

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**NÁVRH PRACOVNÍHO CYKLU MOTORU PLUG-IN
HYBRIDNÍHO VOZIDLA**

ENGINE CYCLE DESIGN FOR PLUG-IN HYBRID

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Koutník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Štěpán Koutník**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh pracovního cyklu motoru plug-in hybridního vozidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá pracovními cykly spalovacího motoru s elektromotorem asistovaným turbodmychadlem, možnostmi pro optimální využití elektrické energie v baterii a rekuperací energie z výfukových plynů. Předpokládá se nalezení optimálních kombinací toků energie pro danou misi vozidla dané kategorie.

Cíle diplomové práce:

Provést rešerši v současnosti používaných elektromotorem asistovaných turbodmychadel.
Analyzovat energetické toky v pohonné jednotce.
Navrhnout pracovní cyklus zaručující optimální využití energetických toků v pohonné jednotce.

Seznam doporučené literatury:

MI, Chris a M. Abul MASRUR. Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives. 2nd Edition. Hoboken, N.J.: Wiley, 2017. ISBN 978-0-470-74773-5.

PISTOIA, Gianfranco. Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market. Boston: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-444-53565-8.

NGUYEN-SCHÄFER, Hung. Rotordynamics of Automotive Turbochargers. Second Edition. Ludwigsburg, Germany: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-17643-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Náplní diplomové práce je analýza energetických toků pohonné jednotky plug-in hybridního užitkového vozidla. Rešerše práce se zabývá řešeními elektromotorem asistovaných turbodmychadel, která mohou pozitivně ovlivnit vlastnosti motoru. Následně je analyzován vznětový spalovací motor a užitkové vozidlo prostřednictvím simulací v softwaru GT-Suite, přičemž simulace jsou prováděny na jízdním cyklu WLTC. Výsledky simulací ukazují závislost spotřeby elektrické energie a energie paliva na průběhu cyklu a zobrazují body, ve kterých motor pracuje. Při využití optimální kapacity baterie je možné ušetřit v závislosti na typu cyklu i více než 50 % energie spotřebované spalovacím motorem, s jejíž redukcí přímo souvisí snížení spotřeby paliva. Výsledné řešení je možné použít pro úpravu pracovních bodů motoru a dimenzování hybridního užitkového vozidla pro různé typy provozu v praxi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hybridní vozidlo, plug-in hybrid, užitkové vozidlo, turbodmychadlo, jízdní cyklus, E-Turbo, rekuperace.

ABSTRACT

The content of this thesis is analysis of energy flows of the propulsion system in plug-in hybrid utility vehicle. Theoretical part of the thesis deals with electrically assisted turbochargers, which can positively influence engine characteristics. The following part analyses given diesel engine and utility vehicle in simulations in GT-Suite software, with simulations being performed on WLTC driving cycle. The results of the simulations demonstrate the relation between the usage of electrical and fuel energies and the driving cycle and show the engine operation points. By using optimal battery capacity, it is possible to save according to driving cycle more than 50 % energy consumed by the engine, directly influencing the fuel consumption. The results are possible to use as a guidance for moving the engine operation points and for sizing of the battery pack of hybrid utility vehicle according to real life application.

KEYWORDS

Hybrid vehicle, plug-in hybrid, utility vehicle, turbocharger, driving cycle, E-Turbo, recuperation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUTNÍK, Štěpán. *Návrh pracovního cyklu motoru plug-in hybridního vozidla*. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132783>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 83 s. Vedoucí práce Pavel Novotný.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Novotného, Ph. D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Bc. Štěpán Koutník

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Pavlu Novotnému, Ph. D. za cenné rady, ochotu a věnovaný čas při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Škarovi ze společnosti Garrett Motion za poskytnutí technických podkladů a jeho plnou podporu v průběhu simulací i jejich vyhodnocování. Další poděkování patří jeho kolegům Ing. Juraji Pospíšilovi a Ing. Romanu Šrobovi za klíčové rady při tvorbě modelu pro simulace pro dosažení relevantních výsledků.

Mimořádné poděkování patří mé rodině a přátelům za podporu po dobu celého studia.

OBSAH

Úvod	9
1 Úvod do problematiky	10
1.1 Proč hybridy	10
2 Rešerše	12
2.1 Druhy hybridů	12
2.2 Systémy přepínání asistované elektromotorem	15
3 Software GT-Suite	31
4 Model pro simulaci jízdních cyklů	33
4.1 Zvolené vozidlo pro simulaci	33
4.2 Model motoru pro simulaci	36
4.3 Model vozidla pro simulaci	40
5 Průběh simulací	53
5.1 Jízdní cyklus pro srovnávání jednotlivých konfigurací	53
5.2 Simulace s pohonem pouze spalovacího motoru	54
5.3 Simulace s hybridním pohonem	54
Závěr	76
Seznam použitých zkratk a symbolů	82

ÚVOD

Moderní svět je závislý na volném pohybu osob a věcí. Protože jsou potřeby konat pohyb na větší vzdálenost, než je člověk schopen sám překonat, využívá k tomu dopravní prostředky. Síla zvířat byla nejdříve nahrazena vynálezem parního stroje, který později nahradil spalovací motor. Protože má provoz spalovacího motoru negativní vliv na životní prostředí, přicházejí restriktce a emisní limity, které nařizují omezení množství škodlivin, které vozidla produkují. Reakcí výrobců vozidel je sestavování složitějších systémů řízení motorů, které tyto škodliviny redukuje, ale také vývoj nových hybridních vozidel využívajících ve svém pohonném systému elektromotor, který svým vlastním provozem neprodukuje žádné škodlivé látky. Cílem je snížit množství produkovaných škodlivin a snížit spotřebu fosilních paliv, jejichž zdroje jsou na Zemi omezené. Za první masově vyráběné hybridní vozidlo je považována Toyota Prius z roku 1997 a od té doby postupně automobilky celého světa zařazují do svého portfolia hybridní vozidla.

Pro pozemní pohyb věcí na kratší vzdálenosti jsou využívána užitková vozidla, přičemž v dnešní době jsou tato vozidla poháněna především vznětovými motory. Na kratší (městské a meziměstské) vzdálenosti by však mohlo být výhodné využívat u těchto vozidel hybridní pohon. Blížící se emisní norma Euro 7 přinese striktnější limity, jež bude náročnější s běžnými motory splnit. Proto je možné zvolit jako řešení cestu hybridního vozidla, pro která je jednodušší dosáhnout nižších hodnot vyprodukovaných emisí díky možnosti začít testovací cyklus s plně nabitými bateriemi.

Z pohledu zákazníka (primárně doručovatelské společnosti) se naskýtá několik hledisek, ze kterých se hybridní vozidla zdají být výhodnou volbou. První výhodou je vnější pohled na ekologické smýšlení firmy, které ukazuje zákazníkovi a státu, že společnosti nejde jen o zisk za každou cenu, ale že při provozování šetří planetu. Protože automobilky platí za překročení emisních limitů své flotily vozidel nemalé poplatky Evropské Unii, je možné, že dalším, kdo bude zatížen poplatky za překročení emisních limitů, budou provozovatelé vozidel splňující starší emisní normy.

Druhým, důležitějším, hlediskem je ušetření nákladů za provoz vozidel. Protože cena elektřiny je mnohem nižší než cena fosilního paliva, doplňování energie na pohyb vozidla je levnější. Díky kombinovanému pohonu je možné snížit spotřebu paliva spalovacího motoru, přičemž při využití dostatečného úložiště pro elektrickou energii a chytrého rozmístění dobíjecích stanic eliminovat provoz na spalovací motor úplně. V dnešní době jsou hybridní vozidla v České republice osvobozena od placení dálničního poplatku a v některých evropských zemích přispívá stát dotacemi na koupi takových vozidel, čímž snižuje pořizovací náklady vozů, jež jsou často hlavní překážkou pro zákazníky.

Jestli je možné sestavit výhodnou konfiguraci hybridního užitkového vozidla a za jakých podmínek by bylo možné tohoto dosáhnout, bude zkoumáno prostřednictvím množství simulací provozu vozidla v softwaru GT-Suite, jež budou testovat vliv jízdního cyklu na energii spotřebované spalovacím motorem a elektromotorem. Pomocí simulací je cílem najít optimum pro dané jízdní cykly, které by bylo výhodnou kombinací daného spalovacího motoru a elektromotoru s dostatečnou kapacitou baterie. Primární cíl je zajistit, aby spalovací motor pracoval v bodě, při kterém dosahuje nejvyšší účinnosti a nejnižší spotřeby. Toho je možné dosáhnout správným řízením hybridního provozu vozidla.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Pohyb moderního světa je z vysoké míry závislý na fosilních zdrojích paliva. V dnešní době se ve světě pohybuje přes 800 milionů motorových vozidel a spolu s vývojem civilizace je možné předpokládat, že se jejich množství bude stále zvyšovat [1]. Nejenže zásoby ropy na světě jsou omezené, motorová vozidla produkují emise, které přináší problémy spojené s životním prostředím, změnou klimatu, nebo zhoršení kvality ovzduší.

1.1 PROČ HYBRIDY

Z výše zmíněných důvodů je třeba hledat alternativu, která by mohla do jisté míry nahradit klasickou koncepci motorových vozidel. Prvním krokem je snižování spotřeby paliva, které vede ke snížení vyprodukovaných emisí. Dalším krokem je vynechání spalovacího motoru a jeho nahrazení elektromotorem. Toto řešení přináší mnohé výhody, ale také úskalí. Elektřinu je možné získávat nejen spalováním neobnovitelných fosilních paliv, ale je možné využít také obnovitelných zdrojů, jako je větrná a sluneční energie, nebo energie vody ve vodních elektrárnách. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, omezená dojezdová vzdálenost a dlouhý čas potřebný k plnému nabití.

Hybridní vozidla redukují některé nedostatky, jak vozidel se spalovacími motory (např. emise), tak elektromobilů (např. dojezd). S kombinací dvou pohonů je poté možné využívat ve vhodný čas elektropohon a spalovací motor.

1.1.1 VÝHODY

Hybridní vozidla přináší svým provozem mnoho výhod. Proti klasické konstrukci vozidel se spalovacím motorem je výhodou prodloužená dojezdová vzdálenost, snížené provozní náklady, snížení vyprodukovaných emisí, zvýšení výkonnostních charakteristik vozidla a menší zátěž motoru při nastartování díky výkonnějšímu elektromotoru nahrazujícímu startér. Prostřednictvím systémů rekuperace energie (např. při brzdění) je možné dobíjet baterie samotným provozem vozidla a prodloužit tak dojezdovou vzdálenost.

V porovnání s elektromobily jsou výhodami větší dojezdová vzdálenost, nezávislost na přístupu k elektrické síti, kratší doba potřebná k plnému nabití a nižší pořizovací cena díky nižšímu množství baterií.

Dle konfigurací, které jsou rozebrány podrobněji v kapitole 2.1, je možné provozovat tato vozidla ve více jízdních režimech. Tyto režimy berou v úvahu, kde a jak je vozidlo provozováno a díky tomu můžou být plně využity možnosti vozidla. Kombinace těchto dvou pohonných jednotek zajišťuje využití obou s vyšší účinností, než kdyby pracovaly samostatně, protože je možné přesunout jejich pracovní provoz do režimu s nejvyšší účinností.

1.1.2 NEVÝHODY

Na rozdíl od typických automobilů jsou nevýhodou vyšší pořizovací a provozní náklady, které jsou navýšené o baterie, elektromotory a jejich integraci. Úložiště pro elektřinu jsou limitována svou kapacitou. V dnešní době se nejvíce využívají lithium-iontové baterie, jejichž hmotnost je vysoká. V případě potřeby vysokého odběru proudu se uvažuje o ultrakapacitoru a další variantou je uložení v setrvačnicku. Tyto varianty ale nenabízejí uložení takového množství elektřiny, jako baterie.

Nevýhodou oproti elektromobilům je, že hybridní vůz je stále poháněn fosilními palivy, s čímž přichází produkce výfukových emisí přímo v místě provozu vozidla.

2 REŠERŠE

2.1 DRUHY HYBRIDŮ

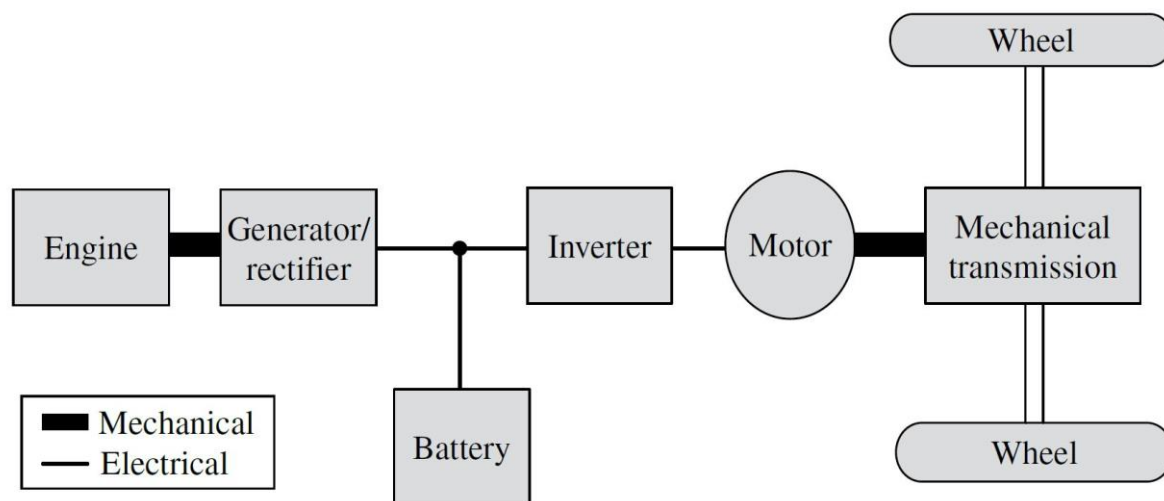
Hybridní vozidla jsou rozdělována dle dvou kritérií. První je podle uspořádání hnacího ústrojí, druhé dle stupně hybridizace.

2.1.1 ROZDĚLENÍ DLE USPOŘÁDÁNÍ HNACÍHO ÚSTROJÍ

Hybridní vozidla využívají k pohonu kombinaci konvenčního vozidla se spalovacím motorem a elektrického vozidla. Způsoby, jakými mohou být tyto pohony kombinovány, jsou probrány v následujících podkapitolách.

SÉRIOVÝ HYBRID

U sériového hybridu je pohonné ústrojí zapojeno dle obr. 1. Spalovací motor přeměňuje energii paliva v mechanickou práci. Ta se pak převádí pomocí generátoru na elektrickou energii. Elektromotor poté využívá elektrickou energii z generátoru nebo energii uloženou v bateriích k pohonu kol přes mechanickou převodovku a rozvodovku. Protože motor nemá fyzické spojení s koly, je možné řídit jeho otáčky nezávisle na rychlosti vozidla. Díky tomu může pracovat v otáčkách, ve kterých dosahuje nejvyšší termické účinnosti [1].



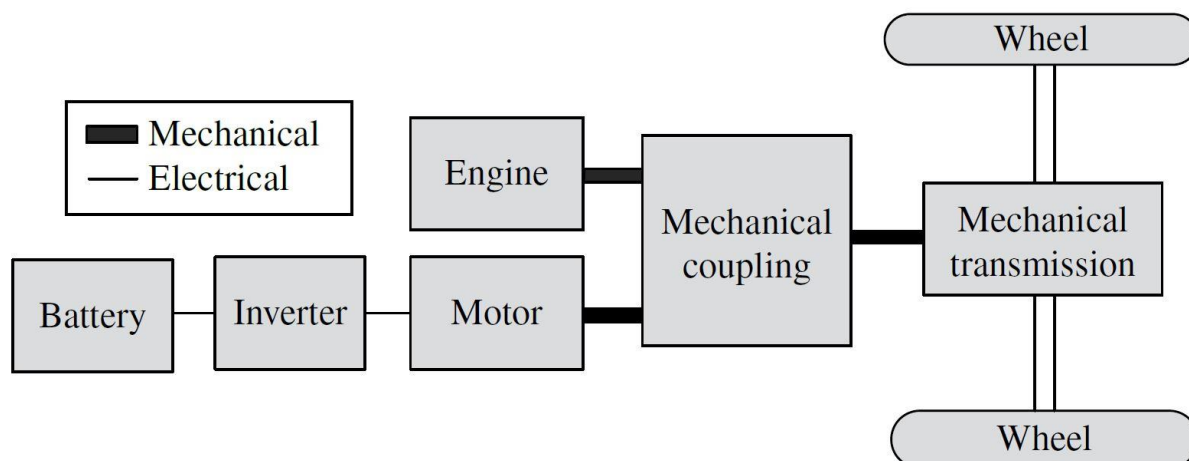
Obr. 1 Schéma sériového hybridu [1]

V tomto případě lze využít i jiného zapojení – samostatný elektromotor pro každé kolo, které má být poháněné. Tímto můžeme zvýšit účinnost pohonného systému vynecháním převodovky a rozvodovky. U tohoto řešení je ale třeba vyřešit ovládání více nezávisle pracujících elektromotorů. Zvýší se také hmotnost neodpružené hmoty, která má vliv na jízdní komfort [1].

PARALELNÍ HYBRID

Paralelní zapojení v hybridním voze umožňuje spalovacímu motoru i elektromotoru přenášet točivý moment na kola, který mohou dodávat samostatně, nebo kombinovaně. Elektromotor může fungovat i jako generátor elektrické energie, kterou může získávat rekuperací kinetické

energie při brzdění nebo absorbováním části energie od spalovacího motoru. Schéma zapojení pohonného ústrojí je na obr. 2 [1].

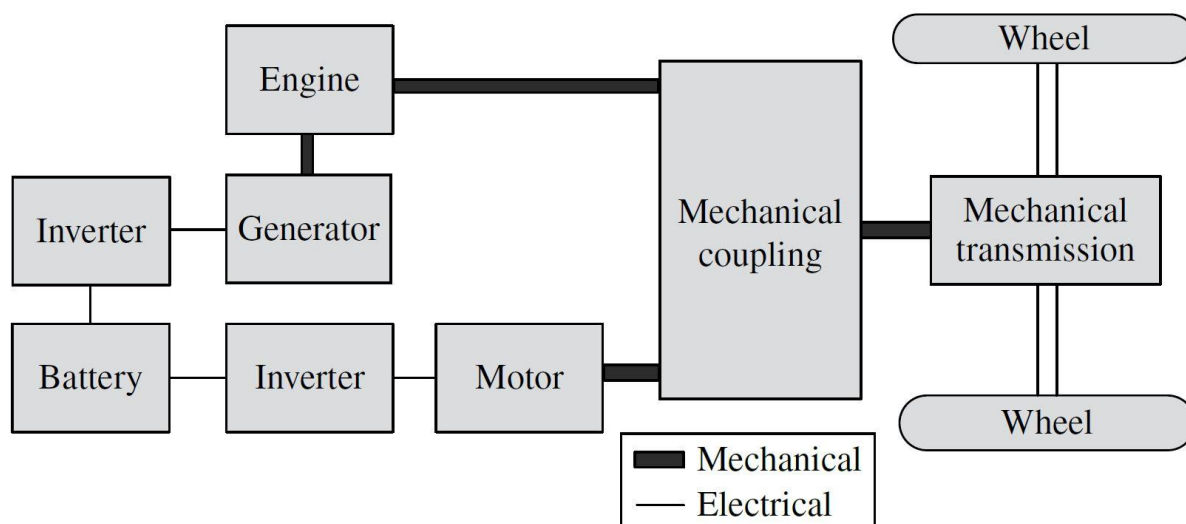


Obr. 2 Schéma paralelního hybridu [1]

KOMBINOVANÝ HYBRID

Kombinovaný hybrid využívá kombinaci sériového a paralelního hybridu obr. 3. V porovnání se sériovým hybridem je zde mechanické spojení mezi spalovacím motorem a hnacím ústrojím, takže je možné jím přímo pohánět vozidlo. V porovnání s paralelním hybridem je zde navíc jeden elektromotor, který funguje jako generátor elektřiny, která se ukládá do baterií. Díky svému zapojení umožňuje funkci buď jako sériový hybrid, paralelní hybrid, nebo jejich kombinaci [1].

Protože toto zapojení nabízí mnohem větší rozsah použití, tak je tato varianta výhodnější z hlediska provozu automobilu. Vzhledem k tomu, že se zvyšuje množství prvků v pohonném systému, zvětšuje se také jeho komplexnost a s tím i jeho cena.



Obr. 3 Schéma kombinovaného hybridu [1]

2.1.2 ROZDĚLENÍ DLE STUPNĚ HYBRIDIZACE

Druhým typem dělení je podle stupně hybridizace. Stupeň hybridizace je kritérium, které určuje, jaký podíl a provozu automobilu má elektromotor vůči kombinovanému výkonu soustavy.

MICRO HYBRID

Micro hybrid na rozdíl od běžných automobilů se spalovacím motorem disponuje systémem Stop/Start, který vypíná motor v případech, kdy není potřeba (zastavení na křižovatce, v koloně), a rekuperací kinetické energie při brzdění, kterou se dobíjí 12V akumulátor. Výkon elektromotoru se pohybuje mezi 2–5 kW [2].

MILD HYBRID

Mild hybrid je první kategorie hybridů svého slova smyslu. Elektromotor zde pomáhá vozidlu při rozjezdu a při brzdění získává elektrickou energii rekuperací. Tento typ využívá pouze paralelní konfigurace vozidla a pohon pouze na elektrinu zde není možný. Obvyklý výkon elektromotoru je 10–20 kW [2].

FULL HYBRID (HEV)

Full hybrid disponuje větší velikostí baterií a vyšším výkonem elektromotoru než Mild hybrid. Vyskytuje v konfiguraci paralelního i sériového hybridu a je možné ho provozovat na krátkou vzdálenost v pouze elektrickém režimu. Obvykle se využívá elektromotorů o výkonu 20–50 kW [2].

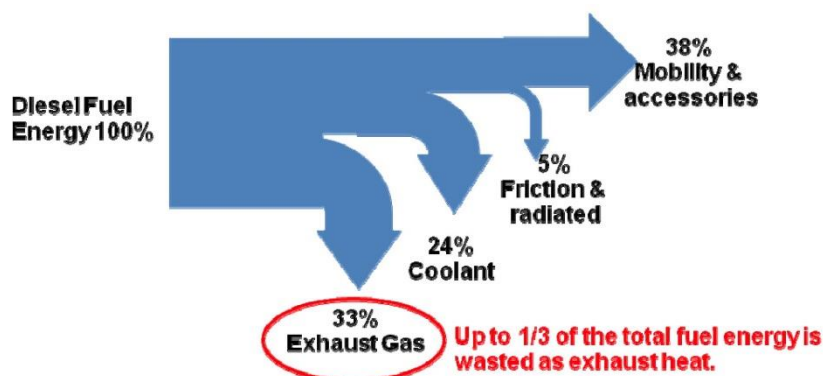
PLUG-IN HYBRID (PHEV)

Plug-in hybrid se od předchozího jmenovaného liší dvěma rozdíly – velikostí baterií a schopností nabíjet baterie z vnějšího zdroje energie. Díky tomu je možné ujet s vozidlem určitou vzdálenost (danou kapacitou baterií) bez nastartování spalovacího motoru. Ke spalovacímu motoru je připojen elektromotor o výkonu 30–125 kW a baterie umožňují vozidlu ujet více než 20 km [2].

2.2 SYSTÉMY PŘEPLŇOVÁNÍ ASISTOVANÉ ELEKTROMOTOREM

Hybridní vozidla umožňují využít energii, která souvisí s provozem vozidla a běžně zůstane nevyužitá. Kinetická energie, která by se jinak přeměnila např. v tepelnou energii brzd, se využívá na výrobu elektrické energie, která se uloží do baterií. Klasický způsob jejího využití je pak převedení energie na kola využitím konfigurací popsaných v kapitole 2.1.1.

Spalovací motor pracuje s celkovou účinností přibližně 35 % (zážehový 25–35 %, vznětový 35–45 %). Tato účinnost znázorňuje transformaci energie obsažené v palivu na mechanickou práci. Zhruba jedna třetina této energie odchází z motoru spolu s výfukovými plyny (viz obr. 4). Protože mají tyto ztráty nejvyšší podíl, je třeba hledat další využití této energie [3].



Obr. 4 Typické rozdělení energie ve vznětovém motoru [4][3]

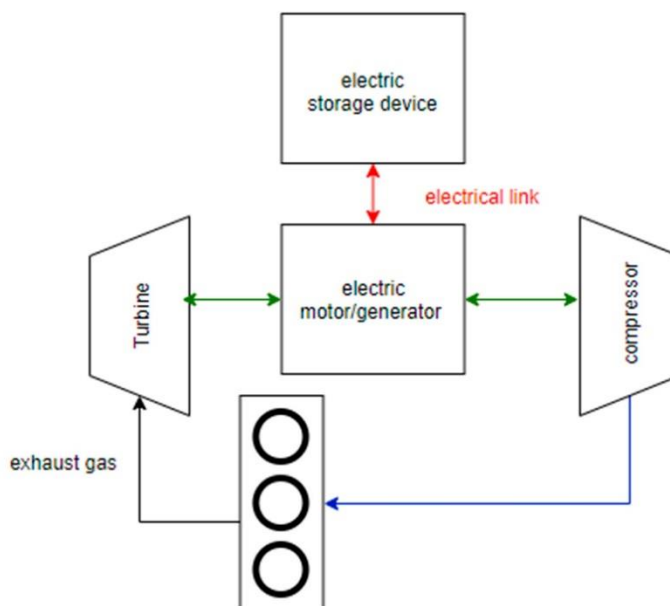
Připojení elektromotoru k turbodmychadlu přináší výhody zvýšení účinnosti motoru, odezvu motoru na polohu plynového pedálu (snížením tzv. turbo efektu) a zlepšení pravidelnosti chodu motoru. Druhým přínosem je rekuperace energie výfukových plynů na elektřinu. V následujících podkapitolách jsou rozebrány způsoby využití elektromotoru u systémů přeplňování automobilu.

2.2.1 ZPŮSOBY ZAPOJENÍ

ELEKTRICKY ASISTOVANÉ TURBODMYCHADLO

Schéma elektricky asistovaného turbodmychadla je zobrazeno na obr. 5. Mezi kompresorem a turbínou je vložen vysokorychlostní elektromotor. Zelenými šipkami je vyznačené mechanické spojení, červenými elektrické a modrými a černými proudění vzduchu, respektive výfukových plynů. V nízkých otáčkách spalovacího motoru funguje elektromotor jako motor – roztáčí kompresor a dodává tak vyšší tlak vzduchu do motoru. Ve vysokých otáčkách motoru, kdy výfukové plyny dostatečně otáčejí turbínou, funguje elektromotor jako generátor a dobíjí baterii.

Výhodami tohoto konceptu je zlepšení odezvy motoru v nízkých otáčkách, udržení vysokých otáček turbodmychadla při řazení a malý odběr elektrické energie potřebný pro jeho provoz.

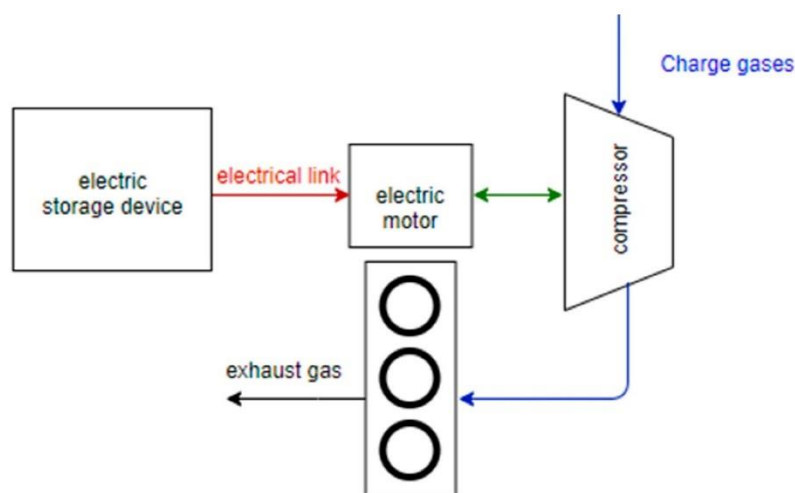


Obr. 5 Schéma elektricky asistovaného turbodmychadla [5]

Nevýhodou je, že přidáním elektromotoru se zvýší moment setrvačnosti rotačních částí turbodmychadla, takže je pro jeho pohon potřeba vyššího výkonu než bez elektromotoru. Druhým problémem jsou vysoké teploty, kterých se u turbodmychadla dosahuje a jejich efekt na elektromotor, proto je třeba vyřešit jeho chlazení nebo upravit konstrukci tak, že je elektromotor mimo osu turbodmychadla a je připojen ke hřídeli převodem.

ELEKTRICKÝ KOMPRESOR

Elektrický kompresor nahrazuje klasický kompresor poháněný mechanicky prostřednictvím rozvodového ústrojí (obr. 6). Tato varianta nevyužívá pro pohon výfukových plynů jako turbodmychadlo, ale má pouze kompresorovou část.



Obr. 6 Schéma elektrického kompresoru [5]

Výhodami této konstrukce je nezávislost na výfukových plynech a otáčkách motoru, nižší moment setrvačnosti rotačních částí díky absenci turbíny. Oproti klasickému zapojení

kompresoru neubírá tato varianta motoru výkon, který je zapotřebí k pohonu kompresoru, a jsou zde eliminovány ztráty v převodech, kterými je obvykle kompresor připojen k motoru.

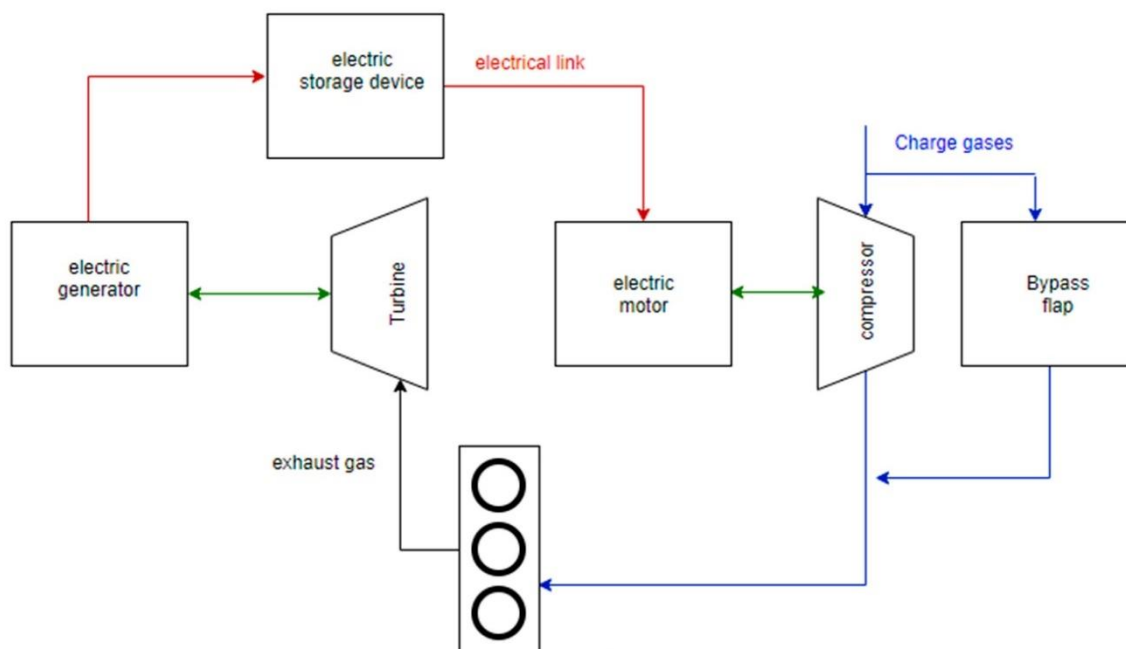
Velikou nevýhodou je závislost na vnějším zdroji energie. Protože není kompresor spojen s výfukovým potrubím, nemůže získávat energii rekuperací. Kvůli tomu je třeba využít jiných možností rekuperace elektrické energie, například při brzdění.

ELEKTRICKÉ ODDĚLENÉ TURBODMYCHADLO

V případě tohoto zapojení jsou turbína a kompresor na dvou oddělených hřídelích (obr. 7). Na hřídeli s turbínou je umístěn generátor, který přeměňuje energii plynů na elektřinu a ukládá ji do baterií. Tu pak elektromotor připojená ke kompresoru využívá pro pohon kompresoru.

Hlavní výhodou jsou oddělené hřídele turbíny a kompresoru, díky čemuž se můžou otáčet různými rychlostmi a také zde není tak vysoká koncentrace tepla, jako u prvního způsobu.

Protože jsou potřeba dva elektromotory a vybavení s tím spojené, náklady na tuto konstrukci jsou vyšší.



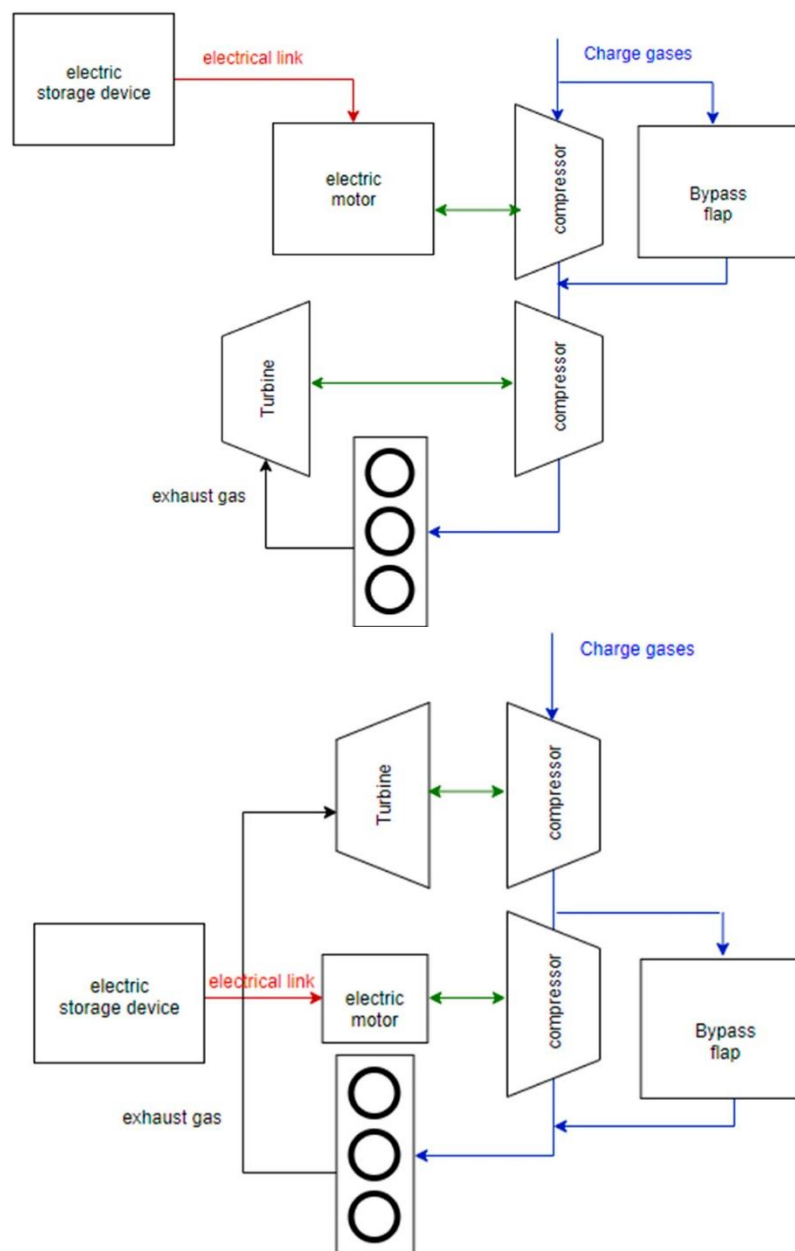
Obr. 7 Schéma elektrického odděleného turbodmychadla [5]

TURBODMYCHADLO S PŘÍDAVNÝM KOMPRESOREM POHÁNĚNÝM ELEKTRINOU

Na obr. 8 lze vidět dva způsoby tohoto typu. Jedná se o vícestupňové přeplňování, přičemž na horním obrázku je nejdříve kompresor poháněný elektromotorem a následně mechanické turbodmychadlo. Druhý způsob je nejdříve mechanické turbodmychadlo a poté kompresor s elektromotorem.

Výhody jsou stejné jako u elektrického kompresoru obohacené o nižší nároky na výkon elektromotoru díky mechanickému turbodmychadlu, které se podílí na zvýšení tlaku. Odezva motoru je oproti klasickému víceštapovému přepřívání také rychlejší.

Nevýhody jsou stejné, jako u elektrického kompresoru (nemožnost regenerovat elektřinu) a nižší účinnost systému.

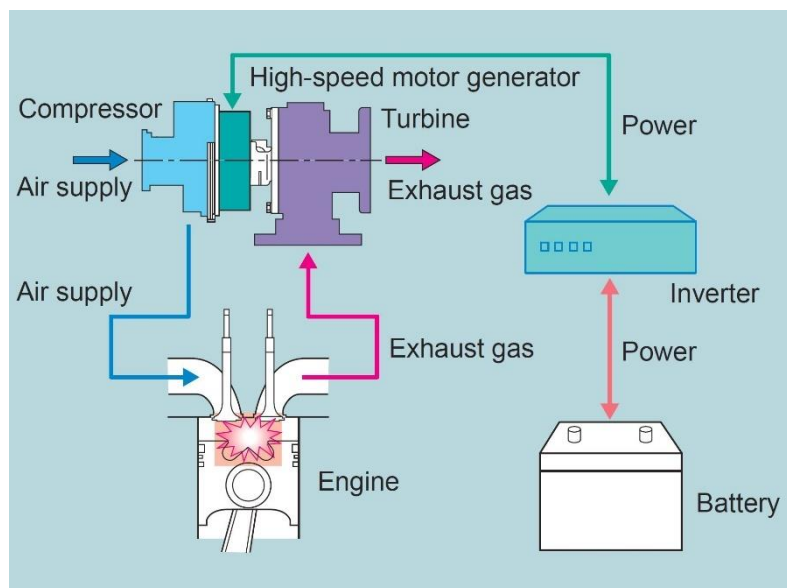


Obr. 8 Schéma turbodmychadla s přidavným kompresorem poháněným elektřinou [5]

2.2.2 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES – HYBRID TURBO

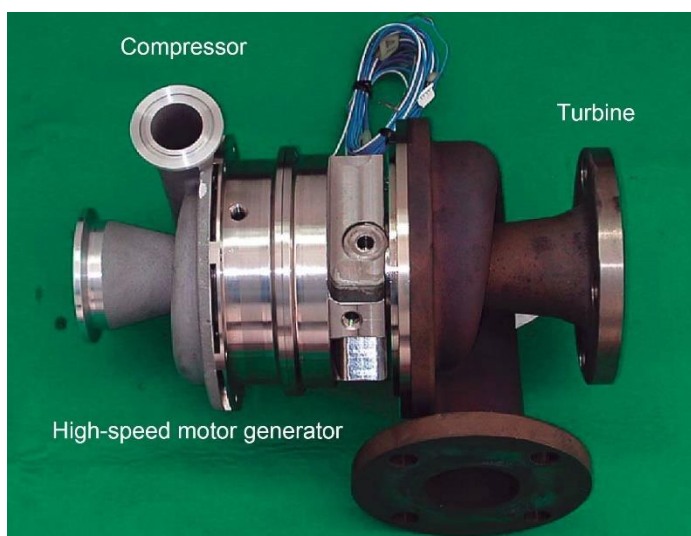
V roce 2006 proběhl výzkum na půdě Mitsubishi Heavy Industries, při němž vznikl prototyp a proběhlo měření turbodmychadla asistovaného elektromotorem. Cílem bylo navrhnout turbodmychadlo, které by v nízkých otáčkách motoru zvýšilo odezvu motoru a snížilo tzv. turbo efekt a ve vyšších otáčkách získávalo energii zpět a nabíjelo tak baterii [6].

V této době se uvažovalo o připojení k autobaterii, přičemž se předpokládá přechod na 36V baterie kvůli rostoucímu množství elektronického vybavení automobilů. Na obr. 9 je možné vidět schéma hybridního turba a na obr. 10 jeho prototyp [6].



Obr. 9 Schéma hybridního turba [6]

Elektromotor je vložený mezi kompresorem a turbínou turbodmychadla. Kvůli tomu bylo nutné prodloužení hřídele, které bylo minimalizováno rozmístěním ložisek a upravením rotoru a statoru tak, aby se turbodmychadlo velikostně přibližovalo typickému. Turbína a kompresor byly využity z konvenčních motorů, jako elektromotor byl zvolen synchronní s permanentními magnety a kluzná ložiska [6].

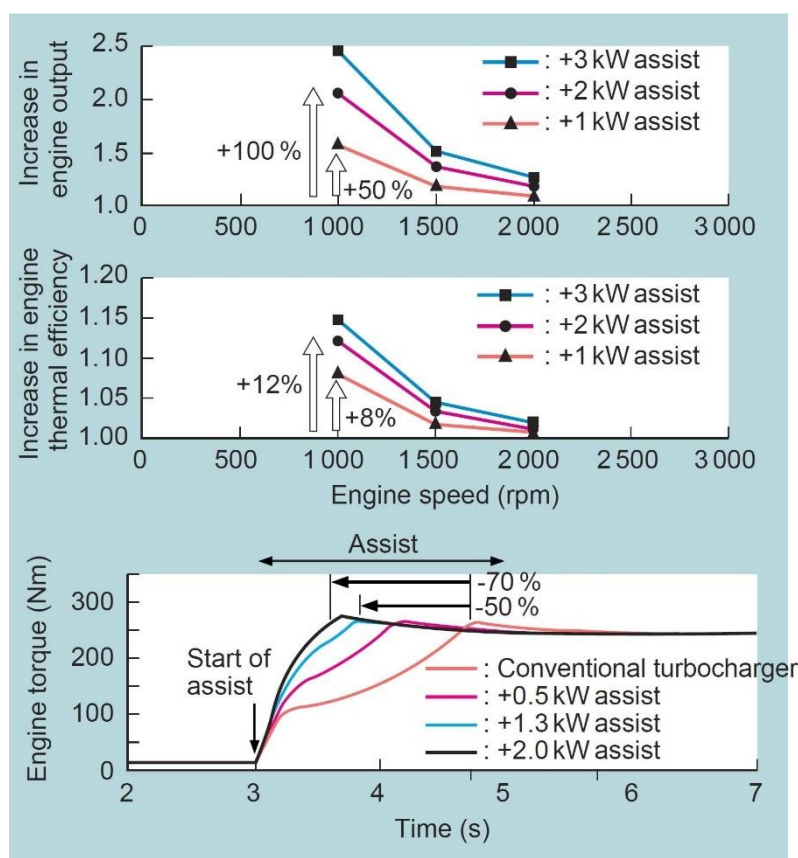


Obr. 10 Prototyp hybridního turba [6]

Neodymové magnety tvořící rotor, jsou k němu připevněny pomocí uhlíkových vláken, které brání uvolnění v důsledku velkých odstředivých sil, které souvisí s vysokými otáčkami turbodmychadla. Díky silným magnetům bylo možné použít koncentrační vinutí pro stator

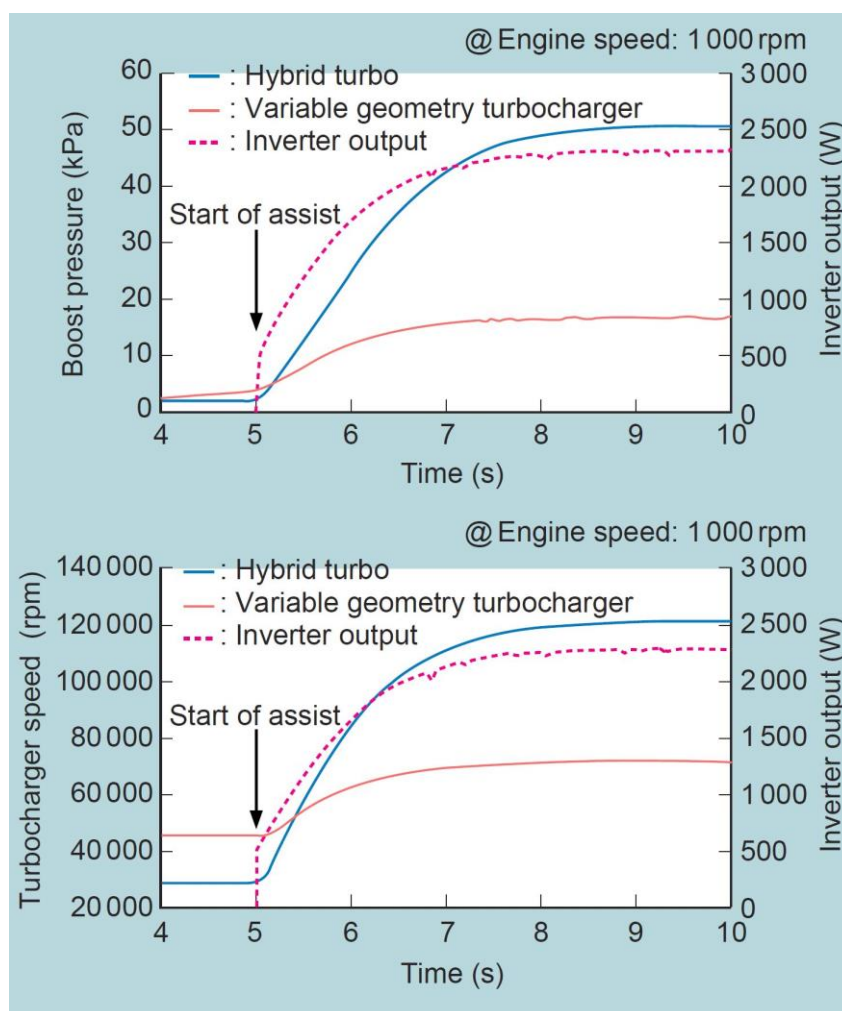
a tím udržet přiměřeně veliký prostor mezi státorem a rotorem. Ten je důležitý pro chlazení, kdy stator je chlazen olejem a rotor vzduchem [6].

Pro simulaci byl použit jako základ dvoulitrový vznětový motor a elektromotory s výkonem od 1 do 3 kW. Na obr. 11 lze vidět výsledky simulací, které byly provedeny. Horní graf ukazuje zvýšení výkonu v závislosti na otáčkách motoru. K nejvyššímu zvýšení dochází v nejnižších otáčkách při využití 3 kW motoru, které zde dosahuje více než dvojnásobku výkonu. Na prostředním grafu je patrné zvýšení tepelné účinnosti motoru v nejnižších otáčkách o více než 10 % při využití 3 kW motoru. Spodní graf zobrazuje závislost točivého momentu motoru na čase. Zde je vidět výrazný rozdíl v odezvě turbodmychadla, kdy tradičnímu turbodmychadlu trvá dosáhnout maxima o sekundu déle, než s použitím elektromotoru o výkonu 0,5 kW. Tento rozdíl roste s použitím vyššího výkonu elektromotoru [6].



Obr. 11 Výsledky simulací s různými výkony elektromotoru [6]

Prototyp byl testován na vznětovém dvoulitrovém motoru s přímým vstřikováním. Při otáčkách motoru 1000 min^{-1} byly naměřeny výsledky zobrazené obr. 12. První graf ukazuje závislost tlaku dodávaného turbem do motoru na čase, druhý pak otáčky turbodmychadla na čase. Modrou je vyznačené hybridní turbo, oranžovou turbodmychadlo s proměnnou geometrií lopatek a fialovou výkon dodávaný převodníkem. Z obou grafů je patrné, že s hybridním turbem lze nejen dosáhnout rychleji otáček, které dosáhne klasické turbodmychadlo, ale také je překonat a tím pádem dodávat motoru vzduch o několikanásobně vyšším tlaku, než by bylo možné u klasické konstrukce [6].



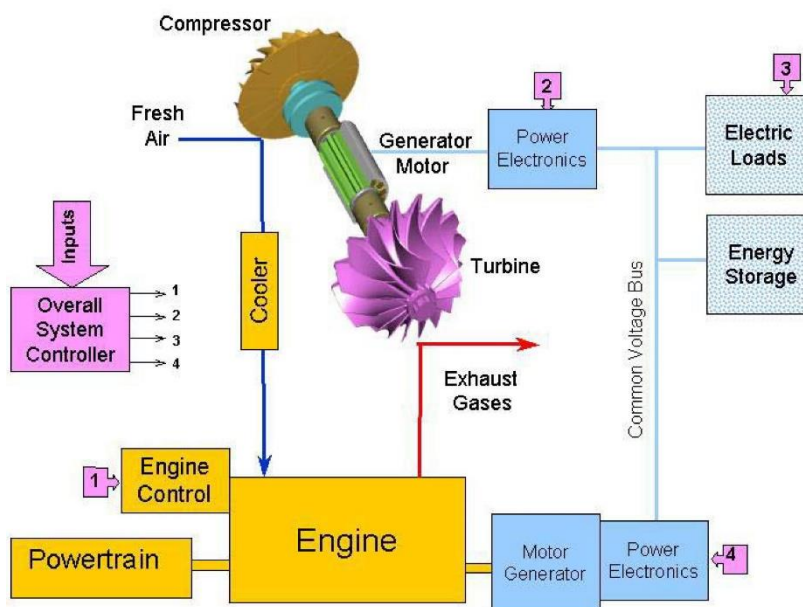
Obr. 12 Výsledky měření prototypu [6]

Výsledky experimentu splnily očekávání a vytyčené cíle a efektivita elektromotorem poháněného turbodmychadla byla potvrzena. Tato technologie by našla využití při stále rostoucích nárocích na ekologii vozidel. Jako další kroky vývoje byla integrace hybridního turba do vozidel, jeho řízení pro dosažení maximální efektivity a výkonu a spolupráce s ostatní elektronikou.

2.2.3 ELEKTRICKÉ TURBOKOMPAUDNÍ PŘEPLŇOVÁNÍ

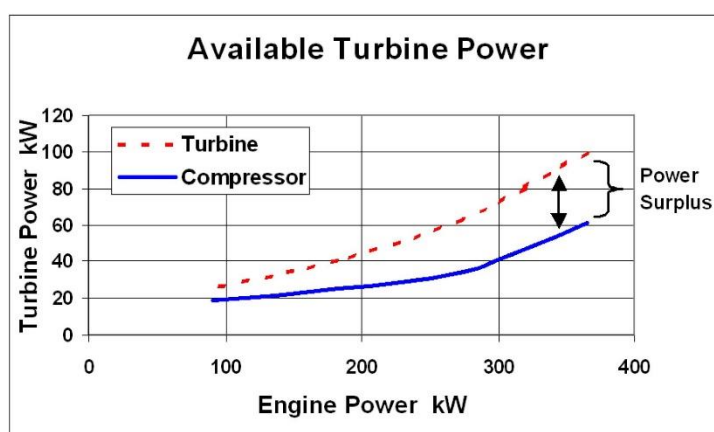
Kompaudní přeplňování je známá technologie pro využití zbytkové tepelné energie za turbodmychadlem. U klasické verze je za výfukovou turbínou druhá turbína (výkonová), která převádí zbylou energii výfukových plynů na rotační pohyb na klikové hřídeli [3].

Jeho elektrická varianta ale využívá zbytkového tepla jinak. Schéma tohoto systému přeplňování je na obr. 13. Na hřídeli turbodmychadla je umístěn motor-generátor, který v nízkých otáčkách motoru turbo roztáčí a ve vysokých jeho rychlost reguluje.



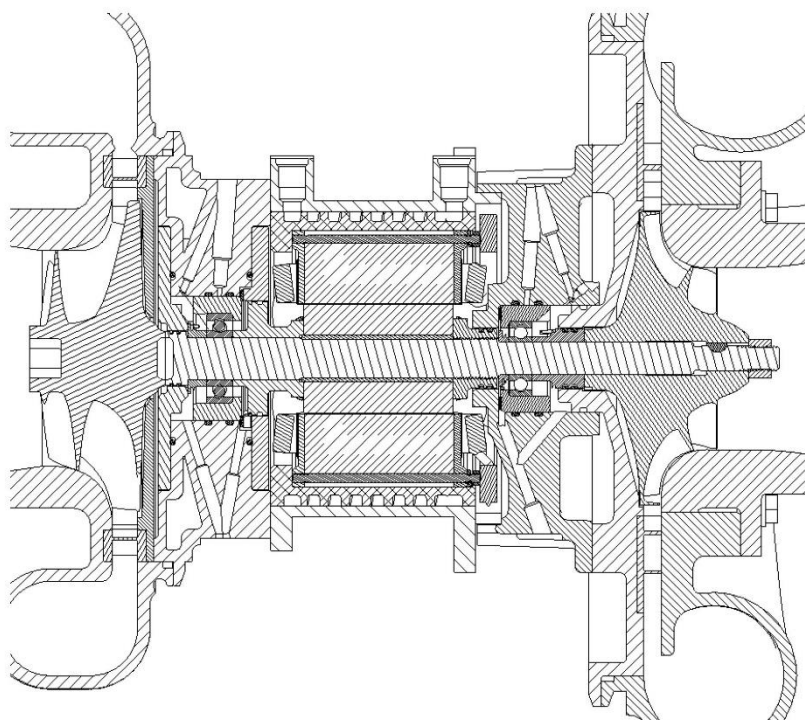
Obr. 13 Schéma elektrického kompaundního přeplňování [7]

Nadbytečný výkon turbíny turbodmyhadla v závislosti na výkonu motoru je vyznačen na obr. 14. Elektromotor tento výkon využije a přemění na elektrickou energii, která je ukládána do baterií. Ke klikové hřídeli spalovacího motoru je připojen elektromotor, který asistuje motoru při zrychlení vozidla. Protože je tato technologie zamýšlena pro nákladní vozidla (vozidla Class 8 – od 15 tun), je možné tuto energii využívat pro pohon mnoha elektrických zařízení, kterými jsou tato vozidla vybavena, obzvláště pak při využití u autobusů, které jsou vybaveny navíc např. osvětlením vnitřního prostoru [7].



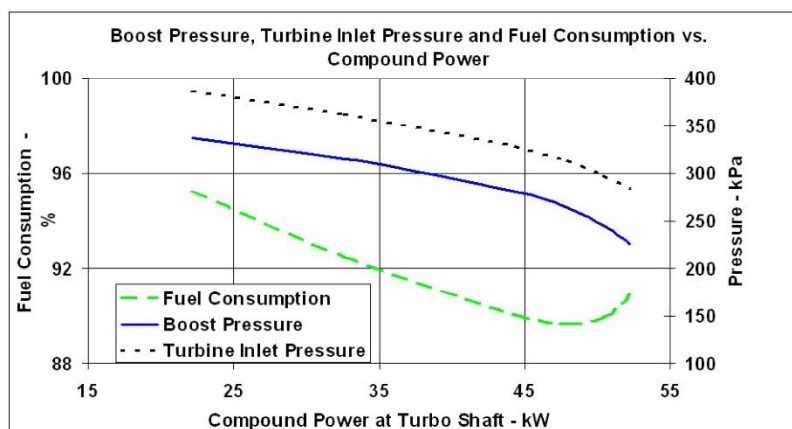
Obr. 14 Nadbytečný výkon turbíny turbodmyhadla [7]

Jako elektromotor byl zvolen spínaný reluktanční motor na základě rozměrových parametrů s přihlédnutím k ceně a jednoduché a zároveň robustní konstrukci. Rotor měl průměr 350 mm a stator 460 mm, délka elektromotoru byla 125 mm. Na obr. 15 lze vidět řez konstrukcí turbodmyhadla. Maximální otáčky turbodmyhadla se stanovily na $66\,500\text{ min}^{-1}$ a provedené simulace ukázaly vysoké hodnoty bezpečnosti této konstrukce. Maximální nepřetržitý výkon byl 40 kW a občasný 60 kW [7][8].



Obr. 15 Řez turbodmychadlem [7]

Obr. 16 znázorňuje závislost spotřeby paliva (vyjádřené v procentech původní hodnoty bez elektrického turba), tlaku před turbínou a na výstupu z kompresoru na odebíraném elektrickém výkonu na hřídeli turbodmychadla. Optimální spotřeby je dosaženo při odběru 45–50 kW i přes snížený tlak vzduchu dodávaný motorem. Při plném zatížení je dosahováno více než 10% úspory paliva oproti klasické koncepci [7].



Obr. 16 Závislost spotřeby paliva, tlaku na vstupu do turbíny a na výstupu z kompresoru na odebíraném výkonu [7]

Spolu se snížením spotřeby a snížením emisí (které přímo souvisí se spotřebou) jsou zde vedlejší výhody, které tento systém přináší. I když je konstrukce turbodmychadla složitější kvůli přidanému elektromotoru, zjednodušení přichází u variabilní geometrie lopatek a přetlakového ventilu, které zde nejsou potřeba. Elektromotor na klikové hřídeli může sloužit i jako generátor elektrické energie a tím pomáhat vozidlo brzdít [7].

2.2.4 MGU-H (F1)

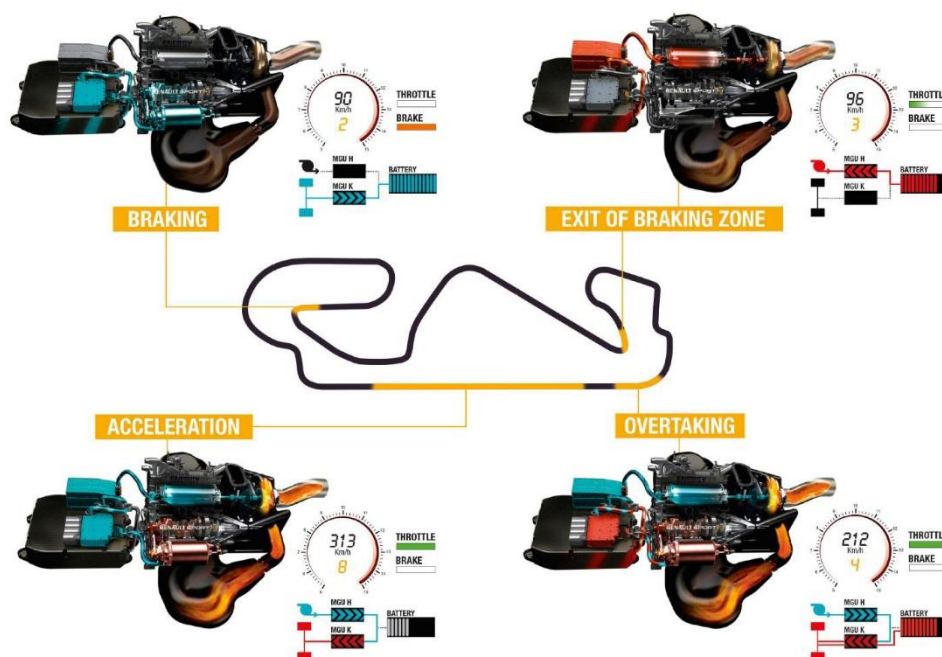
MGU-H je zkratkou pro motor-generator unit – heat (tepelná jednotka motor-generátor). Jedná se o elektromotor zabudovaný do konstrukce turbodmychadla. Ten slouží k regulaci jeho otáček – při nízkých otáčkách motoru je zvýší, při vysokých zase udržuje tak, aby do motoru nebyl nasáván příliš vysoký tlak vzduchu (nahrazuje přetlakový ventil). První varianta baterie vybíjí, druhou se energie rekuperuje [9].



Obr. 17 Pohonná jednotka pro vozy Formule 1 Renault Energy F1-2014 [10]

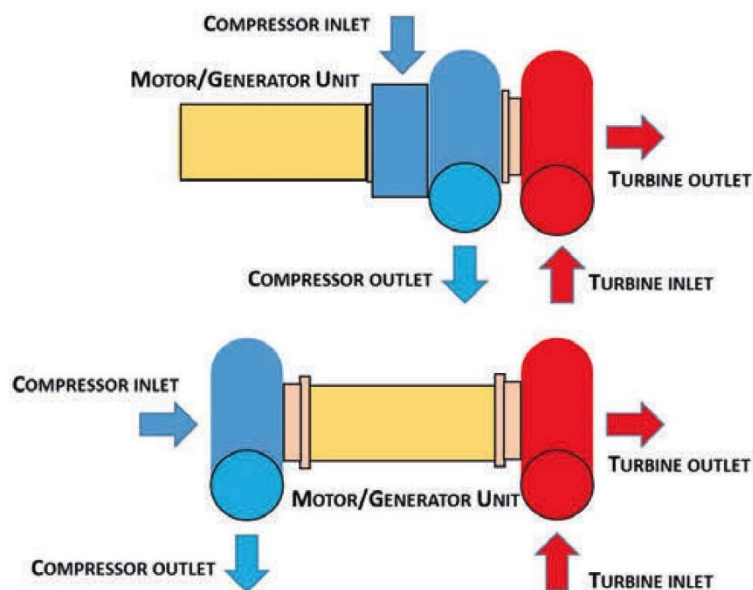
Na obr. 17 je pohled na pohonnou jednotku Renault Energy F1-2014, kterou v roce 2014 používaly ve svých vozech týmy Red Bull Racing, Scuderia Toro Rosso, Lotus F1 Team a Caterham F1 Team. Základem je motor V6 s jedním turbodmychadlem, které je zároveň jednotkou MGU-H. Baterie o minimální hmotnosti 20 kg doplňuje energii z MGU-H a také z MGU-K (motor-generator unit – kinetic – jednotka pro rekuperaci kinetické energie). Ta je poté zpětně využita při zrychlení, buď přímo přenesením na kola, nebo zvýšením otáček turbodmychadla [10].

Způsoby, jakými může pohonná jednotka vozu formule 1 fungovat jsou na obr. 18. Při brzdění se získává energie jednotkou MGU-K. Při rozjezdu z pomalých zatáček zvyšuje jednotka MGU-H otáčky turbodmychadla a pomáhá tak motoru v nízkých otáčkách dosáhnout vyššího výkonu. Při vyšší rychlosti pak jednotka MGU-K dává dodatečnou sílu na kola a zároveň, protože je motor ve vysokých otáčkách, tak MGU-H reguluje otáčky turbodmychadla a dodává energii do baterií.



Obr. 18 Provozní režimy vozu F1 [10]

Schéma konstrukce turbodmychadla je zobrazeno na obr. 19. Elektromotor se připojí na hřídel turbodmychadla buď doprostřed konstrukce (mezi turbínu a kompresor) nebo vně turba na stranu kompresoru.

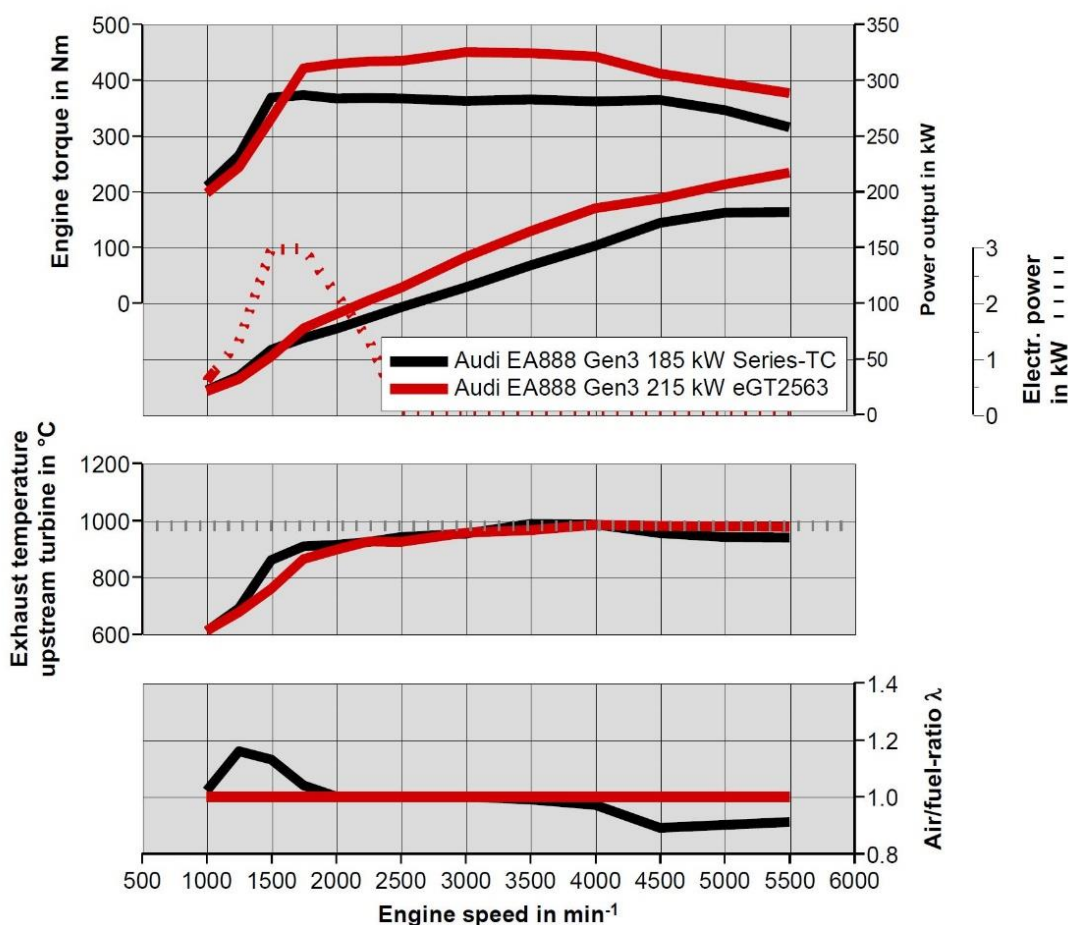


Obr. 19 Schéma začlenění MGU-H do konstrukce turbodmychadla [9]

2.2.5 GARRETT – E-TURBO

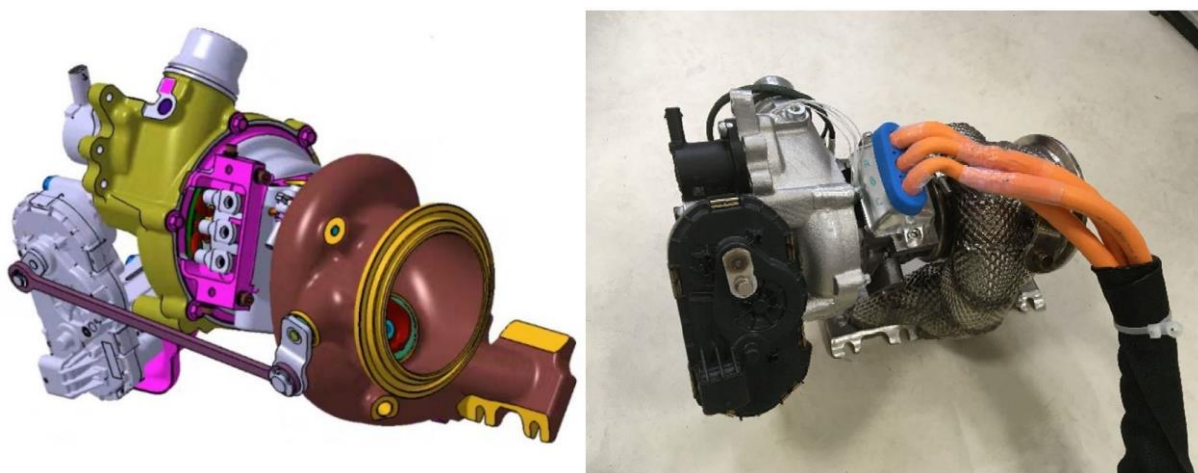
Kvůli zvyšujícím se požadavkům emisních norem rostou nároky na spalovací motory. Uvažuje se o zavedení různých systémů pro snížení vyprodukovaných emisí, například vstřikování vody, regenerace výfukových plynů, proměnný kompresní poměr, variabilní geometrie lopatek turbodmychadla nebo elektricky asistovaná turbodmychadla.

V roce 2019 aplikovala společnost Garrett 48V E-Turbo na dvoulitrový zážehový motor o výkonu 215 kW instalovaný v Audi Q7. Umožnilo to dosáhnout vyššího maximálního výkonu o 30 kW než s klasickou konstrukcí turbodmychadla, přičemž tohoto výkonu motor dosahuje bez obohacení nasávané směsi ve vyšších otáčkách motoru (obr. 20). Spolu se zvýšením výkonu došlo také ke zvýšení točivého momentu, zlepšení odezvy motoru na polohu plynového pedálu, zrychlení vozidla a snížení spotřeby paliva. Elektromotor také může energii z výfukových plynů získávat a při běžném městském provozu rekuperovat přibližně 60 % energie, kterou na svůj pohon spotřebuje. Při dálničním provozu poté je možné rekuperovat větší množství energie díky nižší potřebě prudce akcelarovat [11].



Obr. 20 Srovnání motoru s běžným turbodmychadlem (černá) a E-Turbem eGT25 (červená) [11]

V roce 2020 proběhl výzkum E-Turba voze Mercedes-Benz A200 s motorem M282 (zážehový motor o objemu 1,3 litru). Konstrukci a 3D model turbodmychadla je možné vidět na obr. 21, kdy elektromotor je umístěn mezi turbínou a kompresorem. Maximální možné otáčky můžou přesáhnout $225\,000\ \text{min}^{-1}$ s maximálním výkonem 3,5 kW a točivým momentem 0,35 Nm [12].

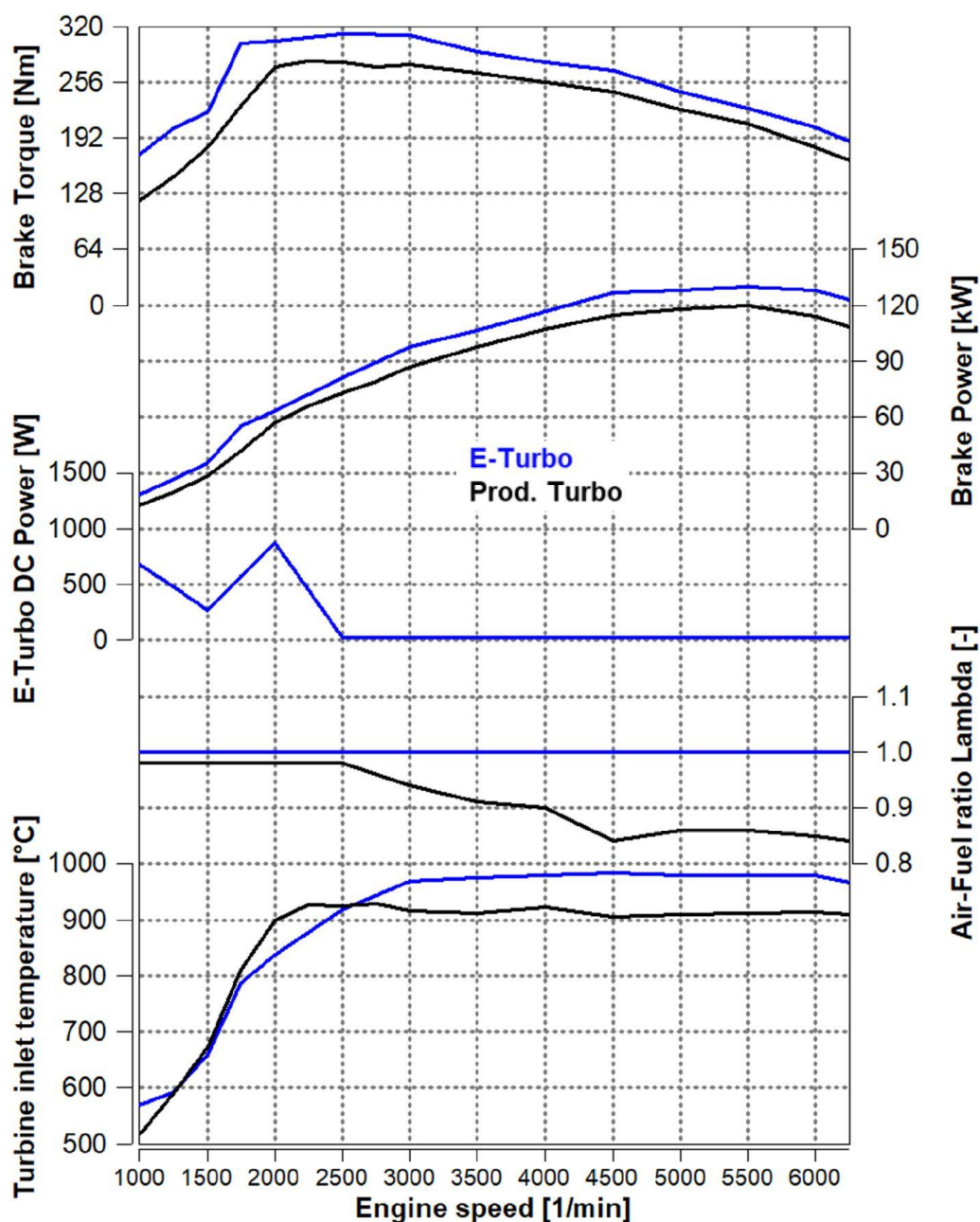


Obr. 21 Model a konstrukce E-Turba použitého u motoru M282 [12]

Cílem bylo využít stechiometrického poměru vzduchu a paliva k dosažení nižších produkovaných emisí, nižší spotřeby, udržet nebo zvýšit výkonnostní charakteristiky a eliminovat turbo efekt. U běžných spalovacích motorů se řeší pomocí menších turbodmychadel s menším momentem setrvačnosti. Elektrifikované turbodmychadlo není ale limitováno nízkou rychlostí proudění plynů a roztočí rotor rychleji do požadovaných otáček [12].

Pro řízení E-Turba může být použita samostatná řídicí jednotka, nebo program integrovaný v řídicí jednotce motoru. Ten pak reguluje otáčky elektromotoru tak, aby se maximalizovala rekuperace elektrické energie a minimalizovalo se pouštění výfukových plynů přes přetlakový ventil [12].

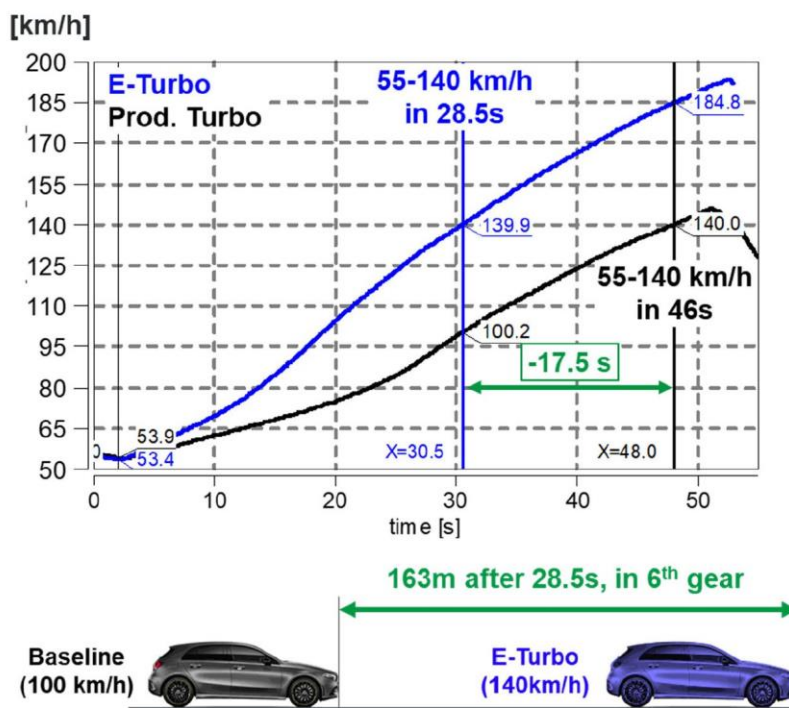
Přenastavení motoru na stechiometrický poměr směsi ve všech provozních režimech motoru a zvýšení účinnosti turbíny a kompresoru ve spojení s elektromotorem o výkonu cca 1 kW způsobilo zvýšení výkonnostních charakteristik při plném zatížení v celém rozsahu otáček motoru. Maximální výkon se zvýšil o 10 kW a točivý moment o 30 Nm, kterého nyní motor dosahuje o 300 min^{-1} dříve, než s klasickým turbodmychadlem (viz obr. 22). Díky stechiometrické směsi paliva se také snížila spotřeba o přibližně 20 % ve vyšších otáčkách, ve kterých se běžně využívá bohatší směsi [12].



Obr. 22 Srovnání motoru s běžným turbodmychadlem (černá) a E-Turbem eGT15 (modrá) [12]

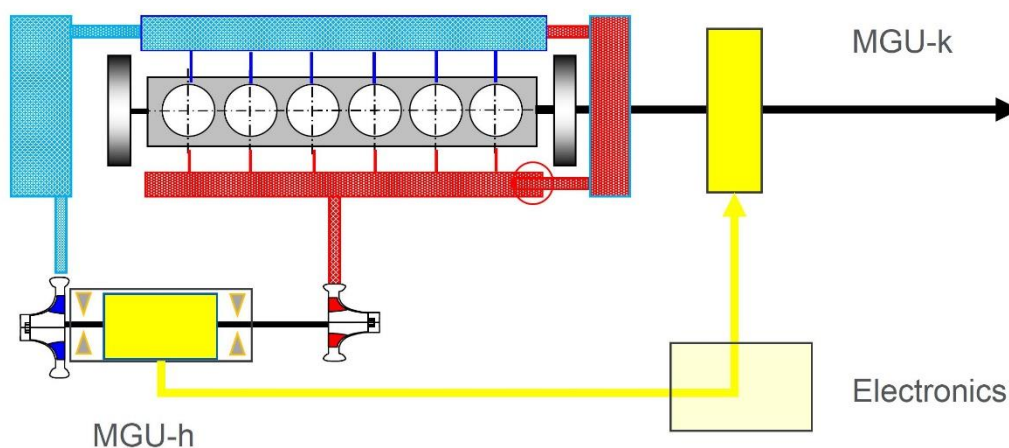
Ke zvýšení výkonu nedošlo pouze při plném zatížení, ale také při přechodových režimech, kdy motor přechází z nízkého do vysokého zatížení. Byla zvýšena odezva turbodmychadla při využití výkonu elektromotoru 2,8 kW tak, že maximálního točivého momentu v rozmezí otáček 1000–2000 min^{-1} bylo dosaženo za méně než jednu sekundu [12].

Silniční test pro potvrzení hodnot naměřených v laboratořích zahrnoval zrychlení na 4. (respektive 6.) rychlostní stupeň z rychlosti 35 km/h (resp. 55 km/h) na rychlost 110 km/h (respektive 140 km/h). Na 4. rychlostní stupeň zrychlilo vozidlo o 6,2 sekund rychleji než vozidlo s běžným turbodmychadlem a na 6. rychlostní stupeň se rozdíl zvýšil na 17,5 sekund. Výsledky testu na 6. rychlostní stupeň znázorněny graficky je možné vidět na obr. 23 [12].



Obr. 23 Srovnání vozidla s běžným turbem a E-Turbem eGT15 v jízdním testu [12]

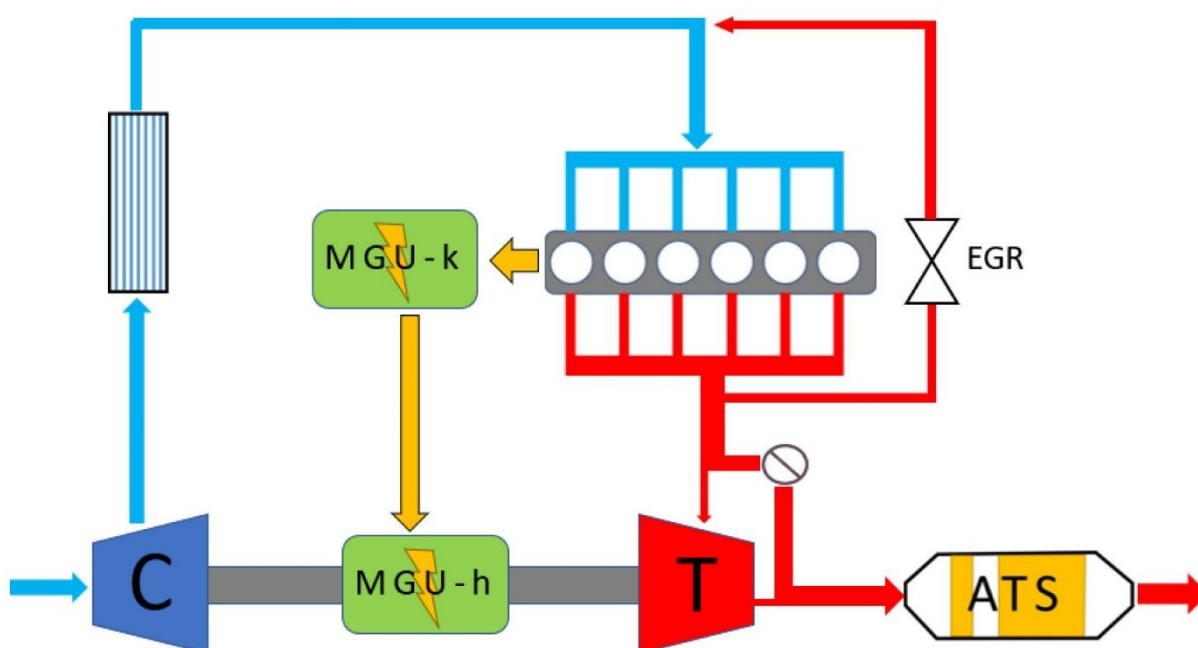
Prozatím byly v této kapitole probírány osobní automobily, ale nákladní automobily také spadají do kategorie silničních vozidel. U těchto se v blízké budoucnosti nepředpokládá přechod na čistě elektrický pohon, primárně z hlediska dojezdu, který je při jejich provozu jedním z důležitých parametrů. Proto se zde začíná počítat s hybridizací, která by vedla ke snížení spotřeby a emisí motoru. Tato vozidla využívají na rozdíl od předchozích vznětové motory, které obtížněji plní emisní normy a potřebují k tomu složitější výfukový systém.



Obr. 24 Schéma hybridního systému nákladního automobilu [13]

Schéma využití odpadní tepelné energie ve výfuku je možné vidět na obr. 24. Elektrickou energii vyrábí jednotka MGU-h na hřídeli turbodmychadla a tu je možné okamžitě využívat jednotkou MGU-k spojenou s klikovou hřídelí motoru.

Jednou z možností zapojení je zrušení přetlakového ventilu turbodmychadla, který nahradí udržování konstantních maximálních otáček turbodmychadla elektromotorem. Elektromotor v tuto chvíli funguje jako generátor elektrické energie, ale jako vedlejší účinek způsobuje nárůst protitlaku ve výfuku. Tím se sice sníží účinnost samostatného spalovacího motoru, ale je možné dosáhnout vyšší účinnosti celku rozumným využitím elektrické energie. Je také možné použít místo přetlakového ventilu obtokový ventil, jehož funkce je popsána níže.



Obr. 25 Schéma provozního režimu pohonné jednotky v případě studeného motoru [13]

Protože nejvíce emisí je produkováno, když je motor studený, je možné s pomocí E-Turba zlepšit schopnost motor nastartovat a emisní systémy uvést do provozu dříve. Elektromotorem je možné zvýšit otáčky kompresoru a poskytnout tím motoru vyšší nasávaný tlak při jeho nastartování. Tím se motor dříve dostane do ustáleného stavu a sníží se emise nespálených uhlovodíků. Než se motor zahřeje, výfukové plyny prochází obtokovým ventilem turbíny pro dřívější ohřátí emisní soustavy ve výfuku. V tomto případě je odebírána elektrická energie jednotkou MGU-k a MGU-h na turbodmychadle pomáhá dosáhnout kompresoru požadovaných otáček (viz obr. 25). Po zahřání motoru a emisního systému je pak možné měnit režimy využití elektromotorů v systému dle jízdních požadavků.

3 SOFTWARE GT-SUITE

Praktická část diplomové práce je zpracována v softwaru GT-Suite 2016 vyvíjeném společností Gamma Technologies. Program je určený pro simulace v automobilovém průmyslu. Umožňuje simulovat jednotlivé součásti vozidel, jimiž může být spalovací motor, emisní systémy, systémy chlazení a tepelný management, vstřikování paliva, hydrauliku a pneumatiku, problematiku mazání, kinematiku a dynamiku klikových a vačkových hřídelí, převodové systémy a řazení. Druhou součástí je modul pro simulování celého vozidla z hlediska výkonu a spotřeby paliva.

Pro tuto práci je pro vytvoření modelu motoru použit modul GT-Power, který se zaměřuje na výkonnostní simulaci spalovacího motoru. V tomto modulu je simulován motor pro získání potřebných dat, která jsou následně vložena do modelu vozidla pro zkrácení výpočtového času při simulaci vozidla. Model vozidla je vytvořen v modulu GT-Suite určenému pro sestavení modelu hybridních, elektrických vozidel a vozidel se spalovacími motory, jež umožňuje provést simulaci jízdy vozidla dle předurčených okrajových podmínek.

Práce v programech GT-Suite se skládá z vytváření modelu pomocí tzv. šablon (bloků), reprezentujících součásti spalovacího motoru a vozidla na pracovní plochu. Tyto bloky mají předdefinované vlastnosti, které je třeba uživatelem doplnit (např. vrtání a zdvih motoru pro simulaci spalovacího motoru, nebo převodové poměry převodovky a rozměry pneumatik pro model vozidla). Bloky jsou následně propojeny do řetězce pomocí spojovací čáry reprezentujícího zapojení daných součástí ve skutečném vozidle (např. zapojení motor-spojka-převodovka). Spojovací čára určuje, které součásti jsou propojeny a jakým způsobem. Určuje např. připojení spojky na vstupní hřídel převodovky a na výstupní připojení hřídele vedoucí k diferenciálu, čímž zajišťuje správnou posloupnost komponentů.

Pro zobrazení a vyhodnocení výsledků je součástí softwaru modul GT-POST, který nabízí prohlížení velkého množství dat, která byla získána při simulaci motoru nebo vozidla. Pro každý blok umístěný na pracovní ploše je dostupné určité množství dat dané typem dané šablony. Modul nabízí vytváření tabulek a grafů ze získaných dat a jejich úpravu.

Zjednodušený způsob, jakým GT-Suite řeší pohyb vozidla je vyjádřen dvěma rovnicemi, které se týkají dvou stran, které jsou v pohybu při provozu vozidla. První částí je spalovací motor, jehož požadovaný točivý moment vyjadřuje rovnice 1 [14]. V rovnici figuruje moment setrvačnosti pohybujících se částí motoru a zrychlení a úhlové zrychlení, vyjádřené derivací otáček motoru.

$$\tau_{eng} = [I_{eng}] \frac{d\omega_{eng}}{dt} \quad (1)$$

Druhá část vyjadřuje točivý moment, který je potřeba k pohonu celého vozidla od spojky po kola, přičemž se skládá z momentů setrvačnosti jednotlivých částí hnacího a převodového ústrojí, pneumatik a sil, které působí proti směru pohybu vozidla. V rovnici 2 [14] je vyjádřen tento moment součtem třech částí. Rovnice pro tyto části jsou zapsány ve vzorcích 3, 4, a 5.

$$\tau_{drv,v} = \tau_{EFF_INER} + \tau_{TRANS_RAT} + \tau_{EXT} \quad (2)$$

Rovnice 3 [14] je první částí předchozí, přičemž vyjadřuje moment, kterého je potřeba dosáhnout pro pohon veškerého ústrojí od spojky po kola. Její součástí je postupně moment setrvačnosti vstupní části převodovky, moment setrvačnosti výstupní části převodovky, moment setrvačnosti hnací hřídele (podělené druhou mocninou převodového poměru převodovky), moment setrvačnosti kol vozidla a moment setrvačnosti zbytku vozidla (podělené násobkem druhých mocnin převodu převodovky a diferenciálu), vynásobené úhlovým zrychlením rotujících součástí.

$$\tau_{EFF_INNER} = \left[I_{trans1} + \frac{I_{trans2}}{R_t^2} + \frac{I_{dsh}}{R_t^2} + \frac{I_{axl}}{R_d^2 R_t^2} + \frac{M_{veh} r_{whl}^2}{R_d^2 R_t^2} \right] \frac{d\omega_{drv}}{dt} \quad (3)$$

Rovnice 4 [14] jež je druhou součástí rovnice 2, vyjadřuje zatížení vyvolané přechodným převodovým poměrem. Tato část rovnice je vytvořena kvůli způsobu, jakým GT-Suite implementuje převodové poměry, jež je tvořen jedním proměnným ozubením, které při přerazení mění lineárně převodový poměr nezávisle na typu převodovky. Tato část rovnice tedy kompenzuje zmíněnou úpravu soukolí podělením jednotlivých momentů setrvačnosti třetí mocninou převodového poměru převodovky.

$$\tau_{TRANS_RAT} = - \left[\frac{I_{trans2}}{R_t^3} + \frac{I_{dsh}}{R_t^3} + \frac{I_{axl}}{R_d^2 R_t^3} + \frac{M_{veh} r_{whl}^2}{R_d^2 R_t^3} \right] \omega_{drv} \frac{dR_t}{dt} \quad (4)$$

Poslední částí jsou externí silové odpory působící na vozidlo zobrazené v rovnici 5 [14]. Těmito silami jsou aerodynamický odpor, valivý odpor a odpor při stoupání. Pro získání točivého momentu jsou tyto síly vynásobeny poloměrem kola a pro převedení na moment u spalovacího motoru poděleny součinem převodových poměrů převodovky a diferenciálu.

$$\tau_{EXT} = \left[\frac{F_{aer} + F_{rol} + F_{grad}}{R_d R_t} \right] r_{whl} \quad (5)$$

Pro simulaci jízdního cyklu je vozidlu prostřednictvím šablony řidiče zadána rychlost v závislosti na čase, kterou by měl model co nejpřesněji kopírovat pomocí regulace plynového a brzdového pedálu. Pomocí rovnic 1 a 2 je nejdříve určen požadovaný točivý moment pro dané zrychlení vozidla a zpětně získána poloha plynového pedálu.

4 MODEL PRO SIMULACI JÍZDNÍCH CYKLŮ

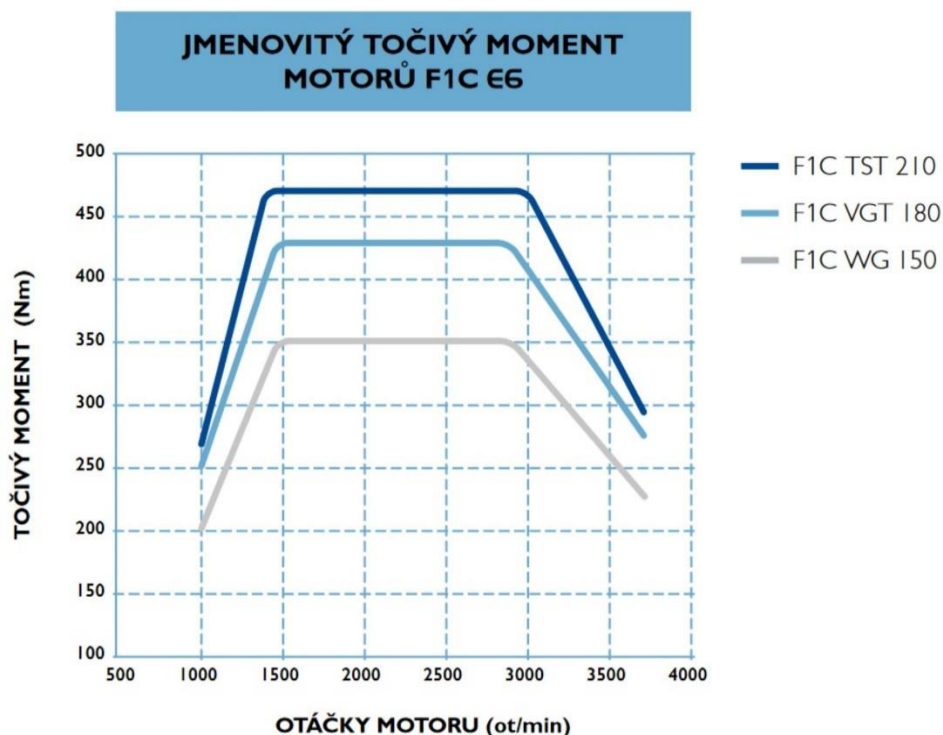
V následující kapitole budou nejdříve probrány specifikace vozidla a motoru, které jsou předmětem této práce. Modely spalovacího motoru a vozidla, na kterém se budou provádět simulace jízdních cyklů pro nalezení nejvýhodnějšího využití energetických toků v pohonné jednotce, jsou popsány v kapitolách 4.2 a 4.3.

4.1 ZVOLENÉ VOZIDLO PRO SIMULACI

Pro simulaci bylo zvoleno užitkové vozidlo Iveco Daily, které je osazeno vznětovým motorem F1C o objemu 3,0 litru, jehož specifikace jsou rozebrány v kapitole 4.1.1. Model, který je detailně popsán v kapitole 4.2, je virtuálním obrazem tohoto reálného motoru s mírnými odchylkami.

4.1.1 PARAMETRY MOTORU F1C 3,0 L

Vznětový motor Iveco F1C 3,0 l je výkonnější ze dvou motorů instalovaných ve vozech Iveco Daily (druhým je Iveco F1A 2,3 l). Tento motor byl zvolen pro jeho větší rozsah využití v rámci všech konfigurací Iveco Daily, kdy je využíván v 6 z 9 variant tohoto vozu.



Obr. 26 Průběh točivého momentu tří variant motoru Iveco F1C [15]

Motor je nabízen ve třech výkonnostních variantách jako vznětový motor (průběh točivého momentu těchto variant je možné vidět na obr. 26) a v jedné variantě upravené pro pohon na stlačený zemní plyn. Vznětové motory nesou označení F1C WG 150, F1C VGT 180 a F1C TST 210. Pro simulaci byl vybrán druhý jmenovaný, nabízející točivý moment 430 Nm v rozmezí otáček 1400–2800 min^{-1} a maximálním výkonem 132 kW v 2800 min^{-1} [14].

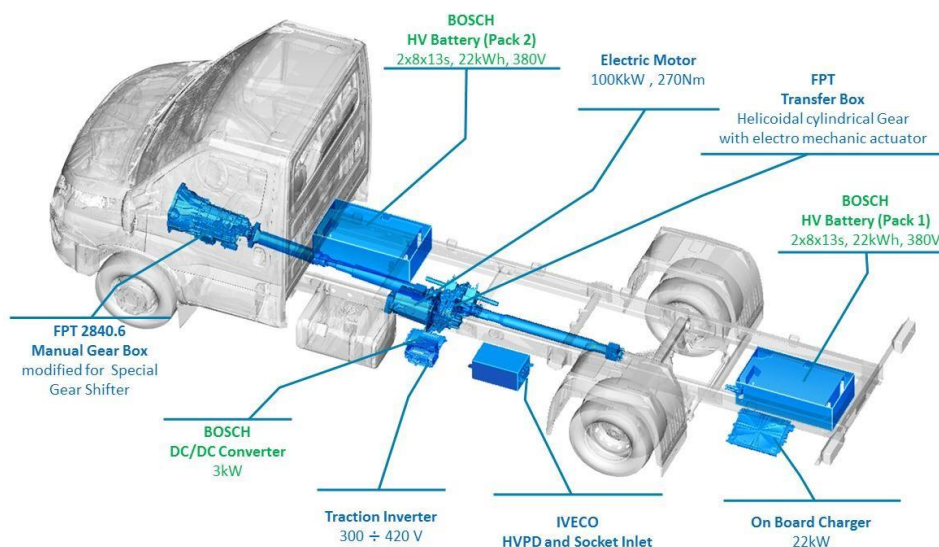
Tabulka níže zobrazuje parametry motoru, podle kterých byl vytvořen model v programu GT-Power.

Tab. 1 Parametry motoru FIC VGT 180 [15][16]

Parametr	Hodnota
Vrtání	95,8 mm
Zdvih	104 mm
Počet válců	4
Zdvihový objem	2,998 l
Délka ojnice	220 mm
Kompresní poměr	19:1
Maximální točivý moment	430 Nm v 1400–2800 min ⁻¹
Maximální výkon	132 kW v 2800 min ⁻¹

4.1.2 PARAMETRY VOZIDLA IVECO DAILY

Výrobce Iveco nabízí více variant modelu Daily, označené H1, H2 a H3. Tyto varianty se liší primárně rozměrovými parametry, jako jsou výška, rozvor a délka (šířka zůstává stejná), které ovlivňují velikost nákladového prostoru. Pro tuto práci byla vybrána varianta H2, která je kompromisem mezi malým a velkým užitkovým vozidlem.



Obr. 27 Konfigurace hybridního pohonného systému vozidla Iveco Daily [17]

Pro tuto simulaci bylo vozidlo osazeno elektromotorem a bateriemi, čímž se z vozidla stal plug-in hybrid. Konfigurace zapojení hnacího ústrojí je paralelní. Na obr. 27 lze vidět konfiguraci zapojení hybridního ústrojí. Pro řazení rychlostních stupňů byla zvolena 8stupňová automatická převodovka Iveco Hi-Matic používaná ve všech modelech.

Tabulka níže zobrazuje parametry vozidla, elektromotoru a akumulátoru, které byly použity jako základ pro model hybridního vozidla v programu GT-Suite. Jako úložiště elektrické energie je použit akumulátor typu Li-Ion s hustotou energie přibližně 200 Wh/kg [18]. Počáteční velikost baterie je zvolena 20 Ah, odpovídající 6 kWh při napětí 300 V, používaném v modelu. Mezi těmito veličinami platí vztah z rovnice 6, přičemž kapacita je dosazena v Ah, napětí ve V a výsledná kapacita je v kWh. Pro výpočet dodatečné hmotnosti, kterou přidává vozidlu je použit vzorec 7, při dosazení kapacity v kWh a hustoty energie ve Wh/kg. Pro výchozí model vychází hmotnost 6 kWh baterie 30 kg.

$$E = \frac{C \cdot U}{1000} \quad (6)$$

$$m_{baterie} = \frac{E \cdot 1000}{e} \quad (7)$$

Tab. 2 Parametry vozidla Iveco Daily [15][17][19]

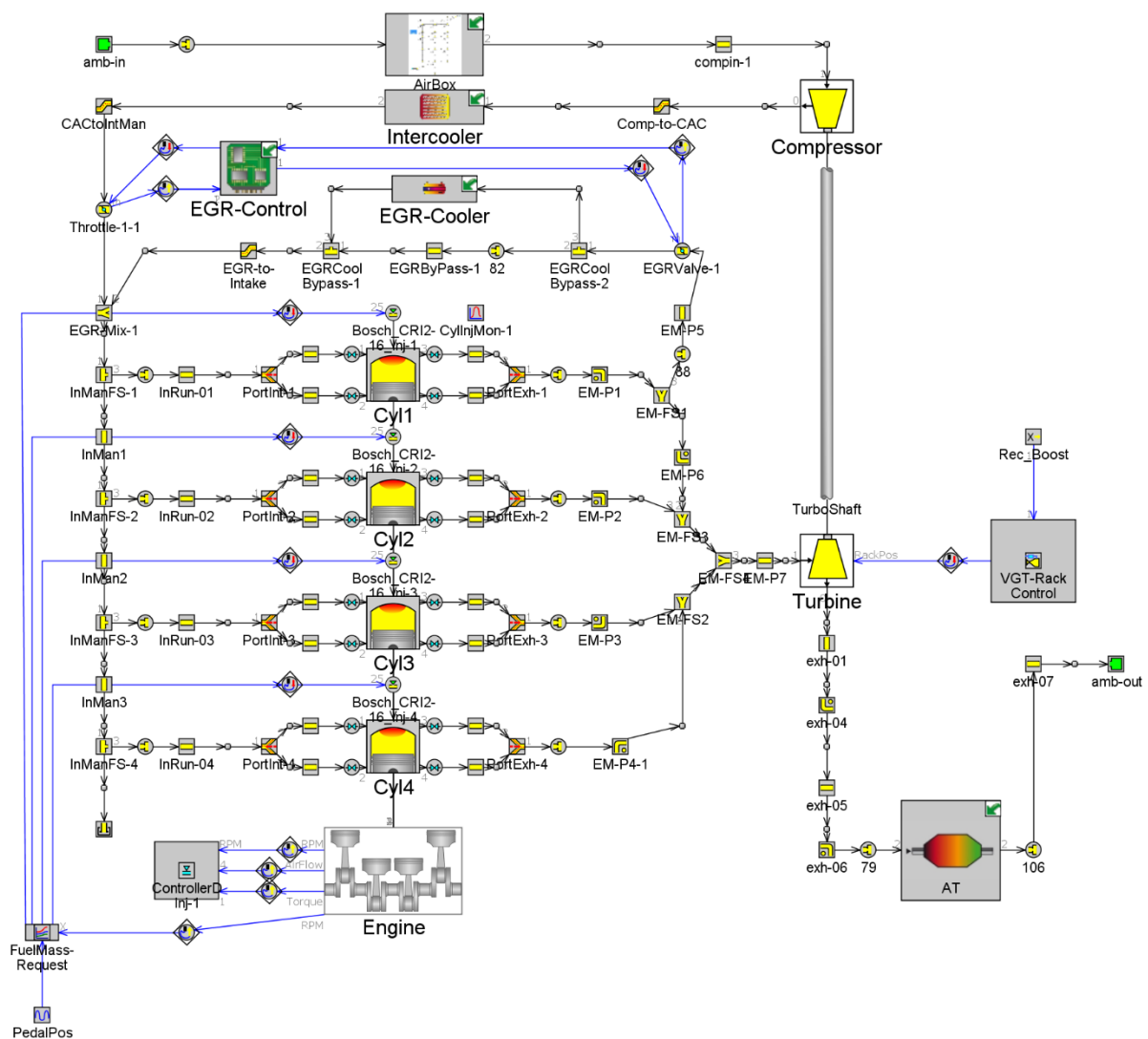
Parametr	Hodnota
Provozní hmotnost vozidla	2200 kg
Maximální celková hmotnost vozidla	3500 kg
Rozvor kol	3,3 m
Poloha těžiště od zadních kol	2 m
Koeficient aerodynamického odporu	0,316
Čelní plocha vozidla	5 m ²
Rozměr pneumatik	218/65/R16
Převodovka	Iveco Hi-Matic 8stupňová
Točivý moment elektromotoru	200 Nm
Kapacita baterie v Ah	20 Ah
Provozní napětí baterie	300 V
Kapacita baterie v kWh	6 kWh
Hmotnost baterie	30 kg

4.2 MODEL MOTORU PRO SIMULACI

V této kapitole je popsán způsob, jakým byl vytvořen model motoru v programu GT-Power.

4.2.1 SESTAVENÍ MODELU MOTORU

Jako základ pro tento motor byl použit vzorový model z knihovny programu vznětového motoru Diesel_4cyl_DIPulse_InjRateMap, který byl upraven tak, aby odpovídal parametrům motoru z tabulky 2. Na obr. 28 lze vidět celý sestavený model motoru. Pro tento případ byl ze vzorového modelu odebrán tlumič výfuku pro zjednodušení výpočtu. EGR ventil byl ponechán, ale pro zjednodušení výpočtového času a celkové simulace je nastavený jako zavřený (průtok vzduchu jím je nulový).



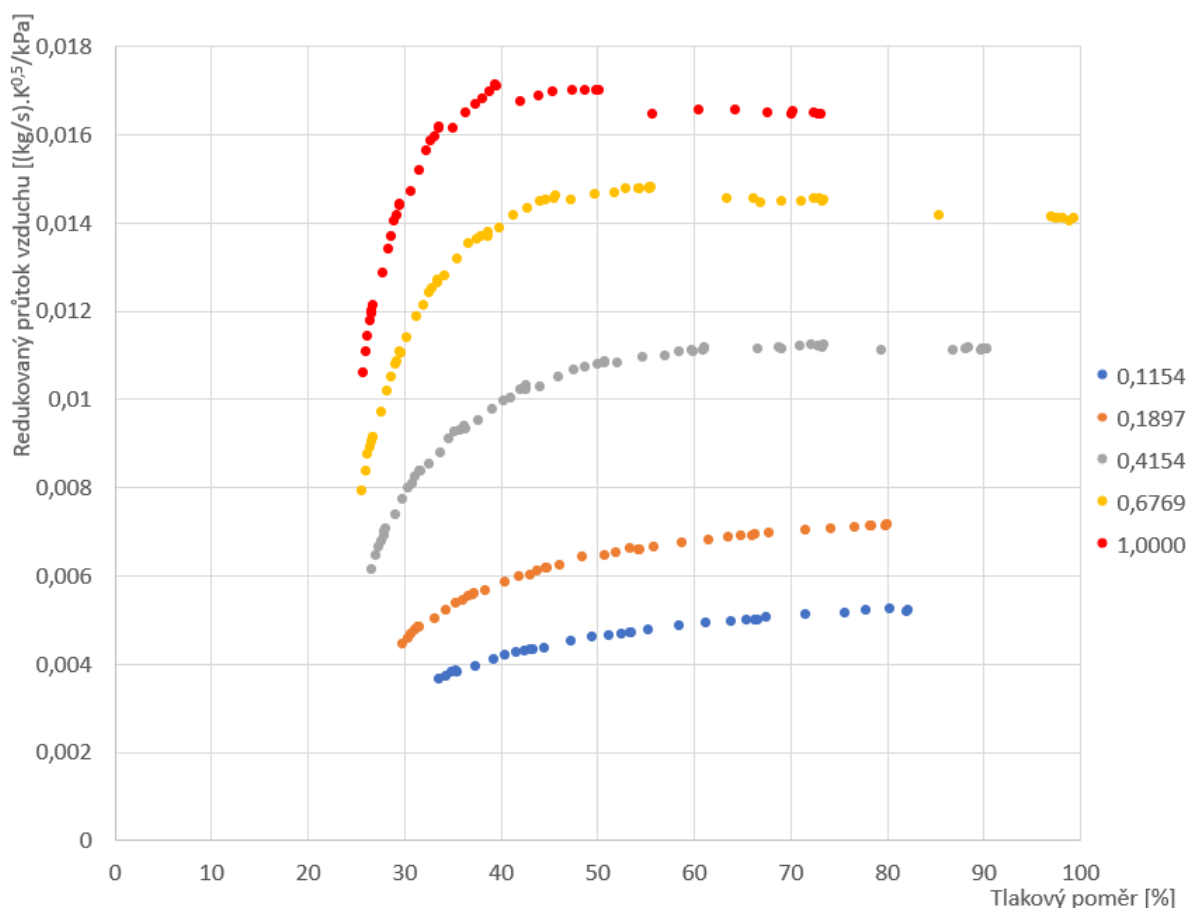
Obr. 28 Pohled na celý model motoru v prostředí programu GT-Power

4.2.2 TURBODMYCHADLO

Charakteristika turbodmychadla GTD 2056 V byly poskytnuta společností Garrett z jejího měření a tímto byly nahrazeny vzorové hodnoty. U kompresoru byly změněny hodnoty průtoku vzduchu, tlakového poměru a účinnosti v závislosti na otáčkách hřídele turbodmychadla.

Protože turbodmychadlo disponuje proměnlivou geometrií rozváděcího kola turbíny, z pěti měření s různou polohou řídicí tyče bylo nutné vytvořit pět map pro turbínu, které jsou do programu zadány jako redukovaný průtok vzduchu, tlakový poměr a účinnost jako funkce redukovaných otáček. Obr. 29 zobrazuje změnu v grafech závislosti redukovaného průtoku vzduchu na tlakovém poměru v závislosti na poloze řídicí tyče. Poloha řídicí tyče je udávána poměrnou hodnotou, která u reálného turbodmychadla znamená vzdálenost, o kterou se řídicí tyč posouvá. Redukovaný průtok vzduchu je vypočítán dle vzorce 8. Tlakový poměr je zobrazen v poměrných číslech z důvodu zachování firemního know-how.

$$\dot{m}' = \frac{\dot{m} \cdot \sqrt{T_{vstup}}}{P_{vstup}} \quad (8)$$



Obr. 29 Srovnání změn turbíny v závislosti na poloze řídicí tyče

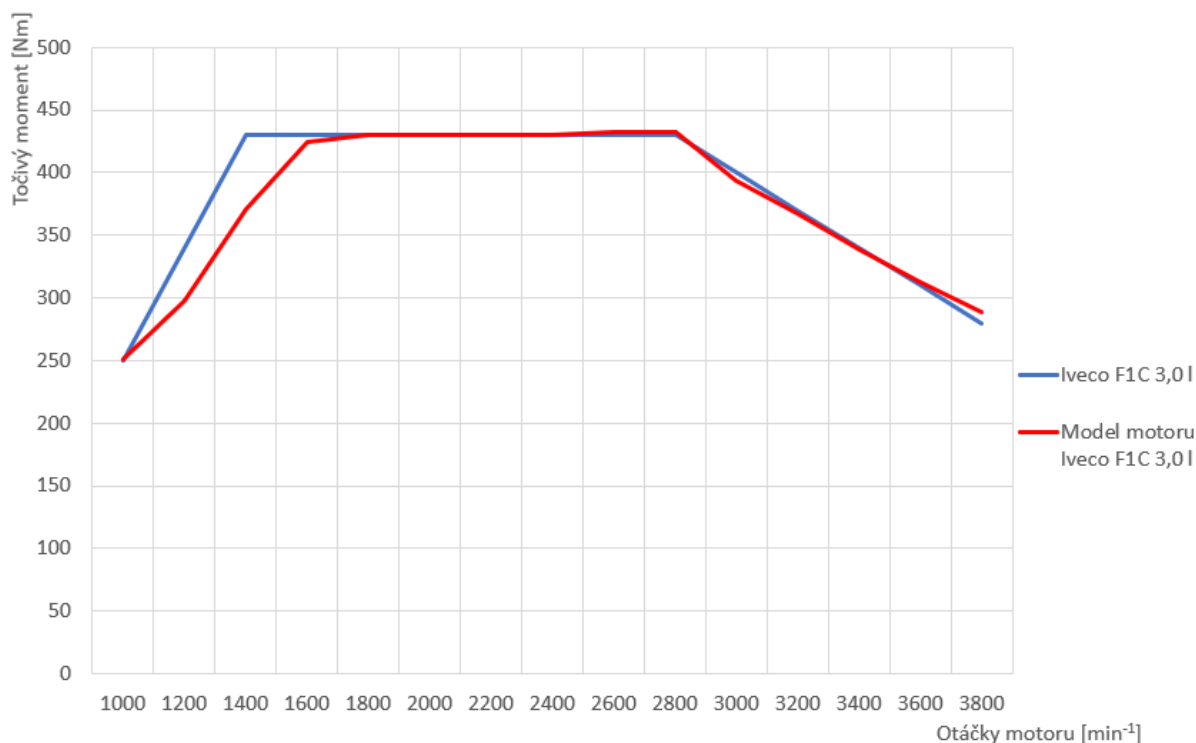
4.2.3 ŘÍZENÍ MOTORU

Systém kontroly vstříkovaní, který v příkladovém modelu fungoval pomocí kontrolní funkce hlídajícího množství vstříknutého paliva tak, aby motor dosahoval požadovaného výkonu, byl odebrán. Tento způsob bylo možné použít v případě, kdyby byly známe charakteristiky motoru (točivý moment, výkon, spotřeba...) v zatíženích 0–100 % v celém rozsahu otáček. Protože byla k dispozici pouze křivka točivého momentu v plném zatížení motoru, bylo potřeba zvolit jiný způsob ovládání množství paliva.

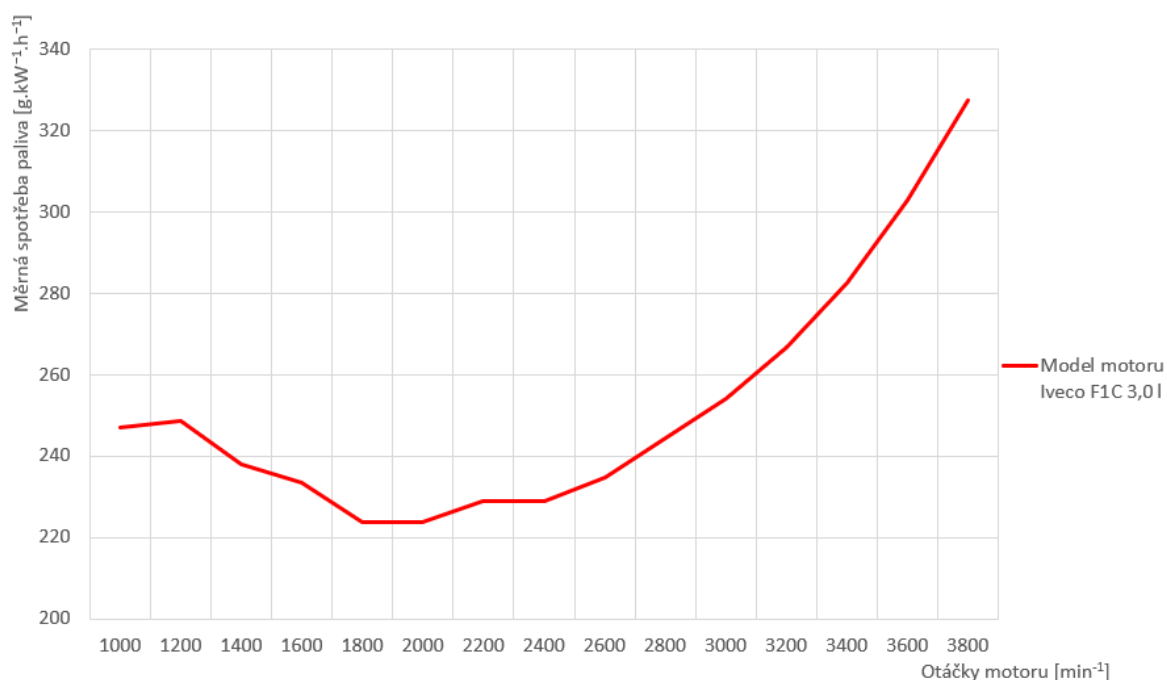
Protože se ve vznětovém motoru nevyskytuje škrťící klapka ovládající průtok vzduchu sacím potrubím, je třeba motor řídit kvalitativně. V této interpretaci řízení probíhá pomocí předem určeného množství paliva v gramech pro každé zatížení, které je dané polohou plynového pedálu.

4.2.4 DOSAŽENÉ CHARAKTERISTIKY MODELU MOTORU

Model vznětového motoru se podařilo naladit tak, že v rozmezí otáček 1600–3800 min^{-1} kopíruje křivku točivého momentu reálného motoru a pouze v rozmezí 1000–1600 min^{-1} roste mírněji. Toto je možné vidět na obr. 30, který zobrazuje modře křivku reálného motoru a červeně křivku vytvořeného modelu. Spotřeba motoru je poté zobrazena na obr. 31, která se v rozmezí jmenovitého výkonu pohybuje v běžných hodnotách pro vznětové motory.

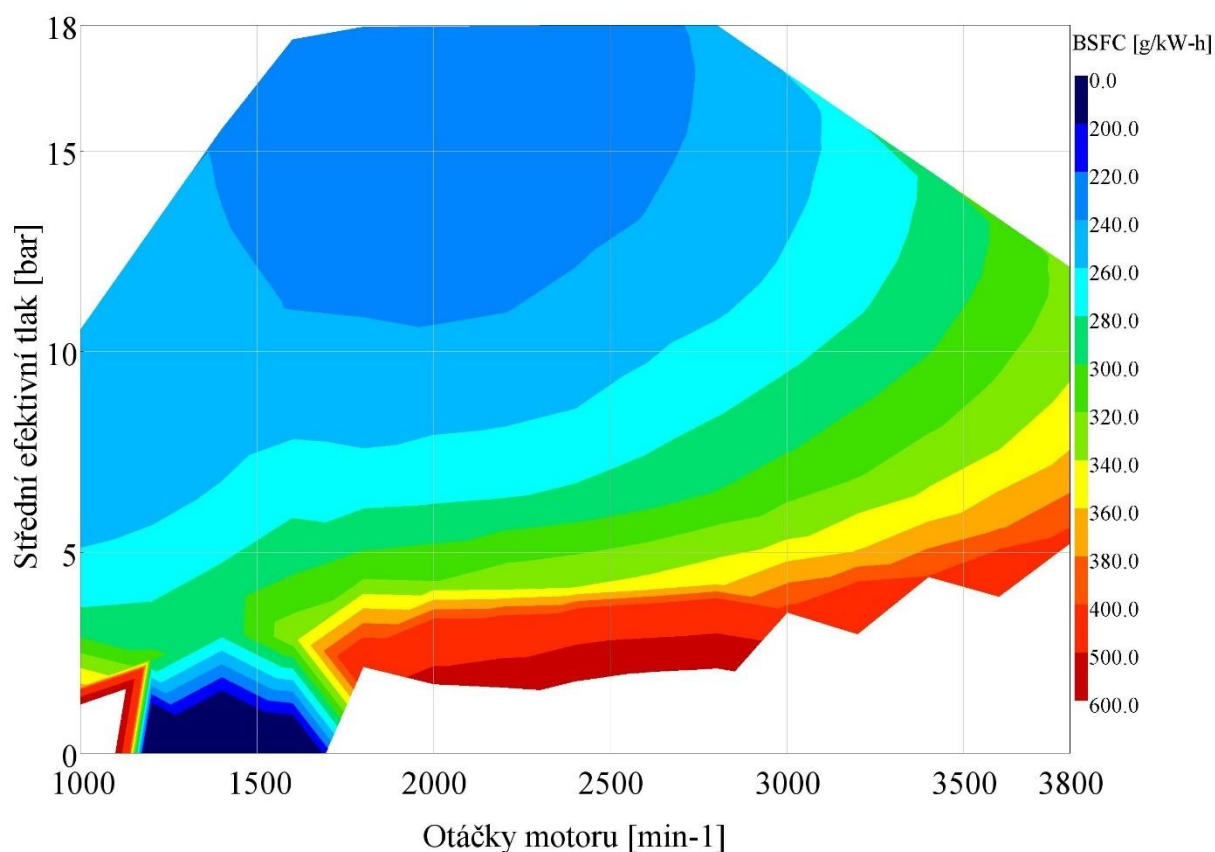


Obr. 30 Srovnání točivého momentu reálného motoru a jeho modelu při plném zatížení



Obr. 31 Měrná spotřeba paliva modelu motoru při plném zatížení

Na obr. 32 lze vidět graf, zobrazující závislost měrné spotřeby paliva na středním efektivním tlaku motoru a otáčkách motoru. Střední efektivní tlak zastupuje zatížení motoru, přičemž je stejným způsobem použit pro účely předání dat o motoru do modelu vozidla. Horní křivka, která uzavírá barevnou plochu grafu, kopíruje křivku točivého momentu při plném zatížení motoru, jež je vidět na obr. 30. Lze si všimnout, že ve vyšších otáčkách s nízkým zatížením motor pracuje s vysokou měrnou spotřebou paliva, zatímco při vyšším zatížení motoru je dosahováno většího výkonu motoru, který snižuje hodnotu měrné spotřeby paliva.



Obr. 32 Graf závislosti měrné spotřeby paliva na otáčkách motoru a středním efektivním tlaku

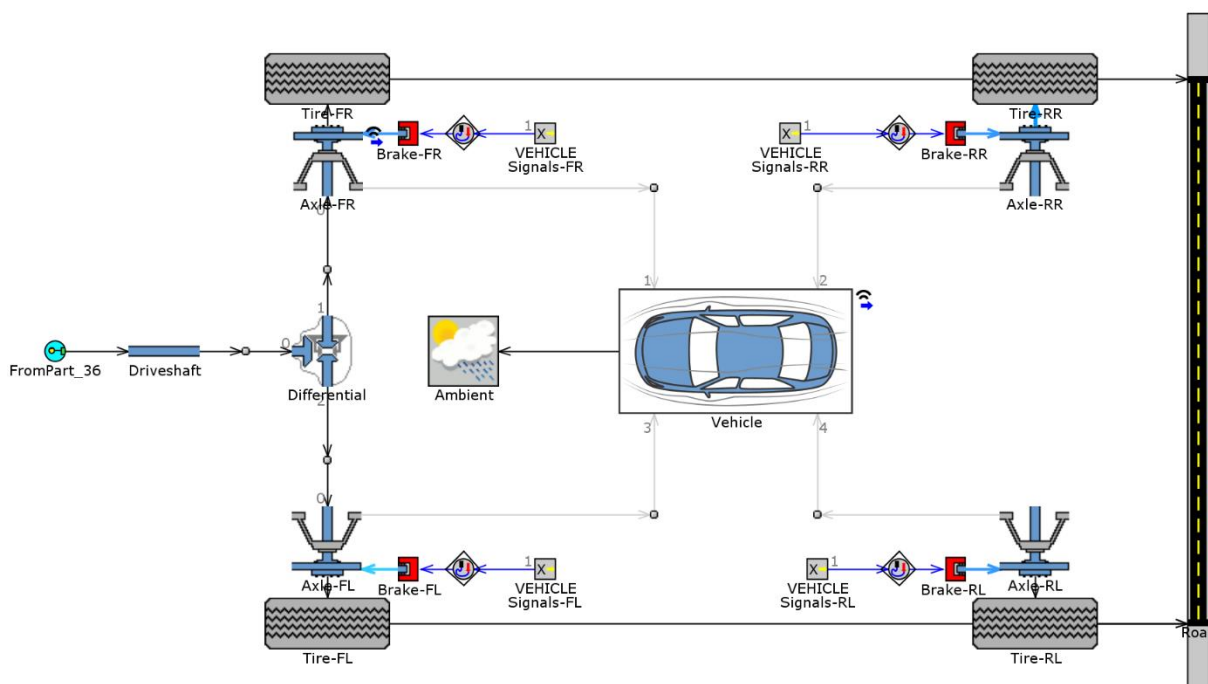
4.3 MODEL VOZIDLA PRO SIMULACI

Jako základ pro model vozidla byl použit vzorový příklad z knihovny GT-Suite Mild_Hybrid. Tento model byl posléze upraven tak, aby splňoval parametry vozidla podrobně popsané v kapitole 4.1.2.

4.3.1 VOZIDLO

Na obr. 33 lze vidět hlavní část modelu vozidla. Skládá se ze samotného vozidla, které je propojeno přes zavěšení s brzdami a koly, která jsou spojena s vozovkou. Kola jsou poté spojena s motorem přes převodové ústrojí začínající diferencíálem, který je zde také možné vidět. Pokračování do automatické převodovky s hydrodynamickým měničem je označeno světle modrou šablonou pojmenovanou FromPart_36. Převodové ústrojí bude rozebráno v samostatné kapitole.

Základní parametry hmotnosti, aerodynamiky a rozměrů byly změněny podle tabulky 2. Velikost čelní plochy vozidla byla přibližně vypočítána z rozměrů vozidla v čelním pohledu a součinitel aerodynamického odporu vyhledán na internetu. Poloha těžiště od zadní nápravy byla určena dle tabulky odhadem blíže ke přední nápravě, protože je počítáno s nezatíženým vozidlem a nebylo známé zatížení jednotlivých náprav. Pro kola je možné zadat jejich rozměr dle metrického kódu pneumatik ISO (běžně používané v praxi). Pro zvolené vozidlo je tento rozměr 225/65/R16.



Obr. 33 Model vozidla v softwaru GT-Suite

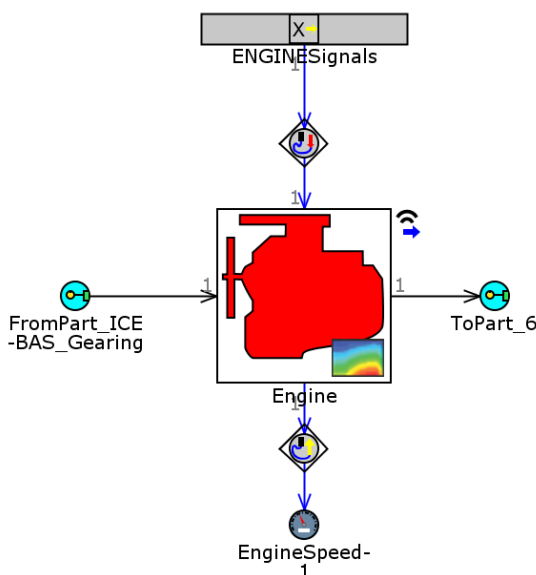
4.3.2 MOTOR

Tento model využívá parametry motoru, které byly spočítány v kapitole 3.2. Protože je motor počítán v odděleném modelu, je potřeba ho do vozidla vložit zjednodušeně přes šablonu EngineState. Je možné ji vidět zapojenou v modelu na obr. 34, kde z levé strany značí světle modrá ikona přechod do podsoustavy elektromotoru a vpravo přechod k převodovce. Horní ikony vedou k řídicí jednotce motoru a spodní k živému monitoru zobrazujícímu otáčky motor v průběhu simulace. Do zmíněné šablony se zadávají základní parametry motoru a poté parametry paliva. Seznam těchto parametrů je v následující tabulce.

Tab. 3 Parametry motoru vložené do šablony EngineState

Parametr	Hodnota
Typ motoru	čtyřdobý
Objem motoru	2998 cm ³
Minimální otáčky	700 min ⁻¹
Moment setrvačnosti motoru (použit ze vzorového motoru)	0,24 kg.m ²
Hustota paliva	850 kg/m ³
Výhřevnost paliva	42,6 MJ/kg

Předání charakteristik spalovacího motoru spočítaného v jiném modelu probíhá pomocí tzv. map. Mapy jsou vkládány do šablony XYZmap a předány motoru skrze určenou kolonku. První mapou je mapa mechanického výstupu motoru. Tu tvoří závislost BMEP (střední efektivní tlak) v barech na otáčkách motoru a poloze plynového pedálu. Vozidlu je tímto způsobem předán výkon motoru.



Obr. 34 Schéma zapojení spalovacího motoru v modelu vozidla

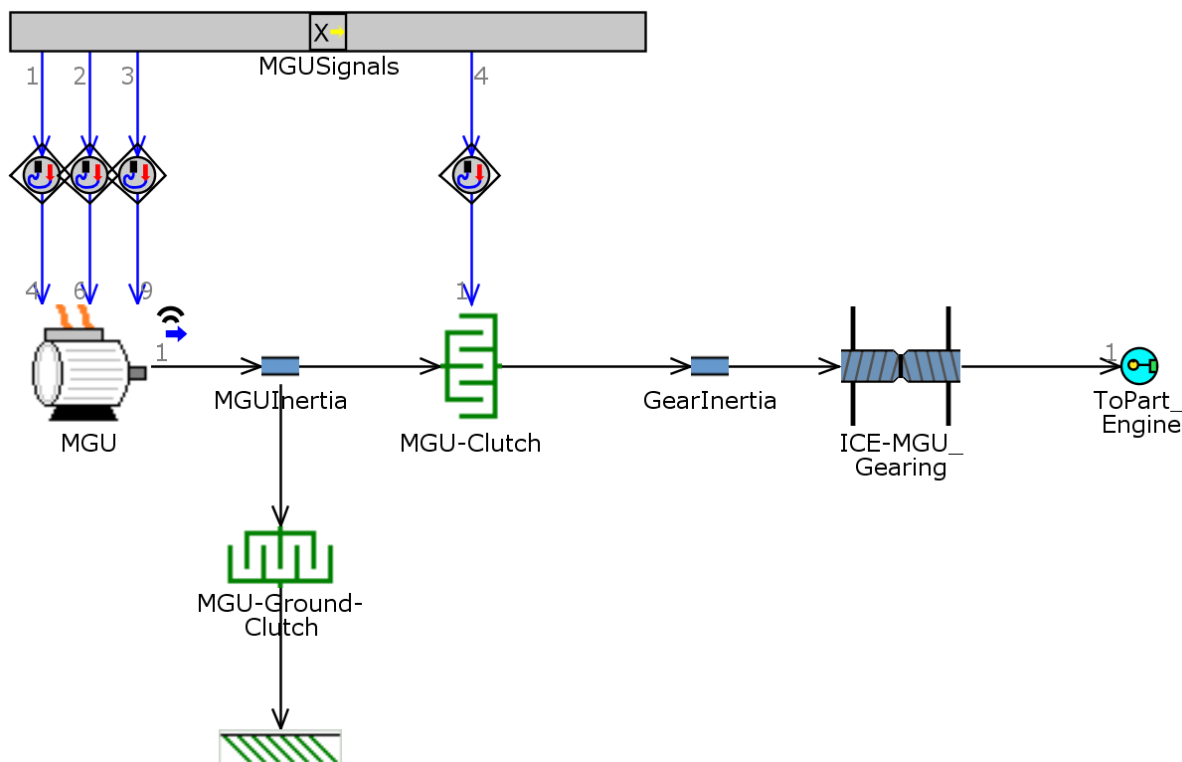
Druhou mapou je mapa tření motoru. Ta je zadávána pomocí závislosti FMPEP (střední třecí efektivní tlak) v barech na otáčkách motoru a BMEP a předává vozidlu informace o třecích ztrátách v motoru. Poslední důležitou mapou je spotřeba paliva, která je zadána jako závislost spotřeby paliva v kg/h na otáčkách motoru a jeho zatížení dané pomocí BMEP.

Do motoru je možné vložit větší množství map, díky kterým je možné spočítat větší množství dat. Příkladem jsou emise, které je možné jednotlivě zadat pro NO_x , HC, CO a CO_2 v závislosti na otáčkách motoru a zatížení. Pro zjednodušení výpočtu je tato možnost vynechána.

Řízení motoru probíhá pomocí řídicí jednotky motoru. Řídicí jednotka přebírá signály od řidiče a předává je motoru. Je třeba zde upravit volnoběžné otáčky motoru pro počítanou variantu a ostatní parametry je možné ponechat jako u vzorového příkladu. Řízení probíhá pomocí šablony řidiče, která dostává informace o rychlosti vozidla a otáčkách motoru a podle toho se snaží co nejvíce přiblížit zadanému jízdnímu cyklu. U řidiče je možné upravovat parametry agresivity, které ovlivňují spotřebu paliva a schopnost přiblížit se k zadané rychlostní křivce.

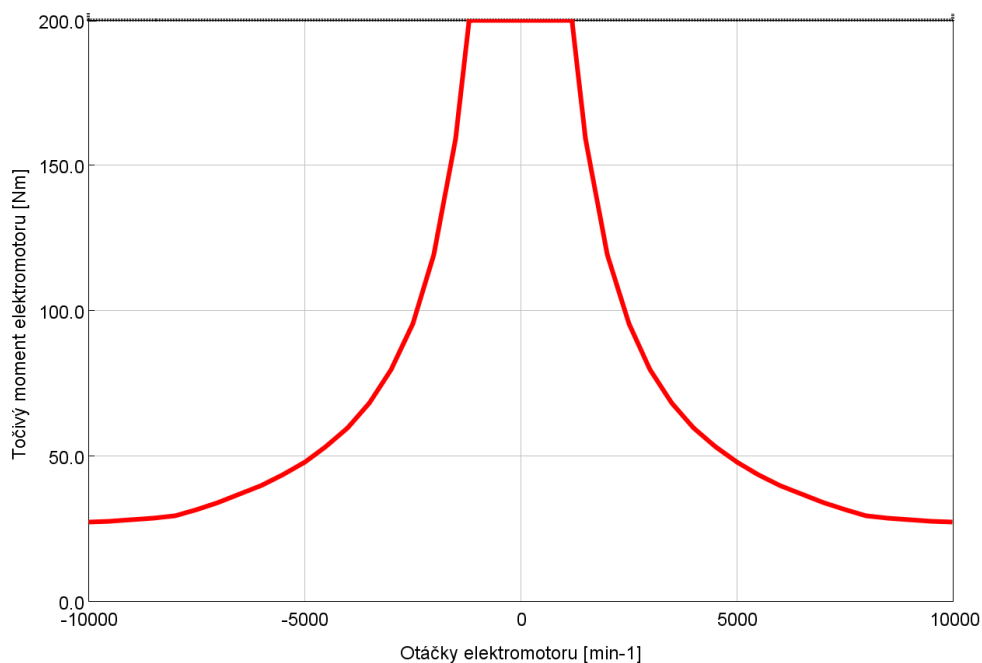
4.3.3 ELEKTROMOTOR A BATERIE

Elektromotor (označen MGU) je k systému připojen z opačné strany motoru, než je převodovka (obr. 35). S klikovou hřídelí je spojen přes ozubené soukolí s převodem 2 do rychla a přenos točivého momentu zajišťuje spojka MGU-Clutch. Druhá spojka pojmenovaná MGU-Ground-Clutch pracuje ve chvíli, kdy režim vozidla nevyžaduje pohon elektromotorem. V tu chvíli je spojka MGU-Clutch rozepnutá a MGU-Ground-Clutch sepnutá, čímž zajistí klidový režim elektromotoru. Světle modrá ikona ToPart_Engine zobrazuje přechod do podsoustavy motoru z předchozí kapitoly.



Obr. 35 Schéma zapojení elektromotoru v modelu vozidla

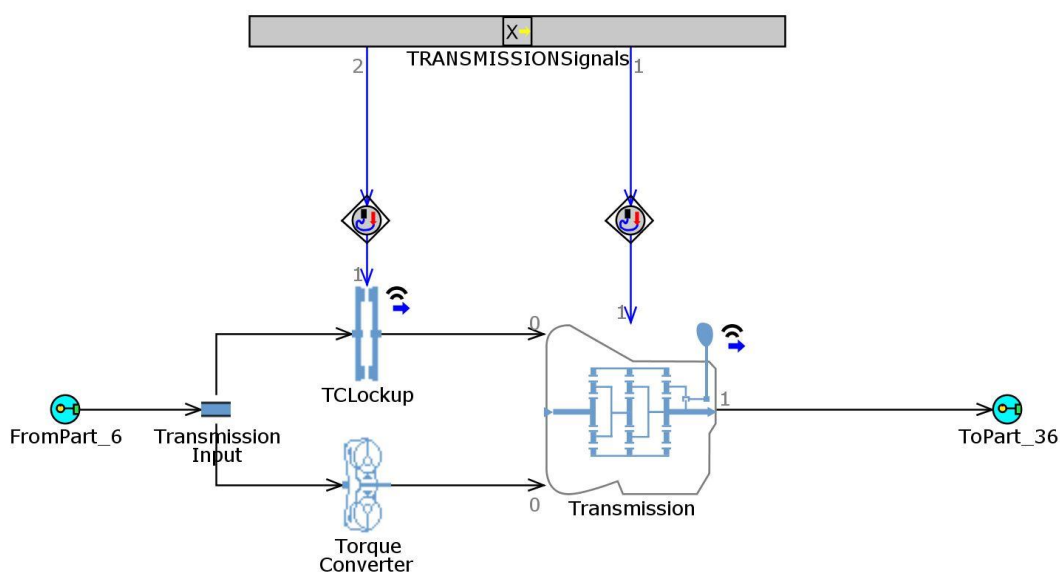
Na obr. 36 lze vidět momentovou charakteristiku použitého elektromotoru. Maximálního točivého momentu 200 Nm dosahuje v rozmezí otáček od -1200 do 1200 min^{-1} a poté klesá k hodnotě 27,2 Nm v $10\,000 \text{ min}^{-1}$. Z tohoto důvodu byl použit výše zmíněný převod tak, aby byl elektromotor provozován co nejvíce času ve svém maximu. O řízení motoru se stará PID regulátor, který v závislosti na vstupech určených jízdním režimem určuje požadovaný výkon elektromotoru pro provoz vozidla.



Obr. 36 Momentová charakteristika použitého elektromotoru

4.3.4 PŘEVODOVÉ ÚSTROJÍ

Ve vzorovém modelu se vyskytuje automatické 6stupňová převodovka s hydrodynamickým měničem (obr. 37). Tato převodovka byla upravena na 8stupňovou přidáním dalších dvou rychlostí a nahrazením převodovými poměry reálné převodovky Hi-Matic používané ve vozidlech Iveco Daily. Tabulka 4 zobrazuje převodové poměry jednotlivých rychlostních stupňů. Pro převodový poměr v diferenciálu byla použita hodnota 3,154 [20].

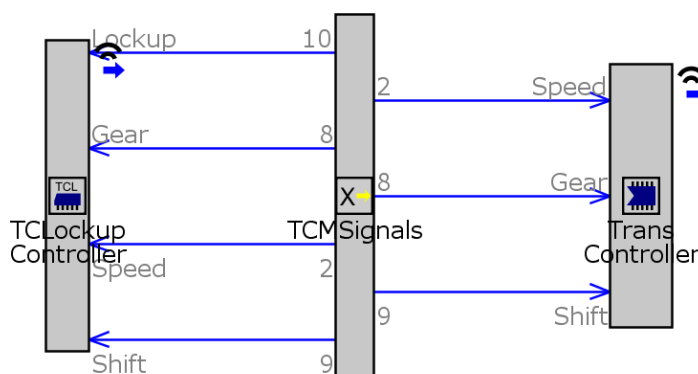


Obr. 37 Schéma zapojení převodovky s hydrodynamickým měničem v modelu vozidla

Tab. 4 Převodové poměry rychlostních stupňů převodovky Iveco Hi-Matic [21]

Rychlostní stupeň	Převodový poměr
1	4,6957
2	3,1304
3	2,1039
4	1,6667
5	1,2845
6	1
7	0,8392
8	0,6667

Pro řízení převodového ústrojí je třeba nejdříve vyřešit způsob, jakým funguje hydrodynamický měnič. Protože pracuje s nižší účinností než sepnutá běžná spojka, je výhodné používat jej pouze pro rozjezd vozidla. Řídící jednotka převodovky (viz obr. 38) a její část TCLockup Controller zajišťuje provoz měniče pouze v otáčkách 850–1500 min⁻¹ a poté dojde k sepnutí spojky TCLockup.



Obr. 38 Schéma zapojení řídicí jednotky převodovky

Řízení způsobu, jakým převodovka řadí, může být řešeno různými způsoby. Nejjednodušší způsob je stanovení závislosti zařazeného rychlostního stupně na čase. Tato varianta bere v úvahu pouze jednu předurčenou trasu, po které se vozidlo pohybuje, není tedy schopná přizpůsobit se různým jízdním cyklům. Z tohoto důvodu je lepší využít jednu za dvou dalších možností.

První z nich je logika řazení podle rychlosti vozidla, pro kterou se každému rychlostnímu stupni přiřadí rychlost vozidla, při které zařadí vyšší rychlostní stupeň, a rychlost, při které zařadí nižší rychlostní stupeň. Pro tuto variantu je potřeba zjistit, jakým otáčkám motoru odpovídá daná rychlost vozidla, aby se simulace nepohybovala mimo rozmezí otáček motoru.

Stejným způsobem funguje druhá varianta, která místo rychlosti vozidla jako řídicího faktory využívá otáčky motoru. Způsob řazení je tedy stejný, jako u předchozí varianty, pouze se místo rychlosti zadají otáčky motoru. Protože je v modelu využívána tato varianta, v tabulce 5 je podrobně rozepsána spolu s rychlostmi odpovídajícími daným otáčkám.

Tab. 5 Způsob řazení převodovky pevným stanovením otáček motoru pro přeřazení

Rychlostní stupeň	Otáčky pro přeřazení na daný rychlostní stupeň	Otáčky pro přeřazení na nižší rychlostní stupeň	Rychlost	Rychlost
[-]	[min ⁻¹]	[min ⁻¹]	[km/h]	[km/h]
1	-	-	-	-
2	2100	1200	18,7	16,0
3	2200	1300	29,3	25,8
4	2300	1400	45,6	35,0
5	2300	1500	57,6	48,7
6	2200	1600	71,4	66,7
7	2150	1600	89,7	79,5
8	2100	1500	104,4	93,8

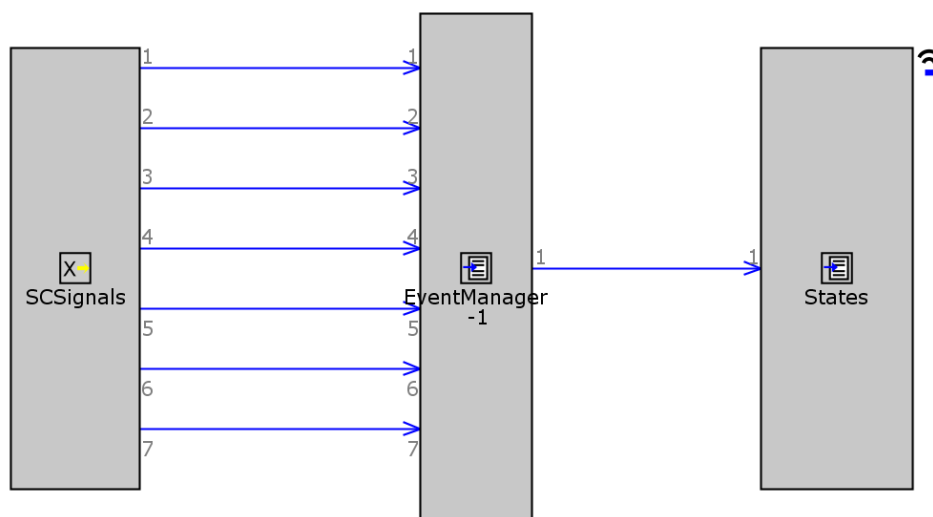
4.3.5 ŘÍZENÍ HYBRIDNÍHO POHONU

Řízení vozidla a rozhodování o využití jednotlivých provozních režimů se provádí v záložce modelu Supervisory Controller (obr. 39). Tato část modelu má předdefinovanou logiku, pomocí které rozhoduje, jaký jízdní režim bude následovat.

Vstupními veličinami, podle kterých se rozhoduje, jsou aktuální režim, stav baterie, otáčky motoru, rychlost vozidla, poloha plynového a brzdového pedálu a okamžité zrychlení vozidla. V tabulce 6 jsou vypsány tyto vstupní veličiny spolu s jejich označením, pomocí kterého jsou tvořeny logické funkce pro rozhodování vozidla o jízdních režimech.

Tab. 6 Popis vstupních veličin pro řídicí jednotku Supervisory Controller

Označení	Popis vstupní veličiny
SOC	Okamžitý stav baterie
RPM	Okamžité otáčky motoru
VehSpeed	Okamžitá rychlost vozidla
AccelPP	Poloha plynového pedálu řidiče
BrakePP	Poloha brzdového pedálu řidiče



Obr. 39 Schéma zapojení řídicí jednotky Supervisory Controller

Byla vytvořena nová řídicí logika pomocí šablony EventManager, která zajišťuje přesnou posloupnost jízdních režimů tak, aby nemohl nastat v daný okamžik nesmyslný režim a zároveň byly podmínky jednoznačné. V následující tabulce jsou vypsané režimy, ve kterých je možné vozidlo provozovat a jejich číselné označení používané při rozhodování.

Tab. 7 Provozní režimy vozidla

Číselné označení	Popis jízdního režimu
1	Stojící vozidlo, spalovací motor vypnutý
2	Startování spalovacího motoru
3	Pohon pouze na spalovací motor
4	Brzdění s využitím rekuperace energie elektromotorem
5	Stojící vozidlo, spalovací motor na volnoběh
6	Pohon na spalovací motor s asistencí elektromotoru
7	Plně elektrický pohon bez spalovacího motoru

Fungování jednotlivých režimů (tabulka 7) je zajištěno pomocí šablony IfThenElse (v obr. 39 označena States), která určuje stav jednotlivých komponent v hnacím řetězci. Tyto komponenty jsou spalovací motor, elektromotor, brzdový systém a spojka elektromotoru. V následující tabulce 8 lze vidět hodnoty použité pro konfiguraci těchto zařízení.

Tab. 8 Konfigurace pohonné soustavy v jednotlivých jízdních režimech

Jízdní režim	Spalovací motor	Elektromotor	Spojka MGU	Brzdový systém
1	0	0	1	100
2	1	1	1	0
3	1	0	0	0
4	1	2	1	2
5	1	3	1	100
6	1	1	1	0
7	0	1	1	0

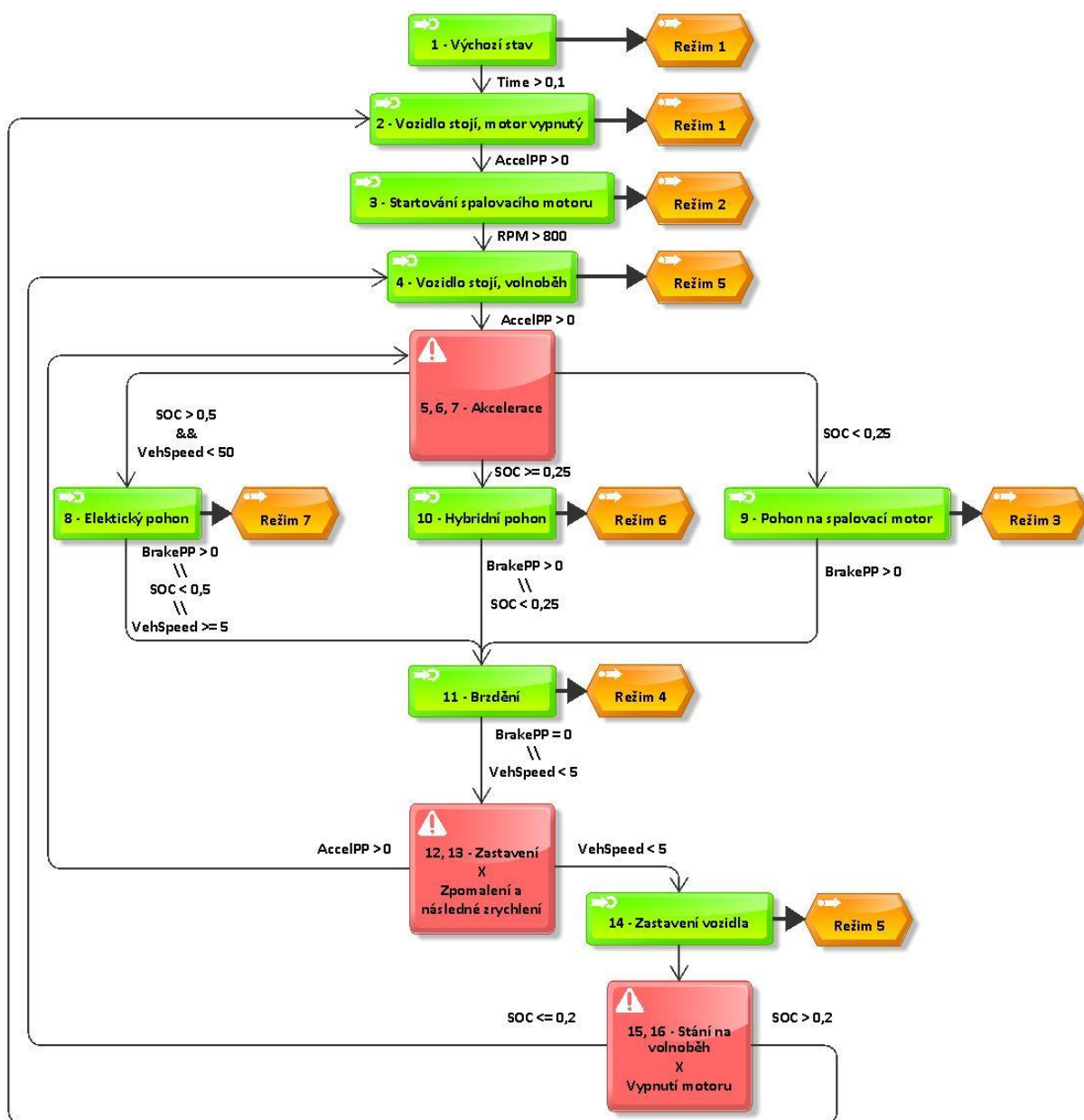
Jednotlivé hodnoty jsou vysvětleny v následujících bodech:

- Spalovací motor
 - 0 – motor je vypnutý,
 - 1 – motor je zapnutý.
- Elektromotor
 - 0 – elektromotor je nevyužíván,
 - 1 – elektromotor je využíván k pohonu vozidla,
 - 2 – elektromotor je využíván k regenerování energie při brzdění,
 - 3 – elektromotor je využíván k regenerování energie při stání na volnoběh.
- Spojka MGU
 - 0 – spojka je rozepnutá,
 - 1 – spojka je sepnutá.
- Brzdový systém
 - 0 – brzdový systém je vypnutý,
 - 2 – brzdový systém je v režimu regenerace energie při brzdění,
 - 100 – brzdový systém je plně spuštěný.

Jízdní režim 1 značí stojící vozidlo a vypnutý motor. Z předchozí tabulky je možné vyčíst, že spalovací motor i elektromotor jsou vypnuté, spojka MGU je sepnutá a brzdový systém udržuje konstantně hodnotu plného tlaku. Vozidlo je tedy nehybně zastaveno. Při startování spalovacího motoru v režimu 2 asistuje elektromotor přes sepnutou spojku MGU. Brzdový systém je v tuto chvíli vypnutý.

Režim 4 označuje regenerativní brzdění při zpomalování vozidla. Elektromotor je v danou chvíli propojen s koly a zpomaluje vozidlo přeměnou kinetické energie na elektrickou. Brzdy jsou tedy v režimu 2, který je pro to určený. Jízdní režim 5 se od prvního liší nastartovaným motorem běžícím na volnoběh a elektromotorem, který je ve speciálním režimu pro rekuperaci energie na volnoběh. Brzdový systém je opět na hodnotě 100.

Režimy 3, 6 a 7 jsou určené pro jízdu. Jejich zapojení dle tabulky znázorňuje vypnutý brzdový systém a pro jednotlivé režimy konfiguraci spalovacího motoru a elektromotoru. Spalovací motor je zapnutý v režimech 3 a 6 a elektromotor spolu se spojkou MGU v režimech 6 a 7, čímž tvoří všechny 3 způsoby pohonu hybridního vozidla.



Obr. 40 Logika řízení hybridního pohonu ve formě vývojového diagramu

Obr. 40 zachycuje řídicí logiku v podobě vývojového diagramu. Zeleně označená okna zastupují fáze, ve kterých se vozidlo může vyskytovat. Tyto fáze poté určují jízdní režim vozidla z tabulky 7, což je v obrázku označeno tlustou šipkou směřující k oranžovému oknu. Mezi jednotlivými fázemi je vedle šipky vložena podmínka, která určuje moment, kdy dojde k přechodu do následující fáze. Červený čtverec poté značí fázi rozhodovací. Podle podmínky vedoucí k rozhodovacímu bloku může nastat více fází. Podle podmínek, které jsou pro každou z následujících fází stanoveny, je rozhodnuto, jaká fáze (respektive režim) bude následovat.

Následující body podrobně popisují řídicí logiku vozidla. Je popsán význam jednotlivých bloků a přechodové podmínky mezi nimi. Pro rozhodovací funkce jsou používány logické operátory && (AND – a zároveň – podmínka je splněna, pokud jsou splněny všechny její dílčí podmínky) a || (OR – nebo – podmínka je splněna, pokud je splněna alespoň jedna

z dílčích podmínek). Číselné označení všech fází značí číslo řádku, na kterém se daná fáze vyskytuje v šabloně Event Manager.

1 – VÝCHOZÍ STAV

- Určen pro iniciaci simulace, stanovuje výchozí režim vozidla.
- Podmínka přechodu do další fáze: $\text{time} > 0,1$.
- Podmínka je splněna po uplynutí 0,1 s času simulace.
- Stanovený režim vozidla: 1.
- Následující fáze: 2.

2 – VOZIDLO STOJÍ, MOTOR VYPNUTÝ

- Rychlost vozidla i motoru je nulová.
- Podmínka přechodu do další fáze: $\text{AccelPP} > 0$.
- Podmínka je splněna ve chvíli, kdy přijde signál plynového pedálu od řidiče s hodnotou vyšší než 0.
- Stanovený režim vozidla: 1.
- Následující fáze: 3.

3 – STARTOVÁNÍ SPALOVACÍHO MOTORU

- Slouží k uvedení spalovacího motoru do chodu. Elektromotor je využit k nastartování spalovacího motoru do volnoběžných otáček
- Podmínka přechodu do další fáze: $\text{RPM} > 800$.
- Podmínka je splněna ve chvíli, kdy motor přesáhne hodnotu 800 min^{-1} , která je volnoběžnými otáčkami motoru.
- Stanovený režim vozidla: 2.
- Následující fáze: 4.

4 – VOZIDLO STOJÍ, MOTOR BĚŽÍ NA VOLNOBĚH

- Rychlost vozidla je nulová, motor běží na volnoběh a elektromotor rekuperuje elektrickou energii do baterií.
- Podmínka přechodu do další fáze: $\text{AccelPP} > 0$.
- Podmínka je splněna ve chvíli, kdy přijde signál plynového pedálu od řidiče s hodnotou vyšší než 0.
- Stanovený režim vozidla: 5.
- Následující fáze: 5, 6, 7.

5, 6, 7 – ROZHODNUTÍ ZPŮSOBU AKCELERACE

- Rozhodovací fáze určující způsob pohonu při zrychlování dle následujících podmínek. Ty jsou kontrolovány postupně a první vyhovující je zvolena.
- Podmínka přechodu do fáze 8: $\text{SOC} > 0,5 \ \&\& \ \text{VehSpeed} < 50$.
 - Podmínka je splněna, pokud stav nabití baterie je vyšší než 50 % a pokud se vozidlo pohybuje nižší rychlostí, než 50 km/h.
- Podmínka přechodu do fáze 9: $\text{SOC} < 0,25$.
 - Podmínka je splněna, pokud stav nabití baterie je nižší než 25 %.
- Podmínka přechodu do fáze 10: $\text{SOC} \geq 0,25$.
 - Podmínka je splněna, pokud stav nabití baterie je vyšší než 25 %.

8 – ELEKTRICKÝ POHON

- Vozidlo se pohybuje pouze na elektrický pohon, spalovací motor je vypnutý.
- Podmínka přechodu do další fáze: $\text{BrakePP} > 0 \ \parallel \ \text{SOC} < 0,5 \ \parallel \ \text{VehSpeed} \geq 50$.
- Podmínka je splněna, pokud přijde signál brzdového pedálu od řidiče větší než 0, nebo se baterie vybijí pod hodnotu 50 % nebo je překročena rychlost vozidla 50 km/h.
- Stanovený režim vozidla: 7.
- Následující fáze: 11.

9 – POHON NA SPALOVACÍ MOTOR

- Vozidlo se pohybuje pouze na spalovací motor, elektromotor je odpojen od systému rozepnutím spojky.
- Podmínka přechodu do další fáze: $\text{BrakePP} > 0$.
- Podmínka je splněna, pokud přijde signál brzdového pedálu od řidiče větší než 0.
- Stanovený režim vozidla: 3.
- Následující fáze: 11.

10 – HYBRIDNÍ POHON

- Vozidlo je poháněno kombinací elektromotoru a spalovacího motoru.
- Podmínka přechodu do další fáze: $\text{BrakePP} > 0 \ \parallel \ \text{SOC} < 0,25$.
- Podmínka je splněna, pokud přijde signál brzdového pedálu od řidiče větší než 0, nebo se baterie vybijí pod hodnotu 25 %.
- Stanovený režim vozidla: 6.
- Následující fáze: 11.

11 – BRZDĚNÍ

- Vozidlo je zpomalováno kombinací kotoučových brzd a rekuperace kinetické energie.
- Podmínka přechodu do další fáze: $\text{BrakePP} = 0 \ \parallel \ \text{VehSpeed} < 5$.
- Podmínka je splněna, pokud přijde nulový signál brzdového pedálu od řidiče, nebo rychlost vozidla klesne pod 5 km/h.
- Stanovený režim vozidla: 4.
- Následující fáze: 12, 13.

12, 13 – ROZHODNUTÍ MEZI ÚPLNÝM ZASTAVENÍM, NEBO ZPOMALENÍM A NÁSLEDNÝM ZRYCHLENÍM

- Rozhodovací fáze určující ze vstupních hodnot, jestli vozidlo zastavuje, nebo pouze zpomalovalo a bude opět akcelarovat.
- Podmínka přechodu do fáze 14: $\text{VehSpeed} < 5$.
 - Ve chvíli, kdy rychlost vozidla klesne pod 5 km/h, přechází vozidlo do fáze zastavení.
- Podmínka přechodu do fáze 5, 6, 7: $\text{AccelPP} > 0$.
 - V případě nenulového signálu plynového pedálu od řidiče přechází vozidlo do fáze akcelerace, při které opět rozhoduje o jejím způsobu ve fázích 5-7.

14 – ZASTAVENÍ VOZIDLA

- Vozidlo je zpomalováno, do úplného zastavení, motor přechází do volnoběžného režimu.
- Podmínka přechodu do další fáze: VehSpeed < 5.
- Stanovený režim vozidla: 5.
- Následující fáze: 15, 16.

15, 16 – ROZHODNUTÍ MEZI VYPNUTÍM MOTORU NEBO VOLNOBĚŽNÉM REŽIMU PŘI ZASTAVENÍ

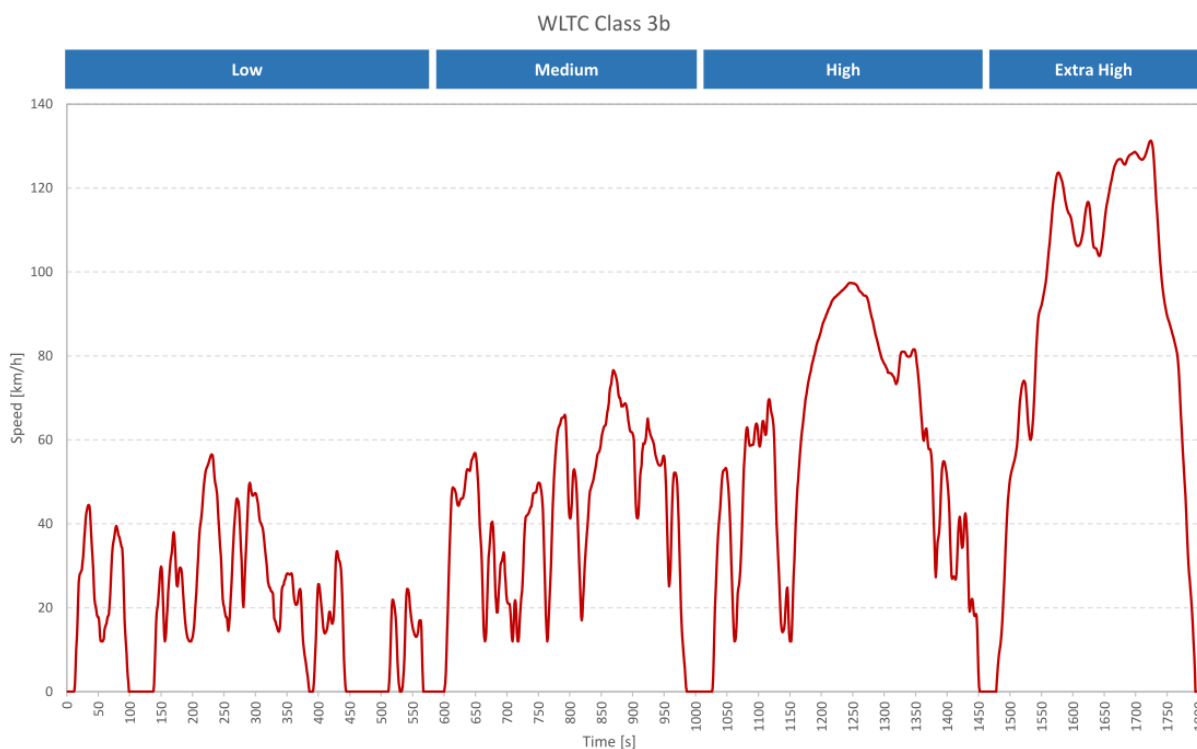
- Rozhodovací fáze určující, jestli při zastavení režim start stop vypne motor.
- Podmínka přechodu do fáze 2: SOC > 0,2.
 - V případě, že stav nabití baterie je vyšší, než 20 %, vozidlo přejde do fáze vypnutého motoru.
- Podmínka přechodu do fáze 4: SOC <= 0,2.
 - V případě, že stav nabití baterie je nižší než 20 %, přechází vozidlo do volnoběžného režimu.

5 PRŮBĚH SIMULACÍ

V této kapitole je popsán průběh simulací, které byly provedeny na modelech popsaných v kapitole 4. Cílem těchto simulací je zjistit, jak lze nejlépe využít energii produkovanou pohonnou jednotkou vozidla z kapitoly 4.1. Prvním krokem je zjistit, jakou spotřebu paliva má vozidlo při využití pouze spalovacího motoru. Následující krok bude připojení elektromotoru a testování hybridního a čistě elektrického pohonu. Cílem bude srovnat, kolik paliva je možné ušetřit pomocí hybridního pohonu, jaký vliv má na spotřebu profil jízdního cyklu a navrhnout vhodné konfigurace vozidla pro dané jízdní cykly.

5.1 JÍZDNÍ CYKLUS PRO SROVNÁVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH KONFIGURACÍ

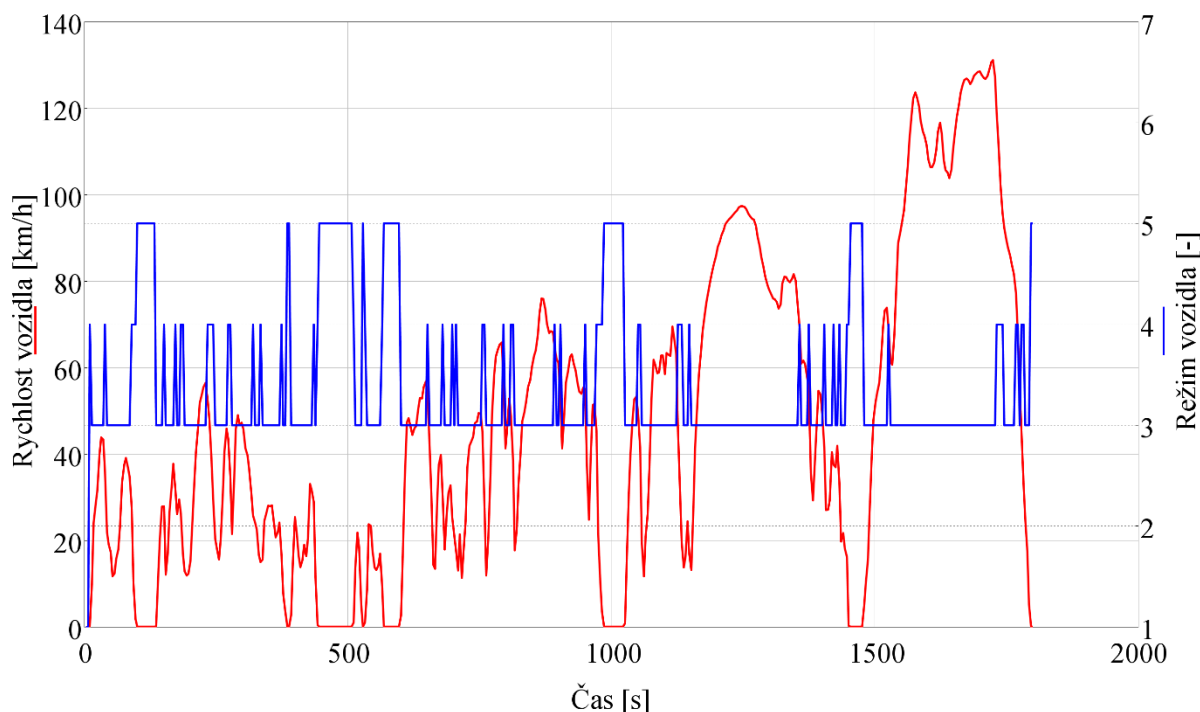
Pro zjištění výhodnosti velikosti úložiště elektrické energie byl zvolen cyklus WLTC, který je v dnešní době používán v Evropské unii při emisních testech vozidel nově uváděných na trh. Protože vozidlo Iveco Daily spadá do tzv. Class 3 pro osobní a lehká užitková vozidla, bude použita tato varianta. Na obr. 41 je možné vidět průběh rychlosti vozidla v závislosti na čase s maximální rychlostí převyšující 130 km/h a délkou trvání 30 minut. Cyklus umožňuje otestovat provoz ve městě s pravidelným rozjížděním a zastavováním, mimoměstský provoz s vyššími rychlostmi a občasným zastavením a také provoz na dálnici bez zastavení, ale se zpomalováním, které je běžné z důvodu např. hustoty provozu. Průměrná rychlost po uplynutí celého cyklu je 46,5 km/h.



Obr. 41 Průběh rychlosti v jízdním cyklu WLTC v závislosti na čase 0

5.2 SIMULACE S POHONEM POUZE SPALOVACÍHO MOTORU

Jako test spotřeby paliva a vyprodukované energie bylo pro určení výchozího bodu zvoleno vozidlo s úplně vybitými bateriemi s tím, že v průběhu cyklu se baterie pouze vybíjí a v průběhu celého cyklu se vozidlo pohybuje pouze v režimu spalovacího motoru. Varianta byla zvolena pro jednodušší implementaci místo vytvoření nového modelu obsahující pouze spalovací motor. Díky zvolené metodě je možné navíc přímo zjistit, jaké množství energie dokáže vozidlo rekuperovat (viz kapitola 5.3).



Obr. 42 Průběh rychlosti a jízdního režimu vozidla v cyklu WLTC v závislosti na čase

Na obr. 42 lze vidět průběh rychlosti na čase a zároveň časově proměnný aktuální jízdní režim vozidla (dle tabulky 7). Z obrázku lze vyčíst, že vozidlo pravidelně přechází mezi režimy 3 a 4 odpovídající pravidelné akceleraci spalovacím motorem a brzdění. V bodech nulové rychlosti vozidlo přechází do režimu 5 – volnoběhu. Jsou využívány pouze 3 jízdní režimy v průběhu cyklu, které jsou charakteristické pro běžné vozidlo osazené pouze spalovacím motorem. Počáteční bod pro srovnání s hybridním motorem byl určen následujícími hodnotami vybraných parametrů.

- Průměrná spotřeba paliva: 11,2 l/100 km,
- Hmotnost spotřebovaného paliva: 2221 g,
- Spotřebovaná energie spalovacím motorem: 94 617 kJ.

5.3 SIMULACE S HYBRIDNÍM POHONEM

Prvotní simulace s modelem hybridního vozidla jsou provedeny s parametry z tabulky 2, stanovující kapacitu baterie na 20 Ah. Bylo provedeno 21 experimentů zobrazených v tabulce 9, která znázorňuje změnu sledovaných veličin z předchozí kapitoly v závislosti na počátečním nabití baterie (SOC). Spotřebovaná energie závisí na způsobu využití jízdních

režimů a stavu nabití baterie v průběhu celého cyklu, kladná energie je energie spotřebovaná, záporná je získaná (rekuperací).

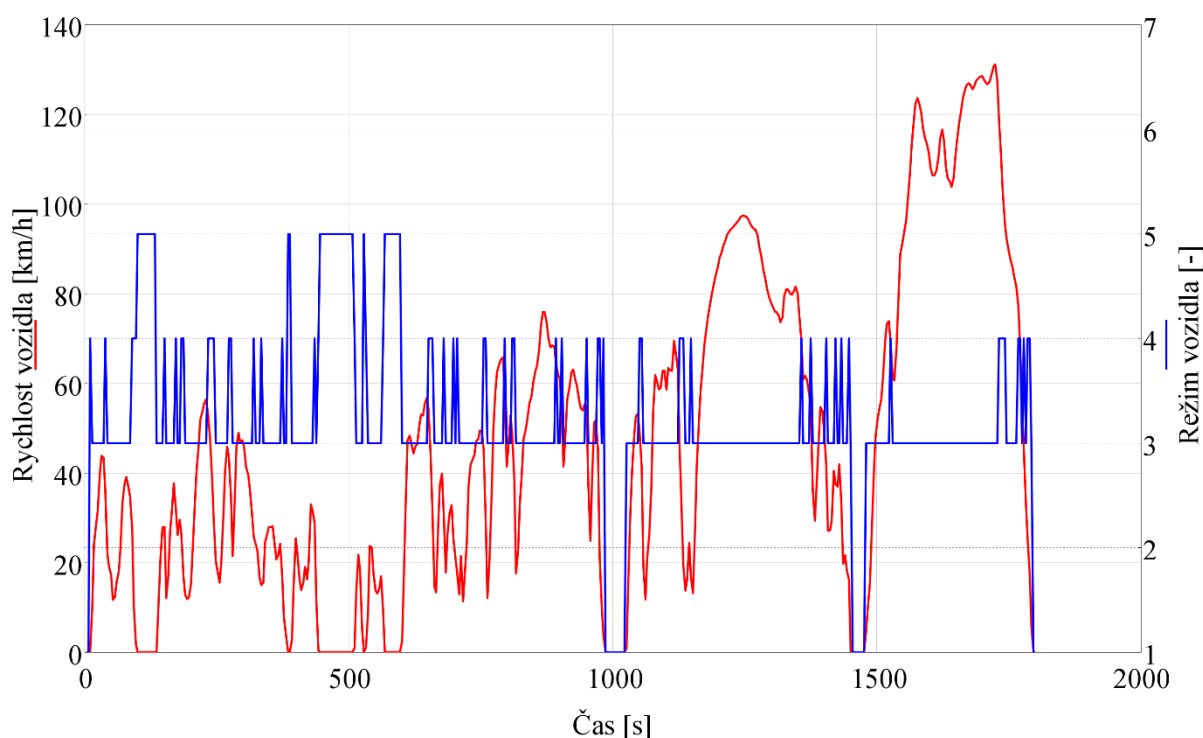
Tab. 9 Srovnání využití energií při provozu vozidla

Číslo	Výchozí SOC	Konečný SOC	Spotřeba paliva	Průměrná spotřeba paliva	Energie spotřebovaná motorem	Energie spotřebovaná a rekuperovaná elektromotorem
[-]	[-]	[-]	[g]	[l/100 km]	[kJ]	[kJ]
1	0,0100	0,1148	2 221	11,23	94 617	-2 411
2	0,0595	0,1639	2 221	11,23	94 617	-2 411
3	0,1090	0,2115	2 214	11,20	94 345	-2 359
4	0,1585	0,2363	2 144	10,84	91 358	-1 801
5	0,2080	0,2453	2 036	10,30	86 750	-895
6	0,2575	0,2520	2 005	10,12	85 423	-302
7	0,3070	0,2521	1 999	10,08	85 176	401
8	0,3565	0,2521	1 956	9,86	83 363	1 254
9	0,4060	0,2528	1 927	9,70	82 111	2 117
10	0,4555	0,2520	1 869	9,41	79 637	3 083
11	0,5050	0,2521	1 822	9,16	77 639	4 038
12	0,5545	0,2534	1 778	8,93	75 782	4 933
13	0,6040	0,2522	1 703	8,55	72 574	5 996
14	0,6535	0,2520	1 632	8,19	69 539	7 012
15	0,7030	0,2520	1 575	7,91	67 133	8 020
16	0,7525	0,2520	1 495	7,50	63 688	9 057
17	0,8020	0,2520	1 425	7,15	60 717	10 092
18	0,8515	0,2521	1 346	6,75	57 366	11 144
19	0,9010	0,2535	1 305	6,54	55 592	12 128
20	0,9505	0,2522	1 256	6,30	53 538	13 204
21	1,0000	0,2522	1 245	6,25	53 061	14 218

Jako první experiment byl použit stav nabití baterie 1 %, protože nebylo možné nastavit hodnotu na 0 %. V tomto případě se vozidlo chová, jako by neobsahovalo žádné prvky hybridního vozu a pracuje pouze se spalovacím motorem, což odpovídá simulaci provedené v kapitole 5.2. Protože model obsahuje rekuperaci elektrické energie při brzdění a systémem rekuperace na volnoběh motoru, dobíjí při svém provozu baterie. V posledním sloupci tabulky lze vidět záporné hodnoty spotřebované elektrické energie, značící, že v průběhu provozu vozidlo získalo rekuperací elektromotorem 2 411 kJ, odpovídajících 11,48 % kapacity dané

baterie, jež do ní uložilo. Zároveň protože vozidlo nepřechází do režimu, který by baterie vybíjel, zmíněná hodnota je maximální hodnota, kterou je možné získat provozem vozidla. Stejný průběh cyklu má experiment 2, který pouze začíná s vyšší hodnotou nabití baterie.

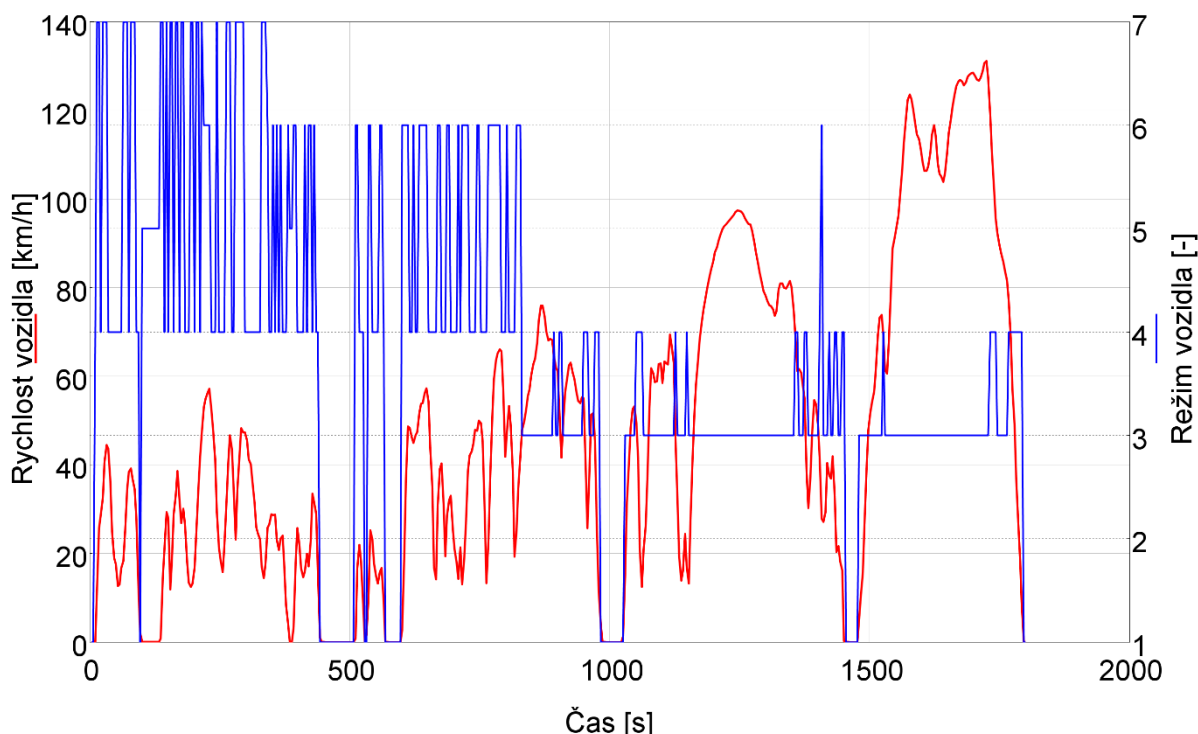
Experimenty 3–5 postupně začínají s vyšší hodnotou nabití baterie. Změnou oproti bodům 1 a 2 je dosažení 20 % nabití baterie v průběhu cyklu, přičemž dochází k vypnutí motoru při zastavení vozidla. Na obr. 43 lze vidět průběh experimentu číslo 4, který dosáhne zmíněné hodnoty po přibližně 600 sekundách a od té doby přechází při zastavení vozidlo do režimu 1, kterým je vypnutí motoru. Množství získané energie rekuperací postupně klesá z důvodu přechodu od režimu 5 k režimu 1, takže vozidlo dobíjí baterie pouze při brzdění a rekuperace při volnoběžném režimu je vynechána. Tímto je ušetřena energie paliva při stání za cenu menšího dobití baterie, které je ale výhodnější provést ze sítě.



Obr. 43 Průběh rychlosti hybridního vozidla a jízdního režimu v závislosti na čase s počátečním stavem nabití baterie 15,85 % (experiment 4)

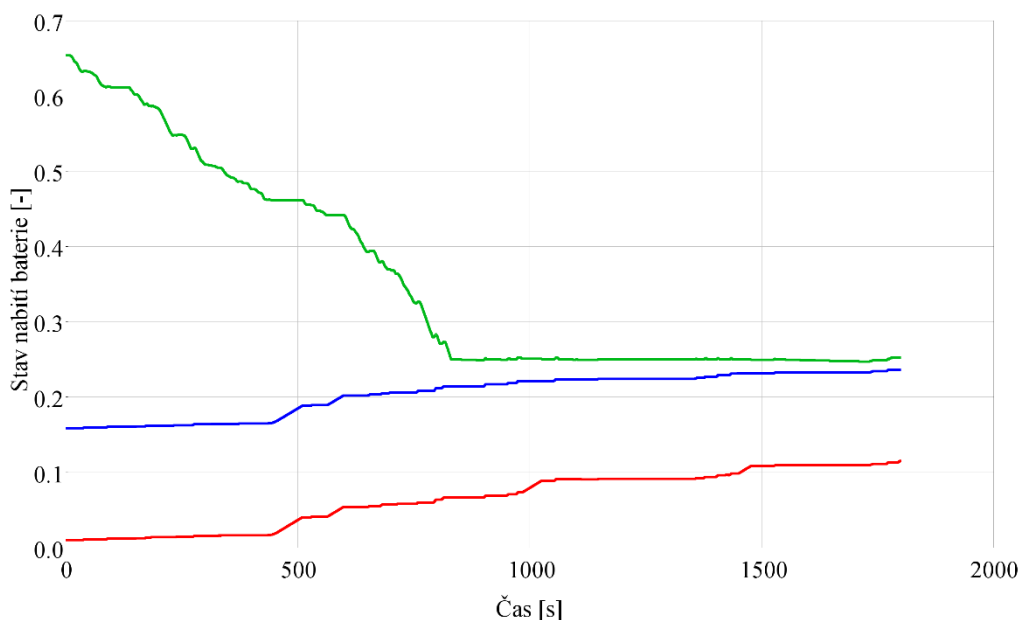
Hodnota konečného stavu baterie roste do experimentu číslo 6, od kterého se ustálí na hodnotě přibližně o 2 desetiny procenta vyšší než 25 %. Ustálená hodnota je v řídicí jednotce popsáné v kapitole 4.3.5 nastavená jako minimální hodnota pro připojení elektromotoru do pohonného systému sepnutím jeho spojky. Protože je hodnota téměř konstantní pro všechny zbylé experimenty, systém je dobře řízený a stav baterie je kontrolován tak, aby nedošlo ke kritickému vybití. Na obr. 44 je možné vidět průběh experimentu 14 z hlediska rychlosti vozidla a jízdního režimu vozidla. Protože daný experiment začíná s bateriemi nabitými na 65 %, vozidlo je v průběhu cyklu provozováno na čistě elektrický pohon (režim 7), dokud není splněna podmínka pro přepnutí do hybridního režimu (6) – 50 % kapacity baterie. V tu chvíli vozidlo pokračuje pouze v hybridním režimu a do režimu 7 nepřechází, protože průběh cyklu a schopnosti elektromotoru regenerovat elektrickou energii nejsou dostatečné pro to, aby byly baterie opět dobité na více než 50 %. V hybridním režimu vozidlo pokračuje, dokud není dosaženo úrovně 25 % dobití baterie, kdy se přechází do režimu čistě spalovacího

motoru. Motor v pár okamžicích přeskočí do režimu 6 díky dobití baterie na více než 25 %, ale většinu času pracuje vozidlo pouze na spalovací motor. Množství spotřebované energie spalovacím motorem klesá dle využití úspornějších jízdních režimů. Ve stejnou chvíli roste využití elektrické energie, které přechází ze záporných hodnot do kladných, čímž je zdůrazněno vyšší využití energie z baterie než její doplňování rekuperací. Přechodem do zmíněných režimů s pohonem elektromotoru bylo možné ušetřit téměř 1 kg paliva, což odpovídá poklesu o téměř 44 % spotřeby v průběhu daného cyklu



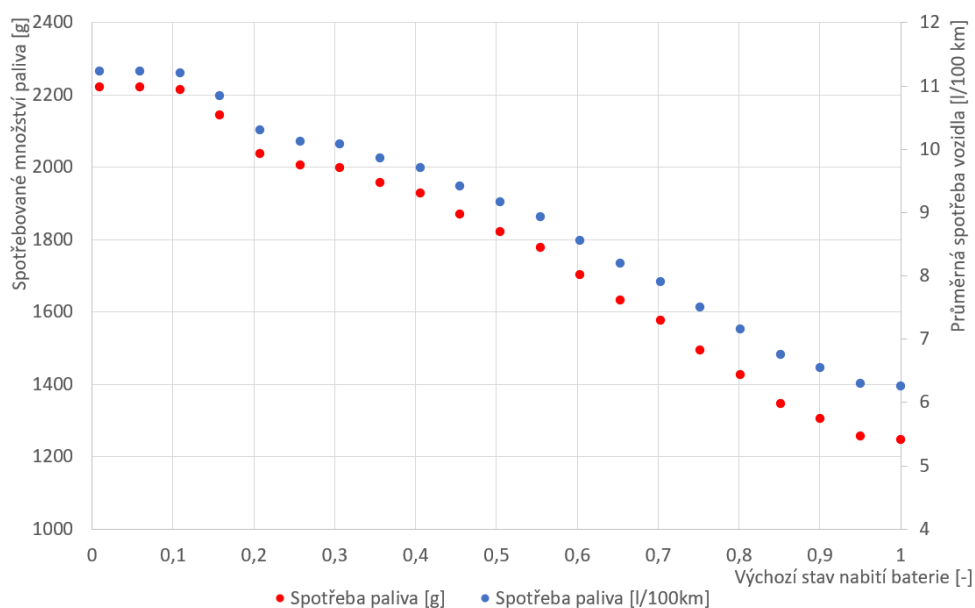
Obr. 44 Průběh rychlosti hybridního vozidla a jízdního režimu v závislosti na čase s počátečním stavem nabití baterie 65,35 % (experiment 14)

Dosud byly v rámci experimentu probrány 3 vzorové případy, které ukázaly, jak je vozidlo řízeno dle podmínek stanovených v kapitole 4.3.5 a kdy přechází mezi jednotlivými režimy. Hlavní podmínkou pro zmíněné rozhodování je aktuální stav nabití baterie. Proto jeho průběh je znázorněn v následujícím obr. 45 pro případy, které byly vybrány jako vzorové v předchozích odstavcích. Červená křivka označuje experiment číslo 1, modrá číslo 4 a zelená číslo 14. Červená s modrou křivkou se shodují přibližně do času 980 s, kdy vozidlo zastavuje a v případě modré křivky přesáhl stav nabití baterie 20 %, tudíž se motor při zastavení vozidla vypíná na rozdíl od červené křivky, která se v tu samou chvíli pohybuje okolo 7 % nabití. Také lze z grafu vyčíst, že zastavení na dobu 30 sekund dobije přibližně 1 % kapacity baterie. V porovnání předchozích dvou křivek se zelenou, která zachycuje režim na čistě elektrický pohon i hybridní pohon, lze vyčíst, že elektrický i hybridní pohon vybijí baterie mnohem rychleji, než je možné získávat elektrickou energii rekuperací kinetické energie. Při dosažení hodnoty 25 % poté přechází vozidlo do režimu 6 a pokaždé, když se doplní energie rekuperací, je ihned využita při zrychlování vozidla.



Obr. 45 Graf závislosti stavu nabití baterie na čase a počátečním nabití baterie

Spotřebovanou energii paliva je také možné vyjádřit pomocí jednotek běžně používaných v při provozu vozidel. Následující obr. 46 zobrazuje červeně závislost celkové spotřeby paliva v gramech a modře závislost průměrné spotřeby paliva v l/100 km na počátečním stavu nabití baterie. S rostoucím nabitím baterie roste poměr využití režimů využívajících elektromotor a tím klesá spotřeba paliva. S využitím plně nabité baterie o kapacitě 20 Ah je tedy možné ušetřit přibližně 44 % paliva v průběhu stejného cyklu, což se rovná přibližně jednomu kilogramu paliva.



Obr. 46 Graf závislosti spotřeby paliva na výchozím stavu nabití baterie

5.3.1 HLEDÁNÍ OPTIMÁLNÍ VELIKOSTI BATERIE

V kapitole 5.3.1 je navázáno na úvodní simulaci kapitoly 5.3, která prozkoumala vliv nabití baterie na průběh jízdního cyklu. Od teď bude uvažován počáteční stav nabití 100 %, odpovídající vozidlu, které přes noc stálo v garáži připojené do sítě. S tímto stavem je probrán postup hledání optimální velikosti baterie k danému vozidlu. Protože kapacita baterie ovlivňuje také hmotnost vozidla, je potřeba vliv této skutečnosti prozkoumat. Zkoumané vozidlo je užitkové vozidlo, u kterého jako jeden z klíčových prvků vozidla figuruje hmotnost, kterou vozidlo dokáže přepravit. Maximální celková hmotnost vozidla zůstává stejná, ale s přibývajícím množstvím baterií se mění provozní hmotnost vozidla, čímž klesá užitečná hmotnost. Simulace budou prováděny na cyklu z kapitoly 5.1 tak, že se cyklus opakuje čtyřikrát v průběhu simulace. Tímto je zajištěna testovací délka 2 hodiny, jež blíže popisuje způsob jízdy užitkových vozidel. Velikost baterie je tedy hledaná pro zmíněný dvouhodinový cyklus, při kterém se jízdní režimy vozidla řídí kapitolou 4.3.5.

Tab. 10 Srovnání spotřeby paliva a konečného stavu baterie v závislosti na změně její kapacity

Číslo	Kapacita baterie	Kapacita baterie	Hmotnost baterie	Konečný SOC	Spotřeba paliva
[-]	[Ah]	[kWh]	[kg]	[-]	[g]
1	20	6	30	0,2524	7 404
2	40	12	60	0,2514	6 756
3	60	18	90	0,2509	5 933
4	80	24	120	0,2508	5 193
5	100	30	150	0,2507	4 602
6	120	36	180	0,2506	3 704
7	140	42	210	0,2868	3 178
8	160	48	240	0,3975	3 217
9	180	54	270	0,4571	2 958
10	200	60	300	0,4177	3 174
11	220	66	330	0,5573	3 014
12	240	72	360	0,5919	2 996
13	260	78	390	0,6264	3 203
14	280	84	420	0,6487	3 045
15	300	90	450	0,6718	3 095

Tabulky 10 a 11 znázorňují vstupní a výstupní hodnoty simulace. Vstupními hodnotami jsou velikost baterie a jejich hmotnost. Je možné dopočítat zbylou užitečnou hmotnost vozidla dle rovnice 9, do níž vstupuje provozní hmotnost vozidla zvětšená o hmotnost baterie a maximální celková hmotnost vozidla. Výstupními hodnotami je spotřeba paliva v gramech, energie spotřebovaná spalovacím motorem, součet energie spotřebované a rekuperované elektromotorem a jejich poměr.

$$m_{\text{užitečná}} = m_{\text{celková}} - (m_{\text{provozní}} - m_{\text{baterie}}) \quad (9)$$

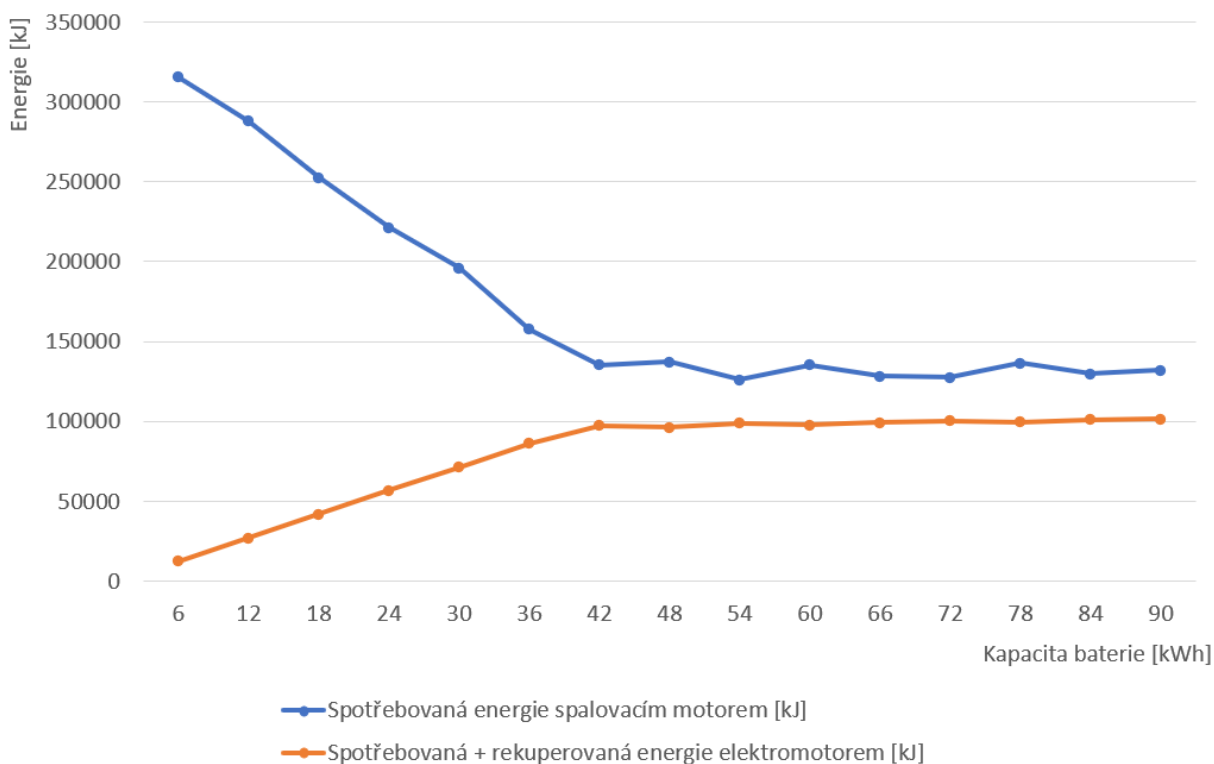
Tab. 11 Srovnání využití energií v závislosti na změně kapacity baterie

Číslo	Kapacita baterie	Energie spotřebovaná motorem	Energie spotřebovaná a rekuperovaná elektromotorem	Poměr energií
[-]	[kWh]	[kJ]	[kJ]	[-]
1	6	315 429	12 503	25,23
2	12	287 839	27 192	10,59
3	18	252 778	42 062	6,01
4	24	221 231	56 796	3,90
5	30	196 063	71 227	2,75
6	36	157 826	86 255	1,83
7	42	135 412	97 331	1,39
8	48	137 066	96 301	1,42
9	54	126 021	98 755	1,28
10	60	135 228	97 916	1,38
11	66	128 435	99 430	1,29
12	72	127 641	100 317	1,27
13	78	136 471	99 472	1,37
14	84	129 751	101 088	1,28
15	90	131 865	101 335	1,30

Z grafu na obr. 47 lze vidět, že množství energie využitá spalovacím motorem téměř lineárně klesá s rostoucí kapacitou baterie, což se odráží ve spotřebě paliva. Oproti tomu množství energie využitá elektromotorem téměř lineárně roste. Tento jev trvá do experimentu 7, který jako první končí s vyšší hodnotou nabití baterie než 25 %. V následujících experimentech pozvolna roste energie spotřebovaná elektromotorem, která reaguje na zvýšenou hmotnost vozidla. Zároveň energie spotřebovaná spalovacím motorem kolísá kolem hodnoty 130 000 kJ, což je způsobeno průběhem cyklu, kdy spalovací motor při stání vozidla se nevypíná ve stejných okamžicích a místo toho přechází do režimu rekuperace energie při volnoběhu. Zmíněný chování způsobuje také záporný přírůstek mezi některými dvěma po sobě jdoucími hodnotami energie spotřebované elektromotorem (jmenovitě mezi experimenty 9 a 10 a také 12 a 13).

Poměr těchto energií je důležitá hodnota určující, jakým množstvím se elektromotor angažuje při provozu vozidla. Pro zvolený jízdní cyklus hodnota poměru velice rychle klesá se zvyšující se kapacitou, dokud nedosáhne hodnoty přibližně 1,4, od které klesá pouze pozvolně. Snížení poklesu je způsobeno délkou cyklu a konečným stavem nabití baterie. V případě, že baterie nedosáhne 25 % stavu nabití před koncem cyklu, jsou využity naplno možnosti hybridního systému vozidla. Mírný pokles tohoto poměru mezi experimenty 7-15 je

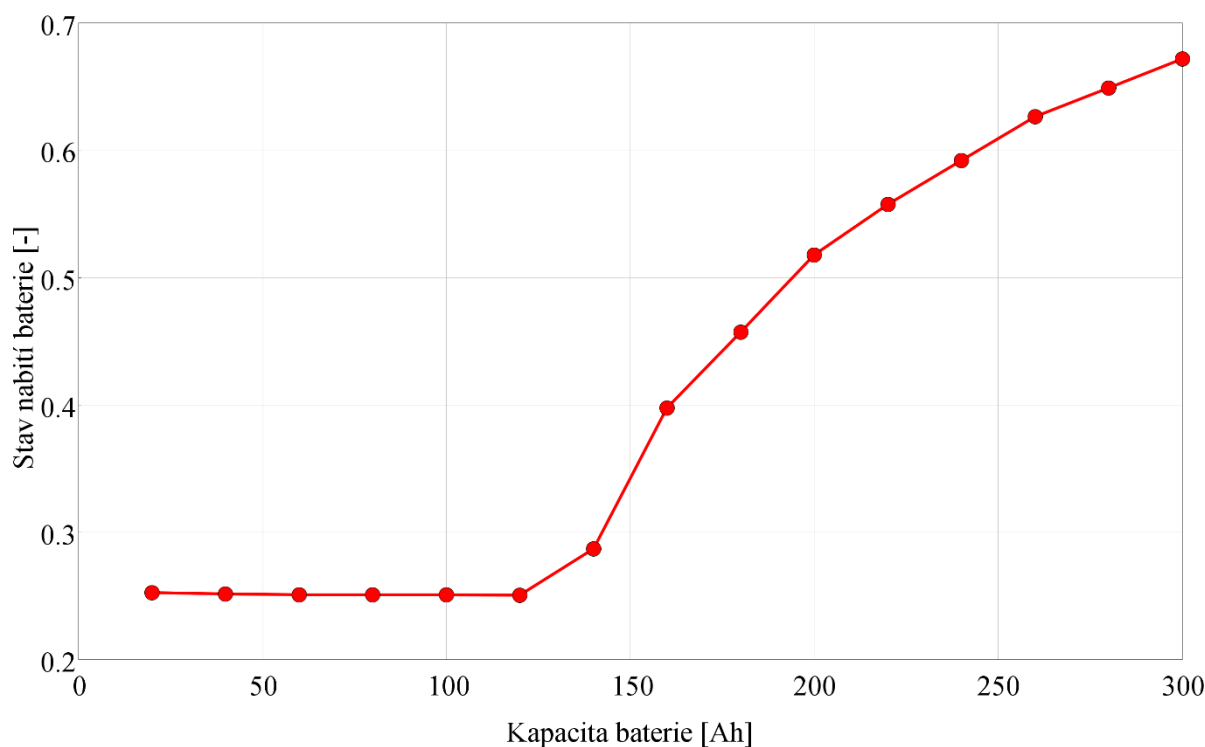
poté způsoben postupně pozdějším dosažením stavu nabití baterie 50 % a s tím související pozdější přechod z pouze elektrického režimu do hybridního.



Obr. 47 Graf závislosti využití energie motorem a elektromotorem na kapacitě baterie

Konečný stav nabití baterie ukazuje, že kapacita 42 kWh postačuje pro daný cyklus k tomu, aby vozidlo využívalo kombinaci čistě elektrického pohonu a hybridního pohonu v případech, které pro ně splňují podmínky – dokud jsou baterie nabitě na více než 50 %, čistě elektrický pohon je aktivován do rychlosti 50 km/h, pod 50 % nabití nebo nad 50 km/h přechází do hybridního režimu. Vozidlo přechází do režimu pouze spalovacího motoru jen v případech, kdy nemůže být aktivován hybridní nebo elektrický režim nezávisle na stavu nabití baterie.

Od experimentu 11 je kapacita baterie dostatečně veliká na to, aby mohl být provozován čistě elektrický režim ve všech případech, kdy vozidlo jede méně než 50 km/h. Do hybridního režimu tedy přechází pouze ve chvíli, kdy je překročena rychlost 50 km/h. Zmíněný fakt je podložen tím, že od 11. experimentu je konečný stav nabití baterie po proběhlém cyklu vyšší než 50 %.

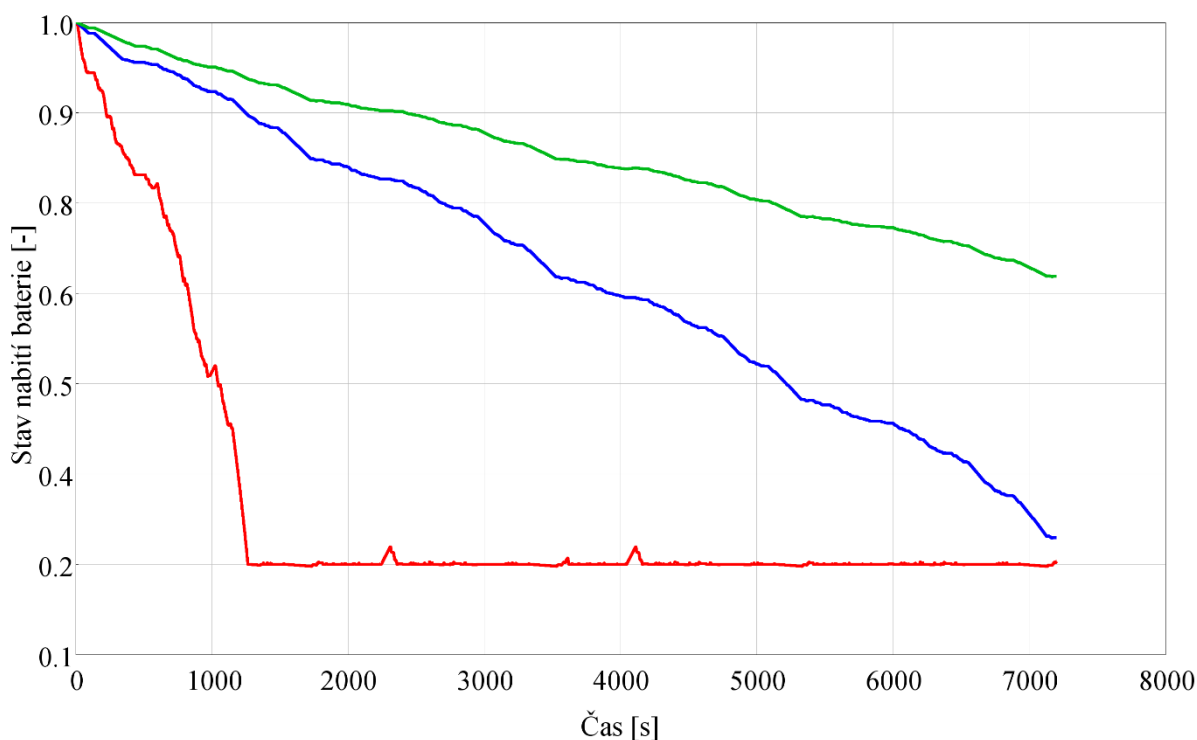


Obr. 48 Graf závislosti konečného stavu nabití baterie na její kapacitě

Na obr. 48 je zobrazena závislost konečného stavu nabití baterie na její kapacitě. Lze si všimnout, že do kapacity 36 kWh je konečné nabití přibližně 25 %. Tato hodnota říká, že v určité chvíli v průběhu cyklu se baterie vybilý do fáze, při které již není možné využívat jejich energii dále, aniž by byla baterie dobíta ať už připojením do sítě nebo rekuperací (díky systému řízení). Proto se vozidlo přepíná do režimu pouze na spalovací motor a dokončí tak cyklus s občasnou asistencí elektromotorem, která vždy následuje po fázi rekuperace.

Následující obr. 49 zobrazuje průběh stavu nabití baterie pro vybrané experimenty 1, 7 a 14. První zmíněný reprezentuje vybití baterie do 25 % (červený), druhý vybití baterie do hodnoty pod 50 % (modrý) a třetí konečný stav baterie vyšší než 50 % (zelený). Lze zde vidět ustálení stavu nabití na 25 % v případě první křivky se dvěma výstupky značícími dobíjení baterie na volnoběh motoru při zastaveném vozidle. Druhá a třetí křivka mají podobný průběh daný tím, že když vozidlo přechází do hybridního režimu, elektromotor je schopný dodávat většinu potřebného točivého momentu na kola a spalovací motor pouze doplňuje zbylý točivý moment. Ve chvíli přechodu do režimu pouze spalovacího motoru poté motor dodává na kola veškerý točivý moment a elektromotor je odpojený od systému přes spojku MGU.

Základní užitečná hmotnost zvolené varianty vozu Iveco Daily je 1100 kg. V praxi tato hodnota určuje, kolik zboží nebo materiálu může vozidlo přepravit, aby splnilo předepsané hodnoty v technickém průkazu. Zvětšováním kapacity baterie se zvyšuje jejich hmotnost a dle vzorce 9 klesá užitečná hmotnost vozidla. Je nutné tedy najít kompromis mezi velikostí baterie a užitečnou hmotností tak, aby mohlo být vozidlo plnohodnotně provozováno jako užitkové vozidlo stejným způsobem, jako bez hybridního pohonu.



Obr. 49 Graf závislosti stavu nabití baterie na čase pro vybrané experimenty (1, 7, 14)

Z tabulek 10 a 11 a obrázků 47 a 49 lze vyčíst, že optimální velikost baterie pro čtyřikrát opakovaný jízdní cyklus WLTC vedoucí k dvouhodinovému provozu vozidla v různých podmínkách, je 42 kWh. Spolu s nepřetržitým provozem vozidla v elektrickém a hybridním režimu velikost baterie snižuje užitečnou hmotnost na 890 kg.

Optimum bylo určeno dle konečného stavu nabití baterie a poměru množství spotřebované energie spalovacím motorem a elektromotorem. Konečný stav baterie u vybrané kapacity baterie je 28,68 % (poprvé více než 25 %) a zmíněný poměr mezi energiemi je dle tabulky 11 1,39, který poté klesá pouze mírně. Toto optimum by v cyklu WLTC dosahovalo dojezdu na pohon elektromotorem 65 km, jež by se dala prodloužit upravenou logikou řízení vozidla, která by povolila využívat pohon na elektromotor se stavem baterie nižším než 50 %.

Jako srovnání lze použít vozidlo Ford Transit Custom, který disponuje bateriemi s kapacitou 13,6 kWh, užitečnou hmotností 1 130 kg a dojezdem přibližně 56 km při provozu pouze na baterie [23]. Iveco Daily nabízí s podobnou kapacitou baterie (spočítáno pro 12 kWh) užitečnou hmotnost 1 040 kg a přibližný dojezd 18 km na elektropohon dle simulace v cyklu WLTC. Hodnoty dojezdu je ale brát jen velmi orientačně, protože dojezd simulovaného vozidla byl určen z provozu, který obsahuje časté zrychlování následované zpomalováním a opětovným zrychlováním, zatímco u vozu Ford Transit neznáme přesné podmínky, za jakých byla dojezdová vzdálenost získána.

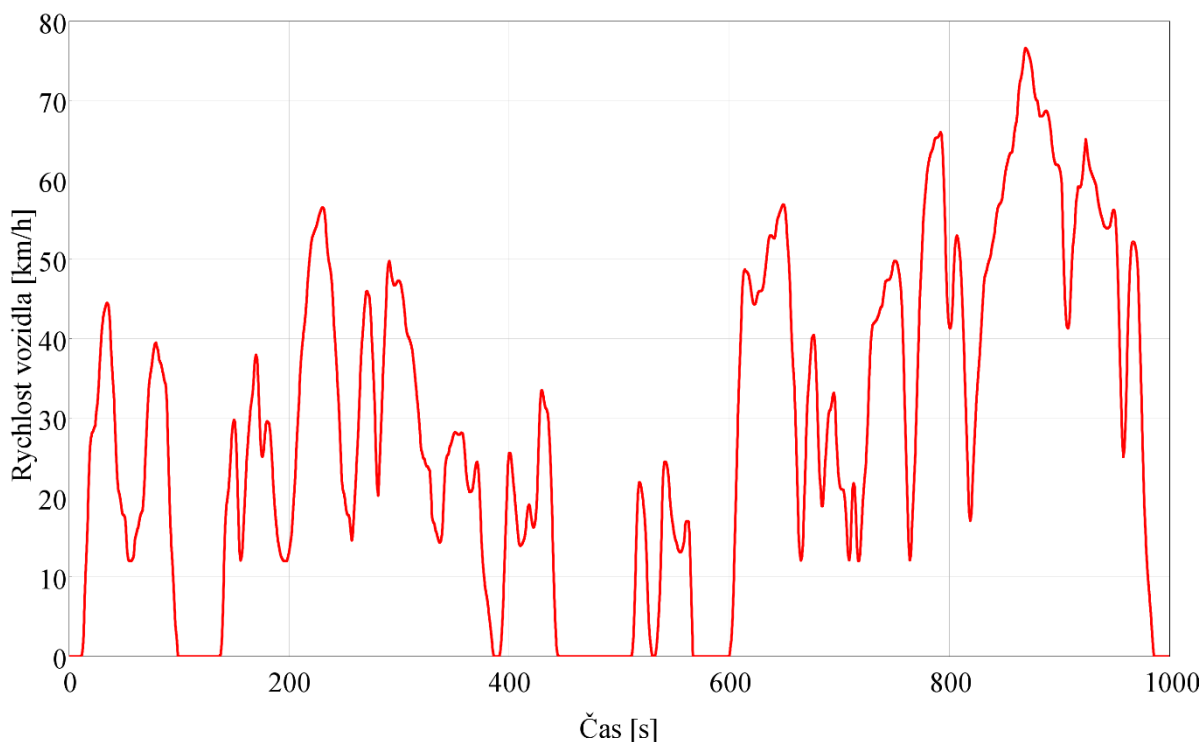
5.3.2 VLIV JÍZDNÍHO CYKLU NA VYUŽITÍ ENERGIE A SPOTŘEBU

Protože jsou užitková vozidla provozována jinými společnostmi na různé účely, je možné provést srovnání také z hlediska cyklu, v jakém je vozidlo provozováno. Je možné používat tato vozidla jako doručovací vozidla po velkých městech, v jejich blízkém okolí nebo převážet zboží na větší vzdálenost mezi velkosklady a kamennými obchody. Dosud byl uvažován cyklus WLTC jako celek. Protože je zmíněný cyklus určený pro univerzální testování vozidel z hlediska emisí, nemusí přímo odpovídat způsobu, jakým je reálné vozidlo provozováno.

Z tohoto důvodu budou v následujících podkapitolách jeho čtyři podcykly sloučeny do dvou blíže charakterizující městský a mimoměstský provoz. Bude hledáno optimum velikosti baterie pro dané cykly, které budou mít v obou případech délku trvání 8 000 sekund (přibližně 133 minut), aby odpovídaly délce simulace z předchozí kapitoly. Pro každý cyklus bude zpracována tabulka podobná tabulkám 10 a 11 z předchozí kapitoly. Protože hodnoty kapacity v Ah a hmotnosti baterie jsou stejné pro danou kapacitu v kWh, jako řídicí prvek tabulky bude kapacita v kWh a zmíněné tabulky budou zkombinovány do jedné.

WLTC LOW + MEDIUM (NÍZKÉ A STŘEDNÍ RYCHLOSTI)

V případě cyklu WLTC je vhodnou reprezentací městského provozu prvních 1000 sekund (jeho průběh lze vidět na obr. 50). Jeho první část dlouhá přibližně 500 s (anglicky označována low) charakterizuje provoz běžným městským prostředím, při kterém vozidlo pravidelně zrychluje, zpomaluje a zastavuje. Druhá polovina cyklu (anglicky medium) je určena pro městský provoz ve vyšších rychlostech (např. městský okruh).



Obr. 50 Část cyklu WLTC pro nízké a střední rychlosti

Pravidelná charakteristika zastavování vozidla naznačuje, že je zastavení a zpomalení vynucené vnějšími vlivy. Těmito může být světelná signalizace, nebo pojíždění v pomalu jedoucí koloně bez zastavování. Průměrná rychlost tohoto cyklu je 28,5 km/h. Cyklus je osmkrát opakován pro dosažení požadované délky 8000 s.

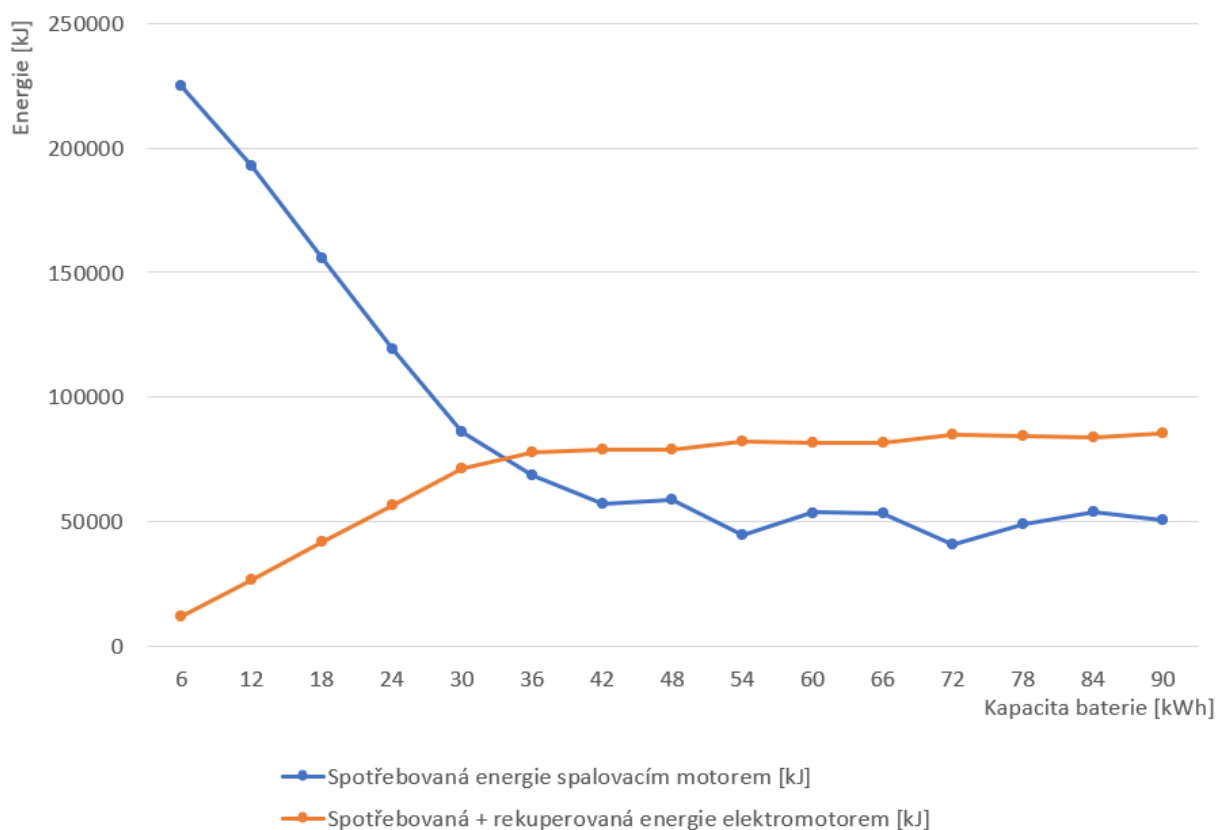
Tab. 12 Srovnání využití energie v nízkorychlostní části cyklu WLTC v závislosti na kapacitě baterie

Číslo	Kapacita baterie	Konečný SOC	Spotřeba paliva	Energie spotřebovaná motorem	Energie spotřebovaná a rekuperovaná elektromotorem	Poměr energií
[-]	[kWh]	[-]	[g]	[kJ]	[kJ]	[-]
1	6	0,2509	4 274	224 602	11 765	19,09
2	12	0,2503	4 518	192 470	26 498	7,26
3	18	0,2503	3 653	155 651	41 568	3,74
4	24	0,2503	2 792	118 951	56 506	2,11
5	30	0,2506	2 014	85 822	71 282	1,20
6	36	0,3424	1 610	68 615	77 429	0,89
7	42	0,4353	1 334	56 858	79 049	0,72
8	48	0,5119	1 375	58 574	78 565	0,75
9	54	0,5523	1 048	44 683	81 863	0,55
10	60	0,5993	1 254	53 435	81 513	0,66
11	66	0,6354	1 251	53 298	81 725	0,65
12	72	0,6548	954	40 663	84 882	0,48
13	78	0,6834	1 144	48 744	84 355	0,58
14	84	0,7077	1 255	53 476	83 823	0,64
15	90	0,7231	1 178	50 214	85 281	0,59

V tabulce 12 lze vidět shrnutí proběhlé simulace v nízkorychlostním cyklu. Lze si všimnout celkově nižší energie spotřebované spalovacím motorem i elektromotorem oproti čtyřikrát opakovanému cyklu WLTC, které je dosažené i přes to, že je cyklus o 800 sekund delší. Tato skutečnost je z jednoho hlediska způsobena tím, že vozidlo je provozováno celý cyklus v elektrickém nebo hybridním režimu a nepřechází do režimu na spalovací motor. Druhé hledisko uvažuje rychlost vozidla a s ní spojené jízdní odpory. Pokud se vozidlo pohybuje rychleji, aerodynamický odpor je vyšší než při nižší rychlosti. Protože ve vzorci aerodynamického odporu figuruje rychlost se druhou mocninou (rovnice 10), dvojnásobná rychlost vyvolá odpor čtyřnásobně větší. Při uvažování teploty okolí 20 °C, tlaku 101,3 kPa a hustoty suchého vzduchu (pro zjednodušení) 1,2047 kg/m³ [24] vychází pro průměrnou rychlost provedeného cyklu 28,5 km/h hodnota aerodynamického odporu 59,6 N.

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzduch} \cdot C_x \cdot S_x \cdot v^2 \quad (10)$$

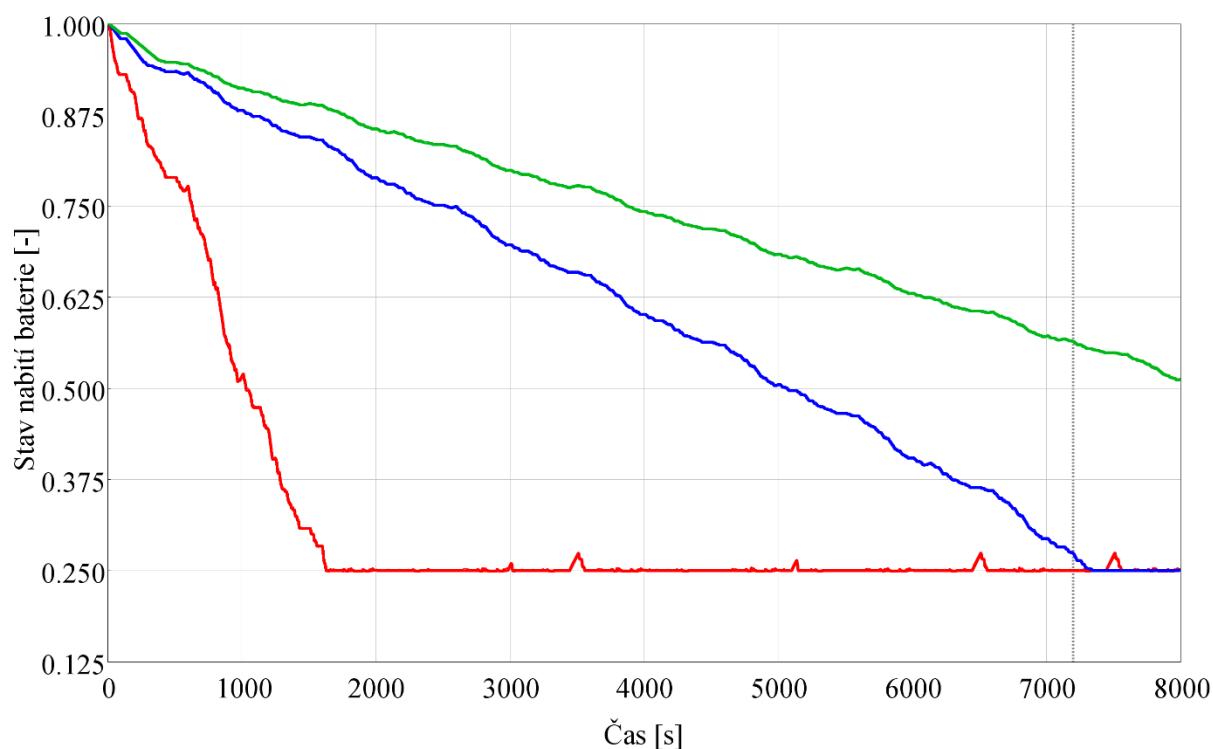
Na obr. 51 lze vidět průběh závislosti energií využitých motorem a elektromotorem pro provoz vozidla. Je možné si opět všimnout lineárního poklesu využité energie spalovacím motorem do kapacity 30 kWh, od které klesá pouze pozvolně s mírnými výkyvy, které jsou pravděpodobně způsobeny občasným přechodem do rekuperace při volnoběžném stání vozidla. Naproti tomu křivka energie spotřebované elektromotorem lineárně roste do stejné hodnoty kapacity baterie a poté jen pozvolně roste. Důležité je všimnout si, že množství energie spotřebované elektromotorem od kapacity 36 kWh převyšuje energii spotřebovanou spalovacím motorem. Toto je podloženo podmínkami, při kterých se aktivuje a deaktivuje elektrický a hybridní režim z kapitoly 4.3.5. Tím se zvyšující se kapacitou baterie dochází k prodloužení doby strávené v elektrickém a hybridním režimu a krácení doby v režimu pouze spalovacího motoru.



Obr. 51 Graf závislosti využité energie v nízkorychlostní části cyklu WLTC na kapacitě baterie

Experiment s kapacitou 30 kWh je poslední končící se stavem nabití baterie 25 %. Následující poté končí s vyšším stavem nabití, čímž je označen průběh jízdního cyklu pouze kombinací elektropohonu a hybridního pohonu bez využití režimu pouze spalovacího motoru. Toto je podloženo faktem, že cyklus nepřevyšuje rychlost 100 km/h, která je mezní pro odpojení elektromotoru od pohonné soustavy. Od kapacity baterie 48 kWh je konečný stav baterie vyšší než 50 %, takže vozidlo projíždí celý cyklus pouze na elektropohon s chvilkovým přechodem do hybridního režimu při překročení rychlosti 50 km/h.

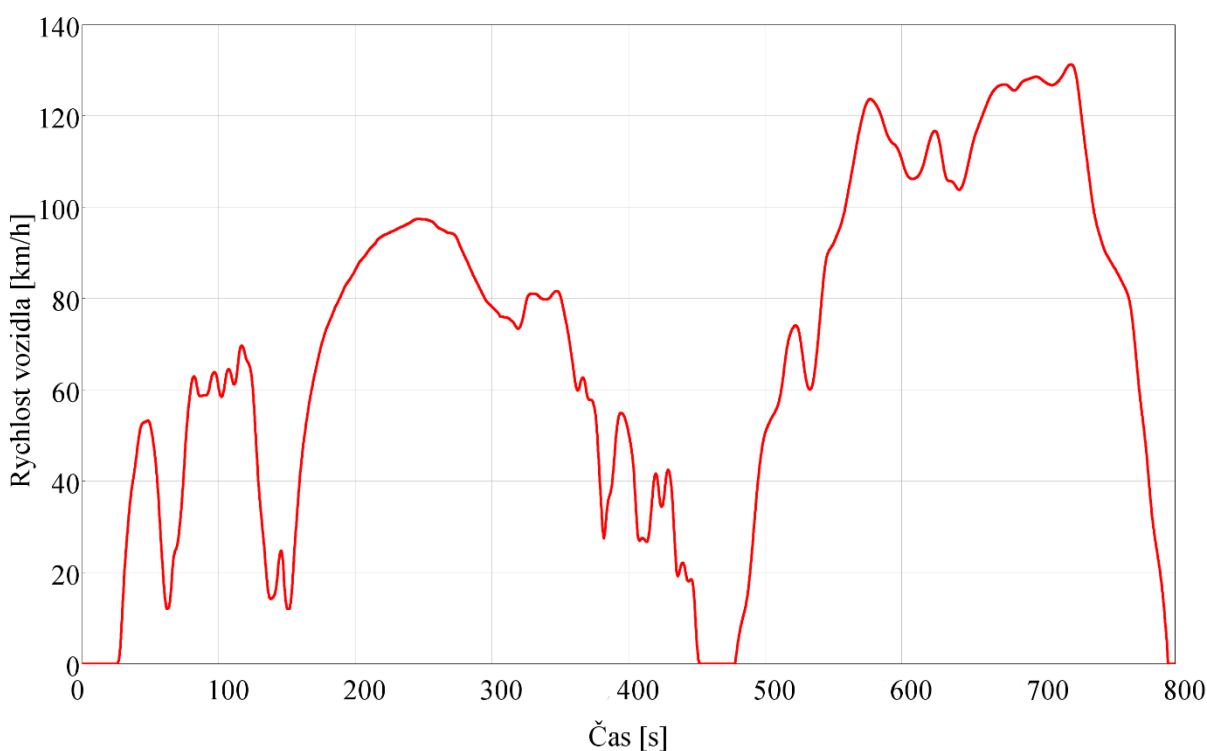
Optimální velikost baterie pro udržení vozidla nad hranicí přechodu do režimu spalovacího motoru je díky profilu cyklu nižší než v případě celého cyklu WLTC. Proto je možné jako optimum určit kapacitu 36 kWh, která pro vozidlo znamená užitečnou hmotnost 920 kg. Baterie o kapacitě 30 kWh dosahují hodnoty 25 % nabití po více než dvou hodinách cyklu, které jsou koncovým časem pro čtyřnásobný cyklus WLTC. Uvažované optimum lze tedy snížit na baterie o kapacitě 30 kWh, které jsou o 30 kg lehčí než 36 kWh a umožňují užitečnou hmotnost 950 kg. Obr. 52 zobrazuje průběh stavu nabití baterie pro experimenty 1 (červený), 5 (modrý) a 8 (zelený). Tyto reprezentují postupně zástupce vybití baterie na 25 % a přechod do režimu na spalovací motor, na více než 25 % (po 7200 s) s udržením provozu na hybridní režim a na více než 50 % pro souvislý režim v režimu na elektropohon ve všech případech pro něj splňujících podmínky.



Obr. 52 Graf závislosti stavu nabití baterie na čase pro vybrané experimenty (1, 5, 8)

WLTC HIGH + EXTRA HIGH (VYSOKÁ A VELMI VYSOKÁ RYCHLOST)

Mimoměstský provoz v jízdním cyklu WLTC se simuluje přibližně od sekundy 1000 (jeho průběh lze vidět na obr. 53). Tento úsek dlouhý 800 sekund obsahuje krátký provoz do rychlosti 60 km/h značící provoz ve obci, část provozu je poté do 100 km/h odpovídající provozu na okresních a státních silnicích a poslední část do rychlosti přibližně 130 km/h, která simuluje dálniční provoz. Zastavení vozidla je méně časté a spíše odpovídá cílenému zastavení (např. vyložení zboží), než nucenému v důsledku vnějších vlivů. Dálniční provoz také simuluje hustý dálniční provoz, který způsobuje momentové zpomalení vozidla následované jeho zrychlením na požadovanou rychlost. Průměrná rychlost tohoto cyklu je 69,5 km/h, jež je o 41 km/h vyšší než v případě předchozí kapitoly. Cyklus je desetkrát opakován pro dosažení cílové délky 8000 s.



Obr. 53 Část cyklu WLTC pro vysoké a velmi vysoké rychlosti

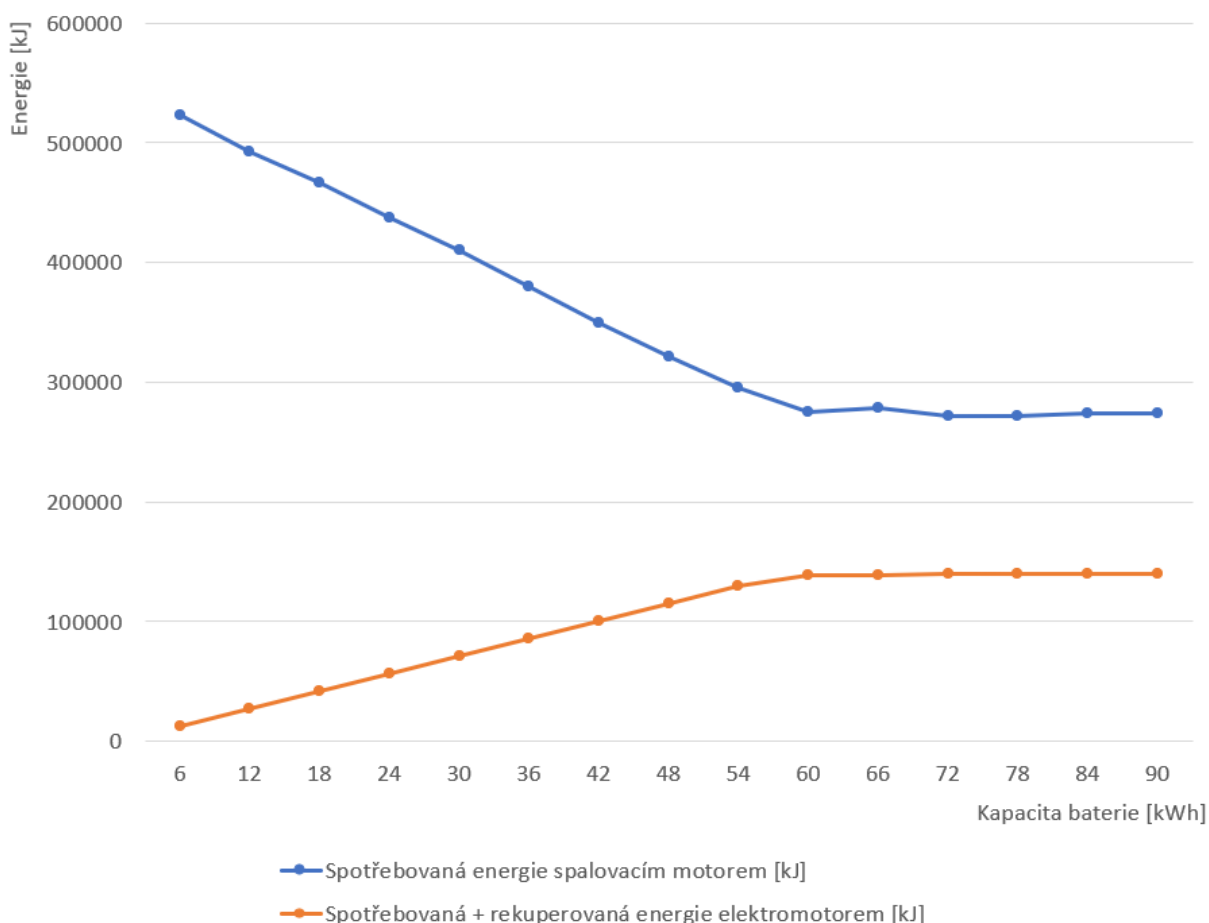
V tabulce 13 je možné pozorovat vývoj sledovaných veličin v závislosti na kapacitě baterie. Protože cyklus probíhá v rychlostech vyšších než 100 km/h, je možné pozorovat, jaký vliv má skutečnost, že je vozidlo provozováno v režimu pouze spalovacího motoru. V porovnání s nízkorychlostním cyklem je ve vysokorychlostním energii využita spalovacím motorem více než dvojnásobná, i když energie spotřebovaná elektromotorem je v tomto cyklu stejná nebo vyšší než v předchozím. Tento jev je způsoben zvýšenou průměrnou rychlostí vozidla, která přináší vyšší odpor vzduchu při provozu. Dle vzorce 10 při dosažení rychlosti 69,5 km/h a užití stejných okrajových podmínek dostaneme hodnotu aerodynamického odporu 354,7 N, jež je téměř šestinásobná vůči nízkorychlostnímu cyklu. Vyšší hodnota aerodynamického odporu se také promítá do spotřeby paliva, která je oproti cyklu WLTC přibližně dvojnásobná a vůči předchozímu cyklu přibližně trojnásobná a ve vyšších kapacitách baterie i pětinašobná.

Tab. 13 Srovnání využití energie ve vysokorychlostní části cyklu WLTC v závislosti na kapacitě baterie

Číslo	Kapacita baterie	Konečný SOC	Spotřeba paliva	Energie spotřebovaná motorem	Energie spotřebovaná a rekuperovaná elektromotorem	Poměr energií
[-]	[kWh]	[-]	[g]	[kJ]	[kJ]	[-]
1	6	0,2522	12 270	522 736	12 809	40,81
2	12	0,2514	11 569	492 872	27 587	17,87
3	18	0,2509	10 956	466 752	42 037	11,10
4	24	0,2509	10 255	436 870	56 674	7,71
5	30	0,2507	9 635	410 469	70 870	5,79
6	36	0,2507	8 918	379 939	85 599	4,44
7	42	0,2506	8 207	349 641	100 515	3,48
8	48	0,2505	7 549	321 613	114 971	2,80
9	54	0,2505	6 924	294 987	129 728	2,27
10	60	0,2871	6 462	275 287	139 108	1,98
11	66	0,3653	6 525	277 997	139 133	2,00
12	72	0,4204	6 384	271 987	140 130	1,94
13	78	0,4688	6 367	271 233	140 053	1,94
14	84	0,5107	6 421	273 566	139 474	1,96
15	90	0,5441	6 417	273 372	139 753	1,96

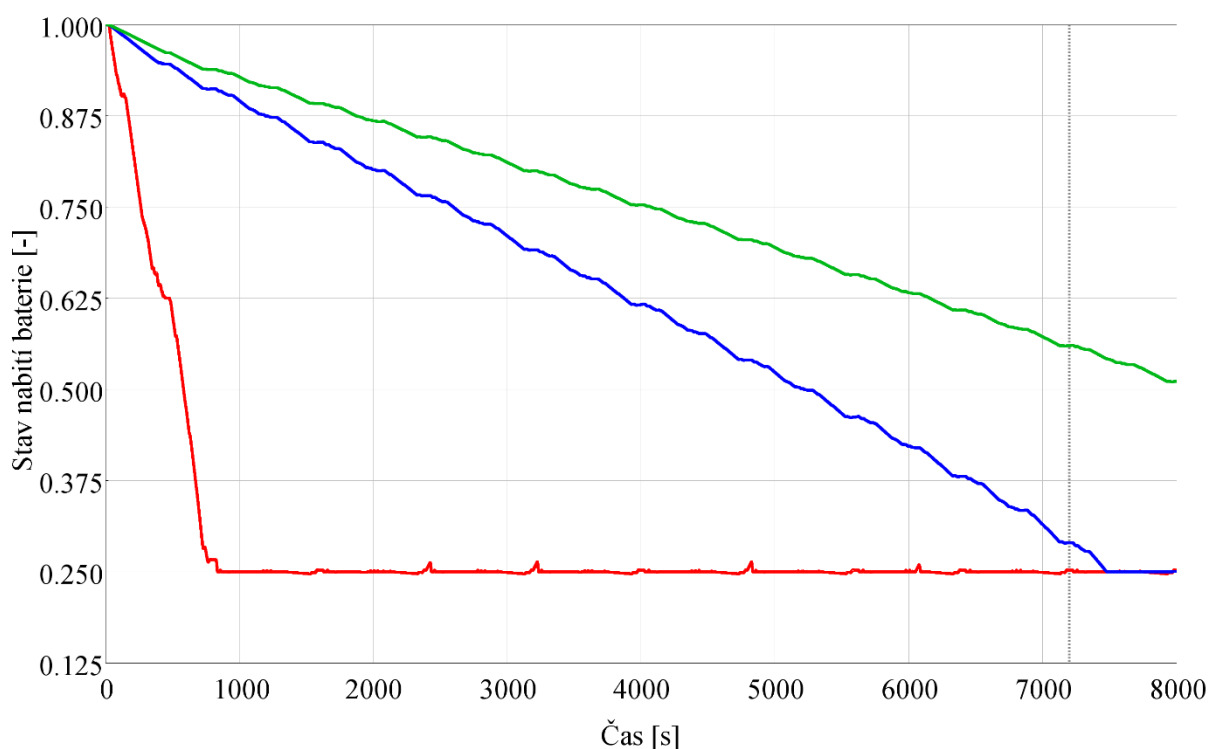
Z konečných hodnot stavu nabití baterie lze vyčíst, že provoz ve vyšších rychlostech je mnohem více energeticky náročný než provoz nízkými rychlostmi z důvodu aerodynamického odporu a setrvačnosti vozidla při rozjezdu. Konečný stavu baterie 50 % je dosažen pouze v experimentech s bateriemi o kapacitách 84 a 90 kWh, jež se hmotnostně pohybují za hranicí 400 kg a kapacitou odpovídají běžným plnohodnotným elektromobilům.

Obr. 54 zobrazuje závislost energií spotřebovaných spalovacím motorem a elektromotorem na kapacitě baterie. Opět je možné pozorovat lineárně klesající křivku pro spalovací motor a rostoucí pro elektromotor, ovšem nyní je bod, kdy se křivky narovnají, až kapacita baterie 60 kWh. Ta označuje bod, kdy je v baterii dostatečné množství energie na to, aby vozidlo provedlo cyklus v elektrickém a hybridním pohonu tak, že využívá čistě spalovacího motoru pouze při rychlostech vyšších, než 100 km/h. Od kapacity 84 kWh poté v rychlostech pod 50 km/h využívá pouze elektrický pohon.



Obr. 54 Graf závislosti využitě energie ve vysokorychlostní části cyklu WLTC na kapacitě baterie

Jako optimální vychází dle tabulky 13 baterie o kapacitě 60 kWh. Ta s sebou ale přináší hmotnost 300 kg, která snižuje užitečnou hmotnost vozidla na 800 kg. V případě uvažování cyklu stejně dlouhého jako čtyřnásobný WLTC, je možné posunout optimum na 54 kWh baterii, která 25 % a s tím přechod do režimu spalovacího motoru dosáhne po 7 477 s. Užitečná hmotnost se zvýší na 830 kg, jež je pořád poměrně nízká v porovnání s originálními 1 100 kg. Na obr. 55 lze vidět průběh stavu nabití baterie v závislosti na čase pro experimenty 1 (červený), 9 (modrý) a 14 (zelený). Tyto reprezentují postupně zástupce vybití baterie na 25 % a přechod do režimu na spalovací motor, na více než 25 % (po 7 200 s) s udržení provozu na hybridní režim a na více než 50 % pro souvislý režim v režimu na elektropohon ve všech případech pro něj splňujících podmínky.



Obr. 55 Graf závislosti stavu baterie na čase pro vybrané experimenty (1, 9, 14)

PŘÍMÉ SROVNÁNÍ WLTC, NÍZKORYCHLOSTNÍHO A VYSOKOKORYCHLOSTNÍHO CYKLU

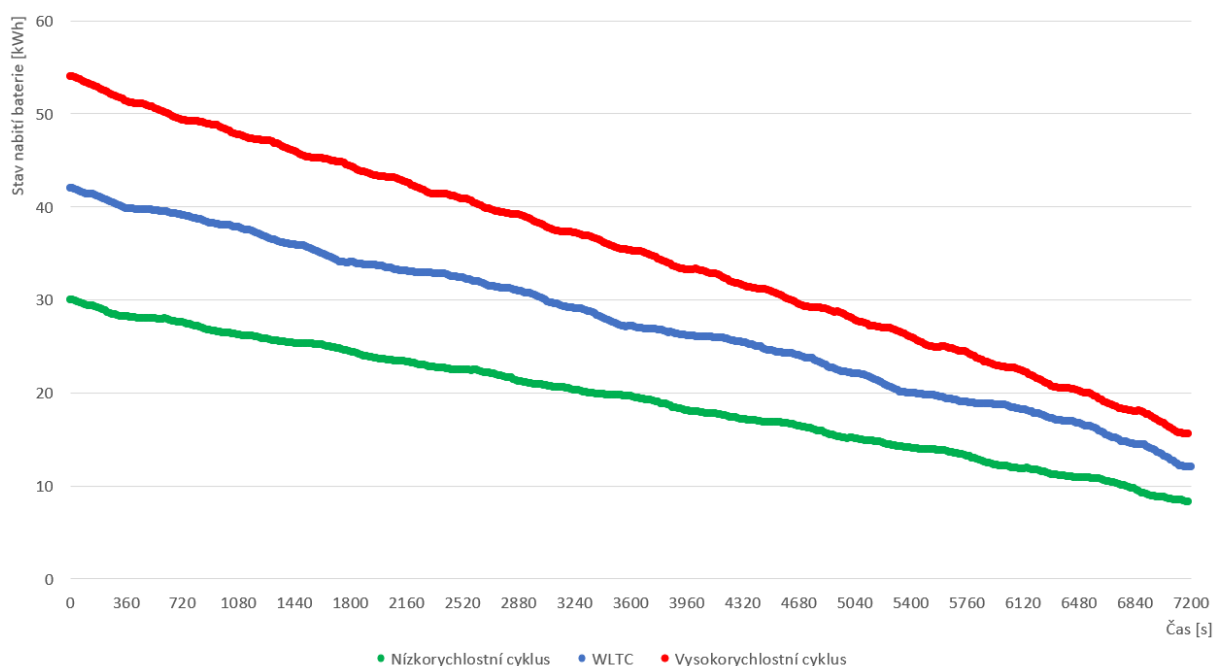
Prvním kritériem, podle kterého se simulované cykly mohou srovnat je průměrná rychlost po uplynutí cyklu. Nejnižší průměrnou rychlost s hodnotou 28,5 km/h má nízkorychlostní část cyklu WLTC, samotný cyklus WLTC má průměrnou rychlost 46,5 km/h a jeho vysokorychlostní část 69,5 km/h. V tabulce 14 je možné vidět nejdříve hodnoty charakterizující dané cykly z hlediska průměrných rychlostí a jízdních odporů, jimiž jsou aerodynamický a valivý odpor, kdy druhý jmenovaný je konstantní nezávisle na uvažovaném jízdním cyklu. Pro srovnání zvolených variant jsou vybrány parametry probírané z předchozích kapitol. U parametrů, které jsou závislé na délce trvání experimentu, byly zjištěny jejich hodnoty v čase 7 200 s pro všechny tři cykly, aby byla jejich hodnota pro srovnání vypovídající.

Tab. 14 Srovnání testovaných cyklů dle optimálních velikostí baterie

	Nízkorychlostní cyklus	WLTC	Vysokorychlostní cyklus
Průměrná rychlost [km/h]	28,5	46,5	69,5
Aerodynamický odpor [N]	59,6	158,8	354,7
Valivý odpor [N]	218,7	218,7	218,7
Kapacita baterie [kWh]	30	42	54
Hmotnost baterie [kg]	150	210	270
Užitečná hmotnost vozidla [kg]	950	890	830
Konečný SOC (7 200 s) [-]	0,2743	0,2868	0,2895
Spotřeba paliva (7 200 s) [g]	1 438	3 178	6 924
Ujetá vzdálenost (7 200 s) [km]	56,820	93,751	139,290
Průměrná spotřeba paliva [l/100 km]	2,98	3,99	4,94
Poměr spotřebovaných energií [-]	1,20	1,39	2,27

Protože aerodynamický odpor roste kvadraticky s rostoucí rychlostí, vozidlo je vystavováno téměř šestinásobnému odporu při vysokorychlostním cyklu oproti nízkorychlostnímu. Výsledkem je přibližně čtyřnásobná spotřeba paliva ve stejném srovnání. Paliva je v cyklech s vyšší průměrnou rychlostí spotřebováno více, ale průměrná spotřeba se zvyšuje mnohem méně. Způsobeno je to větší vzdáleností, kterou za stejný časový úsek ujede vozidlo s vyšší průměrnou rychlostí.

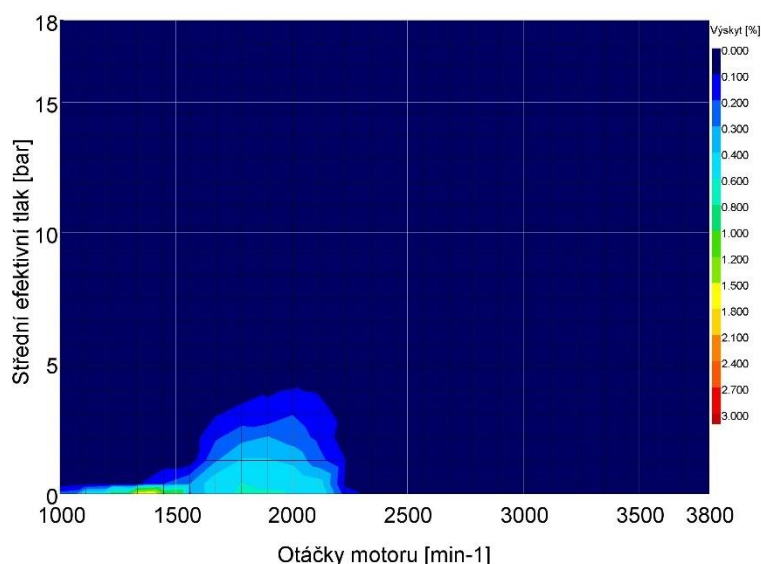
V cyklech s vyšší průměrnou rychlostí roste poměr energie spotřebované spalovacím motorem vůči energii spotřebované elektromotorem. Je to způsobeno logikou řízení hybridního pohonu vozidla, která přepíná elektropohon do hybridního režimu při 50 km/h a při 100 km/h přechází vozidlo do režimu pouze se spalovacím motorem. Proto je poměr pro vysokorychlostní cyklus téměř dvojnásobný vůči nízkorychlostnímu, kdy vozidlo stráví mnohem větší množství času v režimu pouze na spalovací motor. Na obr. 56 je možné vidět průběh stavu nabití baterie pro zvolené konfigurace z tab. 14. Pro přehledné vyobrazení rozdílů mezi jednotlivými cykly byl stav baterie přepočten z podílového vyjádření do vyjádření pomocí zbylé kapacity baterie.



Obr. 56 Graf závislosti stavu nabití baterie na časovém průběhu cyklu

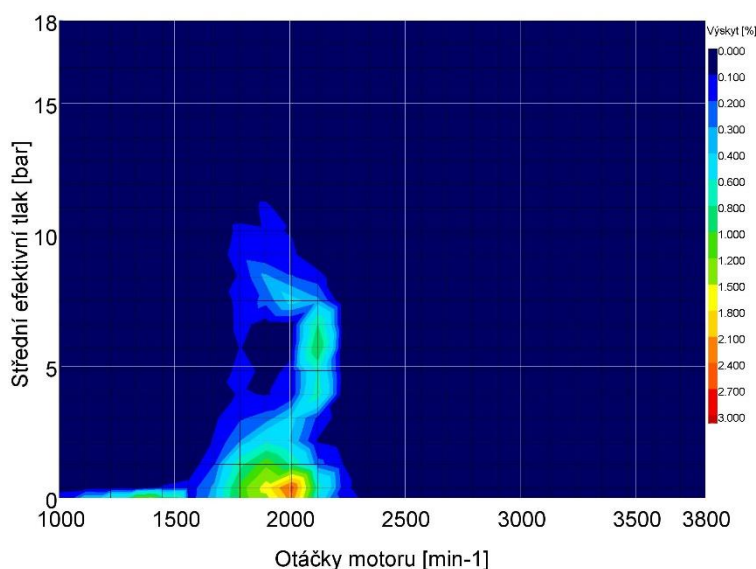
V případě, že je vozidlo cílené primárně na provoz ve městě, je možné vystačit s nejmenší kapacitou baterie. Za stejný časový úsek sice vozidlo ujede menší vzdálenost, ale ušetří velké množství paliva díky dlouhé době, při které je spalovací motor při provozu vypnutý. Díky nízké hmotnosti baterie zůstává užitečná hmotnost vozidla vysoká a je možné převážet téměř stejné množství nákladu, jako u běžného užitkového vozu. Pro městskou dopravu zboží nebo rozvážení zásilek z centrálních skladů ve městech je tato konfigurace výhodná.

Na obr. 57 je možné vidět, v jakých pracovních bodech se motor vozidla vyskytuje nejčastěji v průběhu nízkorychlostního cyklu. Je možné si všimnout, že nejvíce je model užíván v nízkých otáčkách kolem 1500 min^{-1} při velmi nízkém zatížení. Těchto bodů je dosaženo při využití elektromotoru do jeho maxima a připojení spalovacího motoru pouze při rychlosti nad 50 km/h . V daných bodech je měrná spotřeba paliva velmi nízká a roste s rostoucími otáčkami při daném zatížení.



Obr. 58 Nejvíce využívané provozní body motoru pro nízkorychlostní cyklus

Pokud je pro vozidlo zamýšlený kombinovaný provoz a požadavkem zůstává co nejdelší provoz v režimu hybridního vozidla, je zapotřebí obětovat část užitečné hmotnosti na úkor větší baterie. Sníží se tím spotřeba paliva vozidla, ale také množství převáženého zboží. Pro meziměstskou dopravu nebo dopravu v okolí velkých měst s omezeným dálničním provozem začíná být přibývající hmotnost překážkou v převozu maximálního množství zboží. Proto by bylo výhodnější zvolit kompromis, který by obnášel zmenšení kapacity baterie na úkor dojezdu na hybridní pohon při získání vyšší užitečné hmotnosti.

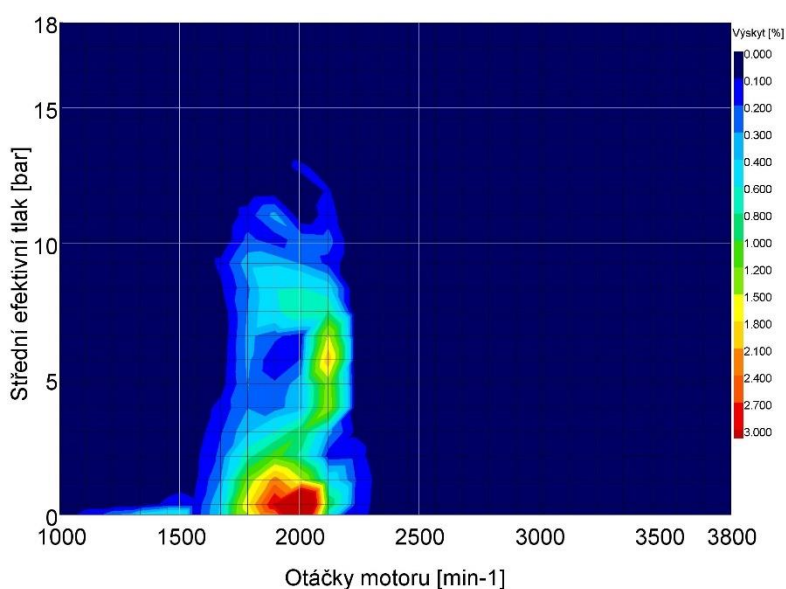


Obr. 57 Nejvíce využívané provozní body motoru pro cyklus WLTC

Obr. 58 zobrazuje pracovní body motoru, jež jsou nejvíce využívány při cyklu WLTC. Lze si povšimnout, že motor pracuje část času ve stejných bodech, jako při nízkorychlostním cyklu, jež charakterizuje pomalou jízdu při cyklu WLTC. Největší využití motoru je ve velmi nízkých zatíženích přibližně při otáčkách 2000 min^{-1} . Toto je pravděpodobně způsobeno spalovacím motorem doplňujícím požadovaný točivý moment na kola v případě, kdy vozidlo

jede v hybridním režimu do 100 km/h a točivý moment od elektromotoru není dostatečný. Následně motor pracuje také v bodech středního zatížení, kdy dosahuje přibližně hodnoty 10 barů středního efektivního tlaku. Tyto hodnoty odpovídají rychlostem přes 100 km/h, kdy vozidlo přechází do režimu provozu na pouze spalovací motor, a dosahují nejnižší měrné spotřeby paliva.

Pro meziměstský a dálniční provoz vychází jako optimální kapacita baterie příliš vysoká na to, aby bylo výhodné vozidlem přepravovat zboží. Kapacita baterie sice stačí na hybridní provoz vozidla po dobu dvou hodin, ale cenou je snížení užitkové hmotnosti o 300 kg. V případě transportu na větší vzdálenosti je důležitá kapacita vozidla, a proto by bylo rozumnější zvolit menší kapacitu baterie a implementovat jinou řídicí logiku pro hybridní pohon. Myšlenkou této logiky by byl elektrický pohon v nízkých rychlostech odpovídající odjezdu z města nebo příjezdu do něj, pohon na spalovací motor v dálničním režimu a hybridní pohon pouze v případě zvýšeného požadavku na zrychlení ze strany řidiče (např. předjíždění na dálnici).



Obr. 59 Nejvíce využívané provozní body motoru pro vysokorychlostní cyklus

Na obr. 59 lze vidět body, ve kterých motor vozidla pracuje v daném cyklu nejvíce. Na rozdíl od předchozích motor téměř nevyužívá nízkých otáček s nízkým zatížením, což je způsobeno minimem zastavování a rozjíždění při vysokorychlostní části cyklu WLTC. Nejvíce motor pracuje kolem otáček 2000 min^{-1} při nízkém zatížení. Vysvětlením je dlouhý provoz v hybridním režimu, při kterém spalovací motor doplňuje točivý moment na kola v případě, kdy točivý moment od elektromotoru není dostatečný. Velká část cyklu poté probíhá v zatíženích vyšších, než 5 barů středního efektivního tlaku. Toto je charakteristické pro provoz nad 100 km/h, kdy elektromotor přestává zasahovat do systému motoru. V daném zatížení motor dosahuje nízké měrné spotřeby paliva, a proto je výhodné ho v daných bodech provozovat.

ZÁVĚR

Tato práce reaguje na zvýšené množství nabídky hybridních a elektrických vozidel pro přepravu osob, přičemž více ekologických řešení pro rozvážení zboží, kromě dnešních užitkových vozidel poháněných vznětovými motory splňujících normu Euro 6, chybí. Vozidel tohoto typu je na trhu malé množství a výrobci se spíše soustředí na plně elektrifikované vozy, jež přináší určitá úskalí. Hybridní vozidla přichází jako možné řešení, které přináší výhody obou variant.

Iveco Daily se vznětovým motorem 3,0 litru bylo zvoleno jako vozidlo pro testování v softwaru GT-Suite, přičemž pro účely práce bylo vozidlo osazeno elektromotorem a úložištěm elektrické energie v bateriích. Vozidlu byly přiděleny režimy, v jakých může být provozováno tak, jak funguje běžný automobil. Těmito režimy je pohon elektromotorem, hybridní pohon, pohon spalovacím motorem, regenerativní brzdění, rekuperace energie při volnoběžných otáčkách motoru a vypnutý motor. Pro ně byla následně vytvořena řídicí logika přiřazující jednotlivým režimům podmínky, při kterých se aktivují a deaktivují, aby jednotlivé typy pohonů byly maximálně využity. Mezi primární podmínky patřila rychlost vozidla, poloha plynového pedálu řidiče a stav nabití baterie.

Cílem řídicí logiky bylo dosažení bodu, ve kterém spalovací motor pracuje nejlépe, na tento bod se zaměřit a snažit se vozidlo provozovat kolem daného bodu co nejdéle. Jako druhý řídicí prvek, který pomohl dosáhnout zmíněného bodu, je převodovka, jejíž nastavení řazení ovlivňuje, v jakých otáčkách se motor vozidla pohybuje. Řazení bylo sestaveno tak, aby motor pracoval v nižších otáčkách tak, aby měl pro provoz k dispozici maximální hodnotu točivého momentu téměř v každém okamžiku. V případě, že motor pracuje v dostatečném zatížení, dokáže dosáhnout v rozpětí otáček daném převodovkou nízké měrné efektivní spotřeby. Kombinací těchto dvou komponent vzniká systém, kterým lze motor provozovat dle potřeby v jeho optimálním pracovním bodu.

Navržení řídicí logiky je důležitý bod pro dosažení optimálního využití obou typů pohonů. V práci je použita logika závislá na menším množství vstupních veličin, jmenovitě rychlost vozidla, stav baterie a poloha pedálů řidiče, přičemž hlavním kritériem pro rozhodování mezi navrženými režimy je rychlost vozidla. Pro posouvání pracovního bodu spalovacího motoru je možné dále do procesu rozhodování zavést více parametrů, nebo rozšířit využití stávajících. Tímto rozšířením je myšleno např. využití polohy plynového pedálu jako kritérium pro přechod do hybridního režimu v libovolné rychlosti, pokud přijde požadavek na vyšší zrychlení. Dalšími parametry je okamžité zrychlení vozidla, požadované zatížení motoru prostřednictvím středního efektivního tlaku nebo točivého momentu, nebo aktuální sklon vozovky, které také mohou být využity pro přechody mezi režimy.

Řídicí logikou lze eliminovat nebo redukovat provoz spalovacího motoru v nízkých rychlostech, ve kterých užívá nižších rychlostních stupňů a pracuje ve větším rozptylu otáček, čímž se více vzdaluje od nejnižšího bodu měrné spotřeby paliva. Proto je v systému zakomponována podmínka rychlosti 50 km/h, jež je rychlost, do které vozidlo využívá pouze pohon na elektromotor, případně hybridní pohon při poklesu stavu nabití baterie pod 50 %. Elektromotor dosahuje nejvyššího točivého momentu v nízkých otáčkách, čímž se jeho provoz v nízkých rychlostech nabízí jako výhodná alternativa. Na rozdíl od elektrických aut ve zkoumaném hybridním vozidle figuruje převodovka, díky které je možné udržet i elektromotor v příznivých otáčkách, čímž se zajistí jeho možné využití ve vyšších rychlostech vozidla bez přílišné ztráty účinnosti.

V práci byly provedeny simulace, které se zaměřily na jízdní cyklus WLTC, jež je používán jako cyklus pro měření emisí při homologaci vozidel v Evropě. Cyklus byl aplikován nejdříve na vozidlo bez hybridního pohonu a poté s hybridním pohonem s kapacitou akumulátoru 6 kWh. Výsledkem bylo srovnání ukazující, že vozidlo poháněné pouze spalovacím motorem využije pro daný cyklus 2,221 kg paliva a hybridní vozidlo s plně nabitou baterií na začátku cyklu dokáže ušetřit přibližně 44 % zmíněného paliva. Toto množství odpovídá téměř 1 kg paliva, přičemž elektropohonu a hybridního pohonu bylo využíváno dle řídicí logiky a konečný stav nabití baterie byl přibližně 25 %.

Protože je uvažován relativně málo výkonný elektromotor v porovnání se spalovacím motorem, provedené simulace prokázaly, že nejvýhodnější je ho provozovat v nízkých rychlostech, pro které platí nižší aerodynamický odpor. Ve vyšších rychlostech poté pomáhá elektromotor spalovacímu motoru při zrychlování, kdy se aktivuje do rychlosti 100 km/h a ve poté je vozidlo poháněno pouze spalovacím motorem.

Pokud budeme uvažovat běžný provoz vozidla, v praxi to znamená, že vozidlo vyjede po nočním nabití z centrálního skladu společnosti s plně nabitými bateriemi, dokud nepřekročí zmíněnou rychlost nebo nedojde k vybití baterie pod 50 %. Poté přechází vozidlo do hybridního režimu, dokud nepoklesne stav nabití baterie na 25 %, kdy jako primární pohon přichází spalovací motor. Pokud by se správně dimenzovala velikost baterie, pak je možné vozidlo provozovat pouze v režimech využívajících elektropohon, poté dobít baterie např. při doplňování zboží ve skladu a opět pokračovat v režimu elektromotoru.

Další simulace byly zaměřeny na hledání ideální velikosti baterie pro cyklus WLTC a jeho nízkorychlostní a vysokorychlostní části. Protože délka trvání cyklu je pouze 30 minut, byly cykly prodlouženy na 2 hodiny a více, aby bylo možné blíže vidět vliv běžného provozu. Výsledkem bylo nalezení optimální velikosti baterie pro provoz ve zmíněných typech cyklů, kdy toto optimum bylo stanoveno na základě podmínky provozu vozidla v elektrickém nebo hybridním režimu po dobu délky trvání cyklu. Konečné hodnoty velikosti baterie byly 30 kWh pro nízkorychlostní cyklus, 42 kWh pro cyklus WLTC a 54 kWh pro cyklus vysokorychlostní. Že jsou dané cykly rozdílně náročné na spotřebu energií ukazuje i množství paliva spotřebovaného při daných cyklech. Při nízkorychlostním cyklu se spotřebovalo 1 438 g paliva, při cyklu WLTC 3 178 g a při vysokorychlostním 6 924 g. Rozdíly mezi těmito množstvími ukazují, že typ cyklu má vedle kapacity baterie také vliv na spotřebu paliva spalovacího motoru. Na rozdíl od optimální kapacity baterie tento růst není lineární, což je způsobeno tím, že spalovací motor se aktivuje pouze od rychlosti 50 km/h. Zatímco nízkorychlostní cyklus v celé délce trvání nepřekračuje 80 km/h, vysokorychlostní dosahuje téměř dvojnásobných rychlostí, čímž je vozidlo vystaveno většímu aerodynamickému odporu vozidla a tím je požadavek na točivý moment motoru a s tím jeho spotřeba paliva vyšší.

Velikost baterie není neomezená a přináší s sebou zvýšení celkové hmotnosti vozidla a s tím snížení užitečné hmotnosti vozidla, kdy každých 6 kWh znamená 30 kg hmotnosti. Baterie, které byly výsledkem experimentu, by přinesly postupně 150 kg, 210 kg a 270 kg, čímž sníží užitečnou hmotnost vozidla Iveco Daily z 1 100 kg na 950 kg, 890 kg a 830 kg. Pro přepravce je důležitá primárně ekonomičnost provozu, jejímž ukazatelem je spotřeba paliva, ale také množství převezeného nákladu. Problém s přidanou hmotností je možné vyřešit konstrukčně tak, aby vozidlo mohlo uvést vyšší hmotnost, ale limitující faktor je legislativní kategorie vozidel do 3,5 tuny, jejíž překročení s sebou přináší nutnost řídičského oprávnění typu C, které pro běžná užitková vozidla není vyžadováno. Výsledné řešení by poté záviselo na

výrobci, který buď zvolí jednu z možných variant, nebo navrhne jejich malé množství, ze kterého by si pak zákazník vybíral.

U hybridního vozidla je dalším způsobem udržení motoru blízko jeho optimálního pracovního bodu elektricky asistované turbodmychadlo, které je předmětem řešení této práce. Díky němu je možné eliminovat nebo ve velké míře redukovat turbo efekt, který je spojený s každým turbodmychadlem. Motor je udržován v optimálním provozním bodu tak, že elektromotor turbodmychadla pomáhá roztáčet jeho hřídel v případě nízkých otáček motoru a v případě vysokého zatížení motoru udržuje maximální otáčky rotoru odebráním energie výfukových plynů a její přeměnou na elektrickou energii.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] MI, Chris a M. Abdul MASRUR. *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives*. 2nd Edition. Hoboken, N.J., USA: Wiley, 2017. ISBN 978-0-470-74773-5.
- [2] DE ARAUJO, Philippe. GARRETT MOTION INC. *HYBRIDS: Knowledge sharing session*. 2019, 67 s.
- [3] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8756-4.
- [4] PATTERSON, A.T.C., R. J. TETT a J. MCGUIRE. Exhaust Heat Recovery using Electro-Turbogenerators. *SAE Mobilus* [online]. United States: SAE International, 2009, 2009-05-13, 1-8 [cit. 2021-02-04]. ISSN 0148-7191. Dostupné z: doi:10.4271/2009-01-1604
- [5] ALSHAMMARI, Mamdouh, Fuhaid ALSHAMMARI a Apostolos PESYRIDIS. Electric Boosting and Energy Recovery Systems for Engine Downsizing. *Energies* [online]. 2019, 12(24), 1-33 [cit. 2021-01-28]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12244636
- [6] IBARAKI, Seiichi, Yukio YAMASHITA, Kunio SUMIDA, Hiroshi OGITA a Yasuaki JINNAI. Development of the "hybrid turbo," an electrically assisted turbocharger. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.: Technical Bulletin [online]. Japonsko: Mitsubishi Heavy Industries, © 1994-2018, 2006, 43(3), 1-5 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <http://www.mhi.co.jp/technology/review/abstractj-43-3-36.html>
- [7] HOPMANN, Ulrich a Marcelo C. ALGRAIN. Diesel Engine Electric Turbo Compound Technology. *SAE Mobilus* [online]. United States: SAE International, 2003, 2003-06-23, 1-9 [cit. 2021-02-04]. ISSN 0148-7191. Dostupné z: doi:10.4271/2003-01-2294
- [8] LEE, Woongkul, Erik SCHUBERT, Yingjie LI, Silong LI, Dheeraj BOBBA a Bulent SARLIOGLU. Overview of Electric Turbocharger and Supercharger for Downsized Internal Combustion Engines. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* [online]. 2017, 3(1), 36-47 [cit. 2021-01-28]. ISSN 2332-7782. Dostupné z: doi:10.1109/TTE.2016.2620172
- [9] BORETTI, Albert. F1 style MGU-H applied to the turbocharger of a gasoline hybrid electric passenger car. *Nonlinear Engineering* [online]. 2017, 2017, 6(4), 1-8 [cit. 2021-02-04]. ISSN 2192-8010. Dostupné z: doi:10.1515/nleng-2016-0069
- [10] PETRÁNY, Máté. How Formula One's Amazing New Hybrid Turbo Engine Works. In: *Jalopnik* [online]. New York: G/O Media, © 2021, 2014-01-22 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://jalopnik.com/how-formula-ones-amazing-new-hybrid-turbo-engine-works-1506450399>

- [11] DAVIES, Peter, N. BONTEMPS, D. FRANCOIS, P. DE ARAUJO, D. ZECCHETTI a S. HEINTZ. *Electric Turbo: A key Technology for Hybridized Powertrains*. Dresden, 2019.
- [12] ZECCHETTI, D., S. HEINTZ, M. MANIAR, J. KEULER a P. DAVIES. *Electric Turbo, a Technology for Stoichiometric Combustion and increased Efficiency*. Dresden, 2020.
- [13] JAEGER, Laurentius, Darius MEHTA, Luca TABACCHI, Jeff LOTTERMAN, Filip ECKL a Peter DAVIES. *Electrified Turbocharging for CV Engines: The Added Values*. Dresden, 2019.
- [14] GAMMA TECHNOLOGIES, © 2015. GT-SUITE: Vehicle Driveline and HEV Application Manual. Version 2016. Stuttgart.
- [15] New Daily E6 Brochure. In: IVECO [online]. Vysoké Mýto: © IVECO – A CNH INDUSTRIAL COMPANY [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.iveco.com/czech/collections/catalogues/Documents/new-daily-E6/New_DailyE6_Brochure.pdf
- [16] VITTORINI, Diego, Marco Di BARTOLOMEO, Davide Di BATTISTA a Roberto CIPOLLONE, 2018. Charge Air Subcooling in a Diesel Engine via Refrigeration Unit – Effects on the Turbocharger Equilibrium. *Energy Procedia* [online]. 148, 822-829 [cit. 2021-5-13]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2018.08.115
- [17] Medium Duty Commercial: IVECO Daily Hybrid Plug-in, © 2019. Horizon 2020 Innovation project on hybrid vehicles [online]. ECOCHAMPS [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://eco-champs.eu/medium-duty-commercial-iveco-daily-hybrid-plug-in/>
- [18] CLOUD, Maria, © 2020. What is the Energy Density of a Lithium-Ion Battery? Flux Power [online]. Vista (California): Flux Power, August 21, 2020 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.fluxpower.com/blog/what-is-the-energy-density-of-a-lithium-ion-battery>
- [19] Specifikace Iveco Daily 35S21V 3520L H2 3.0 Manuál 4 dveře, © 2009-2021. Databáze specifikací automobilů [online]. cars-data.com [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.cars-data.com/cz/iveco-daily-35s21v-3520l-h2-3-0-specs/114789>
- [20] Bevel Drive Iveco Daily 35S 9/40, © 2010 – 2021. Van Spare Parts for IVECO, Fiat, Peugeot, Citroen, Renault [online]. Trenčín: AutoRicambi [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.auto-ricambi.eu/bevel-drive-iveco-daily-35s-9-40-p6541/>
- [21] ZF 8HP transmission, 2001-. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/ZF_8HP_transmission

- [22] Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure, 2001-. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 30 October 2017 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure#/media/File:Class_3b.svg
- [23] POTTS, Greg, © 1996. Ford Transit Custom PHEV review: a plug-in hybrid van. Top Gear: The world's greatest car website [online]. London: BBC Studios Distribution, 2 Nov 2020 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.topgear.com/car-reviews/transit-custom/first-drive>
- [24] BUREŠ, Jiří, © 2002. Vzduch: Fyzikální a chemické vlastnosti vzduchu. ConVERTER: převody jednotek [online]. Holešov [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

C	[Ah]	Kapacita akumulátoru
C_x	[-]	Koeficient aerodynamického odporu
CO		Oxid uhelnatý
CO_2		Oxid uhličitý
E	[kWh]	Energie vyjadřující kapacitu akumulátoru
e	[Wh/kg]	Hustota energie baterie
F_{aer}	[N]	Aerodynamický odpor vozidla
F_{grd}	[N]	Odpor vozidla při stoupání
F_{rot}	[N]	Valivý odpor vozidla
HC		Uhlovodíky
I_{axl}	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti kola vynásobený počtem kol vozidla
I_{dsh}	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti hnací hřídele
I_{eng}	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti motoru
I_{trans1}	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti vstupní strany převodovky
I_{transl}	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti výstupní strany převodovky
MGU		Jednotka motor-generátor
$MGU-H$		Tepelná jednotka motor-generátor
$MGU-K$		Jednotka motor-generátor pro rekuperaci kinetické energie
$m_{baterie}$	[kg]	Hmotnost baterie
$m_{celková}$	[kg]	Celková hmotnost vozidla
$m_{provozní}$	[kg]	Provozní hmotnost vozidla
$m_{užitečná}$	[kg]	Užitečná hmotnost vozidla
M_{veh}	[kg]	Hmotnost vozidla
\dot{m}	[kg/s]	Průtok vzduchu turbínou turbodmychadla
\dot{m}'	[(kg/s) · K ^{0,5} /kPa]	Redukovaný průtok vzduchu turbínou turbodmychadla
NO_x		Oxidy dusíku
P_{vstup}	[kPa]	Tlak na vstupu do turbíny
R_d	[-]	Převodový poměr diferenciálu
R_t	[-]	Převodový poměr převodovky
r_{whl}	[m]	Poloměr kola
S_x	[m ²]	Čelní plocha vozidla

t	[s]	Čas
T_{vstup}	[K]	Vstupní teplota do turbíny
U	[V]	Napětí
v	[m/s]	Rychlost vozidla
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota tekutiny
ρ_{vzduch}	[kg/m ³]	Hustota vzduchu
$\tau_{drv,v}$	[Nm]	Výstupní točivý moment ze spojky
τ_{EFF_INER}	[Nm]	Točivý moment potřebný pro při dané rychlosti
τ_{eng}	[Nm]	Požadovaný točivý moment motoru
τ_{EXT}	[Nm]	Točivý moment potřebný pro překonání externích odporů
τ_{TRANS_RAT}	[Nm]	Točivý moment pro korekci výpočetního modelu
ω_{drv}	[min ⁻¹]	Otáčky spojky nebo hydrodynamického měniče
ω_{eng}	[min ⁻¹]	Otáčky motoru