy z diagnostyki OBD

Kod błędu	Opis	Przyczyna
P1A0C	Problem z falownikiem	Usterka tranzystora
P0A80	Awaria baterii	Uszkodzone ogniwo

Źródło: opracowanie własne na podstawie normy ISO

Podział pojazdów elektrycznych i hybrydowych ze względu na rodzaj napędu:

1. Pojazdy Elektryczne (EV – Pojazdy Elektryczne):
 - a) BEV (pojazd elektryczny zasilany akumulatorem):
 - w pełni elektryczne, zasilane wyłącznie baterią, przykład: Tesla Model S, Nissan Leaf.

2. FCEV (pojazd elektryczny zasilany ogniwami paliwowymi):
 - a) zasilane wodorowymi ogniwami paliwowymi, obciążającymi energię elektryczną, przykład: Toyota Mirai, Hyundai Nexo.
3. Główne elementy budowy:
 - a) Akumulator (Bateria wysokiego napięcia):
 - najważniejszy element magazynujący energię elektryczną,
 - wykorzystywane technologie: litowo-jonowe (Li-ion), litowo-żelazowo-fosforanowe (LFP) lub nikielowo-metalowo-wodorkowe (NiMH).
 - b) Silnik elektryczny:
 - zamienia energię elektryczną z akumulatora na energię mechaniczną napędzającą koła,
 - typy silników: synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM), indukcyjne, reluktancyjne.
 - c) Inwerter (Przetwornica) - przekształca prąd stały (DC) z baterii na prąd przemienny (AC) dla silnika elektrycznego.
 - d) Sterownik mocy (*Power Electronics Controller*) - zarządza przepływem energii między akumulatorem, silnikiem i innymi podzespołami.
 - e) System regeneracyjnego hamowania (*Regenerative Braking*) - przekształca energię kinetyczną podczas hamowania w energię elektryczną, ładowaną do akumulatora.
 - f) Układ ładowania - złącze ładowania, ładowarka pokładowa oraz przetwornik napięcia do ładowania baterii z sieci elektrycznej.
 - g) Układ chłodzenia - zapobiega przegrzewaniu się baterii, silnika i inwertera.
 - h) Konstrukcja podwozia - specjalnie zaprojektowana platforma pod akumulator, często na całej powierzchni podwozi.
4. Pojazdy Hybrydowe (HEV – *Hybrid Electric Vehicles*):
 - a) HEV (pojazd hybrydowy elektryczny):
 - klasyczne hybrydy, które łączą prąd spalinowy i elektryczny. Bateria ładowana jest przez odzysk energii (np. z zasilania) i silnik spalinowy, przykład: Toyota Prius, Honda Insight,
 - b) PHEV (pojazd hybrydowy typu plug-in):
 - wtyczka Hybrydy typu, która ma większą kontrolę i może być kontrolowana przez gniazdo. Zasilanie jest dostarczane wyłącznie z urządzenia, przykład: Mitsubishi Outlander PHEV, Volvo XC60 Recharge.
 - c) MHEV (łagodny hybrydowy pojazd elektryczny):
 - łagodna hybryda, której mały silnik elektryczny wspomaga silnik spalinowy, ale może nie napędzać pojazdu automatycznego, przykład: Audi A6 MHEV, Suzuki Vitara Mild Hybrid.

5. Główne elementy budowy:
- a) Silnik spalinowy (ICE - *Internal Combustion Engine*) - tradycyjny silnik benzynowy lub wysokoprężny, wspomagający lub współpracujący z silnikiem elektrycznym.
 - b) Silnik elektryczny - Odpowiada za wspomaganie napędu oraz możliwość jazdy w trybie elektrycznym (w przypadku HEV i PHEV).
 - c) Akumulator niskonapięciowy i wysokonapięciowy:
 - niskonapięciowy zasila osprzęt pojazdu (światła, radio), a wysokonapięciowy silnik elektryczny,
 - w HEV akumulatory mają mniejszą pojemność niż w pojazdach BEV.
 - d) Przekładnia (np. eCVT - elektroniczna skrzynia biegów) - zarządza przenoszeniem mocy z silnika spalinowego i elektrycznego na koła.
 - e) Inwerter (DC-AC) i konwerter DC-DC - współpracują, aby dostosować napięcie z baterii do wymagań różnych komponentów.
 - f) Sterownik hybrydowy - zarządza współpracą silnika spalinowego i elektrycznego oraz optymalizuje zużycie paliwa i energii elektrycznej.
 - g) System regeneracyjnego hamowania - wykorzystywany do odzyskiwania energii podczas hamowania, ładowania baterii.
6. Elementy wspólne dla EV i HEV:
- a) System zarządzania baterią (BMS - *Battery Management System*) - monitoruje i kontroluje pracę akumulatora, zapewniając bezpieczeństwo i optymalną wydajność.
 - b) Osprzęt elektryczny - alternator, przetwornice napięcia, elektronika sterująca.
 - c) Układ klimatyzacji i ogrzewania - zasilany energią elektryczną lub energią ciepłą z silnika spalinowego.
7. Różnice w budowie:
- a) EV jest napędzany wyłącznie energią elektryczną, nie ma silnika spalinowego, przekładni czy układu wydechowego.
 - b) HEV korzysta z dwóch źródeł energii (spalinowego i elektrycznego), co wymaga bardziej złożonego układu sterowania i zarządzania napędem.

3. Porównanie pojazdu elektrycznego z pojazdem z napędem spalinowym

Porównanie cech obu napędów zaczniemy od analizy sił oporów F_o działających na pojazd w trakcie ruchu. Siły oporu przeciwstawiają się sile napędowej F_n jaka jest generowana przez silnik i przekazywana na koła napędowe aby pojazd mógł jechać ze stałą prędkością to $F_n = F_o$, a gdy chcemy przyspieszać to $F_n > F_o$.

Na ogólną siłę oporów składają się następujące siły oporów:

- siła oporu toczenia,
- siła oporu powietrza,
- siła bezwładności,
- siła oporu wzniesienia.

Siły oporów nie zawsze muszą występować łącznie i zależą od różnych czynników.

Na rysunku 1 przedstawiono wykres siły oporów funkcji prędkości pojazdu opracowany na podstawie danych dotyczących dynamiki ruchu pojazdu.

Na wykresie zobrazowano poszczególne składowe siły oporów wpływające na ruch pojazdu:

- F_p – siła oporów powietrza, której wartość wzrasta proporcjonalnie do kwadratu prędkości pojazdu, co wynika z charakterystyki przepływu powietrza wokół poruszającego się obiektu,
- F_b – siła oporów bezwładności, zależna od masy pojazdu oraz przyspieszenia lub opóźnienia w trakcie ruchu,
- F_w – siła oporów wzniesienia, odzwierciedlająca wpływ grawitacji przy pokonywaniu nachylonego terenu,
- F_t – siła oporów toczenia, określana głównie przez parametry nawierzchni, charakterystykę opon oraz warunki pracy układu jezdnego, przy czym jej wartość jest niemal stała dla niskich prędkości, a wzrasta przy zmianie warunków drogowych.

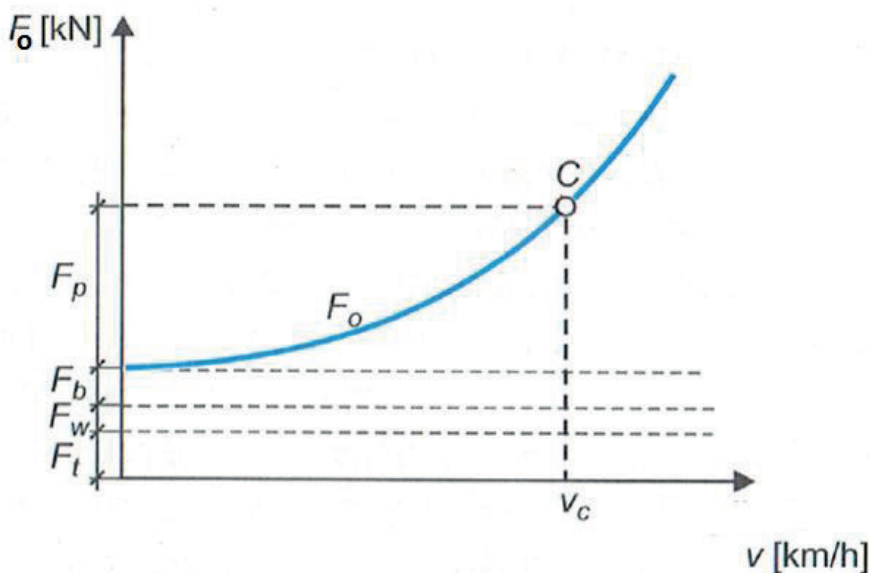
Punkt oznaczony jako C reprezentuje chwilowy punkt równowagi sił, dla którego prędkość chwilowa pojazdu wynosi V_c . W tym punkcie wszystkie składowe siły oporów równoważą się, co prowadzi do stanu ustalonego ruchu pojazdu.

Wykres dostarcza szczegółowych informacji na temat charakteru działania poszczególnych sił oporów w funkcji prędkości, umożliwiając analizę dynamiki pojazdu i wyznaczenie zakresów prędkości, w których dominują poszczególne rodzaje oporów.

Gdy pojazd jedzie z prędkością V_c i działają wszystkie opory jednocześnie to siła napędowa potrzebna do napędu tego pojazdu jest równa sumie siły wszystkich oporów.

Siłę napędową otrzymujemy przez podzielenie momentu napędowego przyłożonego do koła napędowego przez promień dynamiczny koła. Moment napędowy koła pochodzi z silnika.

Moment napędowy, przenoszony jest na koła przez układ przeniesienia napędu, którego zadaniem jest dostosować moment obrotowy generowany przez silnik do potrzeb wynikających z warunków ruchu.



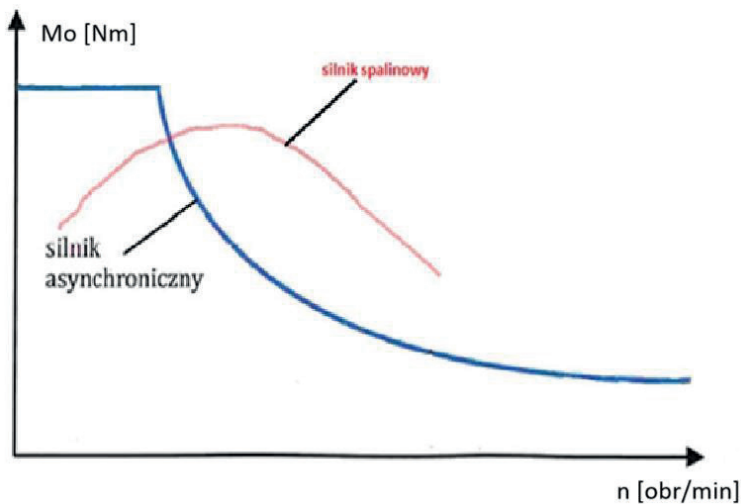
Rysunek 1. Wykres siły oporów F_o w funkcji prędkości pojazdu V , F_p – siła oporów powietrza, F_b – siła oporów bezwładności, F_w – siła oporów wzniesienia, F_t – siła oporów toczenia. C – chwilowy punkt równowagi sił dla którego występuje prędkość chwilowa pojazdu V_c

Źródło: Gabryelewicz (2011)

W samochodach z silnikami spalinowymi w układzie napędowym występują: silnik, sprzęgło wraz z kołem zamachowym, skrzynia biegów, przekładnia główna, mechanizm różnicowy oraz półosie napędowe. Wymienione elementy składowe opisują ogólną konstrukcję i mogą się różnić w zależności od rozwiązań zastosowanych w pojeździe oraz jego przeznaczenia. Porównując pojazdy należy zacząć od źródła napędu.

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie charakterystyk pracy silnika spalinowego i elektrycznego. Wynika z niego że, silnik spalinowy cechuje się brakiem dostępności momentu obrotowego w zakresie niskich prędkości obrotowych wału korbowego. Minimalna prędkość obrotowa, przy której możliwe jest wytworzenie momentu obrotowego, wynosi zwykle około 650–900 obr/min. Jest to wynikiem konieczności zapewnienia wystarczającego napełnienia cylindra mieszanką paliwowo-powietrzną, a także utrzymania stabilnych procesów spalania. W miarę wzrostu prędkości obrotowej moment obrotowy wzrasta aż do osiągnięcia wartości maksymalnej w zakresie średnich obrotów. Następnie, przy dalszym wzroście prędkości obrotowej silnika, moment obrotowy maleje, co jest spowodowane zmniejszeniem napełnienia cylindrów ładunkiem. Efekt ten związany jest z ograniczeniem czasu na realizację cyklu wymiany gazów, co utrudnia skuteczne napełnienie cylindra. Dla porównania, silnik elektryczny zapewnia wysoki moment obrotowy już od zerowej prędkości obrotowej wału, co wynika z charakterystyki elektromagnetycznej generowania siły napędowej.

wej. Moment obrotowy w silniku elektrycznym utrzymuje się na stałym poziomie w szerokim zakresie prędkości, a jego spadek następuje dopiero w najwyższym zakresie obrotów, z powodu ograniczeń w mocy urządzenia. Wykres przedstawiony na rysunku 2 pozwala na bezpośrednie porównanie zdolności obu typów silników do dostarczania momentu obrotowego w różnych warunkach eksploatacyjnych, podkreślając ich kluczowe różnice funkcjonalne. Dla silnika spalinowego widoczna jest konieczność stosowania przekładni w celu zoptymalizowania wykorzystania momentu obrotowego w zależności od obciążenia i prędkości. Natomiast silnik elektryczny charakteryzuje się większą elastycznością, co może wpłynąć na uproszczenie układu napędowego.



Rysunek 2. Porównanie charakterystyk silnika spalinowego i elektrycznego

Źródło: Merkisz, Pielecha (2015)

Analizując obie charakterystyki można zauważyć że, dla prędkości obrotowej $n = 0$ silnik spalinowy w ogóle nie pracuje więc nie generuje momentu obrotowego. Pracuje on dopiero od obrotów biegu jałowego więc silnik potrzebuje sprzęgła do ruszenia pojazdu z miejsca. Silnik elektryczny rozwija wysoki moment obrotowy już od $n = 0$, dzięki temu można wyeliminować konieczność stosowania sprzęgła do ruszania pojazdem. Duży przedział zmienności prędkości obrotowej pozwala również wyeliminować skrzynię biegów. Z konstrukcji można wyeliminować kolejne elementy. Stosując osobne silniki do napędu każdego z kół napędowych, zbędny staje się mechanizm różnicowy. Gdy połączymy koło bezpośrednio z silnikiem nie będą potrzebne półosie. Przekładnia główna wystąpi w obu rozwiązaniach. Jej rolą jest zwiększenie momentu obrotowego na kołach. Wyjątek stanowi napęd realizowany silnikami elektrycznymi umieszczonymi w kołach pojazdu przy użyciu silników wolnoobrotowych.

Z powyższej analizy wynika iż, układ przeniesienia napędu z silnika elektrycznego może mieć prostszą konstrukcję niż w przypadku układu z silnikiem spalinowym.

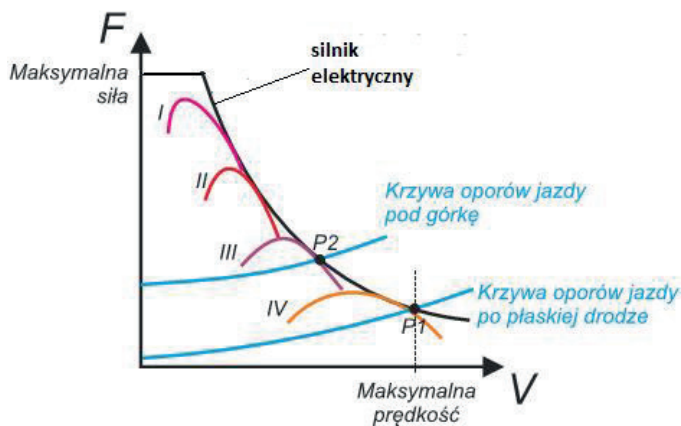
Dla lepszego zobrazowania na rysunku 3 przedstawiono porównanie wykresów trakcyjnych samochodu z napędem elektrycznym i klasycznym.

W przypadku pojazdu z klasycznym napędem spalinowym, wykres trakcyjny przedstawia zależności siły napędowej przenoszonej na koła w funkcji prędkości pojazdu dla poszczególnych biegów (I, II, III, IV). Siła napędowa początkowo jest największa przy niskich prędkościach na każdym biegu, co pozwala na efektywne przyspieszanie. W miarę wzrostu prędkości siła ta maleje w wyniku spadku momentu obrotowego silnika na wyższych obrotach oraz przełożenia w układzie napędowym. Granicę każdego biegu określa punkt przecięcia się wykresów siły napędowej danego biegu z teoretyczną siłą oporów ruchu. Zakres prędkości możliwej do osiągnięcia zależy od kombinacji dostępnych przełożeń oraz maksymalnej prędkości silnika spalinowego. Dla samochodu z napędem elektrycznym wykres trakcyjny przedstawia odmienną charakterystykę. Silnik elektryczny zapewnia stałą lub niemal stałą wartość siły napędowej w szerokim zakresie prędkości, co jest konsekwencją płaskiego przebiegu momentu obrotowego silnika elektrycznego. Dodatkowo brak konieczności stosowania wielu biegów pozwala na bardziej liniowy charakter wykresu trakcyjnego, a dostępność pełnej siły napędowej już od zerowej prędkości zwiększa możliwości dynamiczne pojazdu. Wykres trakcyjny umożliwia zobrazowanie teoretycznego zakresu prędkości pojazdu na każdym biegu oraz porównanie efektywności przeniesienia napędu w obu rodzajach układów napędowych. Ograniczenia charakterystyczne dla pojazdów spalinowych, takie jak konieczność zmiany przełożeń w celu zachowania optymalnej siły napędowej, są w pojazdach elektrycznych zastąpione prostotą działania wynikającą z ich specyfiki. Prezentowane różnice podkreślają korzyści napędu elektrycznego w kontekście uproszczonej konstrukcji układu napędowego.

Wykres trakcyjny umożliwia również ocenę własności ruchowych pojazdu. Stały, duży moment obrotowy przy niskich prędkościach obrotowych oraz brak konieczności przełączania biegów sprawia, że samochody z napędem elektrycznym wykazują większe przyspieszenie (np. podczas ruszania z miejsca) niż wyposażone w silniki o takiej samej mocy pojazdy z napędem spalinowym.

Obecnie napęd elektryczny w odniesieniu do napędu spalinowego ma następujące zalety:

- generuje mniej hałasu,
- nie potrzebuje sprzęgła i skrzyni biegów,
- może w dużym stopniu odzyskiwać energię w trakcie hamowania pojazdu,
- nie emituje spalin,
- nie potrzebuje rozrusznika,
- ma mniej części,
- ma dobrą charakterystykę momentu,
- ma wysoką sprawność (rzędu 94%),
- nie wykazuje tętnienia prędkości obrotowej (brak koła zamachowego),
- nie potrzebuje regularnej wymiany oleju ani innych materiałów eksploatacyjnych,
- tańszy w eksploatacji (przy cenie energii 55 groszy/kWh).



Rysunek 3. Porównanie wykresów trakcyjnych samochodu z napędem elektrycznym i klasycznym

Źródło: <http://www.energoelektronika.pl/do/ShowNews?id=2469>

Współcześnie produkowane samochody napędzane silnikami elektrycznymi mają też wady:

- mały zasięg,
- duża masa całkowita pojazdu,
- długi czas ładowania akumulatora,
- wysoka cena zakupu,
- mała żywotność baterii i wysoki koszt zakupu nowej,
- problemy z bezpieczeństwem pożarowym,
- zbyt cicha praca,
- problemy z utylizacją zużytej baterii,
- brak infrastruktury do ładowania baterii.

Podsumowując obecną sytuację na rynku motoryzacyjnym samochody elektryczne przegrywają ze spalinowymi przede wszystkim przez wysoki koszt zakupu i mały zasięg na jednym ładowaniu baterii. Gdy wady te znikną pojazdy elektryczne mogą zdominować motoryzację.

4. Rozwiązania konstrukcyjne pojazdów elektrycznych

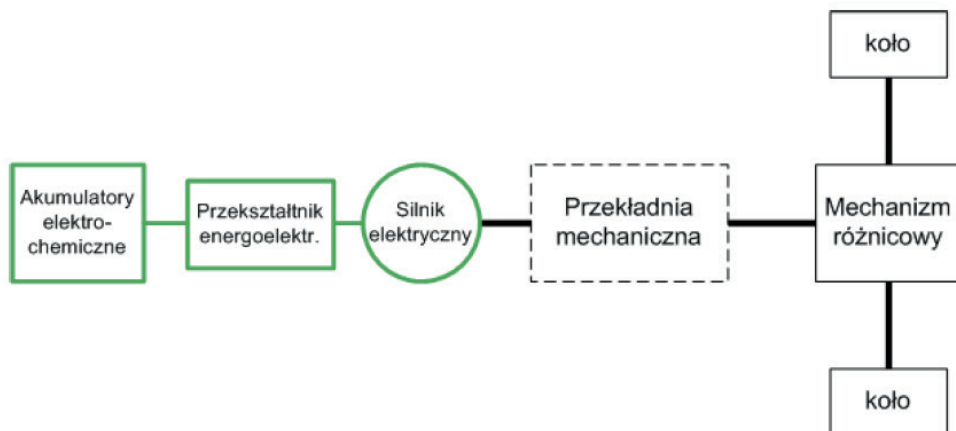
Wyróżnić można trzy podstawowe schematy konstrukcyjne układów napędowych samochodów elektrycznych:

- z jednym silnikiem zasilającym cały układ napędowy,
- z dwoma lub więcej silnikami umieszczonymi w pobliżu kół,
- z silnikami umieszczonymi w kołach pojazdu.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat konstrukcyjny samochodu elektrycznego wyposażonego w pojedynczy silnik elektryczny. Schemat przedstawia podstawowe elementy układu napędowego pojazdu elektrycznego oraz uwidacznia istotne różnice w porównaniu z klasycznym układem napędowym pojazdu spalinowego.

Główne komponenty widoczne na schemacie obejmują:

- silnik elektryczny, pełniący funkcję głównego źródła napędu, zlokalizowany w układzie osi napędowej,
- przetwornicę elektryczną, sterującą parametrami pracy silnika i zapewniającą optymalną konwersję energii elektrycznej z akumulatora na energię mechaniczną,
- akumulator trakcyjny, pełniący rolę magazynu energii, który dostarcza zasilania dla całego układu napędowego,
- sterownik zarządzania napędem (ECU), odpowiedzialny za monitorowanie i regulację parametrów pracy układu,
- przekładnię redukcyjną, zapewniającą dopasowanie momentu obrotowego silnika elektrycznego do wymagań układu napędowego i warunków jazdy,
- wały napędowe i osie kół, które przenoszą moment napędowy na koła jezdne.



Rysunek 4. Schemat konstrukcyjny samochodu elektrycznego z jednym silnikiem

Źródło: Opracowanie własne

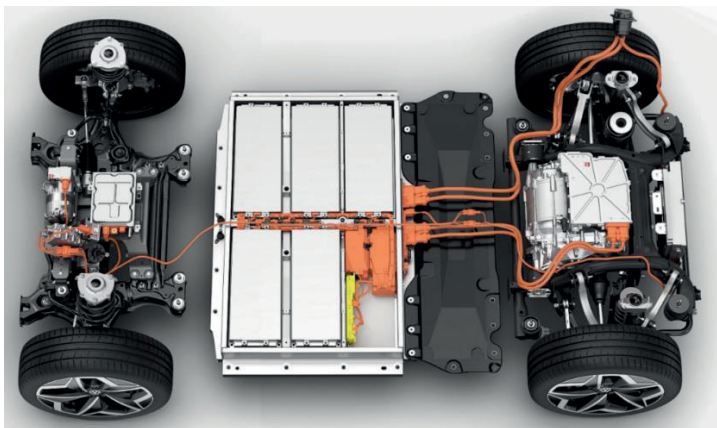
W porównaniu z konstrukcją pojazdu spalinowego w omawianym schemacie wyraźnie widoczny jest brak klasycznej skrzyni biegów. W pojazdach elektrycznych jest ona zazwyczaj zastępowana przez prostą przekładnię redukcyjną ze stałym przełożeniem, co wynika z szerokiego zakresu użytecznego momentu obrotowego generowanego przez silnik elektryczny. Ta uproszczona konstrukcja zmniejsza złożoność układu napędowego, redukuje straty energii i zwiększa niezawodność.

Na rysunku 5 przedstawiono rozmieszczenie elementów układu napędowego w samochodzie Volkswagen e-Up!

Tabela 3. Parametry napędu samochodu e-Up

Wielkość	Wartość
Silnik elektryczny	
Rodzaj	synchroniczny o magnesach trwałych
Moc maksymalna	60 kW
Moc ciągła	40 kW
Moment maksymalny	210 N·m
Moment obrotowy ciągły	160 N·m
Maksymalna prędkość obrotowa	12 000 obr/min
Przekładnia	
Rodzaj	2-biegowa
Przełożenie całkowite	8,16
Układ elektroniczny	
Prąd maksymalny	450 A
Napięcie pracy	250-430 V
Częstotliwość	9-10 kHz

Źródło: Merkiśz, Pielecha (2015)



Rysunek 5. Rozmieszczenie elementów układu napędowego w samochodzie Volkswagen e-Up!

Źródło: Merkiśz, Pielecha (2015)

Rysunek 5 obrazuje kluczowe rozmieszczenie komponentów układu napędowego:

- Akumulator trakcyjny, umieszczony centralnie pod podłogą pojazdu, co zapewnia niski środek ciężkości i równomierne rozłożenie masy. Ze względu na dużą masę akumulatorów oraz ich rozmiary, taka lokalizacja pozwala także zoptymalizować przestrzeń wewnętrzną kabiny i bagażnika.
- Silnik elektryczny, zlokalizowany w przedniej części pojazdu, napędza przednie koła za pośrednictwem prostej przekładni redukcyjnej. Układ ten zapewnia wystarczającą moc i elastyczność dla miejskiego charakteru pojazdu, przy jednoczesnej redukcji strat mechanicznych.
- Ładowarka pokładowa, odpowiedzialna za zarządzanie procesem ładowania akumulatora trakcyjnego, jest przystosowana do korzystania z sieci elektrycznych o napięciu 230 V oraz 400 V, co pozwala na szybkie ładowanie w warunkach domowych i na stacjach szybkiego ładowania.

Opisane rozmieszczenie elementów w Volkswagen e-Up! jest typowe dla nowoczesnych samochodów elektrycznych. Centralne umiejscowienie akumulatorów w podłodze nie tylko poprawia stabilność pojazdu podczas jazdy, ale także przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa pasażerów w razie zderzenia dzięki obniżeniu ryzyka przewrócenia pojazdu.

Silnik elektryczny umieszczony z przodu pojazdu i napędzający przednie koła umożliwia stosunkowo prostą konstrukcję układu napędowego, eliminując konieczność stosowania skomplikowanych przekładni czy wałów napędowych stosowanych w pojazdach o napędzie na tylną oś.

W tabeli 3 przedstawiono parametry napędu samochodu Volkswagen e-Up!, które ilustrują działanie i charakterystykę kluczowych komponentów układu napędowego.

Pojazd wyposażono w automatyczną przekładnię o charakterze redukcyjnym. Przekładnia ta działa w sposób, który:

- zwiększa moment obrotowy przenoszony na koła, co pozwala na osiągnięcie wyższej siły napędowej,
- obniża prędkość obrotową na wyjściu w stosunku do prędkości obrotowej silnika elektrycznego, co optymalizuje działanie układu napędowego przy różnych warunkach jazdy.

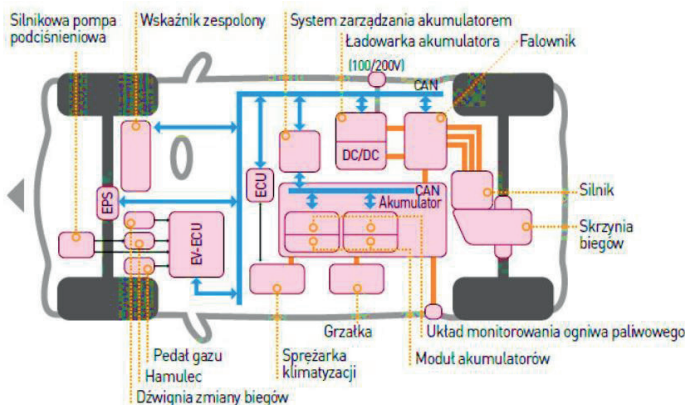
Silnik elektryczny sterowany jest przez zaawansowany układ elektroniczny, który moduluje parametry prądu tak, aby dostosować prędkość obrotową silnika do aktualnych wymagań. Funkcje tego układu obejmują:

- regulację prędkości obrotowej i w funkcji czasu, co zapewnia płynne przyspieszanie oraz precyzyjne sterowanie dynamiką jazdy,
- optymalizację procesów energetycznych, która pozwala na maksymalne wykorzystanie energii zgromadzonej w akumulatorze trakcyjnym,
- redukcję strat energetycznych, co przyczynia się do zwiększenia zasięgu pojazdu na jednym ładowaniu.

Opisane rozwiązania konstrukcyjne, które zostały przedstawione na rysunku 6, w szczególności zastosowanie przekładni redukcyjnej i elektronicznego układu sterowania silnikiem, wpisują się w nowoczesne podejście do projektowania układów napędowych w pojazdach

elektrycznych. Charakteryzują się one prostotą budowy, niezawodnością oraz wysoką wydajnością (Merkisz, Pielecha, 2015).

Na rysunku 6 przedstawiono schemat układu napędowego samochodu elektrycznego Mitsubishi i-MiEV, uwzględniający kluczowe elementy układu zasilania i regeneracji energii.



Rysunek 6. Schemat układu napędowego samochodu elektrycznego Mitsubishi i-MiEV

Źródło: Merkisz, Pielecha (2015)

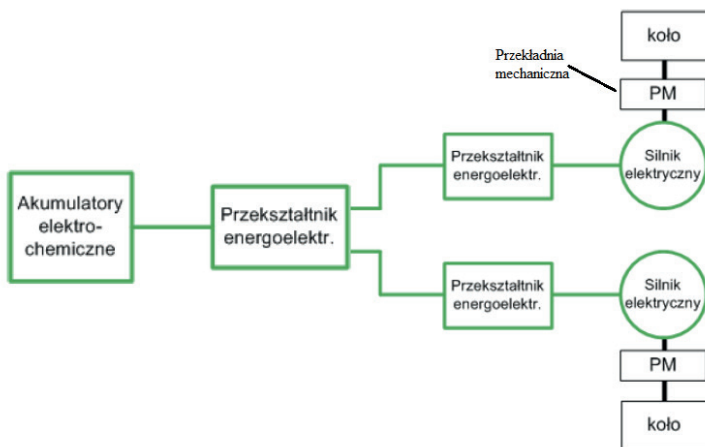
Bateria pojazdu, będąca głównym źródłem zasilania, może być ładowana na dwa sposoby:

- prądem stałym (DC) z tzw. szybkiej ładowarki, co pozwala na znaczne skrócenie czasu ładowania i jest szczególnie przydatne w warunkach stacji szybkiego ładowania,
- prądem przemiennym (AC) z gniazda sieciowego 230V, z wykorzystaniem zintegrowanej ładowarki pokładowej. Ładowanie tego typu jest wygodne, choć bardziej czasochłonne, i odbywa się najczęściej w warunkach domowych.

W trakcie hamowania regeneracyjnego, część energii kinetycznej pojazdu, zamiast być tracona w postaci ciepła (jak ma to miejsce w tradycyjnych układach hamulcowych), jest odzyskiwana. Proces ten odbywa się w generatorze. Energia mechaniczna ruchu pojazdu jest przekształcana w prąd elektryczny i za pośrednictwem prostownika oraz przetwornic DC/DC przekształcana na odpowiednie parametry napięcia i prądu, dla optymalnego ładowania akumulatora.

Schemat układu napędowego pokazuje zintegrowany proces zarządzania energią, który nie tylko pozwala na efektywne użytkowanie zgromadzonej energii elektrycznej, ale również wspiera efektywność energetyczną pojazdu poprzez wykorzystanie procesu regeneracji. Odzyskiwanie energii w trakcie hamowania regeneracyjnego poprawia zasięg pojazdu na jednym ładowaniu oraz przyczynia się do obniżenia zużycia energii z sieci.

Na rysunku 7 przedstawiono schemat konstrukcyjny pojazdu z dwoma silnikami elektrycznymi, który ilustruje układ napędowy zapewniający napęd niezależny dla każdego z kół.



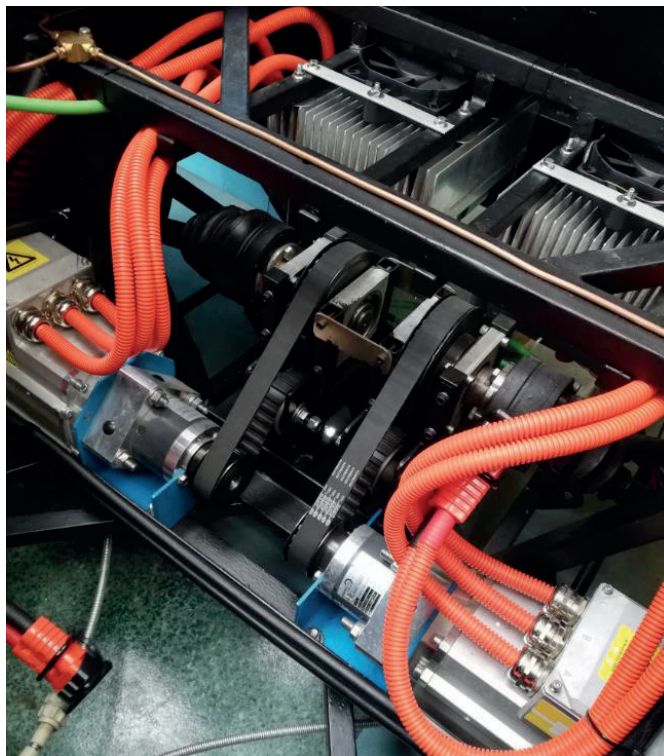
Rysunek 7. Schemat ideowy pojazdu z dwoma silnikami elektrycznymi

Źródło: Opracowanie własne

W tej konstrukcji zastosowanie dwóch oddzielnych silników elektrycznych eliminuje konieczność stosowania klasycznego mechanizmu różnicowego, który w tradycyjnych pojazdach spalinowych służy do rozdzielania momentu obrotowego pomiędzy koła osi. Zamiast tego, pojazd jest napędzany przez dwa silniki elektryczne – po jednym dla każdego koła napędowego.

Dzięki temu rozwiązaniu, prędkości kół wewnętrznego i zewnętrznego w zakręcie są niezależnie kontrolowane. Koło wewnętrzne (wewnętrzne w stosunku do kierunku zakrętu) obraca się wolniej, natomiast koło zewnętrzne obraca się szybciej. Różnica w prędkości obrotowej kół osiągana jest przez precyzyjne sterowanie zasilaniem każdego z silników napędowych. Umożliwia to kontrolę nad podsterownością lub nadsterownością pojazdu oraz wspiera układ ESP. Zapewnia to optymalną przyczepność, a także poprawia stabilność pojazdu.

Braku mechanizmu różnicowego oraz w pełni elektryczny napęd sprawia, że rozwiązanie to umożliwia znacznie prostszą budowę układu napędowego. Mniejsza ilość elementów mechanicznych, obniża masę pojazdu, redukując straty energii. Ponadto, rozwiązanie to umożliwia lepszą kontrolę nad rozdziałem mocy pomiędzy poszczególne koła, co w efekcie zwiększa efektywność napędu i poprawia prowadzenie pojazdu. Praktyczne zastosowanie tego rozwiązania przedstawia rysunek 8.



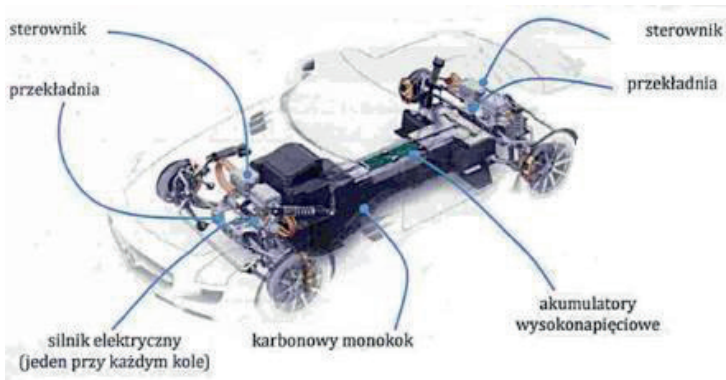
Rysunek 8. Widok układu przeniesienia napędu z dwoma silnikami elektrycznymi zbudowany na Wydziale SiMiR Politechniki Warszawskiej

Źródło: Opracowanie własne

Na Wydziale SiMiR Politechniki Warszawskiej, zbudowano pojazd z napędem na koła tylne. Rozwiązanie to opiera się na dwóch niezależnych silnikach elektrycznych, z których napęd na koła przenoszony jest za pośrednictwem przekładni podwójnej. Przekładnia planetarna, jako pierwsza, której zadaniem jest zwiększenie momentu obrotowego przekazywanego z silnika na koło oraz zmniejszenie prędkości obrotowej. Drugie przełożenie realizuje przekładnia cięgnowa z pasem zębatym. Zastosowanie pasa zębatego w przekładni cięgnowej pozwala nie tylko na zmianę przełożenia ale również na optymalizację konstrukcji.

Na rysunku 9 przedstawiono rozmieszczenie elementów napędu z czterema silnikami elektrycznymi, które zapewniają napęd niezależny dla każdego z czterech kół pojazdu. Tego typu układ napędowy jest stosowany w pojazdach elektrycznych, które wymagają wyjątkowych właściwości trakcyjnych lub dużej siły uciągu. Każdy z czterech silników elektrycznych napędza jedno z kół pojazdu, co umożliwia pełną kontrolę nad przekazywanym momentem obrotowym. Takie rozwiązanie optymalizuje zapotrzebowania na moc redukując poślizgi kół. W rozwiązaniu tym, oprócz samych silników elektrycznych, zastosowano rów-

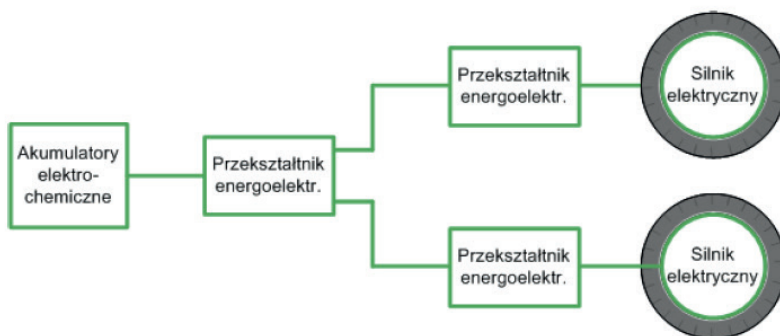
niez odpowiednie przekładnie, które umożliwiają odpowiednie dostosowanie momentu obrotowego i obrotów silników do wymagań napędu. Mimo znaczących korzyści związanych z poprawą trakcji i kontroli nad dynamiką pojazdu, rozwiązanie z czterema silnikami elektrycznymi wiąże się również z wysokimi kosztami konstrukcyjnymi. Zabudowa czterech silników oraz złożonych systemów przekładni zwiększa masę pojazdu, a także wymaga skomplikowanej infrastruktury w postaci dodatkowych układów chłodzenia, sterowania i zasilania.



Rysunek 9. Rozmieszczenie elementów napędu z czterema silnikami elektrycznymi

Źródło: Merkiś, Pielecha (2015)

Inna koncepcja, przedstawiona na rysunku 10, zakłada rezygnację z przekładni redukcyjnych, możliwe jest to przez umieszczenie silnika w piaście koła. Takie rozwiązanie zostało przedstawione na rysunku 10. To innowacyjne rozwiązanie stosowane w nowoczesnych pojazdach elektrycznych, które integruje silniki bezpośrednio z kołami, eliminując konieczność używania klasycznej przekładni mechanicznej. Silniki elektryczne wykorzystywane w tym układzie charakteryzują się specjalną budową, mającą na celu zapewnienie podwyższonej odporności na drgania. Taka konstrukcja umożliwia ich skuteczne działanie w trudnych warunkach, gdzie wibracje mogą być szczególnie intensywne, takich jak jazda po nierównych nawierzchniach. Umieszczenie silników bezpośrednio w obręczy kół pozwala na optymalizację przestrzeni i zapewnia bezpośredni sposób przekazywania momentu obrotowego na koło. Dzięki tej konfiguracji, nie ma potrzeby stosowania przekładni, wałów napędowych czy mechanizmów różnicowych. Przyczynia się to do uproszczenia konstrukcji pojazdu oraz redukcji masy i strat.



Rysunek 10. Schemat układu napędowego pojazdu elektrycznego z silnikami umieszczonymi w kołach napędowych

Źródło: Opracowanie własne

W tym przypadku silnik musi mieć szczególną budowę aby przy ograniczonym miejscu do zamontowania mógł generować wysoki moment obrotowy. Zazwyczaj są to silniki z magnesami trwałymi. Zaletą tego rozwiązania jest duża sprawność układu napędowego, mała ilość elementów oraz możliwość rozbudowywania układu napędowego z 4x2 na 4x4. Do najważniejszych wad należą trudne warunki pracy silników, ograniczone miejsce oraz duża masa nieresorowana. Wstrząsy powodowane nierównościami jezdni mogą spowodować uszkodzenie silnika przez uszkodzenie mocowania magnesów trwałych. Wzrost masy nieresorowanej zwiększa bezwładność koła w ruchu postępowym i obrotowym powodując zwiększone oddziaływanie na zawieszenie pojazdu. Duża masa nieresorowana zwiększa również siły działające w układzie tłumienia drgań powodować odrywanie się kół od nawierzchni podczas pokonywania nierówności drogi, a ponadto zmniejsza odczucie komfortu podróżowania.

Widok (przekrój) koła wraz z napędem przedstawia rysunek 11.



Rysunek 11. Przekrój napędu zintegrowanego z kołem

Źródło: Merkiś, Pielecha (2015)

Na rysunku 12 przedstawiono gniazda ładowania europejskiego modelu Nissana Leafa, pojazdu elektrycznego, wyposażonego w dwa różne typy złączy ładowania. Odpowiadają one wymaganiom różnych systemów ładowania stosowanych na rynku. Po lewej stronie znajduje się gniazdo CHAdeMO, które jest szybkim złączem ładowania prądem stałym (DC) wykorzystywanym do ładowania pojazdów elektrycznych w ramach szybkich stacji ładowania. Technologia CHAdeMO, zapoczątkowana w Japonii, pozwala skrócić czas ładowania w porównaniu do tradycyjnych systemów AC. Złącze to jest szeroko stosowane w pojazdach elektrycznych japońskich marek. Po prawej stronie zlokalizowane jest gniazdo Type 2, które jest obowiązującym standardem złączy ładowania prądem przemiennym (AC) na terenie Unii Europejskiej. Złącze to stosowane jest głównie w standardowych stacjach ładowania, gdzie proces ładowania jest nieco wolniejszy niż w przypadku CHAdeMO, ale wciąż efektywny, zwłaszcza w warunkach domowego ładowania lub publicznych stacji z ładowaniem AC. Gniazdo Type 2 jest powszechnie akceptowane w Europie i gwarantuje kompatybilność z szeroką gamą stacji ładowania dostępnych na tym rynku.



Rysunek 12. Gniazda ładowania europejskiego modelu Nissana Leafa. Po lewej stronie znajduje się charakterystyczne gniazdo CHAdeMO, po prawej – gniazdo Type 2, czyli obowiązujący na terenie Unii Europejskiej standard gniazd

Źródło: Opracowanie własne

Akumulator trakcyjny jak również klasyczny akumulator są źródłami prądu stałego. Różni je napięcie oraz materiały z których zostały wykonane. Dlatego istotną kwestią jest przetwarzanie energii elektrycznej w pojeździe w celu zapewnienia odpowiednich napięć, natężenia oraz rodzaju prądu. Konwersja prądu AC na DC odbywa się za pomocą prostowników a następnie za pomocą przekształtników DC/DC dopasowywane jest napięcie oraz prąd wymagany do ładowania akumulatorów. Pamiętać należy o maksymalnym prądzie ładowania np. dla akumulatorów kwasowych 0,1 C (0,1 pojemności akumulatora) oraz napięcie do 14.8V. Konwersja z prądu z akumulatora trakcyjnego do silnika elektrycznego odbywa się w dwóch etapach. Pierwszy to zamiana DC/AC oraz podwyższenie napięcia za pomocą inwertera a następnie falownik modyfikuje częstotliwość prądu AC. Falownik zmienia częstotliwość prądu przemiennego co umożliwia zmianę prędkości obrotowej silnika AC.

4.1. Rozwiązania konstrukcyjne pojazdów hybrydowych

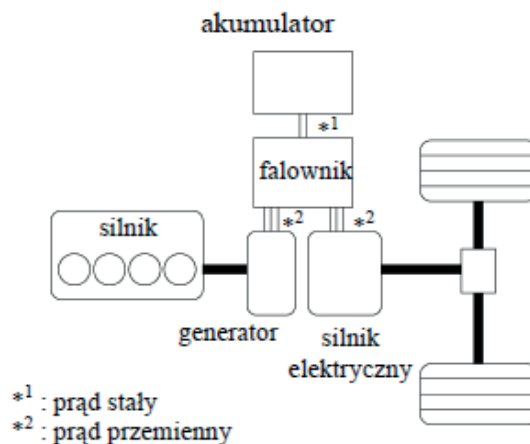
Zgodnie z definicją zawartą w regulaminie nr 85 (EKG) pojazd hybrydowy (PH, ang. HV – *hybrid vehicle*) oznacza pojazd wyposażony w co najmniej dwa różne przemienniki energii i dwa różne układy gromadzenia energii (w pojeździe) przeznaczone do jego napędzania. Przemiennik energii to np. silnik spalinowy albo silnik elektryczny.

Obecnie najczęściej jest to silnik spalinowy ZI pracujący w obiegu Atkinsona i silnik elektryczny. Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje napędów hybrydowych:

- szeregowy,
- równoległy,
- szeregowo-równoległy.

W układzie szeregowym silnik spalinowy jest źródłem energii. Koła napędza tylko silnik elektryczny. Układ szeregowy doskonale sprawdza się, gdy pojazd porusza się przy stałym, nominalnym obciążeniu i prędkości. Wtedy silnik spalinowy może pracować przy największej sprawności. Gdy warunki pracy ulegną zmianie, zużycie paliwa drastycznie wzrośnie. Wynika to z charakterystyki zewnętrznej silnika spalinowego.

Na rysunku 13 przedstawiono schemat szeregowego układu napędowego, w którym zastosowano dwa silniki – elektryczny i spalinowy. Istotą tego rozwiązania jest to, że silniki nie są połączone ze sobą w sposób mechaniczny, lecz łączą je tylko elementy elektryczne. W tym układzie, silnik spalinowy napędza generator, który wytwarza energię elektryczną.



Rysunek 13. Schemat szeregowego układu napędowego

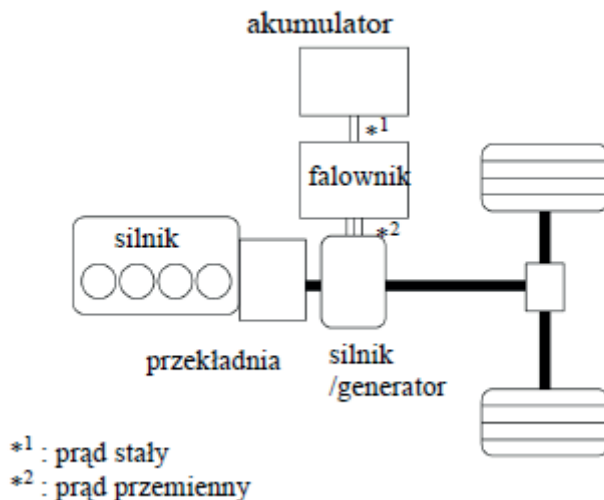
Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Energia elektryczna trafia do bloku zarządzania energią i tam jest rozdzielana i przetwarzana do zasilenia silnika elektrycznego napędzającego koła jezdne oraz na energię ładowania akumulatora. W przypadku gdy naładowany jest akumulator trakcyjny, pojazd napędzany jest bez udziału silnika spalinowego. Sprawność układu szeregowego, to iloczyn sprawności zespołu maszyn połączonych szeregowo. Oznacza to, że całkowita efektywność napędu zależy

od efektywności zarówno silnika spalinowego, jak i silnika elektrycznego. Gdy którykolwiek z elementów układu ma niską sprawność, wpływa to negatywnie na efektywność całego zespołu napędowego. Dlatego w projektowaniu układów szeregowych szczególną uwagę zwraca się na wybór maszyn o jak najwyższej sprawności, co ma kluczowe znaczenie dla efektywności całego systemu.

Układ równoległy umożliwia łączną pracę silnika spalinowego i elektrycznego, z możliwością ich rozdzielenia. Po wyczerpaniu akumulatora pojazd napędza tylko silnik spalinowy. Pojazd taki wymaga stosowania skrzyni biegów, ale przy w pełni naładowanym akumulatorze zapewnia dużą dynamikę pojazdu.

Na rysunku 14 przedstawiono schemat równoległego układu napędowego, w którym silnik elektryczny jest mechanicznie połączony z silnikiem spalinowym, co umożliwia współpracę obu napędów w sposób równoległy. W takim układzie silniki działają niezależnie, ale wspólnie napędzają pojazd, przy czym zarówno silnik elektryczny, jak i spalinowy mogą pracować równocześnie lub selektywnie w zależności od zapotrzebowania na moc. Dodatkowo, napęd równoległy może być realizowany poprzez niezależne połączenie z osiami pojazdu. Oznacza to, że np. przednia oś napędzana jest przez silnik spalinowy a tylna przez elektryczny. Tego typu konfiguracja umożliwia skuteczniejsze wykorzystanie energii, a także daje większe możliwości kontroli trakcji. W układzie równoległym zarówno silnik elektryczny, jak i silnik spalinowy mogą pracować jednocześnie, co pozwala na zwiększenie skuteczności napędu na śliskim podłożu.



Rysunek 14. Schemat równoległego układu napędowego

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Układ mieszany, szeregowo-równoległy zapewnia napęd kół równocześnie przez silnik spalinowy i elektryczny. Niezależnie od stanu naładowania akumulatora dostępna jest pełna moc układu. Pojazd ma zawsze dużą dynamikę i nie potrzebuje klasycznej skrzyni biegów.

Największe doświadczenia w konstruowaniu aut z hybrydowym napędem ma firma Toyota. Omówienie działania układu przeprowadzimy na przykładzie samochodu Toyota Prius II.

W układzie występują dwie maszyny elektryczne które, mogą pracować jako silnik (M-motor) lub generator prądu przemiennego (G-generator). Stąd oznacza się je skrótem MG.

Funkcje elementów układu szeregowo-równoległego:

a) MG1:

- ładuje akumulator trakcyjny,
- steruje przełożeniem między silnikiem a kołami,
- jest rozrusznikiem silnika spalinowego,

b) MG2:

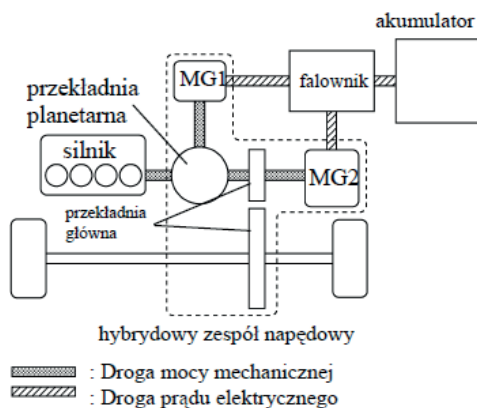
- napędza koła z akumulatora trakcyjnego,
- ładuje akumulator trakcyjny podczas hamowania.

Przekładnia planetarna (przekładnia rozdziału mocy) łączy silnik spalinowy, MG1 oraz MG2 z kołami pojazdu. Nazywana jest też przekładnią E-CVT. Przekładnia główna zwiększa moment obrotowy w układzie napędowym.

Na rysunku 15 przedstawiono schemat układu szeregowo-równoległego (mieszanego), który łączy elementy układu szeregowego i równoległego, umożliwiając elastyczne zarządzanie napędem i generowaniem mocy w pojeździe. W tym układzie maszyny elektryczne, współpracują ze sobą w celu efektywnego przetwarzania energii elektrycznej na mechaniczną – pełniąc rolę silników. Każdy z silników elektrycznych w układzie może również działać jako generator prądu podczas odzyskiwania energii (np. w trakcie hamowania). Efektem tego jest ładowanie akumulatorów energią, która w klasycznych pojazdach jest tracona, poprawia to efektywności energetycznej pojazdu. Takie rozwiązanie sprawia, że elementy te nazywane są maszynami elektrycznymi lub motor-generatorami, gdyż mogą pełnić funkcję zarówno silników, jak i generatorów, zależnie od trybu pracy. W tym układzie, przekładnia główna pełni rolę zwiększenia momentu obrotowego oraz obniża prędkość obrotową kół, co jest szczególnie istotne w kontekście zapewnienia odpowiedniej dynamiki pojazdu oraz redukcji masy elementów przenoszących napęd. W układzie szeregowo-równoległym możliwe jest płynne przełączanie pomiędzy różnymi trybami pracy maszyn w zależności od obciążenia, co pozwala na optymalne wykorzystanie energii z obu źródeł napędu.

W przekładni E-CVT:

- jarzmo połączone jest z silnikiem spalinowym,
- koło słoneczne połączone jest z MG1,
- koło pierścieniowe połączone jest z MG2.

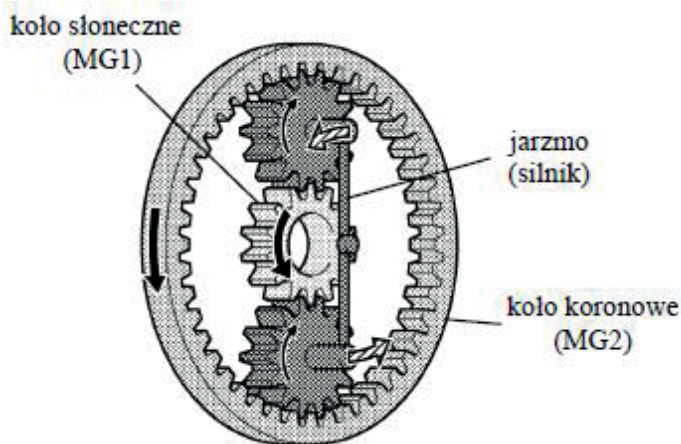


Rysunek 15. Schemat układu szeregowo-równoległego

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

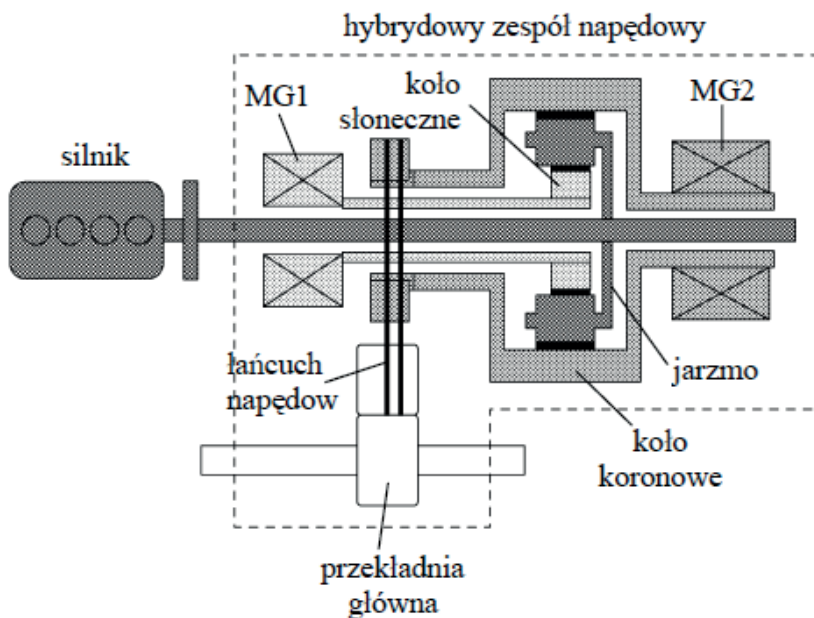
Na rysunku 16 przedstawiono funkcje elementów przekładni planetarnej w napędzie hybrydowym, znanej jako przekładnia e-CVT (*electronic Continuously Variable Transmission*). Jest to zaawansowany układ przekładni, który łączy trzy maszyny w sposób mechaniczny. W przekładni e-CVT, zastosowano przekładnię planetarną, która pozwala na płynne i ciągle dostosowanie stosunku przełożenia w zależności od obciążenia i prędkości obrotowej silników. Układ planetarny składa się z koła słonecznego, kół planetarnych oraz koła koronowego (wieńca), które współpracują w taki sposób, że moc może być rozdzielona między różne źródła napędu, zarówno elektryczne, jak i spalinowe. W porównaniu do klasycznej przekładni CVT, e-CVT nie wykorzystuje elementów jak pasy czy koła pasowe, które zmieniają przełożenie w tradycyjnych przekładniach o zmiennym przełożeniu. Dzięki takiej konstrukcji przekładnia e-CVT charakteryzuje się mniejszymi stratami energii i lepszą wydajnością. Przekładnia e-CVT w napędzie hybrydowym pozwala na elastyczne i płynne dostosowanie napędu do zmieniających się warunków jazdy, umożliwiając równoczesne działanie zarówno silnika elektrycznego, jak i silnika spalinowego. Ponieważ nie ma tutaj potrzeby stosowania tradycyjnych mechanicznych przekładni, taki układ może być prostszy, bardziej niezawodny i cichszy, zapewniając lepszą ekonomikę paliwową i komfort użytkowania pojazdu.

Na rysunku 17 przedstawiono powiązania elementów przekładni planetarnej z elementami napędu pojazdu hybrydowego. W układzie tym przekładnia planetarna odgrywa kluczową rolę w efektywnym zarządzaniu mocą przekazywaną pomiędzy silnikiem spalinowym a silnikami elektrycznymi, umożliwiając płynne przełączanie pomiędzy różnymi trybami pracy pojazdu.



Rysunek 16. Funkcje elementów przekładni planetarnej w napędzie hybrydowym

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

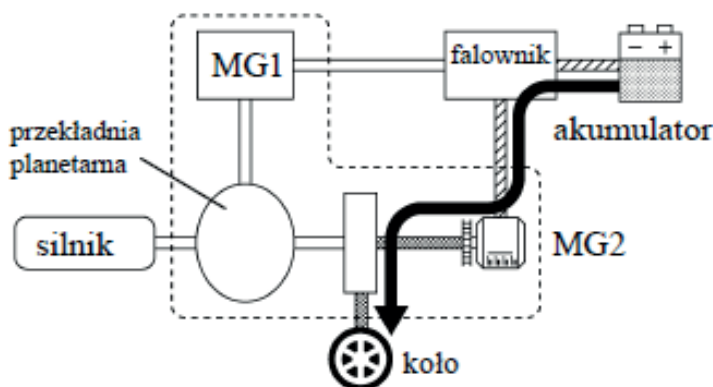


Rysunek 17. Powiązania elementów przekładni planetarnej z elementami napędu pojazdu hybrydowego

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Wał korbowy silnika spalinowego jest bezpośrednio połączony z jarzmem satelitów w przekładni planetarnej. Jarzmo satelitów, będące elementem nośnym w układzie planetarnym, łączy ruch poszczególnych satelitów (planet) i przenosi moment obrotowy z silnika spalinowego do pozostałych elementów układu napędowego. W tym schemacie maszyna MG1 (często silnik elektryczny) jest połączona z kołem słonecznym przekładni planetarnej. Koło słoneczne to główny element przekładni, który generuje lub odbiera moment obrotowy w zależności od kierunku pracy (jako silnik lub generator). Podłączenie maszyny MG1 do koła słonecznego pozwala na regulację prędkości obrotowej w odpowiedzi na zmieniające się wymagania napędowe, takie jak przyspieszanie czy odzysk energii. Z kolei maszyna MG2, również silnik elektryczny, jest połączona z kołem koronowym przekładni planetarnej. Koło koronowe, będące dużym elementem przekładni, odpowiada za odbiór lub generowanie mocy w zależności od aktualnej roli maszyny MG2 w układzie. Połączenie maszyny MG2 z kołem koronowym umożliwia płynne zarządzanie momentem obrotowym na wyjściu z układu, co jest szczególnie istotne w układach hybrydowych, gdzie precyzyjne sterowanie mocą pozwala na minimalizację zużycia paliwa i optymalne wykorzystanie energii elektrycznej.

Na rysunku 18 przedstawiono przepływ energii podczas trybu elektrycznego w pojeździe hybrydowym. W tym trybie pracy, pojazd korzysta wyłącznie z napędu elektrycznego, a silnik spalinowy pozostaje wyłączony. Energia elektryczna jest pobierana bezpośrednio z akumulatora trakcyjnego, w którym zmagazynowana jest energia (akumulator to ogniwo galwaniczne, które może być wielokrotnie ładowane i rozładowywane prądem stałym (DC).



Rysunek 18. Przepływ energii podczas trybu elektrycznego

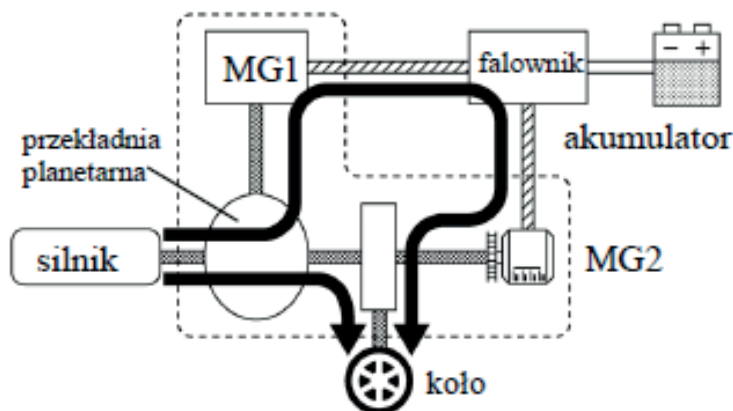
Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Napięcie w akumulatorze wytwarzane jest w wyniku reakcji chemicznej zachodzącej pomiędzy płytami dodatnimi i ujemnymi. Do reakcji niezbędny jest elektrolit). Następnie, energia ta przechodzi przez inwerter, który przekształca prąd stały (DC) w prąd przemienny oraz dopasowuje napięcie (AC) do wartości znamionowej silników. Falownik pełni kluczową rolę w konwersji energii, umożliwiając zasilanie silnika elektrycznego (w tym przypadku silnika

MG2) prądem przemiennym o odpowiedniej częstotliwości, co jest niezbędne do jego prawidłowego działania. Silnik MG2 jest zasilany odpowiednio zmodyfikowanym prądem przemiennym, co pozwala mu na generowanie momentu obrotowego zgodnego z oczekiwaniami kierowcy (reakcja na gaz, hamulec). Odpowiednia wartość momentu obrotowego przekazywana jest następnie przez przekładnię główną do kół pojazdu. Dzięki tej konfiguracji silnik elektryczny może napędzać pojazd bez potrzeby załączania silnika spalinowego. W tym trybie pracy silnik elektryczny jest jedynym źródłem napędu, a cały proces energetyczny odbywa się bez udziału silnika spalinowego. To rozwiązanie pozwala na efektywne wykorzystanie energii z akumulatora, cichą oraz ekologiczną jazdę, zwłaszcza w warunkach miejskich, gdzie pojazd może poruszać się tylko przy użyciu silnika elektrycznego.

Drugim sposobem napędu pojazdu jest pracujący silnik spalinowy, który napędza koła pojazdu oraz MG1. Energia wytworzona przez generator (MG1) jest wykorzystana do zasilania silnika MG2, napędzającego koła pojazdu łącznie z silnikiem spalinowym.

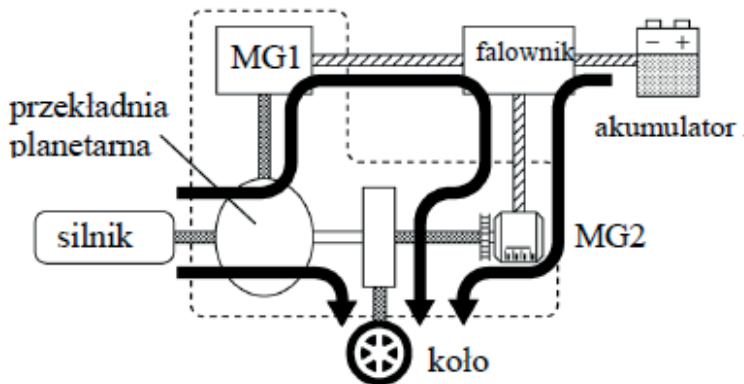
Na rysunku 19 przedstawiono przepływ energii przy średnim obciążeniu w hybrydowym układzie napędowym. W tym trybie energia napędowa pochodzi zarówno z silnika spalinowego, jak i elektrycznego, co pozwala na wydajne zarządzanie mocą podczas jazdy w umiarkowanych warunkach obciążenia. Silnik spalinowy napędza generator MG1, który wytwarza energię elektryczną. Wygenerowany prąd zasila silnik elektryczny MG2. Silnik MG2, zasilany prądem z MG1, generuje moment obrotowy, który za pośrednictwem układu przekładni i elementów napędowych przyczynia się do poruszania kół pojazdu. Jednocześnie, część energii mechanicznej generowanej przez silnik spalinowy jest przekazywana bezpośrednio na koła za pomocą przekładni e-CVT. Dzięki temu uzyskuje się połączenie przepływu energii mechanicznej i elektrycznej, co zwiększa efektywność napędu i umożliwia płynną jazdę bez potrzeby nadmiernego obciążania jednego źródła mocy. Przekładnia e-CVT, będąca kluczowym elementem układu, pozwala na efektywne rozdzielanie i synchronizację mocy między różnymi źródłami napędu, zapewniając płynne przejście między trybami pracy i optymalne wykorzystanie dostępnej energii.



Rysunek 19. Przepływ energii przy średnim obciążeniu

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Na rysunku 20 przedstawiono przepływ energii przy pełnej mocy układu napędowego w hybrydowym pojeździe. W tym trybie oba źródła energii – spalinowe i elektryczne – są wykorzystywane w pełni, co pozwala na maksymalne osiągi pojazdu. Silnik spalinowy napędza prądnicę MG1, która przekształca energię mechaniczną w prąd elektryczny. Wytworzony prąd jest wykorzystywany do zasilania silnika elektrycznego MG2, który generuje moment obrotowy napędzający koła pojazdu. Jednocześnie silnik MG2 otrzymuje dodatkowe zasilanie elektryczne z akumulatora trakcyjnego, co umożliwia uzyskanie większej mocy i zapewnia dynamiczne przyspieszanie pojazdu. Część energii mechanicznej wytwarzanej przez silnik spalinowy jest również przekazywana bezpośrednio na koła za pośrednictwem przekładni e-CVT, co dodatkowo zwiększa moc dostępną na kołach napędowych. W trybie pełnej mocy oba źródła energii współdziałają, co zapewnia efektywne wykorzystanie dostępnej mocy przy zachowaniu elastyczności układu i maksymalnej trakcji.

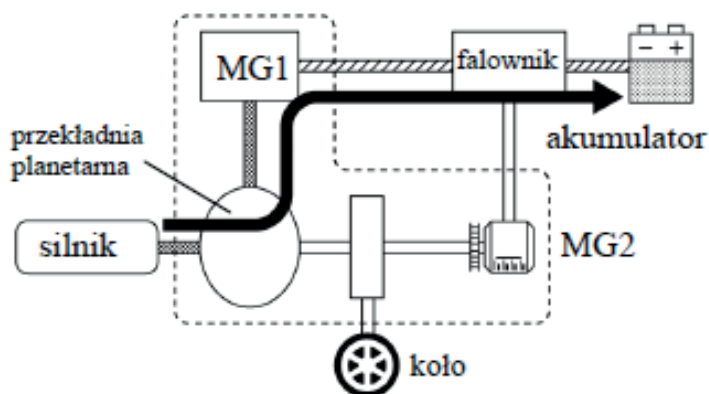


Rysunek 20. Przepływ energii przy pełnej mocy układu napędowego

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Silnik spalinowy napędza MG1 w celu doładowania akumulatora trakcyjnego.

Na rysunku 21 przedstawiono przepływ energii podczas ładowania akumulatora trakcyjnego w pojeździe hybrydowym. W tym trybie, gdy pojazd znajduje się w spoczynku, proces ładowania akumulatora jest realizowany wyłącznie za pomocą silnika spalinowego i generatora. W czasie postoju, silnik spalinowy pozostaje uruchomiony i napędza prądnicę MG1, która przekształca energię mechaniczną na energię elektryczną. Wytworzony przez MG1 prąd elektryczny jest kierowany do akumulatora trakcyjnego, co pozwala na jego doładowanie. Dzięki tej konfiguracji, proces ładowania odbywa się w sposób efektywny, wykorzystując moc silnika spalinowego jako źródło energii w sytuacjach, gdy pojazd nie jest w ruchu, na przykład podczas postoju na światłach czy w korku. Warto podkreślić, że przepływ energii jest ograniczony do komponentów generowania i magazynowania energii, co eliminuje stratność związaną z przesyłaniem energii do silników napędowych.

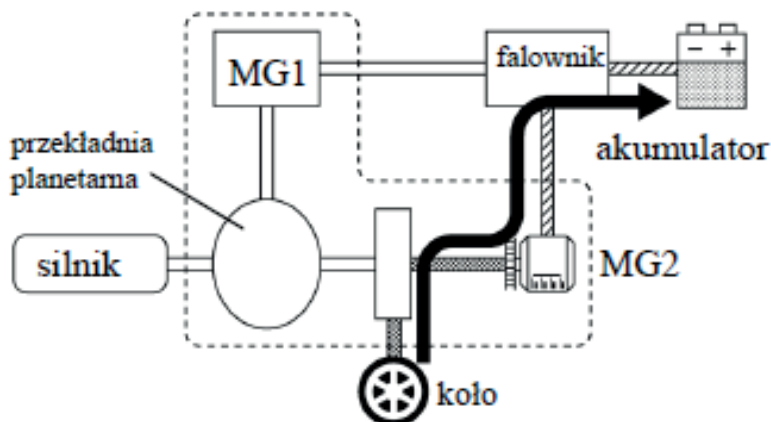


Rysunek 21. Przepływ energii przy ładowaniu akumulatora trakcyjnego

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Podczas hamowania pojazdu moment obrotowy z kół, za pośrednictwem przekładni planetarnej, napędza silnik MG2. Uzyskana w ten sposób energia doładowuje akumulator trakcyjny.

Na rysunku 22 przedstawiono przepływ energii podczas hamowania „odzyskowego” w pojeździe hybrydowym lub elektrycznym. Jest to proces, w którym energia kinetyczna pojazdu, tracąca zwykle w postaci ciepła przy tradycyjnym hamowaniu, jest odzyskiwana i przekształcana na energię elektryczną, co zwiększa ogólną efektywność układu napędowego. W momencie hamowania, które może być inicjowane przez zdjęcie nogi z pedału przyspieszenia lub przy lekkim naciśnięciu hamulca, silnik MG2 (pracujący w trybie generatora) przekształca energię kinetyczną ruchu pojazdu na energię elektryczną. Generowany prąd przepływa przez zespół konwersji energii, który zapewnia prawidłowe zarządzanie energią i dostosowanie parametrów elektrycznych do wymagań układu ładowania. Energia elektryczna uzyskana w prądnicy MG2, po zamianie na prąd stały i dopasowaniu napięcia, jest następnie przekazywana do akumulatora trakcyjnego, gdzie zostaje zmagazynowana, by mogła być później wykorzystana do zasilania silnika elektrycznego w trybie jazdy na napędzie elektrycznym lub hybrydowym. Hamowanie odzyskowe jest szczególnie efektywne w warunkach miejskich lub terenie „górzystym” gdzie częste zwalnianie lub „hamowanie silnikiem” podczas zjazdów z wzniesień pozwala na odzyskanie znacznych ilości energii. W tym systemie opór stawiany przez generator MG2 jest zmienny i zależy od reakcji kierowcy. Umożliwia to uzyskanie optymalnego odzysku energii a dopiero w przypadku, gdy ilość energii kinetycznej jest zbyt duża uruchamiany jest klasyczny układ hamulcowy. Poprawia to efektywność energetyczną pojazdu, zmniejsza zużycie elementów układu hamulcowego oraz redukuje powstawanie pyłów.



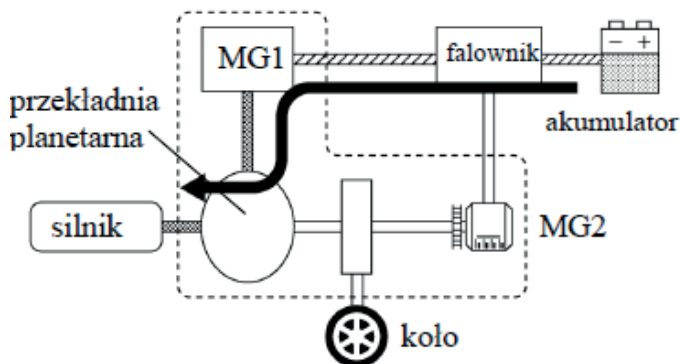
Rysunek 22. Przepływ energii przy hamowaniu odzyskowym

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Rozruch silnika spalinowego następuje przez silnik MG1 zasilany z akumulatora trakcyjnego.

Na rysunku 23 przedstawiono przepływ energii podczas rozruchu silnika spalinowego w hybrydowym układzie napędowym. Proces ten wykorzystuje układ elektryczny pojazdu do uruchomienia silnika spalinowego, eliminując potrzebę stosowania klasycznego rozrusznika mechanicznego. W momencie rozruchu, energia elektryczna jest pobierana z akumulatora trakcyjnego i kierowana do silnika MG1. Silnik MG1 pracuje wówczas w trybie napędu, zamieniając energię elektryczną na mechaniczną. Wytwarzany moment obrotowy jest przekazywany za pośrednictwem przekładni e-CVT na wał korbowy silnika spalinowego, wprowadzając go w ruch do momentu osiągnięcia prędkości obrotowej pozwalającej na samodzielną pracę silnika spalinowego. Cały proces odbywa się płynnie i efektywnie, dzięki integracji elementów elektryczno-mechanicznych w układzie hybrydowym. Taka konfiguracja pozwala nie tylko na redukcję zużycia energii podczas rozruchu, ale także na bardziej niezawodny proces w porównaniu z tradycyjnymi układami, szczególnie w niskich temperaturach lub przy intensywnym użytkowaniu.

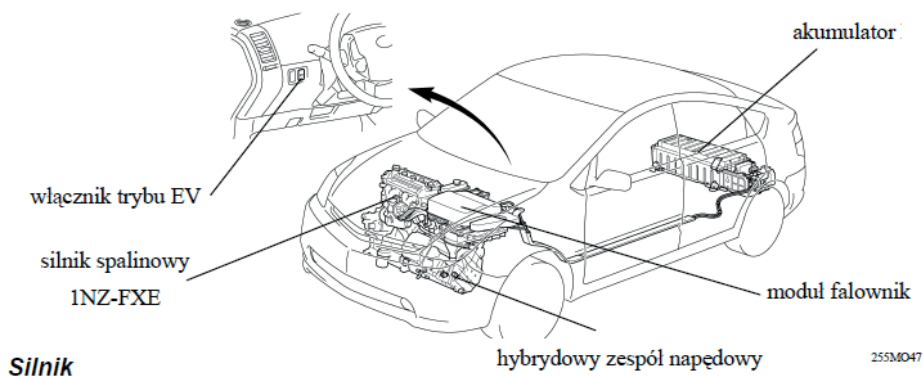
W przypadku, gdy potrzebna jest pełna moc napędowa, silnik spalinowy napędza koła oraz generator MG1, który łącznie z energią z akumulatora zasila silnik MG2.



Rysunek 23. Przepływ energii przy rozruchu silnika spalinowego

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Na rysunku 24 oraz w tabelach 4-5 przedstawiono dane techniczne samochodu hybrydowego Toyota Prius II, które stanowią szczegółowy opis charakterystyki tego modelu. Dane te obejmują parametry zarówno układu napędowego, jak i inne istotne właściwości pojazdu, które wpływają na jego osiągi i efektywność.



Rysunek 24. Dane techniczne samochodu hybrydowego Toyota Prius II

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Tabela 4. Dane techniczne samochodu hybrydowego Toyota Prius II - silnik spalinowy

Silnik		
Model	Prius	Poprzedni Prius
Typ	1NZ-FXE obieg Atkinsona EURO IV	1NZ-FXE obieg Atkinsona EURO IV
Pojemność	1497 cm ³	1497 cm ³
Max. moc	57 kW/5000 obr/min ^{*1}	53 kW/4500 obr/min
Max. moment	115N·m/4000 obr/min ^{*1}	115N·m/4200 obr/min

^{*1} wg: SAE-NET

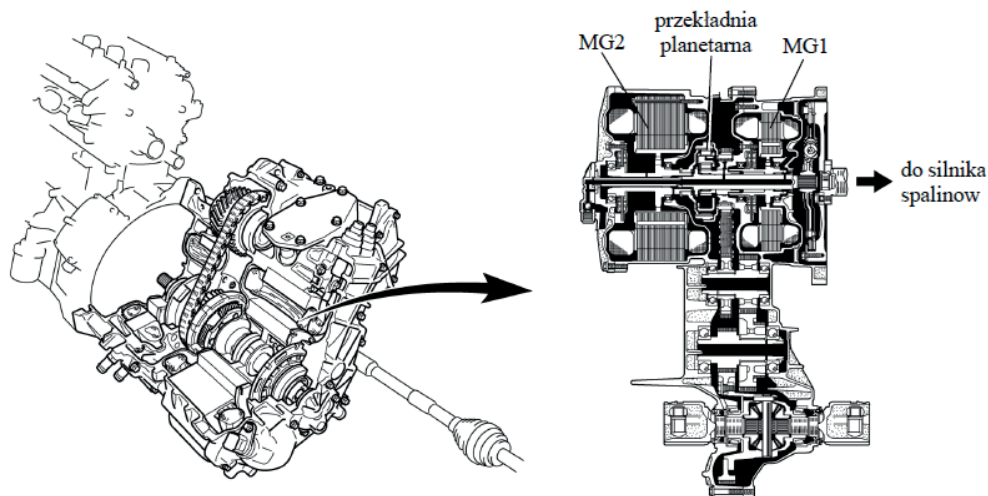
Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Tabela 5. Dane techniczne samochodu hybrydowego Toyota Prius II – silnik elektryczny i generator

Silnik elektryczny i generator			
Pozycja	MG1	MG2	
		Generacja 2	Generacja 1
Typ	Silnik z magnesami stałymi PM	Silnik z magnesami stałymi PM	Silnik z magnesami stałymi PM
Funkcja	Generator, silnik rozruchowy	Generator, silnik napędowy	Generator, silnik napędowy
Napięcie znamionowe (V)	AC 500	AC 500	AC 273.6
Maksymalna moc kW (KM)/(obr/min)	-	50(68)/(1200~1540)	33(45)/(1040~5600)
Maksymalny moment N·m (ft·lbf)/(obr/min)	-	400(295)/(0~1200)	350(259)/(0~400)

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

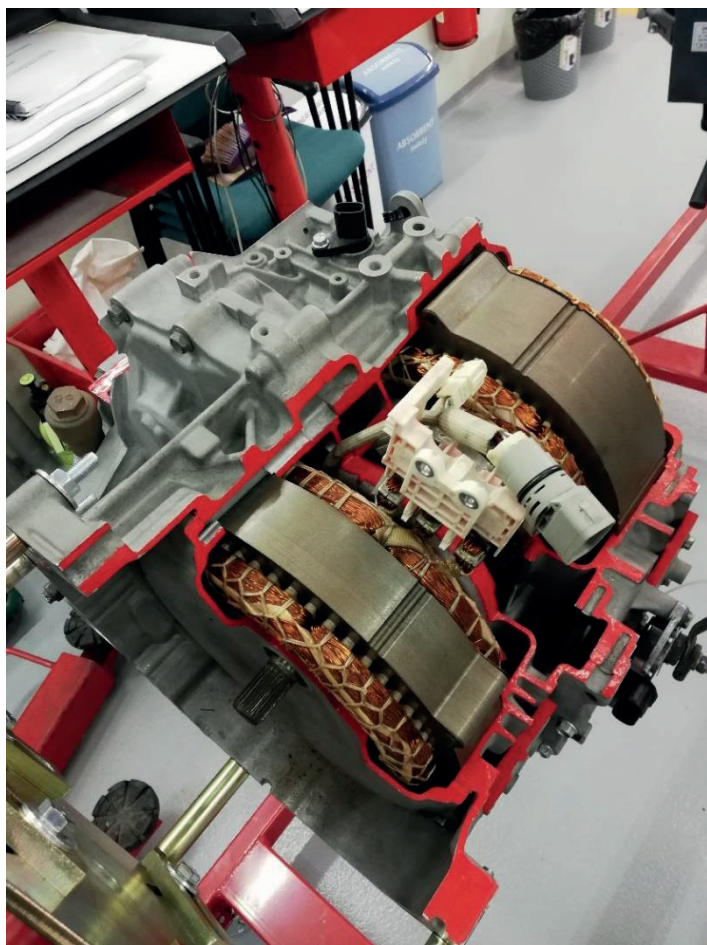
Na rysunku 25 przedstawiono skrzynię przekładniową samochodu Toyota Prius II, w której zastosowano zaawansowane rozwiązanie w postaci podwójnej przekładni głównej zrealizowanej za pomocą walcowych kół zębatach. Konstrukcja ta jest kluczowym elementem układu napędowego, umożliwiającym skuteczne przenoszenie mocy na koła pojazdu przy zachowaniu wysokiej efektywności pracy całego napędu. Podwójna przekładnia główna pełni funkcję mechanicznego mostka, umożliwiając efektywne przenoszenie mocy zarówno z silnika spalinowego, jak i silników elektrycznych MG1 i MG2, zgodnie z wymaganiami układu napędowego hybrydowego w różnych trybach pracy pojazdu.



Rysunek 25. Skrzynia przekładniowa samochodu Toyota Prius II

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

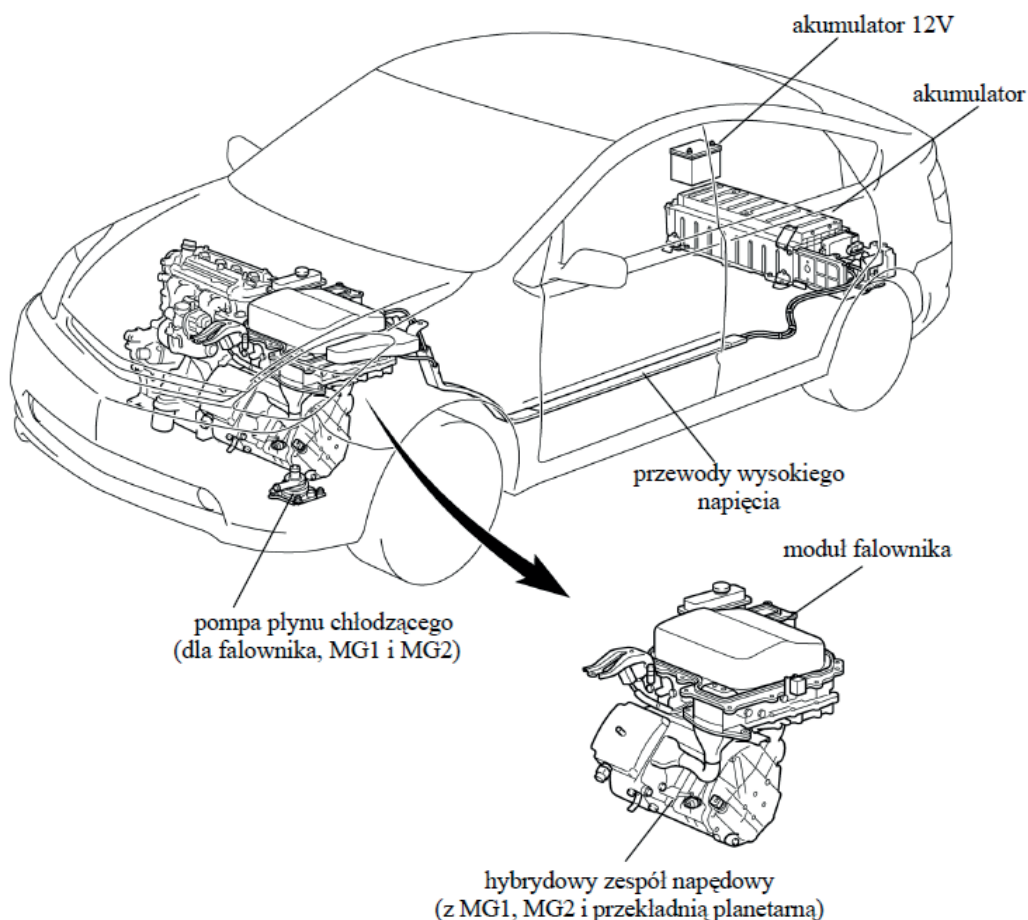
Na rysunku 26 przedstawiono skrzynię przekładniową samochodu Toyota Prius pierwszej generacji, która łączy w sobie rozwiązania technologiczne stosowane w pojazdach hybrydowych. Konstrukcja ta została zaprojektowana jako integralny element hybrydowego układu napędowego. Obudowa skrzyni wykonana jest ze stopów aluminium, co pozwala na znaczne zmniejszenie masy zespołu przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej wytrzymałości. Wewnątrz obudowy znajdują się dwie maszyny elektryczne, MG1 i MG2, pełniące rolę generatora oraz silnika elektrycznego. MG1 odpowiada za uruchamianie silnika spalinowego i generowanie energii elektrycznej, podczas gdy MG2 jest głównym źródłem mocy elektrycznej napędzającej koła pojazdu. Zintegrowano także przekładnię planetarną e-CVT, która działa jako bezstopniowa skrzynia biegów, umożliwiając płynne zarządzanie przepływem mocy między silnikiem spalinowym a maszynami elektrycznymi, dostosowując moment obrotowy do zmieniających się warunków pracy pojazdu. Cały zespół montowany jest do silnika spalinowego w sposób zbliżony do konwencjonalnych skrzyń biegów, co pozwala na efektywne połączenie obu źródeł napędu i ich współpracę w systemie hybrydowym.



Rysunek 26. Skrzynia przekładniowa samochodu Toyota Prius pierwszej generacji

Źródło: Opracowanie własne

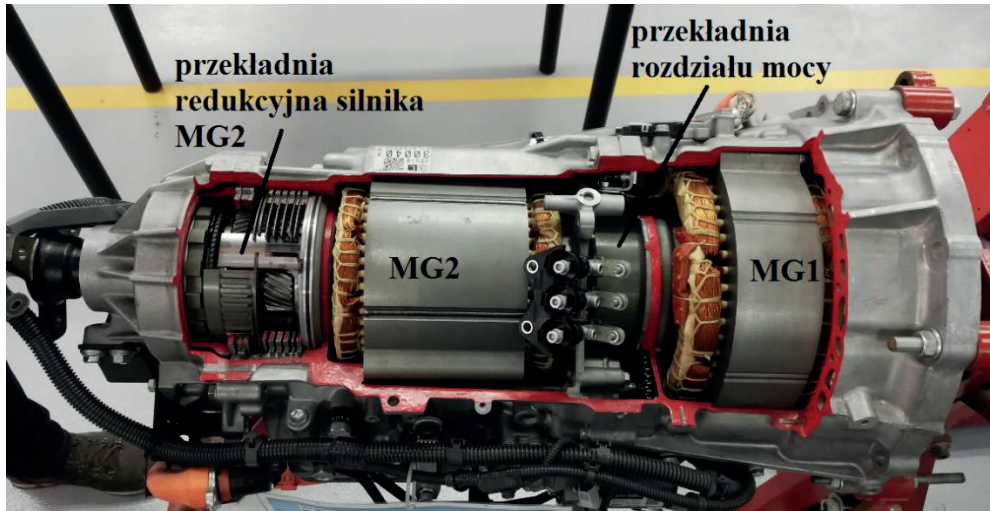
Na rysunku 27 przedstawiono rozmieszczenie zasadniczych elementów napędu hybrydowego w samochodzie Toyota Prius II, uwzględniające zoptymalizowane rozmieszczenie masy pojazdu. Projekt ten odzwierciedla zaawansowaną inżynierię ukierunkowaną na uzyskanie maksymalnej efektywności energetycznej oraz właściwości jezdnych. Akumulator trakcyjny znajduje się w tylnej części pojazdu, co pomaga zrównoważyć masę samochodu względem obu osi, wykorzystywany jest zarówno do zasilania silnika MG2, jak i do przechowywania energii odzyskanej podczas hamowania. Elementy napędu hybrydowego (MG1, MG2, silnik spalinowy, przekładnia e-CVT) są lokalizowane w przedniej części pojazdu w komorze silnikowej, co pozwala na efektywne przenoszenie mocy na koła i optymalizację przestrzeni wewnętrznej pojazdu.



Rysunek 27. Rozmieszczenie zasadniczych elementów napędu hybrydowego w samochodzie Toyota Prius II

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

Rysunek 28 przedstawia przykład zaawansowanego rozwiązania technologicznego, które łączy tradycyjną mechanikę z nowoczesnym układem elektrycznym, oferując efektywne i dynamiczne prowadzenie pojazdu Lexus RX 450H. To rozwiązanie funkcjonalnie jest tożsame z rozwiązaniem z modelu Prius II (rys. 26). Rozwiązania te różni konstrukcja, która jest dostosowana do masy i mocy silników oraz sposób przeniesienia napędu – w tym przypadku układ wzdłużny.



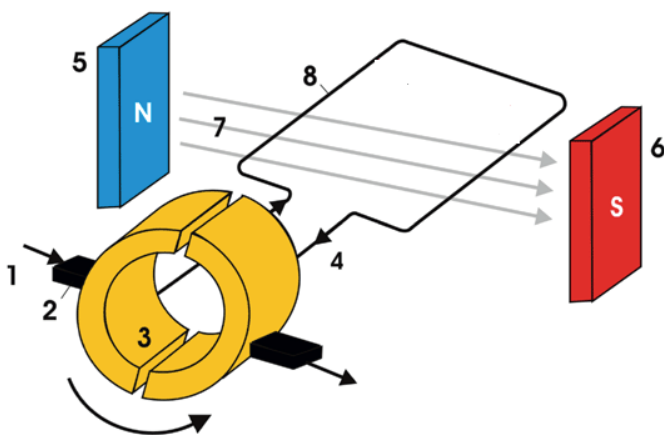
Rysunek 28. Hybrydowa skrzynia biegów samochodu Lexus RX 450H

Źródło: NCF_Prius, Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji

5. Rodzaje, budowa i charakterystyka silników elektrycznych stosowanych w pojazdach

Silnik elektryczny jest maszyną zamieniającą energię elektryczną na energię mechaniczną, natomiast generator prądu wytwarza prąd elektryczny z energii mechanicznej. Każdy silnik elektryczny może pracować jako generator i na odwrót, dlatego silniki, które pracują w stanie generowania prądu nazywa się maszynami elektrycznymi. Moc nominalna silnika podana na tabliczce znamionowej oznacza moc mechaniczną na wale silnika. Moc elektryczna silnika jest większa od mechanicznej o wielkość strat.

Na rysunku 29 przedstawiono model silnika elektrycznego, który opiera się na zasadzie działania pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez prąd elektryczny przepływający przez ramkę z uzwojeniem. Ramka (8) jest zasilana prądem, którego kierunek zmienia się co 180 stopni dzięki zastosowaniu komutatora (3). Komutator pełni rolę przełącznika, który zmienia polaryzację prądu w uzwojeniach ramki. Wokół przewodników, z których wykonana jest ramka, powstaje pole elektromagnetyczne, które oddziałuje z polem magnetycznym wytworzonym przez nabiegunniki, co wywołuje ruch obrotowy wirnika. Interakcja między strumieniem magnetycznym generowanym przez nabiegunniki, a polem elektromagnetycznym w ramce powoduje powstawanie momentu obrotowego, który napędza silnik. Dzięki tej zasadzie silnik elektryczny jest w stanie przekształcać energię elektryczną w mechaniczną.



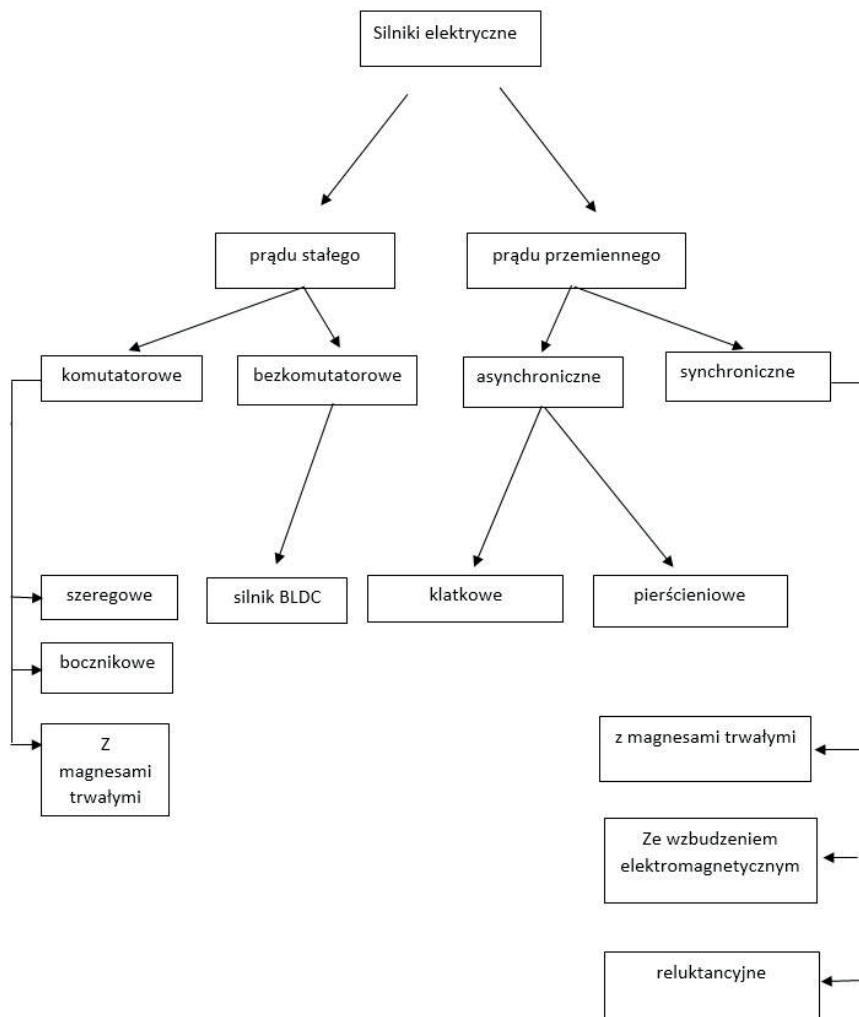
Rysunek 29. Model silnika elektrycznego. 1 – kierunek prądu zasilania, 2 – szczotka węglowa, 3 – komutator, 4 – kierunek prądu w uzwojeniach wirnika, 5 – nabiegunnik północny, 6 – nabiegunnik południowy, 7 – linie pola magnetycznego, 8 – uzwojenie wirnika

Źródło: <http://jakub80.prv.pl/kaciknauk/seps.htm>

Ogólnie każdy silnik składa się z wirnika oraz stojana. Wirnik obraca się względem stojana dzięki oddziaływaniu strumieni magnetycznych. Podział silników wynika z rodzaju prądu zasilającego, ze sposobu wytworzenia strumieni magnetycznych oraz sposobu połączenia względem siebie uzwojeń.

Podczas doboru silnika do napędu pojazdu należy uwzględnić:

- jego charakterystyki,
- bezobsługowość i niezawodność,
- sprawność i moc jednostkową,
- koszt wytworzenia.



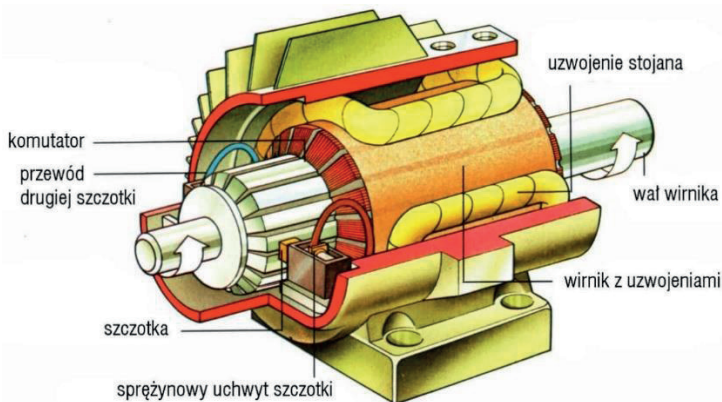
Rysunek 30. Podział silników elektrycznych stosowanych w napędach pojazdów

Źródło: Merkiś, Pielecha (2015)

Najważniejsze wymagania w stosunku do silnika elektrycznego w napędzie pojazdu to:

- duża gęstość mocy (czyli silnik powinien mieć małą masę oraz wymiary i jednocześnie dużą moc);
- duży moment obrotowy przy małych prędkościach obrotowych i duża moc przy wysokich prędkościach obrotowych wirnika;
- szeroki zakres użytecznych prędkości obrotowych.

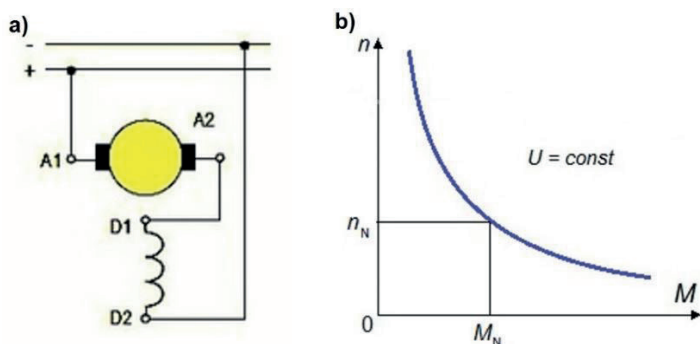
Na rysunku 31 przedstawiono komutatorowy silnik prądu stałego bez magnesów trwałych, w którym zamiast magnesów stałych w stojanie zastosowano nabiegunniki uzwojone. Takie rozwiązanie pozwala na wygenerowanie dużego strumienia magnetycznego przy stosunkowo małych wymiarach silnika. Wykorzystanie nabiegunników uzwojonych umożliwia efektywne wytwarzanie pola magnetycznego, które współdziała z polem wytworzonym przez uzwojenie wirnika, umożliwiając napędzanie silnika. Takie rozwiązanie konstrukcyjne pozwala na zwiększenie mocy silnika, zachowując przy tym kompaktowe wymiary, co jest istotną zaletą, szczególnie w zastosowaniach wymagających dużych mocy w ograniczonej przestrzeni.



Rysunek 31. Komutatorowy silnik prądu stałego bez magnesów trwałych

Źródło: <https://forbot.pl/blog/silniki-elektryczne-szczotkowe-bezsztotkowe-krokowe-id2802>

Na rysunku 32 przedstawiono schemat silnika szeregowego oraz charakterystykę tego typu silnika. Nazwa silnika pochodzi od faktu, że uzwojenia stojana są połączone w szereg z uzwojeniami wirnika, co powoduje, że prąd płynący przez uzwojenia wirnika i stojana jest identyczny. Charakterystyka silnika szeregowego ma postać hiperboli, co oznacza, że wraz ze wzrostem obrotów silnika, moment obrotowy maleje. Silnik ten charakteryzuje się utrzymującą się stałą mocą w każdym punkcie pracy, co wynika z jego specyficznej konstrukcji oraz zależności między momentem obrotowym a prędkością obrotową. Tego typu silniki znajdują zastosowanie w urządzeniach, w których wymagana jest wysoka prędkość obrotowa przy zmiennej wartości momentu.



Rysunek 32. a) Schemat silnika szeregowego oraz b) charakterystyka silnika szeregowego

Źródło: <https://www.cire.pl/pliki/2/goryca13.pdf> i <https://botland.com.pl/pl/content/230-wybor-wlasciwego-silnika-dc>

W silniku szeregowym uzwojenie wzbudzenia (D1-D2) jest połączone szeregowo z uzwojeniami wirnika (A1-A2). Silnik ten ma szerokie zastosowanie w pojazdach elektrycznych, szczególnie starszych. Ma bardzo korzystną charakterystykę. Jego największą wadą jest to, że nie można uruchamiać go bez obciążenia (np. po wymontowaniu z pojazdu) bo wirnik zacznie obracać się zbyt szybko i ulegnie zniszczeniu (<https://slideplayer.pl/slide/5024043/>).

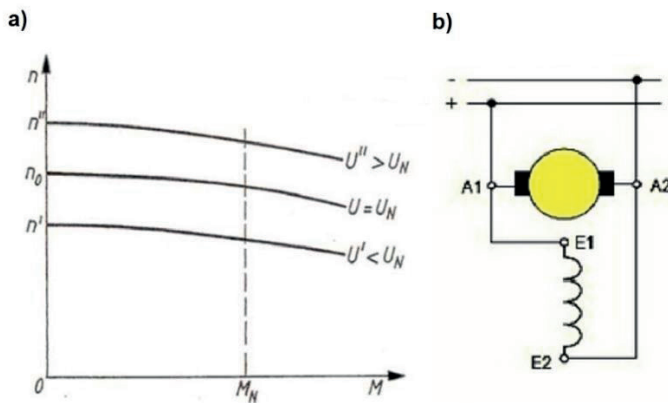
Na rysunku 33 przedstawiono zniszczony wirnik silnika szeregowego. Komutator oraz podłączone do niego końcówki uzwojenia wirnika zostały wyrwane z miejsc mocowania na skutek działania siły odśrodkowej, która powstała w wyniku przekroczenia dopuszczalnej prędkości obrotowej silnika. Zjawisko to, związane z nadmiernymi prędkościami obrotowymi, prowadzi do uszkodzenia elementów mechanicznych wirnika, a w konsekwencji do całkowitego uszkodzenia silnika. Działanie sił odśrodkowych podczas nadmiernych obrotów powoduje, że elementy wirnika, takie jak komutator oraz jego połączenia z uzwojeniami, nie są w stanie wytrzymać tych obciążeń, co skutkuje ich wyrwaniem i zniszczeniem.



Rysunek 33. Zniszczony wirnik silnika szeregowego

Źródło: <https://slideplayer.pl/slide/5024043/>

Na rysunku 34 przedstawiono charakterystykę oraz schemat silnika bocznikowego. Nazwa silnika pochodzi od faktu, że uzwojenia wzbudzenia umieszczone w stojanie są połączone równolegle (paralelnie) do uzwojeń wirnika. W tej konstrukcji uzwojenia stojana i wirnika są zasilane oddzielnie, co pozwala na niezależne sterowanie prądem w obu obwodach. Charakterystyka silnika bocznikowego pokazuje, że moment obrotowy jest niemal stały w szerokim zakresie prędkości obrotowej. Jest to istotna zaleta w aplikacjach wymagających utrzymania stabilnego momentu obrotowego w różnych warunkach pracy, na przykład w napędach maszyn roboczych. Tego typu silniki charakteryzują się również płynniejszym startem i bardziej równomiernym rozkładem obciążeń niż silniki szeregowe.

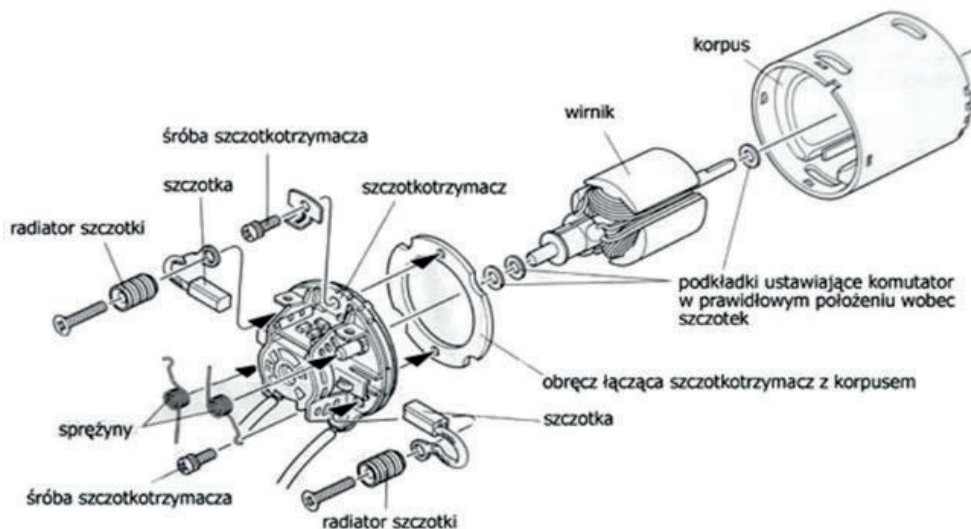


Rysunek 34. a) Charakterystyka silnika bocznikowego oraz b) schemat silnika bocznikowego

Źródło: https://ziladoc.com/download/str-1-36_pdf i <https://bezel.com.pl/2018/08/01/maszyny-pradu-stalego/>

Silnik bocznikowy ma równolegle połączone uzwojenia wzbudzenia (E1-E2) oraz wirnika (A1-A2). Jego zaletą jest mała podatność na zmianę prędkości obrotowej przy zmieniającym się obciążeniu.

Na rysunku 35 przedstawiono komutatorowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi. W tym rozwiązaniu zamiast nabiegunników w formie elektromagnesów, w stojanie silnika umieszczono magnesy trwałe. Tego rodzaju konstrukcja eliminuje konieczność zasilania uzwojeń wzbudzenia prądem, co zmniejsza złożoność i poprawia efektywność silnika. Magnesy trwałe wytwarzają stałe pole magnetyczne, które współdziała z polem wytwarzanym przez prąd w wirniku. Dzięki tej technologii, silnik staje się bardziej kompaktowy, wydajny i mniej podatny na zużycie, co znacząco poprawia jego trwałość i sprawność. Wadą natomiast jest mniejsza moc w porównaniu do silników o tej samej masie posiadających uzwojenia wzbudzenia.



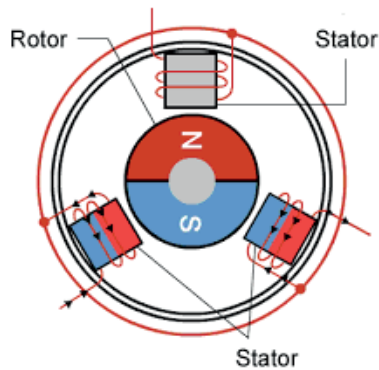
Rysunek 35. Komutatorowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi

Źródło: <https://forbot.pl/blog/silniki-elektryczne-szczotkowe-bezsztotkowe-krokowe-id2802>

5.1. Silnik bezszczotkowy prądu stałego (BLDC)

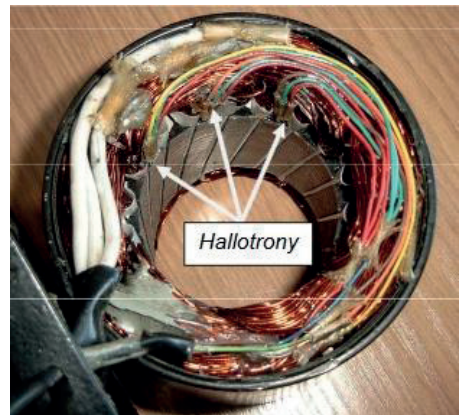
Na rysunku 36 przedstawiono schemat silnika BLDC (bezsztotkowego silnika prądu stałego). W tym rodzaju silnika nie ma szczotek, które tradycyjnie służyłyby do zasilania uzwojonego wirnika. Zamiast tego w wirniku umieszczono magnesy trwałe, co pozwala na eliminację kontaktu elektrycznego między szczotkami a komutatorem, redukując straty i zużycie mechaniczne. Załączanie nabiegunków stojana odbywa się w sekwencji, zgodne z kierunkiem ruchu wirnika. Proces ten jest kontrolowany za pomocą czujników położenia, które monitorują bieżące ustawienie wirnika względem stojana, umożliwiając precyzyjne sterowanie przepływem prądu w uzwojeniu stojana (połączonego w trójkąt lub gwiazdę) i tym samym zapewniając efektywne i płynne obracanie wirnika. Takie rozwiązanie zapewnia wyższą sprawność, mniejsze zużycie energii i dłuższą żywotność silnika.

Na rysunku 37 przedstawiono wirnik oraz stojan silnika BLDC. Na wirniku znajdują się silne magnesy wykonane z metali ziem rzadkich, które generują pole magnetyczne. Zastosowanie magnesów z ziem rzadkich pozwala na osiągnięcie wysokiej gęstości strumienia magnetycznego, co wpływa na zwiększenie momentu obrotowego oraz efektywności energetycznej silnika. W stojanie zainstalowane są czujniki Hallotronowe, które służą do precyzyjnego określania położenia wirnika. Dzięki tym czujnikom system sterujący może odpowiednio przełączać zasilanie uzwojeń stojana w odpowiednich momentach, zapewniając płynny ruch wirnika i maksymalną sprawność pracy silnika.



Rysunek 36. Schemat silnika BLDC

Źródło: <https://botland.com.pl/pl/content/230-wybor-wlasciwego-silnika-dc>



Rysunek 37. Wirnik oraz stojan silnika BLDC

Źródło: <https://www.cire.pl/pliki/2/goryca13.pdf>

Silniki bezszczotkowe prądu stałego charakteryzują się:

- wysoką sprawnością w całym zakresie prędkości obrotowej,
- dużą przeciążalnością momentem obrotowym,
- szerokim zakresem prędkości obrotowej,
- mniejszymi wymiarami gabarytowymi (w porównaniu do silników indukcyjnych lub silników prądu stałego),
- efektywną regulacją prędkości obrotowej,
- dużą niezawodnością ruchową w porównaniu do silników prądu stałego (brak węzła szczotkowego).

Do wad silnika BLDC należy zaliczyć:

- wysoki koszt produkcji,
- skomplikowany system sterowania,
- tętnienie momentu obrotowego minimalnej ilości cewkach w stojanie. (<https://automatykaonline.pl/Artykuly/Technika-napedowa/napedy-blcd>)

W silnikach prądu stałego występują następujące zależności fizyczne:

$$M_e = C \cdot \varphi \cdot I$$

gdzie:

- | | |
|-----------|--------------------------------|
| M_e | – moment obrotowy (Nm), |
| C | – stała konstrukcyjna silnika, |
| φ | – strumień magnetyczny (Wb), |
| I | – natężenie prądu (A). |

oraz

$$n = \frac{U - R \cdot I}{C \varphi}$$

gdzie:

- | | |
|-----------|--|
| n | – prędkość obrotowa wirnika (obr/min), |
| U | – napięcie zasilania (V), |
| R | – rezystancja wirnika (Ω), |
| φ | – strumień magnetyczny (Wb), |
| C | – stała konstrukcyjna silnika, |
| I | – natężenie prądu (A). |

5.2. Silniki prądu przemiennego

Podział silników (rys.31) na synchroniczne i asynchroniczne wynika z prędkości obrotowej wirnika i pola elektromagnetycznego wirującego w nieruchomym stojanie. Pole to wiruje podobnie jak migające lampki choinkowe ułożone w pętle, włączane w odpowiedniej konfiguracji dają złudzenie poruszania się świecących punktów.

W silnikach asynchronicznych pole w stojanie wiruje z prędkością wyższą niż wirnik, natomiast w silnikach synchronicznych z taką samą.

Na rysunku 38 przedstawiono silnik indukcyjny klatkowy, który jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych konstrukcji silników elektrycznych, stosowaną zarówno w przemyśle, jak i w gospodarstwach rolnych. Charakteryzuje się zwartą budową, co zapewnia mu wysoką wytrzymałość mechaniczną i niezawodność w trakcie pracy. Silnik ten jest trwały i bezobsługowy, ponieważ nie zawiera szczotek ani komutatorów, co eliminuje konieczność ich regularnej konserwacji. Dzięki swojej prostocie konstrukcji, silnik klatkowy jest łatwy do produkcji, co wpływa na jego dużą dostępność i konkurencyjność cenową. Jest również odporny na przeciążenia i wykazuje dobrą efektywność w szerokim zakresie obciążeń, co czyni go popularnym rozwiązaniem w wielu zastosowaniach przemysłowych.

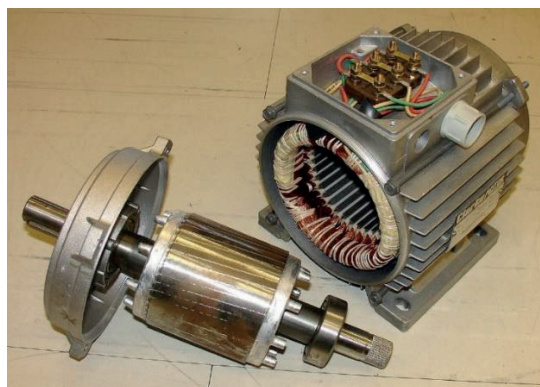
Silnik klatkowy jest maszyną, w której uzwojenie wirnika wygląda jak wałek wykonany z metalowych prętów połączonych na obu końcach. Połączenie prętów na obu podstawach walca powoduje, że silnik ten czasem nosi nazwę silnika zwartego.



Rysunek 38. Silnik indukcyjny klatkowy

Źródło: <http://movimet.pl/polskie-silniki-elektryczne/46-silnik-celma-ak-030738.html>

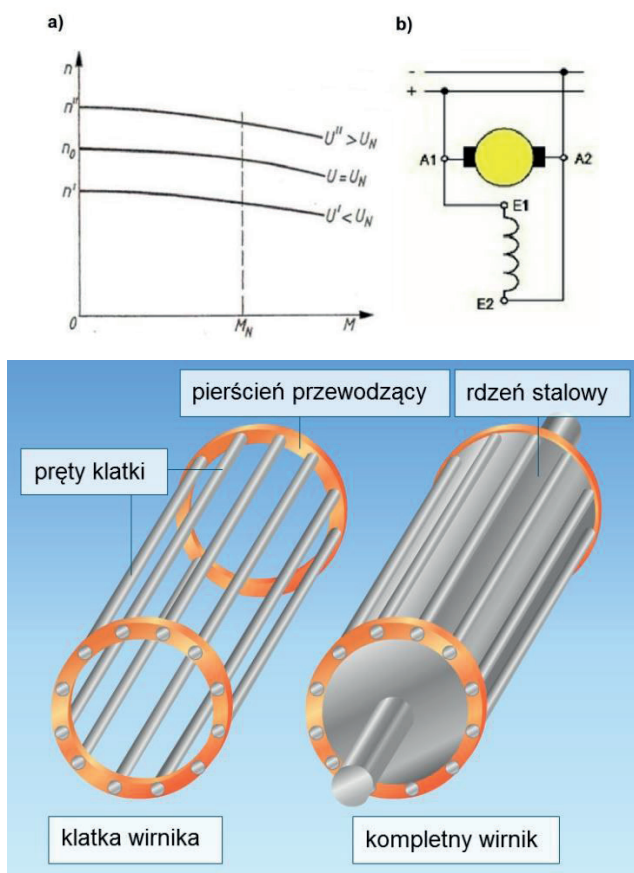
Na rysunku 39 przedstawiono wirnik i stojan silnika klatkowego. Na wirniku widoczny jest charakterystyczny układ prętów. Wirnik składa się z blach krzemowych, które zostały zatopione w stopie aluminium. Taki sposób wykonania wirnika zapewnia jego odpowiednią przewodność elektryczną oraz wytrzymałość mechaniczną. Blachy krzemowe w wirniku mają na celu zminimalizowanie strat eddy'ego i polepszają efektywność silnika, zmniejszając straty energii wynikające z powstawania prądów wirowych. Z kolei materiał z aluminium, stosowany do zalania prętów, umożliwia lepsze odprowadzenie energii cieplnej oraz zmniejsza masę, co poprawia osiągi i trwałość silnika klatkowego.



Rysunek 39. Wirnik i stojan silnika klatkowego

Źródło: <http://movimet.pl/polskie-silniki-elektryczne/46-silnik-celma-ak-030738.html>

Na rysunku 40 przedstawiono budowę wirnika silnika klatkowego. Kształt przekroju prętów wirnika ma kluczowe znaczenie dla momentu rozruchowego silnika, ponieważ bezpośrednio wpływa na sposób wytwarzania pola magnetycznego oraz jego oddziaływanie z polem stojana. W celu zwiększenia momentu rozruchowego, produkowane są silniki głębokożłobkowe oraz dwukłatkowe. W silnikach tych zastosowanie odpowiedniego układu prętów umożliwia lepsze wypełnienie przestrzeni między wirnikiem a stojanem, co przyczynia się do zwiększenia sił elektromagnetycznych w momencie startu. Silniki dwukłatkowe mają dodatkową warstwę zwoju, co również poprawia wydajność w zakresie momentu obrotowego przy rozruchu, umożliwiając uzyskanie lepszych parametrów pracy w początkowej fazie działania. Takie rozwiązania zwiększają efektywność silnika podczas uruchamiania, zapewniając lepsze właściwości dynamiczne i wyższy moment obrotowy przy niskich prędkościach obrotowych.



Rysunek 40. Budowa wirnika silnika klatkowego

Źródło: <http://scholaris.pl/resources/run/id/51142>

Silnik nie posiada komutatora, prąd w uzwojeniach wirnika (w prętach klatki) powstaje w wyniku indukcji elektromagnetycznej (stąd nazwa – indukcyjny).

Prędkość obrotowa tego silnika przy stałej częstotliwości, napięciu i obciążeniu zależy od liczby par biegunów w stojanie. Dlatego silniki te mają nominalne prędkości obrotowe nieznacznie niższe od wynikających ze wzoru:

$$n_s = \frac{60f}{p} \text{ (obr/min)}$$

gdzie:

- n_s – prędkość obrotowa wirującego pola w stojanie (obr/min),
- f – częstotliwość (Hz),
- p – liczba par biegunów (najczęściej od 1 do 6).

Wirnik stojana obraca się wolniej od wirującego pola generowanego przez stojan. Różnica w prędkościach wirowania nazywana jest poślizgiem i wyrażona wzorem:

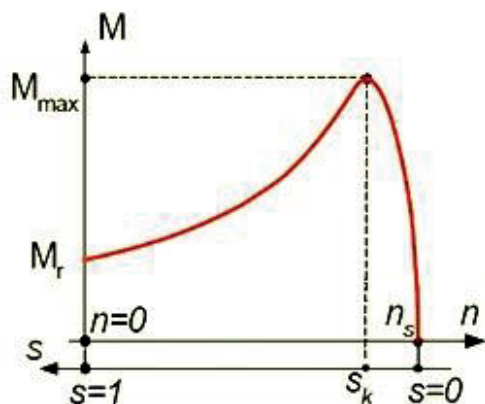
$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

gdzie:

- s – poślizg,
- n – prędkość wirowania wirnika.

Przy stałej częstotliwości i napięciu charakterystyka silnika klatkowego odbiega od pożądanej do napędu pojazdu.

Na rysunku 41 przedstawiona jest charakterystyka silnika klatkowego przy stałej częstotliwości i napięciu zasilania. Normalny zakres pracy silnika mieści się pomiędzy poślizgiem krytycznym, a poślizgiem zerowym. Poślizg krytyczny to wartość, przy której moment obrotowy osiąga swoje maksymalne wartości, a poślizg zerowy to punkt, w którym silnik osiąga maksymalną prędkość obrotową przy danym zasilaniu. Wzrost obciążenia mechanicznego wału silnika prowadzi do przesunięcia punktu pracy w kierunku momentu krytycznego. Oznacza to, że z większym obciążeniem związany jest wzrost wartości poślizgu, a moment obrotowy silnika rośnie, aż osiągnie wartość maksymalną. Przekroczenie wartości dopuszczalnego obciążenia prowadzi do zatrzymania silnika, ponieważ dalszy wzrost obciążenia może spowodować spadek momentu obrotowego poniżej wymaganego poziomu, co w efekcie uniemożliwia dalszą pracę silnika. Charakterystyka ta obrazuje zależność między momentem obrotowym a poślizgiem, która jest kluczowa w ocenie wydajności i parametrów pracy silnika klatkowego w warunkach zmiennego obciążenia.

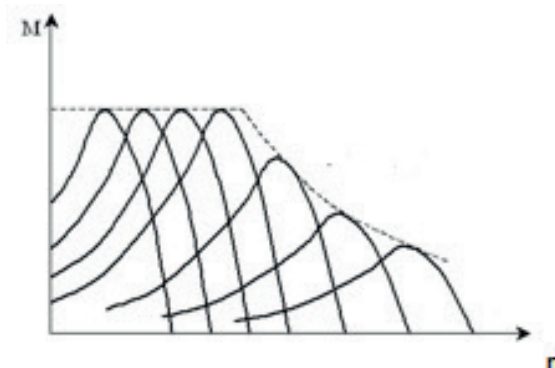


Rysunek 41. Charakterystyka silnika klatkowego przy stałej częstotliwości i napięciu zasilania.
 M – moment obrotowy, M_{max} – maksymalny moment obrotowy, M_r – moment obrotowy rozruchowy,
 n – prędkość obrotowa wirnika, n_s – prędkość synchroniczna wirnika, s – poślizg wirnika

Źródło: <https://bezel.com.pl/2018/08/01/maszyny-indukcyjne/>

Można to zmienić stosując sterowanie przy użyciu falownika (urządzenia zmieniającego częstotliwość prądu) i dostosować charakterystykę silnika do potrzeb napędu, co zostało pokazane na rysunku 42. Zmieniając częstotliwość prądu można "przesunąć" maksymalny moment obrotowy silnika w kierunku niższych obrotów i uzyskać większy moment rozruchowy. Jeżeli zmiany częstotliwości (obniżenie) dokonamy przy stałym napięciu zasilania to spowoduje to niekorzystną zmianę momentu obrotowego spowodowaną zmniejszeniem strumienia magnetycznego. Zwiększenie strumienia powoduje wzrost strat w „żelazie”. Dlatego silniki asynchroniczne steruje się przy stałym stosunku napięcia do częstotliwości. Jest to sterowanie skalarne.

Na rysunku 42 przedstawiono możliwość zmiany charakterystyki silnika klatkowego w zależności od częstotliwości prądu zasilającego stojan. Kolejne krzywe charakterystyki uzyskano poprzez zmianę częstotliwości zasilania, przy jednoczesnym utrzymaniu stałego stosunku napięcia do częstotliwości (tzw. zasada V/f). Zmiana częstotliwości prądu zasilającego wpływa na parametry pracy silnika, takie jak moment obrotowy oraz poślizg. Zwiększenie częstotliwości prowadzi do wyższej prędkości obrotowej silnika, co może być użyteczne w aplikacjach wymagających regulacji prędkości obrotowej silnika. Zmieniając częstotliwość, można dostosować moment obrotowy i charakterystykę silnika do różnych warunków obciążeniowych. Dzięki tej metodzie możliwe jest uzyskanie bardziej elastycznych i wydajnych rozwiązań napędowych, szczególnie w przypadku silników, które muszą pracować w szerokim zakresie obrotów.



Rysunek 42. Możliwości zmiany charakterystyki silnika klatkowego

Źródło: <https://slideplayer.pl/slide/5024043/>

Na rysunku 43 przedstawiono silnik indukcyjny pierścieniowy, w którym widoczne są dwie skrzynki zaciskowe. Pierwsza skrzynka, znajdująca się po lewej stronie, służy do podłączenia zasilania stojana, który odpowiada za wytwarzanie pola magnetycznego w silniku. Druga skrzynka jest przeznaczona do podłączenia wirnika za pomocą pierścieni ślizgowych oraz szczotek. Pierścienie ślizgowe umożliwiają doprowadzenie prądu do uzwojeń wirnika. Dodatkowo, na czas rozruchu silnika, podłączane są do tego układu dodatkowe rezystancje zewnętrzne, które służą do regulacji prądu rozruchowego i zmniejszenia wpływu szkodliwych skutków przeciążenia prądowego. Tego typu rozwiązanie pozwala na kontrolowanie momentu obrotowego podczas uruchamiania silnika, zmniejszając ryzyko jego uszkodzenia oraz zapewniając łagodniejszy start, co szczególnie jest istotne przy silnikach o dużych mocach, stosowanych w różnych gałęziach przemysłu.

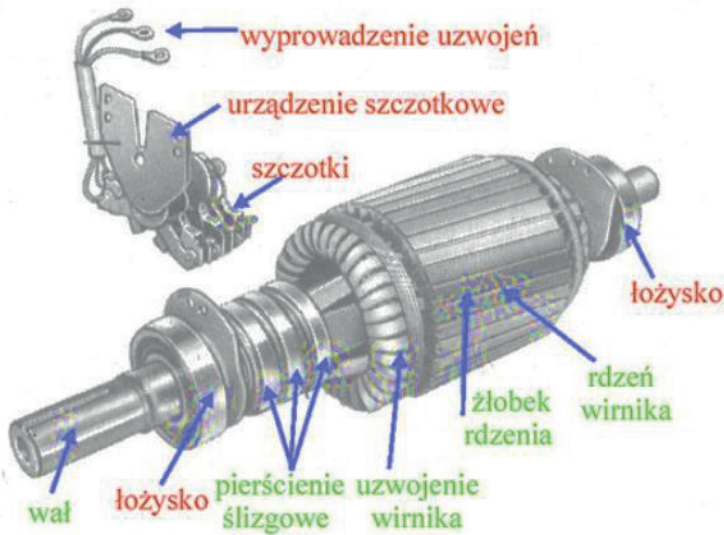


Rysunek 43. Widok silnika indukcyjnego pierścieniowego

Źródło: <http://www.zetech.pl/product/silnik-szude-56i/>

Silniki asynchroniczne pierścieniowe mają identyczny stojan jak silniki klatkowe. Różnica w porównaniu z silnikami synchronicznymi wynika z innego uzwojenia wirnika i wyprowadzeniu końcówek tych uzwojeń na zewnątrz przez zastosowanie pierścieni ślizgowych (takich jak na wirnikach alternatorów).

Na rysunku 44 przedstawiono wirnik silnika pierścieniowego. Jest to element, który stanowi część ruchomą silnika indukcyjnego pierścieniowego. Wirnik składa się z rdzenia, na którym osadzone są uzwojenia, oraz pierścieni ślizgowych, które umożliwiają doprowadzenie prądu do uzwojeń wirnika. Pierścienie ślizgowe są odpowiedzialne za połączenie wirnika z zewnętrznymi elementami, takimi jak szczotki, które przekazują energię elektryczną do wirnika. Dodatkowo, wirnik w silniku pierścieniowym jest wyposażony w uzwojenia, które mogą być połączone z dodatkowymi rezystancjami zewnętrznymi na czas rozruchu, co pozwala na kontrolowanie wartości prądu w wirniku podczas startu i zapobiega przeciążeniu silnika. Struktura wirnika tego typu silnika umożliwia uzyskanie większego momentu obrotowego i lepszą kontrolę nad charakterystyką pracy, zwłaszcza w aplikacjach wymagających zmiennego obciążenia.

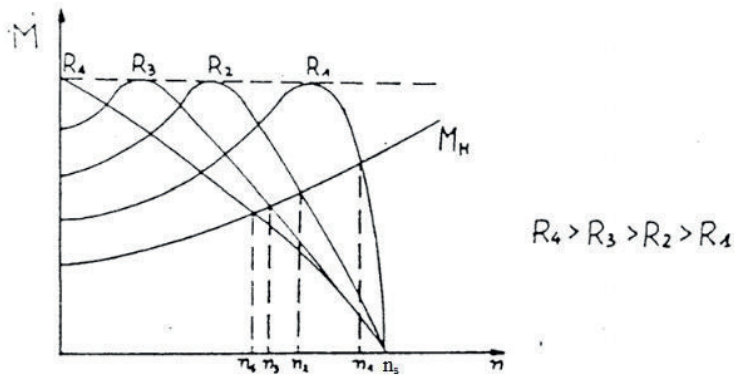


Rysunek 44. Wirnik silnika pierścieniowego

Źródło: <https://slideplayer.pl/slide/86322/>

Na rysunku 45 przedstawiono charakterystyki silnika pierścieniowego przy różnej rezystancji wirnika. Zmiana rezystancji wirnika wpływa na moment obrotowy silnika, szczególnie w fazie rozruchu. Krzywe momentu odpowiadające różnym wartościom rezystancji wskazują, że dołączenie największej rezystancji (oznaczonej jako R4) pozwala uzyskać największy moment rozruchowy. Zwiększenie rezystancji powoduje ograniczenie prądu rozruchowego, co w efekcie zmienia dynamiczne właściwości silnika, umożliwiając uzyskanie

wysokiego momentu obrotowego przy niższych prądach początkowych. Tego typu strategia jest stosowana w celu poprawy rozruchu silnika, zwłaszcza w aplikacjach, które wymagają dużego momentu przy uruchamianiu, takich jak napędy maszyn przemysłowych czy systemy transportowe. Krzywe momentu pomagają w optymalizacji pracy silnika pierścieniowego, zapewniając mu płynny i kontrolowany rozruch w różnych warunkach obciążenia.

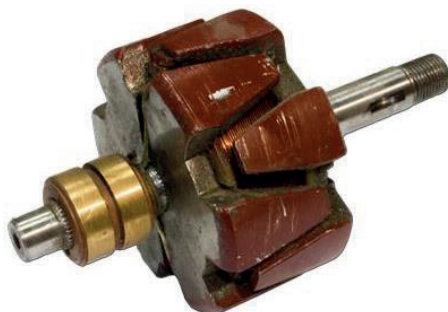


Rysunek 45. Charakterystyki silnika pierścieniowego przy różnej rezystancji wirnika

Źródło: <http://www.ssdservice.pl/~ssdservice/SSDdrives/ELEKTROTECHNIKA/maszyny%20elektr/silniki%20elektryczne.pdf>

Poza różnicami w konstrukcji wirnika, wymuszającymi dodatkowe czynności obsługowe silnik pierścieniowy nie różni się od silnika klatkowego. Silnik synchroniczny posiada stojan nawinięty tak samo jak w silnikach asynchronicznych.

Na rysunku 46 przedstawiono wirnik silnika synchronicznego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym. Dzięki zastosowaniu pierścieni ślizgowych i szczotek, możliwe jest podłączenie końcówek uzwojenia wirnika, co pozwala na sterowanie wartością strumienia magnetycznego emitowanego przez ten wirnik. Strumień magnetyczny, generowany przez uzwojenia wzbudzenia w wirniku, jest kluczowy dla synchronizacji prędkości obrotowej wirnika z polem magnetycznym stojana silnika synchronicznego. W wyniku zastosowania pierścieni ślizgowych, można precyzyjnie kontrolować poziom wzbudzenia, a tym samym wpływać na moment obrotowy i efektywność pracy silnika. To rozwiązanie umożliwia zastosowanie silników synchronicznych w aplikacjach wymagających stałej prędkości obrotowej oraz dużych momentów, np. w napędach precyzyjnych i w dużych systemach przemysłowych.



Rysunek 46. Wirnik silnika synchronicznego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym

Źródło: <https://agri-truck.pl/ogolna/8884-xwirnik-alternatora-kamaz-540000001416.html>

Na rysunku 47 przedstawiono wirnik silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. W tym przypadku, zamiast uzwojeń wzbudzenia, na wirniku umieszczono magnesy trwałe, które generują stały strumień magnetyczny. Dzięki temu, nie ma potrzeby stosowania pierścieni ślizgowych i szczotek, które są używane w tradycyjnych silnikach synchronicznych z wzbudzeniem elektromagnetycznym. Rozwiązanie to eliminuje problemy związane z obsługą i utrzymaniem elementów zużywających się, takich jak szczotki i pierścienie ślizgowe, co zwiększa niezawodność silnika oraz zmniejsza jego wymagania konserwacyjne. Silnik z magnesami trwałymi charakteryzuje się wyższą efektywnością i mniejszymi stratami energii, ponieważ nie ma potrzeby zasilania uzwojenia wzbudzenia. Tego typu silniki są szeroko stosowane w nowoczesnych pojazdach elektrycznych oraz innych aplikacjach wymagających dużej wydajności przy jednoczesnej minimalizacji kosztów eksploatacyjnych.

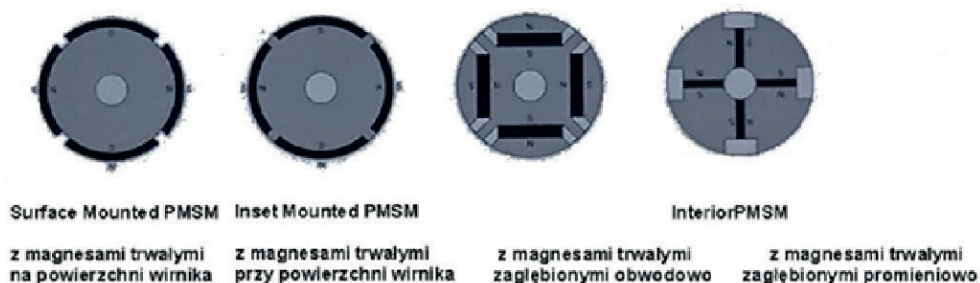


Rysunek 47. Wirnik silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

Źródło: http://home.pydys.com/budowa_generatora

Cecha wyróżniającą silniki synchroniczne jest to, że pracują zawsze przy stałej prędkości obrotowej w zakresie obciążeń nominalnych. Przy obciążeniu momentem wyższym od krytycznego wirnik zatrzyma się. Prędkość obrotowa tych silników zależy tylko od liczby par biegunów w stojanie i częstotliwości prądu zasilającego. Gdy włączymy silnik synchroniczny bezpośrednio do sieci to nie podejmie on pracy. Silniki wyposażone w wirniki z uzwojeniem posiadają zamontowane na wale pierścienie ślizgowe oraz współpracujące z nimi szczotki węglowe. W innym przypadku stosuje się jeden z czterech wariantów montażu magnesów trwałych na wirniku. Rozwiązania te nie wymagają obsługi.

Na rysunku 48 przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne montażu magnesów trwałych na wirniku. W takich konstrukcjach magnesy są zwykle montowane w określony sposób, aby zapewnić równomierne rozmieszczenie strumienia magnetycznego w celu zoptymalizowania pracy silnika. Magnesy mogą być montowane w wirniku na różne sposoby, w zależności od konstrukcji silnika. Często stosowaną metodą jest zastosowanie magnesów w postaci pasków lub segmentów, które są przyklejane, wprasowywane lub wbudowywane w wirnik za pomocą specjalnych klamr lub tulei. Magnesy te muszą być precyzyjnie umieszczone, aby zapewnić stabilność pola magnetycznego i zminimalizować straty energetyczne. W przypadku silników o wyższej wydajności, wykorzystujących magnesy ziem rzadkich, konstrukcja montażu magnesów może obejmować również techniki montażu w metodzie "według wzorca", co zapewnia precyzyjne ich umiejscowienie oraz utrzymanie wysokiej efektywności energetycznej. Konstrukcja ta pozwala również na osiągnięcie większej mocy przy mniejszych rozmiarach wirnika, co ma zastosowanie w wielu nowoczesnych pojazdach elektrycznych i innych technologiach wymagających silników o wysokiej gęstości mocy.

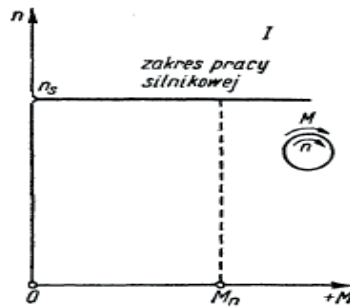


Rysunek 48. Rozwiązania konstrukcyjne montażu magnesów na wirniku

Źródło: Kisielewski P, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Nr 64*

Rysunek 49 przedstawia charakterystykę mechaniczną silnika synchronicznego. W tym przypadku, przy stałych parametrach zasilania, prędkość obrotowa silnika pozostaje na stałym poziomie, niezależnie od zmian obciążenia, aż do momentu, gdy obciążenie osiągnie wartość krytyczną. Po przekroczeniu tego punktu, napotykamy na zjawisko zerwania "więzi" magnetycznej pomiędzy wirnikiem a stojanem, co prowadzi do zatrzymania silnika. Zjawisko to wynika z faktu, że silnik synchroniczny działa na zasadzie utrzymywania stałej synchronizacji prędkości wirnika z prędkością obrotową pola magnetycznego wytwarzanego przez stojan. Kiedy obciążenie staje się zbyt duże, wówczas moment obrotowy, który może

wygenerować silnik, przestaje być wystarczający do utrzymania tej synchronizacji. Skutkuje to utratą synchronizacji, w wyniku czego wirnik przestaje obracać się z tą samą prędkością, co pole magnetyczne w stojanie. To zjawisko jest istotne w kontekście projektowania i eksploatacji silników synchronicznych, ponieważ muszą one pracować w zakresie określonych parametrów obciążeniowych, aby uniknąć tego typu problemów.



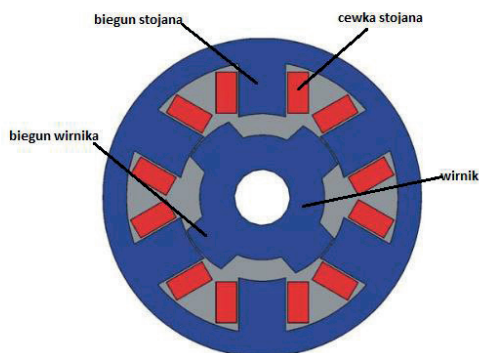
Rysunek 49. Charakterystyka mechaniczna silnika synchronicznego

Źródło: Krakowiak (2012)

Przy stałym strumieniu magnetycznym wirnika czyli przy stałym prądzie wzbudzenia lub przy zastosowaniu magnesów trwałych moment obrotowy silnika synchronicznego zależy od napięcia zasilania stojana. Dostosowanie charakterystyki mechanicznej takiego silnika jest możliwe przy użyciu zaawansowanego technicznie kontrolera.

Silnik reluktancyjny jest maszyną elektryczną posiadającą uzwojony stojan i nieuzwojony wirnik. Na obu elementach występują tzw. jawne bieguny przy czym liczby ich są parzyste i różne od siebie.

Rysunek 50 przedstawia schemat budowy silnika reluktancyjnego. Silnik reluktancyjny działa na zasadzie różnicy w reluktancji (oporze magnetycznym) pomiędzy różnymi pozycjami wirnika względem stojana. Aby taki silnik mógł poprawnie funkcjonować, niezbędna jest asymetria magnetyczna wirnika, co umożliwia dążenie wirnika do pozycji, w której jego reluktancja jest minimalna. Reluktancja to opór magnetyczny, który zależy od kształtu i właściwości materiałów, z których wykonane są elementy wirnika oraz stojana. Wirnik silnika reluktancyjnego przesuwają się w taki sposób, aby osiągnąć konfigurację, w której ścieżka przepływu strumienia magnetycznego staje się jak najprostsza, a opór magnetyczny jak najmniejszy. Tego rodzaju silniki charakteryzują się prostą konstrukcją i wysoką efektywnością, zwłaszcza w aplikacjach wymagających dużej dynamiki, takich jak napędy pojazdów elektrycznych. Jednak ich projektowanie wymaga starannego doboru geometrycznych cech wirnika, aby uzyskać odpowiednią asymetrię magnetyczną, co zapewnia optymalną pracę silnika.



Rysunek 50. Schemat budowy silnika reluktancyjnego

Źródło: Bogusz P., Korkosz M. (2006)

Rysunek 51 przedstawia widok silnika reluktancyjnego, w którym żłobki stojana zawierają uzwojenie, natomiast wirnik pozostaje nieuzwojony. Tego rodzaju konstrukcja jest charakterystyczna dla silników reluktancyjnych, które nie wymagają uzwojeń na wirniku, co czyni je prostszymi i bardziej odpornymi na zużycie w porównaniu do innych typów silników elektrycznych. W silniku reluktancyjnym to uzwojenie stojana tworzy zmienne pole magnetyczne, które wprowadza wirnik w ruch na skutek dążenia do minimalizacji reluktancji, czyli oporu magnetycznego w danym obwodzie. Tego typu konstrukcja silników jest stosowana tam, gdzie istotna jest prostota, niezawodność oraz niski koszt wytwarzania, a także w sytuacjach, gdy układ ma charakteryzować się wysoką efektywnością energetyczną w operacjach wymagających zmiennych prędkości obrotowych. Zaletą tej technologii jest brak konieczności stosowania elementów wymagających częstej konserwacji, takich jak szczotki czy pierścienie ślizgowe.



Rysunek 51. Silnik reluktancyjny

Źródło: <https://www.falowniki.edu.pl/slownik,s,silnik-reluktancyjny>

Źródło: <https://www.falowniki.edu.pl/slownik,s,silnik-reluktancyjny>

Zaletami takiego silnika są:

- Wadą tego silnika jest duże tętnienie momentu obrotowego przy małej liczbie biegunów oraz stosunkowo niska maksymalna wartość prędkości obrotowej.

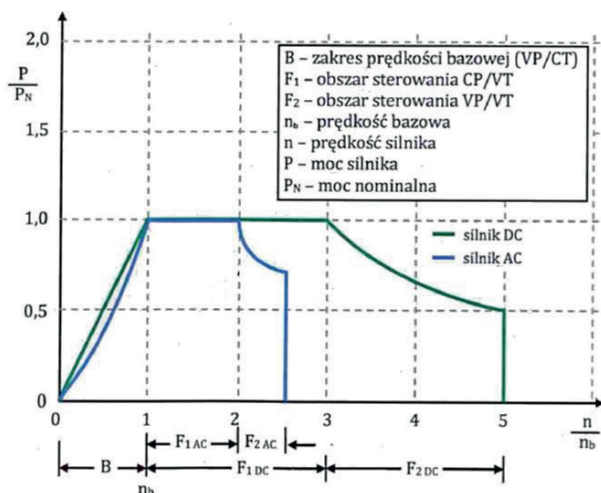
5.3. Istota sterowania silnikami elektrycznymi

Sterowanie pracą silnika elektrycznego stanowi kluczowy element inżynierii napędów elektrycznych, mający bezpośredni wpływ na efektywność, precyzję oraz dynamikę działania systemów napędowych. Proces ten polega na świadomej i precyzyjnej zmianie wybranych parametrów sterujących, takich jak rezystancja, prąd wzbudzenia, częstotliwość prądu, napięcie zasilające czy inne wielkości elektryczne i mechaniczne, które determinują charakterystykę pracy maszyny. Odpowiednia regulacja tych zmiennych pozwala uzyskać pożądane właściwości silnika, takie jak stabilność obrotów, moment obrotowy, sprawność czy szybkość reakcji na zmieniające się warunki obciążenia. Nowoczesne układy sterowania opierają się na zaawansowanych algorytmach i technologii energoelektronicznej, umożliwiając precyzyjne dostosowanie parametrów pracy silnika do wymagań aplikacji przemysłowych, transportowych czy automatyki. W zależności od rodzaju silnika – czy to silnik prądu stałego, indukcyjny, synchroniczny czy bezszczotkowy – dobór odpowiednich metod sterowania ma kluczowe znaczenie dla optymalizacji jego działania.

Silnikiem można tak sterować, aby na charakterystyce uzyskać trzy podstawowe zakresy pracy:

- pierwszy, od zatrzymania do obrotów bazowych, napięcie rośnie do wartości największej dopuszczalnej, a moc do wartości znamionowej – jest to tzw. obszar stałego momentu,
- drugi, od prędkości bazowej do chwili gdy moc silnika zacznie spadać, jest realizowany przez osłabienie strumienia magnetycznego wzbudzenia i wzrost prędkości kosztem momentu obrotowego – jest to obszar stałej mocy,
- trzeci, od chwili spadku mocy do obrotów maksymalnych, nazywa się obszarem zmiennej mocy, uzyskuje się go przez dalsze osłabianie prądu wzbudzenia.

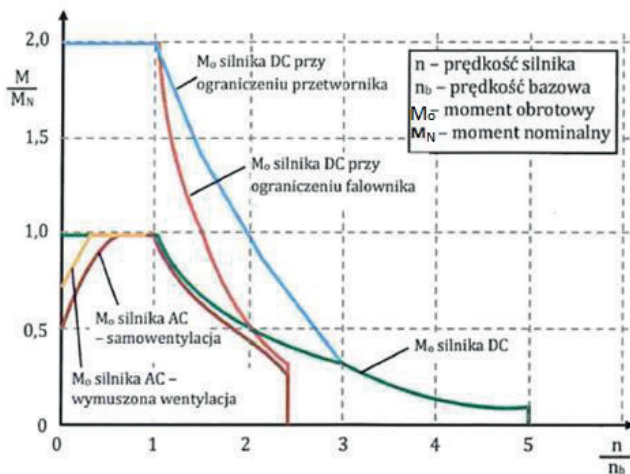
Rysunek 53 przedstawia porównanie charakterystyk mocy dla silnika prądu stałego oraz silnika prądu przemiennego, uwzględniając różnice w zachowaniu obu typów silników przy zmianie prędkości obrotowej. W przypadku silnika prądu stałego, moc wykazuje zależność od prędkości obrotowej, gdzie wraz ze wzrostem obrotów prąd staje się mniej efektywny przy wytwarzaniu mocy, co jest konsekwencją spadku momentu obrotowego przy wyższych prędkościach. Z kolei silnik prądu przemiennego, a szczególnie silnik indukcyjny, charakteryzuje się inną charakterystyką, gdzie moc rośnie w sposób bardziej linearny w zależności od prędkości obrotowej, osiągając najwyższą wartość w średnim zakresie obrotów, z charakterystycznym spadkiem efektywności przy obrotach bliskich maksymalnym. W porównaniu z silnikami prądu stałego, silnik prądu przemiennego osiąga szerszy zakres zastosowań w zastosowaniach wymagających zmiennej mocy, dzięki zdolności do pracy w różnych zakresach obrotów, co czyni go bardziej wszechstronnym.



Rysunek 53. Porównanie charakterystyk mocy silnika prądu stałego i prądu przemiennego

Źródło: Merkiż, Pielecha (2015)

Silniki DC (prądu stałego) wykazują możliwość wytworzenia bardzo dużego momentu rozruchowego co dla silników AC (prądu przemiennego) jest niemożliwe do uzyskania nawet przy wymuszonym chłodzeniu silnika, co pokazano na rysunku 54.



Rysunek 54 Porównanie momentu obrotowego różnych silników

Źródło: Merkiż, Pielecha (2015)

Rysunek 54 przedstawia porównanie momentu obrotowego różnych typów silników, uwzględniając zarówno silniki prądu stałego, prądu przemiennego, jak i silniki indukcyjne, synchroniczne oraz reluktancyjne. Wykres ilustruje, jak różnią się momenty obrotowe w zależności od konstrukcji i typu silnika. Silniki prądu stałego zwykle osiągają największy moment obrotowy przy niskich prędkościach obrotowych, a moment ten stopniowo maleje wraz ze wzrostem prędkości, co jest związane z naturą charakterystyki obciążeniowej tych silników. Z kolei silniki indukcyjne mają moment obrotowy, który rośnie wraz z prędkością obrotową, lecz ich moment szczytowy zazwyczaj nie osiąga wartości silników prądu stałego przy niskich obrotach. Silniki synchroniczne wykazują bardziej liniową zależność momentu obrotowego względem prędkości, z wyraźnym wzrostem momentu przy obrotach bliskich nominalnym, a następnie jego stabilizacją, co jest korzystne w zastosowaniach wymagających stałego momentu w szerokim zakresie prędkości. Silniki reluktancyjne, choć mniej powszechne, wykazują specyficzną charakterystykę momentu obrotowego, która jest silnie zależna od geometrii wirnika i stojana, a moment obrotowy może występować w sposób nieregularny, co przy odpowiedniej konstrukcji może dawać przewagę w zastosowaniach, które nie wymagają dużych momentów w każdych warunkach.

Podsumowując analizę dostępnych silników, do napędu samochodu elektrycznego pretendują silniki bezszczotkowe zarówno prądu stałego jak i przemiennego. Bardzo dobre własności posiadają silniki synchroniczne z magnesami stałymi ze względu na dużą moc przy małej masie oraz wysoką sprawność. Silniki reluktancyjne zaś wyróżnia prostota konstrukcji i bezobsługowość.

Aby sprawnie sterować silnikiem prądu przemiennego, elektryczny układ napędowy musi posiadać:

- prostownik – umożliwia zamianę prądu przemiennego na stały,
- falownik – umożliwia zmianę częstotliwości prądu,
- inwerter – umożliwia zamianę prądu stałego na przemienny o stałym napięciu i częstotliwości,
przetwornice – umożliwiają zmianę napięcia stałego podwyższając lub obniżając napięcie,
- PWM – sterowanie wypełnieniem impulsu – płynna regulacja napięcia prądu stałego,
- transformator – zmienia napięcie prądu przemiennego.

Tabela 6 przedstawia cechy silników elektrycznych stosowanych w pojazdach elektrycznych i hybrydowych, które poza budową i zasadą działania różnią się od tradycyjnych silników spalinowych pod względem kilku kluczowych aspektów. Silniki elektryczne charakteryzują się wysoką efektywnością energetyczną, ponieważ większość energii elektrycznej jest skutecznie konwertowana na energię mechaniczną. Dodatkowo, oferują one wysoki moment obrotowy już od niskich prędkości obrotowych, co zapewnia pojazdom elektrycznym dynamiczne ruszanie oraz płynne i efektywne przyspieszanie. Ich konstrukcja jest prosta, z mniejszą liczbą ruchomych części, co przekłada się na niższe wymagania serwisowe i wyższą niezawodność w porównaniu do silników spalinowych. Ponadto, silniki elektryczne w pojazdach nie emitują spalin ani hałasu, co czyni je przyjaznymi dla środowiska, zwłaszcza w miastach. W pojazdach elektrycznych i hybrydowych występuje także możliwość odzyskiwania energii podczas hamowania, co pozwala na ładowanie akumulatorów bez konieczności podłączania pojazdu do zewnętrznego źródła energii. Silniki te są lekkie, kompaktowe

co sprzyja optymalnemu rozmieszczeniu innych komponentów układu napędowego i akumulatorów w pojeździe. Cechy te sprawiają, że silniki elektryczne stanowią innowacyjne rozwiązanie w napędach pojazdów, mając przewagę nad tradycyjnymi technologiami, zwłaszcza w kontekście ochrony środowiska i zwiększenia efektywności energetycznej transportu.

Tabela 6. Cechy silników elektrycznych stosowanych w pojazdach elektrycznych i hybrydowych

Typ silnika	Sprawność	Gęstość mocy	Maks. prędkość obr.	Niezawodność	Konserwacja	Stopień rozwoju	Koszt silnika	Koszt kontrolera	Całkowity koszt	Recykling	Zast. obecnie w EV	Zast. w przyszłości
Synchroniczny AC	+	+	++	++	+	+	+	-	o	+	++	++
Z przełączaną reluktancją AC	+	++	++	+	+	--	+	o	+	+	o	o
Bezszcotkowy DC	++	++	+	+	+	+	o	-	o	--	+	++
Obcowzbudny DC	--	--	--	+	--	++	-	+	-	-	o	--
++ bardzo dobry, + dobry, o brak wpływu, - zły, -- bardzo zły												

Źródło: Merkisz, Pielecha (2015)

6. Rodzaje i charakterystyka magazynów energii elektrycznej

Współczesne systemy energetyczne coraz częściej opierają się na efektywnym zarządzaniu energią, co wiąże się z koniecznością jej gromadzenia i dystrybucji w odpowiednich momentach. W tym kontekście kluczowe stają się dwa pojęcia: zasobniki energii i magazyny energii. Choć często używane zamiennie, w rzeczywistości odnoszą się do odmiennych koncepcji i pełnią różne funkcje w systemach energetycznych. Zasobniki energii to urządzenia lub systemy, które służą do krótkoterminowego przechowywania energii, zwykle w celu jej natychmiastowego wykorzystania. Charakteryzują się one szybkim czasem reakcji, co czyni je idealnymi do stabilizacji napięcia, kompensacji mocy biernej czy wspomagania krótkotrwałych obciążeń. Przykładami zasobników mogą być superkondensatory, koła zamachowe czy baterie litowo-jonowe wykorzystywane w systemach buforowych. Z kolei magazyny energii to rozwiązania przeznaczone do długoterminowego gromadzenia dużych ilości energii, które mogą być wykorzystywane w okresach zwiększonego zapotrzebowania lub w sytuacjach awaryjnych. Magazyny charakteryzują się większą pojemnością i zdolnością do długiego utrzymywania energii, co pozwala na optymalizację pracy sieci energetycznych i integrację odnawialnych źródeł energii. Do typowych przykładów magazynów energii należą elektrownie szczytowo-pompowe, systemy magazynowania wodoru czy akumulatory przepływowo.

Magazyny energii są obecnie najczęściej wskazywane jako najsłabszy punkt pojazdu elektrycznego. Rozwój magazynów energii (pojemność, koszt produkcji, trwałość) ma decydujący wpływ na elektryfikację motoryzacji. W pojazdach samochodowych stosuje się akumulatory energii elektrycznej. W odróżnieniu od ogniw galwanicznych można je ponownie ładować energią elektryczną.

Rodzaje akumulatorów energii elektrycznej:

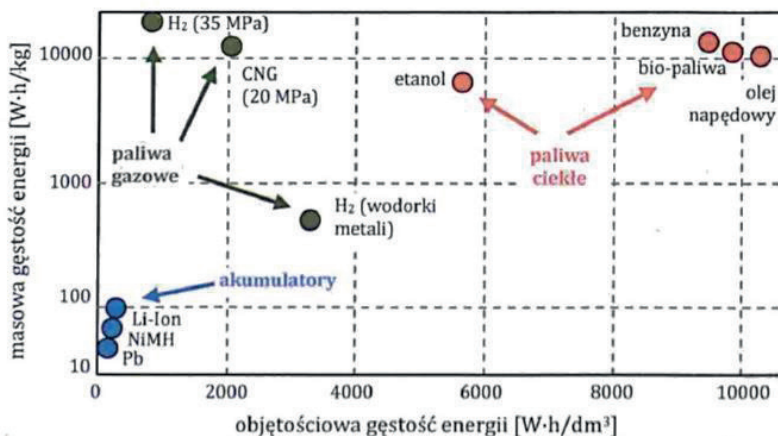
- akumulatory elektrochemiczne,
- ultrakondensatory.

Najważniejszymi parametrami magazynów energii poza oczywiście bezpieczeństwem użytkowania są:

- masowa gęstość energii (Wh/kg),
- objętościowa gęstość energii (Wh/dm^3),
- masowa gęstość mocy (W/kg),
- objętościowa gęstość mocy (W/dm^3).

Rysunek 55 przedstawia porównanie gęstości energii paliw ciekłych, gazowych oraz akumulatorów elektrochemicznych, uwidaczniając wyraźną różnicę między nimi. Paliwa ciekłe charakteryzują się dużą gęstością energii, co oznacza, że w stosunku do swojej masy lub objętości, potrafią przechować znaczną ilość energii. Jest to jedna z głównych zalet paliw kopalnych, która czyni je efektywnymi w transporcie o dalekim zasięgu, przy wykorzystaniu takich środków transportu jak samochody spalinowe czy samoloty. W przeciwieństwie do nich, akumulatory elektrochemiczne wykorzystywane w pojazdach elektrycznych, pomimo rozwoju technologii, nadal charakteryzują się znacznie mniejszą gęstością energii, co oznacza, że w tej samej masie lub objętości mogą przechować o wiele mniej energii w porównaniu

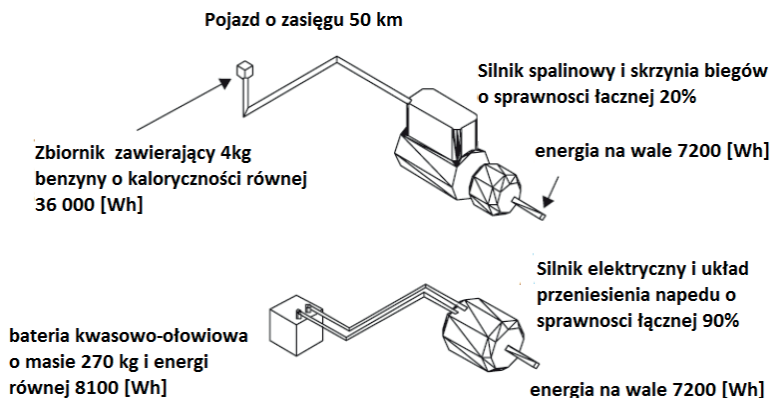
do paliw płynnych. To właśnie ta różnica stanowi główną barierę w zakresie rozwoju pojazdów elektrycznych pod względem zasięgu, ponieważ akumulatory, nawet te najnowocześniejsze, muszą być znacznie większe i cięższe, aby zapewnić odpowiednią ilość energii na długich trasach. Mimo to, akumulatory elektrochemiczne oferują inne korzyści, takie jak mniejsza emisja spalin, niższe koszty eksploatacji czy możliwość ładowania w miejscu użytkowania, co stanowi ich znaczną przewagę w określonych zastosowaniach transportowych.



Rysunek 55. Porównanie gęstości energii paliw ciekłych, gazowych oraz akumulatorów elektrochemicznych

Źródło: Merkisz, Pielecha (2015)

Rysunek 56 przedstawia porównanie gęstości energii w napędzie elektrycznym i spalinowym przy zasięgu 50 km, uwidaczniając różnicę między tymi dwoma rodzajami napędu pod względem efektywności energetycznej. W przypadku napędu spalinowego, paliwa kopalne charakteryzują się wysoką gęstością energetyczną, co pozwala na przejechanie większej odległości przy mniejszej wadze paliwa. Dla zasięgu 50 km wystarczy relatywnie mała ilość paliwa, co sprawia, że napęd spalinowy jest bardziej efektywny pod względem wykorzystania przestrzeni i wagi na krótkie dystanse. Z kolei w napędzie elektrycznym, ze względu na mniejszą gęstość energii akumulatorów elektrochemicznych, pojazd elektryczny wymaga znacznie większej masy akumulatora, aby przejechać ten sam dystans. Chociaż akumulatory mogą być ładowane w różnych miejscach i oferują inne korzyści środowiskowe, ich gęstość energetyczna wciąż jest znacznie mniejsza w porównaniu do paliw kopalnych, co wpływa na masę całkowitą pojazdu oraz wymagany zasięg na danej ilości energii. W efekcie, napęd elektryczny wymaga większych zasobów energetycznych, co w krótkim zasięgu jak 50 km może nie mieć dużego znaczenia, ale przy dłuższych trasach może być istotnym ograniczeniem.

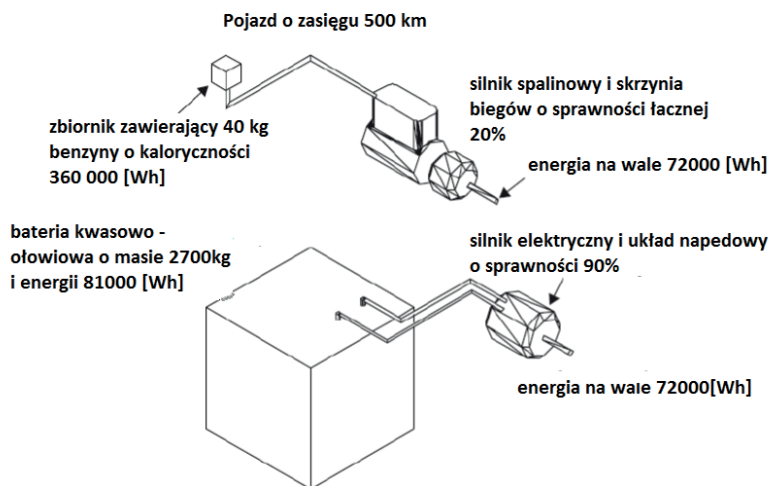


Rysunek 56. Porównanie gęstości energii w napędzie elektrycznym i spalinowym przy zasięgu 50 km

Źródło: <http://m.pl.plb-battery.com/battery-cells/li-ion-battery-for-electric-vehicle/3-2v-3500mah-lifepo4-battery-cell-for-evs.html>

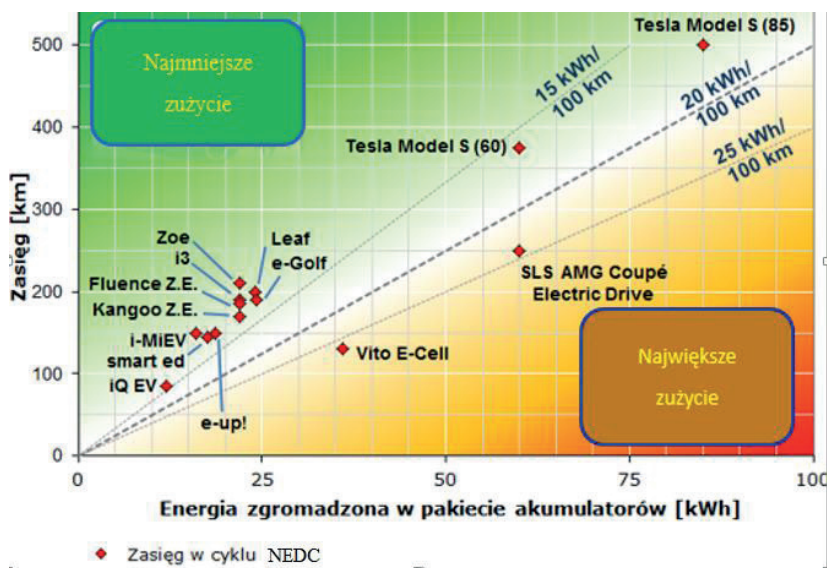
Rysunek 57 porównuje gęstość energii w napędzie elektrycznym i spalinowym przy zasięgu 500 km. Napęd spalinowy charakteryzuje się znacznie wyższą gęstością energii, co pozwala na przejechanie większej odległości przy mniejszej masie paliwa. Z kolei napęd elektryczny wymaga znacznie większej masy akumulatora, aby osiągnąć ten sam zasięg, ze względu na niższą gęstość energii akumulatorów. W rezultacie, pojazdy elektryczne mają większą masę baterii przy tym samym zasięgu. Wartości te trzeba jeszcze skorygować o wartość wzrostu oporu toczenia, który bezpośrednio zmniejsza zasięg pojazdu, co wpływa na efektywność i koszty eksploatacji pojazdów elektrycznych.

Rysunek 58 przedstawia porównanie zużycia energii elektrycznej przez różne pojazdy elektryczne. Wśród porównywanych samochodów większość ma zasięg około 200 km na pełnym ładowaniu. Wartością charakterystyczną jest to, że zużycie energii przez te pojazdy nie przekracza 15 kWh na 100 km, co świadczy o ich wysokiej efektywności energetycznej. Oznacza to, że te pojazdy potrafią przejechać stosunkowo dużą odległość na stosunkowo małej ilości energii elektrycznej. Takie dane pokazują korzyści płynące z napędu elektrycznego w kontekście oszczędności energii i jego niższych kosztów eksploatacji w porównaniu do tradycyjnych pojazdów spalinowych, które z reguły wymagają większej ilości energii na pokonanie podobnego dystansu. Zużycie poniżej 15 kWh na 100 km jest również wynikiem optymalizacji systemów zarządzania energią, zastosowania lekkich konstrukcji oraz nowoczesnych akumulatorów, które pozwalają na dłuższy zasięg przy niższym zużyciu energii. Analiza tego typu danych pokazuje, jak napęd elektryczny staje się coraz bardziej konkurencyjny pod względem kosztów operacyjnych, co sprzyja rozwojowi elektromobilności i poprawie efektywności energetycznej transportu.



Rysunek 57. Porównanie gęstości energii w napędzie elektrycznym i spalinowym przy zasięgu 500 km

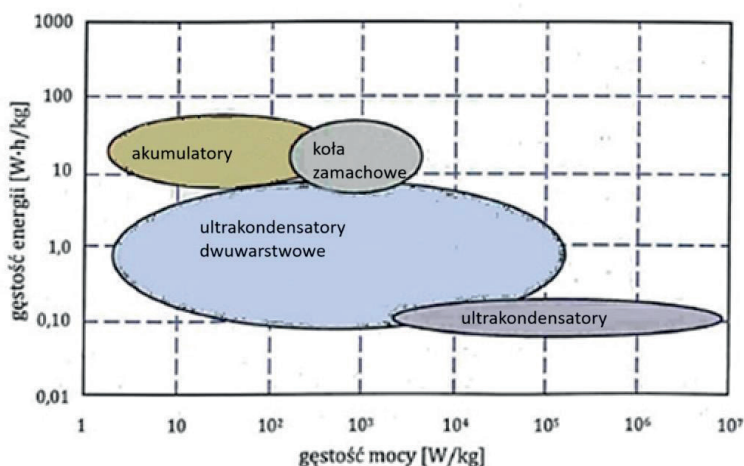
Źródło: <http://m.pl.plb-battery.com/battery-cells/li-ion-battery-for-electric-vehicle/3-2v-3500mah-lifepo4-battery-cell-for-evs.html>



Rysunek 58. Porównanie zużycia energii elektrycznej przez różne pojazdy

Źródło: http://samochodyelektryczne.org/porownanie_zuzycia_energii_samochodow_elektrycznych_z_2013r.htm

Rysunek 59 porównuje charakterystyki typowych magazynów energii elektrycznej i magazynów energii kinetycznej. Magazyny energii elektrycznej, takie jak akumulatory, charakteryzują się określoną pojemnością energetyczną, czasem ładowania oraz wydajnością rozładowania. W przypadku akumulatorów chemicznych, wydajność, czas ładowania i wytrzymałość na cykle ładowania są kluczowe dla efektywnego przechowywania energii w pojazdach elektrycznych. Akumulatory umożliwiają przechowywanie energii w formie chemicznej, którą można szybko zamienić na energię elektryczną w procesie rozładowania.



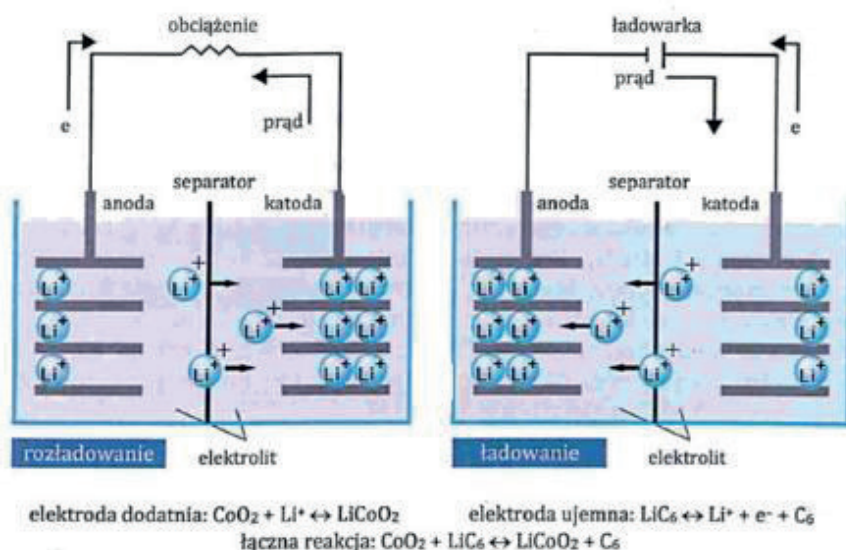
Rysunek 59. Charakterystyka typowych magazynów energii elektrycznej i magazynu energii kinetycznej

Źródło: Merkisz, Pielecha (2015)

Z kolei magazyny energii kinetycznej, takie jak koła zamachowe, przechowują energię w postaci obrotu masy. Energii tej nie przechowuje się na sposób chemiczny, ale jako energię mechaniczną w układzie obrotowym. Charakterystyka tych systemów polega na ich dużej efektywności przy bardzo szybkiej reakcji na zapotrzebowanie na energię. Magazynowanie energii kinetycznej jest bardzo efektywne pod względem odzyskiwania energii, na przykład w pojazdach elektrycznych podczas hamowania odzyskowego. Energię kinetyczną przechowywaną w układzie mechanicznym można szybko uwolnić do układu napędowego w odpowiedzi na chwilowy wzrost zapotrzebowania na moc. Tego typu systemy mają jednak inne ograniczenia, w tym np. wymóg utrzymania bardzo wysokich obrotów magazynów energii, co wiąże się z potrzebą zapewnienia dużej trwałości materiałów oraz konstrukcji mechanicznych.

Akumulatory elektrochemiczne posiadają dwie elektrody wykonane z różnych materiałów, które są umieszczone w elektrolicie. Między elektrolitem a elektrodami zachodzą reakcje chemiczne, w wyniku których na jednej elektrodzie pojawia się nadmiar elektronów (elektroda ujemna, anoda) oraz niedobór elektronów (elektroda dodatnia, katoda). Jeżeli elektrolit jest kwasem to akumulator jest nazywany kwasowym, a gdy elektrolit jest zasadą – zasadowym.

Rysunek 60 przedstawia zasadę pracy akumulatora litowo-jonowego. Podczas ładowania, atomy litu migrują z katody (elektrody ujemnej) do anody (elektrody dodatniej), gdzie osadzają się w porowatej strukturze anody. Proces ten nazywa się interkalacją. Interkalacja to proces wchłaniania cząsteczek, w tym przypadku atomów litu, do struktury elektrody, co pozwala na gromadzenie energii w akumulatorze. W trakcie rozładowania akumulatora, proces odwraca się: atomy litu uwalniają się z anody, przepływają przez elektrolit i osadzają się na katodzie, generując prąd elektryczny. Procesy interkalacji i deinterkalacji są kluczowe dla działania akumulatorów litowo-jonowych, które dzięki tej technologii charakteryzują się dużą gęstością energii, wysoką trwałością oraz wydajnością.



Rysunek 60. Zasada pracy akumulatora litowo – jonowego

Źródło: Merkiś, Pielecha (2015)

Tabela 7 przedstawia porównanie budowy różnych akumulatorów. W tabeli tej uwzględniono akumulatory wykorzystywane w różnych technologiach, takich jak akumulatory ołowiowo-kwasowe, niklowo-kadmowe (NiCd), niklowo-metalowo-wodorkowe (NiMH) oraz litowo-jonowe (Li-ion). Akumulatory ołowiowo-kwasowe mają tradycyjnie stosowaną konstrukcję, której podstawą jest bateria płynnych elektrolitów i elektrod ołowiowych. Z kolei akumulatory NiCd i NiMH różnią się zastosowanym materiałem elektrody i elektrolitu, co zapewnia ich wytrzymałość oraz stosunkowo dużą gęstość energii. W akumulatorach litowo-jonowych zastosowana jest technologia, w której lit metaliczny lub związki litu występują w anodzie i katodzie, a elektroda w postaci separatora oddziela anody i katody, zapewniając przepływ jonów litu w trakcie ładowania i rozładowania akumulatora. W przeciwieństwie do innych typów, akumulatory litowo-jonowe charakteryzują się wyższą wydajnością, dłuższą

trwałością i lepszą gęstością energii. Porównanie konstrukcji poszczególnych akumulatorów uwidacznia różnice w materiałach, technologii produkcji, wadach i zaletach związanych z żywotnością, efektywnością, kosztami i zastosowaniem tych ogniw w różnych typach urządzeń, takich jak pojazdy elektryczne, telefony, urządzenia przenośne czy systemy magazynowania energii.

Tabela 7. Porównanie budowy różnych akumulatorów

Akumulator	Podgrupa	Elektrolit	Anoda (-)	Katoda (+)
Kwasowy (Pb)	standardowy	roztwór kwasu siarkowego	ołów	tlenek ołowiu
	żelowy	żelowy (kwas siarkowy wymieszany z krzemionką)		
	EFB – enhanced flooded battery	wzmocnienie powłoką z poliestru		
	AGM – absorbent glass mat	elektrolit absorbowany na macie szklanej		
Niklowo – kadmowy (NiCd)		półpłynne lub stałe substancje o zasadowym odczynie (np. wodorotlenek potasu – KOH)	wodorotlenek niklu	wodorotlenek kadmu
Niklowo – wodorkowy (NiMH)		wodorotlenek potasu	nikiel	spiek metali ziem rzadkich
Litowo – jonowy (Li – Ion)	kobaltowy (LCO) magnezowy (LMO) fosforanowy (LPF) niklowo – magnezowo – kobaltowy (NMC)	sole litowe	grafit	tlenki metali
Litowo – polimerowy (Li-Po)		stały polimerowy elektrolit	grafit	tlenki metali

Źródło: Merksiz, Pielecha (2015)

Tabela 8 przedstawia charakterystykę wybranych akumulatorów, porównując różne rodzaje technologii akumulatorów pod kątem ich podstawowych parametrów, takich jak pojemność, gęstość energetyczna, żywotność oraz parametry rozładowania. Dokonano porównania kilku typów akumulatorów, takich jak akumulatory kwasowo-ołowiowe, niklowo-kadmowe (NiCd), niklowo-metalowo-wodorkowe (NiMH), oraz akumulatory litowo-jonowe (Li-ion). Akumulatory kwasowo-ołowiowe, choć starsze i tańsze w produkcji, mają stosunkowo niską gęstość energetyczną i krótszy okres użytkowania w porównaniu do nowoczesnych rozwiązań, takich jak akumulatory litowo-jonowe. Akumulatory NiCd, stosowane

głównie w bardziej wymagających aplikacjach, charakteryzują się dobrym cyklem ładowania, ale mają tendencję do efektu pamięci, co wpływa na ich trwałość. Z kolei akumulatory NiMH oferują większą pojemność i są stosunkowo bezpieczniejsze w użytkowaniu niż NiCd, choć również mają pewne ograniczenia, takie jak stosunkowo niski współczynnik wydajności. Akumulatory litowo-jonowe, będące technologią najnowszą i najczęściej stosowaną w pojazdach elektrycznych oraz urządzeniach mobilnych, zapewniają najwyższą gęstość energetyczną i dłuższą żywotność w porównaniu do pozostałych technologii. Akumulatory te cechują się również dużą efektywnością energetyczną i mniejszymi wymiarami, co sprawia, że są preferowane w nowoczesnych systemach zasilania. Porównując obecnie dostępne akumulatory (zamieszczone w powyższej tabeli) można zauważyć, że najlepsze parametry gęstości energii i gęstości mocy wykazują akumulatory w których wykorzystano lit.

Tabela 8. Charakterystyka wybranych akumulatorów

Rodzaj akumulatora	Napięcie celi (V)	Gęstość energii ¹⁾ (W·h/kg)	Gęstość mocy (W/kg)	Cykle życia ²⁾	Czas ładowania (h)	Samorozładowanie (% poj. na miesiąc)
Pb (typowy)	2,0	30-40	150-400	1000		3-20
Zn-pow	1,25	100-220	30-80	600+		
NiMH	1,25	<80	250-1000	3000	2-8	30
Zn-Br		70	100			
NaS	1,78-2,08	90	90-150	5200	4-8	
Ni-Zn		55-75	170-260	300	6-8	
Li-Ion	3,6	110-190	300-1500	2000		5-10
Li-Ion fosforanowe	3,4	95-155	150-250	1000-5000		10
Li-polimer	2,8	150-200	do 2800	150		brak danych
Wanadowy	1,4	70		-		50
Metal/powietrze		150-200	200	500-600	10-12	
Polimerowy	2,4	25		>>1500 ³⁾		brak danych

¹⁾Energia właściwa jest to całkowita ilość energii (w watogodzinach), jaka może być zgromadzona w akumulatorze o masie 1 kg.

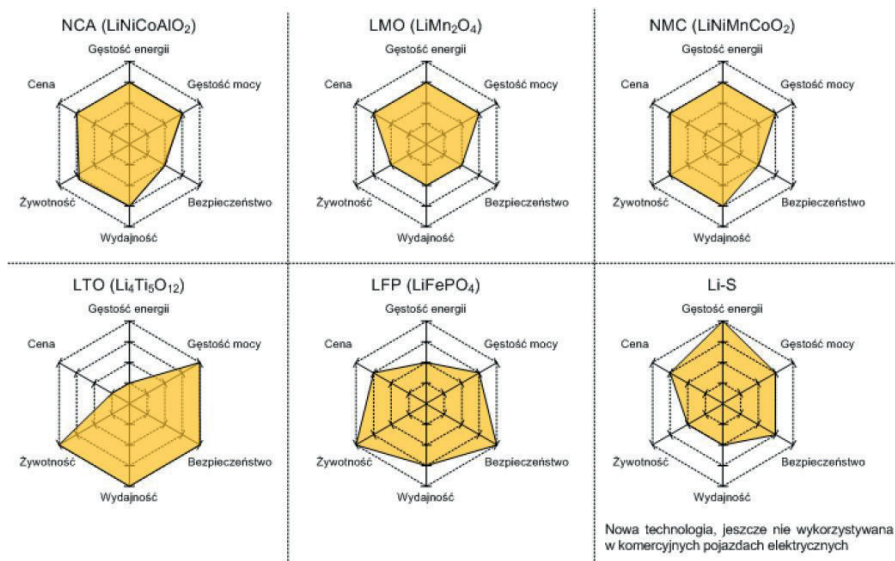
²⁾Liczba cykli ładowanie – rozładowanie, jakie można przeprowadzić zanim pojemność elektryczna akumulatora nie osiągnie 80% pojemności początkowej.

³⁾Po 1500 cyklach pojemność elektryczna akumulatora jest ograniczona zaledwie do 99,1% jej pojemności początkowej.

Źródło: Merkisz, Pielecha (2015)

Rysunek 61 przedstawia porównanie cech różnych akumulatorów litowych, skupiając się na różnych rodzajach technologii ogniw litowych stosowanych w pojazdach elektrycznych, urządzeniach przenośnych oraz innych systemach magazynowania energii. Na ilustracji porównane są różne technologie, takie jak akumulatory litowo-jonowe (Li-ion), litowo-polimerowe (LiPo), litowo-żelazowo-fosforanowe (LiFePO₄), litowo-manganowe (LiMn₂O₄) oraz

litowo-niklowo-kobaltowe (NCM i NCA). Akumulatory litowo-jonowe (Li-ion) charakteryzują się wysoką gęstością energetyczną, długą żywotnością i szerokim zakresem zastosowań, od urządzeń mobilnych po pojazdy elektryczne. Akumulatory litowo-polimerowe (LiPo) oferują podobne właściwości, ale w bardziej elastycznych i lekkich formatach, co czyni je idealnymi dla aplikacji, które wymagają mniejszych, bardziej precyzyjnych rozmiarów.



Rysunek 61. Porównanie cech różnych akumulatorów litowych

Źródło: Merkiś, Pielecha (2015)

Akumulatory litowo-żelazowo-fosforanowe (LiFePO_4) zyskują popularność w zastosowaniach wymagających dużej trwałości i bezpieczeństwa. Charakteryzują się mniejszą gęstością energetyczną w porównaniu do innych technologii, ale oferują wyższą stabilność termiczną i dłuższą żywotność. Litowo-manganowe (LiMn_2O_4) akumulatory, choć mniej wydajne w porównaniu do ogniw opartej na kobaltie i niklu, zapewniają lepszą trwałość i mniejszą podatność na przegrzewanie. Akumulatory litowo-niklowo-kobaltowe (NCM i NCA) oferują najwyższą gęstość energetyczną i są często stosowane w najnowszych pojazdach elektrycznych i innych zaawansowanych systemach energii, ponieważ łączą wysoką wydajność z dobrym stosunkiem kosztów do technologii. Jednakże technologia ta jest także bardziej kosztowna, zwłaszcza ze względu na użycie metali takich jak kobalt i nikiel.

Rysunek 62 przedstawia obudowy akumulatorów litowo-jonowych stosowane w handlu, zwracając szczególną uwagę na jeden z najpopularniejszych typów – akumulator 18650. Oznaczenie "18650" odnosi się do wymiarów akumulatora, z których "18" oznacza średnicę 18 mm, a "650" oznacza jego długość wynoszącą 65 mm. Tego rodzaju ogniwa są szeroko stosowane w różnych aplikacjach, od laptopów, przez narzędzia elektryczne, aż po pojazdy

elektryczne i systemy magazynowania energii. Akumulatory 18650 mają cylindryczną obudowę, która zapewnia stabilność i wytrzymałość mechaniczną, a ich konstrukcja umożliwia łatwe łączenie w większe pakiety ogniw, co jest typowe w zastosowaniach wymagających dużej pojemności energetycznej. Istnieją również inne typy obudów, takie jak akumulatory pryzmatyczne (prostokątne) i akumulatory w formie "pouch", które charakteryzują się bardziej elastyczną strukturą, ale akumulatory 18650 pozostają jednym z najczęściej wybieranych rozwiązań ze względu na ich dostępność, cenę oraz łatwość integracji w różnych systemach. W kontekście pojazdów elektrycznych oraz innych urządzeń przenośnych, akumulatory 18650 cieszą się popularnością dzięki ich dużej gęstości energetycznej, długowieczności oraz łatwej wymienności, co przekłada się na ich szerokie zastosowanie w dzisiejszych technologiach energetycznych.



Rysunek 62. Obudowy akumulatorów litowo-jonowych stosowane w handlu

Źródło: <http://polish.lithiumlifepo4battery.com/supplier-40907-lithium-ion-rechargeable-batteries>

Rysunek 63 przedstawia widok kompletnego akumulatora stosowanego w samochodzie Nissan Leaf. Akumulator ten ma parametry elektryczne wynoszące 350 V oraz pojemność 40 kWh, co zapewnia odpowiednią autonomię pojazdu na jednym ładowaniu. Jego masa wynosi 350 kg, co jest typowe dla dużych akumulatorów używanych w pojazdach elektrycznych. Obudowa akumulatora wykonana jest z laminatu, co zapewnia nie tylko lekkość, ale i wysoką odporność na uszkodzenia mechaniczne oraz skuteczną ochronę elementów wewnętrznych przed wpływem warunków atmosferycznych i uszkodzeniami zewnętrznymi. Akumulator Nissana Leafa jest kluczowym elementem w zapewnianiu pojazdowi odpowiedniego zasięgu, a jego konstrukcja została zaprojektowana w taki sposób, by balansować między wydajnością energetyczną a wymaganiami w zakresie trwałości i bezpieczeństwa.

Pojemność akumulatora i wynikający z tego parametru zasięg pojazdu zależy od parametrów pracy akumulatora. Prąd rozładowania akumulatora podawany jest w odniesieniu do jego pojemności, np. prąd 1C oznacza prąd równy jednej pojemności akumulatora.

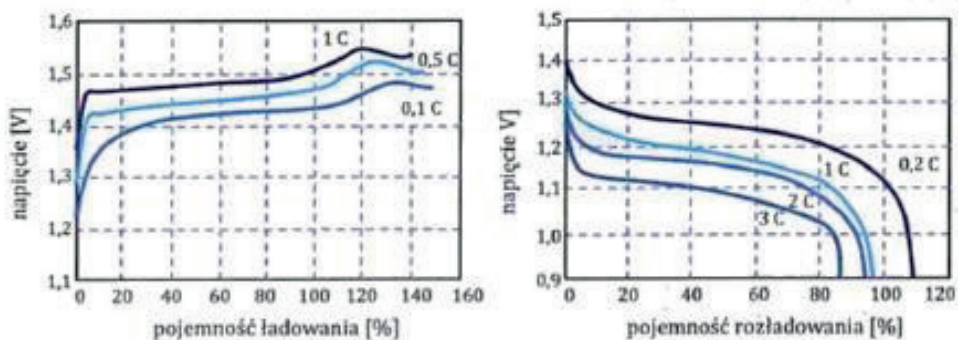
Rysunek 64 przedstawia charakterystykę ładowania i rozładowania akumulatora NiMH (niklowo-wodorkowego metalu). Z wykresu wynika, że im niższy prąd ładowania i rozładowania, tym większa ilość energii może zostać zgromadzona lub pozyskana z akumulatora.

Jest to wynikiem tego, że przy niższych prądach proces chemiczny wewnątrz akumulatora przebiega wolniej i bardziej równomiernie, co pozwala na pełniejsze wykorzystanie pojemności akumulatora, oraz na mniejsze ryzyko uszkodzeń ogniw. W praktyce oznacza to, że akumulator ładowany powoli będzie miał większą efektywność oraz dłuższą żywotność niż akumulator ładowany szybko, ponieważ długotrwałe używanie dużych prądów ładowania/rozładowania może prowadzić do przegrzewania i szybszego zużycia się materiałów wewnętrznych akumulatora.



Rysunek 63. Widok kompletnego akumulatora samochodu Nissan

Źródło: http://samochodyelektryczne.org/jak_szybko_spada_pojemnosc_akumulatorow_nissana_leafa

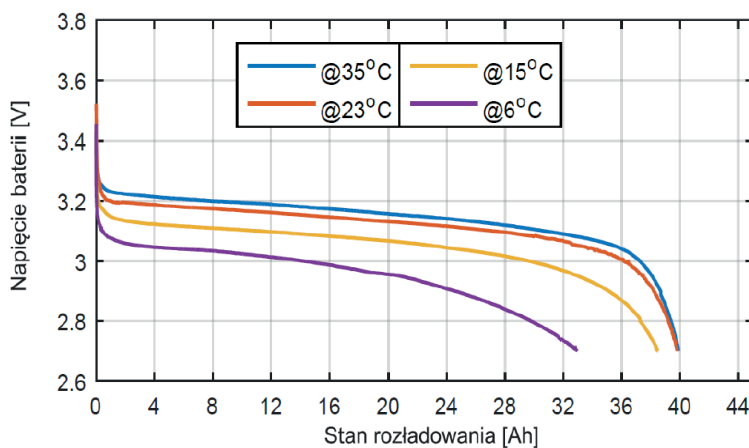


Rysunek 64. Charakterystyka ładowania i rozładowania akumulatora NIMH

Źródło: Merkisz, Pielecha (2015)

Rysunek 65 ilustruje wpływ temperatury na ilość dostępnej energii w akumulatorze. Z wykresu wynika, że akumulatory w niższej temperaturze mają zmniejszoną wydajność, a z zimnego akumulatora można pozyskać mniej energii niż z akumulatora, który jest ogrzany

do wyższej temperatury. Wynika to z faktu, że niska temperatura zwiększa opór wewnętrzny akumulatora, co utrudnia przepływ prądu i obniża efektywność reakcji chemicznych zachodzących w ogniwach. W wyniku tego dostępna moc spada, a sama pojemność akumulatora może się zmniejszyć. Jednak zbyt wysoka temperatura może prowadzić do degradacji akumulatora, co skraca jego żywotność.

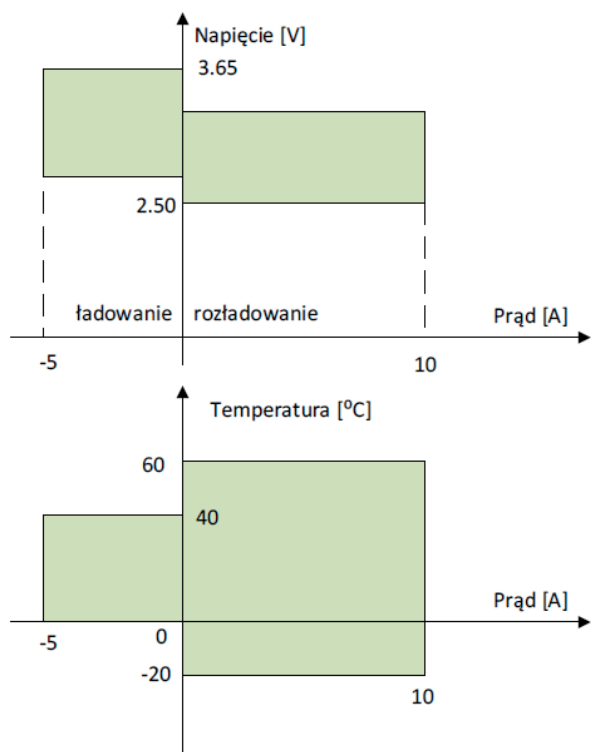


Rysunek 65. Wpływ temperatury na ilość dostępnej energii w akumulatorze

Źródło: <http://m.pl.plb-battery.com/battery-cells/li-ion-battery-for-electric-vehicle/3-2v-3500mah-lifepo4-battery-cell-for-evs.html>

Rysunek 66 przedstawia zakres bezpiecznej pracy akumulatora LiFePO_4 (litowo-żelazowo-fosforanowego). Akumulatory te mają określony reżim temperaturowy, w którym mogą być bezpiecznie ładowane, wynoszący od 0°C do 40°C . W tym zakresie temperatur ładowanie akumulatora odbywa się efektywnie, a bateria nie ulega uszkodzeniom związanym z nadmiernym ciepłem lub niskimi temperaturami. Natomiast w przypadku rozładowania akumulatora, można to zrobić w szerszym zakresie temperatur, co oznacza, że akumulator LiFePO_4 jest bardziej elastyczny pod względem użytkowania w różnych warunkach temperaturowych. Ważne jest jednak, aby unikać ekstremalnych temperatur, ponieważ mogą one wpłynąć na trwałość i bezpieczeństwo baterii. Przekroczenie temperatury pracy spowodowane np. przeładowaniem grozi uszkodzeniem baterii, zmniejszeniem jej pojemności, a nawet jej pożarem.

W celu zabezpieczenia akumulatorów stosowane są układy zarządzające poszczególnymi ogniwami w funkcji temperatury – moduły BMS (*battery management system*). W akumulatorach trakcyjnych zarządzanie energią zostało znacznie rozbudowane i posiadają one własne sterowniki, które analizują proces ładowania, rozładowania, temperaturę oraz kondycję poszczególnych ogniw.



Rysunek 66. Zakres bezpiecznej pracy akumulatora LiFePo4

Źródło: <http://m.pl.plb-battery.com/battery-cells/li-ion-battery-for-electric-vehicle/3-2v-3500mah-lifepo4-battery-cell-for-evs.html>

System BMS ma następujące funkcje:

- zabezpiecza poszczególne ogniwa baterii przed niedozwolonymi warunkami pracy,
- diagnozuje stan baterii,
- prowadzi komunikację z zewnętrznymi sterownikami (np. sterownik ładowarki),
- zarządza balansowaniem ogniw.

Niedozwolone stany pracy mogą być wynikiem:

- przeciążenia baterii zbyt dużym prądem rozładowania,
- przegrzania (awaria układu chłodzenia),
- przeładowania lub zbyt głębokiego rozładowania,
- ładowania w zbyt niskiej temperaturze otoczenia.

BMS nadzoruje stan baterii między innymi przez:

- monitoring napięć na wszystkich ogniwach,
- wielomiejscowy monitoring temperatury baterii,
- pomiar natężenia prądu.

Dzięki tym pomiarom układ BMS stale nadzoruje stan naładowania baterii SoC (*State of Charge*), stopień zużycia baterii SoH (*State of Health*) oraz zapisuje w swojej pamięci istotne zdarzenia.

Dodatkowo system BMS może posiadać następujące funkcje:

- załączanie/wyłączanie obwodu wstępnego ładowania,
- sterowanie układem chłodzenia/grzania,
- monitoring stanu izolacji elektrycznej,
- bezpieczne załączanie i wyłączanie baterii,
- sterowanie dodatkowymi obwodami zasilającymi (panel fotowoltaiczny na dachu samochodu),
- informowanie o pozostałym dostępnym czasie pracy baterii, mocy chwilowej itp.

6.1. Parametry akumulatorów w aspekcie zastosowań w pojazdach elektrycznych

Akumulatory stanowią fundament zasilania w pojazdach elektrycznych i hybrydowych, dlatego ich parametry, takie jak pojemność, napięcie, moc, żywotność, czas ładowania oraz bezpieczeństwo, bezpośrednio wpływają na zasięg, dynamikę jazdy i komfort użytkownika. W kontekście pojazdów elektrycznych istotnym wyzwaniem jest również optymalizacja tych parametrów w taki sposób, aby sprostały one wymaganiom związanym z różnorodnymi warunkami użytkowania – od jazdy w miejskim ruchu, po długodystansowe podróże. Ponadto, istotnym aspektem jest dobór odpowiednich technologii akumulatorowych, które będą w stanie zapewnić wysoką efektywność energetyczną przy minimalnych kosztach operacyjnych i dbałości o ochronę środowiska.

Akumulator kwasowo-olowiowy

Akumulator, w którym elektrolitem jest 37% roztwór wodny kwasu siarkowego, a elektrody wykonane są z ołowiu oraz tlenku ołowiu. Cechy:

- duża obciążalność prądowa,
- mała impedancja wewnętrzna,
- relatywna odporność na przeładowania,
- duża dostępność na rynku,
- niska cena,
- akumulatory VRLA są w pełni bezobsługowe,
- recykling akumulatorów kwasowo-olowiowych prowadzony jest na szeroką skalę,
- łatwy sposób pomiaru stanu naładowania,
- brak potrzeby balansowania ogniw,
- niskie współczynniki energii: 40 Wh/kg; 80 Wh/l,

- liczba cykli <1000,
- głębokie rozładowania znacząco skracają żywotność,
- sprawność 60-70%,
- temperatura pracy -15°C do +50°C (zalecana 20-25°C),
- niebezpieczeństwo przegrzania podczas ładowania,
- uwalnianie wodoru podczas przeładowania i ryzyko eksplozji,
- zalecane rozładowanie do 20% SOC,
- nie przystosowany do szybkiego ładowania,
- samorozładowanie do 15%/miesiąc.

Akumulator niklowo-metalowo-wodorkowy

Akumulator, w którym dodatnia elektroda jest zbudowana z niklu, a ujemna to specjalny stop niklu, aluminium, manganu, magnezu i kobaltu. Cechy:

- gęstość energii 70Wh/kg,
- gęstość mocy 200 W/kg przy rozładowaniu 80%,
- mała rezystancja wewnętrzna,
- może być przechowywany zarówno rozładowany jak i naładowany,
- 500-1000 cykli,
- wymaga procesu formowania,
- sprawność 66%, spada przy szybkim ładowaniu,
- samo rozładowanie 1,5%/dzień,
- ładowanie podtrzymujące (buforowe) obniża żywotność,
- efekt pamięci; zalecane, co najmniej jedno pełne rozładowanie na miesiąc,
- gorsza tolerancja na przeładowanie niż akumulatorów NiCad,
- niskie napięcie pojedynczej celi: 1.2 V,
- zalecane ładowanie niskim prądem (10h),
- przegrzanie podczas ładowania powyżej 45°C skraca żywotność,
- prąd rozładowania zalecany nie większy niż 3-5°C,
- wysoka toksyczność, należy poddać recyklingowi,

Wysokotemperaturowe akumulatory Na-NiCl₂

Baterie ZEBRA pracują w temperaturze ok. 270°C i wykorzystują rozpuszczone sole jako elektrolit. Cechy:

- dobra gęstość energii na jednostkę masy: 120 Wh/kg i objętości 180 Wh/l,
- 3000 cykli,
- możliwość przeładowania,
- uszkodzenie pojedynczej celi jest niegroźne,
- możliwość szybkiego ładowania do 80% SOC,
- szeroki zakres temperaturowy -40°C ; +70°C,
- gęstość mocy 170 W/kg,
- temperatura pracy 270°C,

- wymagana kontrola temperatury,
- po wystygnięciu jest gotowa do pracy po kilkudziesięciu godz.,
- duża rezystancja wewnętrzna,
- samorozładowanie 15%/dzień,
- duże straty ciepłne,
- konieczny recykling.

Akumulator „litowo-polimerowy”

Odmiana akumulatorów litowo-jonowych, w których ciekły elektrolit zastąpiony jest stałym elektrolitem polimerowym. Cechy:

- bardzo duża gęstość energii 200 Wh/kg,
- technologia umożliwia konstruowanie giętkich i bardzo cienkich elastycznych ogniw,
- mała gęstość mocy (ok. 350W/kg) dla baterii o dużej gęstości energii,
- duża rezystancja wewnętrzna,
- mała liczba cykli: 300-500,
- nie tolerują przeładowań,
- mało standardowych i uniwersalnych cel; większość cel produkowana w dużych ilościach ma specjalne zastosowanie,
- zakres temperaturowy 0-45°C,
- większy koszt za kWh od porównywalnych Li-ion: 1200-2500 \$/kWh.

Akumulator litowo-jonowy

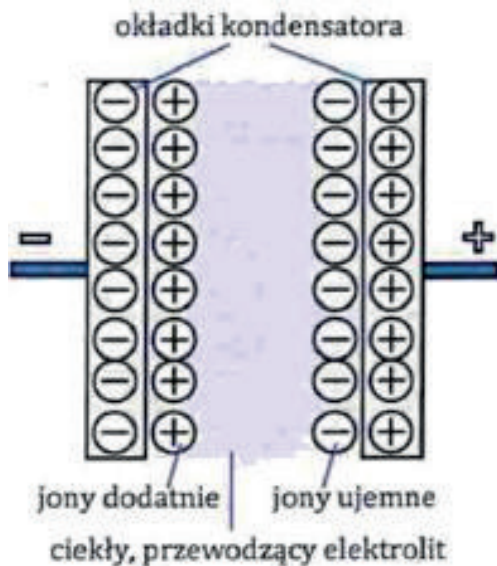
Akumulator, w którym rolę elektrolitu pełnią specyficzne sole litowe rozpuszczone w mieszaninie organicznych rozpuszczalników. Cechy:

- gęstość energii: 90-160 Wh/kg; 135-250 Wh/l,
- gęstość mocy: od 340 W/kg,
- liczba cykli: 1000-3000,
- impuls prądu do 40°C,
- możliwość szybkiego ładowania,
- samorozładowanie 5%/miesiąc,
- wysoka sprawność 90-99%,
- temp. od -20 do 60°C,
- napięcie pojedynczej celi: 3.6 V,
- LiFePO₄ dostępne od 400\$/kWh,
- przeładowanie może uszkodzić cele,
- bardziej skomplikowany pomiar SOC,
- wymagane zabezpieczenia napięciowe i prądowe,
- mogą zapalić się lub wybuchnąć- LiCoO₂,
- problem balansowania napięć.

6.2. Superkondensatory

Superkondensatory charakteryzują się bardzo małą gęstością energii i bardzo dużą gęstością mocy. W bardzo krótkim czasie mogą być naładowane bardzo dużym prądem i tak samo szybko mogą być nim rozładowane. Mają bardzo dużą trwałość. Napięcie dopuszczalne jest ograniczone do około 3V.

Rysunek 67 przedstawia budowę superkondensatora dwuwarstwowego, który jest jednym z typów kondensatorów o wysokiej pojemności. Superkondensator dwuwarstwowy składa się z dwuwarstwowych elektrod, które są oddzielone elektrolitem. Te warstwy tworzą dwie powierzchnie ładunkowe, zwane warstwami podwójnymi, które są odpowiedzialne za magazynowanie ładunku elektrycznego. W odróżnieniu od tradycyjnych kondensatorów, które magazynują ładunek na pojedynczej elektrodzie, superkondensatory wykorzystują tzw. efekt podwójnej warstwy elektrody (EDLC - Electric Double Layer Capacitor). W wyniku tego efektu możliwe jest zmagazynowanie większej ilości energii, nawet pomimo mniejszych rozmiarów. Elektrolit, który pełni funkcję przewodnika jonowego, umożliwia przemieszczanie się jonów pomiędzy warstwami elektrody, co pozwala na skuteczne magazynowanie energii. Superkondensatory są popularne w aplikacjach wymagających szybkiego ładowania i rozładowywania, takich jak systemy magazynowania energii czy w pojazdach elektrycznych, zapewniając uzupełniającą funkcję do akumulatorów.



Rysunek 67. Budowa superkondensatora dwuwarstwowego

Źródło: Merkiś, Pielecha (2015)

Superkondensator posiada dwie takie same elektrody, które są oddzielone od siebie elektrycznie za pomocą porowatej membrany – separatora, którym jest cienka porowata folia z tworzywa sztucznego. Separator nie pełni roli dielektryka, jedynie uniemożliwia bezpośrednie zwarcie elektryczne obu węglowych elektrod. Zatem nie stanowi żadnej przeszkody dla jonów, przepuszczając je w kierunku odpowiednich elektrod, jeśli tylko dołączone zostanie napięcie. Każda elektroda, która jest bryłką węgla aktywnego styka się (jest nasączona) z ciekłym elektrolitem, którym jest najczęściej roztwór kwasu siarkowego. Warstwa elektrolitu jest podwójna. Jony, które znajdują się w elektrolicie, są między sobą oddalone o bardzo małe odległości (rzędu kilku nanometrów). Wpływa to bezpośrednio na odległość między elektrodami, która również jest bardzo mała. Oprócz tych wszystkich elementów budowy, które odróżniają superkondensator od zwykłego kondensatora istnieje jeszcze taka, że superkondensator nie posiada dielektryka, a jego rolę pełnią obszary styku pomiędzy przewodzącym elektrolitem, a przewodzącymi elektrodami (<http://www.portalnaukowy.edu.pl/allegro/superkondensator.pdf>).

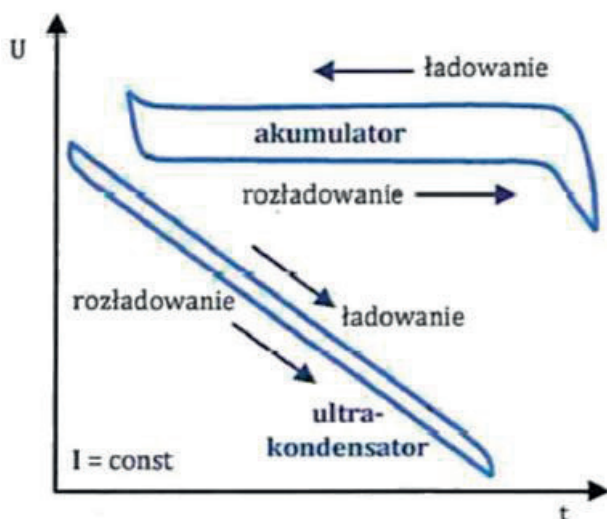
Tabela 9 porównuje cechy superkondensatorów z innymi typami magazynów energii, takimi jak akumulatory kwasowo-ołowiowe, akumulatory litowo-jonowe. W kontekście charakterystyk tych magazynów energii, superkondensatory charakteryzują się specyficznymi właściwościami, które odróżniają je od innych technologii. Superkondensatory mają bardzo dużą moc powrotu, co oznacza, że mogą dostarczać energię w bardzo krótkim czasie, nawet kilkadziesiąt razy szybciej niż akumulatory litowo-jonowe. Mają również niezwykle długą żywotność cykliczną, z kilkoma milionami cykli ładowania/rozładowania, co sprawia, że są bardzo trwałe. Dodatkowo, są w stanie działać w szerokim zakresie temperatur, co pozwala na ich używanie w trudnych warunkach. Jednakże, głównym ograniczeniem superkondensatorów w porównaniu do innych magazynów energii, takich jak akumulatory litowo-jonowe, jest ich stosunkowo niska gęstość energii. Oznacza to, że mogą przechować mniej energii w jednostce objętości lub masy. Chociaż mają dużą moc i długowieczność, ich zastosowanie w długoterminowym magazynowaniu energii jest ograniczone w porównaniu do akumulatorów chemicznych, które oferują większą pojemność, ale są mniej wydajne w przypadku szybkich ładowań i rozładowań. Superkondensatory, ze względu na swoje właściwości, najlepiej sprawdzają się w aplikacjach wymagających szybkiego dostarczania energii i wysokiej liczby cykli, takich jak systemy odzyskiwania energii w pojazdach elektrycznych czy w urządzeniach wykorzystujących energię kinetyczną.

Tabela 9. Cechy ultrakondensatorów na tle innych magazynów energii

Cechy	Akumulatory ołowiowe	Superkondensatory	Konwencjonalne kondensatory
Czas ładowania	1-5 h	0,3 do 30 s	10^{-3} do 10^{-6} s
Czas rozładowania	0,3 h do 3 h	0,3 do 30 s	10^{-3} do 10^{-6} s
Gęstość energii (W·h/kg)	10 to 100	1 to 10	< 0,1
Gęstość mocy (W/kg)	< 1000	< 10 000	<100 000
Trwałość (liczba cykli ładowania/rozładowania)	< 1000	>500 000	>500 000
Sprawność ładowania/rozładowania	0,7 – 0,85	0,85-0,98	>0,95
Temperatura pracy	od -20 do 100 °C	od -40 do 65 °C	od -20 do 65 °C

Źródło: Merkiś, Pielecha (2015)

Rysunek 68 ilustruje porównanie przebiegu rozładowania superkondensatora i typowego akumulatora. Podczas rozładowania superkondensatora napięcie na jego zaciskach zmienia się w szerokim zakresie, co jest typowe dla kondensatorów. Wartość napięcia spada w miarę jak kondensator oddaje zgromadzoną energię, a zmiany te są zazwyczaj szybkie i wyraźne, ponieważ kondensator oddaje energię niemal natychmiastowo. W przeciwieństwie do tego, akumulatory, takie jak akumulatory litowo-jonowe, charakteryzują się stosunkowo wąskim zakresem zmian napięcia w trakcie rozładowania. Napięcie pozostaje względnie stabilne przez większość cyklu rozładowania, co wynika z natury chemicznych procesów zachodzących w akumulatorze. Dopiero w ostatniej fazie rozładowania napięcie zaczyna spadać gwałtowniej. Taki przebieg rozładowania wynika z pojemności akumulatorów, które dostarczają energię w sposób bardziej ciągły i stabilny niż superkondensatory, ale z mniejszą zdolnością do szybkiej wymiany energii. Różnica w zachowaniu napięcia na zaciskach w obu przypadkach podkreśla odmienności między tymi dwoma rodzajami magazynów energii. Superkondensatory, mimo że oferują bardzo wysoką moc, są mniej stabilne pod względem napięcia, natomiast akumulatory zapewniają bardziej równomierny poziom napięcia, co jest korzystne w aplikacjach wymagających stabilnego zasilania.



Rysunek 68. Porównanie przebiegu rozładowania superkondensatora i typowego akumulatora

Źródło: Merkisz, Pielecha (2015)

Pakiet superkondensatorów o parametrach: (tabela 10)

- pojemność - 30(Wh),
- moc - 45(kW),
- napięcie nominalne - 24(V),
- wymiary jak klasyczny akumulator rozruchowy samochodu osobowego,
- masa 4kg.

Aktualnym powszechnym zastosowaniem superkondensatorów są urządzenia rozruchowe zapewniające zabezpieczenie energetyczne układu rozruchowego w warunkach terenowych. Przedstawiony poniżej pakiet rozruchowy pozwala na sprawny rozruch silnika wysokoprężnego samochodu wojskowego Star 266 w temperaturze otoczenia -30°C . Powszechne stosowanie superkondensatorów w urządzeniach rozruchowych pozwala na zdobywanie doświadczeń przez producentów w zakresie aplikacji tych rozwiązań w szeroko rozumianej branży motoryzacyjnej.

Tabela 10. Parametry superkondensatorów wiodącego producenta

Specyfikacja	Seria K2	Moduł 48V	Moduł 125V
			
Pojemność elektryczna (F)	650-3000	83-165	63
Napięcie (V)	2,7	48	125
Opór wewnętrzny (mΩ)	0,29-0,8	6,3-10	18
Przecieki prądu (mA)	1,5-5,2	3,0-5,2	10
Gęstość energii (W·h/kg)	4,1-6,0	2,6-3,9	2,3
Gęstość mocy (kW/kg)	12-14	5,6-6,8	3,6

Rysunek 69 przedstawia superkondensator rozruchowy do samochodów spalinowych, który jest wykorzystywany w procesie uruchamiania silnika pojazdu. Superkondensator ten składa się z kilku istotnych zacisków. Zacisk B+ jest przeznaczony do podłączenia dodatniej klemy akumulatora pojazdu, natomiast zacisk B- jest używany do podłączenia ujemnej klemy akumulatora. Zacisk S+ służy do podłączenia zewnętrznej ładowarki, która zapewnia niezbędne ładowanie kondensatora w momencie, gdy jest to wymagane. Superkondensator rozruchowy jest szczególnie użyteczny w przypadku samochodów, gdyż zapewnia szybką dostawę energii potrzebnej do uruchomienia silnika, a jednocześnie nie wymaga dużych rozmiarów ani długich czasów ładowania.



Rysunek 69. Superkondensator rozruchowy do samochodów spalinowych

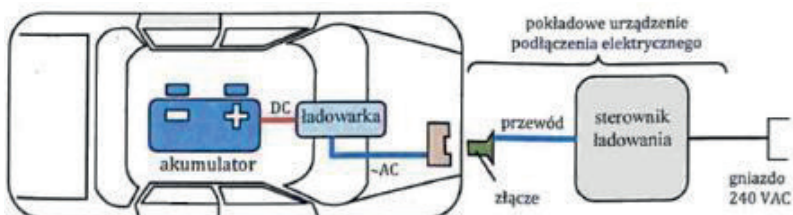
Źródło: Opracowanie własne

6.3. Ładowanie akumulatorów

Ładowanie akumulatorów może być realizowane na kilka sposobów:

- przewodowo przez zastosowanie ładowarki pokładowej (małe moce),
- przewodowo przez zastosowanie ładowarki stacjonarnej (duże moce),
- bezprzewodowo wykorzystując indukcję elektromagnetyczną lub rezonans magnetyczny (wiele zakresów mocy).

Rysunek 70 ilustruje proces ładowania akumulatora pojazdu przy użyciu małego prądu. Pojazd jest podłączony do sieci elektroenergetycznej za pomocą przewodu ładowania, który jest wyposażony w sterownik. Proces ładowania przy małym prądzie jest zazwyczaj stosowany w sytuacjach, gdy nie ma potrzeby szybkiego doładowania akumulatora, a celem jest stopniowe uzupełnianie energii. Sterownik w przewodzie ładowania kontroluje i reguluje proces ładowania, zapewniając bezpieczne i efektywne dostarczanie energii do akumulatora pojazdu.



Rysunek 70. Ładowanie akumulatora pojazdu małym prądem

Źródło: Merkiś, Pielecha (2015)

Dopuszczalne moce ładowania podzielono na trzy zakresy i przydzielono im poziomy zależne od rodzaju napięcia.

Tabela 11 przedstawia parametry systemów ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych. W tym przypadku uwzględnione są różne aspekty techniczne i jakościowe, które określają efektywność i wydajność procesu ładowania, w tym prędkość ładowania, napięcie, moc oraz typy systemów ładowania.

Tabela 11. Parametry systemów ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych

Poziom	Typ	Napięcie (V)	Natężenie prądu (A)	Moc (kW)	Gniazdo (przykład)
1	AC	120	12 16	1,44 1,92	
2	AC	208-240	<80	3,3-19,2	
1	DC	200-450	<80	<19,2	
2	DC	200-450	<200	<90	
3	DC	200-600	<400	<240	

Źródło: Merkisz, Pielecha (2015)

Porównanie tych parametrów ma na celu ukazanie różnic między systemami ładowania, które mogą obejmować różne technologie, takie jak ładowanie standardowe, szybkie ładowanie czy ładowanie bezprzewodowe. Parametry te są kluczowe dla określenia czasu ładowania, możliwości danej infrastruktury oraz kompatybilności z różnymi modelami pojazdów elektrycznych.

Tabela 12 przedstawia kluczowe parametry związane z czasem ładowania akumulatorów w różnych modelach pojazdów elektrycznych i hybrydowych: Nissan Leaf 2011, Nissan Leaf 2012, Chevy Volt, Tesla, Mitsubishi i-MiEV oraz Toyota Prius PHEV. Uwzględniając zasięg pojazdów w trybie elektrycznym, pojemność akumulatorów, moc ładowarek oraz parametry ładowania (napięcie, natężenie i moc), możliwa jest analiza efektywności i szybkości uzupełniania energii w tych pojazdach. Zasięg elektryczny różni się znacznie – od 17,7 km w Toyocie Prius PHEV do 322 km w Tesli, co jest bezpośrednio związane z pojemnością akumulatorów, wynoszącą od 4,4 kWh do 53 kWh. Równie istotna jest moc wbudowanych ładowarek – większość modeli korzysta z mocy 3,3 kW, ale Nissan Leaf 2012 i Tesla wyróżniają się odpowiednio 6,6 kW i 16,5 kW, co znacząco wpływa na skrócenie czasu ładowania. Analiza czasów ładowania przy różnych poziomach napięcia i mocy pokazuje wyraźne różnice w efektywności procesu ładowania. Przy najniższym napięciu 120V i mocy 1,4 kW (AC L1), pełne ładowanie trwa od 3 godzin (Toyota Prius PHEV) do nawet 37 godzin (Tesla).

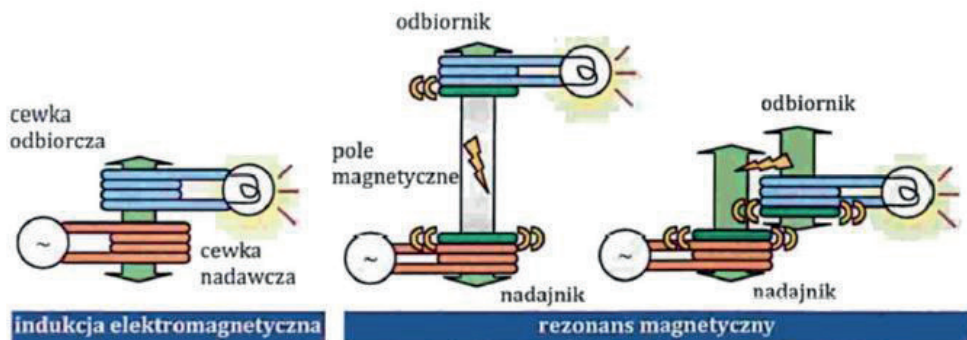
Tabela 12. Czasy ładowania akumulatorów

Wyszczególnienie	Parametr	Nissan Leaf 2011	Nissan Leaf 2012	Chevy Volt	Tesla	Mitsubishi i-MIEV	Toyota Prius PHEV
	Zasięg EV (km/mil)	161/100	161/100	64/40	322/200	121/75	17,7/11
	Energia akumulatorów (kW·h)	24	24	10,4	53	16	4,4
	Moc ładowarki (kW)	3,3	6,6	3,3	16,5	3,3	3,3
U (V)/I (A)/N (kW)		Czas ładowania (h)					
120/12/1,4	AC L1	17	17	8	37	14	3
240/16/3,8	AC L2 - 16A	8	7	4	14	7	1,5
240/30/7,2	AC L2 - 30A	8	4	4	8	7	1,5
240/70/16,8	AC L2 - 70A	8	4	4	4	7	1,5
208/150/31,5	DC L2 - 208V	0,77	0,77	-	1,7	0,65	-
500/125/62,5	DC L2 - 500V	0,39	0,39	-	0,85	0,32	-
U – napięcie, I – prąd, N – moc ładowania							

Źródło: Merkiż, Pielecha (2015)

Zastosowanie wyższego napięcia 240V i prądu 16A (AC L2 – 16A) pozwala na skrócenie tego czasu do 1,5 godziny w przypadku Toyoty i 14 godzin dla Tesli. Przy prądzie 30A i mocy 7,2 kW (AC L2 – 30A) Tesla ładuje się już w 8 godzin, a Nissan Leaf 2012 w 4 godziny. Najszybsze ładowanie prądem przemiennym osiągnięte jest przy mocy 16,8 kW (AC L2 – 70A), co pozwala Tesli na pełne naładowanie w 4 godziny, a Toyocie w zaledwie 1,5 godziny. Jeszcze większą efektywność zapewnia ładowanie prądem stałym (DC). Przy napięciu 208V i mocy 31,5 kW Nissan Leaf i Tesla osiągają około 80% naładowania w mniej niż 2 godziny, natomiast Mitsubishi i-MIEV – w zaledwie 39 minut. Najszybsza metoda, z użyciem napięcia 500V i mocy 62,5 kW, pozwala skrócić ten czas jeszcze bardziej – Tesla ładuje się do 80% w 51 minut, a Mitsubishi i-MIEV w 19 minut. Wyniki te jednoznacznie wskazują, że efektywność ładowania zależy nie tylko od pojemności akumulatorów, ale także od zastosowanej technologii ładowania i parametrów sieci zasilającej. Szybkie ładowanie prądem stałym stanowi kluczowy element rozwoju infrastruktury pojazdów elektrycznych, umożliwiając znaczące skrócenie czasu uzupełniania energii i zwiększając komfort użytkowania tych pojazdów.

Rysunek 71 przedstawia proces ładowania bezprzewodowego, który polega na przesyłaniu energii za pomocą indukcji elektromagnetycznej. Aby system ładowania działał efektywnie, cewki muszą być możliwie blisko siebie i precyzyjnie ustawione. Dzięki zastosowaniu rezonansu magnetycznego, energia może być transportowana nawet przy niedokładnym



Rysunek 71. Ładowanie bezprzewodowe

Źródło: Merkiś, Pielecha (2015)

Podsumowując rozważania dotyczące dostępnych obecnie magazynów energii należy zauważyć, że największe możliwości oferują akumulatory na bazie litu, ale intensywne prace badawczo – rozwojowe trwają w wielu firmach.

Superkondensatory mogą obecnie pełnić rolę uzupełniających magazynów energii, które pozwalają w bardzo krótkim czasie przyjąć lub oddać prąd o bardzo dużym natężeniu. Pakiety superkondensatorów wymagają nadzorowania przez system elektroniczny taki jak BMS. Współpraca obu rodzajów magazynów energii jest obecnie optymalnym rozwiązaniem.

7. Problemy bezpieczeństwa w eksploatacji pojazdów elektrycznych i hybrydowych

7.1. Bezpieczeństwo kierowcy i pasażerów pojazdów elektrycznych i hybrydowych

Dostępne na polskim rynku samochody elektryczne mogą się pochwalić dobrymi lub bardzo dobrymi rezultatami testów zderzeniowych NCAP. Dzieje się tak dlatego, że baterie, które zazwyczaj są zlokalizowane w podłodze samochodu, stanowią dodatkową metalową konstrukcję usztywniającą pojazd, bardzo odporną na uderzenia.

Samochody elektryczne z baterią zainstalowaną w podłodze mają jeszcze jedną ważną cechę poprawiającą bezpieczeństwo - bardzo nisko umieszczony środek ciężkości. To rozwiązanie zastosowane w samochodach elektrycznych znacząco redukuje ryzyko wywrócenia pojazdu. Potwierdzeniem tezy o wyższym poziomie bezpieczeństwa samochodów elektrycznych są dane statystyczne. Spośród 50 samochodów przebadanych w okresie ostatnich 8 lat, amerykańska Narodowa Agencja Bezpieczeństwa Drogowego - NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*) wybrała trzy samochody, w których istnieje najniższe prawdopodobieństwo odniesienia poważnych obrażeń ciała. To należące do Tesli Model 3 (poniżej 6%), Model S i Model X (poniżej 7%). Samochody Tesli osiągają dziś lepsze wyniki testów zderzeniowych niż Volvo, które niezmiennie cieszy się opinią producenta najbezpieczniejszych samochodów na świecie.

Dosyć popularnym argumentem krytyków pojazdów elektrycznych jest ten o łatwopalności baterii. Również w tym przypadku najlepiej sięgnąć do danych. Portal *Greentransportation.info* zamieszcza statystyki na podstawie danych amerykańskiego Narodowego Stowarzyszenia Przeciwożarowego - *National Fire Protection Association*. W USA dochodzi do 150 tys. pożarów samochodów spalinowych rocznie. Zważywszy na fakt, iż zgodnie ze statystykami amerykańskiego Ministerstwa Transportu, Amerykanie przejeżdżają około 3 bilionów mil rocznie. Oznaczałoby to, że jeden pożar pojazdu przypada statystycznie na każde 20 milionów przejechanych mil. Z kolei przytaczane przez ten sam portal, statystyki dla pojazdów Tesli wskazują, że na 638 milionów mil przejechanych "elektrykami" w 2013 roku przypadło 5 pożarów. Zestawienie to pokazuje, że jeden pożar samochodu elektrycznego przypada na 120 milionów przejechanych mil. Statystycznie zatem samochody elektryczne palą się sześć razy rzadziej niż samochody spalinowe.

Pojazdy elektryczne mogą powodować zagrożenie dla pieszych z uwagi na fakt, iż przy małych prędkościach są praktycznie niesłyszalne. Aby minimalizować ryzyko potrącenia pieszych, którzy mogą nie usłyszeć nadjeżdżającego pojazdu, Unia Europejska wprowadziła nakaz stosowania w samochodach elektrycznych systemów wydających „sztuczne” odgłosy przy małych prędkościach. Obowiązek montowania tego typu urządzeń został wprowadzony od 1 lipca 2021 roku (system AVAS). Wprowadzenie w życie takiego rozwiązania zwiększyło bezpieczeństwo wśród pieszych i poprawiło nastawienie opinii publicznej do samochodów elektrycznych. Natomiast w długim terminie, społeczeństwo po prostu przyzwyczai się do tego, że przechodzenie przez ulicę "na słuch" jest po prostu niebezpieczne, bo po ulicach jeżdżą inne samochody, niż tylko te z głośnym silnikiem spalinowym.

Podsumowując, elektryfikacja transportu niesie ze sobą również poprawę bezpieczeństwa w transporcie. Analiza danych pozwala na stwierdzenie, że samochody elektryczne mają lepsze parametry bezpieczeństwa, a nawet pożary zdarzają im się rzadziej (<https://for-sal.pl/artykuly/1430650,impact-czy-samochody-elektryczne-sa-bezpieczniejsze-od-samochodow-spalinowych.html>).

7.2. Bezpieczeństwo personelu serwisującego pojazdy elektryczne i hybrydowe

Obsługa i naprawa pojazdu wyposażonego w źródło napięcia przekraczające napięcia uważane za bezpieczne przysparza wielu trudności. Szczególnie narażeni mogą być ludzie nie rozumiejący istniejącego zagrożenia czyli osoby nieposiadające przeszkolenia w zakresie obsługi i eksploatacji urządzeń elektrycznych do 1000V napięcia znamionowego.

Zgodnie z prawem tj. art. 54 ustawy z 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne (Dz.U. nr 54, poz. 348 ze zm.), § 5 rozporządzenia Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z 28 kwietnia 2003 r. w sprawie szczegółowych zasad stwierdzenia posiadania kwalifikacji przez osoby zajmujące się eksploatacją urządzeń, instalacji i sieci (Dz.U. nr 89, poz. 828 ze zm). można dopuścić pracownika do pracy przy układach elektrycznych o napięciu do 1000V gdy posiada on odpowiednie kwalifikacje potwierdzone przed komisją kwalifikacyjną.

Tabela 13 przedstawia napięcia uważane za bezpieczne w różnych warunkach środowiskowych. Wskazuje ona, że napięcie przemiennie jest bardziej niebezpieczne w porównaniu do napięcia stałego, ponieważ ma częstotliwość zbliżoną do naturalnej częstotliwości pracy ludzkiego serca. Przepływ prądu przemiennego przez ciało człowieka może zakłócić rytm serca, co zwiększa ryzyko poważnych zagrożeń zdrowotnych, takich jak zatrzymanie akcji serca. W związku z tym zaleca się określone limity napięć, które są uznawane za bezpieczne, aby zminimalizować ryzyko porażenia elektrycznego w różnych warunkach użytkowania i środowisku.

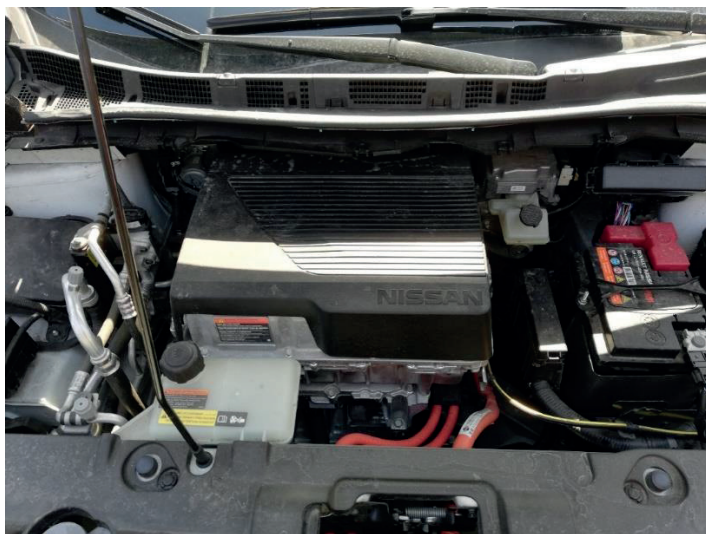
Tabela 13. Napięcia uważane za bezpieczne dla różnych warunków środowiskowych

Warunki	Napięcie przemiennie	Napięcie stałe
	(V)	(V)
Normalne (suche)	50	120
Zwiększonego zagrożenia (wilgotne)	25	60
Ekstremalnego zagrożenia (mokre)	12	30

Źródło: <https://www.ciop.pl/>

W celu zapewnienia bezpieczeństwa osobom obsługującym pojazdy elektryczne i hybrydowe zastosowano barwne (kolor pomarańczowy) oznaczanie przewodów, które mogą znaleźć się pod napięciem uważanym za niebezpieczne dla życia lub zdrowia człowieka. Zastosowano również ekranowanie izolacji przewodów wysokonapięciowych.

Rysunek 72 przedstawia widok komory silnikowej samochodu elektrycznego Nissan Leaf. W tym samochodzie, w komorze silnikowej znajduje się układ napędowy składający się z silnika elektrycznego oraz innych kluczowych komponentów, takich jak falownik, jednostka sterująca i akumulator trakcyjny. W zakresie bezpieczeństwa elektrycznego pojazdy EV wyposażone są w zabezpieczenia przed porażeniem prądem, zarówno dla użytkowników, jak i służb ratunkowych. W razie wypadku systemy automatycznie odłączają wysokie napięcie, aby zapobiec ryzyku porażenia. Dodatkowo stosuje się izolację przewodów i elementów pod napięciem, a także specjalne oznaczenia dla służb ratunkowych, informujące o lokalizacji komponentów elektrycznych.



Rysunek 72. Widok komory silnikowej samochodu elektrycznego NISSAN LEAF

Źródło: Opracowanie własne

Rysunek 73 przedstawia widok komory silnikowej samochodu hybrydowego Toyota Prius Plug-in. W komorze silnikowej tego pojazdu znajdują się zarówno elementy układu napędowego spalinowego, jak i elektrycznego, tworząc tym samym konstrukcję hybrydową. Kluczowe komponenty to silnik spalinowy, silnik elektryczny, akumulator trakcyjny oraz inne elementy zarządzające przepływem energii, takie jak falownik i sterowniki.

Rysunek 74 przedstawia widok komory silnikowej samochodu hybrydowego Lexus 300H. W tym pojeździe, podobnie jak w innych pojazdach hybrydowych, znajdują się zarówno silnik spalinowy, jak i silnik elektryczny, które współpracują ze sobą, by zapewnić optymalną wydajność i efektywność paliwową. Bezpieczeństwo użytkowania pojazdu hybrydowego, takiego jak Lexus wynika z zaawansowanej konstrukcji i zastosowania odpowiednich systemów ochronnych. Obecność zarówno układu napędowego spalinowego, jak i elektrycznego wymaga starannego zabezpieczenia, aby zapewnić maksymalne bezpieczeństwo kierowcy i pasażerów podczas codziennej eksploatacji. Jednym z kluczowych aspektów bezpieczeństwa jest odpowiednia izolacja elementów elektrycznych, takich jak akumulator

trakcyjny, falownik i sterowniki. Pracują one pod wysokim napięciem, co mogłoby stanowić zagrożenie, dlatego pojazd wyposażony jest w systemy ochrony przed porażeniem prądem.



Rysunek 73. Widok komory silnikowej samochodu hybrydowego TOYOTA Prius Plug-in

Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 74. Widok komory silnikowej samochodu hybrydowego LEXUS 300H

Źródło: Opracowanie własne

W razie wykrycia awarii lub kolizji systemy te automatycznie odłączają zasilanie, minimalizując ryzyko porażenia. Kolejnym ważnym elementem jest monitorowanie i zarządzanie przepływem energii. Sterowniki i systemy kontroli dbają o stabilność działania układu elektrycznego, zapobiegając przegrzaniu, przeciążeniu lub zwarciom. Dzięki temu zmniejsza się ryzyko awarii, a użytkownik może korzystać z pojazdu w bezpieczny i komfortowy sposób.

Rysunek 75 przedstawia widok dolnej części płyty podłogowej samochodu hybrydowego Toyota Prius Plug-in. Zauważalnym elementem na tym rysunku jest jaskrawy, pomarańczowy kolor izolacji przewodów elektrycznych, który ma na celu oznaczenie elementów systemu elektrycznego mogących być pod napięciem, co stanowi potencjalne zagrożenie dla osób nieostrożnych. Takie oznaczenia są stosowane w pojazdach elektrycznych i hybrydowych, aby zwiększyć bezpieczeństwo zarówno dla mechaników, jak i innych osób zajmujących się pojazdem. W dolnej części płyty podłogowej mogą również znajdować się komponenty takie jak akumulator trakcyjny, systemy zarządzania energią oraz inne elementy układu napędowego, które są niezbędne do funkcjonowania układu hybrydowego. Pomarańczowa izolacja ma zatem ważną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa przy naprawach lub podczas obsługi pojazdu.

W pojazdach elektrycznych lub hybrydowych stosuje się sprężarki klimatyzacji o napędzie elektrycznym. Sprężarka stanowi zespół z silnikiem. Użycie do jej smarowania niewłaściwego oleju może przyczynić się do poważnej awarii. Układy klimatyzacji tych samochodów wymagają oleju elektroizolacyjnego np. olej ND-11. Podobnie barwnik UV dodawany do układu klimatyzacji w pojazdach z elektrycznym napędem klimatyzacji musi posiadać odpowiedni atest.(50).

Rysunek 76 przedstawia niklowo-wodorkową baterię samochodu hybrydowego Toyota Prius, której napięcie nominalne wynosi 201,6 V. Bateria ta została zaprojektowana z myślą o przechowywaniu energii elektrycznej, która zasila silniki elektryczne pojazdu. W celu utrzymania optymalnej temperatury pracy akumulatora, zastosowano system chłodzenia powietrzem. Chłodzenie powietrzem jest jednym z powszechnych rozwiązań w pojazdach hybrydowych, zapewniając efektywną regulację temperatury ogniw akumulatora, co jest kluczowe dla jego wydajności i trwałości. W przypadku samochodów hybrydowych, takich jak Toyota Prius, system zarządzania energią akumulatora i jego chłodzenie odgrywają istotną rolę w efektywności pojazdu oraz w zapewnieniu bezpieczeństwa operacyjnego podczas ładowania i użytkowania baterii.

Przed przystąpieniem do prac naprawczych lub obsługowych w zakresie elementów mogących znaleźć się pod niebezpiecznie wysokim napięciem należy odłączyć mechanicznie baterię pojazdu od układu elektrycznego. Służy do tego specjalny rozłącznik serwisowy, zwane bezpiecznikiem akumulatora HV. Należy pamiętać też o ładunkach elektrycznych, które mogą pozostać w kondensatorach. Podczas obsługi lub naprawy zawsze trzeba postępować zgodnie z zaleceniami producenta pojazdu. Podstawowe informacje o budowie pojazdu i możliwych zagrożeniach występujących w jego konstrukcji można znaleźć w karcie ratowniczej pojazdu. Takie karty są dostępne w autoryzowanych stacjach obsługi pojazdu lub w Internecie.



Rysunek 75. Widok dolnej części płyty podłogowej samochodu hybrydowego TOYOTA Prius Plug-in

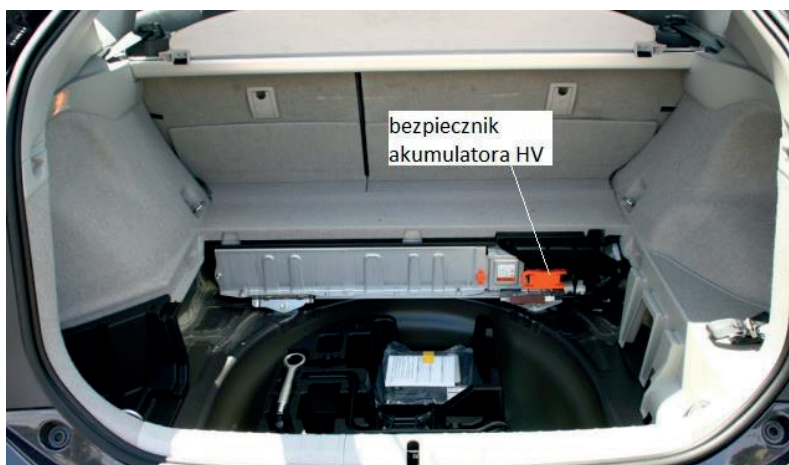
Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 76. Niklowo – wodorkowa bateria samochodu hybrydowego TOYOTA Prius (napięcie nominalne 201,6V)

Źródło: Opracowanie własne

Rysunek 77 przedstawia lokalizację bezpiecznika akumulatora w samochodzie Toyota Prius. Podczas prac serwisowych niezwykle ważne jest, aby odłączyć akumulator wysokonapięciowy od instalacji elektrycznej pojazdu w celu zapewnienia bezpieczeństwa. Zatrzymanie przepływu energii z akumulatora zapobiega ryzyku porażenia prądem elektrycznym lub uszkodzenia komponentów elektrycznych i elektronicznych pojazdu. Bezpiecznik pełni rolę ochronną, automatycznie przerywając obwód, gdy wykryje nadmierne napięcie lub zwarcie w systemie, co dodatkowo zabezpiecza cały układ przed uszkodzeniami w sytuacji awaryjnej.



Rysunek 77. Lokalizacja bezpiecznika akumulatora w samochodzie TOYOTA Prius Przy pracach serwisowych należy odłączyć akumulator wysokonapięciowy od instalacji elektrycznej pojazdu

Źródło: <http://forum.toyotaklub.org.pl/index.php?topic=40111.0>

8. Zalety i wady elektromobilności

Elektromobilność odgrywa coraz większą rolę we współczesnym transporcie, stając się kluczowym elementem globalnych działań na rzecz zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. Dynamiczny rozwój technologii pojazdów elektrycznych wynika z potrzeby ograniczenia emisji spalin, zmniejszenia uzależnienia od paliw kopalnych oraz poszukiwania bardziej efektywnych i ekologicznych rozwiązań transportowych. Wprowadzenie elektromobilności niesie ze sobą liczne korzyści zarówno w kontekście ochrony środowiska, jak i poprawy komfortu oraz ekonomiki użytkowania pojazdów. Jedną z kluczowych zalet elektromobilności jest redukcja emisji dwutlenku węgla i innych zanieczyszczeń powietrza, co bezpośrednio przekłada się na poprawę jakości życia i zdrowia mieszkańców miast. Pojazdy elektryczne charakteryzują się również cichą pracą, co przyczynia się do zmniejszenia hałasu w przestrzeni miejskiej. Dodatkowo, rozwój elektromobilności wspiera innowacyjność w sektorze energetycznym, promując wykorzystanie odnawialnych źródeł energii i integrację z inteligentnymi sieciami energetycznymi.

Elektromobilność oferuje także korzyści ekonomiczne – niższe koszty eksploatacji pojazdów elektrycznych wynikające z tańszej energii elektrycznej oraz mniejszej liczby części podlegających zużyciu przekładają się na oszczędności dla użytkowników. Równocześnie rozwój infrastruktury ładowania i rosnąca dostępność modeli samochodów elektrycznych sprawiają, że elektromobilność staje się coraz bardziej przystępna i wygodna. Wprowadzenie elektromobilności stanowi krok w stronę nowoczesnego, ekologicznego i efektywnego transportu. Jej zalety wpływają nie tylko na środowisko naturalne, ale również na aspekty ekonomiczne i społeczne, kształtując przyszłość mobilności na całym świecie.

1. Korzyści ekologiczne:
 - Redukcja emisji gazów cieplarnianych: Pojazdy elektryczne nie emitują spalin podczas użytkowania, co przyczynia się do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla (CO₂) i innych szkodliwych substancji.
 - Mniejszy ślad węglowy w miastach: Elektromobilność pomaga zmniejszyć zanieczyszczenie powietrza w gęsto zaludnionych obszarach.
 - Potencjał dla energii odnawialnej: Ładowanie pojazdów elektrycznych energią ze źródeł odnawialnych, takich jak energia słoneczna czy wiatrowa, dodatkowo zmniejsza ich wpływ na środowisko.
2. Niższe koszty eksploatacji:
 - Tanie ładowanie: Energia elektryczna jest zazwyczaj tańsza niż paliwa kopalne, co obniża koszty użytkowania pojazdów.
3. Wysoka efektywność energetyczna:
 - Silniki elektryczne są bardziej efektywne w przekształcaniu energii na ruch (około 90% sprawności) w porównaniu do silników spalinowych (ok. 30-40%).
4. Komfort użytkowania:
 - Cisza i brak wibracji: Samochody elektryczne są ciche i bardziej komfortowe w codziennej eksploatacji.
 - Natychmiastowa reakcja na przyspieszenie: Silniki elektryczne zapewniają wysoki moment obrotowy już od startu, co przekłada się na płynną i dynamiczną jazdę.

5. Korzyści społeczne i infrastrukturalne:
 - Redukcja hałasu w miastach: Elektryczne pojazdy zmniejszają poziom hałasu, co ma pozytywny wpływ na zdrowie mieszkańców.
 - Inwestycje w infrastrukturę: Rozwój elektromobilności generuje miejsca pracy w sektorach związanych z budową stacji ładowania, produkcją baterii i pojazdów.
6. Zachęty finansowe:
 - Dofinansowania i ulgi podatkowe: W wielu krajach rządy oferują dopłaty do zakupu pojazdów elektrycznych, co obniża ich koszt początkowy.
 - Preferencje w miastach: Elektryczne pojazdy mają często przywileje, takie jak darmowe parkowanie czy możliwość poruszania się buspasami.

Wady elektromobilności

1. Wysoki koszt początkowy:
 - Cena pojazdów: Samochody elektryczne są droższe od spalinowych odpowiedników, głównie z powodu kosztu baterii.
 - Brak dostępności w niektórych segmentach: Pojazdy elektryczne są często mniej dostępne w budżetowych klasach samochodów.
2. Problemy związane z bateriami:
 - Produkcja baterii: Wytwarzanie baterii, szczególnie litowo-jonowych, wiąże się z wysokim śladem węglowym i eksploatacją rzadkich surowców, takich jak lit, kobalt czy nikiel.
 - Recykling: Technologia recyklingu baterii dopiero się rozwija, co rodzi problemy z gospodarowaniem odpadami.
 - Ograniczona żywotność: Baterie tracą swoją pojemność z czasem i muszą być wymieniane po kilku latach użytkowania.
3. Ograniczony zasięg:
 - Zasięg na jednym ładowaniu: Mimo postępu technologicznego, zasięg większości pojazdów elektrycznych jest wciąż mniejszy niż samochodów spalinowych.
 - Problemy w dłuższych podróżach: Konieczność częstszego ładowania i czas ładowania mogą być uciążliwe w przypadku dalekich tras.
4. Infrastruktura ładowania:
 - Nierównomierny rozwój: Brak wystarczającej liczby stacji ładowania, szczególnie w mniejszych miejscowościach i na terenach wiejskich, utrudnia korzystanie z pojazdów elektrycznych.
 - Czas ładowania: Nawet szybkie ładowarki wymagają więcej czasu niż tankowanie pojazdu spalinowego.
5. Zależność od źródeł energii:
 - Emisje pośrednie: Jeśli energia elektryczna używana do ładowania pochodzi z paliw kopalnych, pojazdy elektryczne mogą nadal przyczyniać się do emisji CO₂.
 - Wzrost zapotrzebowania na energię: Masowa adopcja pojazdów elektrycznych może przeciążyć sieci elektroenergetyczne, zwłaszcza w krajach, gdzie sieci nie są dostatecznie rozwinięte.

6. Aspekty społeczne i geopolityczne:
 - Wydobycie surowców: Eksploatacja minerałów potrzebnych do produkcji baterii, takich jak kobalt czy lit, często odbywa się w trudnych warunkach pracy i może mieć negatywny wpływ na środowisko naturalne.
 - Zależność od importu surowców: Kraje bez własnych zasobów kluczowych surowców stają się zależne od zagranicznych dostawców.
7. Problemy z adaptacją społeczeństwa:
 - Zmiana nawyków: Przyzwyczajenie do ładowania pojazdu zamiast tankowania oraz planowanie tras z uwzględnieniem stacji ładowania wymaga zmiany stylu życia.
 - Koszt infrastruktury: Budowa sieci ładowania wymaga dużych inwestycji, co może podnieść koszty energii elektrycznej.

Bibliografia

- Bogusz P., Korkosz M. (2006). Silnik reluktancyjny przełączalny – podstawy teoretyczne. Politechnika Rzeszowska. Rzeszów.
- Dzieniażewski G., Radkowski P. (2018). Szkolny plan nauczania dla zawodu technik pojazdów samochodowych po szkole podstawowej. Obowiązuje w Zespole Szkół im. ks. Stanisława Staszica w Tarnobrzegu. Tarnobrzeg.
- Gabryelewicz M. (2011). Podwozia i nadwozia pojazdów samochodowych część 1. WKŁ. Warszawa.
<http://forum.toyotaklub.org.pl/index.php?topic=40111.0> (dostęp 19.02.2020)
http://home.pydys.com/budowa_generatora (dostęp 3.01.2020).
<http://jakub80.prv.pl/kaciknauk/seps.htm> (dostęp 5.01.2020).
<http://m.pl.plb-battery.com/battery-cells/li-ion-battery-for-electric-vehicle/3-2v-3500mah-lifepo4-battery-cell-for-evs.html> (dostęp 4.01.2020).
<http://movimet.pl/polskie-silniki-elektryczne/46-silnik-celma-ak-030738.html> (dostęp 3.01.2020).
<http://polish.lithiumlifepo4battery.com/supplier-40907-lithium-ion-rechargeable-batteries> (dostęp 6.01.2020).
http://samochodelektryczne.org/jak_szybko_spada_pojemnosc_akumulatorow_nissana_leafa (dostęp 4.01.2020).
http://samochodelektryczne.org/porownanie_zuzycia_energii_samochodow_elektrycznych_z_2013r.htm (dostęp 5.01.2020).
<http://scholaris.pl/resources/run/id/51142> (dostęp 5.01.2020).
<http://www.energoelektronika.pl/do/ShowNews?id=2469> (dostęp 4.01.2020).
<http://www.portalnaukowy.edu.pl/allegro/superkondensator.pdf> (dostęp 4.01.2020)
<http://www.ssdservice.pl/~ssdservice/SSDrives/ELEKTROTECHNIKA/maszyny%20elektr/silniki%20elektryczne.pdf> (dostęp 7.01.2020).
<http://www.zetech.pl/product/silnik-szude-56i/> (dostęp 5.01.2020).
<https://agri-truck.pl/ogolna/8884-xwimik-alternatora-kamaz-540000001416.html> (dostęp 6.01.2020).
<https://automatykaonline.pl/Artykuly/Technika-napedowa/napedy-blcd> (dostęp 5.01.2020).
<https://bezel.com.pl/2018/08/01/maszyny-indukcyjne/> (dostęp 3.01.2020) (dostęp 4.01.2020).
<https://bezel.com.pl/2018/08/01/maszyny-pradu-stalego/> (dostęp 4.01.2020).
<https://botland.com.pl/pl/content/230-wybor-wlasciwego-silnika-dc> (dostęp 3.01.2020).
<https://finanse.wp.pl/tag/opiec> (dostęp 3.01.2020).
<https://forbot.pl/blog/silniki-elektryczne-szczotkowe-bezszczotkowe-krokowe-id2802> (dostęp 6.01.2020).
<https://forbot.pl/blog/silniki-elektryczne-szczotkowe-bezszczotkowe-krokowe-id2802> (dostęp 6.01.2020).
<https://forsal.pl/artykuly/1430650,impact-czy-samochody-elektryczne-sa-bezpieczniejsze-od-samochodow-spalinowych.html> (dostęp 19.02.2020).
<https://motoryzacja.interia.pl/samochody-nowe/premiery/news-tesla-model-s-p100-d-w-wersji-wysci-gowej,nld,2338161> (dostęp 5.01.2020).
<https://slideplayer.pl/slide/5024043/> (dostęp 7.01.2020).
<https://slideplayer.pl/slide/86322/> (dostęp 3.01.2020).
<https://strefabiznesu.pl/blichewicz-prognozy-sugeruja-ze-do-2030-r-udzial-samochodow-elektrycznych-w-globalnej-sprzedazy-bedzie-wynosil-16-proc/ar/c12-14237929> (dostęp 3.01.2020).
<https://warsztatowiec.info/sprezarki-elektryczne-czyli-przyszlosc-klimatyzacji/> (dostęp 19.02.2020).
<https://wiadomosci.onet.pl/nauka/raport-ipcc-dot-oceanow-i-lodowcow-co-nam-grozi/rsq4tky> (dostęp 5.01.2020).
<https://www.auto-swiat.pl/porady/czy-to-samochody-truja-najbardziej/6vsk90x> (dostęp 4.01.2020).
<https://www.ciop.pl/> (dostęp 19.02.2020).

- <https://www.cire.pl/pliki/2/goryca13.pdf> (dostęp 4.01.2020).
- <https://www.falowniki.edu.pl/slownik,s,silnik-reluktancyjny> (dostęp 3.01.2020).
- <https://www.forumsamochodowe.pl/galeria/nissan-a31/nissan-leaf-30-kwh-tyl-samochod-elektryczny-p25836.htm#vp> (dostęp 6.01.2020).
- <https://www.gram.pl/news/2008/04/15/apple-i-sony-placa-za-pozar-notebooka.shtml> (dostęp 3.01.2020).
- <https://www.newsweek.pl/ekrany-akustyczne-przepisy-koniec-ekranow/kgv8kt5> (dostęp 3.01.2020).
- <https://www.volvojan.pl/Zestaw-rozrzadu-pasek-153X26-VOLVO-S40-V40-silniki-diesla-D4192T2-od-1999r-INA-p4807.html> (dostęp 4.01.2020).
- https://ziladoc.com/download/str-1-36_pdf (dostęp 3.01.2020).
- Kisielewski P. (2011). Technologia montażu magnesów trwałych w wirniku silnika synchronicznego dużej mocy. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Nr 64 Politechniki Wrocławskiej. Wrocław.
- Krakowiak I. (2012). Elektrotechnika i elektronika. Politechnika Warszawska. Warszawa. Materiały własne autora.
- Merkisz J., Pielecha I. (2015). Układy elektryczne pojazdów hybrydowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań.
- NCF_Prius (2007). Instrukcja obsługi samochodu Toyota Prius drugiej generacji.
- Rozporządzenie ministra edukacji narodowej 1z dnia 16 maja 2019 r. w sprawie podstaw programowych kształcenia w zawodach szkolnictwa branżowego oraz dodatkowych umiejętności zawodowych w zakresie wybranych zawodów szkolnictwa branżowego.

NAPĘDY ELEKTRYCZNE I HYBRYDOWE W POJAZDACH SAMOCHODOWYCH

Streszczenie. Poradnik przeznaczony jest dla uczniów i studentów kierunków technicznych, zainteresowanych nowoczesnymi systemami napędowymi oraz zrównoważonym transportem. Zawiera on kluczowe zagadnienia związane z elektromobilnością, koncentrując się na konstrukcji, działaniu oraz eksploatacji pojazdów elektrycznych i hybrydowych. W początkowych rozdziałach przedstawiono porównanie napędów elektrycznych i spalinowych, wskazując ich zalety i wady. Następnie opisano rozwiązania konstrukcyjne stosowane w nowoczesnych pojazdach, w tym w modelach hybrydowych. Kolejne rozdziały zawierają szczegółową charakterystykę silników elektrycznych, takich jak silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC) oraz silniki prądu przemiennego. Omówiono także sposoby sterowania silnikami oraz ich wpływ na wydajność pojazdów. Poradnik przedstawia różne typy magazynów energii elektrycznej, w tym akumulatory i superkondensatory, analizując ich parametry i sposoby ładowania. Istotnym aspektem są kwestie bezpieczeństwa, zarówno dla użytkowników pojazdów elektrycznych i hybrydowych, jak i personelu serwisowego. W końcowych rozdziałach dokonano podsumowania zalet i wad elektromobilności, przedstawiając jej wpływ na współczesny transport i środowisko.

Słowa kluczowe: elektromobilność, pojazd, napęd, hybryda, transport, ekologia

ELECTRIC AND HYBRID DRIVES IN MOTOR VEHICLES

Summary. The guide is intended for technical students interested in modern propulsion systems and sustainable transportation. It covers key issues related to electromobility, focusing on the design, operation and use of electric and hybrid vehicles. The initial chapters present a comparison of electric and internal combustion drives, pointing out their advantages and disadvantages. This is followed by a description of the design solutions used in modern vehicles, including hybrid models. Subsequent chapters provide detailed characteristics of electric motors, such as brushless direct current (BLDC) motors and AC motors. Also discussed are ways to control the motors and their impact on vehicle performance. The guide presents different types of electric energy storage, including batteries and supercapacitors, analyzing their parameters and charging methods. Safety issues are an important consideration, both for users of electric and hybrid vehicles and for service personnel. The final chapters summarize the advantages and disadvantages of electromobility, previewing its impact on modern transportation and the environment.

Keywords: electromobility, vehicle, drive, hybrid, transportation, ecology



WIR
WYDAWNICTWO

ISBN 978-83-64377-67-9