



**Politechnika
Śląska**



**UCZELNIA
BADAWCZA**
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

mgr inż. Bartłomiej Urbański

Badania i wdrożenie alternatywnego układu napędowego w sporcie samochodowym

**Rozprawa doktorska w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych
w dyscyplinie inżynierii mechanicznej**

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Przybyła, prof. PŚ,
Katedra Techniki Ciepłej,
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska

Promotor pomocniczy: dr inż. Ryszard Buchalik,
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych,
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska

Opiekun pomocniczy: mgr inż. Łukasz Brodziński,
M-Sport Poland sp. z o.o.

Politechnika Śląska

Gliwice 2024

Podziękowania

Niniejsza rozprawa doktorska powstała pod opieką dr. hab. inż. Grzegorza Przybyły, prof. Politechniki Śląskiej oraz dr. inż. Ryszarda Buchalika, którym dziękuję za pomoc i wkład merytoryczny na każdym etapie realizowania tej pracy.

Chcę podziękować również firmie M-Sport Poland sp. z o.o. a w szczególności Maciejowi Wodzie za umożliwienie realizacji niniejszej pracy i Łukaszowi Brodzińskiemu, który był Opiekunem Pomocniczym i okazał duże wsparcie merytoryczne, w szczególności przy przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych. Podziękowania również dla wszystkich pracowników M-Sport Poland sp. z o.o., którzy byli zaangażowani w realizację niniejszej pracy, tj. Michał Augustyn, Mateusz Nowak i Konrad Makula.

Szczególne podziękowania składam moim rodzicom Jolancie i Wojciechowi Urbańskim, a w szczególności tacie, który zaszczepił we mnie pasję do sportu samochodowego. Osobne podziękowania za wsparcie i cierpliwość składam mojej narzeczonej Kamili Stopińskiej oraz rodzinie i przyjaciołom za każdą okazaną pomoc.

Bartłomiej Urbański

Spis treści

1.	Wprowadzenie	6
1.1	Rys historyczny sportów samochodowych	6
1.2	Charakterystyka poszczególnych konkurencji w dyscyplinie sport samochodowy	7
1.3	Układy napędowe stosowane w samochodach rajdowych.....	11
1.4	Układy napędowe stosowane w samochodach osobowych wybranych segmentów	20
1.5	Cel, zakres oraz tezy pracy	30
2.	Wybór alternatywnego układu napędowego z wykorzystaniem analizy wielokryterialnej	32
2.1	Zdefiniowanie problemu i celu analizy	32
2.2	Identyfikacja rozwiązań alternatywnych.....	34
2.3	Określenie kryteriów oceny	39
2.4	Agregacja wyników analizy.....	44
2.5	Podsumowanie wyników i podjęcie decyzji	45
3.	Jednowymiarowe analizy numeryczne	48
3.1	Stworzenie modelu w programie AVL CruiseM	48
3.2	Symulacje numeryczne z wykorzystaniem stworzonego modelu	60
4.	Badania eksperymentalne	78
4.1	Cel i zakres badań na hamowni silnikowej	78
4.2	Opis stanowiska badawczego na hamowni silnikowej.....	78
4.3	Przeprowadzone badania na hamowni silnikowej.....	82
4.4	Cel i zakres badań samochodu rajdowego w warunkach rzeczywistych	93
4.5	Opis samochodu rajdowego oraz trasy	93
4.6	Przeprowadzone badania samochodu rajdowego.....	95
5.	Bezpieczeństwo użytkowania oraz zmiany w przepisach.....	96
5.1	Plan stworzenia procedur bezpieczeństwa	97
5.2	Propozycja zmian przepisów grup rajdowych dla FIA	100
5.3	Samochód rajdowy a jego dopuszczenie do ruchu drogowego.....	104
6.	Podsumowanie i wnioski	106
6.1	Wnioski naukowe.....	106
6.2	Wnioski wdrożeniowe.....	107
6.3	Plan przyszłych badań.....	107
7.	Bibliografia.....	108

Ważniejsze stosowane oznaczenia

litery alfabetu łacińskiego

- a, m – współczynniki funkcji Vibe
- c – udział masowy pierwiastka węgla w paliwie, $\text{kg}_c/\text{kg}_{\text{pal}}$
- E – emisja całkowita w cyklu badawczym, g/cykl
- e – emisja, g/cykl
- [i] – udział molowy „i” – tego składnika spalin suchych,
- k – konsumpcja paliwa, dm^3
- n – ilość materii, kmol
- m – masa, kg
- m_p – ilość paliwa zużyta przez silnik spalinowy w trakcie realizacji cyklu badawczego na hamowni silnikowej, kg/cykl
- M_c – masa molowa pierwiastka węgla, kg/kmol.
- M_i – masa molowa „i” – tego składnika spalin suchych, kmol/kg
- M_o – moment obrotowy, Nm
- n_o – prędkość obrotowa, obr/min
- p – ciśnienie, Pa
- t – temperatura, °C
- T – temperatura, K
- OP – otwarcie przepustnicy, °
- v – prędkość, km/h
- Wd – wartość opałowa paliwa, J/kg

litery alfabetu greckiego

- α , α_k , °OWK – bieżąca oraz całkowita wartość kąta obrotu wału korbowego podczas procesu spalania
- ϵ – energia, kJ
- η – sprawność, %
- λ – stosunek nadmiaru powietrza (tlenu), -
- τ – czas, s

indeksy dotyczące

- B – baterii trakcyjnej 48 V
- BE – badania eksperymentalnego
- CO – tlenku węgla
- CO_2 – dwutlenku węgla
- CS – cyklu symulacyjnego
- H – hamowania
- HC – węglowodorów
- NO – tlenku węgla
- NO – tlenku azotu
- OS – odcinka specjalnego
- S – samochodu

inne oznaczenia umowne

- ' – prim; wielkości dotyczące substratów spalania
- " – bis; wielkości dotyczące produktów spalania
- AC – prąd przemienny (ang. alternating current)
- ALS – system podtrzymujący prędkość obrotową turbosprężarki (ang. Anti-Lag System)

- ASN – Krajowa Władza Sportowa (ang. National Sporting Authority)
- 2WD – samochód z układem napędowym realizowanym na jedną oś
- 4WD – samochód z układem napędowym realizowanym na dwie osie
- BEV – samochód z elektrycznym, bateryjnym układem napędowym (ang. Battery Electric Vehicle)
- BISG – zintegrowane z paskiem napędu akcesoriów silnika spalinowego, urządzenie elektryczne służące do rozruchu, odzyskiwania energii podczas hamowania samochodu i wspomagania silnika spalinowego (ang. Belt-driven Integrated Starter Generator)
- DC – prąd stały (ang. direct current)
- DOHC – podwójny górny wałek rozrządu (ang. Double Overhead Camshaft)
- ERC – Rajdowe Mistrzostwa Europy
- EREV – samochód z hybrydowym, spalinowo-elektrycznym układem napędowym składającym się z silnika spalinowego i generatora prądu elektrycznego służącego do ładowania baterii trakcyjnej (ang. Extended-Range Electric Vehicle)
- F1 – Formuła 1
- FCEV – samochód z elektrycznym układem napędowym z ogniwami paliwowymi (ang. Fuel Cell Electric Vehicle)
- FIA – Międzynarodowa Federacja Samochodowa (fr. Fédération Internationale de l'Automobile)
- mHEV – samochód z hybrydowym, spalinowo-elektrycznym układem napędowym z wykorzystaniem rozwiązań tzw. miękkiej hybrydyzacji o bezpiecznym napięciu zasilania 48 V (ang. mild-Hybrid Electric Vehicle)
- HEV – samochód z hybrydowym, spalinowo-elektrycznym układem napędowym (ang. Hybrid Electric Vehicle)
- IC – chłodnica powietrza doładowanego (ang. Intercooler)
- MKS – Międzynarodowy Kodeks Sportowy
- PHEV – samochód z hybrydowym, spalinowo-elektrycznym układem napędowym z możliwością ładowania baterii trakcyjnej ze źródła zewnętrznego (ang. Plug-in Hybrid Vehicle)
- OS – odcinek specjalny
- RSMP – Rajdowe Samochodowe Mistrzostwa Polski
- WEC – Mistrzostwa Świata Wyścigów Długodystansowych
- WTCC – Mistrzostwa Świata Samochodów Turystycznych
- WTCR – Puchar Świata Samochodów Turystycznych
- WRC – Rajdowe Mistrzostwa Świata

1. Wprowadzenie

Niniejsza praca dotyczy sportu samochodowego, który jest specjalistyczną dziedziną sektora motoryzacyjnego. Aby wyjaśnić kontekst, uwarunkowania i motywacje stojące za tą pracą, w niniejszym rozdziale zostały przybliżone główne fakty i zagadnienia odnoszące się do sportu samochodowego. Poruszone zostały również kwestie związane z aktualnym stanem techniki zarówno w samochodach rajdowych jak i produkowanych seryjnie. Na koniec sformułowane zostały cele, zakres oraz teza pracy.

1.1 Rys historyczny sportów samochodowych

Sport samochodowy ma historię niewiele krótszą niż sam samochód. Carl Benz opatentował swój pierwszy pojazd w 1886 roku [1] podczas gdy pierwszy wyścig samochodowy odbył się we Francji już 8 lat później w 1894 roku na trasie Paryż – Rouen [2]. Skłonność ludzi do rywalizacji i chęć osiągnięcia jak najlepszych wyników była i jest kołem zamachowym dla rozwoju sportu samochodowego, a w rezultacie również techniki samochodowej [3–5]. Należy przy tym pamiętać, że wiele rozwiązań zastosowanych po raz pierwszy w samochodach wyczynowych było następnie adaptowane do użycia w ich seryjnie produkowanych odpowiednikach. Takie rozwiązania jak układ rozrządu z podwójnymi wałkami w głowicy (DOHC), turbodoładowanie, napęd na cztery koła, hamulce tarczowe, aktywne zawieszenie a nawet lusterka wsteczne, nawet jeżeli nie mają swojego początku w sporcie samochodowym, to właśnie jemu należy oddać zasługi ich dopracowania i popularyzacji w seryjnie produkowanych samochodach [4]. Ekstremalny charakter rywalizacji w sporcie samochodowym pozwala również na uzyskanie odpowiedzi na temat granic niezawodności poszczególnych podzespołów, które nie byłyby nigdy eksploatowane w tak wymagających warunkach.

Poza daniem impulsu rozwojowego dla sektora motoryzacyjnego, sport samochodowy od wielu lat jest obiektem zainteresowania kibiców. Zarówno wyścigi samochodowe (F1 – Formuła 1, WEC – Mistrzostwa Świata Wyścigów Długodystansowych, WTCC – Mistrzostwa Świata Samochodów Turystycznych, WTCR – Puchar Świata Samochodów Turystycznych), jak i rajdy samochodowe na różnych szczeblach (WRC – Rajdowe Mistrzostwa Świata, ERC – Rajdowe Mistrzostwa Europy) przyciągały i przyciągają uwagę publiczności zarówno na torach wyścigowych jak i odcinkach specjalnych rajdów. Jeżeli chodzi o rajdy zawody

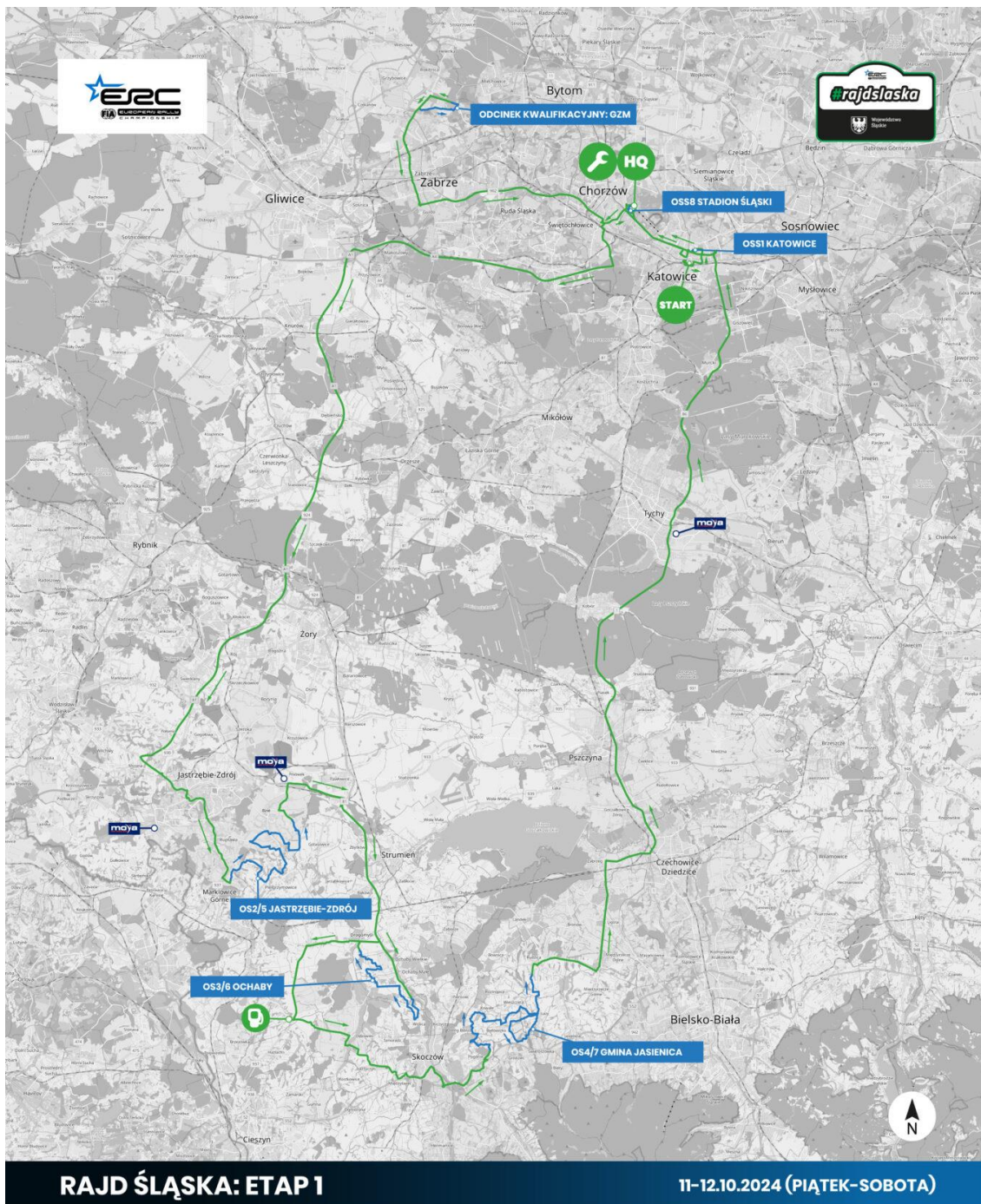
te zazwyczaj są rozproszone na dużo większej powierzchni niż wyścigi samochodowe. Jednocześnie w ich przypadku kibice mogą przebywać w znacznie bliższej odległości do samochodów rajdowych niż na wyścigach samochodowych. Takie miejsca jak: start i meta rajdu, przegrupowania, parki serwisowe przyciągają w trakcie rajdu zainteresowanie ludzi i samochody rajdowe w tych miejscach znajdują się wręcz na wyciągnięcie ręki. Oprócz kibiców w sporcie samochodowym przebywa również duża grupa organizatorów zawodów oraz członków zespołów. W porównaniu do seryjnie produkowanych samochodów, samochody wyścigowe i rajdowe emitują do otoczenia więcej hałasu oraz substancji szkodliwych. Konieczne jest więc określenie nowych kierunków rozwoju samochodów rajdowych, aby przy możliwie najmniej negatywnym wpływie na otoczenie i zdrowie ludzi (z powodu emisji substancji szkodliwych [6]), w dalszym ciągu mogły być narzędziem i podmiotem rywalizacji sportowej dla zawodników [5, 7]. Trzeba również jednak podkreślić, że redukcja emisji hałasu w sporcie samochodowym nie zawsze jest pożądana ze względów bezpieczeństwa i należy określić właściwy kompromis w tym zakresie. Hałas emitowany przez samochód rajdowy w trakcie jego jazdy po odcinku specjalnym (OS) ułatwia kibicom w zorientowaniu się, że nadjeżdża, co znacznie zwiększa bezpieczeństwo prowadzonej rywalizacji sportowej.

1.2 Charakterystyka poszczególnych konkurencji w dyscyplinie sport samochodowy

Zgodnie z Międzynarodowym Kodeksem Sportowym (MKS) Międzynarodowej Federacji Samochodowej (FIA) [8], art. 1.1.1. stanowi, że FIA jest jedyną międzynarodową władzą sportową upoważnioną do ustanawiania i wdrażania przepisów, opartych na podstawowych zasadach bezpieczeństwa oraz bezstronności sportowej, dotyczących propagowania i kontroli zawodów samochodowych, także w zakresie Esportu, oraz organizacji Międzynarodowych Mistrzostw FIA, także w Esporcie. FIA jest więc najważniejszym podmiotem, który określa kształt rywalizacji w sporcie samochodowym. Składają się na to wszelkie kwestie związane z określeniem rywalizacji pod kątem sportowym, technicznym jak i bezpieczeństwem zawodników, organizatorów oraz kibiców.

Sport samochodowy jako dyscyplina dzieli się wg MKS FIA [8] na następujące konkurencje w przypadku zawodów szybkościowych:

- **Drifting:** Konkurencja, w której kierowcy rywalizują, starając się dokładnie podążać wyznaczoną trasą. Punkty za właściwą kombinację linii, kąta, stylu i prędkości jazdy, są przyznawane przez sędziów. Drifting może odbywać się na zamkniętych, stałych lub okazjonalnych trasach, z dozwolonymi dwiema formami współzawodnictwa, tj. drifting solo lub w parze.
- **Próba:** Usankcjonowane zawody, w których każdy zawodnik może wybrać swój własny czas do ich wykonania w okresie ustalonym regulaminem.
- **Próba ustanowienia Rekordu:** Próba pobicia Rekordu Krajowego, Rekordu Świata, Absolutnego Rekordu Świata lub Niekwestionowanego Rekordu Świata, w zgodzie z MKS.
- **Rajd:** Zawody drogowe z narzuconą średnią prędkością przejazdu, całkowicie lub częściowo rozgrywane na drogach otwartych dla normalnego ruchu drogowego. Rajd składa się albo z pojedynczej trasy, którą muszą pokonać wszystkie samochody biorące w nim udział, albo z kilku tras zbieżających do jednego punktu zbiorczego, ustalonego z góry po którym może być kontynuowana trasa wspólna lub nie. Trasa może zawierać jeden lub kilka odcinków specjalnych (OS) tj. prób organizowanych na drogach zamkniętych dla normalnego ruchu drogowego, i których wyniki razem, w myśl zasad ogólnych są głównym wyznacznikiem klasyfikacji generalnej rajdu. Części trasy, które nie obejmują odcinków specjalnych zwane są odcinkami drogowymi. Na odcinkach drogowych najwyższa prędkość przejazdu nie może nigdy być czynnikiem stanowiącym klasyfikację. Zawody, które częściowo wykorzystują drogi otwarte dla normalnego ruchu drogowego, ale mają ponad 20 % odcinków specjalnych całej trasy, rozgrywanych na torach stałych lub półstałych, muszą we wszystkich przypadkach być uważane za zawody o charakterze szybkościowym. Przykładową trasę etapu rajdy zaprezentowano na rysunku 1.



PARTNER GŁÓWNY:



Województwo Śląskie

WSPÓLORGANIZATOR:



STADION ŚLĄSKI

LEGENDA:



DROGI DOJAZDOWE W RUCHU OTWARTYM



ODCINKI SPECJALNE



PARK SERWISOWY



BAZA RAJDU



START RAJDU



META RAJDU



STREFA MONTAŻU OPON



STREFA TANKOWANIA

Rysunek 1 Trasa etapu 1 rundy Rajdowych Mistrzostw Europy - Rajdu Śląska

- **Rajd Terenowy (z wyjątkiem Mistrzostw Świata FIA):** Konkurencja przeprowadzana na trasie o całkowitej długości od 1200 km do 3000 km. Długość każdego odcinka specjalnego nie może wynosić więcej niż 500 km.
- **Rajd Terenowy Maraton (o ile inne właściwe przepisy FIA nie stanowią inaczej):** Rajd terenowy, którego całkowita długość trasy musi wynosić co najmniej 5000 km. Całkowita długość odcinków specjalnych musi wynosić co najmniej 3000 km.
- **Slalom (nazywany również Gymkhana, Motorkhana lub podobnie):** Konkurencja rozgrywana na zamkniętym torze, gdzie w danej chwili tylko jeden samochód pokonuje trasę pomiędzy ustawionymi wygradzeniami, a czynnikami decydującymi o wyniku są umiejętności oraz osiągnięty czas.
- **Wyścig górski:** Konkurencja, w której każdy samochód startuje indywidualnie w celu pokonania tej samej trasy, kończącej się linią mety zwyczajowo usytuowanej na wysokości wyższej niż linia startu. Czas pokonania trasy zawartej pomiędzy liniami startu i mety jest czynnikiem determinującym klasyfikację.
- **Wyścig na przyspieszenie (ang. dragster):** Wyścig na przyspieszenie pomiędzy co najmniej dwoma samochodami, ze startu zatrzymanego, na torze prostym, którego trasa jest precyzyjnie zmierzona, gdzie pierwszy samochód mijający linię mety (bez kary) uzyskuje najlepszy wynik.
- **Wyścig na torze:** Zawody odbywające się na torze zamkniętym pomiędzy dwoma lub więcej samochodami współzawodniczącymi pomiędzy sobą w tym samym czasie na tej samej trasie, w których decydującym czynnikiem jest prędkość lub dystans przejechany w określonym czasie.
- I inne formy rywalizacji w gestii FIA.

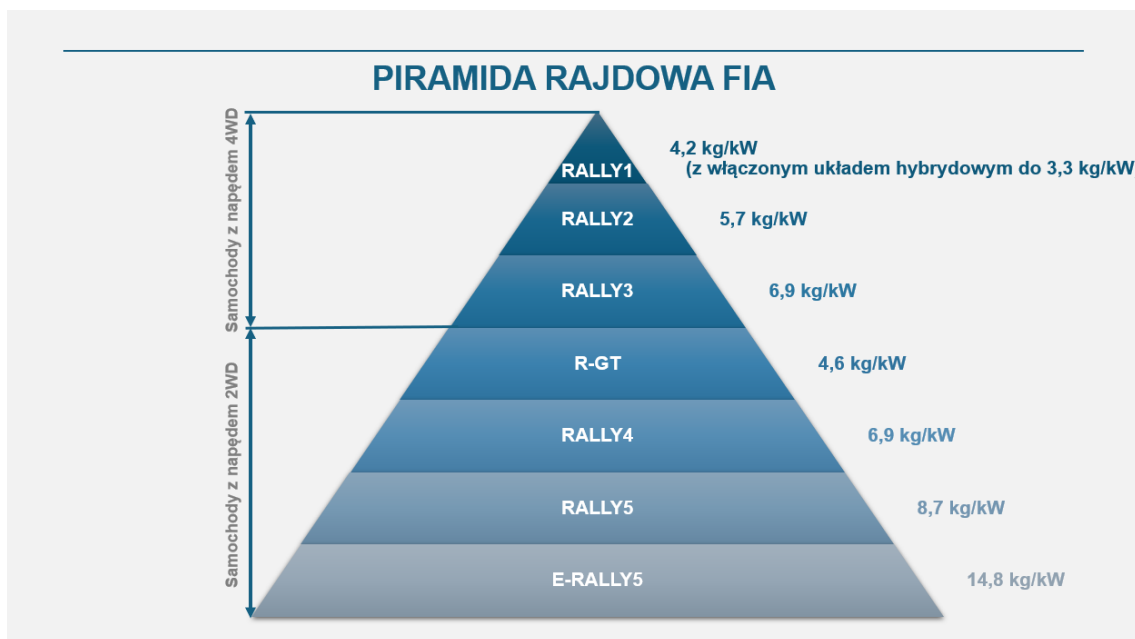
W przypadku niniejszej pracy, przewidywane wdrożenie dotyczy rajdów, co powoduje jego ścisłe powiązanie z rynkiem motoryzacyjnym. W przeciwieństwie do innych form sportu samochodowego, w rajdach istnieje konieczność przemieszczania się samochodów w normalnym ruchu drogowym pomiędzy odcinkami specjalnymi (OS) na których odbywa się jazda na czas. To oznacza, że pojazdy używane w rajdach muszą posiadać dopuszczenie do ruchu drogowego [9–14], więc aby jego uzyskanie było możliwe, w większości przypadków bazują na modelach produkowanych seryjnie lub w małych seriach. Taki wymóg zapewnia bliskie powiązanie pomiędzy technologiami stosowanymi w rajdach, a tymi dostępnymi dla przeciętnego kierowcy. Wpływa on również na ograniczenia w projektowaniu pojazdów w porównaniu z samochodami

przeznaczonymi wyłącznie do wyścigów, gdzie przepisy pozwalają na bardziej zaawansowane i niestandardowe rozwiązania techniczne.

Należy podkreślić, że w rajdach samochodowych wykorzystywane są przede wszystkim samochody osobowe z segmentów A (mini/mikro), B (małe auta) i S (sportowe) [15]. Obecnie prowadzone są dyskusje nad wprowadzeniem do rajdów samochodów segmentu J (terenowe/SUV) [15], co odzwierciedla rosnącą popularność tych pojazdów na rynku i sugeruje, że przyszłość tej konkurencji może obejmować szerszą gamę pojazdów.

1.3 Układy napędowe stosowane w samochodach rajdowych

Podział samochodów rajdowych według Międzynarodowej Federacji Samochodowej (FIA) na grupy oraz klasy służy do uporządkowania rywalizacji w rajdach, takich jak Rajdowe Mistrzostwa Świata (WRC) [16] czy Rajdowe Mistrzostwa Europy (ERC) [17]. Może być on wykorzystywany przez ASN (Krajowa Władza Sportowa uznana przez FIA) w mistrzostwach poszczególnych krajów (w przypadku Polski, ASN jest Polski Związek Motorowy, który jednocześnie jest również polskim związkiem sportowym). Każda z grup samochodów rajdowych ma określone specyfikacje techniczne, które mają na celu wyrównanie szans zawodników oraz dostosowanie różnych typów samochodów do określonych poziomów zaawansowania sportowego. Samochody rajdowe FIA dzielą się obecnie na 5 klas w których występuje 9 rodzajów grup samochodów rajdowych [16-18]. Główne grupy samochodów rajdowych FIA, zaprezentowano na rysunku 2. W zestawieniu uwzględniono również nową grupę samochodów E-Rally5, które wykorzystują elektryczny układ napędowy.



Rysunek 2 Hierarchia głównych grup samochodów rajdowych FIA [9, 18-20]

Różnice pomiędzy poszczególnymi grupami samochodów rajdowych FIA, zostały opisane poniżej:

- **Rally1**

Rally1 to najwyższa klasa samochodów rajdowych, wykorzystywana w WRC. Samochody w tej kategorii są najbardziej zaawansowane technologicznie i mogą korzystać z hybrydowych układów napędowych. Specyfikację opisano w tabeli 1.

Tabela 1 Podstawowa specyfikacja samochodów grupy FIA Rally1 [14, 18, 20]

Współczynnik masy do mocy samochodu	4,2 kg/kW (z włączonym układem hybrydowym do 3,3 kg/kW)
Silnik	1,6-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem (285 kW) i silnik elektryczny (100 kW)
Napęd	4WD
Masa minimalna	1 260 kg
Aerodynamika	Rozbudowany pakiet aerodynamiczny
Przykładowy samochód	Ford Puma Rally1 Hybrid

Samochód tej grupy zaprezentowano na rysunku 3.



Rysunek 3 Ford Puma Rally1 Hybrid (fot. M-Sport UK Limited)

- **Rally2**

Rally2 to klasa przeznaczona dla samochodów nieco mniej zaawansowanych technologicznie niż Rally1, ale nadal bardzo konkurencyjna. Jest to najwyższa grupa samochodów stosowana w Rajdach Regionalnych FIA, w tym ERC. Stosowana również w krajowych mistrzostwach rajdowych. Specyfikację opisano w tabeli 2.

Tabela 2 Podstawowa specyfikacja samochodów grupy FIA Rally2 [13, 18, 21]

Współczynnik masy do mocy samochodu	5,7 kg/kW
Silnik	1,6-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem
Napęd	4WD
Masa minimalna	1 230 kg
Aerodynamika	Ograniczony pakiet aerodynamiczny
Przykładowy samochód	Ford Fiesta Rally2

Samochód tej grupy zaprezentowano na rysunku 4.



Rysunek 4 Ford Fiesta Rally2 (fot. M-Sport UK Limited)

- **Rally2-Kit [22]**

Rally2-Kit to grupa samochodów oparta na przepisach Rally2, ale zbudowana na bazie zestawów montażowych, aby umożliwić mniejszym zespołom samodzielne przygotowanie samochodu rajdowego. Specyfikacja jest zbliżona do samochodów Rally2. Przykładowy samochód to Suzuki Swift Rally2-Kit.

- **Rally3**

Rally3 to stosunkowo nowa klasa, która wypełnia lukę między Rally4 a Rally2, oferując samochody z napędem na cztery koła dla mniej zaawansowanych kierowców. Należy podkreślić, że grupa ta powstała z inicjatywy firmy M-Sport Poland sp. z o.o. a autor niniejszej pracy był zaangażowany w tworzenie przepisów technicznych grupy i zarządzanie projektem pierwszego samochodu grupy FIA Rally3- Forda Fiesty ST Rally3. Specyfikację opisano w tabeli 3.

Tabela 3 Podstawowa specyfikacja samochodów grupy FIA Rally3 [10], [18], [23]

Współczynnik masy do mocy samochodu	6,9 kg/kW
Silnik	1.3 lub 1.5-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem
Napęd	4WD
Masa minimalna	1 210 kg
Aerodynamika	Wyłącznie tylne skrzydło
Przykładowy samochód	Ford Fiesta ST Rally3

Samochód tej grupy zaprezentowano na rysunku 5.



Rysunek 5 Ford Fiesta ST Rally3 EVO (fot. M-Sport Poland sp. z o.o.)

- **R-GT**

Grupa R-GT obejmuje samochody rajdowe z napędem na tylną oś, bazujące na modelach samochodów sportowych o wysokich osiąгах, takich jak Alpine A110 Rally, czy Porsche 911. Są to bardziej spektakularne samochody z większą mocą, jednak ze względu na rodzaj układu napędowego mniej konkurencyjne na bardziej technicznych odcinkach rajdowych. Specyfikację opisano w tabeli 4.

Tabela 4 Podstawowa specyfikacja samochodów grupy FIA R-GT [9, 18, 24]

Współczynnik masy do mocy samochodu	4,6 kg/kW
Silnik	Zazwyczaj duże jednostki wolnossące lub turbodoładowane
Napęd	2WD
Masa minimalna	1 300-1 400 kg
Aerodynamika	Ograniczone pakiety aerodynamiczne
Przykładowy samochód	Porsche 911

- **Rally4**

Rally4 to klasa przeznaczona dla początkujących kierowców i zespołów z ograniczonym budżetem, korzystająca z samochodów przednionapędowych. Specyfikację opisano w tabeli 5.

Tabela 5 Podstawowa specyfikacja samochodów grupy FIA Rally4 [10, 18, 25]

Współczynnik masy do mocy samochodu	6,9 kg/kW
Silnik	1.0, 1.2 lub 1.3-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem
Napęd	2WD
Masa minimalna	1 080 kg
Aerodynamika	Brak
Przykładowy samochód	Ford Fiesta Rally4

Samochód tej grupy zaprezentowano na rysunku 6.



Rysunek 6 Ford Fiesta Rally4 (fot. M-Sport Poland sp. z o.o.)

- **Rally5**

Rally5 to najbardziej podstawowa klasa rajdowa, przeznaczona dla początkujących zawodników. Samochody te są najtańsze i najprostsze w utrzymaniu. Specyfikację opisano w tabeli 6.

Tabela 6 Podstawowa specyfikacja samochodów grupy FIA Rally5 [10, 18, 26]

Współczynnik masy do mocy samochodu	8,7 kg/kW
Silnik	1.0, 1.2 lub 1.3-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem
Napęd	2WD
Masa minimalna	1 030 albo 1 080 kg
Aerodynamika	Brak
Przykładowy samochód	Ford Fiesta Rally5

- **Rally5-Kit [12]**

Rally5-Kit jest podobny do Rally5, ale umożliwia budowanie samochodów na bazie zestawów homologowanych przez tunerów za pośrednictwem ASN. Specyfikacja jest zbliżona do Rally5, z naciskiem na niskie koszty budowy i eksploatacji. Przykładowy samochód to Suzuki Swift Rally5-Kit.

- **E-Rally5 [11]**

E-Rally5 to klasa obejmująca samochody elektryczne, stworzona z myślą o przyszłości motorsportu i zrównoważonym rozwoju. Jest to kategoria eksperymentalna, która ma na celu badanie potencjału samochodów elektrycznych w rajdach. Specyfikację opisano w tabeli 7.

Tabela 7 Podstawowa specyfikacja samochodów grupy FIA E-Rally5 [11, 19]

Współczynnik masy do mocy samochodu	14,8 kg/kW
Silnik	Elektryczny
Napęd	2WD
Masa minimalna	1 530 kg
Aerodynamika	Brak
Przykładowy samochód	Opel Corsa Rally Electric

Podsumowanie:

- Rally1 to najwyższa grupa samochodów rajdowych, z zaawansowanymi technologiami i hybrydowym układem napędowym.
- Rally2 oferuje tańsze i mniej zaawansowane technologicznie samochody, ale nadal bardzo konkurencyjne.
- Rally3, Rally4 i Rally5 to grupy dla mniej zaawansowanych kierowców, z Rally5 jako najbardziej podstawową i ekonomiczną opcją.
- R-GT skupia się na sportowych samochodach z napędem na tylną oś, oferując bardziej spektakularne widowisko.
- Rally2-Kit i Rally5-Kit oferują zestawy do budowy samochodów rajdowych na bazie ich seryjnie produkowanych wersji, co umożliwia mniejszym zespołom ich budowę we własnym zakresie.
- E-Rally5 to eksperymentalna klasa, skupiająca się na samochodach elektrycznych, mająca na celu promowanie zrównoważonego rozwoju w rajdach.

Każda z przedstawionych wyżej grup samochodów rajdowych jest przystosowana do różnych poziomów zaawansowania zawodników i ich budżetu, co umożliwi rywalizację szerokiemu spektrum zainteresowanych. Spośród tych grup samochodów wyłącznie grupy Rally1 i E-Rally5 wyposażone są w alternatywne układy napędowe. Wszystkie pozostałe grupy samochodów rajdowych wykorzystują wyłącznie silniki spalinowe, a zastosowanie technologii hybrydowych układów napędowych jest obecnie nieuwzględnione przez przepisy techniczne. W przypadku samochodów grupy Rally1

alternatywne układy napędowe dotyczą samochodów najwyższej klasy, które są kosztowne i wykorzystywane praktycznie wyłącznie w Rajdowych Mistrzostwach Świata (WRC) [16]. Natomiast eksperymentalne samochody o napędzie elektrycznym E-Rally5 nie są wystarczająco konkurencyjne, aby zastąpić nawet obecnie stosowane samochody Rally5.

W 2020 roku FIA zaprezentowała tzw. mapę drogową wdrażania alternatywnych technologii układów napędowych w samochodach rajdowych, której założenia zaprezentowano na rysunku 7.

PLAN FIA ODNOŚNIE WDRAŻANIA ALTERNATYWNYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH DO SAMOCHODÓW RAJDOWYCH

	Rodzaj układu napędowego	Napięcie zasilania	Od	2021	2022	2023	2024	2025
Rally1	PHEV	> 60 V DC	2022		✓	✓	✓	✓
Rally2	mHEV	< 60 V DC	2023			✓	✓	✓
Rally2	BEV	> 60 V DC	?					?
Rally3	mHEV	< 60 V DC	?				?	?
Rally4	mHEV	< 60 V DC	?			?	?	?
Rally5	BEV	> 60 V DC	?			?	✓	✓

Rysunek 7 Plan FIA dotyczący wdrożenia alternatywnych układów napędowych

Jak można z niej wywnioskować, FIA postawiła na wprowadzenie 3 różnych rodzajów alternatywnych układów napędowych do samochodów rajdowych, tj.:

- samochody Rally wyposażone w hybrydowe układy napędowe zarówno wysokiego napięcia z możliwością ładowania baterii trakcyjnej PHEV (wyłącznie Rally1), jak i niskiego napięcia mHEV (Rally2, Rally3, Rally4),
- samochody Rally wyposażone w elektryczne układy napędowe BEV, czyli wykorzystujące baterie (Rally2, Rally5).

Podsumowując wykonanie powyższego planu FIA, do tego momentu wprowadzono wyłącznie poniższe z wymienionych wcześniej grupy samochodów, które wykorzystują alternatywne układy napędowe:

- Rally1,
- Rally5 BEV pod nazwą E-Rally5.

Planowane samochody Rally2 mHEV, Rally2 BEV, Rally3 mHEV i Rally4 mHEV nie doczekały się jeszcze wdrożenia do rajdów samochodowych. Widać, że opóźnienie we wdrażaniu alternatywnych układów napędowych do rajdów samochodowych jest duże i tym bardziej konieczne są działania w tym zakresie. Również dlatego, że samochody rajdowe coraz bardziej oddalają się technologicznie od rozwiązań stosowanych w samochodach produkowanych seryjnie. Brakuje więc rozwiązań pomostowych, które pozwolą na rozpowszechnienie alternatywnych układów napędowych wśród bardziej popularnych grup samochodów rajdowych.

Celem niniejszej pracy jest stworzenie takiego alternatywnego układu napędowego, który będzie możliwy do wdrożenia w samochodach grupy Rally3. Zaproponowane rozwiązanie musi być efektywne kosztowo, a wyposażone w nie samochód konkurencyjny i bardziej przyjazny środowisku niż obecne samochody tej grupy. Zgodnie z przedstawioną przez FIA mapą drogową, należy przyjąć, że preferowane w tych samochodach są niskonapięciowe układy hybrydowe. Niemniej, wstępna analiza przeprowadzona w kolejnym rozdziale dotyczyć będzie wszystkich dostępnych technologii alternatywnych układów napędowych stosowanych w samochodach produkowanych seryjnie, aby zweryfikować słuszność założenia przyjętego przez FIA. Ponadto, należy podkreślić, że ostateczny kształt przepisów FIA nie jest jeszcze ustalony, a przygotowanie rekomendacji dla FIA w zakresie alternatywnego układu napędowego dla grupy Rally3 jest częścią niniejszej pracy. Przygotowane rekomendacje będą mogły zostać zgłoszone do FIA do dalszej dyskusji.

1.4 Układy napędowe stosowane w samochodach osobowych wybranych segmentów

Prowadzona od dłuższego czasu polityka ograniczania emisji substancji szkodliwych oraz CO₂ na wszystkich liczących się rynkach motoryzacyjnych wymusiła na producentach samochodów osobowych poszukiwanie nowych rozwiązań, które umożliwią spełnienie coraz bardziej rygorystycznych norm [27–31]. Powoduje to coraz powszechniejsze wdrażanie do samochodów osobowych technologii alternatywnych układów napędowych [29]. O ile eksperymentowanie z innymi niż silnik spalinowy rodzajami układów napędowych znane jest praktycznie od początków motoryzacji, to nigdy w historii nie stały się popularną, przez co liczącą się na rynku alternatywą. Zmiany w tej kwestii zachodzą dynamicznie w ostatnich latach. Dzieje się tak głównie

ze względu na wolę polityczną i wynikające z niej zmiany legislacyjne, zachęcające do odejścia od stosowania, w szczególności w Unii Europejskiej, silników spalinowych w samochodach osobowych [32–34].

Zmiany procentowe odnoszące się do zaostrzania norm emisji spalin w Unii Europejskiej zaprezentowano w tabeli 8.

Tabela 8 Procentowa zmiana w normach emisji substancji szkodliwych dla silników z Zapłonem Iskrowym w Unii Europejskiej [35, 36]

Rynek / Norma	Substancja	Początkowa norma	Obecna norma	Zmiana, %
Unia Europejska	HC+NO _x	970 mg/km (Euro 1, 1992)	160 mg/km (Euro 6d, 2021)	- 84
	CO	2 720 mg/km (Euro 1, 1992)	1 000 mg/km (Euro 6d, 2021)	- 63

Opisana w tabeli początkowa norma Euro 1 była pierwszą wprowadzoną normą emisji substancji szkodliwych na terenie Unii Europejskiej, natomiast norma Euro 6d jest aktualnie obowiązująca. Jak można zauważyć w znaczącym stopniu ograniczono dopuszczalną wartość emisji takich substancji toksycznych jak węglowodory, tlenki azotu oraz tlenek węgla. Tak duże ograniczenie w emisji substancji szkodliwych jest sporym wyzwaniem dla technologii opartej o konwencjonalne układy napędowe. Potrzeba spełnienia norm powoduje konieczność rozbudowania istniejących systemów oczyszczania spalin jak również wdrażanie nowych rozwiązań [37]. Przekłada się to ostatecznie na wzrost kosztów budowy samochodów a w rezultacie na ich cenę końcową. Szacuje się (w zależności od źródła), że koszt produkcji samochodu osobowego po wprowadzeniu normy emisji spalin Euro 7 może wzrosnąć od kilkuset do kilku tysięcy euro [38, 39].

Nie bez znaczenia w obserwowanym obecnie odwrócenie silników spalinowych była również tzw. afera VW, Dieseldgate, która wybuchła we wrześniu 2015 roku. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) oskarżyła Volkswagen AG o instalowanie w swoich samochodach oprogramowania mającego na celu manipulowanie testami emisji spalin [40]. W praktyce oznaczało to, że w trakcie testów emisji spalin oprogramowanie aktywowało specjalny tryb pracy silnika, dzięki któremu możliwe było spełnienie określonych norm. W trakcie normalnych warunków pracy, poza testami emisji spalin, silnik spalinowy samochodu emitował nawet 40 razy więcej NO_x niż dopuszczały normy. Oprócz porażki wizerunkowej Volkswagen AG, dotkliwych kar finansowych sięgających 30 miliardów dolarów, wycofania około 500 tysięcy pojazdów,

afery wpłynęła na zmiany przepisów w zakresie sposobu przeprowadzania badań homologacyjnych, tak aby zminimalizować ryzyko oszukiwania przez producentów w ich trakcie. Obecnie stosowane w Unii Europejskiej procedury badawcze, które są również adaptowane przez niektóre inne rynki, to WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) i RDE (Real Driving Emissions). Podczas gdy WLTP to laboratoryjna procedura testowa, zastępująca wcześniejszy test (New European Driving Cycle), to RDE jest testem emisji w rzeczywistych warunkach drogowych [41, 42]. Celem stosowania RDE równoległe z WLTP jest potwierdzenie, że wyniki laboratoryjne są w określonym stopniu spójne z wynikami możliwymi do uzyskania podczas codziennego użytkowania samochodu [34, 43].

Oprócz stale zaostrzanych norm emisji spalin na wszystkich kluczowych rynkach, jak również konsekwencji afery Dieseltgate, kolejnym kluczowym aspektem jest nacisk na zmniejszenie zużycia paliwa przez flotę samochodową. W USA, odpowiedzią na kryzys naftowy w latach 70. było wprowadzenie regulacji CAFE (Corporate Average Fuel Economy), która dotyczyła średniego zużycia paliwa floty pojazdów danego producenta [44]. Przepisy te wymagają, aby średnie zużycie paliwa floty pojazdów sprzedawanych przez producenta w danym roku modelowym spełniało określone, maksymalne wartości uzależnione od rodzaju pojazdu. W przypadku niespełnienia norm, producent jest obciążany karą finansową, która jest naliczana biorąc pod uwagę liczbę sprzedanych pojazdów. Unia Europejska posiada własne przepisy w tym zakresie, które określają limity emisji CO₂ dla nowych samochodów [33]. Są one wyznaczane jako średnia całej floty sprzedawanych pojazdów. W przypadku ich niespełnienia, producenci również muszą płacić kary finansowe.

Wszystkie poruszone wyżej aspekty, a w szczególności postęp technologiczny, powodują, że dotychczas droższe, alternatywne technologie układów napędowych, stają się coraz bardziej atrakcyjnym wyborem w stosunku do konwencjonalnych silników spalinowych. Dyskusyjne jest natomiast tempo wprowadzanych zmian, w stosunku do uzyskiwanych rezultatów oraz legislacyjne wspieranie wyłącznie wybranych technologii, co nie zawsze sprzyja osiągnięciu postawionego celu. W tym miejscu należy podkreślić, że uzyskane w ostatnich dwóch dekadach tempo redukcji substancji szkodliwych przez samochody osobowe wyposażone w silniki spalinowe jest imponujące, nawet pomimo wzrostu liczby samochodów przypadających na 1 000 mieszkańców. Porównanie danych w tym zakresie w Polsce w roku 2002 i 2022 przedstawiono w tabeli 9.

Tabela 9 Porównanie zmian w emisji substancji szkodliwych z samochodów osobowych oraz liczby samochodów na 1 000 mieszkańców w Polsce w roku 2002 i 2022 [45,46]

Substancja	Emisje w 2002 r, Gg	Emisje w 2022 r, Gg	Redukcja emisji	Ilość samochodów na 1 000 mieszkańców 2002 r., szt.	Ilość samochodów na 1 000 mieszkańców 2022 r., szt.	Zmiana natężenia ruchu, %
CO	643	168	- 74	289	584	+ 102
NO _x	72	60	- 17			
PM _{2,5}	2	2	0			
PM ₁₀	2	2	0			

Jak widać na przykładzie Polski, pomimo wzrostu liczby samochodów na 1 000 mieszkańców o 51 % w porównywanych latach 2002 i 2022 r. znacznie obniżono lub utrzymano na tym samym poziomie emisję wszystkich, kluczowych substancji szkodliwych. Pokazuje to, że dokonano ogromnego wręcz postępu, jeżeli chodzi o układy oczyszczania spalin w samochodach napędzanych silnikami spalinowymi. Należy więc podchodzić z pewną rezerwą do negowania wykorzystywania silników spalinowych w samochodach osobowych, w szczególności mając na uwadze, że ciągła walka o redukcję emisji CO₂ będzie prowadzić do wzrostu kosztów produkcji samochodów a w rezultacie może doprowadzić do wykluczenia komunikacyjnego części społeczeństwa [39].

Udoskonalanie napędów spalinowych, które znamy obecnie, szczególnie poprzez zastosowanie rozwiązań hybrydowych, wydaje się wciąż atrakcyjną drogą, aby osiągnąć efektywny ekonomicznie i relatywnie czysty środek transportu. Należy postawić w tym miejscu pytanie, czy cele polityczne są określone w sposób realny, który umożliwia ich spełnienie w rozsądnych ramach ekonomicznych i technicznych.

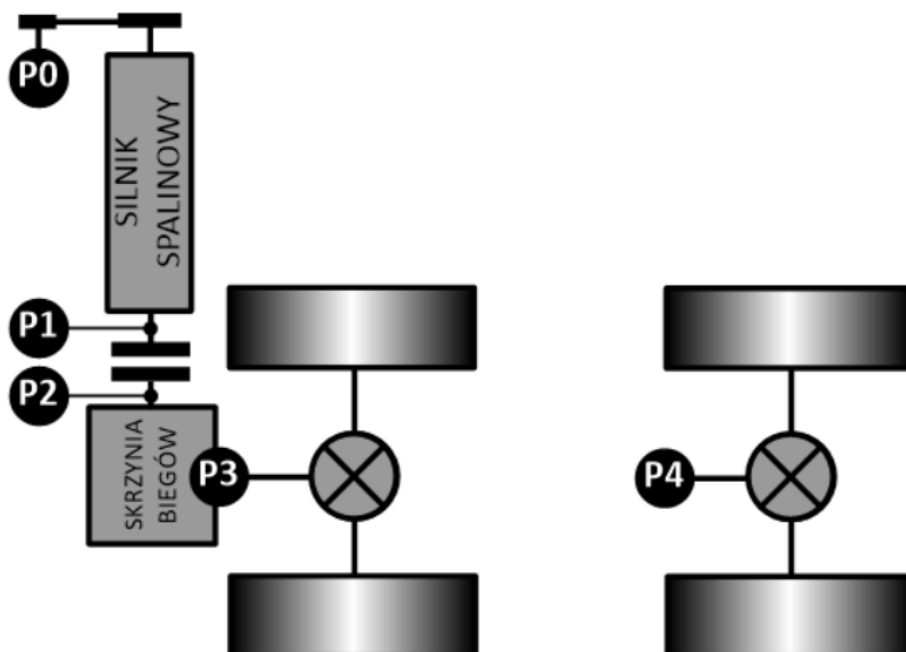
Porównanie wybranych technologii układów napędowych, wraz z porównaniem ich wpływu na środowisko i efektywność ekonomiczną zostanie przeprowadzone w kolejnych częściach pracy. Pod uwagę należy wziąć nie tylko emisję substancji szkodliwych podczas jazdy, ale także związaną z procesem produkcji pojazdu i pozyskiwania niezbędnych surowców, których ilość jest często ograniczona z natury (ang. Whole Life Cycle Assessment) [28].

Alternatyw dla napędów w samochodach osobowych opartych na silnikach spalinowych jest co najmniej kilka. Od rozwiązań, które zakładają częściową elektryfikację po takie, które korzystają wyłącznie z napędu elektrycznego. Biorąc pod uwagę rodzaj układu napędowego, w międzynarodowej nomenklaturze obowiązującej obecnie następujący podział samochodów [29, 47-49]:

- Hybrydowe spalinowo-elektryczne z wykorzystaniem rozwiązań tzw. miękkiej hybrydyzacji o bezpiecznym napięciu zasilania 48 V (ang. mild-Hybrid Electric Vehicle - mHEV).
- Hybrydowe spalinowo-elektryczne (ang. Hybrid Electric Vehicle - HEV).
- Hybrydowe spalinowo-elektryczne z możliwością ładowania baterii trakcyjnej ze źródła zewnętrznego (ang. Plug-in Hybrid Vehicle - PHEV).
- Hybrydowe spalinowo-elektryczne z silnikiem spalinowym i generatorem prądu elektrycznego służącym do ładowania baterii trakcyjnej (ang. Extended-Range Electric Vehicle – EREV).
- Elektryczne bateryjne (ang. Battery Electric Vehicle - BEV).
- Elektryczne z ogniwami paliwowymi (ang. Fuel Cell Electric Vehicle - FCEV).

Spośród wyżej wymienionych samochody wykorzystujące technologie BEV i FCEV wpisują się koncepcję samochodów bez emisyjnych (ang. Zero-Emission Vehicle).

W układach hybrydowych w których występuje zarówno silnik spalinowy jak i silnik elektryczny stosowane są różne konfiguracje montażu silnika elektrycznego. Pozycje konfiguracyjne silnika elektrycznego w hybrydowym układzie napędowym zaprezentowano na rysunku 8.



Rysunek 8 Pozycje montażowe silnika elektrycznego w hybrydowych układach napędowych

Pozycje montażowe silnika elektrycznego dzielą się na następujące [47, 48, 50, 51]:

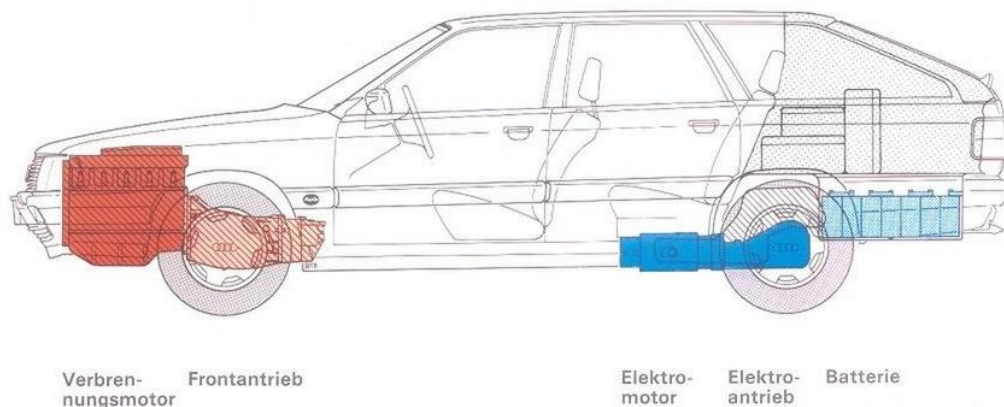
- P0 – do silnika spalinowego poprzez pasek osprzętu,
- P1 – do silnika spalinowego poprzez wał korbowy,
- P2 – do układu napędowego (możliwe odłączenie od silnika spalinowego),
- P3 – do układu napędowego poprzez przekładnie (możliwe odłączenie od silnika spalinowego),
- P4 – do układu napędowego tylnej osi (brak połączenia z silnikiem spalinowym).

Rozwiązania hybrydowe oprócz bezpośredniego wspomaganie układu napędowego, dzięki instalacji elektrycznej o napięciu znamionowym wyższym niż 12 V otwierają możliwość stosowania dodatkowych komponentów elektrycznych. Są to m.in. rozwiązania stosowane w układzie powietrza doładowanego silnika spalinowego.

Historia alternatywnych do silników spalinowych technologii układów napędowych w samochodach osobowych sięga drugiej połowy XIX w. Za pierwszy taki samochód można najprawdopodobniej uznać Flocken Elektrowagen, wyprodukowany w 1888 roku przez firmę Maschinenfabrik A. Flocken w Coburgu, należąca do Andreasa Flockena [47]. Samochody z napędem elektrycznym były rozwijane, ustanawiając m. in. na przełomie XIX w. i XX w. rekordy prędkości, w tym przekroczenie prędkości 100 km/h w 1899 roku przez Camille Jenatzy w samochodzie La Jamais Contente [47]. W kolejnych dekadach XX w. pojawiały się mniej lub bardziej udane próby wdrożenia do produkcji samochodów z napędem elektrycznym, ale nigdy nie zyskały one masowej popularności. Głównym problemem samochodów wyposażonych w tę technologię napędową jest niska gęstość magazynowanej energii w porównaniu do samochodów spalinowych, co wpływa negatywnie na ich osiągi oraz zasięg. Kolejną, niemniej istotną wadą jest wysoki koszt produkcji takich samochodów, w szczególności baterii trakcyjnych [37, 52]. Dopiero w ostatnich dwóch dekadach, za sprawą rosnących cen paliw oraz zachęt legislacyjnych (dopłat rządowych) w niektórych krajach, samochody elektryczne zaczynają stawać się bardziej popularne [29].

W przypadku samochodów hybrydowych, które łączą w sobie różne technologie układów napędowych, początek ich historii można ustalić na rok 1900 i prezentację na światowej wystawie w Paryżu samochodu Lohner-Porsche Mixte Hybrid [53]. Co ciekawe samochód ten mógłby być dzisiaj nazwany jako EREV [54], ponieważ koła napędzane były silnikami elektrycznymi umieszczonymi w piastach kół (w jednej

z wersji napędzany były wszystkie 4 koła), natomiast silnik spalinowy służył do ładowania baterii trakcyjnej. Ponadto pojazd ten osiągnął sukces w sporcie, zajmując pierwsze miejsce w klasie podczas wyścigu Exelberg [53]. Samochód nie przyjął się głównie ze względu na wysoką cenę i niższą niezawodność w stosunku do wyposażonych wyłącznie w silnik spalinowy samochodów. Przez lata technologie hybrydowe nie zostały wdrożone do produkcji seryjnej, niemniej producenci samochodów w dalszym ciągu się nimi interesowali. Jedną z prób było Audi Duo, które na przełomie lat 80 i 90, posiadało silnik spalinowy napędzający oś przednią i silnik elektryczny napędzający oś tylną. Ponadto samochód posiadał możliwość ładowania baterii trakcyjnej ze źródła zewnętrznego [55]. Schemat układu napędowego Audi Duo zaprezentowano na rysunku 9.



Rysunek 9 Schemat układu napędowego Audi Duo [56]

Te nowoczesna, nawet jak na współczesne standardy koncepcja nie doczekała się jednak wdrożenia do produkcji seryjnej.

Dopiero wprowadzenie w 1997 roku Toyoty Prius rozpoczęło etap produkcji seryjnej samochodów osobowych z napędem hybrydowym (HEV) [55]. Początkowo ten rodzaj układu napędowego był traktowany bardziej jako ciekawostka, natomiast podobnie jak w przypadku samochodów wyposażonych wyłącznie w elektryczny układ napędowy, wraz ze wzrostem cen paliw oraz w związku z coraz bardziej restrykcyjnymi normami emisji spalin i ograniczeniami w emisji CO₂, staje się on coraz bardziej popularną technologią. W kolejnych latach XXI wieku technologie hybrydowe zostały rozwinięte o różne ich warianty, w tym PHEV. Pierwszym oferowanym na rynku samochodem PHEV był produkowany w Chinach BYD F3DM, który został wprowadzony

do sprzedaży w 2008 roku [57, 58]. Wariant PHEV wspomnianej już Toyoty Prius z dopiskiem Plug-in Hybrid wprowadzono do sprzedaży w 2012 roku. Za pierwszy samochód EREV należy uznać Chevroleta Volta/Opla Amperę, który został wprowadzony do sprzedaży w 2010 roku [59]. W tym samochodzie zastosowano silnik spalinowy, którego rolą było wydłużenie zasięgu samochodu poprzez doładowywanie przez niego baterii trakcyjnej.

W przypadku samochodów wyposażonych w technologię ogniw paliwowych, jako pierwszy na rynku zaoferowany został Hyundai Tucson Fuel Cell, nazywany również ix35 Fuel Cell, który zadebiutował w 2014 roku [60]. Niemniej, już ponad 10 lat wcześniej, bo w 2002 roku, Toyota wprowadziła model FCHV, ale wyłącznie w ograniczonych ilościach tzn. nie był on oferowany na masową skalę [61].

Jako pierwsze rozwiązanie mHEV można uznać Hondę Insight z 1999 roku [62]. W tym samochodzie silnik elektryczny o niewielkiej mocy około 10 kW służył do wspomagania silnika spalinowego. Od kilku lat popularność zdobywają układy mHEV w technologii 48 V, które wykorzystują m.in. BISG (ang. Belt-Integrated Starter Generator, tj. urządzenie elektryczne, które w zależności od potrzeby może pełnić funkcję silnika elektrycznego lub generatora prądu) [49, 63–66]. Pomimo tego, że są to układy o mniejszej mocy, szacuje się, że mogą ograniczyć zużycie paliwa nawet o 15 % [67, 68]. Układy te charakteryzują się występowaniem wysokich prądów elektrycznych, co jest konsekwencją zastosowania obniżonego napięcia elektrycznego [67]. W trybie regeneracji energii podczas hamowania samochodu może to wpływać na ograniczenie zdolności baterii trakcyjnej do przyjmowania w krótkim czasie dużej ilości energii. Zwraca to uwagę na możliwość wykorzystania oprócz baterii trakcyjnej również superkondensatorów, aby możliwy był jak najwyższy odzysk energii podczas hamowania samochodu [69].

Układy napędowe mHEV, ale również HEV mogą być uzupełniane o dodatkowe komponenty elektryczne, takie jak turbosprężarka wspomagana elektrycznie lub kompresor napędzany elektrycznie [70, 71]. Takie rozwiązanie w technologii 48 V zastosowano po raz pierwszy w Audi SQ7 TDI, które wprowadzono na rynek w 2016 roku [72]. W 2020 roku tę technologię wprowadzono również do silników TFSI, występujących w modelach S6 i S7. Elektryczny kompresor stosuje także firma Mercedes w rodzinach silników M256 i M254. W ostatnim czasie w wersji Mercedes-AMG C 63 S E PERFORMANCE został zastosowany silnik o pojemności jedynie 2.0 L, natomiast wspomagany silnikiem elektrycznym w pozycji P3 (por. rysunek 8) oraz dzięki

zastosowaniu wspomaganej elektrycznie turbosprężarki generuje moc systemową układu na poziomie 680 KM [73].

Porównując przydatność poszczególnych technologii napędowych do wykorzystania w rajdach, należy przybliżyć charakterystykę każdej z nich wraz z ich wadami oraz zaletami. Jak już zostało wspomniane, samochody rajdowe budowane są w przeważającej większości na bazie samochodów produkowanych seryjnie. Z tego powodu preferowane są technologie, które pochodzą z takich właśnie samochodów. Analizę poszczególnych koncepcji układów napędowych rozpoczęto od określenia wpływu poszczególnych technologii na ograniczenie emisji substancji szkodliwych oraz efektywności, ponieważ ograniczenie negatywnego wpływu samochodów rajdowych na otoczenie jest jednym z celów pracy.

Porównanie to można przeprowadzić na wiele sposobów, natomiast w przypadku tej pracy rozpoczęto od weryfikacji sprawności wybranych technologii, w tym analizując całkowitą sprawność, uwzględniając procesy od wydobycia/wytworzenia paliwa, jego dystrybucji, obróbki, do konwersji energii w samochodzie (tzw. z ang. well to wheel) [74]. Dla wybranych przypadków porównano również średnią emisję CO₂, biorąc pod uwagę cykl życia samochodu [28, 52]. Pierwsze porównanie odnosi się do sprawności BEV w stosunku do konwencjonalnych układów napędowych, wykorzystujących silniki spalinowe. Porównanie sprawności konwersji energii w samochodzie oraz całkowitej *well to wheel* zaprezentowano w tabeli 10.

Tabela 10 Porównanie sprawności BEV do samochodów wyposażonych w silniki spalinowe [74]

Rodzaj napędu	Rodzaj paliwa	Sprawność konwersji energii w samochodzie, %	Sprawność całkowita, %
Silnik spalinowy ZI	Benzyna	14-33	11-27
Silnik spalinowy ZI	LPG	14-26	12-22
Silnik spalinowy ZS	Olej napędowy	28-42	25-37
Silnik elektryczny	Paliwa kopalne	50-80	12-31
Silnik elektryczny	Odnawialne źródła energii	50-80	39-72

Jak widać na podstawie powyższych porównań, sprawność poszczególnych rozwiązań jest uzależniona od sposobu pozyskiwania energii używanej do napędzania samochodu. Sprawność całkowita samochodu z napędem elektrycznym przy zmianie sposobu pozyskiwania energii odnawialnych źródeł na paliwa kopalne znacznie spada, tj. z 39-72 % na 12-31 %. W przypadku rynku polskiego, na którym ma nastąpić

wdrożenie samochodu rajdowego wyposażonego w alternatywny układ napędowy, sytuacja jest szczególna, ponieważ około 70 % układów wytwórczych tworzących miks energetyczny to elektrownie wykorzystujące paliwa kopalne takie jak węgiel kamienny, brunatny, czy też gaz [28, 75]. Stawia to sens wykorzystania samochodów BEV pod dużym znakiem zapytania - na polskim rynku nie uzyskują one pozytywnego efektu lub uzyskują go w ograniczonym zakresie ze względu na sposób produkcji energii elektrycznej i związane z nim emisje substancji szkodliwych [27, 28]. Wyniki porównania cyklu życia samochodu z silnikiem spalinowym, HEV i BEV, w przypadku Polski pokazują, że BEV jest najmniej korzystną technologią, jeżeli chodzi o emisję CO₂ [27, 28]. Niekorzystny miks energetyczny Polski, oparty w większości na paliwach kopalnych, powoduje, że eksploatacja BEV nie jest w stanie zneutralizować wyższej energochłonności podczas produkcji samochodu, a dokładnie baterii trakcyjnej [27, 76]. Ponadto produkcja BEV jest bardziej toksyczna niż samochodu z silnikiem spalinowym ze względu na większą ilość metali, chemikaliów i energii w procesie produkcyjnym, w szczególności akumulatorów trakcyjnych [52]. W przypadku Polski, bardziej efektywne od zastosowania technologii BEV są różne formy hybrydowe, które wpływają pozytywnie na lokalne podniesienie sprawności układu napędowego w samochodzie, nie polegając całkowicie na wykorzystaniu do jego zasilania energii z krajowego systemu energetycznego [27, 28]. Sytuacja wygląda odmiennie w przypadku krajów takich jak Norwegia czy Szwecja., gdzie miksy energetyczne oparte są w kolejności w 97 % i 90 % na źródłach odnawialnych lub energii pochodzącej z elektrowni jądrowych [27, 28]. Biorąc pod uwagę, że niniejsza praca realizowana jest w Polsce, to BEV ze względu na uzyskiwaną sprawność całkowitą przy krajowym miesie energetycznym nie jest preferowanym rozwiązaniem.

Odnosząc się do FCEV, to w przypadku tej technologii porównanie przy użyciu średniej emisji CO₂ w cyklu życia samochodu, jest bardzo uzależnione od sposobu pozyskiwania wodoru i może wahać się od 70 g CO₂ eq/km do nawet 215 g CO₂ eq/km [77]. Dla porównania emisja CO₂ w cyklu życia samochodu BEV w Polsce w latach 2015-2050 ma wahać się pomiędzy 172 g CO₂ eq/km do nawet 276 g CO₂ eq/km [77]. FCEV wydaje się więc być obiecującą technologią, biorąc pod uwagę wpływ na środowisko, w szczególności brak emisji substancji szkodliwych podczas konwersji energii w ogniwie paliwowym w samochodzie oraz wysoką sprawność silników elektrycznych wykorzystywanych do jego napędu [31]. Niemniej, problemem jest brak sieci tankowania

wodoru oraz stabilnych planów rozwojowych w tym zakresie [77]. Nie jest więc możliwe łatwe i powszechne wdrożenie takiej technologii układu napędowego na ten moment.

Z powyższych porównań wyłania się wniosek, że analizując kwestie sprawności w wymiarze uwzględniającym nie tylko sprawność konwersji energii w samochodzie, ale również proces jej pozyskiwania oraz emisję CO₂ z całego cyklu życia produktu, należy przyjąć, że w przypadku niniejszej pracy, realizowanej w Polsce, korzystnym kierunkiem są rozwiązania pomostowe w postaci hybrydowych układów napędowych. Samochody wykorzystujące rozwiązania z napędem elektrycznym i magazynem energii, tj. BEV nie są w tym przypadku optymalnym rozwiązaniem.

W tym miejscu sens rozwiązań hybrydowych jako rozwiązań pomostowych jest tym większy, ponieważ zapewniają one modułowość i możliwość zastosowania również innych komponentów elektrycznych w samochodzie o wyższym napięciu zasilania niż 12 V. W szczególności interesującym rozwiązaniem może być dodatkowy kompresor napędzany elektrycznie w układzie powietrza doładowanego lub turbosprężarka, która jest wspomagana silnikiem elektrycznym [71, 78]. Zastosowanie tych elementów wpływa na mniejszą bezwładność układu powietrza doładowanego w przejściowych stanach pracy silnika spalinowego, tj. pozwala ograniczyć zjawisko opóźnienia w reakcji turbosprężarki [71, 78]. Jest to szczególnie interesujące w przypadku rajdów, ponieważ opóźnienie w działaniu turbosprężarki jest minimalizowane na ten moment poprzez system ALS (ang. Anti-Lag System), który zakłada dodatkowe dawkowanie paliwa. Zastąpienie, nawet częściowe, dodatkowego dawkowania paliwa systemu ALS, miałyby więc jednoznacznie pozytywny wpływ na zużycie paliwa samochodu rajdowego, a w rezultacie również na emisję substancji szkodliwych.

1.5 Cel, zakres oraz tezy pracy

Niniejsza praca ma na celu stworzenie alternatywnego układu napędowego, który pozytywnie wpłynie na parametry energetyczne silnika spalinowego i w rezultacie poprawi dynamikę samochodu rajdowego. Celem jest również zmniejszenie negatywnego wpływu na otoczenie samochodów rajdowych poprzez obniżenie zużycia paliwa i emisji substancji szkodliwych. Nie bez znaczenia jest również, aby opracowany układ napędowy był przystępny kosztowo i możliwe kompatybilny z istniejącymi już samochodami. W rezultacie popularyzacja tego typu układów napędowych w rajdach powinna być możliwie szybka. Nie należy również zapominać, że rywalizacja sportowa

wymaga, aby kolejne generacje samochodów rajdowych były szybsze od swoich poprzedników. W innym przypadku zastosowanie technologii, która nie gwarantuje przewagi sportowej nad aktualnymi samochodami rajdowymi będzie dyskusyjne i najprawdopodobniej spotka się z niechęcią zawodników.

1.5.1 Poniżej określono zakres przedmiotowy pracy:

- Analiza dostępnych na rynku rozwiązań alternatywnych układów napędowych samochodów osobowych.
- Wybór rozwiązania alternatywnego układu napędowego.
- Symulacje numeryczne z wykorzystaniem stworzonego modelu.
- Badania eksperymentalne alternatywnego układu napędowego i samochodu rajdowego.
- Określenie procedur bezpiecznego użytkowania układu.
- Propozycje zmian przepisów FIA, tak aby możliwe było wdrożenie badanego układu.
- Kwestia dopuszczenia do ruchu drogowego samochodu rajdowego.
- Podsumowanie i wnioski.

1.5.2 Postawiono następującą tezę pracy:

Biorąc pod uwagę dostępne na rynku alternatywne rozwiązania napędowe stosowane w samochodach osobowych, istnieje możliwość selekcji a następnie adaptacji wybranych elementów tych układów w samochodzie rajdowym grupy Rally3. Zastosowanie tych elementów poprawi dynamikę jazdy takiego samochodu, spowoduje obniżenie zużycia paliwa oraz emisji substancji szkodliwych przy zachowaniu wymagań regulaminowych FIA. W efekcie powstanie nowe rozwiązanie pomostowe pomiędzy obecnie stosowanymi napędami spalinowymi w samochodach grupy Rally3 a hybrydowymi układami napędowymi, które są obecnie stosowane w samochodach grupy Rally1. Będzie to rozwiązanie atrakcyjne kosztowo i możliwe do montażu w istniejących już samochodach rajdowych grupy Rally3, a tym samym pozwalające na popularyzację tego rozwiązania w rajdach.

2. Wybór alternatywnego układu napędowego z wykorzystaniem analizy wielokryterialnej

Aby dokonać wyboru optymalnego pod względem technicznym oraz kosztowym rozwiązania alternatywnego układu napędowego do zastosowania w samochodzie rajdowym, wykorzystano analizę wielokryterialną. Analizę podzielono na następujące części:

- zdefiniowanie problemu i celów analizy,
- identyfikacja rozwiązań alternatywnych,
- określenie kryteriów oceny,
- ocena alternatyw w oparciu o kryteria,
- agregacja wyników,
- analiza wyników, decyzje i wnioski końcowe.

2.1 Zdefiniowanie problemu i celu analizy

Celem analizy jest wybór konkretnego rozwiązania alternatywnego układu napędowego opartego o dostępne na rynku komponenty, który zostanie poddany dalszym rozważaniom. Wspomniane rozważania obejmą badania numeryczne i eksperymentalne, a w przypadku uzyskania pomyślnych wyników rozwiązanie zostanie wdrożone w sporcie samochodowym.

Analiza będzie polegała na porównaniu dostępnych na rynku motoryzacyjnym rozwiązań alternatywnych układów napędowych, które biorąc pod uwagę szereg założeń i ograniczeń są możliwe do zastosowania w samochodach rajdowych grupy Rally3. Określając przydatność każdej z technologii do rajdów, analizę rozpoczęto od oszacowania wpływu danego rozwiązania na osiągi samochodu rajdowego. Z uwagi na charakter wdrożenia, tj. rywalizację sportową, zastosowane rozwiązanie powinno pozytywnie wpływać na osiągnięte przez samochody rajdowe czasy na odcinkach specjalnych (OS).

Równie istotna jest dojrzałość technologii pod kątem jej zastosowania w rajdach samochodowych. Nie wszystkie technologie nadają się do wykorzystania w wymagającym środowisku sportów samochodowych, w szczególności biorąc pod uwagę, że muszą one konkurować z rozwijanymi przez dekady, dopracowanymi układami napędowymi wykorzystującymi silniki spalinowe. Niemniej ważne jest ograniczenie emisji substancji szkodliwych z samochodów rajdowych. Istotne jest, aby

rajdy były bardziej przyjazne środowisku naturalnemu, a przede wszystkim ograniczyły negatywny wpływ na zdrowie osób przebywających w pobliżu samochodów rajdowych.

Kolejnym czynnikiem koniecznym do wzięcia pod uwagę jest bezpieczeństwo, ponieważ wprowadzenie nowej technologii nie powinno powodować większego zagrożenia dla zawodników, obsługi samochodu, organizatora rajdu, czy też kibiców niż obecnie stosowana technologia.

Istotną składową jest również opłacalność kosztowa w porównaniu do uzyskanego efektu. Tę kwestię należy mieć na uwadze, zwłaszcza że FIA określa maksymalną cenę sprzedaży samochodu grupy Rally3.

Przeanalizować należy również dostępność wybranych technologii na rynku samochodów seryjnych. Spowodowane jest to wymienionym już wcześniej faktem, że samochody w rajdach od początku bazowały na samochodach produkowanych seryjnie. Od tej reguły istniały wyjątki w postaci samochodów produkowanych w małych seriach w celu wykorzystania ich wyłącznie w sporcie samochodowym, jak m.in. Grupa IV, B, czy w ostatnich latach Rally1. Celem niniejszego doktoratu jest jednak wdrożenie alternatywnego układu napędowego do samochodów mniej zaawansowanej grupy FIA, tj. Rally3, powstających z samochodów produkowanych seryjnie. Ponadto wybrany samochód musi być segmentu B lub J ze względu na to, że właśnie takie samochody są lub będą wykorzystywane jako bazowe do samochodów grupy Rally3. W przeszłości jako samochód bazowy wykorzystywano również samochody segmentu A, jednakże ich ograniczona dostępność na rynku powoduje, że nie są one już stosowane w rajdach. Natomiast samochody segmentu S służą jako bazowe dla grupy R-GT, która nie jest przedmiotem niniejszej pracy. Wymóg dostępności technologii w samochodach produkowanych seryjnie narzuca również kształt obecnych przepisów technicznych FIA, które w większości wymuszają zastosowanie części z takich właśnie samochodów, choć niekoniecznie z tego samego modelu samochodu. Ma to na celu ograniczenie stopnia zaawansowania technologicznego tych komponentów, a w rezultacie również ich kosztów. Możliwość zastosowania części z innych modeli samochodów powoduje, że wdrożenie technologii mogłoby nastąpić, pomimo braku jej występowania we wspomnianych wcześniej segmentach samochodów. Ostatnim z aspektów, który należy rozważyć podczas przeprowadzania analizy jest kompatybilność wybranego układu z istniejącymi już samochodami rajdowymi. Nie jest to najważniejsze kryterium, natomiast możliwość łatwego zamontowania wybranego układu napędowego

do wyprodukowanych już samochodów rajdowych, potencjalnie pozwoliłaby na o wiele szybszą adaptację i rozpowszechnienie technologii alternatywnego układu napędowego.

2.2 Identyfikacja rozwiązań alternatywnych

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu techniki, której szczegóły zaprezentowano w rozdziale 1 zidentyfikowano szeroką gamę rozwiązań alternatywnych układów napędowych w samochodach produkowanych seryjnie. Przy czym ograniczenia w wyborze samochodu, które sprowadzają się do segmentu B i J, znacznie zawężają potencjalny wybór. Wybrane segmenty samochodów reprezentują tę część rynku samochodowego, która charakteryzuje się niższymi kosztami zakupu i w efekcie również mniejszą możliwością wyboru technologii układów napędowych. Wspomniane segmenty samochodów są jednak zbieżne z ogólną koncepcją FIA na samochody grupy Rally3. Ich cena maksymalna została określona regulaminowo na poziomie 131 141 EUR (bez podatków i kosztów rejestracji, stan na 29.09.2024 r.). Dla porównania maksymalna cena samochodu Rally2 wynosi 260 766 EUR (bez podatków i kosztów rejestracji, stan na 29.09.2024 r.). Jak widać samochód rajdowy grupy Rally3, będący również obecnie podstawowym samochodem rajdowym 4WD jest prawie dwukrotnie tańszy niż samochód grupy Rally2. Mając to na uwadze, wdrażany alternatywny układ napędowy musi być również rozsądny kosztowo, aby nie podnieść znacznie ceny samochodu grupy Rally3.

Do porównania należy przyjąć modele hybrydowe w dostępnych wariantach, ponieważ samochody BEV posiadają ograniczenia, które utrudniają ich adaptację w rajdach. Przede wszystkim mocno utrudniona jest konwersja takiego samochodu na napęd 4WD, dlatego są one obecnie klasyfikowane w formie praktycznie seryjnych samochodów bez modyfikacji w grupie E-Rally5 (które nie są konkurencyjne względem grupy Rally3, a nawet Rally5). BEV zostały ujęte w analizie w celach porównawczych.

W porównaniu nie wzięto również pod uwagę FCEV, ponieważ ta technologia nie jest jeszcze wystarczająco popularna i brak jest na rynku samochodu segmentu B, który byłby w nią wyposażony. Zastosowanie układu napędowego FCEV z innego modelu samochodu w samochodzie rajdowym jest bardzo utrudnione ze względu na wymaganą znaczną ingerencję w samochód, aby zintegrować ten typ układu napędowego. Jest to sytuacja analogiczna do BEV, a nawet bardziej skomplikowana, biorąc pod uwagę wymogi bezpieczeństwa odnoszące się do sposobu przechowywania i tankowania

wodoru. Dodatkowym ograniczeniem jest brak rozwiniętej sieci stacji tankowania wodorem.

Pewne pole manewru przy wyborze technologii stwarza wspomniana już możliwość wykorzystania części pochodzących z produkcji seryjnej, ale z innego modelu samochodu niż ten w którym mają być one zastosowane. Poszerza to katalog ewentualnych, możliwych do zastosowania rozwiązań.

W pierwszej kolejności dokonano porównania podstawowych parametrów technicznych każdego z analizowanych samochodów pod względem wykorzystywanego obecnie samochodu napędzanego silnikiem spalinowym traktując go jako rajdowy samochód referencyjny.

- **Segment B (małe auta)**

Samochód referencyjny bazowy wyposażony jest w silnik spalinowy i został opisany w tabeli 11. Jest to model, który jest obecnie wykorzystywany przez firmy Ford Motor Company i M-Sport Poland sp. z o.o. jako bazowy do homologacji wersji rajdowej w grupie Rally3. Koszt samochodu przedstawiono z 2023 roku, tj. ostatniego roku, w którym Ford Fiesta ST był oferowany w sprzedaży.

Tabela 11 Specyfikacja samochodu referencyjnego bazowego dla segmentu B

Marka i model	Ford Fiesta ST
Silnik	1.5-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem
Moc	151 kW
Napęd	FWD (na oś przednią)
Masa	1 285 kg
Współczynnik masy do mocy	8,53 kg/kW
Koszt samochodu (2023)	118 600 zł

Do porównania modelu referencyjnego wybrano następujące modele segmentu B zaprezentowane w tabeli 12, tak aby każdy z nich reprezentował inną technologię alternatywnego układu napędowego.

Tabela 12 Porównanie wybranych modeli segmentu B wyposażonych w alternatywne układy napędowe

Marka i model pojazdu	Opel Corsa 1,2 Turbo Hybrid	Renault Clio E-Tech full hybrid 145	Opel Corsa Electric 100 kW 50 kWh
Technologia układu napędowego	mHEV	HEV	BEV
Silnik	1,2-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem	1,6-litrowy wolnossący oraz silnik elektryczny	Elektryczny
Moc	100 kW	Silnik spalinowy: 69 kW, BISG i silnik elektryczny: 14,17 kW + 36 kW	100 kW
Napięcie w instalacji elektrycznej	48 V	230 V	230 V
Napęd	2WD (na oś przednią)	2WD (na oś przednią).	2WD (na oś przednią)
Masa	1 298 kg	1 238 kg	1 548 kg
Współczynnik masy do mocy	12,97 kg/kW	11,60 kg/kW	15,48 kg/kW
Koszt samochodu	116 100 zł	119 300 zł	161 900 zł

- **Segment J (terenowe/SUV)**

Samochód referencyjny bazowy wyposażony w silnik spalinowy, opisany został w tabeli 13. Jest to model, który potencjalnie może być wykorzystywany jako bazowy do homologacji wersji rajdowej w grupie FIA Rally3, biorąc pod uwagę aktualne przepisy FIA.

Tabela 13 Specyfikacja samochodu referencyjnego bazowego dla segmentu J

Marka i model pojazdu	Ford Puma ST
Silnik	1,5-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem.
Moc	205 KM.
Napęd	FWD (na oś przednią).
Masa	1 362 kg.
Współczynnik masy do mocy	9,03 kg/KM
Koszt samochodu	125 000 zł

Do porównania modelu referencyjnego wybrano następujące modele segmentu J zaprezentowane w tabeli 14, tak aby każdy z nich reprezentował inną technologię alternatywnego układu napędowego.

Tabela 14 Porównanie wybranych modeli segmentu J wyposażonych w alternatywne układy napędowe

Marka i model pojazdu	Opel Mokka 1.2 Turbo Hybrid	Renault Captur E-Tech full hybrid 145	Opel Mokka Electric 100 kW 50 kWh
Technologia układu napędowego	mHEV	HEV	BEV
Silnik	1.2-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem	1.6-litrowy wolnossący oraz silnik elektryczny	Elektryczny
Moc	100 kW	Silnik spalinowy: 69 kW, BISG i silnik elektryczny: 14,17 kW + 36 kW	100 kW
Napięcie w instalacji elektrycznej	48 V	230 V	230 V
Napęd	2WD (na oś przednią)	2WD (na oś przednią)	2WD (na oś przednią)
Masa	1 364 kg	1 370 kg	1 598 kg
Współczynnik masy do mocy	13,63 kg/KM	12,85 kg/KM	15,98 kg/KM
Koszt samochodu	129 900 zł	131 800 zł	170 000 zł

Jak można zauważyć w powyższym porównaniu, zarówno w przypadku segmentu B jak i J, technologia BEV okazuje się nie być konkurencyjna w porównaniu do samochodów hybrydowych. Biorąc pod uwagę zarówno współczynnik masy do mocy, który jest kluczowy przy określaniu osiągnięć samochodu oraz masę samochodu, która w sporcie samochodowym powinna być możliwie najniższa, okazuje się, że BEV jest najmniej korzystnym rozwiązaniem. Również cena zakupu BEV jest o około 30-40 % wyższa niż hybrydowych konkurentów. Jednakże, jak już zostało wspomniane, BEV zostaną wymienione w analizie wielokryterialnej wyłącznie w celu porównawczym. Analizie należy więc poddać przede wszystkim zaproponowane modele hybrydowe.

Do porównania przyjęto modele samochodów wykorzystujące dwie z technologii hybrydowych, tj. mHEV i HEV. HEV jest rzadko stosowaną technologią w samochodach segmentu B, niemniej Renault oferuje model Clio z takim rozwiązaniem. O ile porównanie danych technicznych wypada na korzyść Renault Clio i Captur, o tyle dalsza analiza koncepcji układu napędowego, praktycznie przekreśla możliwość zastosowania takiego modelu jako bazowego do budowy samochodu rajdowego. Przede wszystkim problemem jest brak turbodoładowania silnika spalinowego w tym modelu, co powoduje, że jego modyfikacja do parametrów osiąganych przez inne samochody rajdowe w klasie bardzo utrudniona. W myśl obowiązujących aktualnie, restrykcyjnych przepisów FIA nie ma możliwości konwersji silnika wolnossącego na turbodoładowany w grupie Rally3.

Ponadto, układ hybrydowy zastosowany w Clio wykorzystuje dwa silniki elektryczne. Zastosowanie wykorzystanego w układzie mHEV urządzenia BISG (ang. Belt-Integrated Starter Generator), wydaje się być stosunkowo łatwe do przeniesienia do specyfikacji rajdowej. BISG jest urządzeniem, które zastępuje alternator i może spełniać zarówno funkcję ładowania baterii, odzysku energii podczas hamowania samochodu jak i napędową [79]. Ponieważ urządzenie połączone jest z układem napędowym samochodu poprzez pasek osprzętu silnika spalinowego, to jego integracja z istniejącymi jednostkami napędowymi jest relatywnie nieskomplikowana. Inaczej sytuacja prezentuje się w przypadku drugiego silnika elektrycznego, który został zabudowany w skrzyni biegów i nie mógłby zostać zastosowany przy jej wymianie na sportową skrzynię sekwencyjną o zębach prostych. Ewentualna integracja tego silnika elektrycznego ze sportową skrzynią biegów wymagałaby rozwijania nowej skrzyni biegów, co stanowiłoby dużą przeszkodę w tym wdrożeniu.

Jeżeli chodzi o samochody segmentu J, wnioski dotyczące technologii układu napędowego są analogiczne jak w przypadku samochodów segmentu B. Natomiast podwyższona masa tych samochodów i gorszy współczynnik masy do mocy sprawiają, że nie są one preferowane do użycia jako bazowe do budowy samochodu rajdowego. Może to jednak zostać wymuszone przez sytuację na rynku samochodów produkowanych seryjnie, ponieważ samochody segmentu B są w przypadku niektórych producentów, zastępowane tymi z segmentu J.

W przypadku technologii HEV i mHEV pojawia się wspomniana już dodatkowa korzyść, ponieważ możliwe jest wyposażeniu samochodu w instalację elektryczną napięciu 48 V i więcej. Mając to na uwadze, przeanalizowano również dostępne technologie wspomagające układ doładowania silnika spalinowego, ponieważ ich zastosowanie może mieć pozytywny wpływ zarówno na parametry energetyczne silnika spalinowego, w szczególności w stanach przejściowych, jak i ograniczenie zużycia paliwa oraz emisji substancji szkodliwych. Ponieważ takie rozwiązania nie są obecnie stosowane w samochodach segmentu B i J, to jedyną możliwością jest zastosowanie takiego rozwiązania z innych modeli samochodów produkowanych seryjnie. W tabeli 15 przedstawiono modele samochodów wyposażonych w elektrycznie wspomaganą turbosprężarkę lub elektrycznie napędzany kompresor.

Tabela 15 Modele samochodów, w których zastosowano wspomagające urządzenia elektryczne w układzie powietrza doładowanego

Marka i model samochodu	Audi SQ7 4.0 TDI	Mercedes E53 AMG W213 EQ Boost	Mercedes-AMG C 63 S E PERFORMANCE
Technologia układu napędowego	mHEV	mHEV	PHEV
Silnik	3,0-litrowy turbodoładowany silnik wysokoprężny z bezpośrednim wtryskiem	3,0-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem oraz silnik elektryczny	2,0-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem oraz silnik elektryczny
Moc	320 kW	Silnik spalinowy: 320 kW, BISG i silnik elektryczny: 16 kW	Silnik spalinowy: 350 kW BISG i silnik elektryczny: 150 kW
Technologia elektryczna w układzie powietrza doładowanego	Kompresor elektryczny	Kompresor elektryczny	Wspomagana elektrycznie turbosprężarka
Napięcie w instalacji elektrycznej	48 V	48 V	12 V
Napęd	4WD (na wszystkie koła)	4WD (na wszystkie koła)	4WD (na wszystkie koła)
Masa	2 278 kg	1 940 kg	2 111 kg
Współczynnik masy do mocy	4,0 kg/kW	3,0 kg/kW	3,1 kg/kW
Koszt samochodu	450 000 zł	450 000 zł	650 000 zł

W przypadku przedstawionego porównania nie należy kierować się wyłącznie ceną samochodu wyposażonego w technologię elektrycznego wspomaganie w układzie powietrza doładowanego, ale skupić się na cenie samego urządzenia. Jak zostało wspomniane, przepisy FIA już obecnie przewidują możliwość zastosowania rozwiązań z innych modeli samochodów produkowanych seryjnie. Stanowi to bazę do dyskusji nt. rozszerzenia tych przepisów podczas wdrażania alternatywnego układu napędowego w samochodzie grupy Rally3.

Powiązanie urządzenia elektrycznego w układzie napędowym samochodu oraz drugiego pod postacią elektrycznego kompresora zainstalowanego w układzie powietrza doładowanego silnika spalinowego stwarza możliwość poprawy charakterystyki momentu obrotowego silnika spalinowego samochodu rajdowego. Jest to szczególnie interesujące pod względem uzyskania efektu synergii dwóch rozwiązań urządzeń elektrycznych.

2.3 Określenie kryteriów oceny

Na podstawie przyjętych założeń dotyczących alternatywnego układu napędowego, będącego przedmiotem niniejszej pracy, przyjęto następujące kryteria oceny:

- wpływ na podwyższenie osiągnięć samochodu w rajdach samochodowych – K1,
- wpływ na redukcję emisji substancji szkodliwych i ograniczenie zużycia paliwa – K2,
- możliwość zapewnienia bezpiecznego użytkowania w rajdach samochodowych – K3,
- koszt układu – K4,
- dostępność na rynku seryjnych samochodów – K5,
- kompatybilność z istniejącymi samochodami rajdowymi – K6.

Wagę kryteriów zdefiniowano jako poniżej:

- 3 punkty: kryteria kluczowe, które są dominujące w podjęciu decyzji,
- 2 punkty: kryteria istotne, które mają znaczący wpływ na podjęcie decyzji,
- 1 punkt: kryteria pomocnicze, które w mniejszym stopniu niż inne mają wpływ na podjęcie decyzji.

Następnie poszczególnym kryteriom nadano wagę, jak określono w tabeli 16, mając na uwadze nadane priorytety dla projektu samochodu rajdowego z alternatywnym układem napędowym.

Tabela 16 Waga poszczególnych kryteriów

Kryterium	3	2	1
K1	X		
K2	X		
K3	X		
K4	X		
K5		X	
K6			X

Kryteria K1, K2, K3 i K4 uznano za kryteria kluczowe, ponieważ zarówno wpływ wybranego rozwiązania na poprawę osiągnięć samochodów rajdowych oraz redukcję emitowanych przez te pojazdy substancji szkodliwych, jak również zapewnienie bezpiecznego użytkowania wybranego układu są dominujące przy dokonywaniu wyboru. Równie istotne są również koszty zastosowanego układu, ze względu na określoną w przepisach FIA wspomnianą wcześniej cenę maksymalną samochodu grupy Rally3. Powyższe wybory wynikają z przyjętych założeń projektu, który zakłada wdrożenie dostępnego, alternatywnego układu napędowego i wpłynie pozytywnie zarówno na osiągnięcia sportowe samochodu rajdowego jak i aspekty ochrony środowiska. Jednocześnie wdrażany układ nie może wpływać negatywnie na poziom bezpieczeństwa w rajdach samochodowych, ponieważ w tak ekstremalnym sporcie poziom

bezpieczeństwa musi zostać zachowany na najwyższym możliwym poziomie. Jako kryterium istotne zdefiniowano kryterium K5, tj. dostępność danego rozwiązania na rynku seryjnych samochodów. Jest to istotne z wymienionego wcześniej powodu, tj. przepisów FIA zakładających wykorzystanie rozwiązań z samochodów produkowanych seryjnie. Kryterium K6, tj. kompatybilność danej technologii z istniejącymi samochodami rajdowymi jest kryterium pomocniczym, ponieważ jego spełnienie pozwoliłoby na znacznie szybsze wdrożenie technologii alternatywnych układów napędowych do samochodów rajdowych.

Aby przeprowadzić ocenę, określono trzystopniową skalę jak poniżej:

- 3 punkty: wysoka ocena, kryterium jest spełnione w bardzo dużym stopniu, wynik jest bardzo korzystny i wydaje się zbliżony do optymalnego w analizowanym zakresie możliwych rozwiązań technologicznych,
- 2 punkty: średnia ocena, kryterium jest spełnione w stopniu umiarkowanym, wynik jest zadowalający, wyraźnie różny od optymalnego,
- 1 punkt: niska ocena, kryterium jest spełnione w minimalnym stopniu lub nie spełnia oczekiwań.

Wyniki oceny zaprezentowano w tabeli 17.

Tabela 17 Oceny poszczególnych rozwiązań

Kryterium	BEV	HEV	mHEV
K1	1	3	2
K2	1	3	2
K3	1	2	3
K4	1	2	3
K5	3	3	3
K6	1	2	3

Poniżej przedstawiono podsumowanie i uzasadnienie wyniku przyznanych ocen dla poszczególnych rozwiązań wedle określonych kryteriów:

- Wpływ na podwyższenie osiągnięć samochodu w rajdach samochodowych - K1: technologia BEV nie jest obecnie konkurencyjna względem samochodów rajdowych wyposażonych w silniki spalinowe lub w układy hybrydowe. Zostało to już przedstawione w porównaniu grup samochodów rajdowych FIA, że samochody elektryczne grupy E-Rally5 są cięższe o około 50 % a ich współczynniki masy są niższe o około 76 %. Samochody te są przy tym droższe od ich wyposażonych w silniki spalinowe odpowiedników z grupy Rally5. Ponadto zasięg samochodów

E-Rally5 nie jest wystarczający, aby pokonać zakładany dystans rajdu na poziomie Rajdowych Mistrzostw Europy FIA lub Rajdowych Mistrzostw Świata FIA. Wspomniane aspekty powodują, że technologia BEV wykorzystywana obecnie w samochodach produkowanych seryjnie, jest praktycznie bezużyteczna w rajdach. Z kolei stworzenie od podstaw samochodu napędzanego elektrycznie wyłącznie w celu rywalizacji w rajdach samochodowych nie wpisywałoby się w założenia kosztowe projektu. Ponadto, nie wpisywałoby się w konieczność powiązania technologii z samochodami produkowanymi seryjnie. Z tych powodów technologia BEV została oceniona jako niespełniająca oczekiwań określonych w projekcie. W przypadku rozwiązań hybrydowych (spalinowo-elektrycznych), warunek pozytywnego wpływu na osiągi samochodu można uznać za spełniony, biorąc pod uwagę zastosowanie z powodzeniem układu hybrydowego PHEV w samochodzie grupy Rally1. Analogicznie więc układ HEV powinien spełnić swoje zadanie w samochodzie rajdowym. W przypadku mHEV, należy stwierdzić, że układ ten spełnia kryterium poprawy osiągow samochodu rajdowego, jednakże z uwagi na charakterystykę takich układów, czyli biorąc pod uwagę ich ograniczoną moc, na pewno w mniejszym stopniu niż układy HEV.

- Wpływ na redukcję emisji substancji szkodliwych i ograniczenie zużycia paliwa – K2: odnosząc się do wprowadzenia w niniejszej pracy, można stwierdzić, że w przypadku Polski rozwiązanie BEV nie jest korzystne (w skali całego cyklu życia produktu) pod kątem ochrony środowiska naturalnego i biorąc pod uwagę istniejący miks energetyczny. Z tego powodu technologia ta ponownie została oceniona jako niespełniająca oczekiwań. Biorąc pod uwagę rozwiązania HEV, przedstawione we wprowadzeniu można stwierdzić, że najlepiej wypełniają one rolę ograniczenia wpływu na środowisko naturalne, zarówno biorąc pod uwagę emisję podczas eksploatacji, jak i porównując cały cykl życia samochodu wyposażonego w taką technologię do technologii wykorzystującej wyłącznie silnik spalinowy. Analogicznie jak w przypadku kryterium K1, technologia mHEV pozwala na wspomaganie silnika spalinowego w stanach przejściowych, natomiast na pewno nie w takim stopniu jak w przypadku technologii HEV ze względu na ograniczone moce tych układów.
- Możliwość zapewnienia bezpiecznego użytkowania w rajdach samochodowych – K3: w kontekście zapewnienia możliwości bezpiecznego użytkowania układu w rajdach, technologia BEV ponownie nie jest korzystna. Ma to związek nie tylko z wysokim

napięciem stosowanym w układach zasilania, jak również z gabarytami baterii trakcyjnej, która zawiera w sobie dużą ilość zakumulowanej energii elektrycznej, co zwiększa ryzyko porażenia prądem [80]. Wynikiem tego jest duże ryzyko pożaru i narażenia na wysoką temperaturę, w szczególności podczas przegrzania baterii trakcyjnej lub wypadku takiego samochodu [80], co w rajdach nie jest rzadkim zjawiskiem. Układy HEV wykorzystują wysokie napięcia, tj. powyżej 60 V DC. Powoduje to podobne zagrożenia jak w przypadku technologii BEV, jedynie z uwagi na mniejsze gabaryty baterii trakcyjnej, ilość zakumulowanej energii jest w konsekwencji mniejsza i w rezultacie zagrożenia z tym związane są również niższe. Najbardziej korzystna w przypadku tego kryterium okazuje się technologia mHEV, która wykorzystuje tzw. napięcie bezpieczne, tj. poniżej 60 V DC. Również ograniczone gabaryty baterii trakcyjnej powodują mniejszą ilość przechowywanej energii i w rezultacie niższe ryzyko wynikające z jego potencjalnego uszkodzenia w wyniku wypadku.

- Koszt układu – K4: tym razem znów technologia BEV nie jest korzystnym wyborem, głównym kosztem w przypadku tej technologii jest bateria trakcyjna o dużej pojemności [27, 76]. Mając na uwadze stopień skomplikowania i wymagane pojemności baterii w układach PHEV i HEV, to koszt tych technologii jest zadowalający. Jeżeli chodzi o technologię mHEV, to ze względu na niższe napięcie zasilania oraz mniejsze pojemności baterii trakcyjnej jest to zdecydowanie najbardziej korzystne kosztowo rozwiązanie.
- Dostępność na rynku seryjnych samochodów – K5: w tym przypadku każda z ocenianych technologii uzyskała najwyższą ocenę. Zarówno BEV, HEV i mHEV są spopularyzowane wśród wielu różnych producentów i w wielu różnych modelach samochodów produkowanych seryjnie [37].
- Kompatybilność z istniejącymi samochodami rajdowymi – K6: kolejny raz technologia BEV uzyskuje najniższą ocenę, biorąc pod uwagę, że zabudowanie silników elektrycznych wysokiej mocy oraz baterii trakcyjnej dużej pojemności w istniejącym samochodzie nie miałyby większego sensu. Stopień ingerencji w istniejący samochód, który został zaprojektowany i wyprodukowany jako samochód z silnikiem spalinowym byłby zbyt duży. W przypadku HEV przeróbka jest możliwa, ale również trudna, biorąc pod uwagę konieczność zastosowania silnika elektrycznego o wciąż stosunkowo wysokich parametrach. W tych układach hybrydowych silniki elektryczne zabudowywane są zazwyczaj w skrzyni biegów lub

na tylnej osi, w zależności od architektury układu [48]. W przypadku samochodu rajdowego powodowałyby to konieczność zaprojektowania od nowa skrzyni biegów, co wiązałoby się z dużymi nakładami zarówno po stronie producentów samochodów jak i potencjalnych właścicieli istniejących samochodów. Również bateria trakcyjna w tych układach wciąż ma stosunkowo dużą pojemność i jej montaż wiązałby się ze znaczną ingerencją w nadwozie samochodu, aby zamontować ją w sposób solidny i bezpieczny. W przypadku technologii mHEV jej kompatybilność z istniejącymi samochodami wynika już z jej założeń. Tak naprawdę większość modeli samochodów, które wykorzystują technologię mHEV jest zmodyfikowanymi w niewielkim stopniu odpowiednikami samochodów, które posiadają układ napędowy z silnikiem spalinowym. To powoduje, że łatwość implementacji jest najwyższa spośród ocenianych technologii. BISG, który jest dołączany do układu poprzez pasek osprzętu silnika spalinowego, to bardzo przyjazne w montażu w istniejącym modelu samochodu urządzenie.

2.4 Agregacja wyników analizy

Po uwzględnieniu ocen poszczególnych rozwiązań oraz wag poszczególnych kryteriów uzyskano wyniki oceny, które zostały przedstawione w tabeli 18.

Tabela 18 Wyniki oceny poszczególnych rozwiązań

	BEV	HEV	mHEV
K1	3	9	6
K2	3	9	6
K3	3	6	9
K4	3	6	9
K5	6	6	6
K6	1	2	3
Suma:	19	38	39

Jak można zauważyć w wynikach przeprowadzonej analizy wielokryterialnej, technologia BEV nie jest obecnie odpowiednia do wykorzystania w samochodach rajdowych. Odpowiednie są za to technologie hybrydowe, tj. HEV i mHEV, które uzyskały odpowiednio dwukrotnie i ponad dwukrotnie lepszy wynik niż BEV.

Obie z technologii hybrydowych (spalinowo-elektrycznych) uzyskały podobne wyniki, co świadczy o zasadności wdrożenia takiej technologii w rajdach. W przypadku wybranego rozwiązania, nie wyklucza się możliwości ładowania baterii trakcyjnej

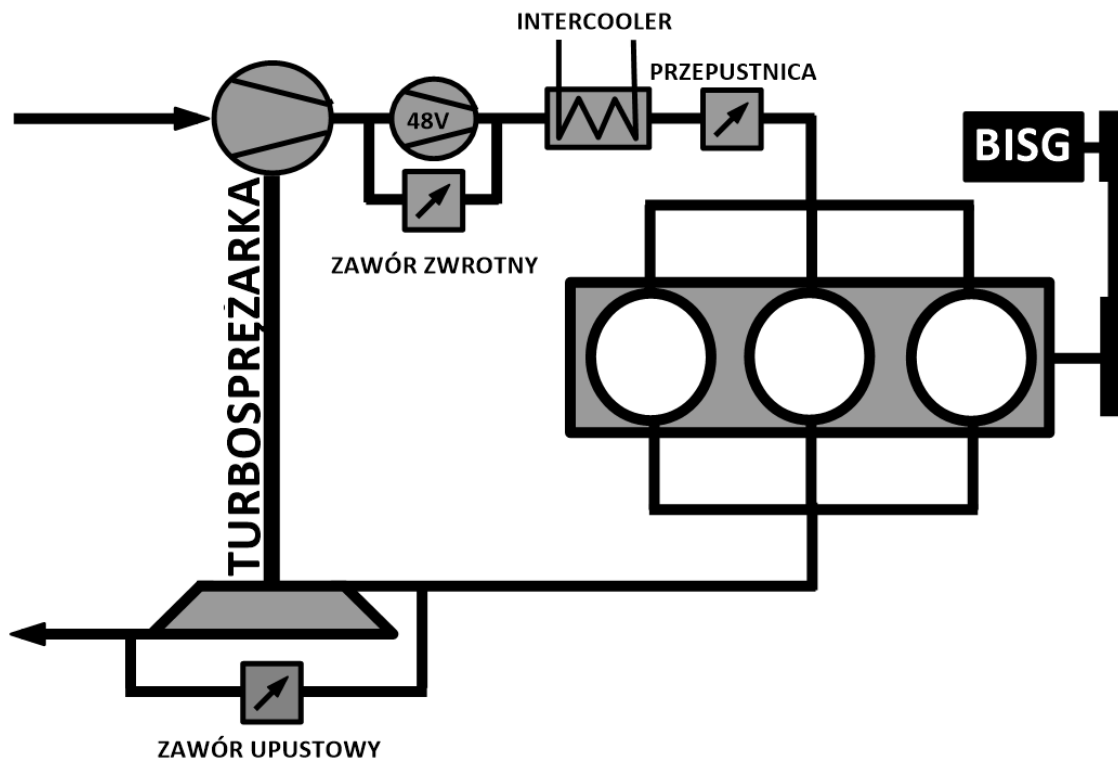
w parkach serwisowych rajdu po to, aby zwiększyć skuteczność działania układu hybrydowego.

2.5 Podsumowanie wyników i podjęcie decyzji

Ostatecznie, biorąc pod uwagę wszystkie wady i zalety porównywanych rozwiązań, wybrano technologię mHEV. Pomimo uzyskania przez tę technologię niższych wyników za wpływ na osiągi samochodu, emisję substancji szkodliwych oraz zużycie paliwa, to pod kątem bezpieczeństwa, kosztu i kompatybilności ma ona dużą przewagę nad pozostałymi. Z tego powodu technologia mHEV jest właściwym wyborem pod kątem dalszych prac pod kątem wdrożenia jej do samochodów rajdowych grupy Rally3. Możliwość doposażenia w nią zarówno nowych jak i istniejących samochodów rajdowych jest dużą zaletą, która pozwoli potencjalnie na szybką popularyzację wybranego układu hybrydowego.

Na tym etapie określono również komponenty, które weszły w skład wybranego, hybrydowego układu napędowego. Chcąc maksymalnie wykorzystać potencjał układu mHEV, zdecydowano się na jego rozbudowę o kompresor elektryczny w układzie powietrza doładowanego. Zakłada się, że takie rozwiązanie przyniesie potencjalne korzyści związane z ograniczeniem działania lub nawet likwidacją systemu ALS (system podtrzymujący prędkość obrotową turbosprężarki, ang. Anti-Lag System), który obecnie realizowany jest poprzez dodatkowe dawki paliwa. Jest to rozwiązanie, które nie jest efektywne pod kątem zużycia paliwa i emisji substancji szkodliwych. Skraca również

żywołność turbosprężarki, zwiększa naprężenia termiczne oraz podwyższa temperaturę pracy silnika. Schemat wybranego układu hybrydowego zaprezentowano na rysunku 10.



Rysunek 10 Schemat wybranego układu hybrydowego

Podstawowe parametry komponentów składowych proponowanego systemu podsumowano w tabeli 19

Tabela 19 Podstawowe parametry wybranego hybrydowego układu napędowego

Lp.	Urządzenie	Podstawowa charakterystyka techniczna	
1.	BISG	Producent	Ford Motor Company
		Pozycja w układzie napędowym	P0
		Napięcie zasilania	48 V
		Moc napędowa max.	10 kW
		Moc regeneracji max.	13 kW
		Stosowane w samochodzie	Ford Puma 1.0 EcoBoost Hybrid
		Cena zakupu	8 007,30 zł
2.	Kompresor elektryczny	Producent:	BorgWarner
		Napięcie znamionowe	48 V
		Moc maksymalna	5 kW
		Prędkość obrotowa max.	72 000 obr./min.
		Czas potrzebny na osiągnięcie 90% zadanych prędkości obrotowych	270 ms
		Spręż maksymalny	1,45
		Przepływ maksymalny	500 kg/h
		Stosowane w samochodzie	Mercedes E53 AMG W213 EQ Boost
		Cena zakupu	6 940,89 zł
3.	Bateria z przetwornicą DC-DC	Producent	Ford Motor Company
		Napięcie zasilania	48 V
		Pojemność	9,6 Ah
		Stosowane w samochodzie	Ford Transit 2.0 EcoBlue Hybrid
		Cena zakupu	8 880,00 zł

Wybrany system BISG zapewnia cztery podstawowe funkcjonalności opisane poniżej:

- rozruch silnika spalinowego,
- ładowanie baterii trakcyjnej 48 V, która z kolei za pomocą przetwornicy DC-DC utrzymuje również stały stopień naładowania baterii 12 V w samochodzie,
- odzyskiwanie energii w trakcie hamowania samochodu,
- wspomaganie silnika spalinowego.

W kolejnych częściach pracy zostanie przeanalizowany wpływ wybranego hybrydowego układu napędowego na parametry energetyczne silnika spalinowego oraz dynamiczne samochodu rajdowego Ford Fiesta ST Rally3 EVO.

3. Jednowymiarowe analizy numeryczne

Aby przeprowadzić analizę wstępną i zweryfikować celowość zastosowania wybranej koncepcji alternatywnego układu napędowego przed badaniami eksperymentalnymi, przystąpiono do stworzenia numerycznego modelu silnika spalinowego, odwzorowującego pracę silnika w samochodzie rajdowym Ford Fiesta ST Rally3.

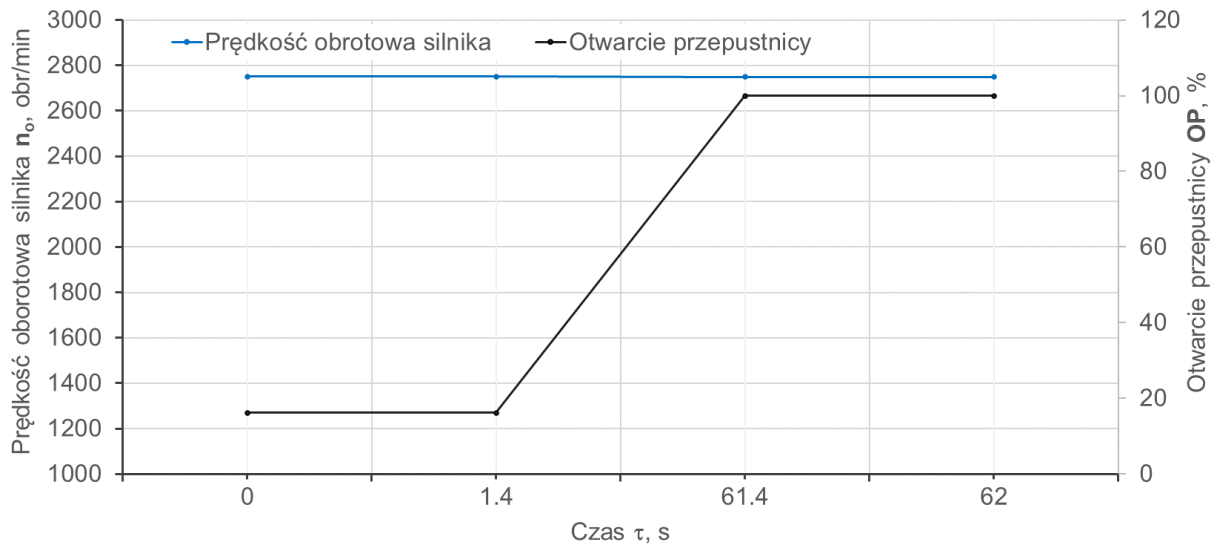
Do przeprowadzenia analizy wykorzystano program AVL CruiseM, który jest przeznaczony do przeprowadzania analiz numerycznych jedno lub zero-wymiarowych zarówno silników spalinowych, układów napędowych (włączając w to rozwiązania elektryczne) jak i całego pojazdu, ze szczególnym uwzględnieniem jego kinematyki i dynamiki. Zastosowanie tego narzędzia pozwoliło na przeanalizowanie wpływu dobranych urządzeń dodatkowych zarówno na parametry energetyczne silnika spalinowego, zarządzanie energią elektryczną w układzie 48 V, jak i dynamikę całego samochodu.

Celem analizy była weryfikacja postawionej tezy, że zastosowany alternatywny układ napędowy pozytywnie wpłynie na istotne parametry użytkowe samochodu. Ponadto zweryfikowano układ zarządzania energią elektryczną, dzięki czemu możliwe było potwierdzenie właściwego dopasowania parametrów wybranej baterii trakcyjnej o napięciu 48 V.

3.1 Stworzenie modelu w programie AVL CruiseM

Prace nad opracowywaniem modelu numerycznego rozpoczęto od przeprowadzania badań na hamowni silnikowej, które posłużyły do stworzenia i kalibracji tego modelu. Na początku dokonano pomiaru momentu obrotowego silnika spalinowego Forda Fiesty ST Rally3 na hamowni silnikowej w zakresie zmian prędkości obrotowej od 2750 do 7250 obr/min z krokiem co 250 obr/min wyznaczając charakterystyki prędkościowe.

Przebieg przykładowego cyklu dla prędkości obrotowej silnika wynoszącej 2750 obr/min zaprezentowano na rysunku 11.



Rysunek 11 Przykładowy cykl podczas badań na hamowni silnikowej

W trakcie badań dokonywano zmiany kąta otwarcia przepustnicy w całym dostępnym zakresie, dzięki czemu możliwe było zebranie charakterystyki dla kolejnych prędkości wału korbowego w zakresie zmian momentu obrotowego i w konsekwencji mocy silnika spalinowego. Zmiany kąta otwarcia przepustnicy dokonywano w powolny i jednostajny sposób, czas od jej pełnego zamknięcia do pełnego otwarcia wynosił 60 s. Dzięki temu zebrane kolejno punkty pomiarowe pracy silnika spalinowego można traktować jak dla stanu ustalonego. Wynika to z faktu, że każda istotna zmiana położenia przepustnicy zachodziła w czasie znacząco dłuższym, niż silnik spalinowy potrzebuje, aby dojść do stanu ustalonego.

Oprócz badań, które miały na celu wyznaczenie parametrów pracy silnika w stanie ustalonym, przeprowadzono również badania w stanach nieustalonych zgodnie z predefiniowanymi cyklami zmienności wybranych parametrów. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano parametry pracy silnika spalinowego oraz wybranych urządzeń jego osprzętu w zakresach prędkości obrotowej silnika jak określono powyżej. W szczególności określone zostały:

- wartości chwilowe momentu obrotowego silnika,
- prędkość obrotowa turbosprężarki,

- sygnał sterujący zaworem upustowym turbiny,
- temperatura powietrza pomiędzy turbosprężarką a chłodnicą powietrza doładowanego,
- ciśnienie powietrza pomiędzy turbosprężarką a chłodnicą powietrza doładowanego,
- temperatura powietrza pomiędzy chłodnicą powietrza doładowanego a przepustnicą,
- ciśnienie powietrza pomiędzy chłodnicą powietrza doładowanego a przepustnicą,
- temperatura powietrza w kolektorze dolotowym,
- ciśnienie powietrza w kolektorze dolotowym,
- temperatura w układzie wylotowym za turbosprężarką.

Zebrane dane posłużyły jako dane wejściowe do stworzenia modelu silnika za pomocą modułu w oprogramowaniu AVL CruiseM, tj. „Engine parametrization wizard”. Pozostałe z wymaganych danych wejściowych zostały wyznaczone lub założone. Wielkości, dla których nie było dostępnego pomiaru podczas badań na hamowni, zostały określone na podstawie literatury i doświadczenia inżynierskiego. Brak realizacji pomiaru niektórych wielkości wynikał między innymi z ograniczeń technicznych stanowiska badawczego. Przykładowo, pomiarom nie podlegało przeciwcisnienie w rurze wydechowej, natomiast w przypadku większości układów konwencjonalnych wartość ta jest bliska ciśnieniu otoczenia. Wartość tego ciśnienia wygenerowano poprzez dodanie do ciśnienia atmosferycznego relatywnie niewielkiego (nie więcej niż 10 % wartości ciśnienia atmosferycznego) czynnika proporcjonalnego do przepływu masowego gazów wylotowych.

Istotne parametry, które zostały wyznaczone w inny sposób niż pomiary na hamowni silnikowej, to:

- temperatura przed turbiną turbosprężarki,
- ciśnienie przed turbiną turbosprężarki,
- ciśnienie przed kompresorem turbosprężarki za ogranicznikiem wlotu powietrza do niej (wymóg przepisów FIA dla grupy FIA Rally3).

Parametry te mają kluczowe znaczenie, ze względu na swój duży wpływ na istotne wyjściowe parametry pracy silnika, włączając w to symulowanie procesu generacji ciepła w komorze spalania w opracowywanym modelu obliczeniowym. Gdyby w toku przeprowadzanych analiz numerycznych okazały się one nieprawidłowe, skutkowałyby to błędnymi wnioskami w zakresie zarówno ilościowym jak i jakościowym co do proponowanych konfiguracji układu doładowania.

Uzupełnienie brakujących danych wejściowych zostało przeprowadzone na podstawie posiadanych charakterystyk urządzeń składających się na turbosprężarkę, tj. turbiny i kompresora. Jeżeli chodzi o kompresor, to w charakterystykach zawarto takie dane jak:

- prędkość korygowaną w obr/min wraz z temperaturą odniesienia 297 K,
- przepływ masowy korygowany kg/s wraz z ciśnieniem i temperaturą odniesienia (ciśnienie: 1 bar, temperatura: 297 K), którym odpowiadają spręż i sprawność.

W charakterystykach określono również krzywą graniczną stanu pracy niestatecznej w formie przepływu masowego w funkcji sprężu (ang. surge line). Dane zostały pogrupowane, tworząc 8 linii, odpowiadających różnym prędkościom obrotowym.

W przypadku turbiny turbosprężarki sposób postępowania był podobny, w charakterystykach zawarte były:

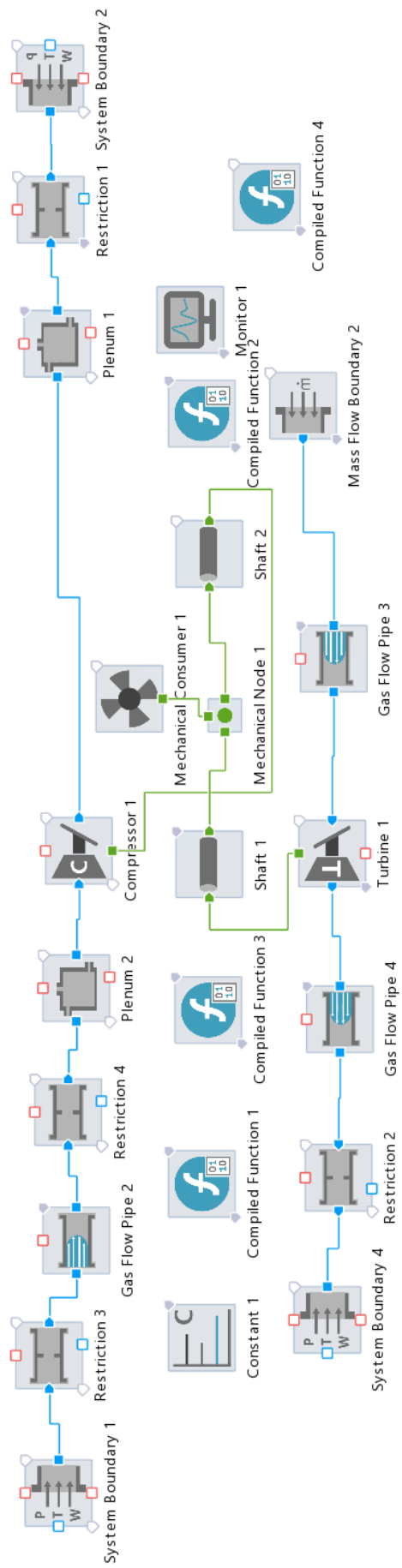
- prędkość korygowaną w obr/min wraz z temperaturą odniesienia 600 K,
- przepływ w $(\text{kg} \cdot \sqrt{\text{K}})/(\text{s} \cdot \text{Pa})$, którym odpowiadają bezwymiarowe wartości sprężu i sprawności.

Następnie, przy pomocy modułu oprogramowania AVL „TC Map Generator”, wykorzystując posiadane dane, sporządzono kompletne mapy, gotowe do zaimplementowania w modelu numerycznym zawierające znormalizowane parametry opisujące punkty pracy dla kompresora i turbiny osobno. Parametry te składają się z:

- przepływu w $(\text{kg} \cdot \sqrt{\text{K}})/(\text{s} \cdot \text{Pa})$,
- prędkości obrotowej w $\text{obr}/\text{min}/\sqrt{\text{K}}$,
- sprężu,
- sprawności (w przypadku kompresora również linię oznaczającą obszar pracy niestatecznej, ang. surge line).

Moduł „TC Map Generator” posiada algorytmy, które stosowano do aproksymacji wprowadzonych danych z wykorzystaniem odpowiednich krzywych. Otrzymane w wyniku działania modułu mapy zostały użyte w modelu obliczeniowym, który został użyty do określenia wspomnianych wcześniej brakujących danych z testów na hamowni silnikowej.

Skonstruowany model obliczeniowy dla celów wyznaczania brakujących z hamowni parametrów przedstawia rysunku 12.



Rysunek 12 Topografia modelu obliczeniowego, służącego do wyznaczenia brakujących danych

Model obliczeniowy składa się z dwóch, niezależnych od siebie ścieżek przepływu czynnika gazowego. Jedna z nich przebiega przez kompresor turbosprężarki, a druga przez turbinę turbosprężarki. Poniżej przedstawiono założenia przyjęte odnośnie do modelu obliczeniowego oraz elementów, wchodzących w jego skład:

- warunki brzegowe wlotowe obiegu kompresora wynoszą odpowiednio 100 kPa dla ciśnienia i 25 °C dla temperatury,
- ogranicznik wlotu powietrza do kompresora turbosprężarki (o średnicy wewnętrznej 31 mm), który jest wymagany przez przepisy FIA dla grupy FIA Rally3.

Ponieważ analizowane są w tym wypadku stany ustalone, to pojemności zbiorników w układzie nie mają wpływu na wyniki, a jedynie czas i stabilność procesu osiągnięcia stanu ustalonego. W modelu zastosowano kilku regulatorów PID. Pierwszy z nich reguluje temperaturę warunku brzegowego (wlot) przed turbiną turbosprężarki w sposób, który zapewnia, aby temperatura za turbiną turbosprężarki zgadzała się ze zmierzonymi charakterystykami. Kolejny, drugi regulator, steruje zaworem upustowym turbiny turbosprężarki tak, aby przepływający przez układ (turbiny wraz z zaworem upustowym) strumień masowy, będący sumą masy powietrza w układzie dolotowym oraz paliwa, pokrywał się z charakterystykami. Strumień masowy powietrza w ścieżce kompresora został zadany ze zmierzonej charakterystyki. Trzeci regulator steruje elementem dławiącym przepływ na wylocie ze ścieżki kompresora tak, aby ciśnienie w zbiorniku za kompresorem miało wartość wynikającą z pomiarów. Regulatory działają w oparciu o algorytm proporcjonalno-całkująco-różniczkujący, dzięki którym odchyłki wartości mierzonej od zadanej są niemalże zerowe po dojściu do stanu ustalonego całego układu. Zostały one tak dostrojone, aby działały stabilnie i możliwie szybko, bez wpadania w drgania.

Symulacje z wykorzystaniem modelu obliczeniowego zostały przeprowadzone z wystarczająco długim czasem symulacji oraz odpowiednim krokiem czasowym, ponieważ dalsza zmiana tych parametrów nie powodowała istotnej zmiany wyników. Czterokrotnie dłuższy czas symulacji i czterokrotnie gęstszy krok powodował mniej niż 1 % różnicy w uzyskiwanych wynikach. W uzyskanym stanie przepływ powietrza i przyrost ciśnienia w kompresorze, jak również w rezultacie również moc kompresora oraz turbiny pokrywają się z danymi z hamowni. Zgadzają się również strumień spalin i temperatura za turbiną. Z pomocą tych danych można więc odczytać temperaturę i ciśnienia przed turbiną, których brakuje z danych pomiarowych z badań na hamowni

silnikowej. Odczytu dokonano w momencie, gdy obliczane wartości były już ustabilizowane, tj. różnica pomiędzy wartością minimalną i maksymalną w przeciągu ostatnich 10 s nie była większa niż 1 % oraz gdy wartości znane były zgodne z dostrojonymi przez regulatory na poziomie nie gorszym niż 0,25 %.

W wyniku wykorzystania modelu obliczeniowego, odtworzono każdy z punktów pomiarowych na podstawie danych z badań na hamowni silnikowej. Uzyskano w ten sposób brakujące dane wejściowe w celu stworzenia modelu silnika spalinowego.

Do opracowania modelu silnika w narzędziu dostępnym w AVL CruiseM - „Engine Parametrization Wizard”, oprócz wymienionych wcześniej danych, wykorzystano również jego znane, dane techniczne, które wymieniono w tabeli 20.

Tabela 20 Podstawowe dane silnika Forda Fiesta ST Rally3

Pojemność skokowa, cm ³	1496
Ilość cylindrów	3
Stopień sprężania ϵ	10,5:1
Średnica cylindra, mm	84,0
Skok tłoka, mm	90,0
Długość korbowodu	143,2
Ilość zaworów na jeden cylinder	4
Średnica zaworu dolotowego, mm	31,0
Średnica zaworu wydechowego, mm	26,6
Skok zaworu dolotowego cylinder nr 1, mm	10,1
Skok zaworu dolotowego cylinder nr 2 i 3, mm	9,1
Skok zaworu wydechowego cylinder nr 1, mm	9,1
Skok zaworu wydechowego cylinder nr 2 i 3, mm	8,9

Stworzony model posiada po jednym przypadku/wariancie dla każdego symulowanego punktu. Współczynniki transferu ciepła oraz spadku ciśnienia w poszczególnych elementach składowych układu wyznaczono w oparciu o aproksymację danych wejściowych (tj. rzeczywistych danych pomiarowych uzyskanych podczas badań silnika spalinowego na hamowni). Narzędzie zapewnia możliwość stworzenia uniwersalnego modelu, w którym można symulować również zmienność parametrów w czasie, tj. stany przejściowe. Z uwagi na to, że model ma na celu pokazanie wpływu działania kompresora elektrycznego na silnik, to konieczna była modyfikacja, polegająca na zastąpieniu turbiny i kompresora przygotowanymi wcześniej plikami z ich mapami, jak również dodaniu wymaganego przez przepisy FIA dla grupy Rally3 ogranicznika wlotu powietrza do kompresora o średnicy wewnętrznej 31 mm. Ponadto, dodano sterowanie zaworem upustowym z turbiny turbosprężarki w postaci obejścia turbiny, które zawiera zwężkę o kontrolowanym współczynniku

przepływu, wyznaczanym przez regulator PID. Jako dane wejściowe do tego regulatora wykorzystywane są ciśnienie w chłodnicy powietrza doładowanego i zadane ciśnienie w kolektorze dolotowym, zgodnie z mapą rzeczywistego silnika spalinowego, a sam regulator dostrojono w taki sposób, aby zapewnić stabilność i szybkość jego pracy bez nadmiernych drgań. Dostrojenie wartości współczynników potwierdzono obserwując jego pracę w różnych, symulowanych cyklach pracy silnika i korygowano je wraz ze zmianami zachodzącymi w modelu.

W modelu wykorzystywana jest funkcja Vibe, tj. charakteryzująca proces wypalania paliwa w cylindrze silnika i pozwalająca na określenie przebiegu wyzwiania ciepła podczas procesu spalania. Funkcja Vibe opisana jest poniższym równaniem [81, 82]:

$$x(\alpha) = 1 - \exp \left[-\alpha \left(\frac{\alpha}{\alpha_k} \right)^{(m+1)} \right] \quad (1)$$

Gdzie, w (1):

- $\alpha, \alpha_k, ^\circ OWK$ – bieżąca oraz całkowita wartość kąta obrotu wału korbowego podczas procesu spalania,
- a, m – współczynniki funkcji Vibe.

Parametry charakterystyczne “a” i “m” tej funkcji zostały określone na podstawie przebiegu rzeczywistej funkcji wypalania paliwa określonej przy wykorzystaniu pomiarów z indykacji ciśnienia w cylindrze silnika badanego na hamowni silnikowej.

Czas spalania i współrzędną jego początku (w odniesieniu do kąta obrotu wału korbowego) wyrażono kilkoma zakresami względem prędkości obrotowej silnika, w których zmiana parametrów zachodzi liniowo. Do dobrania wartości charakterystycznych wykorzystano przebiegi ciśnienia zmierzone podczas indykacji rzeczywistego silnika. Udało się w ten sposób uzyskać zadowalającą dokładność, tj. mniej niż 5 % różnicy mocy indykowanej dla zakresu prędkości obrotowej silnika od 2500 obr/min do 7250 obr/min i pełnego otwarcia przepustnicy w stanie ustalonym.

Paliwo podawane jest bezpośrednio do komory spalania, przy założeniu jego odparowania i spalania w momencie podania (dotyczy danego kroku obliczeniowego). Prędkość podawania paliwa, a równocześnie także ilość wyzwianego ciepła, kontrolowana jest za pomocą docelowej znanej krzywej wyzwiania ciepła (ROHR controlled fuel injection). Współczynnik nadmiaru powietrza λ został ustawiony na stałą wartość 0,85, zgodnie z ustawieniem silnika rzeczywistego.

Podczas testów modelu zauważono problemy z pracą turbosprężarki. Posiadane dane tworzące mapę turbiny, zawierają jej charakterystykę w punktach odpowiadających pracy ze znacznymi prędkościami obrotowymi jej wału i przy wysokim przepływie czynnika. Sposób działania wykorzystanego do stworzenia map turbiny, modułu „TC Map Generator” powoduje, że sprawność symulowanej sprężarki znacząco spada poza zakresem pracy pokrywającym się z dostarczonymi danymi. Z tego powodu minimalną wartość sprawności turbosprężarki określono na 45 %. Ze względu na sposób wykorzystania silnika, sprężarka pracuje zazwyczaj w zakresie pokrywającym się z posiadaną charakterystyką i wtedy sprawność jest wyższa od 55 %. Mając na uwadze, że modyfikacja wygenerowanych przez moduł „TC Map Generator” map jest złożona i pracochłonna, zdecydowano się rozwiązać ten problem w następujący sposób. Do wału turbosprężarki został podłączony element, który jest źródłem momentu obrotowego (silnik elektryczny o zerowych stratach tarcia) i którego masowy moment bezwładności wynosi zero. Zadawany moment obrotowy w elemencie jest obliczany w oparciu o bieżącą sprawność turbiny i jeżeli jest ona mniejsza od 45 %, to dodawany jest moment obrotowy równy iloczynowi momentu generowanego przez turbinę i ilorazu pomniejszonego o jeden - iloraz sprawności 45 % oraz sprawności rzeczywistej. W efekcie tego dodawany jest brakujący moment obrotowy, tak jakby turbina osiągała 45 % sprawności. Następnie wyznaczono masowe momenty bezwładności silnika oraz turbosprężarki. W tym celu zostały wykonane testy eksperymentalne z wykorzystaniem samochodu, polegające na tym, że w momencie, gdy rozłączony od układu napędowego silnik był na obrotach biegu jałowego, to wciskano raptownie pedał przyspieszenia do maksymalnego otwarcia przepustnicy i odczekaniu, aż silnik uzyska maksymalną prędkość obrotową. Wyniki z tych testów zostały uśrednione dla kilku powtórzeń. Wykorzystując pochodne prędkości obrotowej wału korbowego silnika i wału turbosprężarki uśredniono w zakresie 1500-6000 obr/min tempo narastania tych prędkości. W modelu odzwierciedlono taką samą sytuację i wartości masowych momentów bezwładności, uśredniono w taki sposób, aby tempa narastania prędkości obrotowych były zgodne z modelem co do 1 %. Dokonano tego poprzez zmienianie momentów bezwładności wału korbowego silnika i wału turbosprężarki przy znanych już pozostałych parametrach wyznaczonych dla stanów ustalonych.

Ponadto zamodelowano samochód rajdowy o znanej masie, średnicy tocznej kół, przełożeniach skrzyni biegów, przełożeniu elementów transferujących moc i innych. W ciągu elementów transferujących moc znajdują się elementy elastyczne o odpowiednio

dobranej sztywności i zdolności tłumienia drgań skrętnych. Częstotliwość rezonansowa układu znajduje się znacząco poniżej pulsacji powodowanych przez cykle silnika spalinowego nawet dla obrotów biegu jałowego. Ugięcie kątowe elementów elastycznych nigdy nie przekracza pół obrotu, równocześnie zapewniony jest relatywnie stały przebieg siły napędzającej samochód (wygładzenie pulsacji cykli silnika). W układzie napędowym znajduje się także sprzęgło o określonym maksymalnym momencie - wartość tą ustawiono na 600 Nm. Jest to na tyle dużo, że nie powoduje uślizgu dla żadnej prędkości obrotowej przy pełnym otwarciu przepustnicy, a równocześnie zapewnia prawidłowy poziom sił (nie większy niż około 150% maksymalnego momentu obrotowego generowanego przez silnik w stanie ustalonym) w układzie podczas wyrównywania się prędkości obrotowej wałów po zmianie przełożenia. W przypadku symulacji dynamicznych zakładających analizę całego samochodu, konieczne było określenie danych samochodu wymienionych w tabeli 21. Podane dane dotyczą samochodu rajdowego Ford Fiesta ST Rally3.

Tabela 21 Wybrane dane techniczne samochodu rajdowego Ford Fiesta ST Rally3 określone w AVL CruiseM

Masa samochodu, kg	1210
Masa samochodu z hybrydowym układem napędowym, kg	1230
Masa załogi, kg	160
Powierzchnia czołowa A_x , m ²	2,15
Współczynnik oporu powietrza C_x , -	0,37

Jak można zauważyć w tabeli 21, założono wzrost masy samochodu z układem hybrydowym o 20 kg, względem takiego, który nie jest w niego wyposażony. Wynika to z przeprowadzonych pomiarów masy poszczególnych elementów, które wchodziły w skład analizowanego układu hybrydowego. Założona masa załogi wynika z przepisów technicznych FIA, gdzie określona została masa standardowej załogi.

Na tym etapie udało się uzyskać model, który odzwierciedlał samochód rajdowy wyposażony w silnik spalinowy. Parametry zmienne w symulacji można zadawać jako funkcję czasu lub wyliczać w oparciu o wybrany algorytm wykorzystujący dowolne, wyznaczone podczas symulacji wielkości.

Kolejnym etapem było zaimplementowanie elementów układu mHEV, które były przedmiotem weryfikacji i do których należą:

- bateria trakcyjna o napięciu 48 V,

- układ BISG 48 V w pozycji P0 (połączenie z układem napędowym samochodu za pomocą paska osprzętu silnika spalinowego),
- kompresor elektryczny o napięciu zasilania 48 V w układzie doładowania silnika spalinowego, połączony szeregowo z turbosprężarką.

Charakterystyki tych maszyn i urządzeń są znane i zostały wprowadzone do modelu. Jeżeli chodzi o baterię trakcyjną 48 V to są to:

- napięcia robocze,
- pojemność,
- wydajność prądowa,
- charakterystyki poboru prądu w zależności od stopnia naładowania i temperatury otoczenia.

W przypadku BISG są to:

- maksymalna moc w funkcji obrotów (ujemna i dodatnia, ponieważ urządzenie może pracować jako silnik i generator),
- sprawności w funkcji obrotów oraz obciążenia,
- przełożenie BISG względem wału silnika (przełożenie rolek i paska).

W przypadku tej maszyny, możliwe jest dowolne sterowanie momentem obrotowym w funkcji dowolnych, wyznaczanych parametrów.

Kolejnym elementem układu był kompresor elektryczny. W przypadku tej maszyny, była znana przede wszystkim jej charakterystyka przepływu, która pozwoliła wygenerować mapę przy pomocy modułu „TC Map Generator”, podobnie jak dla kompresora turbosprężarki. Oprócz tego znane były charakterystyki silnika elektrycznego.

Skonfigurowany model układu, pozwala na wykonanie analiz w wielu konfiguracjach. Powstały dwie jego wersje, tj. taka, która symuluje pracę silnika spalinowego i wybranych urządzeń elektrycznych na hamowni silnikowej oraz druga, pozwalająca na analizę całego samochodu, wyposażonego w wybrany układ napędowy.

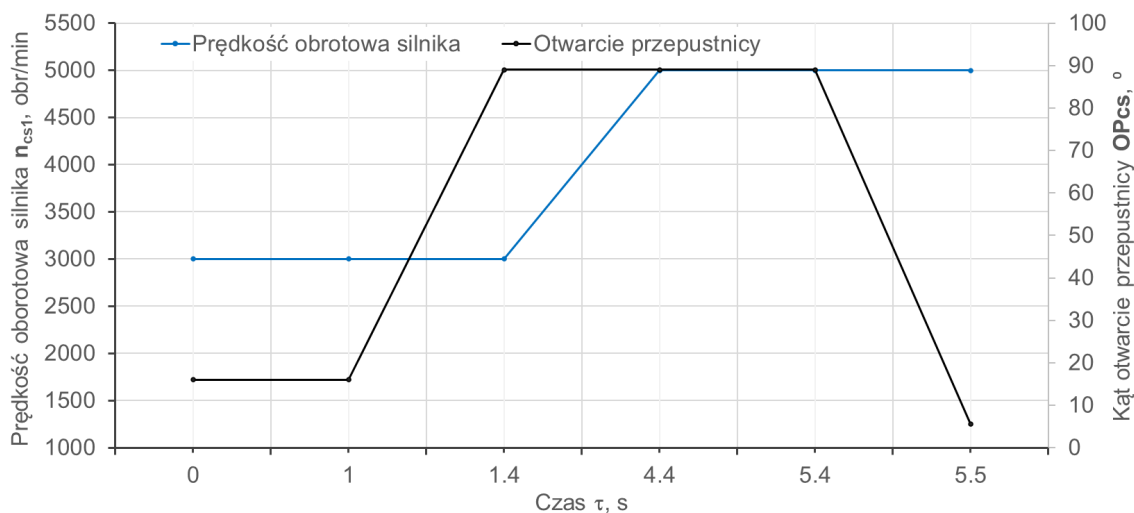
Topografię modelu zaprezentowano na rysunku 13 poniżej.

3.2 Symulacje numeryczne z wykorzystaniem stworzonego modelu

3.2.1 Symulacje numeryczne silnika spalinowego z kompresorem elektrycznym

Po zakończeniu prac nad stworzeniem modelu silnika i samochodu rajdowego oraz przetestowaniu poprawności jego działania przeprowadzono symulacje numeryczne. Zdecydowano się przede wszystkim na ustalenie i zasymulowanie cyklu, którego wyniki miały za zadanie odpowiedzieć na pytanie, czy zastosowanie wybranych urządzeń elektrycznych w układzie napędowym samochodu rajdowego, pozwoli na osiągnięcie realnych korzyści, przede wszystkim w postaci poprawy parametrów energetycznych zespołu napędowego. Ponadto założono, że ten cykl symulacyjny będzie również powtórzony podczas badań eksperymentalnych na hamowni silnikowej w celach porównawczych.

Kompresor elektryczny ma przede wszystkim za zadanie zniwelowanie negatywnego efektu zbyt wolnego rozpędzania się turbosprężarki w stanach przejściowych pracy silnika spalinowego, co skutkuje znacznymi rozbieżnościami w wartości rzeczywistego ciśnienia w kolektorze dolotowym w stosunku do zadanego. Opisane zjawisko symulowano, wybierając cykl, podczas którego w pierwszej fazie silnik spalinowy ma stałą prędkość obrotową i stałe, małe otwarcie przepustnicy, a następnie poprzez raptowne maksymalne otwarcie przepustnicy, wraz ze stopniowym zwiększaniem prędkości obrotowej silnika od 3000 obr/min do 5000 obr/min. Taki cykl powoduje uzyskanie, spodziewanych rozbieżności w wartościach ciśnienia w kolektorze dolotowym w stosunku do zadanego, spowodowanych bezwładnością turbosprężarki. Wykorzystywany cykl zaprezentowano na rysunku 14.



Rysunek 14 Zadany cykl symulacyjny

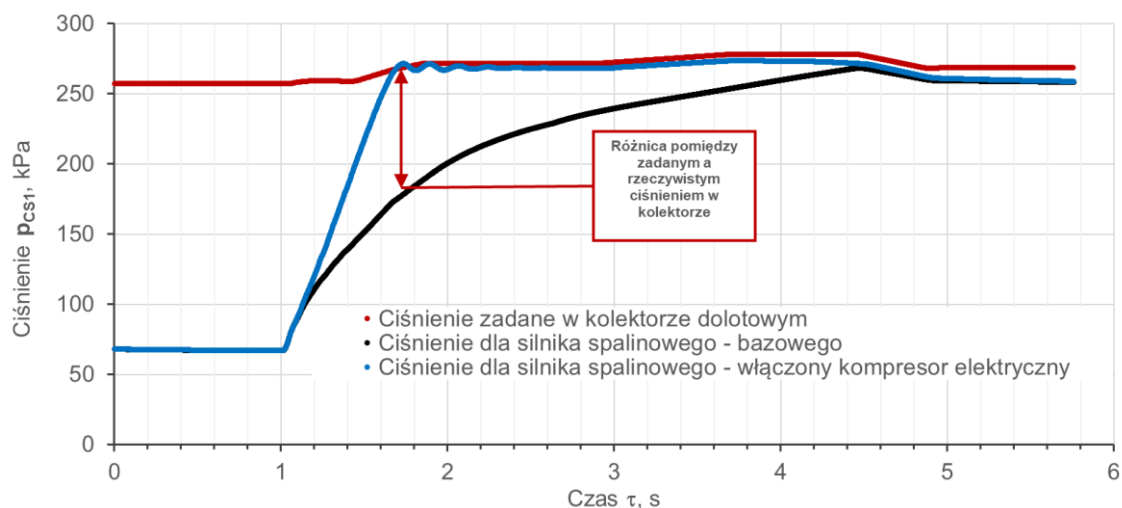
Plan symulacji z wykorzystaniem powyższego cyklu zakładał analizę silnika spalinowego w następujących konfiguracjach:

- silnik spalinowy bez włączonego kompresora elektrycznego - bazowa,
- silnik spalinowy z włączonym kompresorem elektrycznym.

W przypadku konfiguracji z włączonym kompresorem elektrycznym, konieczne było określenie strategii jego działania w funkcji dostępnych parametrów. Mając na uwadze, że symulowany cykl ogranicza się wyłącznie do silnika spalinowego, wymagane było określenie takiej strategii uruchamiania kompresora elektrycznego, która nie wykorzystuje danych wejściowych pochodzących z samochodu. Jak już wspomniano, dobrym wskaźnikiem zjawiska bezwładności turbosprężarki, a co za tym idzie zbyt niskiego ciśnienia doładowania jest porównanie rzeczywistego ciśnienia w kolektorze dolotowym do zadanego. Różnica zadanej wartości ciśnienia w kolektorze dolotowym do rzeczywistej, pozwala określić skalę niedoboru ciśnienia, które może zostać uzupełnione z wykorzystaniem kompresora elektrycznego. Wynika z tego pierwszy warunek uruchomienia kompresora elektrycznego, tj., gdy powyższa różnica jest większa od 0. Następnym warunkiem jest wykrycie chęci kierowcy do zwiększania obciążenia. Zwłoka działania kompresora elektrycznego, który do 90 % swojej maksymalnej prędkości obrotowej (która wynosi 70 000 obr/min) dochodzi w około 270 ms powoduje, że konieczne jest jego możliwie wczesne uruchomienie. Ustalono, że będzie on włączał się powyżej 20 % otwarcia przepustnicy, aby uzyskać możliwie wysoką prędkość obrotową i parametry pracy w momencie, gdy konieczne będzie uzupełnienie ciśnienia

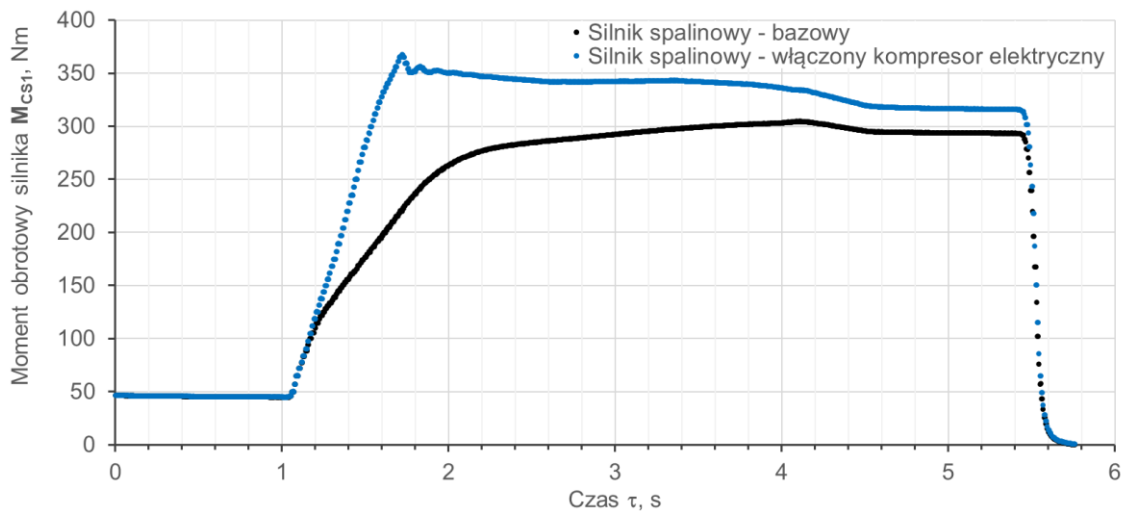
w kolektorze dolotowym. Te dwa warunki, które muszą być spełnione łącznie zostały zaimplementowane do modelu jako algorytm uruchamiania kompresora elektrycznego. Ponadto, zastosowano funkcję, która w momencie wykrycia zbliżania się ciśnienia w kolektorze dolotowym do zadanego, płynnie ogranicza pracę kompresora elektrycznego, aż do jego wyłączenia. Ta funkcja podlegała kalibracji tak, aby uzyskać maksymalny poziom doładowania przez kompresor elektryczny, jednocześnie mając na uwadze zużycie energii. Dodatkowo, aby reakcja kompresora elektrycznego była możliwie szybka, ustalono, że prędkość obrotowa w trybie jego biegu jałowego będzie wynosić 7500 obr/min, zgodnie z określoną przez jego producenta specyfikacją (zaprogramowano regulator PID, który nie pozwala na zejście prędkości obrotowej kompresora elektrycznego poniżej tej wartości).

Aby zobrazować zjawisko niedoboru ciśnienia w kolektorze dolotowym, poniżej na rysunku 15, zaprezentowano uzyskane w wyniku symulacji numerycznych ciśnienie zadane w kolektorze dolotowym w trakcie cyklu symulacyjnego oraz rzeczywiste z wyłączonym oraz włączonym kompresorem elektrycznym. Zdecydowano się nie włączać w program symulacji systemu ALS, aby uzyskać referencję do bazowej konfiguracji silnika spalinowego. Jest to uzasadnione, ponieważ jednym z celów niniejszej pracy jest weryfikacja czy możliwe jest ograniczenie działania systemu ALS, a nawet rezygnacja z korzystania z niego.



Rysunek 15 Zjawisko niedoboru ciśnienia w kolektorze dolotowym w stosunku do zadanego

Jak widać, niedobór ciśnienia w konfiguracji bazowej silnika jest znaczący. Zastosowanie kompresora elektrycznego pozwala osiągnąć zadaną wartość ciśnienia w kolektorze dolotowym szybciej o około 2,8 s. Wpływa to pozytywnie na możliwe do uzyskania przebiegi momentu obrotowego silnika. W momencie porównawczym, tj. w 1,7 s, różnica pomiędzy ciśnieniem w kolektorze dolotowym bez włączonego kompresora i z włączonym kompresorem elektrycznym wynosi nawet około 93 kPa. Na rysunku 16, zaprezentowano z kolei jak niedobory ciśnienia i zastosowanie kompresora elektrycznego wpływają na przebieg momentu obrotowego silnika spalinowego.



Rysunek 16 Porównanie przebiegów momentu obrotowego silnika spalinowego

W rezultacie zastosowania kompresora elektrycznego, przebieg momentu obrotowego jest bardziej korzystny, ponieważ jego przyrost jest szybszy niż w przypadku konfiguracji bez niego. Największy przyrost momentu obrotowego w przypadku konfiguracji z kompresorem elektrycznym względem konfiguracji bazowej można zauważyć, analogicznie do wykresów ciśnienia w kolektorze dolotowym, w 1,7 s zadanego cyklu. Wynosi on aż 67 %, co jest znaczącą wartością. Przeprowadzone symulacje potwierdziły więc sens zastosowania kompresora elektrycznego, w celu ograniczenia zjawiska niedoboru ciśnienia w kolektorze dolotowym względem ciśnienia zadanego.

3.2.2 Symulacje numeryczne samochodu wyposażonego w silnik spalinowy z kompresorem elektrycznym oraz BISG – wpływ na dynamikę samochodu

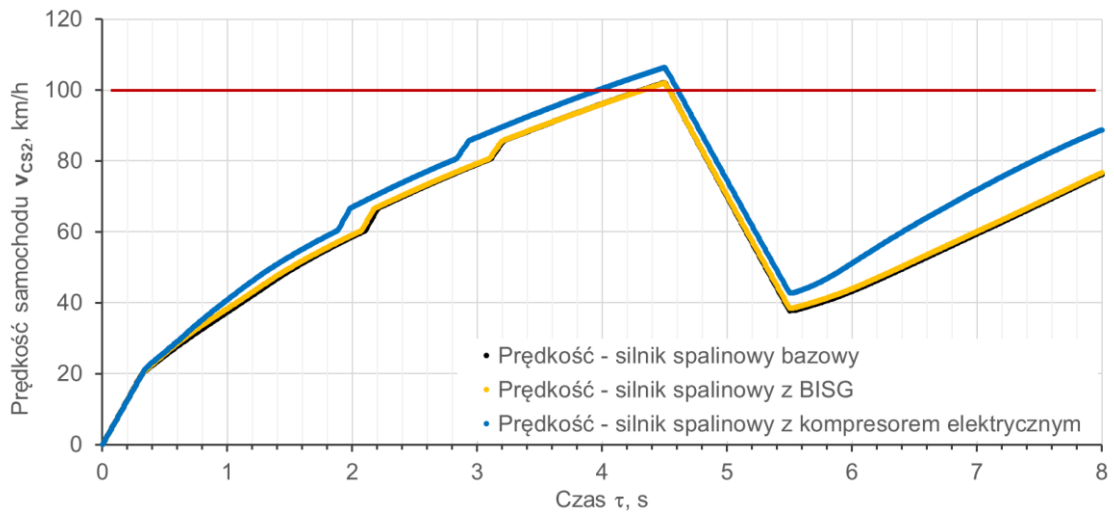
Kolejnym krokiem była weryfikacja parametrów dynamicznych samochodu rajdowego wyposażonego w układ napędowy z BISG i kompresorem elektrycznym. Aby potwierdzić pozytywny wpływ na parametry dynamiczne samochodu, zdecydowano się na stworzenie cyklu, który składał się z fazy przyspieszania samochodu w zakresie prędkości od 0 km/h do 100 km/h, następnie fazy gwałtownego hamowania do około 40 km/h i fazy ponownego przyspieszenia do około 80 km/h. Wszystkie fazy przyspieszeń samochodu odbywały się przy raptownym, maksymalnym otwarciu przepustnicy. Ponadto, aby wywołać efekt niedoboru ciśnienia w kolektorze dolotowym, spowodowany bezwładnością turbosprężarki, prędkości cyklu zostały dobrane w taki sposób, że druga faza przyspieszania zaczynała się na tym samym przełożeniu skrzyni biegów, na którym kończyła się pierwsza (brak zmiany przełożenia skrzyni biegów w trakcie fazy hamowania). Tak stworzony cykl miał za zadanie zweryfikować zarówno czas osiągnięcia zadanej prędkości ze startu zatrzymanego, jak również elastyczność układu napędowego, które w rywalizacji sportowej w rajdach są istotne.

Plan symulacji z wykorzystaniem powyższego cyklu zakładał analizę samochodu rajdowego w następujących konfiguracjach układu napędowego:

- silnik spalinowy z wyłączonym BISG i kompresorem elektrycznym - bazowa,
- silnik spalinowy z włączonym BISG i wyłączonym kompresorem elektrycznym,
- silnik spalinowy z wyłączonym BISG i włączonym kompresorem elektrycznym.

Strategia działania BISG (w trybie wspomaganie silnika spalinowego) i kompresora elektrycznego w trakcie symulacji zadanego cyklu zakłada ich pracę na maksymalnych parametrach, co odzwierciedla działanie procedury startu wykorzystywanej w samochodach rajdowych. Jej założenia opierają się na uzyskaniu najlepszych możliwych parametrów układu napędowego podczas startu samochodu rajdowego do odcinka specjalnego (OS) rajdu. Z drugiej strony podejście pozwala również na bezpośrednie porównanie wszystkich badanych konfiguracji, bez wpływu działania strategii, które mogłyby zaburzyć analizę uzyskanych wyników. Wprowadzenie strategii działania BISG i kompresora elektrycznego uzależnionych od parametrów pracy silnika spalinowego oraz samochodu zostaną wprowadzone w dalszych symulacjach, zakładających cykle trasy odcinków specjalnych (OS), których przebieg wzorowany jest na OS rzeczywistego rajdu.

Wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych symulacji zaprezentowano na rysunku 17.



Rysunek 17 Porównanie przebiegów prędkości samochodu rajdowego

Jak widać na rysunku 17, podczas zmiany przełożenia skrzyni biegów widoczne jest gwałtowne przyspieszenie. Wynika to z modelowanego sposobu zmiany biegu i wykorzystania energii kinetycznej wirujących elementów rozpędzonego silnika (uślizg sprzęgła wynikający z maksymalnego możliwego do przeniesienia momentu obrotowego).

Odnosząc się do uzyskanych wyników, najlepszy czas uzyskała konfiguracja silnika spalinowego z kompresorem elektrycznym, która pozwoliła zgodnie z poprzednimi symulacjami, na lepszą reakcję silnika na wciśnięcie przez kierowcę pedału przyspieszenia. W szczególności widać to w drugim cyklu przyspieszania po hamowaniu samochodu, gdzie z uwagi na brak zmiany przełożenia skrzyni biegów, dużą rolę odgrywała reakcja silnika na raptowną zmianę położenia przepustnicy aż do jej maksymalnego otwarcia, przy jego stosunkowej niewielkiej prędkości obrotowej. Jest to sytuacja analogiczna do pierwszego cyklu symulacyjnego, podczas której wystąpił niedobór ciśnienia w kolektorze dolotowym spowodowany bezwładnością turbosprężarki. Należy zauważyć, że wpływ BISG na dynamikę samochodu jest pomijalny, ponieważ przebieg prędkości samochodu w zadanym cyklu symulacyjnym z włączonym i wyłączonym BISG jest praktycznie identyczny. Z tego powodu, to kompresor elektryczny jest rozwiązaniem preferowanym, ponieważ pozwolił uzyskać o 0,4 s lepszy czas przyspieszenia do 100 km/h i ponad 12 km/h wyższą prędkość

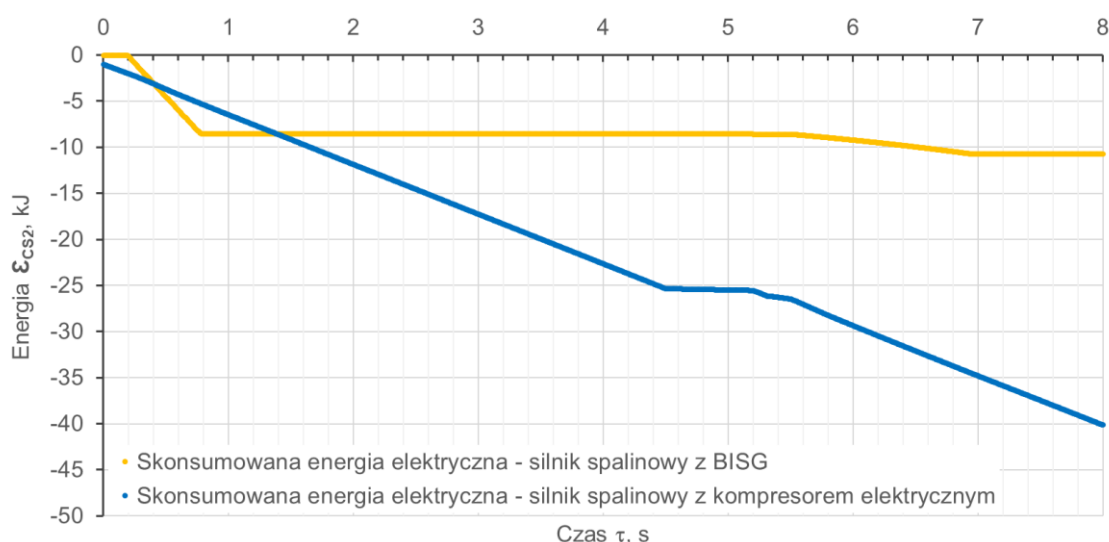
na końcu symulowanego cyklu samochodu rajdowego. Samochód rajdowy wyposażony w silnik z kompresorem elektrycznym przebył w czasie 8 s również o 13,4 m dłuższą drogą niż ten w konfiguracji bazowej. Porównanie wyników zamieszczono w tabeli 22.

Tabela 22 Porównanie czasu osiągnięcia przez samochód rajdowy prędkości 100 km/h ze startu zatrzymanego i przejechanej drogi po 8 s

Konfiguracja	Wartość, s	Zmiana wartości, %	Droga, m	Zmiana wartości, %
Silnik spalinowy bazowy	4,3		136,2	
Silnik spalinowy z włączonym BISG	4,3	0,0	137,2	0,7
Silnik spalinowy z włączonym kompresorem elektrycznym	3,9	- 9,0	149,6	9,8

Jak można zauważyć, względne porównanie czasu i drogi w konfiguracji samochodu z silnikiem z włączonym kompresorem elektrycznym są zauważalnie lepsze od konfiguracji bazowej.

Oprócz parametrów dynamicznych samochodu rajdowego, porównano również zużycie energii elektrycznej instalacji 48 V w każdej z symulowanej konfiguracji. Porównanie pokazano na rysunku 18, z pominięciem konfiguracji bazowej w której omawiane zużycie energii nie występuje.



Rysunek 18 Porównanie zużycia energii w trakcie symulacji cyklu

Jak można zauważyć, najwyższe zużycie energii zanotowano w konfiguracji z uruchomionym kompresorem elektrycznym. Jednakże, odnosząc to do skuteczności jego działania, to taka konsumpcja energii elektrycznej jest adekwatna i akceptowalna. Szczegółowe podsumowanie zużycia energii przez samochód rajdowy w symulowanym cyklu zamieszczono w poniższej tabeli 23.

Tabela 23 Porównanie zużycia energii w badanym cyklu

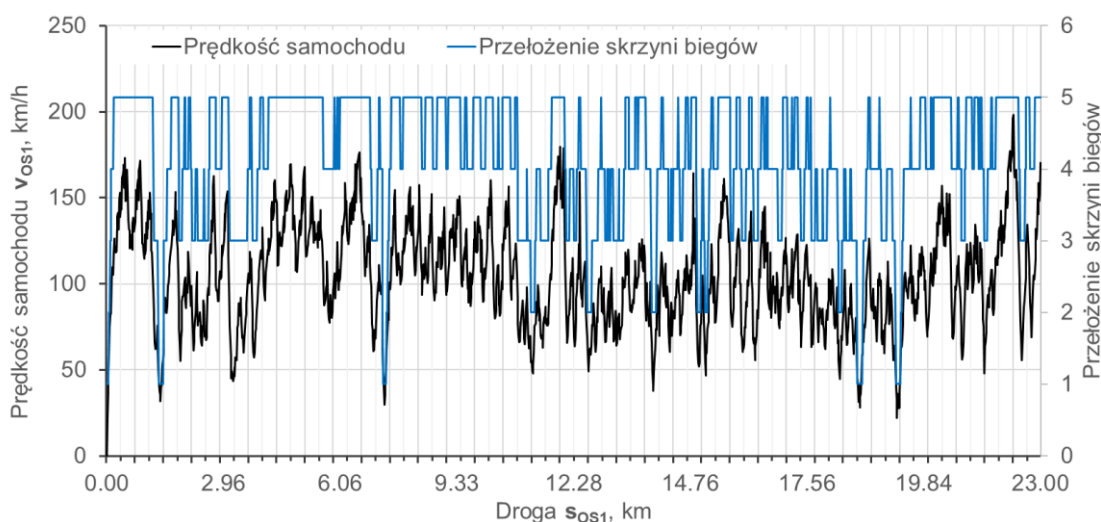
Konfiguracja	Wartość, kJ	Zmiana wartości, %
Silnik spalinowy z BISG	- 10,7	
Silnik spalinowy z kompresorem elektrycznym	- 40,1	52

Jak można zauważyć, kompresor elektryczny konsumuje w symulowanym cyklu prawie trzykrotnie większą ilość energii niż BISG. Niemniej, wykres zużycia energii pokazuje, że zakres działania BISG w przypadku tryby wspomaganie silnika spalinowego jest bardzo ograniczony, wręcz punktowy. Należy więc stwierdzić, że BISG o wybranej charakterystyce i przy obecnym przełożeniu nie jest rozwiązaniem optymalnym, aby wykorzystywać go w trybie wspomaganie silnika spalinowego. Wynika to z jego charakterystyki, która umożliwia jego działanie do prędkości obrotowej silnika spalinowego około 3700 obr/min. Jest to wartość niższa od wykorzystywanych w badaniu prędkości obrotowych silnika, które z kolei odpowiadają tym wykorzystywanym w trakcie rajdów. W przypadku trybu BISG w którym odzyskuje on energię w trakcie hamowania samochodu, zakres prędkości silnika spalinowego w którym BISG funkcjonuje jest o wiele większy i wynosi około 6600 obr/min.

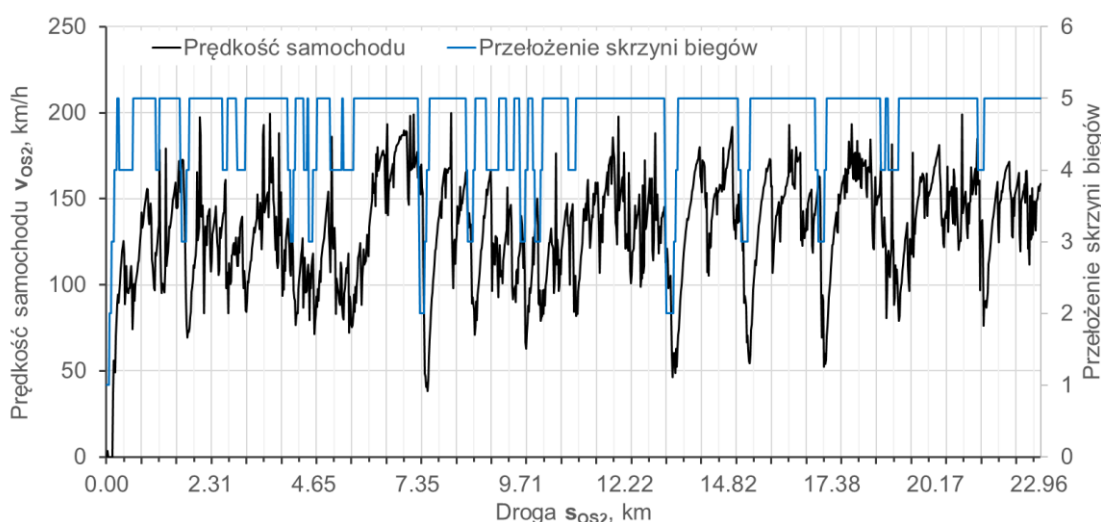
Podsumowując tę część symulacji numerycznych, stwierdzono, że optymalną konfiguracją, jeżeli chodzi o wspomaganie pracy silnika spalinowego jest wykorzystanie kompresora elektrycznego. W przypadku BISG zakres użytecznej prędkości obrotowej silnika spalinowego okazał się być zbyt niski, aby możliwe było jego wykorzystanie w trakcie jazdy sportowej. Niemniej, w dalszych analizach zostanie wzięta pod uwagę konfiguracja silnika spalinowego z BISG w trybie odzyskiwania energii podczas hamowania samochodu oraz z kompresorem elektrycznym.

3.2.3 Symulacje numeryczne samochodu wyposażonego w silnik spalinowy z kompresorem elektrycznym oraz BISG – trasa rajdu

Następnym krokiem w przeprowadzanych pracach, było wykorzystanie symulacji numerycznych do weryfikacji działania hybrydowego układu napędowego w samochodzie rajdowym w trakcie badanego cyklu, symulującego odcinek specjalny (OS). W tym celu przeanalizowane posiadane dane z rajdów i wytypowano dwa odcinki rund Rajdowych Mistrzostw Świata (WRC) o odmiennej charakterystyce. Następnie każdy z OS został skrócony do 23 km, aby zapewnić ten sam punkt odniesienia przy porównywaniu wyników symulacji. Przebieg OS, które zostały stworzone do symulacji zostały zaprezentowany na rysunku 19 i rysunku 20.



Rysunek 19 Przebieg prędkości i przełożeń skrzyni biegów odcinka specjalnego 1



Rysunek 20 Przebieg prędkości i przełożeń skrzyni biegów odcinka specjalnego 2

Jak można zauważyć, wybrane OS różnią się od siebie, przebiegiem profilu prędkości w funkcji drogi oraz wykorzystywanymi przełoženiami skrzyni biegów. Istotną różnicą pomiędzy OS jest możliwość do uzyskania prędkość średnia, która jest znacznie wyższa w przypadku OS 2. Wybranie dwóch, różniących się od siebie charakterystyką OS miało na celu zweryfikowanie w jakim stopniu hybrydowy układ napędowy wpływa pozytywnie na dynamikę samochodu rajdowego. Ponadto, możliwa była weryfikacja wybranej baterii trakcyjnej 48 V dla OS o różnych charakterystykach, ze szczególnym uwzględnieniem jej pojemności.

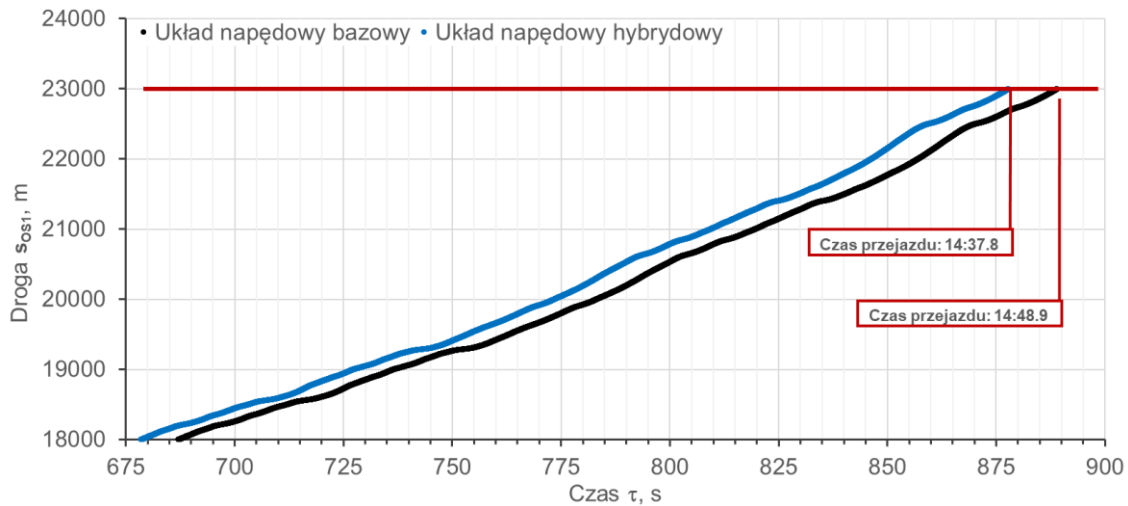
Korzystając z możliwości programu AVL CruiseM, określono cykl jazdy, odwzorowując w funkcji drogi prędkości samochodu i zadane przełożenia skrzyni biegów zgodnie z rysunkiem 19 i rysunkiem 20 powyżej. W trakcie przeprowadzania symulacji, cykl jazdy realizuje następnie wirtualny kierowca, którego zachowanie wynika z algorytmu określonego w programie, bazującego na odpowiednio dostrojonych regulatorach PID. Zastosowanie jednego deterministycznego modelu kierowcy pozwoliło na dobrą powtarzalność zadanego cyklu jazdy w różnych konfiguracjach. Zdecydowano się na przeprowadzenie symulacji z wykorzystaniem powyższych cykli w następujących konfiguracjach układu napędowego samochodu:

- silnik spalinowy z wyłączonym kompresorem elektrycznym i BISG – bazowy układ napędowy samochodu,
- silnik spalinowy z włączonym kompresorem elektrycznym i BISG – hybrydowy układ napędowy samochodu.

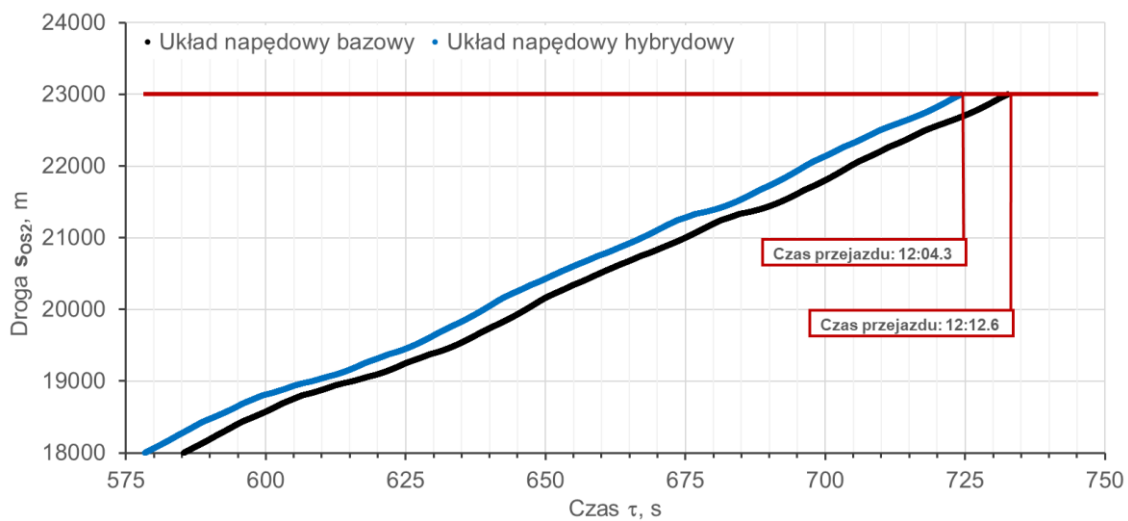
Należy zauważyć, że omawiane symulacje nie służyły wyłącznie do analizy dynamiki samochodu oraz pojemności baterii trakcyjnej 48 V, ale również zarządzania energią podczas pracy kompresora elektrycznego. W tych symulacjach zdecydowano się na wykorzystanie BISG nie w celu wspomaganie układu napędowego samochodu, ale w celu odzyskiwania energii w trakcie hamowania samochodu rajdowego. Pozwoliło to na przeanalizowanie stopnia możliwego odzysku energii w zadanym cyklu, co bezpośrednio wpływa na to, czy pojemność wybranej baterii trakcyjnej 48 V jest wystarczająca.

Na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji, porównano czas przejazdu każdego OS. Wnioskiem z tego porównania jest, że samochód rajdowy wyposażony w hybrydowy układ napędowy jest w stanie przejechać zadany dystans w krótszym czasie

niż samochód z bazowym układem napędowym. Różnice w przyroście drogi w funkcji czasu, zaprezentowano na rysunku 21 i rysunku 22



Rysunek 21 Różnica w czasie przejazdu samochodu rajdowego na OS1



Rysunek 22 Różnica w czasie przejazdu samochodu rajdowego na OS2

Jak można zauważyć, zastosowanie hybrydowego układu napędowego pozwoliło, aby samochód rajdowy pokonał OS w krótszym czasie niż w przypadku konfiguracji bazowej układu napędowego. Różnice w czasie przejazdów OS zaprezentowano w tabeli 24.

Tabela 24 Porównanie czasów przejazdów OS z różnymi konfiguracjami układu napędowego samochodu rajdowego

Konfiguracja	Czas przejazdu OS 1, s	Różnica, s	Zmiana wartości, %	Czas przejazdu OS 2, s	Różnica, s	Zmiana wartości, %
Samochód w bazowej konfiguracji układu napędowego	14:48,9	/	/	12:12,6	/	/
Samochód z hybrydowym układem napędowym	14:37,8	11,1	- 1,3	12:04,3	8,3	- 1,1

W obu przypadkach, samochód wyposażony w hybrydowy układ napędowy był w stanie przejechać każdy z symulowanych OS w około 1 % krótszym czasie. Mając na uwadze wartości bezwzględne, są to istotne różnice w rywalizacji sportowej w trakcie rajdu.

Kolejnym aspektem w porównaniu dynamiki samochodu rajdowego była weryfikacja o ile szybciej jego konfiguracja z hybrydowym układem napędowym jest w stanie pokonać dystans 1 km OS od konfiguracji z bazowym układem napędowym. Jest to porównanie stosowane powszechnie w rajdach, aby w przejrzysty sposób zobrazować różnice w osiąгах samochodów rajdowych. Obliczone wartości zaprezentowano w tabeli 25 poniżej.

Tabela 25 Porównanie różnicy średniego czasu przejazdu dla symulowanych konfiguracji układu napędowego

Konfiguracja	Średnia różnica w czasie przejazdu na 1 km OS względem specyfikacji bazowej samochodu, s/km OS
Samochód z hybrydowym układem napędowym OS 1	- 0,49
Samochód z hybrydowym układem napędowym OS 2	- 0,36

Na podstawie powyższych wartości, wpływ hybrydowego układu napędowego na osiągi samochodu rajdowego jest wyraźnie widoczny. W przypadku każdego z analizowanych OS konfiguracja samochodu rajdowego z hybrydowym układem napędowym była wyraźnie szybsza od konfiguracji z bazowym układem napędowym. Należy podkreślić, że wpływ działania hybrydowego układu napędowego na osiągi samochodu rajdowego jest zróżnicowany i zależy od charakterystyki OS. Analizie celowo zostały poddane OS o odmiennych charakterystykach, aby zweryfikować działanie hybrydowego układu napędowego w możliwie różnych warunkach.

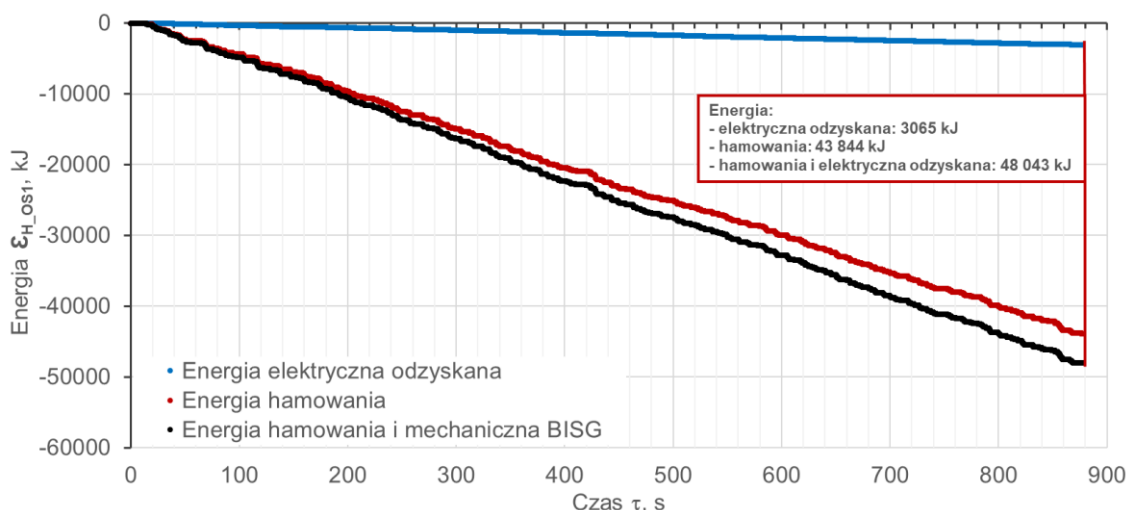
Zróźnicowanie symulowanych OS, dobrze obrazuje porównanie średnich prędkości przejazdów każdego z nich, które zaprezentowano w tabeli 26.

Tabela 26 Porównanie średnich prędkości przejazdu OS 1 i OS 2

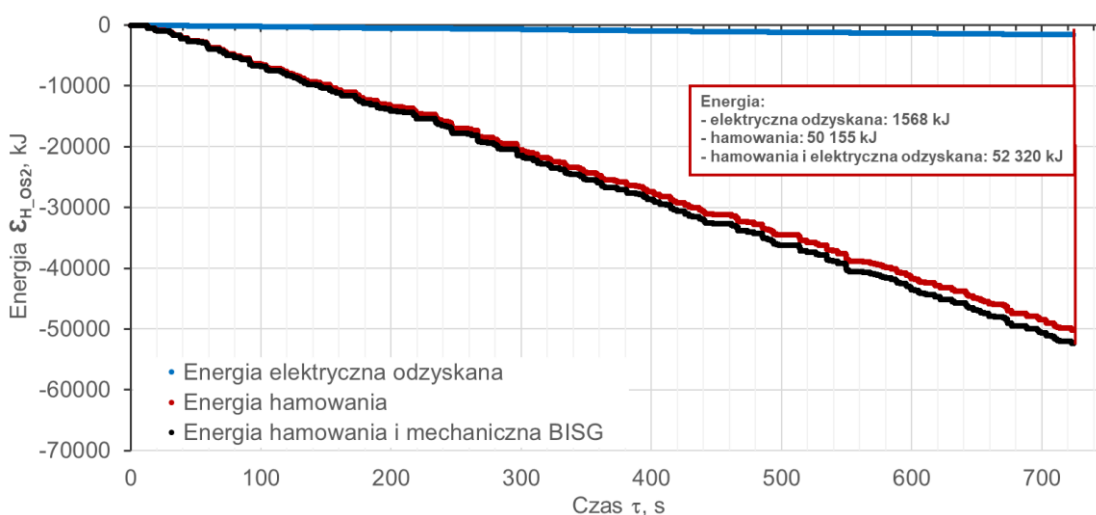
OS	Średnia prędkość przejazdu OS, km/h	Zmiana wartości, %
1	94,3	
2	113,0	19,8

Różnica w średniej prędkości jest wyższa o niemal 20 %, co uzasadnia różnice w skuteczności działania hybrydowego układu napędowego. Na OS 1, tj. o niższej, średniej prędkości przejazdu, występuje większa ilość zmian prędkości samochodu. Sugeruje to większą ilość hamowań samochodu, w rezultacie również jego przyspieszeń, czyli chwil, w których silnik spalinowy pracuje w stanach przejściowych. To właśnie w takich przypadkach, zakłada się występowanie niedoborów ciśnienia w kolektorze dolotowym przez bezwładność turbosprężarki. To wtedy sens wykorzystywania kompresora elektrycznego jest największy, aby to zjawisko możliwe ograniczyć.

Kolejnym, istotnym etapem analizy wyników symulacji komputerowych, była weryfikacja jaka część energii z hamowania jest możliwa do odzyskania, wykorzystując BISG. Porównanie ilości energii hamowania, do ilości odzyskanej energii elektrycznej na OS 1 i OS 2, zaprezentowano odpowiednio na rysunku 23 i rysunku 24. Energia hamowania to według przyjętego założenia suma energii rozproszonej w czterech tarczach hamulcowych i BISG. Jest to równocześnie energia wymagań do spowolnienia pojazdu zgodnie z zadanym profilem prędkości w funkcji drogi. Energia ta może być traktowana jako darmowa, gdyż gdyby nie obecność BISG cała wymagana energia zostałaby rozproszona z użyciem konwencjonalnego układu hamulcowego.



Rysunek 23 Porównanie ilości energii hamowania do ilości energii odzyskanej z hamowania na OS 1

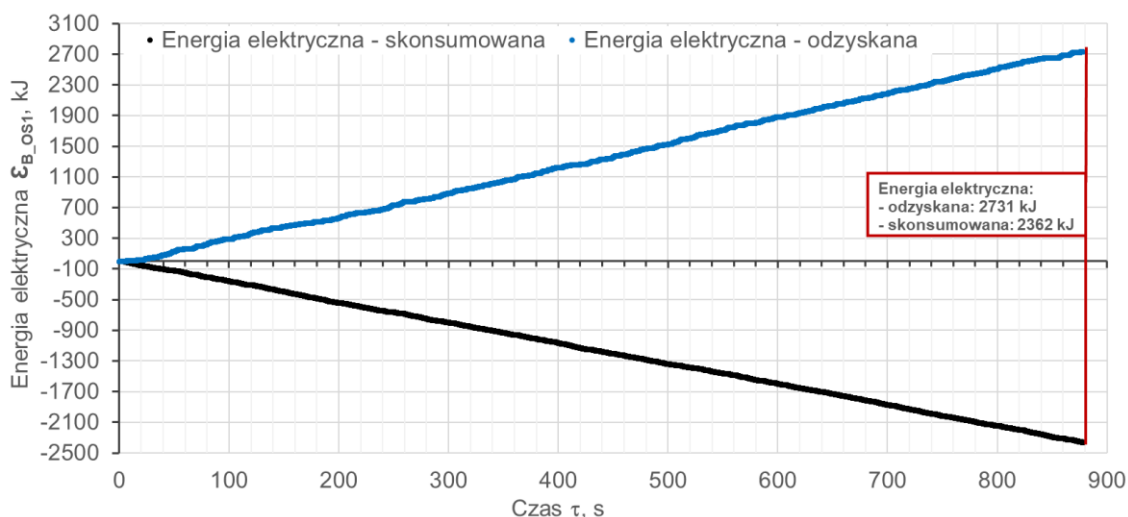


Rysunek 24 Porównanie ilości energii hamowania do ilości energii odzyskanej z hamowania na OS 2

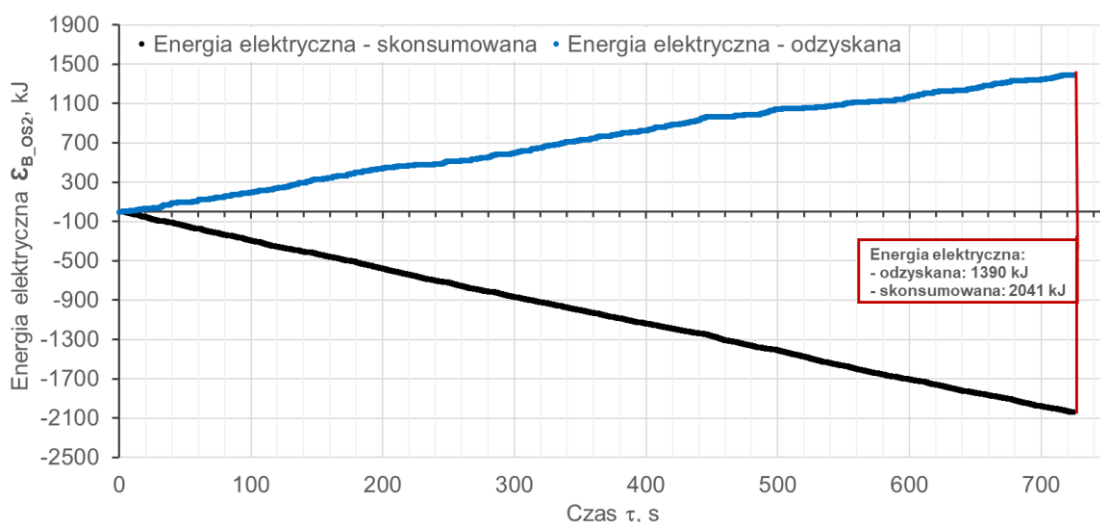
Ilość energii odzyskanej podczas hamowania na OS 1 była wyższa niż w przypadku OS 2, pomimo tego, że to na tym drugim OS ilość energii wykorzystanej na hamowanie była wyższa. Na OS 1, ilość energii odzyskanej podczas hamowania wyniosła około 7 %, natomiast na OS 2, ponad dwa razy mniej, tj. około 3 %. Wynika to z charakterystyki urządzenia BISG, którego sprawność wraz z prędkością obrotową maleje. OS 2, który ma wyższe prędkości średnie przejazdu i w domyśle również wyższe, średnie prędkości obrotowe silnika spalinowego, jest mniej korzystny, aby optymalnie wykorzystać możliwości BISG. Różnica w ilości odzyskanej energii wynika także z intensywności

hamowania, która związana jest także z maksymalną przyczepnością opon do nawierzchni. Podczas intensywnego hamowania jego moc jest duża. Moc BISG jest ograniczona jego konstrukcją, w związku z tym jego udział w energii hamowania jest niewielki. Podczas relatywnie delikatnego hamowania (niewielka moc hamowania), udział mocy i energii wnoszony przez BISG może być znacznie większy. Należy podkreślić że profile prędkości, ilość hamowania, czas trwania hamowania są różne dla różnych OS, co także ma kluczowe znaczenie, jeżeli chodzi o odzyskiwanie energii przez BISG.

W rezultacie powyższych analiz, przystąpiono do bilansu energii baterii trakcyjnej 48 V, aby zweryfikować czy jej pojemność jest wystarczająca. Bilans energii baterii trakcyjnej jest ściśle powiązany z działaniem BISG, które w omawianych symulacjach zostało skonfigurowane na tryb odzyskiwania energii podczas hamowania samochodu. Dzięki temu w żadnej chwili jazdy BISG nie obciąża samochodu powodując pogorszenie osiągnięć, działa jedynie wspomagając i odciążając układ hamulcowy, zachowując wartość wymaganej siły i mocy hamowania, która wynika z profilu trasy. Sterowanie zostało skonfigurowane w taki sposób, że jeżeli wirtualny kierowca naciskał pedał hamulca, to jednocześnie uruchamiany jest BISG w funkcji odzyskiwania energii w maksymalnym, możliwym wynikającym z jego charakterystyki stopniu. Jak już zostało wspomniane, zakres prędkości obrotowej silnika spalinowego w których BISG może pracować w funkcji odzyskiwania energii jest o wiele szerszy niż w przypadku funkcji wspomaganie i sięga około 6600 obr/min silnika spalinowego. Z tego powodu wykorzystanie zastosowanego BISG w funkcji odzyskiwania energii okazało się, zgodnie z założeniami, o wiele bardziej sensowne niż w funkcji wspomaganie. Podsumowanie bilansu energii dla OS 1 i OS 2, zaprezentowano odpowiednio na rysunku 25 i rysunku 26.



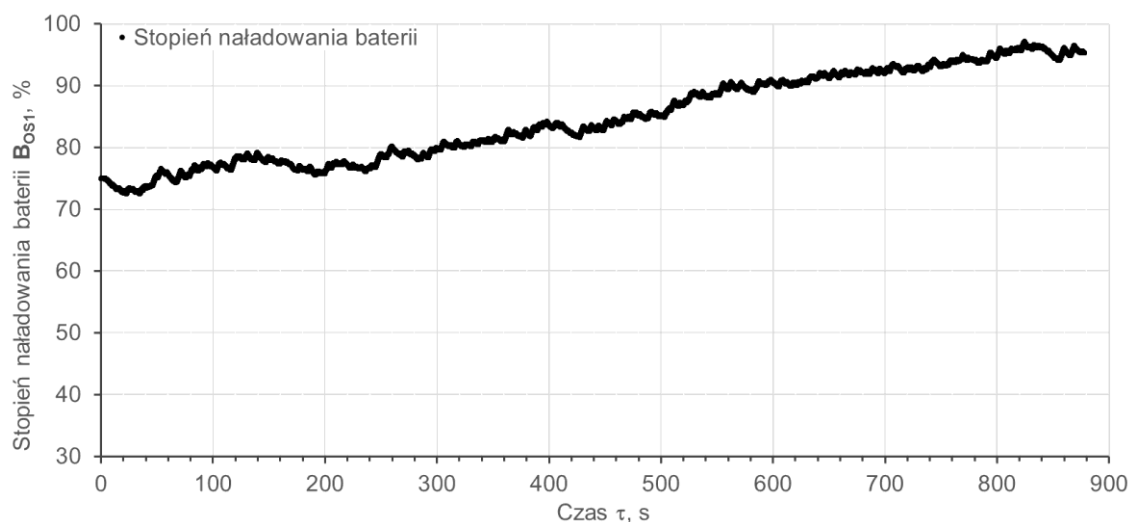
Rysunek 25 Bilans energii baterii 48 V na OS 1



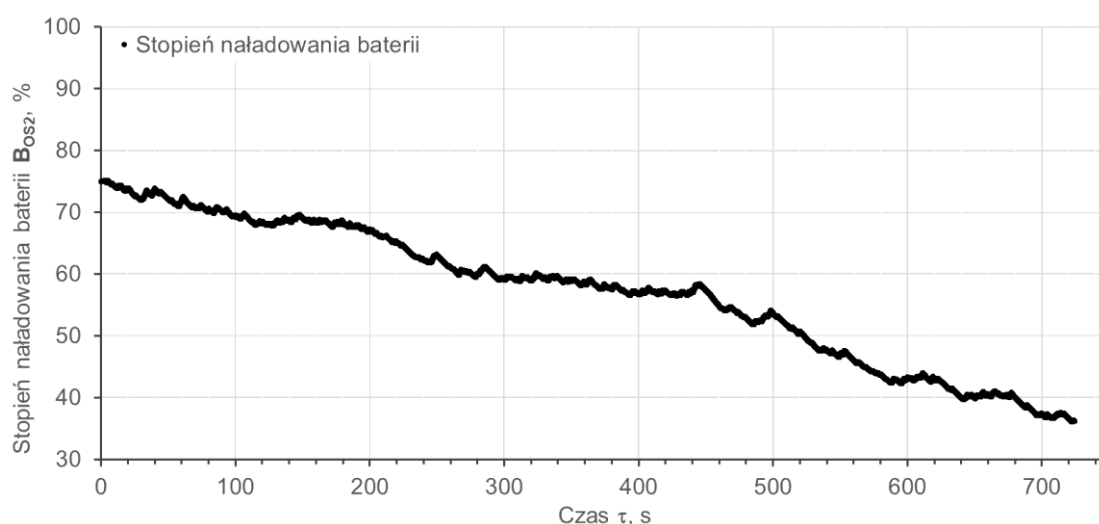
Rysunek 26 Bilans energii baterii 48 V na OS 2

Jak można zauważyć, w obu przeprowadzonych symulacjach OS, odzysk energii elektrycznej przez BISG ma znaczny udział w energii elektrycznej, która jest następnie wykorzystywana do zasilania kompresora elektrycznego. Z uwagi na odmienną charakterystykę OS, różny był procentowy udział energii elektrycznej odzyskanie do zużytej dla każdego z nich. W przypadku OS 1 stosunek ten wynosił 147 %, więc energia odzyskana przez BISG wystarczyła nie tylko na zasilenie kompresora elektrycznego w trakcie jazdy OS, ale również doładowanie baterii trakcyjnej 48 V. Jeżeli chodzi OS 2, to odzysk energii elektrycznej BISG w stosunku do energii elektrycznej zużytej przez kompresor elektryczny wyniósł 86 %. Pozostała część energii do zasilenia kompresora elektrycznego została pobrana z baterii trakcyjnej 48 V.

Stan naładowania baterii trakcyjnej 48 V na OS 1 i OS 2, podsumowano na rysunku 27 i rysunku 28 poniżej.



Rysunek 27 Stopień naładowania baterii trakcyjnej 48 V na OS1



Rysunek 28 Stopień naładowania baterii trakcyjnej 48 V na OS2

W przypadku obu symulowanych OS, stan naładowania baterii trakcyjnej 48 V w momencie rozpoczęcia symulacji wynosił 75 %. Jest to zbieżne z wytycznymi producenta tej baterii, aby zapewnić jej możliwie długą trwałość. Ponadto, producent baterii określa, że stopień naładowania baterii trakcyjnej 48 V w dolnym zakresie nie powinien być niższy 40 %. W realnych warunkach należałoby ograniczyć ładowanie baterii poprzez wyłączenie możliwości doładowania powyżej pewnego stopnia naładowania.

Jak widać na powyższych rysunku, omawiana wcześniej różna charakterystyka OS 1 i OS 2 ma swoje odzwierciedlenie w odzyskanej przez BISG energii elektrycznej i w rezultacie również w stanie naładowania baterii. W przypadku symulacji OS 1, stan naładowania baterii na końcu symulacji był wyższy niż na jej początku i wyniósł około 95 %. Jeżeli chodzi o OS 2, to stan naładowania baterii spadł do około 36 %. W zależności od charakterystyki OS, wykorzystanie energii elektrycznej z baterii trakcyjnej 48 V może być znacząco różne. Jeżeli brać pod uwagę, wyłącznie OS 1, to można wywnioskować, że wybrana bateria trakcyjna 48 V jest przewymiarowana, jeżeli chodzi o jej pojemność. Natomiast, biorąc pod uwagę OS 2, można stwierdzić, że jest wystarczająca.

Należy mieć na uwadze, że w rajdach, wspomniane wyżej względy trwałościowe nie odgrywają pierwszorzędного znaczenia. Jest więc możliwe, w przypadku dłuższych OS (powyżej 20 km) o niekorzystnej do odzyskiwania energii z hamowania charakterystyce, aby przed ich startem przekraczać stopień naładowania baterii na poziomie 75 %. To pozwoliłoby w razie konieczności, zapewnić odpowiedni zapas energii w baterii trakcyjnej 48 V, aby wspomaganie zapewniane przez kompresor elektryczny było możliwe na całej długości Odcinka Specjalnego.

Przy ocenie wybranej baterii trakcyjnej 48 V, należy brać pod uwagę, że bateria trakcyjna 48 V jest produktem pochodzącym z seryjnie produkowanego samochodu, spełniającym kryterium bezpieczeństwa i kosztów, przez co nie ma możliwości łatwego doboru innej. Powyższe oraz fakt, że w trakcie symulacji OS o znacznie różnej konfiguracji jej pojemność okazała się wystarczająca, należy uznać, że wybrana bateria trakcyjna 48 V ma właściwe parametry, aby zastosować ją w hybrydowym układzie napędowym. Na podstawie zasymulowanych OS o różnej charakterystyce i otrzymanego w rezultacie końcowego poziomu naładowania akumulatora można stwierdzić, że proponowana konfiguracja z wybraną baterią powinna po pełnym naładowaniu wystarczyć na większość spotykanych OS w rajdach.

4. Badania eksperymentalne

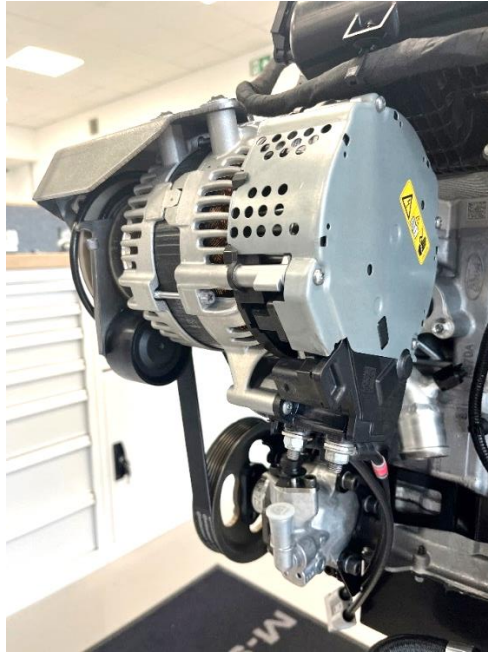
Po przeprowadzeniu jednowymiarowych symulacji numerycznych, przystąpiono do badań eksperymentalnych na hamowni silnikowej. Badania zostały przeprowadzone na hamowni silnikowej w firmie M-Sport Poland sp. z o.o. z wykorzystaniem silnika pochodzącego z samochodu rajdowego oraz wybranego układu hybrydowego. Następnie, przeprowadzono badania samochodu rajdowego, aby określić wpływ systemu ALS podtrzymującego prędkość obrotową turbosprężarki (ang. Anti-Lag System) na zużycie paliwa przez samochód rajdowy i potencjał w zakresie jego ograniczenia przy założeniu wykorzystania kompresora elektrycznego do jego zastąpienia.

4.1 Cel i zakres badań na hamowni silnikowej

Celem badań było uruchomienie układu w warunkach rzeczywistych oraz weryfikacja wyników uzyskanych w jednowymiarowych symulacjach numerycznych. Podczas badań rzeczywistych porównano wpływ systemu podtrzymującego prędkość obrotową turbosprężarki ALS (ang. Anti-Lag System) na parametry energetyczne silnika, również w połączeniu z wybranym układem hybrydowym.

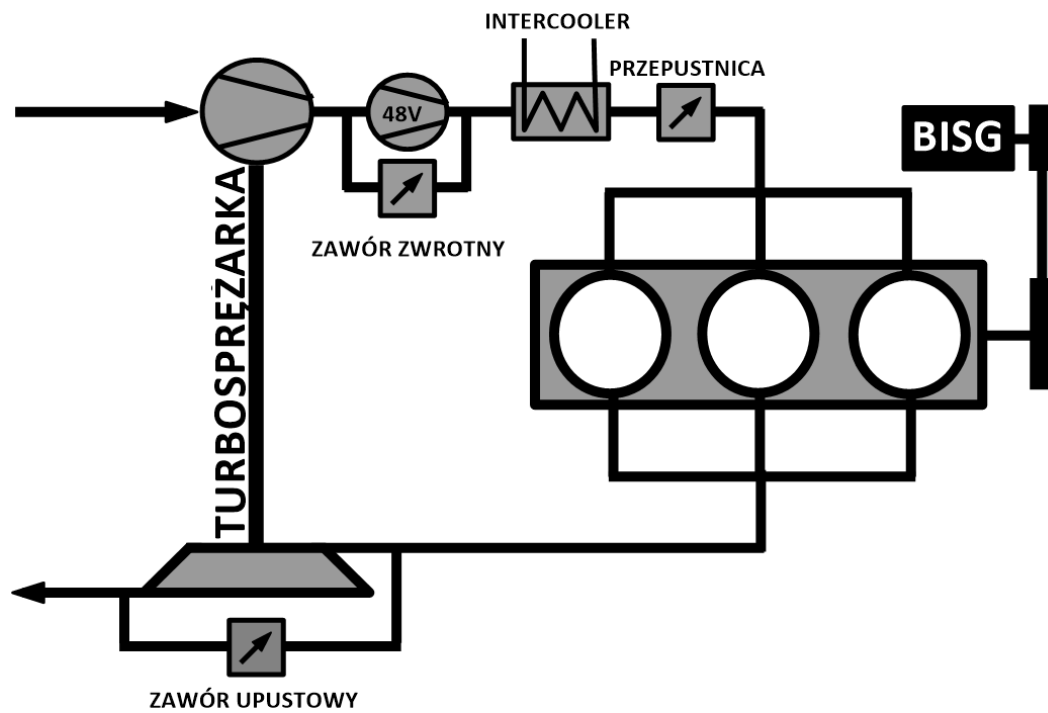
4.2 Opis stanowiska badawczego na hamowni silnikowej

Prace rozpoczęto od zintegrowania elementów układu hybrydowego ze stanowiskiem badawczym. Przede wszystkim konieczne było zamontowanie BISG do silnika spalinowego i połączenie go z nim poprzez pasek napędu osprzętu. Wiązało się to z zaprojektowaniem adaptera mocującego BISG do silnika spalinowego oraz zmianą przebiegu paska napędu osprzętu, jak również jego napinacza. BISG zamontowany na silniku spalinowym zaprezentowano na rysunku 29.



Rysunek 29 BISG zamontowany na silniku spalinowym

Kolejnym krokiem było dostosowanie układu doładowania silnika spalinowego do montażu kompresora elektrycznego w założonym układzie szeregowym, zgodnie ze schematem zaprezentowanym na rysunku 30.



Rysunek 30 Schemat stanowiska

W układzie tym, oprócz samego kompresora elektrycznego i dodatkowych przewodów doładowania, zastosowano również zawór zwrotnego, którego zadaniem było niedopuszczenie do przepływu powietrza doładowanego ze strony kompresora elektrycznego do turbosprężarki, czyli w przeciwnym niż zakładany kierunku. Gdy zintegrowano BISG oraz kompresor elektryczny z silnikiem spalinowym, przystąpiono do stworzenia instalacji elektrycznej 48 V.

Bateria trakcyjna 48 V, jak już zostało określone, jest urządzeniem pochodzącym z produkowanego seryjnie samochodu dostawczego Ford Transit. Posiada ona zintegrowany układ zarządzania pracy baterii oraz chłodzenia, jak również przetwornicę DC-DC, służącą do ładowania baterii 12 V. Po powyższych czynnościach, największym wyzwaniem było stworzenie komunikacji z wykorzystaniem magistrali CAN pomiędzy maszynami i urządzeniami elektrycznymi. Wykorzystując posiadane informacje odnośnie sposobie komunikacji CAN każdego elementu, skonfigurowano je w taki sposób, aby mogły współpracować ze sobą i z silnikiem spalinowym podczas badań eksperymentalnych na hamowni silnikowej. Założono następujące tryby sterowania BISG:

- Sterowania ręcznego, z krokiem co 10 % dostępnego momentu maksymalnego zarówno, jeżeli chodzi o napędzanie jak i odzyskiwanie energii.
- Ładowania, polegający na utrzymywaniu stałego stanu naładowania baterii trakcyjnej 48 V.

W przypadku kompresora elektrycznego ustalono następujące tryby sterowania:

- Wolnych obrotów na poziomie 7500 obr/min.
- Wspomagania silnika spalinowego, które polegało na wykrywaniu różnicy pomiędzy ciśnieniem rzeczywistym i zadany w kolektorze dolotowym oraz położenia przepustnicy powyżej 20 %. Są to założenia analogiczne do przeprowadzonych symulacji w AVL CruiseM.

Działanie układu sterowania za pośrednictwem magistrali CAN, zweryfikowano najpierw poza hamownią silnikową. Stworzone w tym celu stanowisko testowe zaprezentowano na rysunku 31.



Rysunek 31 Stanowisko testowe komunikacji CAN pomiędzy elementami układu hybrydowego

Po pomyślnym skonfigurowaniu działania układu hybrydowego, przygotowano ostatecznie stanowisko do badań eksperymentalnych na hamowni silnikowej. Jego wygląd zaprezentowano na rysunku 32.



Rysunek 32 Stanowisko do badań eksperymentalnych na hamowni silnikowej

Następnie podłączono i skonfigurowano wszystkie urządzenia, wchodzące w skład układu hybrydowego, przystąpiono do wstępnych testów jego działania przy uruchomionym silniku spalinowym. Zweryfikowano przede wszystkim działanie:

- BISG, wraz z układem napinania paska napędu osprzętu,
- kompresora elektrycznego, wraz ze szczelnością układu doładowania,
- baterii elektrycznej 48 V, wraz z instalacją 48 V i przetwornicą DC-DC 12 V.

Tak przygotowany układ był gotowy do przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

4.3 Przeprowadzone badania na hamowni silnikowej

Badania na hamowni silnikowej zostały podzielone na następujące części:

- Rozruch silnika i jego rozgrzanie do temp. 90 °C w przypadku czynnika chłodzącego silnik i 67 °C w przypadku oleju silnikowego.
- Weryfikacja działania wszystkich układów.
- Właściwe badania eksperymentalne.

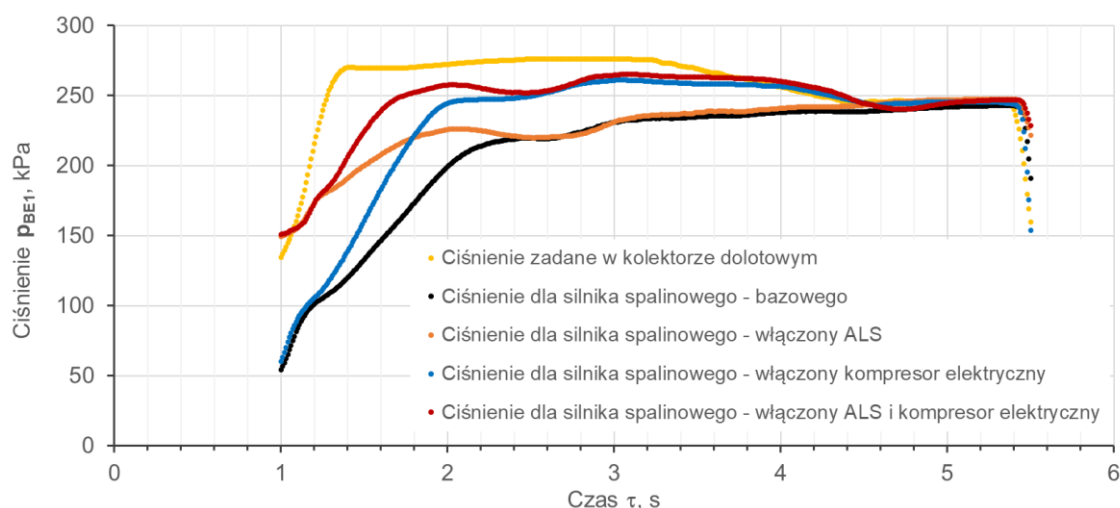
Cykl, który wybrano do przeprowadzenia badań eksperymentalnych jest bardzo zbliżony do tego, który został wykorzystany podczas jednowymiarowych symulacji numerycznych (por. rysunek 14). Cel zdefiniowania takiego cyklu był analogiczny jak podczas przeprowadzania symulacji numerycznych, tj. wymuszenie zjawiska niedoboru ciśnienia w kolektorze dolotowym. Ponadto, kompatybilność cykli umożliwiła porównanie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych z wcześniejszymi symulacjami numerycznymi. Aby ograniczyć błąd pomiarowy, zdecydowano się na 10-krotne powtórzenie cyklu. Następnie wyniki poszczególnych parametrów uśredniono.

Badania eksperymentalne zostały podzielone, uwzględniając różne konfiguracje silnika spalinowego:

- silnik spalinowy w konfiguracji bazowej,
- silnik spalinowy z włączonym systemem ALS,
- silnik spalinowy z włączonym kompresorem elektrycznym,
- silnik spalinowych z włączonym systemem ALS i kompresorem elektrycznym.

W trakcie badań nie skupiano się na wspomaganie silnika spalinowego przez BISG, ponieważ taka konfiguracja okazała się nieefektywna energetycznie, biorąc pod uwagę przeprowadzone symulacje numeryczne.

W wyniku uzyskanych badań uzyskano wartości ciśnienia w kolektorze dolotowym, które zaprezentowano na rysunku 33. Analogicznie do przeprowadzonych symulacji numerycznych, również podczas badań eksperymentalnych pojawiło się zjawisko niedoboru ciśnienia w kolektorze dolotowym względem zadanego.



Rysunek 33 Ciśnienie w kolektorze dolotowym dla różnych konfiguracji silnika spalinowego

Na początek omówione zostaną konfiguracje silnika spalinowego z włączonym i wyłączonym kompresorem elektrycznym, które mają swoje odzwierciedlenie w wykonanych symulacjach numerycznych. W przypadku badań eksperymentalnych nie jest możliwe porównanie wprost czasu dojścia ciśnienia w kolektorze dolotowym do wartości zadanej, natomiast pierwsze ustabilizowanie się wartości ciśnienia w kolektorze dolotowym można przyjąć na 1.9 s w przypadku konfiguracji z włączonym kompresorem elektrycznym i 2.4 s z wyłączonym. Różnica pomiędzy porównywanymi konfiguracjami wynosi około 49 kPa na korzyść rozwiązania z włączonym kompresorem elektrycznym.

Należy jednak zauważyć, że porównanie wyników badań eksperymentalnych do symulacji numerycznych w obu przypadkach z włączonym kompresorem elektrycznym różni się niemal dwukrotnie na korzyść symulacji numerycznych. Może być to spowodowane różnicami w konfiguracji modelu układu doładowania, w szczególności jego objętościami w stosunku do stanowiska na hamowni silnikowej, gdzie konfiguracja układu doładowania była wymuszona przez istniejącą infrastrukturę. Niemniej poprawa przebiegu ciśnienia w kolektorze dolotowym w przypadku badań

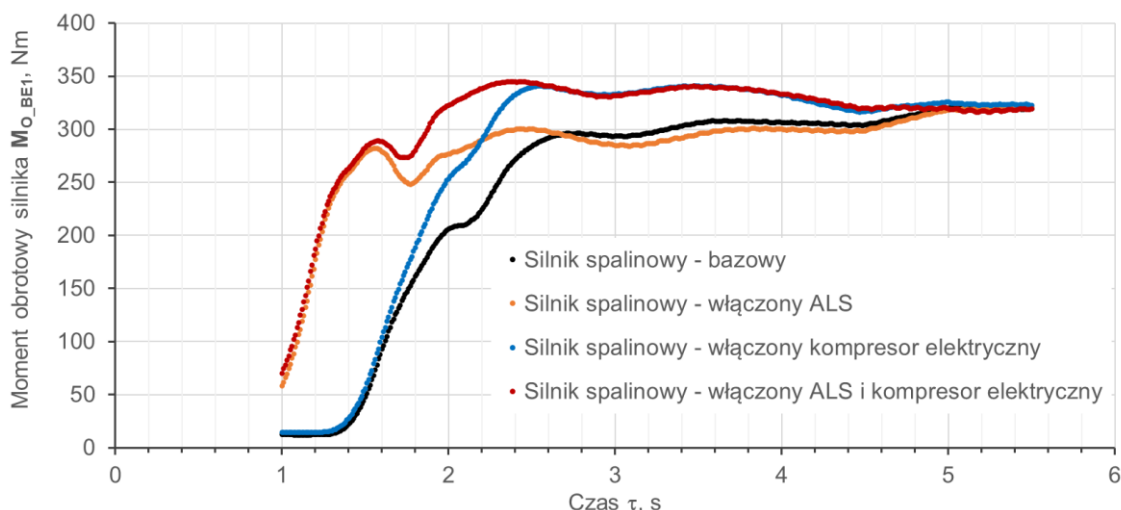
eksperymentalnych jest zauważalna i pokrywa się ilościowo z wnioskami z symulacji numerycznych.

Jak już zostało wspomniane, podczas badań eksperymentalnych było możliwe porównanie silnika spalinowego w konfiguracji z systemem podtrzymania obrotów turbosprężarki - ALS. Niepożądanymi efektami ubocznymi działania tego systemu są:

- generowanie niepotrzebnego do napędu samochodu momentu silnika, który utrudnia kierowcy wycucie samochodu w trakcie hamowania samochodu.
- podwyższenie zużycia paliwa, więc i emisji substancji szkodliwych.
- podwyższenie temperatury silnika i turbosprężarki, generacja naprężeń termicznych, w rezultacie obniżenie ich trwałości.

Jak można zauważyć, system ALS podnosi wyjściową wartość ciśnienia w kolektorze dolotowym. Spowodowane jest to faktem, że system ten zakłada utrzymanie stałych obrotów turbosprężarki podczas gdy kierowca zdejmuje nogę z pedału przyspieszenia. Jak widać na rysunku 33, silnik spalinowy w konfiguracji z włączonym systemem ALS osiąga ten sam poziom ciśnienia w kolektorze dolotowym jak silnik w konfiguracji z wyłączonym ALS o 0,5 s wcześniej, tj. odpowiednio w 1,6 s i 2,1 s badania. Jednocześnie silnik w konfiguracji z włączonym kompresorem elektrycznym w 1,8 s badania zaczyna generować wyższe wartości ciśnienia w kolektorze dolotowym niż w przypadku konfiguracji z włączonym systemem ALS. Tendencja ta następnie utrzymuje się do osiągnięcia przez wszystkie badane konfiguracje stanu ustalonego w zakresie ciśnienia w kolektorze dolotowym. Aby możliwe było zastąpienie w pełni systemu ALS kompresorem elektrycznym, konieczne są jeszcze prace nad opracowaniem takiej strategii sterowania kompresorem elektrycznym, aby uruchamiał się on jeszcze wcześniej niż w badanej konfiguracji. Należy rozważyć w tym zastosowanie algorytmów predykcyjnych. Najlepszy przebieg ciśnienia w układzie dolotowym zapewnia połączenie działania systemu ALS z kompresorem elektrycznym. O ile takie rozwiązanie nie wpływa na wyeliminowanie efektów ubocznych działania systemu ALS, to zapewnia najbardziej dynamiczny i najwyższy przyrost ciśnienia w kolektorze dolotowym, co z kolei jest korzystne oceniając charakterystykę silnika w badanym stanie przejściowym.

Uzyskane w badaniach eksperymentalnych przebiegi momentu obrotowego zaprezentowano na rysunku 34 poniżej. Jak można zauważyć są one ściśle związane z omówionymi przebiegami ciśnienia w kolektorze dolotowym.



Rysunek 34 Porównanie przebiegów momentu obrotowego silnika spalinowego

Porównując konfigurację silnika spalinowego z włączonym i wyłączonym kompresorem elektrycznym, to od 1.6 s ta pierwsza konfiguracja zapewnia bardziej dynamiczny przyrost ciśnienia w kolektorze dolotowym. Największą różnicę w momencie obrotowym, wynoszącą 27 % na korzyść konfiguracji z kompresorem elektrycznym można zauważyć w 2.3 s badania. Konfiguracje wykorzystujące system ALS zarówno z wyłączonym jak i włączonym kompresorem elektrycznym zapewniły najlepszą dynamikę przyrostu momentu obrotowego w przeprowadzonych badaniach. Wartość maksymalnego momentu obrotowego była najwyższa przy konfiguracji z włączonym systemem ALS jak i kompresorem elektrycznym. Porównanie wartości maksymalnych momentu obrotowego dla badanych konfiguracji zaprezentowano w tabeli 27 poniżej.

Tabela 27 Porównanie wartości momentu obrotowego silnika spalinowego

Konfiguracja	Moment max., Nm	Zmiana wartości, %	Moment w 2 s badania, Nm	Zmiana wartości, %
Silnik spalinowy bazowy	320		206	
Silnik spalinowy z włączonym systemem ALS	320	0	276	+ 34
Silnik spalinowy z włączonym kompresorem elektrycznym	341	+ 7	254	+ 23
Silnik spalinowy z włączonym systemem ALS i kompresorem elektrycznym	345	+ 8	323	+ 57

Należy podkreślić, że o ile konfiguracja silnika spalinowego z kompresorem elektrycznym nie zapewnia najszybszego przyrostu momentu obrotowego, to powoduje podwyższenie jego wartości maksymalnej o 7 %. Kompresor elektryczny jest więc korzystnym rozwiązaniem, które po dopracowaniu systemu sterowania, aby uruchamiał się możliwie jak najszybciej, mogłoby zastąpić system ALS. Niemniej, biorąc pod uwagę konfigurację, która zakłada wykorzystanie zarówno kompresora elektrycznego jak i systemu ALS, która pozwoliła uzyskać najbardziej korzystny przebieg i najwyższe wartości momentu obrotowego, to również jest ona uzasadniona do zastosowania w rywalizacji sportowej.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, obliczono średnią sprawność i średnie zużycie paliwa dla jednego cyklu. Względne różnice wartości zaprezentowano w tabeli 28.

Tabela 28 Zmiana wartości średniej sprawności silnika spalinowego i zużycia paliwa w jednym cyklu pomiarowym

Konfiguracja	Zmiana wartości średniej sprawności silnika dla jednego cyklu, %	Średnie zużycie paliwa dla jednego cyklu, %
Silnik spalinowy bazowy	0	0
Silnik spalinowy z włączonym systemem ALS	- 6,1	+ 15,2
Silnik spalinowy z włączonym kompresorem elektrycznym	- 0,9	+ 9,5
Silnik spalinowy z włączonym systemem ALS i kompresorem elektrycznym	- 6,7	+ 25,6

Ponieważ dokładność wyników pomiarów, które zostały wykorzystane do obliczenia sprawności nie była znana, zdecydowano się na przeprowadzenie analizy wrażliwości na podstawie wyników z silnika bazowego. Przyjęto, zmianę każdej wartości wykorzystanej w obliczeniach sprawności w zakresie od - 5 % do + 5 %. Wyniki analizy zaprezentowano w tabeli 29.

Tabela 29 Obliczona zmiana sprawności przy założeniu +/- 5 % zmiany wartości mierzonej

Zmiana wartości	Zmiana sprawności dla pracy w analizowanym zakresie, p.p.	Zmiana sprawności dla wartości opałowej w analizowanym zakresie, p.p.	Zmiana sprawności dla gęstości paliwa w analizowanym zakresie, p.p.	Zmiana sprawności dla konsumpcji paliwa w analizowanym zakresie, p.p.
- 5 %	- 1	+ 1	+ 1	+ 1
+ 5 %	+ 1	- 1	- 1	- 1

Jak można zauważyć błąd pomiaru wartości mierzonej o +/- 5 % wpływał na obliczoną sprawność w zakresie maksymalnie +/- 1 p.p.

Pomimo wyższego zużycia paliwa i bardziej korzystnym przebiegu krzywej momentu obrotowego, konfiguracja silnika spalinowego z kompresorem elektrycznym pozwala na zachowanie niemal identycznej sprawności jak w przypadku silnika bazowego. Najmniej korzystne pod kątem sprawności okazuje się rozwiązanie z systemem ALS i włączonym kompresorem elektrycznym, a następnie z samym systemem ALS. Należy więc zwrócić uwagę, że w zależności od potrzeb kompresor elektryczny może zapewnić najlepszy stosunek sprawności do uzyskanego przebiegu krzywej momentu obrotowego lub najlepszy przebieg krzywej momentu obrotowego w przypadku współdziałania z systemem ALS, albo ograniczenie działania systemu ALS.

Podczas realizacji badań eksperymentalnych dokonywano pomiaru składu spalin analizatorem gazu firmy CAPELEC, typu CAP 3201. Urządzenie to pozwala na pomiar udziałów objętościowych w spalinach suchych takich składników jak: tlenek węgla, węglowodory, tlenek azotu, dwutlenek węgla oraz tlen. Ponadto analizator wyświetla aktualną wartość stosunku nadmiaru powietrza wyznaczoną na podstawie składu spalin wg. algorytmu producenta. Na rysunku 35 pokazano widok na panel tylny oraz przedni analizatora. Dodatkowa na rysunku tym zamieszczono informacje na temat zakresów pomiarowych oraz dokładności pomiarowej urządzenia. Próbkę spalin do analizy pobierana była w końcowej części przewodu odprowadzającego spalin z silnika. Skład spalin mierzono każdorazowo w trakcie realizacji danego cyklu badawczego, a następnie dokonywano obliczeń uśrednionych wartości dla każdej z mierzonych wielkości w zakresie czasu realizowanego cyklu.



CAP3201

Moduł pomiarowy CO, CO ₂ , HC, (detekcja nierozproszonego promieniowania podczerwonego)	Moduł pomiarowy O ₂ (czujnik elektrochemiczny)
Wielkości mierzone oraz zakres pomiarowy	Dokładność pomiarowa wartości odczytanej
CO, 0 ÷ 10,5%, obj.	CO, ±3%
CO ₂ , 0 ÷ 21%, obj.	CO ₂ , ±4%
HC, 0 ÷ 20 000 ppm, obj. (równoważnik C ₆ H ₁₄)	HC, ±5%
NO _x , 0 ÷ 10 000 ppm, obj.	NO _x , ±1%
O ₂ , 0 ÷ 21%, obj.	O ₂ , ±3%

Rysunek 35 Specyfikacja modułu pomiarowego składu spalin

Na podstawie zebranych uśrednionych wartości poszczególnych składników spalin dla analizowanych wariantów konfiguracyjnych (bazowego, ALS, kompresora elektrycznego i ALS + kompresora elektrycznego), dokonano obliczeń wielkości emisji substancji toksycznych dla przeprowadzonego testu badawczego. Obliczenia wykonano w oparciu o stechiometrię spalania realizując bilans pierwiastka węgla. Skład elementarny paliwa (benzyny silnikowej) przyjęto w oparciu o literaturę [83]. W pierwszej kolejności obliczono jednostkową zawartość pierwiastka węgla w paliwie:

$$n'_c = \frac{c}{M_c}, \text{ kmol}_c / \text{kg}_{pal} \quad (2)$$

Gdzie, w (2):

- c – udział masowy pierwiastka węgla w paliwie, $\text{kg}_c / \text{kg}_{pal}$,
- M_c – masa molowa pierwiastka węgla, kg / kmol .

Następnie zakładając, że węgiel z paliwa znajduje się w spalinach w postaci CO₂, CO oraz C_mH_n, można zapisać:

$$n'_c = n''_{CO_2} + n''_{CO} + n''_{C_m H_n}, \text{ kmol} / \text{kg}_{pal} \quad (3)$$

Gdzie, w (3):

- $n''_{CO_2}, n''_{CO}, n''_{C_m H_n}$ – jednostkowe ilości poszczególnych składników spalin zawierających węgiel, $\text{kmol} / \text{kg}_{pal}$,

Ponadto uwzględniając, że dokonywano pomiaru spalin suchych, poszczególne składniki spalin zawierające pierwiastek węgiel wynoszą:

$$[CO_2] = \frac{n''_{CO_2}}{n''_{ss}}; [CO] = \frac{n''_{CO}}{n''_{ss}}; [HC] = \frac{n''_{C_6H_{14}}}{n''_{ss}} \quad (4)$$

Gdzie, w (4):

- $[CO_2], [CO], [HC]$ – udziały molowe w spalinach suchych składników zawierających węgiel, $kmol/kmol_{ss}$,
- n''_{ss} – jednostkowa ilość spalin suchych, $kmol_{ss}/kg_{pal}$.

Łącząc równania (2) i (4), uzyskuje się równanie na jednostkową ilość spalin suchych

$$n''_{ss} = \frac{n'_c}{[CO_2]+[CO]+[HC]}, \quad kmol_{ss}/kg_{pal} \quad (5)$$

Następnie możliwe jest określenie jednostkowej ilości poszczególnych składników spalin, poprzez wykorzystanie równań (4) i (5) oraz uwzględniając dodatkowo, że udział NO w spalinach suchych jest zdefiniowany analogicznie jak wielkości określone w równaniu (4). Po dokonaniu przekształceń oraz wprowadzając do uzyskanej formuły masę molową poszczególnych składników spalin, otrzymuje się zależność na jednostkową ilość kolejnego składnika spalin:

$$e_i = \frac{c[i]M_i}{([CO_2]+[CO]+[HC])M_c}, \quad kg_i/kg_{pal} \quad (6)$$

Gdzie, w (6):

- $[i]$, $kmol_i/kmol_{ss}$,
- M_i , $kmol_i/kg_i$ – udział molowy oraz masa molowa „i” – tego składnika spalin suchych dla którego wykonywane są obliczenia.

Na rysunkach od 36 do 38 zaprezentowano wyniki obliczeń całkowitej emisji HC, NO_x oraz CO dla każdego z rozpatrywanych wariantów w zakresie trwania cyklu pomiarowego. Dla węglowodorów wielkość emisji obliczono jest w odniesieniu do C₆H₁₄, natomiast dla tlenków azotu w obliczeniach przyjęto masę molową NO₂.

W obliczeniach wykorzystano równanie (6) mnożąc uzyskaną wartość przez ilość paliwa spalonego w trakcie realizacji cyklu badawczego:

$$E_i = m_p e_i, \text{ kg}_i/\text{cykl} \quad (7)$$

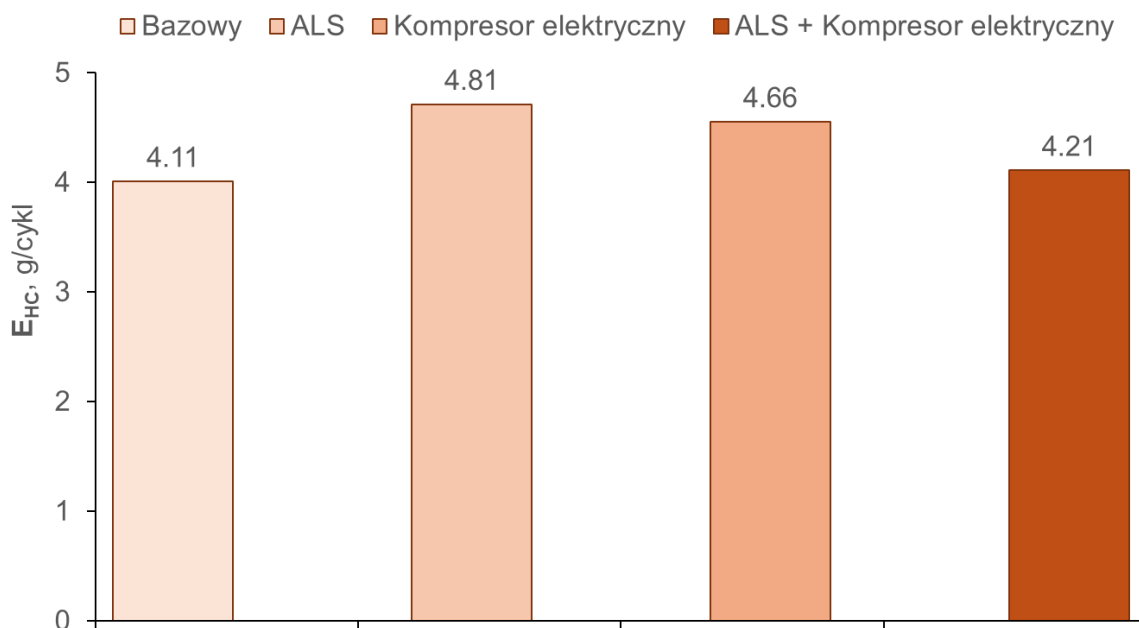
Gdzie, w (7):

- m_p , kg/cykl – ilość paliwa zużyta przez silnik spalinowy w trakcie realizacji cyklu badawczego na hamowni silnikowej.

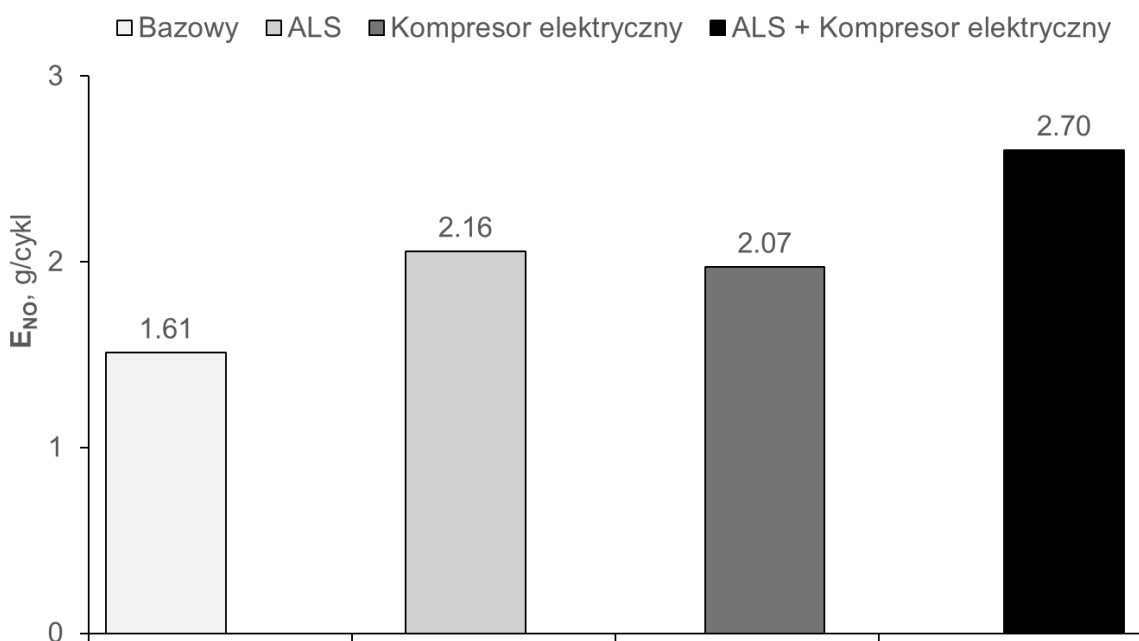
Na podstawie równań (6) i (7) można również określić emisję CO₂. Przy czym określając emisję dwutlenku węgla na podstawie przeprowadzonych pomiarów należy zauważyć, że im więcej jest tlenu węgla oraz węglowodorów w spalinach silnika tym niższa jest zawartość CO₂ w spalinach. Dodatkowo skład spalin mierzony był na wylocie z silnika spalinowego, natomiast w pojazdach Rally3, na wylocie z silnika spalinowego montowany jest trójfunkcyjny konwerter katalityczny spalin, który w pewnym stopniu pozwala na redukcję emisji CO, HC oraz NO. Pomimo, że silnik spalinowy tego pojazdu spala mieszanekę podstechiometryczną to w sytuacjach przejściowych (zmiana położenia przepustnicy) w spalinach pojawia się wolny tlen zdolny do częściowego utlenienia CO oraz HC. W związku z tym obliczenia emisji tlenu węgla wykonano dla założenia całkowitego i zupełnego spalania paliwa w trakcie realizacji każdego z cykli badawczych opierając się na ilości zużycia paliwa w trakcie cyklu oraz wykorzystując zależność (2). Po uwzględnieniu przytoczonych założeń ilość dwutlenku węgla można określić na podstawie:

$$E_{CO_2} = m_p c \frac{M_{CO_2}}{M_c}, \text{ kg}_{CO_2}/\text{cykl} \quad (8)$$

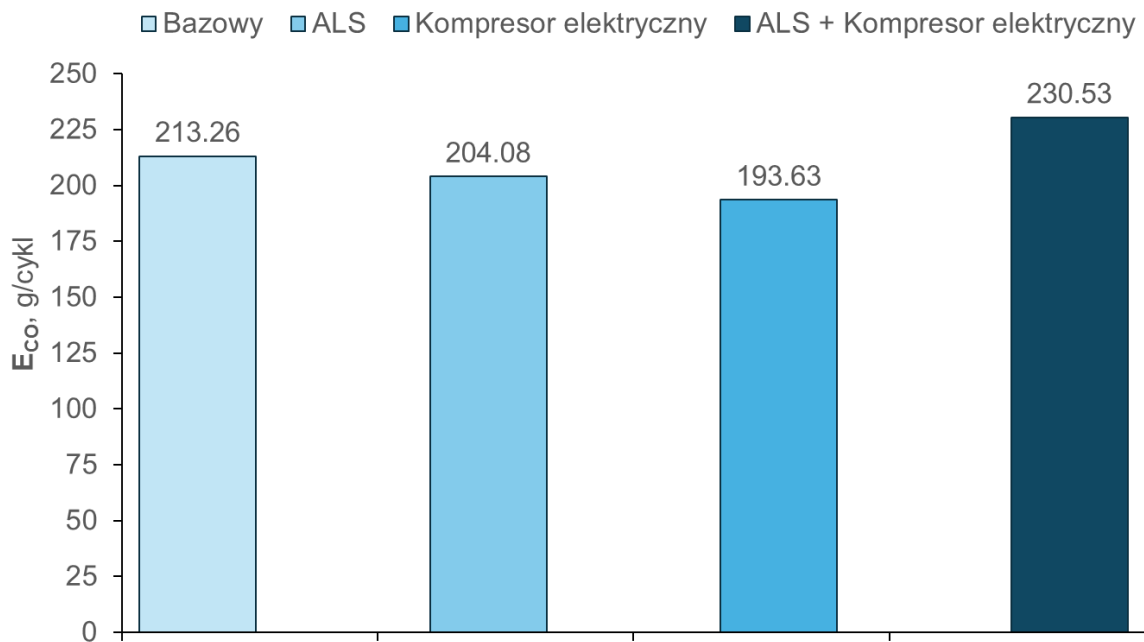
Wyniki obliczeń całkowitej emisji CO₂, zaprezentowano na rysunku 39.



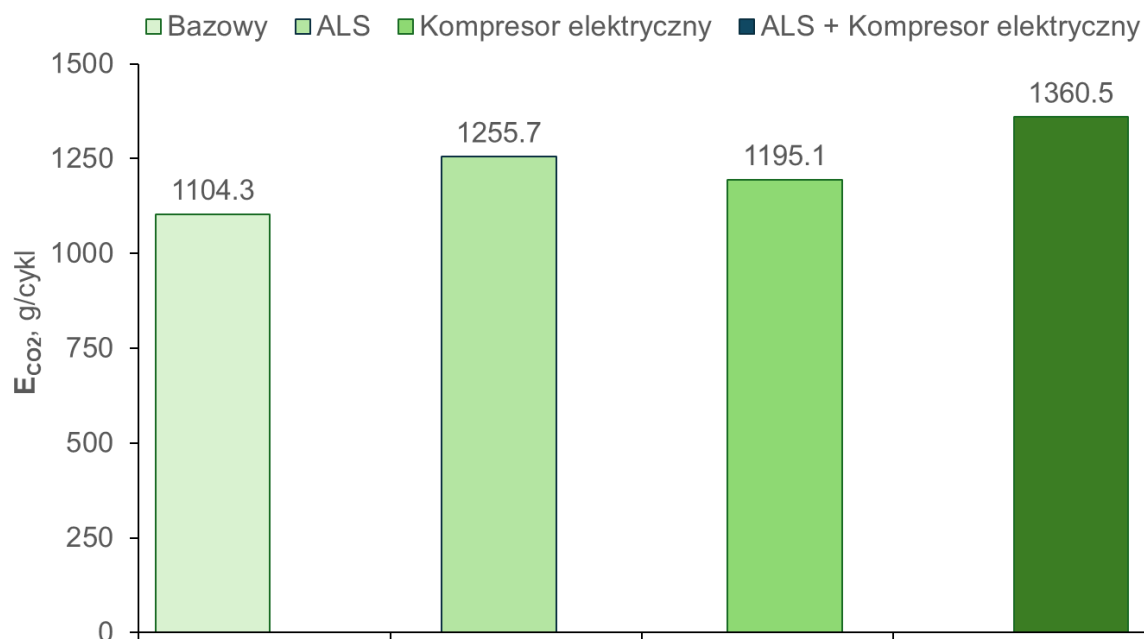
Rysunek 36 Emisja węglowodorów w analizowanym cyklu badawczym



Rysunek 37 Emisja tlenków azotu w analizowanym cyklu badawczym



Rysunek 38 Emisja tlenku węgla w analizowanym cyklu badawczym



Rysunek 39 Emisja dwutlenku węgla w analizowanym cyklu badawczym

Jak można zauważyć, w przypadku każdego z analizowanych przypadków konfiguracja silnika spalinowego z kompresorem elektrycznym była bardziej korzystna od konfiguracji z włączonym systemem ALS. W przypadku analizowanego składu CO, okazała się nawet bardziej korzystna od konfiguracji bazowej silnika spalinowego. Mając

to na uwadze, należy stwierdzić, że zastosowanie kompresora elektrycznego przyczynia się do ograniczenia występowania substancji szkodliwych w składzie spalin silnika rajdowego w porównaniu do konfiguracji w włączonym systemem ALS. Ciekawą obserwacją jest, że w przypadku udziałów HC, najbardziej korzystną konfiguracją okazała się ta z włączonym zarówno kompresorem elektrycznym jak i systemem ALS.

4.4 Cel i zakres badań samochodu rajdowego w warunkach rzeczywistych

OS charakteryzują się odmienną charakterystyką niż odcinki dojazdowe oraz sportowym wykorzystaniem samochodu rajdowego. Jazda odcinkiem specjalnym jest jazdą sportową na czas, więc zawodnicy starają się uzyskać możliwie jak najkrótszy czas przejazdu. W takich warunkach silnik samochodu rajdowego pracuje praktycznie cały czas pod pełnym obciążeniem. W takim przypadku konsumpcja paliwa jest znacznie wyższa niż podczas jazdy odcinkiem dojazdowym. Ponadto, podczas jazdy OS włączony jest system ALS, który ma za zadanie utrzymywać stałe, wysokie obroty turbosprężarki podczas odjęcia nogi z pedału przyspieszenia [84]. Jak już zostało wspomniane, oprócz tego, że niewątpliwie pozytywnie wpływa on na osiągi samochodu rajdowego, to jednocześnie ma negatywny wpływ na konsumpcję paliwa i wzrost temperatury pracy silnika w szczególności, gdy silnik posiada zintegrowany z głowicą kolektor wydechowy.

Celem przeprowadzenia badań w warunkach rzeczywistych było określenie wpływu systemu ALS na zużycie paliwa samochodu rajdowego oraz główne temperatury pracy silnika. W tym celu wytypowano trasę o charakterze OS i przy pomocy systemu akwizycji danych zamontowanego w samochodzie rejestrowano takie parametry jak:

- prędkość samochodu,
- zużycie paliwa,
- temperaturę czynnika chłodniczego silnika,
- temperaturę oleju silnikowego.

Badania zostały wykonane w następujących konfiguracjach samochodu rajdowego:

- z wyłączonym systemem ALS,
- z włączonym systemem ALS.

4.5 Opis samochodu rajdowego oraz trasy

Do badań wykorzystano samochód rajdowy Ford Fiesta ST Rally3, który zaprezentowano na rysunku 40.



Rysunek 40 Ford Fiesta ST Rally3

Specyfikację powyższego samochodu określono w tabeli 30.

Tabela 30 Podstawowe dane techniczne Forda Fiesty ST Rally3

Marka i model pojazdu	Ford Fiesta ST Rally3
Silnik	1,5-litrowy turbodoładowany silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem.
Moc, kW	175
Maksymalny moment obrotowy, Nm	410
Napęd	4WD
Masa, kg	1 210
Skrzynia biegów	Pięciobiegowa, sekwencyjna

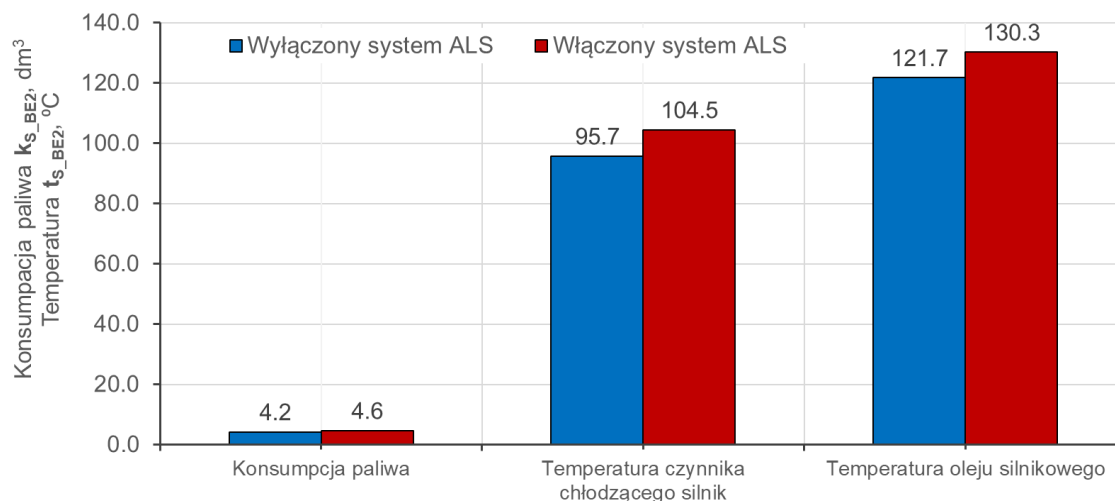
Trasę odcinka testowego dobrano w taki sposób, aby występowały na nim dynamiczne zmiany prędkości, które odwzorowują rzeczywisty odcinek specjalny. Zdecydowano się na wybór trasy o długości 2,45 km. Na rysunku 41 zaprezentowano przebieg prędkości samochodu w funkcji drogi oraz wykorzystywane przełożenia skrzyni biegów na trasie odcinka testowego. Kierowca w każdym przejeździe miał za zadanie przejechać odcinek testowy czterokrotnie i możliwie powtarzalnie.



Rysunek 41 Przebieg prędkości i przełożenia skrzyni biegów odcinka testowego

4.6 Przeprowadzone badania samochodu rajdowego

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano dane, które zostały zarejestrowane w systemie akwizycji danych samochodu rajdowego. Po ich analizie oraz uśrednieniu, uzyskano wyniki konsumpcji paliwa oraz temperatur czynnika chłodzącego silnik oraz oleju silnikowego, które zaprezentowano na rysunku 42.



Rysunek 42 Uśrednione wyniki z badań samochodu rajdowego na odcinku testowym

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają, że gdy system ALS jest włączony, to konsumpcja paliwa samochodu rajdowego jest wyższa o około 10%. W przypadku temperatur czynnika chłodzącego silnik i oleju silnikowego, to są one wyższe przy

włączonym systemie ALS. Z powyższego można wywnioskować, że system ALS powoduje podwyższenie masy samochodu rajdowego, ponieważ pomiędzy strefami tankowania musi przewozić więcej paliwa. Zakładając, że w skrajnym przypadku konieczne będzie zatankowanie zbiornika paliwa do pełna (60 dm^3), przyjmując paliwo Pb98, to masa samochodu rajdowego może być wyższa o około 4,5-5,0 kg. Ponadto wyższe temperatury pracy silnika mogą negatywnie wpływać na jego trwałość. Zmniejszają również margines bezpieczeństwa w przypadku udziału w rajdach w gorących strefach klimatycznych.

Przeprowadzone analizy potwierdzają, że emisje substancji szkodliwych całej stawki RSMP na odcinkach dojazdowych rajdu są marginalne porównując je do emisji substancji szkodliwych pochodzącej z całego transportu drogowego w Polsce. W przypadku CO stanowi 0.09 ‰ tej emisji, a NOx 0.02 ‰ [84]. Można więc stwierdzić, że rajdy nie wpływają w znaczący sposób na podwyższenie emisji substancji szkodliwych. Należy jednak czynić starania, aby emisja substancji szkodliwych z samochodów rajdowych była coraz niższa.

Dzięki zastosowaniu kompresora elektrycznego, możliwe byłoby ograniczenie działania systemu ALS w samochodzie rajdowym, co spowodowałoby osiągnięcie zakładanego celu, tj. ograniczenia konsumpcji paliwa na OS. W konsekwencji emisja substancji szkodliwych przez samochód rajdowy podczas jazdy OS w wartościach bezwzględnych również powinna być niższa.

5. Bezpieczeństwo użytkowania oraz zmiany w przepisach

Aby możliwe było wdrożenie układu w sposób zapewniający możliwie wysoki poziom bezpieczeństwa, konieczne jest zidentyfikowanie grup osób, które mogą mieć kontakt z samochodem rajdowym wyposażonym w opracowywany układ hybrydowy oraz określić możliwy stopień takiego kontaktu. Należy również uwzględnić charakterystykę rajdów, która zakłada, że rywalizacja sportowa odbywa się na zamkniętych odcinkach dróg publicznych, w związku z tym procedury muszą być opracowane w taki sposób, aby ich wdrożenie było możliwe niemalże w każdych warunkach. Oprócz kwestii bezpieczeństwa, konieczne jest również określenie propozycji zmian w przepisach FIA, które pozwolą na wykorzystanie opracowywanego hybrydowego układu napędowego w rajdach, przede wszystkim w grupie FIA Rally3. Ponadto, należy zweryfikować możliwość dopuszczenia do ruchu drogowego samochodu

rajdowego, mając na uwadze, że odcinki dojazdowe pomiędzy Odcinkami Specjalnymi (OS) odbywają się w normalnym ruchu drogowym.

5.1 Plan stworzenia procedur bezpieczeństwa

Jednym z głównych założeń prowadzonego projektu było, aby zastosowanie wybranego układu hybrydowego w jak najmniejszym, możliwym stopniu wpływało na zwiększenie zagrożeń, które może powodować. Jednym z aspektów niniejszej pracy jest przede wszystkim zapewnienie możliwie najwyższych norm bezpieczeństwa, które są konieczne w wymagającym środowisku sportów samochodowych. Potęgowane jest to również przez fakt, że rajdy jako sport wyczynowy w którym rywalizacja odbywa się przy dużych prędkościach na OS, są narażone na wyższe ryzyko występowania wypadków. Ponadto, w przeciwieństwie do zawodów sportowych rozgrywanych na obiektach zamkniętych, jak np. wyścigi samochodowe, gdzie rywalizacja odbywa się na odpowiednio przygotowanych torach, rajdy samochodowe rozgrywane są na zamkniętych odcinkach dróg publicznych. W związku z tym nie jest możliwe zabezpieczenie całości trasy na takim poziomie w jaki odbywa się to na odpowiednio przygotowanym torze wyścigowym. Mając to na uwadze samochód rajdowy musi być tak przygotowany, aby zapewnić ochronę załodze, z uwzględnieniem braku dedykowanej infrastruktury. Ponadto należy brać pod uwagę, że styczność z nim mogą mieć przypadkowi, znajdujący się przy trasie OS kibice oraz osoby nieświadome odbywającego się rajdu. Dodatkowo, rajdy samochodowe odbywają się nierzadko w trudnych warunkach atmosferycznych, w których muszą być również serwisowane w improwizowanych warunkach np. pod namiotem. Dochodzi więc aspekt zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa również dla serwisantów takich samochodów.

Wprowadzane rozwiązanie musi zapewniać możliwie wysoki poziom bezpieczeństwa. Ponadto, wszelkie dodatkowe procedury powinny być maksymalnie proste i przejrzyste, tak, aby nawet osoba niezwiązana z techniką samochodową mogła w łatwy sposób wykryć potencjalne zagrożenie związane z zastosowaną technologią.

W pierwszej kolejności przeanalizowano istniejące przepisy FIA dotyczące bezpieczeństwa elektrycznego. Art. 251 Klasyfikacje i definicje Zał. J do MKS FIA określa, że porażenie prądem, będące zagrożeniem dla życia, zachodzi przy źródle zasilania o napięciu wyższym niż 60 V DC lub 30 V AC rms (wartości zaczerpnięte z ISO/DIS-3.2:2010). Art. 253 Wyposażenie Bezpieczeństwa dla Samochodów Grup N, A

(z Rozszerzeniami) i R-GT Zał. J do MKS określa z kolei wymogi odnośnie do bezpieczeństwa pojazdów napędzanych elektrycznie. Są to m. in następujące wymagania:

- Przyjęcie jako minimalnego poziomu zabezpieczeń tego, który obowiązuje w samochodach produkowanych seryjnie.
- Przewody elektryczne i wyposażenie elektryczne muszą zostać zabezpieczone przed potencjalnymi uszkodzeniami mechanicznymi jak i ryzykiem pożaru oraz porażenia prądem.
- Ochrona przed kurzem i wodą jako min. IP 55, chyba że w przepisach szczegółowych określono inaczej.
- Pakiet baterii musi być wykonany z ogniw ze składem chemicznym zaakceptowanym przez FIA.

Dużą zaletą przyjętych rozwiązań jest fakt, że są one stosowane również w samochodach produkowanych seryjnie. Powoduje to, że zarówno BISG, kompresor elektryczny jak i pakiet baterii z BMS zostały już zweryfikowane pod kątem bezpieczeństwa i nie muszą przechodzić dodatkowych badań homologacyjnych. Spełniony jest wymóg art. 253 Zał. J do MKS FIA, który jako minimum określa poziom zabezpieczeń obowiązujących samochody seryjne.

Pomimo braku szczegółowych wymogów w przepisach FIA dla napięcia poniżej 60 V DC oraz faktu wykorzystania komponentów pochodzących z produkcji seryjnej, to konieczne jest określenie podstawowych zasad bezpiecznego korzystania z części elektrycznej układu hybrydowego. Przede wszystkim konieczne jest zidentyfikowanie potencjalnych zagrożeń. Wybranie technologii mHEV opartej na napięciu zasilania 48 V jest korzystne pod względem ograniczania ryzyka, ponieważ z definicji jest to napięcie tzw. bezpieczne. Oczywiście w dalszym ciągu nie wyklucza to zagrożeń związanych z prądem elektrycznym, w szczególności biorąc pod uwagę:

- Wysokie natężenia prądu występujące w takich układach, związane z tym ryzyko nagrzewania się połączeń, w szczególności uszkodzonych, prowadzące do zwiększonego ryzyka oparzeń i pożarów.
- Zastosowanie pakietu baterii Li-Ion, które w przypadku pożaru są trudne do ugaszenia jak również emitują duże ilości substancji szkodliwych.

Przede wszystkim, należy określić grupy docelowe informacji nt. zasad bezpieczeństwa w odniesieniu do alternatywnego układu napędowego. Biorąc pod uwagę

strukturę organizacyjną rajdu samochodowego oraz zespołu, możemy wyróżnić następujące grupy docelowe:

- Załoga samochodu, tj. kierowca i pilot,
- Inżynierowie i mechanicy,
- Osoby oficjalne i sędziowie,
- Służby ratunkowe,
- Kibice,
- Pozostałe osoby (Media, VIP, etc.).

Każdą z wyżej wymienionych grup można podzielić wg stopnia możliwości kontaktu z samochodem hybrydowym w sytuacji krytycznej, tj. uszkodzenia układu elektrycznego.

- Stopień 1. - Kontakt możliwy, konieczne szkolenie w zakresie postępowania z zagrożeniami dotyczącymi bezpieczeństwa elektrycznego, pożarowego i chemicznego (pakiet baterii),
- Stopień 2. - Kontakt konieczny, konieczne szkolenie w zakresie neutralizacji zagrożenia dotyczącego bezpieczeństwa elektrycznego, pożarowego i chemicznego (pakiet baterii),
- Stopień 3 - Kontakt niepożądany, konieczne szkolenie w zakresie identyfikacji zagrożeń, ich unikania oraz przekazywania informacji nt. zdarzenia do kompetentnych osób.

Przyporządkowując powyższe stopnie do każdej z ról, otrzymamy strukturę określoną w tabeli 31.

Tabela 31 Określenie zakresu modułów szkoleniowych w zależności od grupy docelowej

Funkcja/Stopień kontaktu	1	2	3
Załoga samochodu	X		
Inżynierowie i mechanicy	X		
Osoby oficjalne i sędziowie	X		
Służby ratunkowe		X	
Kibice			X
Pozostałe osoby			X

Z powyższego wynika konieczność opracowania trzech różniących się poziomów instrukcji i szkoleń dotyczących zachowania w stosunku do sytuacji związanej z układem elektrycznym samochodu hybrydowego.

Przygotowanie konkretnych i szkoleń uzależnione jest od końcowej integracji układu z samochodem, dlatego poniżej określony zostanie zakres instrukcji i szkoleń do przygotowania w zależności od grupy docelowej i stopnia możliwego kontaktu z układem hybrydowym. Dla odpowiednich stopni kontaktu należy:

- 1. należy przygotować szkolenie oraz instrukcję w zakresie:
 - Budowa układu hybrydowego, lokalizacja elementów w samochodzie i podstawowe parametry,
 - Potencjalne zagrożenia związane z układem hybrydowym, tj. ryzyko rażenia prądem, niekontrolowanego wzrostu temperatury w baterii trakcyjnej, który może skutkować emisją dymu i gazów szkodliwych, pojawieniem się płomieni i wydzielaniem dużych ilości ciepła (run-out baterii),
 - Zasady postępowania w przypadku wystąpienia zagrożenia
- 2. należy przygotować szkolenie oraz instrukcję w zakresie analogicznym do 1, z uzupełnieniem o postępowanie ratownicze z uwzględnieniem układu hybrydowego.
- 3. należy przygotować wyłącznie instrukcję określającą potencjalne zagrożenia i zasady postępowania w przypadku wystąpienia zagrożenia. Instrukcja powinna być rozpowszechniana za pośrednictwem wszystkich dostępnych kanałów komunikacji, aby dotrzeć do jak największej grupy osób.

W przypadku instalacji elektrycznych w których występuje tzw. napięcie bezpieczne, tj. poniżej 60 V DC, największym zagrożeniem jest pożar baterii, który powoduje emisję dużych ilości dymu, substancji szkodliwych dla środowiska oraz trujących i ciepła. Ryzyko porażenia prądem jest przy tym napięciu zasilania niższe niż w przypadku instalacji wysokiego napięcia.

5.2 Propozycja zmian przepisów grup rajdowych dla FIA

Jak już zostało wspomniane, w 2020 roku FIA zapowiedziała plan wprowadzanie układów hybrydowych do rajdów. Zaplanowano działania zaprezentowano na Rysunku 7. Należy podkreślić, że niniejsza praca ma na celu wdrożenie hybrydowego układu napędowego do samochodu grupy FIA Rally3, co wpisuje się w przyjęte przez FIA założenia. Zaproponowany układ hybrydowy powinien spotkać się więc z aprobatą FIA, jako wpisujący się w zaplanowany rozwój technologii układów napędowych w rajdach.

Alternatywny układ napędowy, będący przedmiotem niniejszej pracy jest przewidziany do wdrożenia w samochodach rajdowych grupy Rally3. Jak już zostało

wspomniane, grupa samochodów Rally3 jest przeznaczona głównie dla młodych kierowców, którzy rozpoczynają swoją karierę w rajdach samochodowych. Z tego powodu, w przypadku tych samochodów, oprócz osiągnięć duże znaczenie odgrywają również koszty zakupu samochodu oraz jego serwisowania. Jak już zostało wspomniane jest to jeden z czynników, dla których układ mHEV jest obecnie optymalnym rozwiązaniem, jeżeli chodzi o wdrażanie alternatywnych układów napędowych do tej grupy samochodów rajdowych. Biorąc pod uwagę strukturę przepisów technicznych FIA, to dzielimy je następująco:

- Przepisy Homologacyjne dla danej grupy samochodów FIA,
- Przepisy Szczegółowe określone dla danej grupy art. Zał. J do MKS FIA.

Rozpoczynając proces budowy samochodu rajdowego od samochodu produkowanego seryjnie, należy przede wszystkim wybrać taki model samochodu, który powstał w ilości przynajmniej 2500 egzemplarzy co do zasady w przeciągu 12 kolejnych miesięcy. Ponadto, wybrany model samochodu musi pochodzić z rodziny samochodu (zbiór wszystkich modeli), wyprodukowanych w ilości przynajmniej 25 000 egzemplarzy również co do zasady w przeciągu 12 kolejnych miesięcy. Takie zasady sprawiają, że budowanie samochodów wyłącznie do celów sportowych staje się nieopłacalne i niejako przymuszają one producentów samochodów rajdowych do wykorzystania produktów seryjnych jako bazowe. Z małymi wyjątkami, producenci tworzą więc samochody rajdowe bazując na samochodach produkowanych seryjnie, dostosowując je wykorzystując możliwości stwarzane przez przepisy danej grupy samochodów FIA. Przepisy homologacyjne określają stopień możliwych do wykonania modyfikacji w samochodzie, które następnie muszą zostać opisane w formularzu homologacyjnym zatwierdzanym przez FIA. Te modyfikacje samochodu, w większości przypadków nie podlegają łatwym zmianom, ponieważ co do zasady ilość dozwolonych modyfikacji części już homologowanych jest mocno ograniczona. Takie działanie również ma na celu ograniczenie tworzenia zbyt wielu specyfikacji samochodu, biorąc pod uwagę możliwe warunki na danym rajdzie. Dawałoby to zapewne przewagę sportową, dzięki dostosowaniu specyfikacji samochodu do konkretnych warunków, ale zmuszałoby jednocześnie zawodników do posiadania wielu zestawów części tworzących daną specyfikację, przez co generowałoby również koszty. Ponadto ograniczenie zmian w specyfikacji części zmusza producenta do przemyślanych pod kątem wdrażania ich

kolejnych wersji, tj. wprowadzania do produkcji i sprzedaży takich części co do skuteczności i trwałości których nie ma wątpliwości.

Samochód, który posiada już homologację może w pewnych zakresach być modyfikowany bez ingerencji w homologację. Takie zmiany są dozwolone na bazie przepisów szczegółowych, które w zależności od grupy samochodu FIA są określone w odpowiednich art. Zał. J do MKS FIA.

W przypadku wdrażania alternatywnych układów napędowych do samochodów grupy Rally3, prace należy rozpocząć od analizy sytuacji aktualnej.

Przed wszystkim art. 260 Zał. J do MKS FIA, tj. *Przepisy Szczegółowe dla Samochodów Grup Rally3/4/5* przewidują maksymalne napięcie zasilania na poziomie 16 V [10], co powoduje, że niemożliwe jest obecnie zastosowanie układu mHEV. Ponadto, następujące elementy układy mHEV nie są uwzględnione obecnie w przepisach grupy Rally3, które zakładają wykorzystanie wyłącznie silnika spalinowego:

- BISG,
- kompresor elektryczny wraz ze sposobem jego zabudowy w układzie doładowania silnika spalinowego,
- pakiet baterii 48 V służący do zasilania układu mHEV.

Mając to na uwadze, proponowane są następujące zmiany w przepisach dla grupy FIA Rally3, które zaprezentowano w tabeli 32 poniżej.

Tabela 32 Proponowane zmiany w przepisach FIA

Lp.	Proponowana zmiana	Art. 260 Zał. J do MKS FIA	Przepisy Homologacyjne FIA grupy Rally3
1.	Zdefiniowanie, że samochód grupy FIA Rally3 może być napędzany silnikiem spalinowym, ale również elektrycznym.	✓	
2.	Określenie, że oprócz turbosprężarki w układzie doładowania może być również zastosowany kompresor elektryczny. Przy założeniu, że w dalszym ciągu całe powietrze dostarczane do silnika spalinowego musi przechodzić przez ogranicznik wlotu powietrza zamontowany na kompresorze turbosprężarki. Wymusi to zastosowanie szeregowego usytuowania kompresora elektrycznego w układzie doładowania silnika spalinowego.	✓	
3.	Określenie, że napięcie zasilania instalacji układu hybrydowego może wynosić nie więcej niż 60 V.	✓	

4.	Możliwość zamontowania w samochodzie homologowanej baterii trakcyjnej 48 V.	✓	
5.	Możliwość zamontowania w samochodzie homologowanego BISG.	✓	
6.	Możliwość homologacji kompresora elektrycznego na następujących warunkach: Pochodzący z modelu samochodu produkowanego w ilości przynajmniej 2500 egzemplarzy w przeciągu 12 kolejnych miesięcy, Określone parametry maksymalne urządzenia takie jak: moc, spręż i przepływ masowy powietrza, Określona maksymalna cena sprzedaży, w której producent będzie musiał sprzedać klientowi kompresor elektryczny.		✓
7.	Możliwość homologacji BISG na następujących warunkach: Pochodzący z modelu samochodu produkowanego w ilości przynajmniej 2500 egzemplarzy w przeciągu 12 kolejnych miesięcy, Określone parametry maksymalne urządzenia takie jak moc i rodzaj układu chłodzenia (powietrze). Określona maksymalna cena sprzedaży, w której producent będzie musiał sprzedać klientowi BISG.		✓
8.	Możliwość homologacji baterii trakcyjnej 48 V na następujących warunkach: Pochodząca z modelu samochodu produkowanego w ilości przynajmniej 2500 egzemplarzy w przeciągu 12 kolejnych miesięcy, Określone parametry maksymalne urządzenia takie jak napięcie, natężenie prądu oraz pojemność i rodzaj układu chłodzenia (powietrze). Określona maksymalna cena sprzedaży, w której producent będzie musiał sprzedać klientowi baterię trakcyjną 48 V.		✓

Pakiet powyższych, proponowanych zmian ma na celu umożliwienie wdrożenia do grupy samochodów FIA Rally3 opracowanego układu hybrydowego bez ingerowania w ogólne założenia tej klasy. Proponowane zapisy odnośnie do pochodzenia części mają na celu:

- Skorzystanie z części, które posiadają dopuszczenie do użytkowania w samochodach produkowanych seryjnie, przez co gwarantują wysoki poziom bezpieczeństwa.

Ponadto, pochodzenie części z produkcji seryjnej gwarantuje niższy koszt zakupu niż w przypadku rozwiązań, które są dedykowane do użycia w sporcie samochodowym.

- Określenie maksymalnych wartości kluczowych parametrów ma na celu wyrównanie rywalizacji sportowej, tak, aby każdy z producentów korzystał z porównywalnych rozwiązań.
- Określenie maksymalnej ceny sprzedaży części przez producenta dla klienta również ma na celu ograniczenie kosztów wdrażania układu oraz zapewnienie możliwości zakupu części zamiennych w stałych kwotach. Mechanizm ten reguluje pośrednio, aby stosowane technologie były adekwatne kosztowo do grupy samochodów FIA w której są wdrażane.

Podsumowując, opracowany układ hybrydowy wpisuje się w strategię FIA dotyczącą wdrażania alternatywnych układów napędowych do grup samochodów rajdowych. Proponowane zmiany w przepisach zostały stworzone w sposób analogiczny do innych części, które mogą być stosowane w samochodach grupy FIA Rally3 i przez to zakłada się, że będą dobrą bazą do dyskusji nad docelowym kształtem przepisów z FIA oraz pozostałymi producentami samochodów.

5.3 Samochód rajdowy a jego dopuszczenie do ruchu drogowego

Niezwiązany bezpośrednio, ale istotnym aspektem pracy jest możliwość zapewnienia możliwości dopuszczenia do ruchu drogowego samochodów rajdowych, na odcinkach dojazdowych. Modyfikacje samochodów rajdowych wynikające z przepisów FIA i dotyczące zarówno kwestii bezpieczeństwa jak i tych, które mają przystosować je do rywalizacji sportowej, powodują, że nie są one dłużej zgodne z zatwierdzoną homologacją drogową. W takim przypadku konieczne jest określenie specjalnej procedury dopuszczenia do ruchu drogowego samochodów przygotowanych do zawodów sportowych zgodnie z przepisami FIA lub ASN. Brak kompleksowych rozwiązań legislacyjnych w tej kwestii w Polsce od wielu lat wpływał negatywnie na rozwój rajdów, powodując dużą niepewność wśród osób potencjalnie zainteresowanych posiadaniem samochodu rajdowego lub udziałem takim samochodem w zawodach. Autor, reprezentując Polski Związek Motorowy, uczestniczył w pracach legislacyjnych w Ministerstwie Infrastruktury podczas których udało się wypracować sposób dopuszczenia do ruchu drogowego samochodów rajdowych i dzięki temu zakończyć trwający od wielu lat impas w tej kwestii. Przyjęta procedura dopuszczenia do

ruchu drogowego *samochodów osobowych przeznaczonych do zawodów sportowych* określona w Oddziale 7 Rozdziału 5 ustawy z dnia 20 czerwca 1997 r. Prawo o ruchu drogowym zakłada uznanie warunków technicznych samochodów rajdowych określonych w przepisach polskiego związku sportowego (w domyśle zarówno przepisów FIA jak i PZM). Dzięki temu modyfikacje samochodów rajdowych wyłączone będą spod przepisów obowiązujących samochody seryjne, co będzie kluczowe, aby nie musiały one przechodzić osobnej procedury homologacji lub dopuszczenia jednostkowego. Biorąc pod uwagę niski wolumen produkcyjny samochodów rajdowych (około 50-100 rocznie) homologacja lub dopuszczenie jednostkowe takiego samochodu byłyby nieuzasadnioną ekonomicznie, nadmierną regulacją prowadzącą w rezultacie do zablokowania możliwości uzyskania dopuszczenia do ruchu drogowego samochodów rajdowych. Prowadziłyby to prawdopodobnie do zanikania rajdów i w rezultacie ich likwidacji z uwagi na brak samochodów, które mogłyby służyć do rywalizacji w nich.

6. Podsumowanie i wnioski

Niniejsza praca ma charakter wdrożeniowy, dlatego wnioski z niej zostały podzielone na część naukową oraz wdrożeniową. W przypadku wniosków naukowych zostaną poruszone kwestie związane z uzyskanymi wynikami i ich wpływem na dynamikę samochodu rajdowego oraz emisję substancji szkodliwych. W części wniosków wdrożeniowych omówiony zostanie z kolei potencjał wdrożeniowy opracowane hybrydowego układu napędowego i dalsze kroki z tym związane.

6.1 Wnioski naukowe

Rezultatem niniejszej pracy jest opracowany i przetestowany w badaniach eksperymentalnych hybrydowy układ napędowy do samochodu rajdowego. Na podstawie uzyskanych wyników wyciągnięto poniższe wnioski.

- Zastosowanie kompresora elektrycznego w układzie szeregowym (za kompresorem turbosprężarki) ma jednoznacznie pozytywny wpływ na parametry energetyczne silnika spalinowego, co przekłada się na lepszą dynamikę i osiągi samochodu rajdowego. W porównaniu do konfiguracji bazowej samochód rajdowy z kompresorem elektrycznym może być szybszy nawet o około 0,5 s/km OS. Na podstawie badań eksperymentalnych zweryfikowano również, że kompresor elektryczny oprócz korzystniejszego przebiegu charakterystyki momentu obrotowego podwyższa również jego maksymalną wartość w tym przypadku o około 7 %. Z punktu widzenia uzyskanych wyników, pod kątem sportowym najbardziej korzystna jest kombinacja kompresora elektrycznego z systemem ALS.
- Rozwiązanie kompresora elektrycznego, potencjalnie może umożliwić rezygnację lub ograniczenie działania systemu ALS, który obecnie stosowany jest w samochodach rajdowych. Rezygnacja z systemu ALS pozwoliłaby na obniżenie zużycia paliwa i emisji substancji szkodliwych oraz wzrost trwałości turbosprężarki.
- Oprócz kompresora elektrycznego, wyniki potwierdziły zasadność zastosowania BISG. O ile dobrane urządzenie nie nadaje się do wspomagania silnika spalinowego ze względu na marginalny efekt, to do odzysku energii w trakcie opóźnienia (zwalniania, hamowania) samochodu już tak. Dzięki sprawnemu działaniu tego urządzenia, możliwy jest odzysk dużej ilości energii, co z kolei wpływa na to, że dobrana bateria trakcyjna 48 V o pojemności 9,6 Ah jest wystarczająca.

Podsumowując, badany hybrydowy układ napędowy potwierdził pozytywny wpływ zarówno na dynamikę samochodu rajdowego. Przy założeniu likwidacji lub ograniczenia działania systemu ALS, możliwe jest również ograniczenie zużycia paliwa i emisji substancji szkodliwych.

6.2 Wnioski wdrożeniowe

Oдноśnie kwestii wdrożeniowej wyciągnięto poniższe wnioski.

- Wybrany układ hybrydowy składa się z BISG, kompresora elektrycznego i baterii trakcyjnej 48 V, które podlegają relatywnie łatwemu wdrożeniu zarówno do nowych jak i istniejących samochodów. Zgodnie z założeniami projektu, potencjalnie przyczyni się on do szybkiego rozpowszechnienia alternatywnych układów napędowych w samochodach rajdowych.
- Kluczowa jest również niska cena układu, która stanowi mniej niż 10 % kosztu samochodu grupy FIA Rally3. Wdrożenie układu hybrydowego związane jest bezpośrednio ze zmianami przepisów FIA, dlatego kluczowe jest rozpoczęcie rozmów w ramach tej organizacji, aby przepisy techniczne grupy FIA Rally3 uwzględniały badany układ. Następnie, będzie można przystąpić do wdrażania opracowanego układu hybrydowego.

6.3 Plan przyszłych badań

Aby możliwe było zastąpienie systemu ALS przez kompresor elektryczny dalszym analizom powinien podlegać sposób sterowania kompresora elektrycznego, który powinien zapewnić jego jak najszybsze uruchomienie w momencie, gdy występuje zjawisko niedostatecznego napędzania turbosprężarki.

W tym miejscu należy zastanowić się nad opracowaniem strategii sterowania w oparciu o różnorodne sygnały wejściowe, aby możliwe było jak najszybsze włączenie kompresora elektrycznego, gdy może to przynieść pozytywny efekt, oraz ograniczenie jego pracy i równocześnie zużycia energii elektrycznej, gdy efekt jego pracy jest znikomy.

7. Bibliografia

- [1] Mercedes-Benz Group AG: Benz-Patent is Part of the World Documentary Heritage. Aktualizacja: 29.09.2024. Dostępny w Internecie: <https://www.mercedes-benz.com/en/innovation/milestones/benz-patent-motor-car/>.
- [2] Mercedes-Benz Corporate Archive: First automobile race Paris - Rouen. Aktualizacja: 01.06.1954. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://mercedes-benz-archive.com/marsClassic/en/instance/ko/First-automobile-race-Paris---Rouen.xhtml?relId=1001&fromOid=7419&resultInfoTypeId=175&viewType=thumbs&sortDefinition=manualsort-1&oid=7419&thumbScaleIndex=1&rowCountsIndex=5>.
- [3] Skeete J.-P.: The obscure link between motorsport and energy efficient, low-carbon innovation: Evidence from the UK and European Union. W: Journal of Cleaner Production. [online]. 2019, t. 214, s. 674–684.
- [4] Foxall G. R., Johnston B. R.: Innovation in Grand Prix motor racing: the evolution of technology, organization and strategy. W: Technovation. [online]. 1991, t. 11, nr. 7, s. 387–402.
- [5] Næss H. E., Chadwick S. (reds): The future of motorsports: Business, politics and society, Routledge research in sport, culture and society. Routledge, Abingdon, Oxon, New York, NY 2023, ISBN 9781003302650.
- [6] Magomadov I. Z., Khanaliev G. I., Mamatsuev R. A., Apkarov I. A., Aisungurov N. D., Sergiev S. S., Mamasurov S. H., Aptaev H. H.: Vehicle Emissions and Their Impact on Humans. W: : Proceedings of the International Conference “Health and wellbeing in modern society” (ICHW 2020), Atlantis Press, Paris, France 2020.
- [7] Næss H. E., Tickell S.: The Green Transition in Motorsport. Routledge, London 2024, ISBN 9781032665078.
- [8] Federation Internationale de l'Automobile: INTERNATIONAL SPORTING CODE: FIA ISC 2024.
- [9] Federation Internationale de l'Automobile: APP. J TO THE FIA ISC - ART. 256 APP. J Specific Regulations for GT Production Cars homologated by the FIA (Group R-GT): ART. 256 APP. J TO THE FIA ISC 2024.

- [10] Federation Internationale de l'Automobile: APP. J TO THE FIA ISC – ART. 260 Specific Regulations for Cars in Groups Rally5/Rally4/Rally3: ART. 260 APP. J TO THE FIA ISC 2024.
- [11] Federation Internationale de l'Automobile: APP. J TO THE FIA ISC - ART. 260A Specific Regulations for Cars in Group E-Rally5: ART. 260A APP. J TO THE FIA ISC 2024.
- [12] Federation Internationale de l'Automobile: APP. J TO THE FIA ISC - ART. 260B Specific Regulations for Cars in Group Rally5-Kit: ART. 260B APP. J TO THE FIA ISC 2024.
- [13] Federation Internationale de l'Automobile: APP. J TO THE FIA ISC - ART. 261 Specific Regulations for Cars in Group Rally2: ART. 261 APP. J TO THE FIA ISC 2024.
- [14] Federation Internationale de l'Automobile: APP. J TO THE FIA ISC - ART. 262 Specific Regulations for Rally1 Cars: ART. 262 APP. J TO THE FIA ISC 2024.
- [15] European Economic Community: REGULATION (EEC) No 4064/89 MERGER PROCEDURE 1999.
- [16] Federation Internationale de l'Automobile: 2024 FIA WORLD RALLY CHAMPIONSHIP SPORTING REGULATIONS 2024.
- [17] Federation Internationale de l'Automobile: 2024 FIA REGIONAL RALLY SPORTING REGULATIONS 2024.
- [18] Federation Internationale de l'Automobile: FIA Rally Car Pyramid webinar outlines the framework for ASN-level competitions. Aktualizacja: 12.05.2021. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.fia.com/news/fia-rally-car-pyramid-webinar-outlines-framework-asn-level-competitions>.
- [19] Opel Motorsport: OPEL CORSA RALLY ELECTRIC. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.opel-motorsport.com/en/vehicles/corsa-e-rally>.
- [20] M-Sport UK Limited: FORD PUMA HYBRID RALLY1. [dostęp: 29.09.2024].
- [21] M-Sport UK Limited: FORD FIESTA RALLY2. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.m-sport.co.uk/fiesta-rally2>.

- [22] Federation Internationale de l'Automobile: APP. J TO THE FIA ISC - ART. 260E APP. J Specific Regulations for Cars fitted with R4 KIT: ART. 260E APP. J TO THE FIA ISC 2024.
- [23] M-Sport UK Limited: FORD FIESTA RALLY3. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.m-sport.co.uk/fiesta-rally3>.
- [24] ALPINE: APINE A100 RALLY. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.alpine-cars.co.uk/competition/a110-rally.html>.
- [25] M-Sport UK Limited: FORD FIESTA RALLY4. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.m-sport.co.uk/fiesta-rally4>.
- [26] M-Sport UK Limited: FORD FIESTA RALLY5. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.m-sport.co.uk/fiesta-rally5>.
- [27] Borkowski A., Zawiślak M.: Comparative analysis of the life-cycle emissions of carbon dioxide emitted by battery electric vehicles using various energy mixes and vehicles with ICE. W: Combustion Engines. [online]. 2023, t. 192, nr. 1, s. 3–10.
- [28] Pipitone E., Caltabellotta S., Occhipinti L.: A Life Cycle Environmental Impact Comparison between Traditional, Hybrid, and Electric Vehicles in the European Context. W: Sustainability. [online]. 2021, t. 13, nr. 19, s. 10992.
- [29] Sanguesa J. A., Torres-Sanz V., Garrido P., Martinez F. J., Marquez-Barja J. M.: A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. W: Smart Cities. [online]. 2021, t. 4, nr. 1, s. 372–404.
- [30] Leach F., Kalghatgi G., Stone R., Miles P.: The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. W: Transportation Engineering. [online]. 2020, t. 1, s. 100005.
- [31] Szalek A., Pielecha I., Cieslik W.: Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Energy Flow Analysis in Real Driving Conditions (RDC). W: Energies. [online]. 2021, t. 14, nr. 16, s. 5018.
- [32] Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport : the role of vehicles, fuels and transport demand, EEA Report 02/2022. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2022, ISBN 978-92-9480-473-0.

- [33] PARLAMENT EUROPEJSKI I RADA UE: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/631 z dnia 17 kwietnia 2019 r. określające normy emisji CO₂ dla nowych samochodów osobowych i dla nowych lekkich pojazdów użytkowych oraz uchylające rozporządzenia (WE) nr 443/2009 i (UE) nr 510/2011: ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2019/631 2019.
- [34] Pielecha J., Kurtyka K.: Exhaust Emissions from Euro 6 Vehicles in WLTC and RDE—Part 2: Verification by Experimental Measurement. W: *Energies*. [online]. 2023, t. 16, nr. 22, s. 7533.
- [35] RADA UE: DYREKTYWA RADY 93/59/EWG zmieniająca dyrektywę 70/220/EWG w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do działań, jakie mają być podjęte w celu ograniczenia zanieczyszczenia powietrza przez emisje z pojazdów silnikowych 1993.
- [36] ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU I RADY UE: ROZPORZĄDZENIE (WE) NR 715/2007 PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów: ROZPORZĄDZENIE (WE) NR 715/2007 2007.
- [37] Conway G., Joshi A., Leach F., García A., Senecal P. K.: A review of current and future powertrain technologies and trends in 2020. W: *Transportation Engineering*. [online]. 2021, t. 5, s. 100080.
- [38] Euro 7 standards: New rules for vehicle emissions. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2022, ISBN 978-92-76-58723-1.
- [39] Bothe D., Zähringer M., Schmitt S., Streichardt M.: REGULATORY COSTS OF EURO 7 – FINDINGS FROM AN INDUSTRY SURVEY. Aktualizacja: 23.05.2023. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.frontier-economics.com/media/piugmdqt/frontier-report-regulatory-costs-of-euro-7.pdf>.
- [40] Jong W., van der Linde V.: Clean diesel and dirty scandal: The echo of Volkswagen's dieselgate in an intra-industry setting. W: *Public Relations Review*. [online]. 2022, t. 48, nr. 1, s. 102146.

- [41] Bielaczyc P., Woodburn J.: Trends in Automotive Emission Legislation: Impact on LD Engine Development, Fuels, Lubricants and Test Methods: a Global View, with a Focus on WLTP and RDE Regulations. W: Emission Control Science and Technology. [online]. 2019, t. 5, nr. 1, s. 86–98.
- [42] Petrović V., Petrović S.: EUROPEAN REGULATION ON VEHICLE REAL DRIVING EMISSIONS. W: Mobility and Vehicle Mechanics. [online]. 2017, t. 43, nr. 2, s. 39–52.
- [43] Andrych-Zalewska M., Chłopek Z., Merkisz J., Pielecha J.: Analysis of the operation states of internal combustion engine in the Real Driving Emissions test. W: Archives of Transport. [online]. 2022, t. 61, nr. 1, s. 71–88.
- [44] Wang Y., Miao Q.: The impact of the corporate average fuel economy standards on technological changes in automobile fuel efficiency. W: Resource and Energy Economics. [online]. 2021, t. 63, s. 101211.
- [45] European Environment Agency: Air pollutant emissions data viewer: (Gothenburg Protocol, Air Convention), UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention). Aktualizacja: 25.06.2024. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution/air-pollutant-emissions-data-viewer-1990-2022>.
- [46] Eurostat: Stock of vehicles at regional level: Statistics Explained. Aktualizacja: 04/2024. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Stock_of_vehicles_at_regional_level.
- [47] Denton T.: Alternative fuel, hybrid and electric vehicles. Routledge, London 2016, ISBN 978-1-317-55251-2.
- [48] Zhuang W., Li S., Zhang X., Kum D., Song Z., Yin G., Ju F.: A survey of powertrain configuration studies on hybrid electric vehicles. W: Applied Energy. [online]. 2020, t. 262, s. 114553.
- [49] Helbing C., Bennewitz K., Mann A.: The 48-V Mild Hybrid Drive System of the Volkswagen Golf 8. W: MTZ worldwide. [online]. 2020, t. 81, nr. 2, s. 18–25.

- [50] Pels T., Davydov V., Ellinger R., Kaup C., Schöffmann W.: 48V - Where to place the e-machine? W: J. Liebl (ed.): Der Antrieb von morgen 2017, Proceedings, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden 2017, s. 31–59.
- [51] Urbański B., Przybyła G.: Hybrid drivetrain systems 48 V in rally cars. W: Combustion Engines. [online]. 2021.
- [52] Verma S., Dwivedi G., Verma P.: Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. W: Materials Today: Proceedings. [online]. 2022, t. 49, s. 217–222.
- [53] Porsche Cars North America, Inc.: Prof. Ferdinand Porsche Created the First Functional Hybrid Car. Aktualizacja: 20.04.2020. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: https://press.porsche.com/prod/presse_pag/PressResources.nsf/Content?ReadForm&languageversionid=857388&archive=10.
- [54] Pielecha I.: Control algorithms for a Range Extender vehicle with an combustion engine. W: Combustion Engines. [online]. 2020, t. 183, nr. 4, s. 3–10.
- [55] Khajepour A., Fallah M. S., Goodarzi A.: Electric and hybrid vehicles: Technologies, modeling, and control a mechatronic approach. John Wiley & Sons Inc, Chichester West Sussex United Kingdom 2014, ISBN 978-1-118-34151-3.
- [56] Ruciński A.: Audi pokazało hybrydę plug-in już 30 lat temu. Konstrukcja Duo robi wrażenie do dziś. Aktualizacja: 13.03.2023. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://e.autokult.pl/audi-duo-bylo-pierwsza-hybryda-plug-in-ktorej-konstrukcja-robi-wrazenie-nawet-dzis,6811582191630465a>.
- [57] Masiero G., Ogasavara M. H., Jussani A. C., Risso M. L.: Electric vehicles in China: BYD strategies and government subsidies. W: RAI Revista de Administração e Inovação. [online]. 2016, t. 13, nr. 1, s. 3–11.
- [58] Wang H., Kimble C.: Betting on Chinese electric cars? – analysing BYD's capacity for innovation. W: International Journal of Automotive Technology and Management. [online]. 2010, t. 10, nr. 1, s. 77.
- [59] Mettlach H.: APPLICATIONS – TRANSPORTATION | Hybrid Electric Vehicle: Plug-In Hybrids. W: : Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Elsevier 2009, s. 286–291.

- [60] Selmi T., Khadhraoui A., Cherif A.: Fuel cell-based electric vehicles technologies and challenges. W: Environmental science and pollution research international. [online]. 2022, t. 29, nr. 52, s. 78121–78131.
- [61] Aso S., Kizaki M., Nonobe Y.: Development of Fuel Cell Hybrid Vehicles in TOYOTA. W: : 2007 Power Conversion Conference - Nagoya, IEEE 2007, s. 1606–1611.
- [62] Duoba M., Ng H., Larsen R.: Characterization and Comparison of Two Hybrid Electric Vehicles (HEVs) - Honda Insight and Toyota Prius. W: : SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States 2001.
- [63] Mark Schudeleit, Christian Sieg, Ferit Küçükay: The Potential of 48V HEV in Real Driving. Unpublished 2015.
- [64] Dörsam T., Kehl S., Klinkig A., Radon A., Sirch O.: Die neue Spannungsebene 48 V im Kraftfahrzeug. W: ATZelektronik. [online]. 2012, t. 7, nr. 1, s. 20–25.
- [65] Bao R., Avila V., Baxter J.: Effect of 48 V Mild Hybrid System Layout on Powertrain System Efficiency and Its Potential of Fuel Economy Improvement. W: : SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States 2017.
- [66] Lauer S., Weldle R., Perugini M., Lyubar A.: 48-V High-power Full Hybrid System. W: MTZ worldwide. [online]. 2021, t. 82, nr. 2, s. 24–31.
- [67] Bank T., Klamor S., Sauer D. U.: Lithium-ion cell requirements in a real-world 48 V system and implications for an extensive aging analysis. W: Journal of Energy Storage. [online]. 2020, t. 30, s. 101465.
- [68] Kuypers M.: Application of 48 Volt for Mild Hybrid Vehicles and High Power Loads. W: : SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States 2014.
- [69] Sreedhar S., Siegel J. B., Choi S.: Topology Comparison for 48V Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System. W: IFAC-PapersOnLine. [online]. 2017, t. 50, nr. 1, s. 4733–4738.
- [70] Xia F., Griefnow P., Tidau F., Jakoby M., Klein S., Andert J.: Electric torque assist and supercharging of a downsized gasoline engine in a 48V mild hybrid

- powertrain. W: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. [online]. 2021, t. 235, nr. 5, s. 1245–1255.
- [71] Griefnow P., Andert J., Xia F., Klein S., Stoffel P., Engels M., Jolovic D.: Real-Time Modeling of a 48V P0 Mild Hybrid Vehicle with Electric Compressor for Model Predictive Control. W: : SAE Technical Paper Series, SAE Technical Paper Series, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States 2019.
- [72] Kumawat A. K., Thakur A. K.: A Comprehensive Study of Automotive 48-Volt Technology. W: International Journal of Mechanical Engineering. [online]. 2017, t. 4, nr. 5, s. 13–20.
- [73] Mercedes-AMG GmbH: Mercedes-AMG C-Class Sedan. [dostęp: 29.09.2024]. Dostępny w Internecie: <https://www.mercedes-amg.com/en/home/vehicles/c-class/sedan.html>.
- [74] Albatayneh A., Assaf M. N., Alterman D., Jaradat M.: Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles. W: Environmental and Climate Technologies. [online]. 2020, t. 24, nr. 1, s. 669–680.
- [75] Dižo J., Blatnický M., Semenov S., Mikhailov E., Kostrzewski M., Drożdżiel P., Šťastniak P.: Electric and plug-in hybrid vehicles and their infrastructure in a particular European region. W: Transportation Research Procedia. [online]. 2021, t. 55, s. 629–636.
- [76] Shafique M., Azam A., Rafiq M., Luo X.: Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A case study of Hong Kong. W: Research in Transportation Economics. [online]. 2022, t. 91, s. 101112.
- [77] FOŁĘGA P., BURCHART D., MARZEC P., JURSOVA S., PUSTEJOVSKA P.: POTENTIAL ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE IMPACTS OF FUEL CELL ELECTRIC VEHICLES POWERED BY HYDROGEN PRODUCED FROM POLISH COKE OVEN GAS. W: Transport Problems. [online]. 2022, t. 17, nr. 1, s. 151–161.
- [78] Grill M., Keller P., Mohon S., van Maanen K., Wenzel W., Xiaobing L., Negandhi V.: Development of a 48V P0 demonstration vehicle with eBooster® air charging.

- W: M. Bargende, H.-C. Reuss, J. Wiedemann (eds.): 18. Internationales Stuttgarter Symposium, Proceedings, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden 2018, s. 551–566.
- [79] Abidin S. F. Z., Khalid A., Zanalli S., Zahari I., Jalal R. I. A., Abas M. A., Kote H.: The effect of 48V mild hybrid technology on fuel consumption of a passenger car by using simulation cycle. W: Case Studies in Thermal Engineering. [online]. 2021, t. 28, s. 101492.
- [80] Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L., Liu J., Li Y., Liang Z., He X., Li X., Tavajohi N., Li B.: A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. W: Journal of Energy Chemistry. [online]. 2021, t. 59, s. 83–99.
- [81] Heywood J. B.: Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill, New York 1988, ISBN 0-07-028637-x.
- [82] Przybyła G.: Studium stosowania biopaliw gazowych do zasilania silników spalinowych, Monografia / Politechnika Śląska nr. 575. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015, ISBN 978-83-7880-316-4.
- [83] Postrzednik S., Żmudka Z.: Termodynamiczne oraz ekologiczne uwarunkowania eksploatacji tłokowych silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007, ISBN 978-83-7335-421-0.
- [84] Urbański B., Przybyła G., Brodziński Ł., Savitskaya M.: Reducing emissions of harmful substances in rally cars. W: Combustion Engines. [online]. 2024.