

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**System akumulace elektrické energie pro elektrická
vozidla**

**Autor práce: Bc. Jakub Koniček
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Drabek Ph.D.**

Plzeň 2020

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce obsahuje simulaci hybridního vozidla, měření spotřeby paliva vozidla a možností jejího snižování. Předkládá algoritmus řízení za účelem provozování pohonů hybridních vozidel s co nejvyšší efektivitou.

Klíčová slova

Hybridní elektrické vozidlo, rekuperace energie, spotřeba energie, spotřeba paliva, jízdní cyklus, NEDC, WLTP, simulace, akumulátory

Abstract

The presented diploma thesis contains a simulation of a hybrid vehicle, measuring the fuel consumption of the vehicle and the possibility of reducing it. It presents a control algorithm in order to operate the drive of hybrid vehicles with the highest possible efficiency.

Keywords

Hybrid electric vehicle, energy recovery, energy consumption, fuel consumption, driving cycle, NEDC, WLTP, simulation, batteries

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 19.6.2020

Jakub Koníček

Obsah

OBSAH	6
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	7
1 ÚVOD	9
1.1 ENERGETICKÉ ZTRÁTY	9
2 ELEKTRICKÉ SYSTÉMY	10
2.1 REGENERATIVNÍ BRZDĚNÍ	10
2.2 PREDIKTIVNÍ NAVIGACE	11
2.3 ADAPTIVNÍ TEMPOMAT	11
3 MECHANICKÉ SYSTÉMY	12
3.1 SETRVAČNÍKY	12
4 AKUMULÁTORY ENERGIE	14
4.1 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY.....	14
4.2 ULTRAKAPACITORY	14
4.3 LI-ION	16
4.4 LI-POL	19
5 USPOŘADÁNÍ POHONÝCH JEDNOTEK ELEKTRICKÝCH A HYBRIDNÍCH VOZIDEL	21
5.1 ELEKTRICKÁ VOZIDLA.....	21
5.2 HYBRIDNÍ VOZIDLA	22
5.2.1 <i>Sériový hybrid</i>	22
5.2.2 <i>paralelní hybrid</i>	23
5.2.3 <i>sério-paralelní hybrid</i>	23
5.2.4 <i>Komplexní hybrid</i>	25
6 SIMULACE VYBRANÉHO VOZIDLA	27
6.1 MATLAB/SIMULINK	28
6.2 JÍZDNÍ CYKLY	28
6.2.1 <i>Sběr dat</i>	29
6.2.2 <i>Design jízdního cyklu</i>	29
6.2.3 <i>NEDC</i>	29
6.2.4 <i>WLTP</i>	31
6.2.5 <i>FTP-75</i>	33
6.3 SIMULACE VYBRANÉHO VOZIDLA.....	33
6.4 VÝDLEDKY.....	39
7 ŘÍDÍCÍ ALGORITMUS	45
7.1 NÁVRH ŘÍDÍCÍHO ALGORITMU	46
ZÁVĚR	52
SEZNAM LITERATURY	53
PŘÍLOHY NA CD	1

Seznam symbolů a zkratek

ABS...(Anti-lock brake system) - Protiblokovací systém brzd
ACC...(Adaptive cruise control) - Adaptivní tempomat
CVT...(Continuously variable transmission) - Převodovka s plynule proměnným převodem
LCO...(Lithium cobalt oxide) - Oxid kobaltnatý lithný
LMO...(Lithium manganese oxide) - Oxid manganatý lithný
NMC...(Lithium nickel manganese Cobalt Oxide) - Oxid kobaltnatý lithno-nikelnatý
ESS...(Energy storage system) - Systém skladování energie
EV...(Electric vehicle) - Elektrické vozidlo
BEV...(Battery electric vehicle) - Bateriové elektrické vozidlo
FCEV...(Fuel cell electric vehicle) - Elektrické vozidlo s palivovými články
HEV...(Hybrid electric vehicle) - Hybridní elektrické vozidlo
EU...Evropská unie
PSAT...(Power system analysis toolbox) - Nástroj pro analýzu energetického systému
VDMS...(Vehicle dynamics for use with MATLAB/Simulink) - Dynamika vozidel
propoužití MATLAB/Simulinku
NEDC...(New european driving cycle) - Nový evropský jízdní cyklus
UDC...(Urban driving cycle) - Městský jízdní cyklus
EUDC...(Extra-urban driving cycle) - Příměstská jízdní cyklus
ECE...(United nations economic commission for europe) - Evropská hospodářská komise
WLTP...(Worldwide harmonised light vehicles test procedure) - Celosvětový postup
zkoušky osobních vozidel
FTP...(Federal test procedure) - Federální zkušební postup
UDDS...(Urban dynamometer driving schedule) - Městský jízdnírozvrh pro dynamometr
EPA...(Environmental protection agency) - Agentura pro ochranu životního prostředí
P₆₅...Spotřeba energie při spouštění spalovacího motoru při rychlosti větší než 65 km/h
P₅₀...Spotřeba energie při spouštění spalovacího motoru při rychlosti větší než 50 km/h
P₃₀...Spotřeba energie při spouštění spalovacího motoru při rychlosti větší než 30 km/h
G...Stálý převod
r...Průměr pneumatik [m]
v...Rychlost vozidla [km/h]
g...Tíhové zrychlení [m/s^2]
C_x...Činitel odporu
C_r...Činitel valivého odporu
S_a...Čelní plocha vozidla [m^2]
ρ...Hustota vzduchu [kg/m^3]
F_g... Tíhová síla [N]
F_{vz}...Odpor vzduchu [N]
F_{br}...Brzdná síla[N]
F_v...Valivý odpor pneumatik [N]
F_t...Tažná síla [N]
a...Zrychlení vozidla [m/s^2]
d...Vzdálenost ujetá vozidlem [km]
SOC...(State of charge) - Úroveň nabití [%]
U₀...Napětí nezatížené baterie [V]
I_{bat}...Proud baterie [A]
R_i...Vnitřní odpor baterie [Ω]
C...Celková průměrná dpotřeba paliva [l/100km]
C₁...Palivo potřebné k dobití baterie z úplného vybití [l/100km]
C₂...Palivo potřebné k dobití baterie po jednom jízdním cyklu [l/100km]

D_e ...Celkový dojezd vozidla poháněného pouze elektřinou [km]
 D_p ...Průměrná vzdálenost ujetá při cyklu [km]
PSO...(Particle swarm optimization) - Optimalizace hejnem částic
DIRECT...(Dividing rectangles) - Dělení na obdélníky
SA...(Simulated annealing) - Simulované žíhání
EMS...(Energy management system) - Systém řízení energie
 T_{mot} ...Točivý výkon spalovacího motoru[Nm]
 T_v ...Požadovaný točivý moment[Nm]
 T_{el} ...Točivý moment elektromotoru[Nm]
 T_{elmax} ...Maximální točivý moment elektromotoru pro $v > v_1$ [Nm]
 T_{min} ...Minimální pracovní zatížení spalovacího motoru[Nm]
 T_{max} ...Maximální pracovní zatížení spalovacího motoru při dobíjení[Nm]
 SOC_{max} ...Maximální úroveň nabití baterie[%]
 SOC_{min} ...Minimální úroveň nabití baterie[%]
 v_1 ...Maximální rychlost čistě elektrického režimu [km/h]
 Q_{bat} ...Kapacita baterie [Ah]
 U_{bat} ...Napětí baterie [V]
 η_{nab} ...Účinnost nabíjení baterie [g/kWh]
 ρ_b ...Hustota paliva [Kg/L]
 w_m ...Váhové koeficienty jednotlivých jízdních cyklů
 p ...Počet jízdních cyklů
 v_i ...Rychlost částice
 x_i ...Poloha částice
 m ...Setrvačná hmotnost částice
 p_i ...Ideální poloha částice
 p_{gi} ...Ideální poloha skupiny částic

1 Úvod

Tato práce se zabývá tím, jaké jsou možnosti snížení spotřeby vozidel a problémy s tímto související. První část této práce je věnována elektrickým a mechanickým způsobům omezení spotřeby vozidla. Dále se zaměřuje na akumulátory energie jako primární nebo sekundární zdroje elektrické energie vozidel. Další část obsahuje popis uspořádání pohonného ústrojí hybridních a elektrických vozidel a výčet jejich výhod a nevýhod. Následně se zaměřuje na popis různých jízdních cyklů, důvody jejich zavedení a vylepšování. Dále v prostředí MATLAB/Simulink podrobuje model vybraného vozidla jednomu z jízdních cyklů v různých jízdních režimech. Nakonec navrhuje řídicí algoritmus jehož úkolem je snížení spotřeby paliva vozidla na minimum. V závěru budou zhodnoceny výsledky a přesnost simulací.

1.1 Energetické ztráty

Snaha o snižování emisí skleníkových plynů se nyní zaměřuje na snižování zbytečných energetických ztrát. Mezi největší ztráty patří maření kinetické energie. Protože možnosti pro snižování spotřeby mechanickými úpravami motoru se stále zmenšují, zaměřují se odborníci na periferie. Jednou z nejperspektivnějších úprav je inteligentní převod kinetické energie, v situacích kdy má poháněcí agregát přebytek výkonu, zejména při malém zatížení či brzdění motorem, na jiný druh energie. Nastává tzv. rekuperace, tedy přeměna části kinetické (pohybové) energie zpět na využitelnou energii. Některé systémy přeměňují mechanickou energii na elektrickou pomocí generátorů, jiné shromažďují kinetickou energii ve formě kinetické energie rotujících částí. Tato energie se ukládá do zásobníku (akumulátoru) a ve vhodný okamžik je možné ji vrátit zpět do pohonné soustavy vozidla. Tento proces je známý například z elektrických a hybridních vozidel, kde je však rekuperovaná energie využívána přímo k pohonu, což s sebou přináší nutnost rozsáhlých úprav. Přitom dnes již skoro každé moderní auto umí ulehčit motoru tím, že jej alternátor bude zatěžovat pouze v určitých okamžicích. Tento systém bývá velmi často doplněn systémem start-stop.

2 Elektrické systémy

Elektrický motor/generátor je základem systému, který umožňuje přeměnu kinetické energie na elektrickou, kterou lze ukládat v zásobnících a následněji využít v případě potřeby pro pohon vozidla. Dalším příkladem elektrického systému je řídicí jednotka prvku výbavy ovládající některý z hlavních spotřebičů energie.

2.1 Regenerativní brzdění

Pravděpodobně nejpoužívanějším způsobem rekuperace kinetické energie vzniklé při brzdění nebo zpomalování vozidla v dopravních prostředcích je systém převodu na elektrickou energii a její ukládání do zásobníků, nejčastěji akumulátorů nebo superkapacitorů. Vozy vybavené regenerativním brzděním jsou kromě spalovacího motoru, vybaveny i elektromotorem, který zároveň slouží jako velmi výkonný generátor. Inteligentní řídicí jednotka ve voze rozhoduje o režimu práce motor/generátor. Když chce řidič začít brzdít, tak při sešlápnutí brzdového pedálu nezačnou brzdít klasické třecí brzdy, ale je aktivováno brzdění rekuperací tedy generátorový režim, elektromotor přejde do záporné momentové charakteristiky a začne převádět kinetickou energii na elektrickou, která se ukládala dříve do akumulátorů, dnes čím dále častěji do superkapacitorů. Energie potřebná ke generování elektrického proudu v konečném důsledku zpomaluje vozidlo. Hybridní a elektrická vozidla jsou vybavena i klasickými třecími brzdami, které fungují jako záložní systém pro případ, že regenerativní brzdění nepostačuje k zastavení vozidla. Elektronické systémy a palubní počítač vozu určují, kdy použít běžný systém třecích brzd nebo jestli aktivovat reverzní chod elektromotoru. Regenerativní brzdění je řízeno řídicí jednotkou brzd. Řídicí jednotky jsou elektronická zařízení, která prostřednictvím dálkového ovládání určují, kdy začne a skončí brzdění, stejně jako síla brzdění. Podobně jako řídicí jednotka ABS, která monitoruje vzájemnou rychlost otáčení kol, dokáže řídicí jednotka brzd vypočítat, jak velký moment je k dispozici pro výrobu elektrické energie, a zároveň monitorovat rychlost kol. Následně se při rozjezdu nebo akceleraci vozu využívá elektrická energie uložená v akumulátorech pro napájení elektromotoru, ten vytváří točivý moment a společně s momentem spalovacího motoru se přenáší přes převodovku na hnací nápravu vozu. Celý proces je řízen řídicí jednotkou. Výsledkem je, že vznikne hybridní spojení elektromotoru se spalovacím motorem. Oba motory se doplňují co do účinnosti, takže pro dosažení stejné dynamiky je potřeba méně paliva. Regenerativní brzdy fungují nejlépe při určitých rychlostech, především při jízdě s častým zastavováním a rozjížděním. Ztráta energie kvůli teplu vznikajícímu při tření je kolem 80%. Regenerativní brzdění

dokáže rekuperovat polovinu této ztracené energie a snížit spotřebu paliva o 10 až 25%. [10]

2.2 Prediktivní navigace

S pomocí prediktivní navigace můžeme díky úmyslné jízdě setrvačností ušetřit až 15 % paliva. Prediktivní navigace spojuje data z mapy s pohonem vozidla. Systém řízení motoru používá náhled trasy a do svých výpočtů zahrne skutečné průměrné rychlosti na silnicích, světelné křižovatky, kruhové objezdy a denní dobu z podobných jízd. Tyto výpočty použije pro prediktivní řízení spalovacího motoru nebo elektromotoru. Například když navigační software vidí, že následující dvoukilometrový sestupný úsek vede k zastavěné oblasti, dokáže vozidlu přikázat, aby vstoupil do režimu úsporné jízdy setrvačností nebo vyrobil více energie pro elektrický pohon. [3]

2.3 Adaptivní tempomat

Použitím adaptivního tempomatu (ACC) dokážeme snížit spotřebu energií díky jízdě konstantní rychlostí až o 5 %. Systém udržuje danou rychlost s ohledem na vozidla před ním a udržuje od nich bezpečnou vzdálenost. Tu lze navíc nastavovat v několika stupních. Radarové senzory sledují provoz a podle toho dokáže samočinně přizpůsobit rychlost vozidla. ACC je k dispozici i jako nadstandardní doplněk pro mnohá kompaktní vozidla. Úspora je díky udržování konstantní rychlosti a zajištění, že motor vždy pracuje v nejefektivnější rychlosti. Uvedené potenciální úspory paliva se vždy týkají popisovaného systému. [3]

3 Mechanické systémy

Setrvačnický je u mechanických systémů přímo zásobníkem kinetické energie, využívá se jeho momentu setrvačnosti. Při brzdění se setrvačnický roztáčí a při akceleraci se naopak jeho energie odebírá pro pohon. Setrvačnický může v systému pracovat čistě mechanicky nebo ve spojení s elektromotorem.

3.1 Setrvačnický

Setrvačnický je v principu účinným a praktickým zařízením na krátkodobé uložení kinetické energie. Tento způsob je známý již několik tisíc let. Jako příklad bychom mohli uvést hrnčířský kruh. Ve století páry pomáhal akumulovanou kinetickou energií překonávat mrtvé body klikového mechanismu parních strojů a v současné době je setrvačnický nedílnou součástí každého spalovacího motoru, kde vyrovnává nerovnoměrný chod. Tato velmi stará myšlenka uložení energie do rotující hmoty se stává v posledních letech znovu aktuální, zejména v souvislosti s plánovaným rostoucím podílem hybridních a elektrických vozidel na automobilovém trhu. Princip uložení energie v setrvačnicku je velmi jednoduchý. Setrvačnický je v tomto systému přímo zásobníkem kinetické energie, která se přímo použije k rozjezdu nebo akceleraci vozidla. Množství uložené energie je přímo úměrné hmotnosti a kvadraticky úhlové rychlosti rotující hmoty okolo osy procházející těžištěm. Princip systému je relativně jednoduchý přes převodovku s plynule proměnným převodem (CVT) je setrvačnický napojen na hnací hřídel. V okamžiku, kdy začne vůz brzdit, setrvačnický se začne roztáčet a vůz bude brzdit. V ideálním případě budou otáčky setrvačnicku dosahovat rychlostí až 60000 otáček za minutu. Při rozjezdu nebo akceleraci setrvačnický zpětně předává energii zpět přes převodovku na hnací nápravu. V minulosti byl v praxi využit setrvačnický např. ve Švýcarsku, Belgii, Kongu, Švédsku nebo Číně ke stavbě gyrobusů. Na každé zastávce se připojil sběrač gyrobusu k napájecímu stožáru a proud ze sítě během výměny dopravovaných osob urychlil setrvačnický tak, že akumuloval dostatečné množství energie. Ta vystačila gyrobusu se staženým sběračem k ujetí několika kilometrů k další zastávce s nabíječkou. Těžké setrvačnický musely být z důvodů působení jejich gyroskopického momentu umístěny tak, aby osa jejich rotace byla svislá a jízdní vlastnosti tím byly ovlivněny minimálně[4]. Gyrobus nalezneme na obr. číslo 1.



Obr. č. 1 Vnitřek gyrobusu[4]

4 Akumulátory energie

Elektrochemické akumulátory jsou zařízení pro ukládání elektrické energie.

Akumulátor je článek, do které ho je nejprve potřeba energii uložit a následně je možné používat ho jako zdroj. U elektrochemických akumulátorů nás kromě měrné energie a měrného výkonu dále zajímají tyto vlastnosti:

- nabíjecí doba
- vybíjecí doba
- počet cyklů
- účinnost

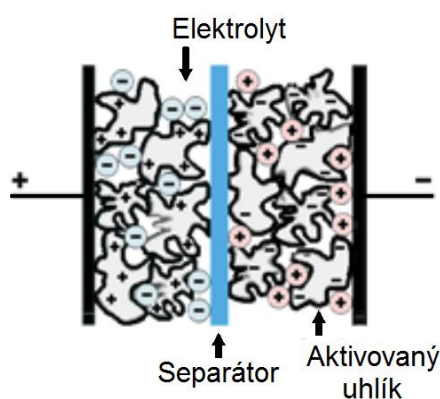
4.1 Olověné akumulátory

Olověný akumulátor, který byl objeven francouzským fyzikem Gastonem Planté v roce 1859, byl prvním nabíjecím akumulátorem pro komerční využití. Navzdory své dlouhé historii jsou chemické sloučeniny na bázi olova i dnes hojně používány. Najdeme hned několik důvodů pro jejich oblíbenost. Olověné akumulátory jsou spolehlivé a poměrně levné z hlediska ceny vztažené na množství uložené energie. Existuje jen několik dalších baterií, které dodají velké množství energie tak levně jako olověné akumulátory, které jsou proto cenově efektivní pro automobily, golfová vozítka, vysokozdvizné vozíky, lodě a záložní zdroje. Jejich hlavní výhody jsou nízká cena, snadná výroba, pomalé samovybití, vysoké vybíjecí proudy, dobré vlastnosti při nízkých i vysokých teplotách. Naopak nevýhodami jsou špatný poměr energie ke hmotnosti, dlouhá doba nabíjení, omezená životnost, a hlavně jsou nešetrné vůči životnímu prostředí.[5]

4.2 Ultrakapacitory

Termín ultrakapacitor nebo superkondenzátor se používá k popisu jakéhokoli elektrického dvouvrstvého kondenzátoru se specifickou energií a výkonem mezi bateriemi a kondenzátory. Obecně je energetická kapacita kondenzátoru závislá na množství uložených nábojů a na potenciálu mezi jeho deskami. Kvalita dielektrika, skrz kterou může být elektrické pole udržováno, má velký dopad na náboj. V ultrakapacitoru však může být termín dielektrikum nahrazen výrazem elektrolyt (elektricky aktivní chemická látka), protože ultrakapacitor je v tomto bodě spíše jako baterie než konvenční kondenzátor. Elektrolyt odděluje desky, které jsou ve skutečnosti dvě vrstvy stejného substrátu. Nabité desky polarizují elektrolyt, což způsobuje, že pozitivní ionty se pohybují jedním směrem a negativní ionty druhým a způsobují tvorbu druhé sady nábojů. Proto tzv. elektrická

dvojitá vrstva poskytuje velkou plochu pro ukládání nábojů. Použití materiálu s velkou povrchovou plochou, jako je porézní práškový aktivovaný uhlík místo konvenční izolační bariéry má za následek velmi vysoký nábojový potenciál nebo kapacitu. Na rozdíl od baterií se však v ultrakapacitoru nevyskytují žádné chemické reakce a kladné a záporné náboje jsou vytvářeny výhradně statickou elektřinou. Struktura ultrakapacitoru je znázorněna na obr. č. 2. Ve srovnání s tradičními kondenzátory je ultrakapacitor schopen se nabíjet a ukládat energii v exponenciálně vyšší hustotě. Teoreticky by kapacita jednoho faradu mohla být poskytnuta několika miligramy materiálu s plochou asi 1 cm² pro ultrakapacitor. Dosud komerční ultrakapacitory mají kapacitu až 5 000 F. Specifická energie ultrakondenzátorů se pohybuje od 1 do 30 Wh / kg.



Obr. č. 2 Ultrakapacitor

Ultrakapacitory mají navíc mnohem vyšší měrný výkon (až 6000 W / kg) než baterie. Jinými slovy, ultrakapacitory mohou uvolňovat energii rychleji. Důvodem je, že baterie pracují na základě pohybu nosičů náboje v kapalném elektrolytu, zatímco rychlost vybíjení a nabíjení ultrakapacitorů je obvykle omezena zahříváním elektrod. Obecně má ultrakapacitor, který má specifickou energii 1/10 konvenční baterie, měrný výkon desetkrát až stokrát větší. Výsledkem je, že ultrakapacitory jsou zvláště vhodné pro rychlé nabíjení a uvolňování velkého množství energie, zatímco baterie dokážou lépe uchovávat větší množství energie po dlouhou dobu.

Použití ultrakapacitorů jako zařízení pro ukládání energie pro kompletní řešení energetických požadavků elektrického vozidla se nyní nezdá být realistické vzhledem k jejich neuspokojivým charakteristikám hustoty energie. Jejich vysoká hustota výkonu je však činí výhodnými jako zařízení pro vyrovnávání zatížení pro elektrické vozidlo napájené z baterií nebo hybridní elektrické vozidlo. Navíc jsou ultrakapacitory velmi

vhodné pro aplikace vyžadující regenerativní brzdový výkon, protože je lze velmi rychle dobít. Cena ultrakondenzátorů rychle klesla pod 10000 \$/kWh a očekává se další pokles. V budoucnu tedy budou realistické rozsáhlé aplikace ultrakondenzátorů.[6]

4.3 Li-ion

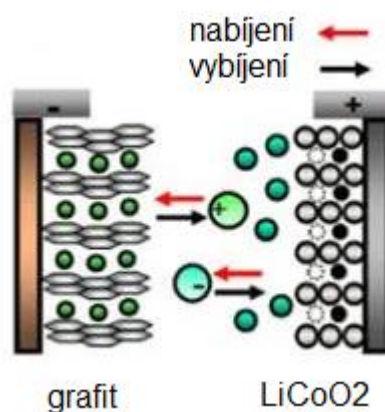
Li-ion akumulátor je běžně používaný ve spotřební elektronice. Díky vysoké hustotě energie vzhledem k objemu se výborně hodí pro přenosná zařízení. V současnosti je to v této oblasti asi nejpoužívanější typ. Jmenovité napětí Li-ion článku dané normami je 3,6V. Skutečné výstupní napětí závisí na typu článku, stupni nabití a dalších faktorech, může se pohybovat např. mezi 4,2 a 3-2,5 V. Klesající napětí může indikovat do jisté míry úroveň vybití akumulátoru. Překročení mezního nabíjecího i vybíjecího napětí může akumulátor nevratně poškodit či zničit. Vysoká kapacita v poměru k objemu a hmotnosti, téměř žádné samovybití a životnost dosahuje 500-5000 cyklů. Nevýhodou naopak je, že akumulátory Li-ion jsou citlivé na nízké teploty pod bodem mrazu nebo vysoké teploty, při těchto teplotách akumulátor stárne a ztrácí svoji kapacitu. Ideální teplota pro provoz je 15-45°C.

Lithium-iontové baterie jsou pojmenovány podle svých aktivních materiálů. Názvy jsou buď psány v plném rozsahu nebo zkrácena svými chemickými značkami. Řada písmen a čísel, která jsou spojena dohromady, může být obtížně zapamatovatelná a ještě těžší jí vyslovit, proto je chemické složení baterií také označeno písmennou zkratkou.

Oxid kobalnatý lithný (LiCoO) - LCO

Například oxid kobalnatý lithný, jeden z nejběžnějších Li-iontových článků, má chemické značku LiCoO₂ a zkratku LCO. Z důvodu jednoduchosti lze pro tuto baterii použít také krátký Li-kobalt. Kobalt je hlavní aktivní materiál, který dává této baterii charakter. Jiné Li-iontové články mají podobné zkratky.[7]

Díky jeho vysoké měrné energii je Li-kobalt nejčastěji použit pro mobilní telefony, notebooky a digitální fotoaparáty. Baterie se skládá z katody oxidu kobaltu a grafitové anody. Katoda má vrstvenou strukturu a během vybíjení se lithiové ionty pohybují z anody na katodu. Směr pohybu se při nabíjení mění. Nevýhodou Li-kobaltu je relativně krátká životnost, nízká tepelná stabilita a omezené možnosti zatížení (měrný výkon). Obrázek 3 ilustruje strukturu. [7]



Obrázek 3: Struktura Li-kobaltové baterie

Stejně jako jiné lithium-iontové články má Li-kobalt grafitovou anodu, která omezuje počet cyklů změnou rozhraní pevného elektrolytu, zhuštěním anody a lithia při rychlém nabíjení a nabíjení při nízké teplotě. Novější baterie obsahují nikl, mangan nebo hliník pro zlepšení životnosti, možnosti zatížení a nákladů. Specifická energie těchto baterií je 150–250 Wh/kg. [7]

Li-kobalt by neměl být nabíjen a vybíjen při proudu vyšším, než je jeho C-hodnota. To znamená, že článek s 2400 mAh lze nabíjet a vybíjet pouze při 2400 mA. Vynucení rychlejšího nabíjení nebo vybíjení vyššího než 2400 mA způsobuje přehřívání a nadměrné namáhání. Pro optimálně rychlé nabíjení výrobce doporučuje rychlost 0,8 C což je přibližně 2000 mA. Povinný ochranný obvod baterie omezuje rychlost nabíjení a vybíjení na bezpečnou úroveň přibližně 1C pro článek. [7]

Oxid manganatý lithný (LiMn₂O₄) - LMO

Li-iontový článek s manganovým spinelem byl poprvé publikován ve Věstníku pro výzkum materiálů v roce 1983. V roce 1996 společnost Moli Energy komercializovala Li-iontovou baterii s oxidem manganatým lithným jako katodovým materiálem. Architektura vytváří trojrozměrnou strukturu spinelu, která zlepšuje tok iontů na elektrodě, což má za následek nižší vnitřní odpor a zlepšené rozložení proudu. Další výhodou spinelu je vysoká tepelná stabilita a zvýšená bezpečnost, bohužel počet cyklů a životnost je omezená. [7]

Nízký vnitřní odpor článků umožňuje rychlé nabíjení a vybíjení vysokým proudem. Při proudech 8-10 C dochází pouze k mírnému nárůstu teploty. Je také možné aplikovat jednosekundové zátěžové impulzy až do 30 C. Trvalé vysoké zatížení při tomto proudu by způsobilo hromadění tepla ale teplota článku nesmí přesáhnout 80 °C. Li-manganové články se používají pro elektrické nářadí, lékařské nástroje a také pro hybridní a elektrická vozidla.[7]

LMO článek má kapacitu, která je zhruba o třetinu nižší než Li-kobalt. Flexibilita konstrukce umožňuje technikům navrhnout baterii pro optimální životnost, maximální proud zátěže (specifický výkon) nebo vysokou kapacitu (specifická energie). Například verze s dlouhou životností má kapacitu pouze 1100 mAh; vysokokapacitní verze má 1500 mAh.[7]

Většina Li-manganových baterií se mísí s lithium-nikl-mangano-oxidem kobaltu (NMC), aby se zvýšila kapacita a prodloužila životnost. Tato kombinace přináší to nejlepší v každém systému a LMO-NMC je volena pro většinu elektrických vozidel, jako jsou Nissan Leaf, Chevy Volt a BMW i3. LMO část baterie, která může být asi 30 procent, poskytuje vysoký proud při akceleraci a část NMC poskytuje dlouhý dojezd.[7]

Výzkum Li-iontových baterií směřuje ke kombinaci LMO článků s kobaltem, niklem a hliníkem jako aktivním katodovým materiálem. V některých architekturách je do anody přidáno malé množství křemíku. To poskytuje zvýšení kapacity až o 25 %. Zisk je však obvykle spojen s kratší životností, protože se křemík zvětšuje a zmenšuje v závislosti na nabití, což způsobuje mechanické namáhání. Tyto tři aktivní kovy, jakož i vylepšení s křemíkem mohou být vhodně nakombinovány pro zvýšení specifické energie (kapacity), měrného výkonu (maximální proud) nebo životnosti. Zatímco běžné baterie mají vysokou kapacitu, průmyslové aplikace vyžadují systémy baterií, které mají dobré možnosti zatížení, poskytují dlouhou životnost, bezpečnost a spolehlivost.[7]

Oxid kobaltnatý lithno-mangano-nikelnatý (LiNiMnCoO₂) - NMC

Jedním z nejúspěšnějších Li-ionových systémů je katodová kombinace niklu, manganu a kobaltu (NMC). Podobně jako LMO články mohou být tyto systémy přizpůsobeny pro specifickou energii nebo výkon. Například NMC v článku 18650 pro podmínky mírného zatížení má kapacitu asi 2800 mAh a může dodávat 4A až 5A.

NMC ve stejném článku optimalizovaném pro specifický výkon má kapacitu pouze asi 2000 mAh, ale dodává nepřetržitý vybíjecí proud 20 A. Anoda na bázi křemíku zvýší kapacitu na 4000 mAh a vyšší, ale se sníží schopnost dodávat vysoký proud a zkrátí živost. Křemík přidaný do grafitu má tu nevýhodu, že se anoda zvětšuje a zmenšuje v závislosti na nabití, což způsobuje mechanickou nestabilitu. [7]

Tajemství NMC spočívá v kombinaci niklu a manganu. Nikl je známý svou vysokou měrnou energií, ale špatnou stabilitou. Mangan má výhodu v tom, že vytváří strukturu spinelu k dosažení nízkého vnitřního odporu, ale nabízí nízkou specifickou energii. Kombinace kovů odstraňuje nevýhody jednotlivých kovů. NMC je volena na baterie pro elektrické nářadí, elektrická kola a další. Kombinace katody je obvykle jedna třetina niklu, jedna třetina manganu a jedna třetina kobaltu. To nabízí jedinečnou směs, která také snižuje náklady na suroviny díky sníženému obsahu kobaltu. Další úspěšnou kombinací je NCM s 5 díly niklu, 3 díly kobaltu a 2 díly manganu. Jsou možné i jiné kombinace používající různá množství katodových materiálů. Tři aktivní materiály niklu, manganu a kobaltu lze snadno smíchat, aby vyhovovaly široké škále aplikací pro automobilové systémy a systémy skladování energie, které vyžadují časté cyklování. Výrobci baterií se kvůli vysokým nákladům na kobalt opouštějí systémy s kobaltovými katodami a nahrazují ho niklem. Systémy na bázi niklu mají vyšší energetickou hustotu, nižší náklady a delší životnost než články na bázi kobaltu, ale mají mírně nižší napětí. [7]

4.4 Li-pol

Termín polymer se běžně používá k popisu určitého typu lithiové baterie, která může nebo nemusí být na bázi polymeru. Zatímco slovo „polymer“ je vnímáno jako plast, polymery sahají od syntetických plastů po přírodní biopolymery a proteiny, které tvoří základní biologické struktury. [9]

Lithium-polymer se liší od ostatních bateriových systémů v typu použitého elektrolytu. Původní konstrukce polymeru ze 70. let minulého století používala pevný, suchý polymerní elektrolyt, který připomíná plastový film. Tento izolátor umožňuje výměnu iontů (elektricky nabitě atomy) a nahrazuje tradiční porézní separátor, který je nasáklý elektrolytem. Pevný polymer má špatnou vodivost při pokojové teplotě a baterie tak musí být zahřívána na 60 °C a více, aby byl umožněn tok proudu. Tolik očekávaný trik skutečné plastové baterie slibovaný na počátku roku 2000 se nenaplnil, protože nebylo dosaženo dobré vodivosti při teplotě okolí. [9]

Aby byla moderní Li-polymerová baterie vodivá při pokojové teplotě, byl přidán gelový elektrolyt. Většina Li-polymerních článků dnes obsahuje mikroporézní separátor s trochou vlhkosti. Li-polymer může být postaven na mnoha systémech, jako je Li-kobalt, NMC, Li-fosfát a Li-mangan. Většina Li-polymerových článků je na bázi kobaltu, a může být také přidán další aktivní materiál. Pokud jde o uživatele, Li-polymer je v podstatě stejný jako Li-ion. Oba systémy používají stejný katodový a anodový materiál a obsahují podobné množství elektrolytu. Li-polymer je jedinečný v tom, že tradiční porézní separátor nahrazuje mikroporézní elektrolyt. Li-polymer nabízí mírně vyšší měrnou energii a může být vyroben tenčí než běžný Li-ion, ale výrobní náklady jsou vyšší než ve válcovém provedení. [9]

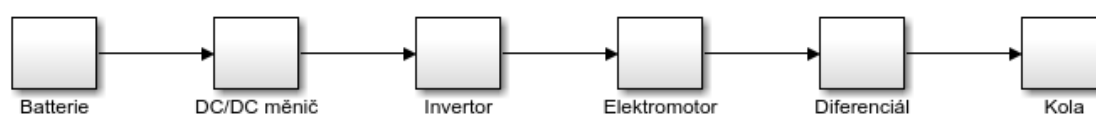
Zatímco standardní Li-ion potřebuje tuhé pouzdro pro stlačení elektrod dohromady, Li-polymer používá vrstvené desky, které nevyžadují kompresi. Fóliový kryt snižuje hmotnost o více než 20 procent oproti klasickému tvrdému plášti. Tenká foliová technologie umožňuje různý design, protože baterie může být vyrobena do jakéhokoli tvaru a úhledně se vejde do stylových mobilních telefonů a tabletů. Li-polymer může být také velmi tenký, aby se podobal kreditní kartě. Díky nízké hmotnosti a vysokému měrnému výkonu je Li-polymer preferovanou volbou pro modeláře. [9]

Vlastnosti nabíjení a vybíjení Li-polymeru jsou identické s jinými Li-iontovými systémy a nevyžadují vyhrazenou nabíječku. Problémy s bezpečností jsou také podobné v tom, že jsou zapotřebí ochranné obvody. Nahromadění plynu během nabíjení může způsobit nafouknutí některých článků a výrobci zařízení musí umožnit zvětšení. Li-polymer ve fóliovém balení je méně odolný než Li-ion ve válcovém provedení. [9]

5 Uspořádání pohonných jednotek elektrických a hybridních vozidel

5.1 Elektrická vozidla

Na rozdíl od konvenčního vozidla poháněného spalovacím motorem je elektrické vozidlo (EV) poháněno elektrinou, která je uložena v systému skladování energie (ESS), jako jsou baterie, ultrakapacitory nebo setrvačníky. Elektrická vozidla jsou také označována jako čistá EV nebo bateriová EV (BEV) v případě, že hlavním úložištěm energie je baterie. Uspořádání BEV je znázorněno na obr. č. 4.[1]



Obr. č. 4 Pohonné ústrojí EV

Pohoné ústrojí elektrického vozidla napájeného z baterie se skládá z baterie pro ukládání energie, elektrického motoru a střídače. Baterie se nabíjí prostřednictvím nabíječky. Střídač udává směr a množství toku energie z/do elektromotoru tak, aby bylo možné řídit rychlost vozidla a směr pohybu.[1]

Je třeba poznamenat, že během procesu brzdění je baterie dobíjena regenerativní energií. DC-DC měnič se používá pro přizpůsobení napětí baterie a napětí na sběrnici DC střídače a může být volitelné. Zde uvedený mechanický převod je obecný pojem pro redukci převodových stupňů a rychlosti. Na rozdíl od konvenčních vozidel, EV a jiná vyspělá vozidla nepotřebují automatickou převodovku.[1]

Omezený dojezd BEV (bez dobíjení) podnítil výzkum a vývoj elektrických vozidel s palivovými články. Elektrická vozidla poháněná palivovými články (FCEV) mají téměř stejnou konfiguraci jako BEV, s výjimkou zdroje energie. Vodíkové palivo je potřebné a uskladněné přímo ve vozidle a FCEV je dlouhodobě skutečným vozidlem s nulovými emisemi. Honda FCX-V1 byla první FCEV, které bylo certifikováno pro použití v USA. Trakční motory používané v elektrických vozidlech se obvykle dělí na stejnosměrné motory, asynchronní motory nebo motory s permanentními magnety. Nevýhody stejnosměrných motorů přiměly vývojáře EV, aby obrátili svou pozornost na střídavé motory. Bezúdržbové a levné asynchronní motory přilákaly mnoho vývojářů EV. Mezitím

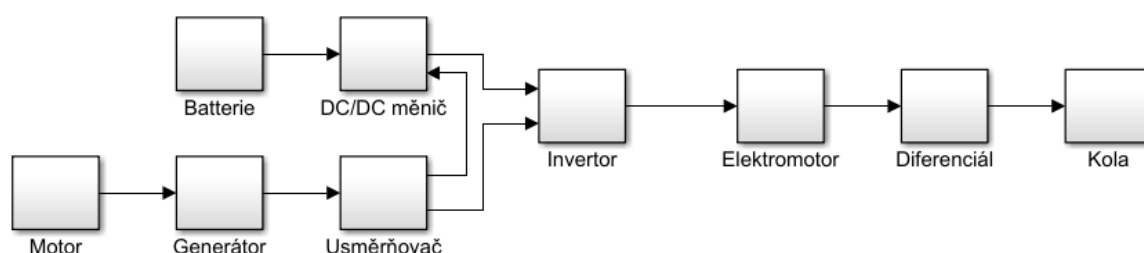
však existují problémy s velikostí a hmotností pro vysokorychlostní provoz. Vysoká hustota výkonu nabízí hlavní výhodu u motorů s permanentními magnety, což je atraktivní pro pohonné řešení EV i přes vysoké náklady na motory.[1]

5.2 Hybridní vozidla

V hybridním elektrickém vozidle (HEV) existují dva nebo více zdrojů energie. V nejběžnějších typech hybridních elektrických vozidel je obvykle spalovací motor kombinován s baterií a elektrickým motorem. Hybridní elektrická vozidla lze rozdělit do čtyř různých typů podle uspořádání součástí hnacího ústrojí: sériový, paralelní, sériově-paralelní a komplexní hybrid.

5.2.1 Sériový hybrid

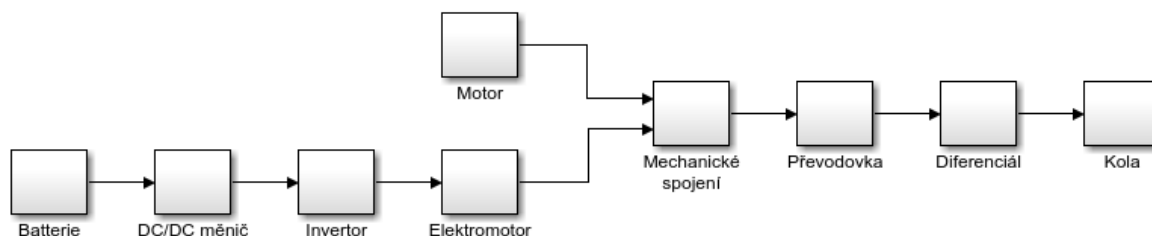
Uspořádání sériového HEV, jak je znázorněno na *obr. č.5*, je jednodušší než konfigurace paralelního HEV. Veškerý pohonný výkon poskytuje pouze elektrický motor. Spalovací motor ve vozidle pohání generátor, který může nabíjet baterii, když stav nabití (SOC) baterie klesne pod určitou úroveň. Kromě spalovacího motoru a generátoru je pohonný systém stejný jako u EV. Řada HEV má výhody, včetně flexibility umístění sestavy motor-generátor a jednoduchosti hnacího ústrojí, ale mezitím kvůli své vnitřní struktuře potřebuje řada HEV více pohonných komponent (tj. spalovací motor, generátor a elektromotor). Skutečnost, že neexistuje žádné mechanické spojení mezi spalovacím motorem a mechanickou převodovkou, umožňuje motoru běžet v jeho nejefektivnější oblasti úpravou jeho otáček a točivého momentu. Elektromotor musí být navržen pro maximální výkon požadovaný vozidlem. U jízdy na velké vzdálenosti musí být pohonné komponenty dimenzovány, aby se dosáhlo maximálního výkonu.[1]



Obr. č. 5 Pohonné ústrojí sériového HEV

5.2.2 paralelní hybrid

V paralelním HEV jsou elektrický motor a spalovací motor spojeny s převodovkou prostřednictvím mechanického spojovacího zařízení, jako jsou oddělené spojky, takže vozidlo může být poháněno buď spalovacím motorem, nebo elektromotorem, nebo oběma. Požadavky na výkon elektromotoru v paralelním HEV jsou nižší než u EV s podobnou velikostí.[1] Uspořádání paralelního HEV je znázorněna na Obr. č. 6.



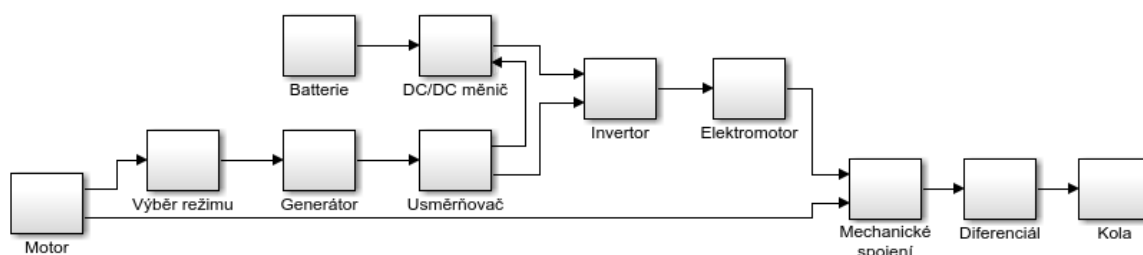
Obr. č. 6 Uspořádání pohonného ústrojí paralelního HEV

Paralelní HEV má následující výhody. Zprvč paralelní HEV potřebuje pouze dvě pohonné komponenty, spalovací a elektrický motor. Elektromotor může být provozován jako generátor a naopak. Za druhé, spalovací motor a elektromotor mohou být nastaveny na sníženou hladinu výkonu pro krátké cesty. U jízdy na velké vzdálenosti musí být spalovací motor navržen pro maximální výkon, zatímco elektromotor může být stále dimenzován na polovinu maximálního výkonu. Mechanická struktura a řízení hnacího ústrojí jsou však složité z důvodu nutnosti silové vazby pro spalovací motor a elektromotor. Právě tato složitost dává nastavení hnací soustavy větší volnost při optimalizaci spotřeby paliva a výkonu vozidla. Mechanické spojení je realizováno pomocí řemenic, ozubených kol, spojky nebo společného hřídele pro spalovací motor a elektromotor. Mechanické propojení mezi elektromotorem a spalovacím motorem může být konfigurováno pro sdílení společného přenosu nebo použití samostatných převodů nebo dokonce oddělených náprav. Mechanická převodovka již není omezoována tradičními automatickými převodovkami. Například, planetové soukolí bylo zavedeno do paralelních hybridů místo tradičního CVT. Flexibilita konfigurací v paralelním HEV nabízí výhodu pro optimalizaci úspory paliva v hybridních elektrických vozidlech.[1]

5.2.3 sério-paralelní hybrid

Vzhledem k výhodám sériových i paralelních konfigurací výrobci vyvinuli sériově-paralelní hybridní elektrická vozidla. Tyto HEV mohou pracovat buď pomocí samotného elektrického motoru nebo s pomocí spalovacího. Konfigurace sériově-paralelního HEV je znázorněna na obr. č. 7. V této konfiguraci je výkon

spalovacího a elektrického motoru spojen pro řízení vozidla v paralelním provozu. Zatímco tok energie ze spalovacího motoru do generátoru a poté do elektromotoru lze považovat za sériové uspořádání. Zařízení výběr režimu lze navrhnout mnoha způsoby. Nejjednodušší z nich jsou spojky pro výběr, který hřídel je připojen ke spalovacímu motoru. Pro připojení buď pohonu nebo elektrického generátoru. Další možností je mít zařízení pro dělení výkonu, jako jsou planetová soukolí, které dělí energii spalovacího motoru na hnací hřídel a elektrický generátor.[1]



Obr. č. 7 Pohonné ústrojí sériově-paralelního HEV

Baterii lze nabíjet pomocí napájení generátoru. Elektromotor může také pohánět přední kola paralelně se spalovacím motorem. Výběr řídicího režimu zajišťuje řídicí jednotka. Jsou-li potřeba krátké dávky energie, poskytuje spalovací a elektrický motor společně potřebnou energii podle požadavku vozidla. Toyota Prius, na obr. č 8, je typický sériově-paralelní HEV. V modelu Toyota Prius je baterie nabíjena při delší době čekání, jako jsou semaforey nebo dopravní zácpy. Podle zprávy Agentury pro ochranu životního prostředí USA byl Prius v roce 2008 nejúspěšnějším vozem prodávaným v USA.[1]

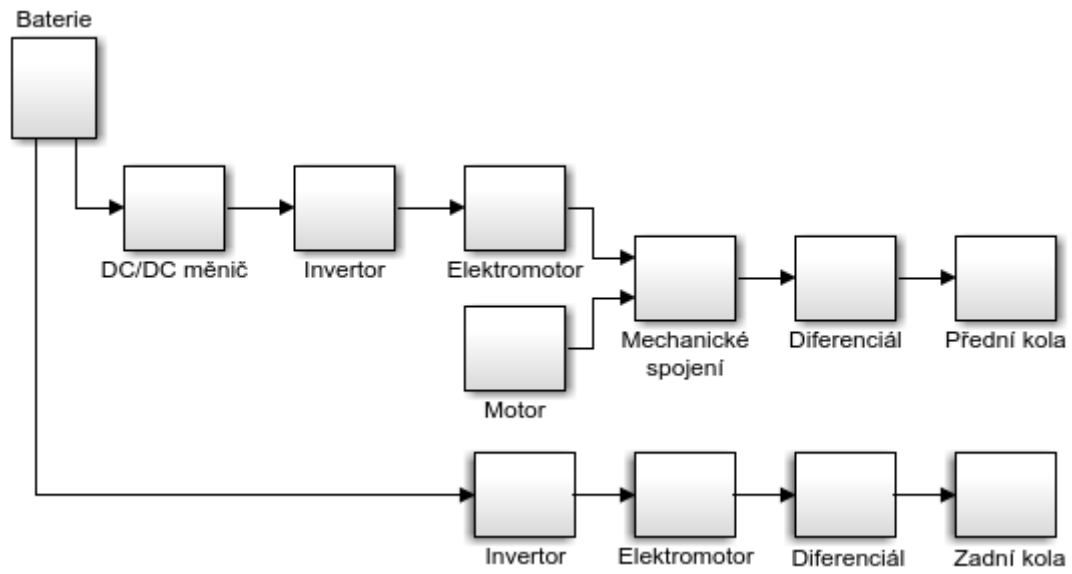


Obr. č. 8 Toyota Prius I

5.2.4 Komplexní hybrid

Existují jiné konfigurace HEV, které nelze klasifikovat do výše uvedených tří typů. Příklad je znázorněn na *obr.č. 9*, který má schopnost pohonu všech čtyř kol s více elektrickými stroji a spalovacím motorem. Je velmi podobný sériově-paralelnímu hybridnímu systému. Hlavní rozdíl je v tom, že elektrický motor připojený k zařízení pro rozdělení či kombinování výkonu v komplexním HEV umožňuje obousměrný tok energie, zatímco generátor v sériově paralelním hybridu umožňuje pouze jednosměrný tok energie.

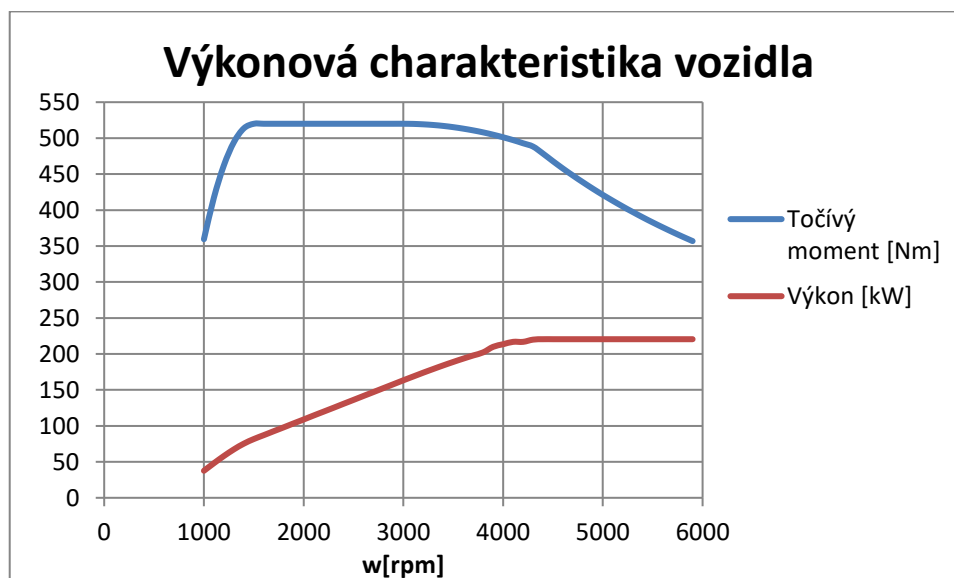
Tento obousměrný tok energie má za následek tři provozní režimy hnacího výkonu, které jsou v sériově paralelním hybridu nemožné. Další rozdíl spočívá v tom, že obvykle je sériově-paralelní HEV poháněn spalovacím anebo elektrickým motorem připojeným na přední nápravu. V komplexním hybridním vozidle jsou však přední a zadní náprava odděleně poháněny hybridním pohonem a elektromotorem. V normálním provozním režimu je energie z spalovacího motoru rozdělena, aby poháněla přední nápravu a poháněla elektromotor jako generátor pro nabíjení baterie. Když je požadavek na zatížení nízký, baterie dodává energii do předního elektromotoru pro pohon přední nápravy a není nutné používat jak spalovací motor, tak zadní elektrický pohon. Pokud vozidlo běží při velkém zatížení (např. Zrychlení), poskytuje spalovací motor i přední elektrický motor sílu k pohonu přední nápravy a mezitím zadní elektrický motor pohání zadní kola. Elektromotory vpředu i vzadu se stávají generátory pro nabíjení baterie v regenerativním režimu (brzdění nebo zastavení). Jiný hybridní systém se dvěma nápravami se liší od předchozího jen z hlediska výměny funkcí mezi předními a zadními koly. Existují také jiné variace, např. Toyota Highlander, který využívá tři elektrické motory a spalovací motor pro minimalizaci spotřeby paliva vozidla a zlepšení jízdních vlastností vozidla. Komplexní hybrid bohužel trpí vysokou složitostí a náklady, které jsou podobné sériově-paralelnímu hybridu.[1]



Obr.č. 9 Konfigurace komplexního HEV

6 Simulace vybraného vozidla

Uvedení nového modelu značky DS byl hlavní faktor výběru vozidla. Jedná se o model DS7 Crossback E-Tense 4x4. Jde o rodinné SUV a plug-in HEV. To znamená kombinaci elektromobilu a auta na benzinový pohon. V tomto případě specifickou tím, že DS7 Crossback E-Tense 4x4 může mít v útrokách dokonce tři motory, benzinový čtyř válec o objemu 1598 ccm s turbodmychadlem a dvěma elektromotory, kdy každý pohání jednu nápravu. Celkový nejvyšší výkon hybridní soustavy dosahuje 220 kW. Graf výkonu vozidla je zobrazen na Obr. č. 10 Pohon všech kol u DS7 Crossback E-Tense 4x4 funguje pouze do 135 km/h. Při této rychlosti se totiž odpojuje elektromotor pohánějící zadní nápravu. DS7 Crossback se vyrábí i jako plug-in hybrid s pohonem pouze přední nápravy. [9]



Obr. č. 10 Výkon vozidla

Zároveň jde o maximální rychlost, pokud chce řidič provozovat automobil výhradně na elektrický pohon. V tomto módu je celkový výkon omezen na 90 kW. Podle přísnější normy měření paliva WLTP se dá na nabitou baterii ujet čistě na elektřinu 58 km, podle dříve používané NEDC 68 km. Další parametry vozidla jsou v tabulce 1.[9]

Tab. 1 Vlastnosti vozidla

Parametr	Hodnota
Max. rychlost(omezovač)	252(240) km/h
Váha vozidla	1825 kg
Spotřeba paliva (NEDC)	1,3-1,7 l / 100 km
Vypouštěné emise CO ₂	34 g/km
Kapacita baterie	13,2 kWh
Napětí baterie	400 V
Zrychlení 0-100 km/h	5,1 s
Valivý odpor pneumatik	0,01
Průměr pneumatik	0,59 m
Koeficient odporu vzduchu	0,3
Čelní plocha	2,54 m ²

6.1 MATLAB/Simulink

MATLAB od Mathworks je vysoce výkonný jazyk pro technické výpočty a programování. Simulink, vyvinutý společností Mathworks, je komerční nástroj pro modelování, simulaci a analýzu vícedoménových fyzikálních systémů. Obsahuje grafické uživatelské rozhraní a přizpůsobitelnou sadu blokových knihoven. Simulink je široce používán v teorii řízení a zpracování digitálního signálu pro simulaci a návrh více systémů. MATLAB/Simulink se ukázal jako velmi účinný softwarový nástroj pro modelování vozidel a ověřování příslušné strategie. Několik existujících simulátorů vozidel, jako jsou ADVISOR, PSAT a VDMS, bylo vyvinuto a naprogramováno pomocí MATLAB/Simulink. Bez ohledu na jakýkoli profesionální software si uživatelé mohou také vytvořit své vlastní modely součástí vozidla z hlediska zájmů a specifických požadavků na systém. Hybridní elektrické vozidlo je pouze zvláštním případem tohoto obecného systému, jen s motorem a elektrickým pohonem. Výsledky simulací mohou být vyobrazeny různými způsoby, např. "Rozsah", "Pracovní plocha" proměnné, "Displej" atd. Uživatelé mohou v prostředí MATLAB/Simulink snadno modifikovat a vyzkoušet různé algoritmy a strategie řízení spotřeby pro určité cíle výkonu vozidla.

6.2 Jízdní cykly

Jízdní cyklus je série datových bodů představující rychlost vozidla v závislosti na čase. Jízdní cykly jsou vytvářeny různými zeměmi a organizacemi za účelem posouzení výkonnosti vozidel různými způsoby, jako například spotřeby paliva a emisí. Měřené spotřeby paliva a emisí jsou prováděny na dynamometru. Emise z výfuku jsou shromažďovány a měří se pro indikaci výkonu vozidla. Další použití pro cyklů je

v simulacích vozidel. Přesněji řečeno, jsou používány v pohonných systémech simulací a předpovídají účinnost spalovacích motorů, převodovek, elektrických hnacích systémů, baterií, systémů palivových článků a podobných součástí.

6.2.1 Sběr dat

Sběr dat z testovaného vozidla je nejdůležitější činnost. Test silničního provozu jako je město nebo dálnice. Aby byla zajištěna srovnatelnost pro všechna vozidla, a tím bylo zaručeno spravedlivé srovnání mezi různými výrobci automobilů, provádějí se testy v laboratoři za jasných a opakovatelných podmínek. Profil rychlosti, který musí zkoušené vozidlo opakovat, parametry laboratorních přístrojů, jako je kalibrace dynamometrů, analyzátory plynů, anemometry, rychloměry nebo valivý odpor zkušební stolice, podmínky prostředí, jako je teplota místnosti, hustota vzduchu, vítr, druhy paliva: benzín, nafta, LPG, zemní plyn, elektřina atd. Kvalita paliva a jeho chemické vlastnosti, tolerance, za nichž jsou opatření platná a proces nastavení pro vozidla před zkouškou.

6.2.2 Design jízdního cyklu

Jízdní cyklus je v podstatě simulací jízdních podmínek na silnici. Jízdní cykly se používají ke snížení nákladů na silniční testování, čas testu a únavy zkušební inženýra. Celá myšlenka je, aby se jízdní cyklus mohl provádět v testovací laboratoři (podvozek dynamometru) nebo v počítačové simulaci.

Mohou být namodelovány dva druhy jízdního cyklu. Jedním z nich je rychlost závislá na vzdálenosti a nadmořské výšce. Druhý z nich je rychlost závislá na čase a zařazeném převodu. Závislost na vzdálenosti je skutečná replika testovací trasy, zatímco časová závislost je komprimovaná verze času potřebného k provedení zkoušky na silnici. Příklady časově závislých jízdních cyklů je evropský NEDC cyklus a FTP-75. Časově závislé jízdní cykly jsou používány speciálně pro testování podvozku na dynamometru, protože v krátké době mohou být výsledky k dispozici a opakovatelnost testů je snadná.

6.2.3 NEDC

NEDC cyklus představuje postup hodnocení parametrů u automobilů, které se prodávají na evropském trhu. U vozů se spalovacím motorem se měří především úroveň emisí, u elektromobilů dojezd a spotřeba energie. Výsledky NEDC cyklů u elektromobilů jsou často považovány jako nereálné. Proto se od září 2017 v zemích EU postupně zavádí nová metodika WLTP.[14]

Cyklus se skládá ze dvou částí. První částí je UCD cyklus představeným v roce 1970 jako součást předpisů Evropské hospodářské komise (ECE) pro vozidla. Cyklus byl navržen jako typická simulace jízdních podmínek v ucpáných evropských městech. Je charakterickým nízkým požadovaným výkonem, nízkou teplotou výfukových splodin a maximální rychlostí 50 km/h. Druhou částí je EUDC poprvé představený v roce 1990. Byl navržen jako více aktivní cyklus s vyššími rychlostmi. Maximální rychlost je zde proto 120 km/h nebo pro méně výkonná vozidla pouze 90 km/h.[14]

Cyklus musí být prováděn na automobilu se studeným motorem při teplotě 20-30 °C. Cyklus by měl být prováděn na rovné silnici v bezvětří ale je prováděn na měřicí stolici, kvůli opakovatelnosti. Měřicí stolice simuluje odpor vzduchu a tíhovou sílu. Pro každé vozidlo je vytvořena tabulka hodnot odporů pro danou rychlost v cyklu. Toto umožňuje testovat jedno fyzické vozidlo pro všechny typy karoserií jednoduchou změnou tabulky. Ventilátor spojený s testovací stolicí umožňuje přívod vzduchu do vozidla rychlostí odpovídající momentální rychlosti vozidla. V průběhu vývoje vozidla lze s tímto uspořádáním provést mnohem více testů než s konvenčními silničními testy. Testovací cyklus je prováděn se všemi přídatnými zátěžemi vypnutými.[14]

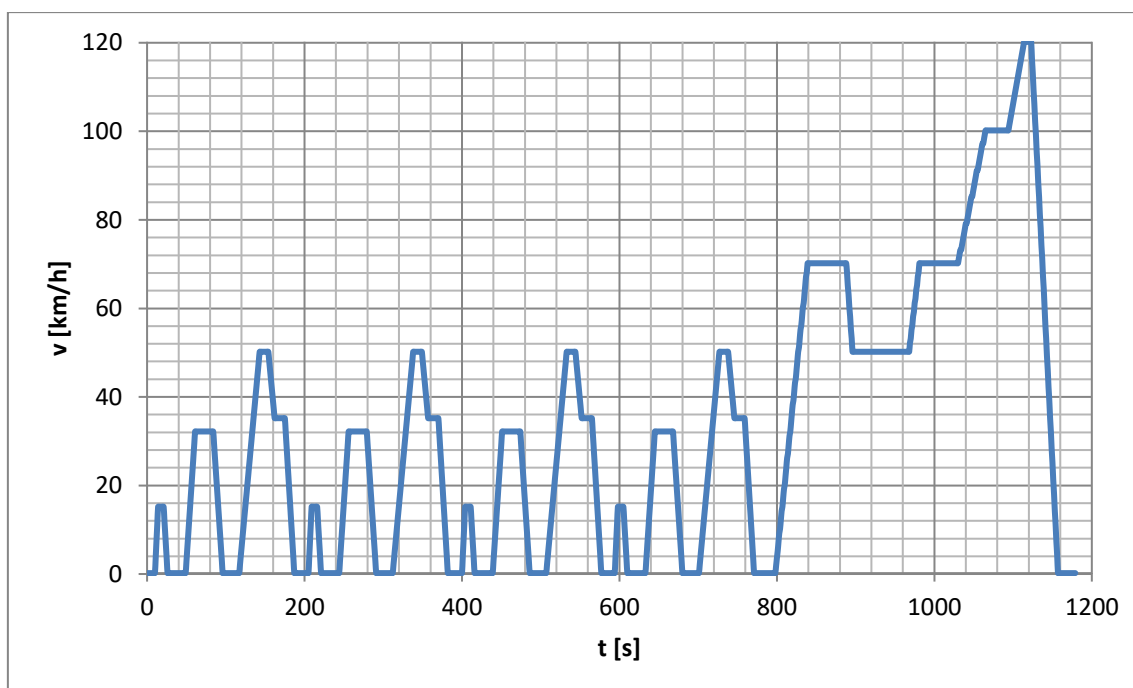
6.2.3.1 Průběh cyklu

Po startu motoru auto stojí 11 s, pokud je vozidlo vybaveno manuální převodovkou, stojí 6 s na neutrál a 5 s se zařazeným prvním rychlostním stupněm. Po té lehce zrychlí na 15 km/h během 4 s a jede konstantní rychlostí 8 s. Následuje úplné zastavení během 5 s. Následně stojí 21 s, 16 s na neutrál a 5 s se zařazeným prvním rychlostním stupněm. Ve 49 sekundě vozidlo mírně zrychlí na 32 km/h během dvanácti vteřin a jede takto 24 s. Dále brzdí 11 s do úplného zastavení a čeká dalších 21 s. V čase 117 sekund vozidlo zrychlí na 50 km/h za 26 s a udržuje rychlost 12 s. Následně zbrzdí na 35 km/h za 8 s a setrvá při této rychlosti 13 s. A nakonec zastaví během 12 s. Cyklus končí po 195 s po teoretické vzdálenosti 994,03 m. Tento postup se opakuje čtyřikrát. Celková doba trvání této části cyklu je 780 s a ujetá vzdálenost 3976,1 m s průměrnou rychlostí 18,35 km/h.[14]

Druhou část začíná 20 sekundami stání se zařazenou rychlostí pokud je vozidlo vybaveno manuální převodovkou. Po uplynutí této doby vozidlo zrychluje na 70 km/h v rozmezí 41 s a setrvává na této rychlosti 50 s. Následně zpomalí na 50 km/h za 8 s a setrvá v takové rychlosti 69 s, po té znovu přidá na 70 km/h během 13 s. Ve 251 sekundě vozidlo zrychluje na 100 km/h během 35 s takto jede 30 s. Předposledním

krokem je v čase 316 s přidání vozidla na 120 km/h během doby 20 s a udržije rychlost 10 s. Nakonce úplně zastaví v intervalu 34 s. Celková doba trvání druhé části cyklu je 400 s s teoretickou vzdáleností 6356 m a průměrnou rychlostí 62,6 km/h.[14]

Kombinací dostaneme výslednou vzdálenost 10932 m, průměrnou rychlost 33,5 km/h s dobou trvání 1180 s. Z těchto údajů je vypočítána celková průměrná spotřeba a s tím související emise. Průběh testu je na *Obr. č. 11*



Obr. č. 11 Průběh testu NEDC

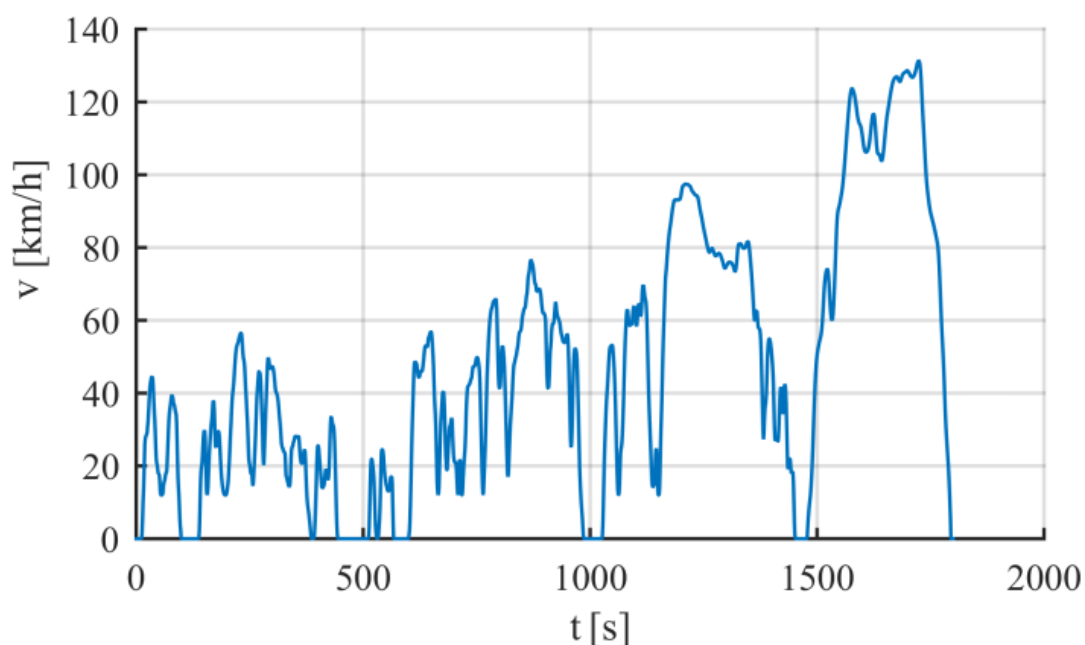
6.2.4 WLTP

Právě díky aféře dieseldgate se ukázalo jak moc se liší reálná a měřená spotřeba. Aby se zamezilo dalším nereálným hodnotám, které měřily automobilky u nových aut v rámci testů, které se pak i o několik litrů lišily od skutečných údajů, byla zavedena nová metodika měření spotřeby a emisí s označením WLTP. Od 1. září roku 2019 musí všechna osobní vozidla registrovaná v EU plnit tento standard. Plán Evropské unie na rok 2021 pro nové osobní automobily je 95 gCO₂/km.[13]

Pro automobilky urychlené zavedení této metodiky měření znamená velké problémy. I pro ty značky, které nikdy nepoužily žádné padělání měření, najednou musely začít emise a spotřebu zcela jiným způsobem. WLTP je velmi komplexní a mělo by více odpovídat reálnému provozu auta. Celé měření trvá podstatně déle, a je při něm ujeta delší

vzdálenost a to vyšší průměrnou rychlostí. Navíc bylo v rámci tohoto cyklu upuštěno od neustálého zastavování, aby nemohl být využit systém Stop-Start, který dříve uměle snižoval jak emise, tak spotřebu. Navíc všechny automobilky bez rozdílu musely do testů zahrnout veškeré možné prvky výbavy, které by mohly spotřebu jakkoliv ovlivňovat. Jde například o rozměry kol, nosič na kola či střešní box, které znamenají další zátěž a zvýšení spotřeby.[13]

Metodika WLTP má mnoho zajímavých parametrů, díky kterým jsou hodnoty emisí a spotřeby o mnoho reálnější. Nově je délka zkušební trati 23266 metrů a cyklus trvá 30 minut. Průměrná rychlost při testování je 46,5 km/h, přičemž ta maximální je 131,3 km/h. Průběh testu WLTP je znázorněn na Obr. č. 12

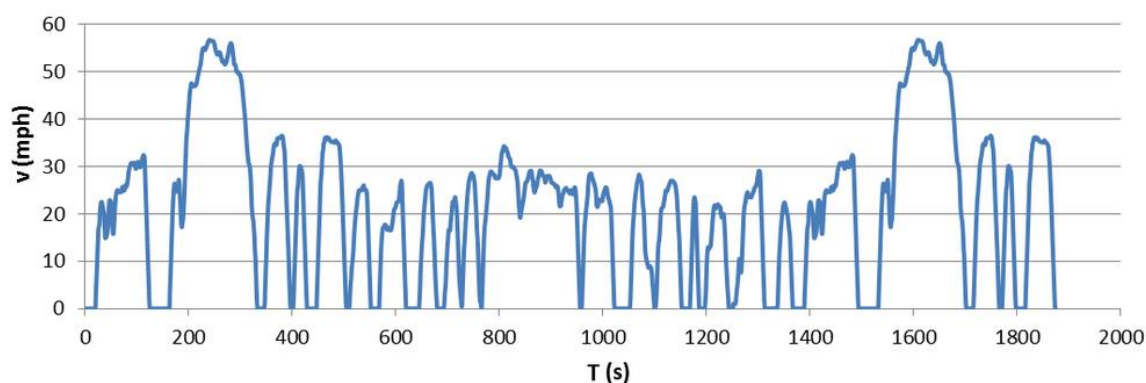


Obr. č. 12 WLTP cyklus[13]

WLTP díky práci s reálnějším profilem řízení než předchozí testy měří přesnější hodnoty spotřeby a emisí. Dále WLTP zajišťuje srovnatelné výsledky testů po celém světě. Jedním z hlavních cílů procesu WLTP je jednotné stanovení emisí výfukových plynů a spotřeby energie pro různé typy pohonů, jako je benzín, nafta, CNG nebo dokonce elektřina. Pokud je postup měření WLTP cyklu správně dodržován, musí vozidlo stejného typu vždy poskytovat stejný výsledek testu ve všech částech světa.[13]

6.2.5 FTP-75

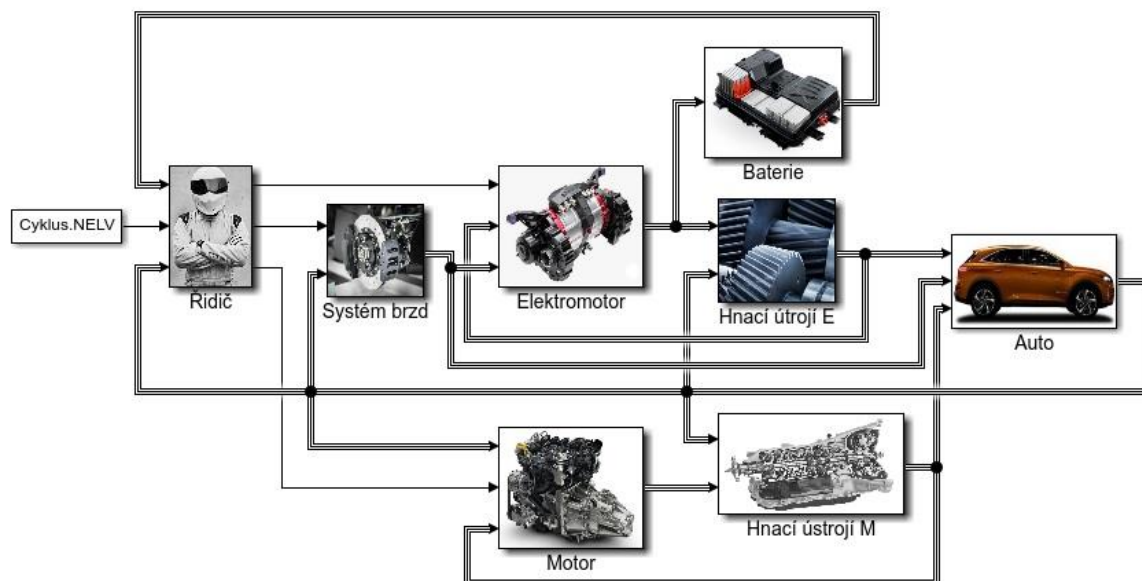
Městský jízdní cyklus Federálního zkušebního postupu EPA se skládá z UDDS cyklu a prvních 505 s z dalšího UDDS cyklu. Test začíná startem za studena a pokračuje další částí, která simuluje teplý start. Váhové faktory jsou 0,43 pro studený start a 0,57 pro start za tepla. Původně byl cyklus vytvořen jako test pro vozidla na fosilní paliva, dnes ale slouží i k odhadování maximálního dojezdu elektrických vozidel. Ujetá vzdálenost během testu je 17,77 km s průměrnou rychlostí 34,1 km/h a dobou trvání 1874 s. Průběh testu je na Obr. č. 13.[13]



Obr.č. 13 FTP-75 cyklus[13]

6.3 Simulace vybraného vozidla

Simulace vybraného vozidla byla vytvořena v prostředí MATLAB/Simulink. Prvním krokem nasimulování vozidla bylo vybrání jízdního cyklu. Byl vybrán cyklus NEDC ze dvou důvodů. Díky jeho snadné implementaci a zadruhé, protože všichni výrobci automobilů ještě nepřesli k WLTP cyklům, nebo nezveřejňují jejich výsledky v kompletním znění. Obr. č. 14 ukazuje celý systém pro simulaci vozidla. Vstupní data jsou realizována pomocí jednoduché tabulky hodnot požadovaných rychlostí v daný čas.

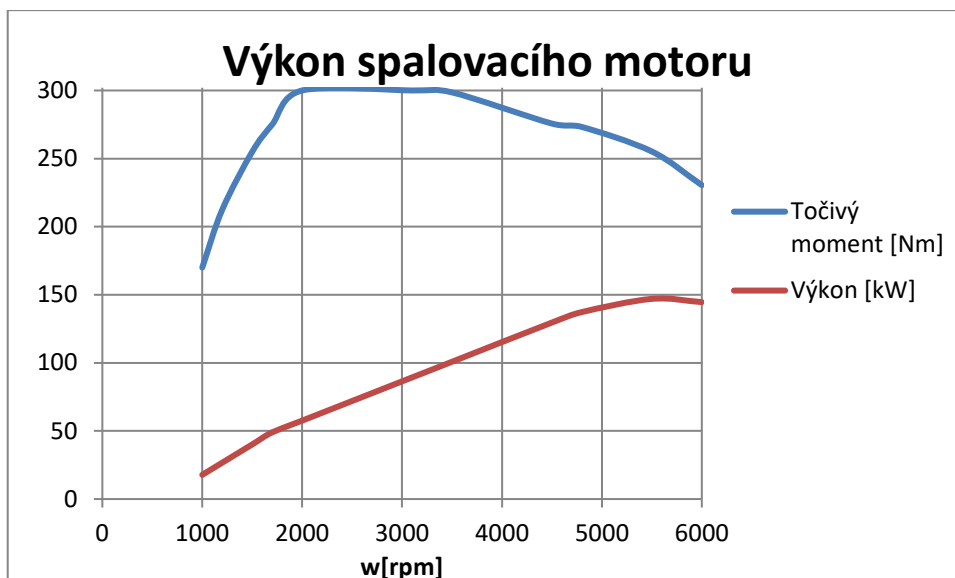


Obr. č. 14 Simulace vozidla

Podsystém řidič se stará o vytváření požadavků stlačení plynových nebo brzdového pedálu pomocí PID regulátoru z odchylky požadované a aktuální rychlosti. Další úlohou tohoto systému je rozhodnutí, která pohonná jednotka bude pracovat nebo jestli budou pracovat v hybridním režimu, tedy obě najednou.

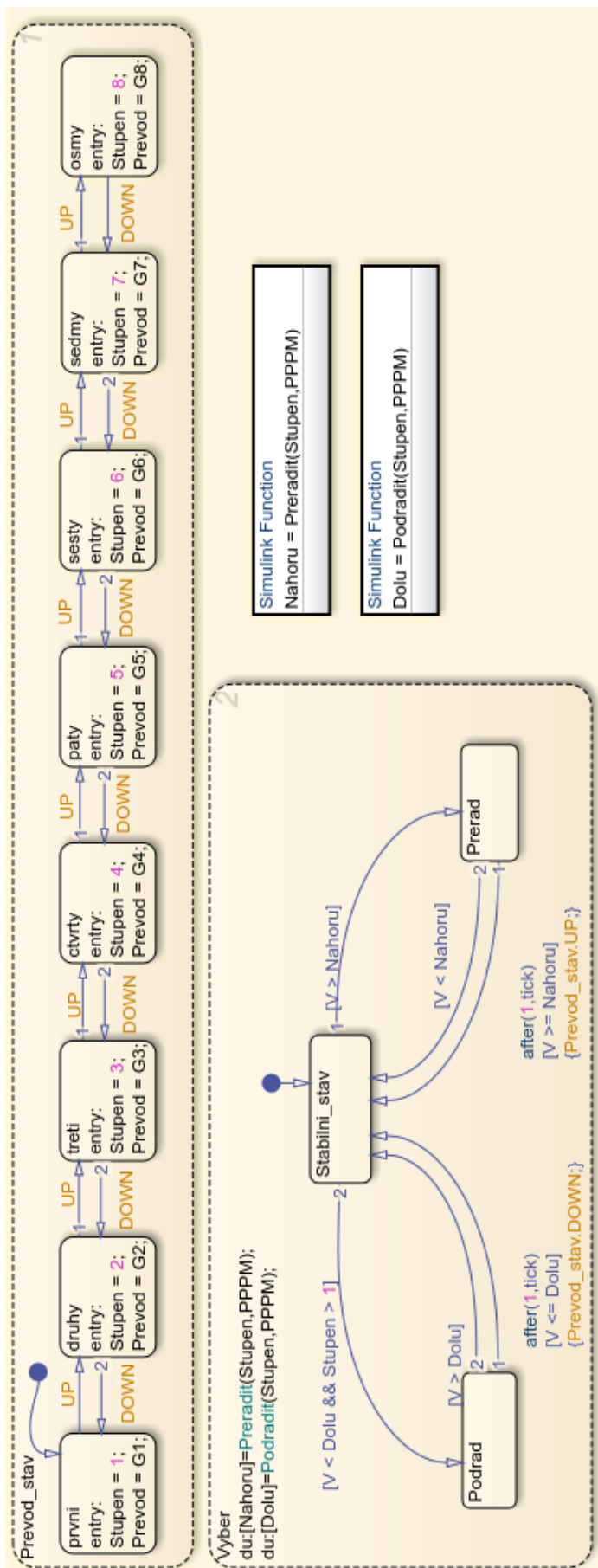
Systém brzd se stará o převod požadavku polohy brzdového pedálu na sílu a rozdělení tohoto požadavku na brzdný účinek třecích brzd a regenerativní účinek elektromotoru.

Motor zde představuje klasický spalovací motor, který má klasickou výkonovou charakteristiku představenou tabulkou hodnot pro určité pásmo otáček implementovaným v podsystému Omezovač výkonu. Výkonovou charakteristiku spalovacího motoru nalezneme na *Obr. č. 15* Probíhá zde i výpočet spotřeby paliva, která probíhá přes dodaný výkon motoru a jeho momentální účinnost. Tímto způsobem byl vypočten celkový výkon přivedený v palivu a následně převeden na objem v litrech. Simulované palivo má vnitřní energii 42,1 MJ/kg a jeho hustota je 0,77 kg/m³.



Obr. č. 15 Výkonná charakteristika spalovacího motoru motoru

Hlavním úkolem Hnacího ústrojí motoru je nalezení správného převodového stupně osmistupňové automatiké převodovky a převedení vstupního točivého momentu na výstupní pomocí celkového převodu. Dále upravuje pomocí tohoto poměru otáčky motoru. Diagram chování převodovky můžeme vidět na obr. č. 16, uvnitř kterého jsou funkce přěrazení a podřazení realizovány tabulkami 2 a 3. Hodnoty jednotlivých převodů jsou v tabulce 4.



Obr. č. 16 Diagram automatické převodovky

Tab. 2 Tabulka rychlostí pro podřazení

	Rychlostní stupeň							
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Poloha plynového pedálu [%]	0,0	11,1	18,7	28,9	38,7	51,4	64,4	77,0
	6,3	11,1	18,7	28,9	38,7	51,4	64,4	77,0
	12,5	11,1	18,7	28,9	38,7	51,4	64,4	77,0
	18,8	11,1	18,7	28,9	38,7	51,4	64,4	77,0
	25,0	11,1	19,1	28,9	39,4	51,8	64,8	77,3
	31,3	11,1	20,5	30,5	42,4	55,1	65,1	77,8
	37,5	11,1	21,3	34,5	47,7	62,4	77,7	88,0
	43,8	11,1	23,4	41,6	56,4	72,4	91,3	99,2
	50,0	11,1	27,3	47,7	65,1	83,3	104,9	113,4
	56,3	11,1	30,3	53,4	72,9	94,2	118,5	127,6
	62,5	11,1	33,8	58,5	80,5	105,1	132,1	141,8
	68,8	11,1	38,8	65,6	90,0	115,9	145,7	156,0
	75,0	19,6	46,1	73,5	100,8	120,8	150,3	170,2
	81,3	25,5	49,1	78,3	104,7	123,7	155,9	184,4
	87,5	31,5	52,5	80,0	106,0	125,0	157,0	191,0
	93,8	31,5	52,5	80,0	106,0	125,0	157,0	191,0
100,0	31,5	52,5	80,0	106,0	125,0	157,0	191,0	

Tab. 3 Tabulka hodnot pro přeřazení

	Rychlostní stupeň							
		2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Poloha plynového pedálu [%]	0,0	12,8	21,0	31,5	42,2	53,6	66,7	85,0
	6,3	12,8	21,0	31,5	42,2	53,6	66,7	85,0
	12,5	12,8	21,0	31,5	42,2	55,6	69,0	82,4
	18,8	12,8	21,0	31,5	43,9	58,1	72,2	86,3
	25,0	12,8	21,0	34,2	47,0	61,5	76,1	90,6
	31,3	12,8	24,9	41,1	54,3	72,1	89,8	107,6
	37,5	15,6	28,7	47,2	63,3	85,5	107,7	129,9
	43,8	17,1	31,8	53,0	71,2	96,8	122,4	148,0
	50,0	18,7	35,3	59,5	79,2	107,0	134,7	162,5
	56,3	20,2	39,7	68,0	88,1	117,2	146,2	175,3
	62,5	23,5	46,4	76,5	98,9	127,3	155,8	184,3
	68,8	27,6	51,9	85,0	109,1	137,5	165,9	194,4
	75,0	31,7	59,7	93,5	118,4	147,7	176,9	206,2
	81,3	36,6	67,5	97,3	128,9	157,8	186,8	215,8
	87,5	38,0	68,0	99,0	130,0	150,0	188,0	232,0
	93,8	38,0	68,0	99,0	130,0	150,0	188,0	232,0
100,0	38,0	68,0	99,0	130,0	150,0	188,0	232,0	

Tab. 4 Hodnoty převodových stupňů

Převod	Hodnota	Převod	Hodnota	Převod	Hodnota
Stálý	3,87	Třetí	1,95	Šestý	1
První	5,07	Čtvrtý	1,469	Sedmý	0,808
Druý	2,971	Pátý	1,23	Osmý	0,672

Elektromotor má stejnou funkci jako motor, tedy vypočítává z vložené tabulky výkon a točivý moment elektromotoru. Tato hodnota je také použita pro výpočet maximálního momentu regenerativního brždění.

V podsystému baterie se převádí po pomoci bloku Výpočet proudu požadovaný výkon elektromotoru na potřebný proud dodaný baterií pomocí rovnice:

$$I_{bat} = \frac{U_0 - \sqrt{U_0^2 - 4P_{poz}R_i}}{2R_i} \quad (1)$$

Další důležitou funkcí je výpočet ztrát baterie a jejího stavu nabití, který se používá pro řízení signálu Baterie_OFF ovládajícím znemožnění jejího úplného vybití, vysláním povelu bloku řidič, že se nemůže používat elektromotor k pohánění vozidla.

$$SoC_n = SoC_s - 100 \int \frac{P_{bat}}{C_{bat}} dt \quad (2)$$

Hnací ústrojí elektromotoru má stejný stálý převod jako hnací ústrojí motoru. Další převody nemá. Z točivého momentu se vypočítává tažná síla pomocí rovnice:

$$F_{t_{el}} = \frac{(T_{el} - T_{zt})G}{r} \quad (3)$$

Posledním podsystémem je Auto. Zde se sčítají všechny tahové a odporové síly působící na vozidlo. Síly se sčítají podle následující rovnice:

$$F_{celk} = F_t - F_{br} - F_{vz} - F_g - F_v \quad (4)$$

Kde:

$$F_t = F_{t_m} + F_{t_{el}} \quad (5)$$

$$F_{vz} = \frac{1}{2} \rho S_a C_x v^2 \quad (6)$$

$$F_g = mg \sin \alpha \quad (7)$$

$$F_v = mg C_r \quad (8)$$

Z výsledné síly se vypočívává zrychlení, rychlost a ujetá vzdálenost. Dle rovnic:

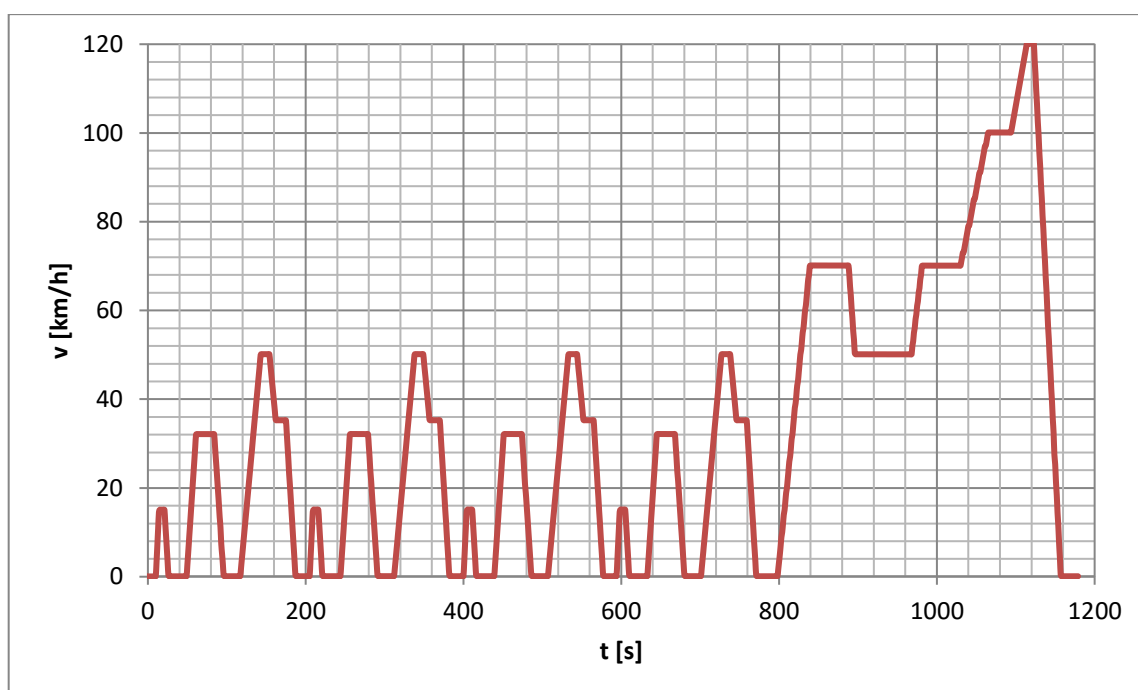
$$a = \frac{F_{celk}}{m} \quad (9)$$

$$v = \int a dt \quad (10)$$

$$d = \int v dt \quad (11)$$

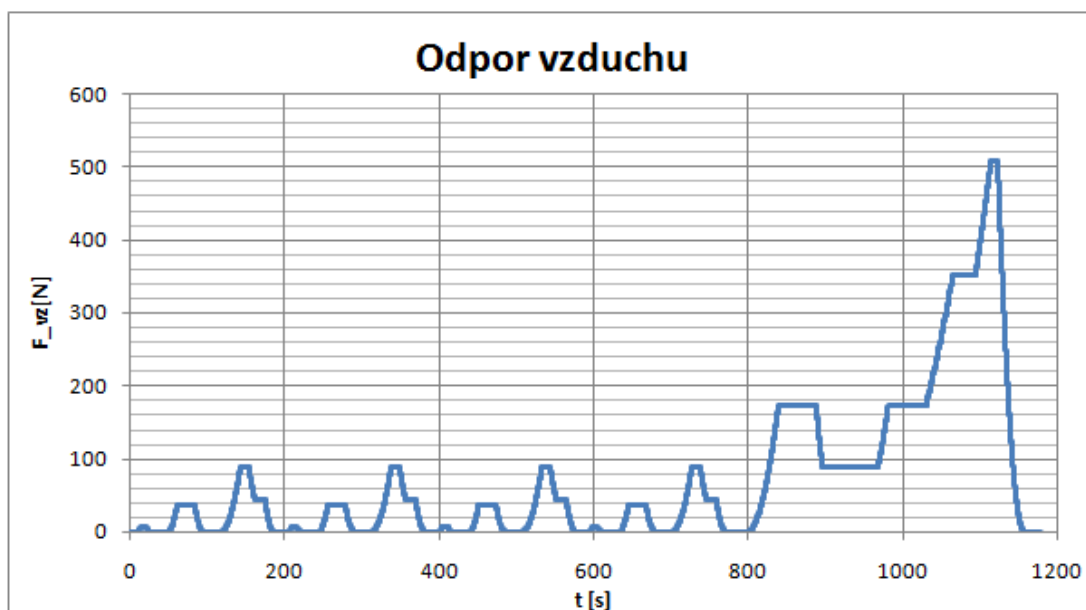
6.4 Výsledky

Při návrhu v prostředí MATLAB/Simulink byl vytvořen model hybridního vozidla, jehož vstupem byl časový průběh požadované rychlosti. Výstupní veličinou nemusí být pouze rychlost vozidla znázorněná na *obr. č. 17* ale celá škála veličin, jako jsou spotřeba paliva a energie baterie, výstupní proud baterie a síly působící na vozidlo.



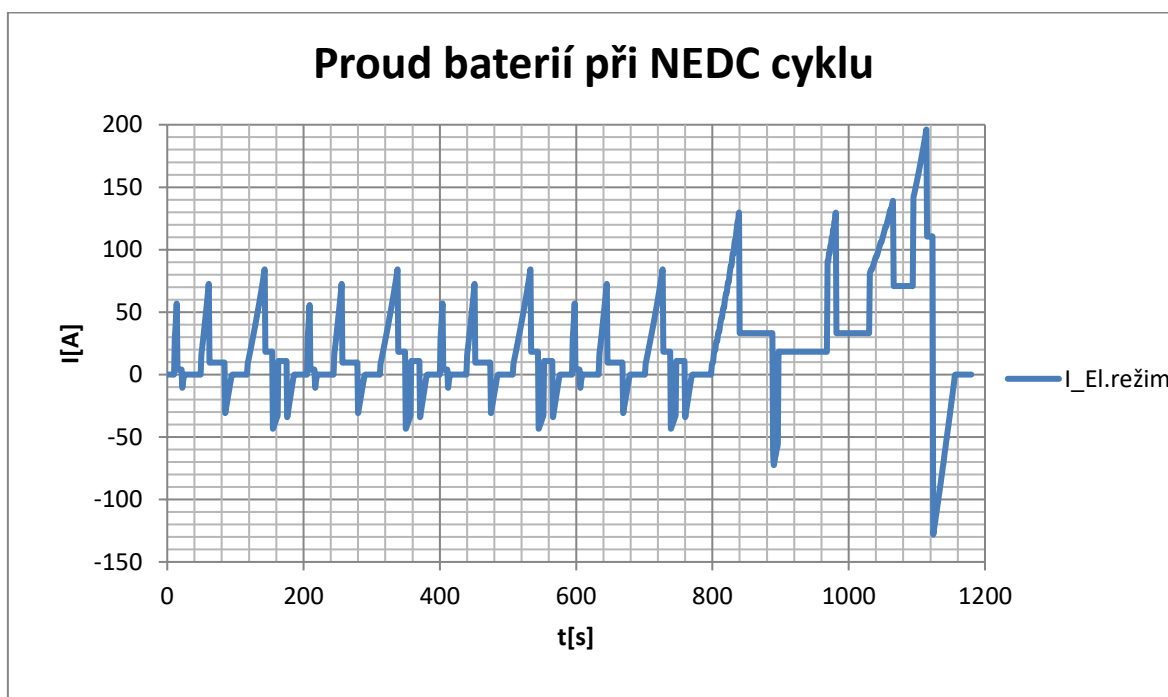
Obr. č. 17 Rychlost vozidla při NEDC cyklu

Rychlost vozidla se v žádném z testovaných režimů nelišila o více jak 0,25 km/h. Snaha o výpočet koeficientů PID regulátoru nebyla úspěšná proto byly koeficienty lazeny metodou pokus-omyl. Maximální rychlost modelu vozidla je 249,1 km/h. Další důležitou veličinou měnící se v závislosti na rychlosti je odpor vzduchu. Průběh této síly je na *obr. č. 18*.



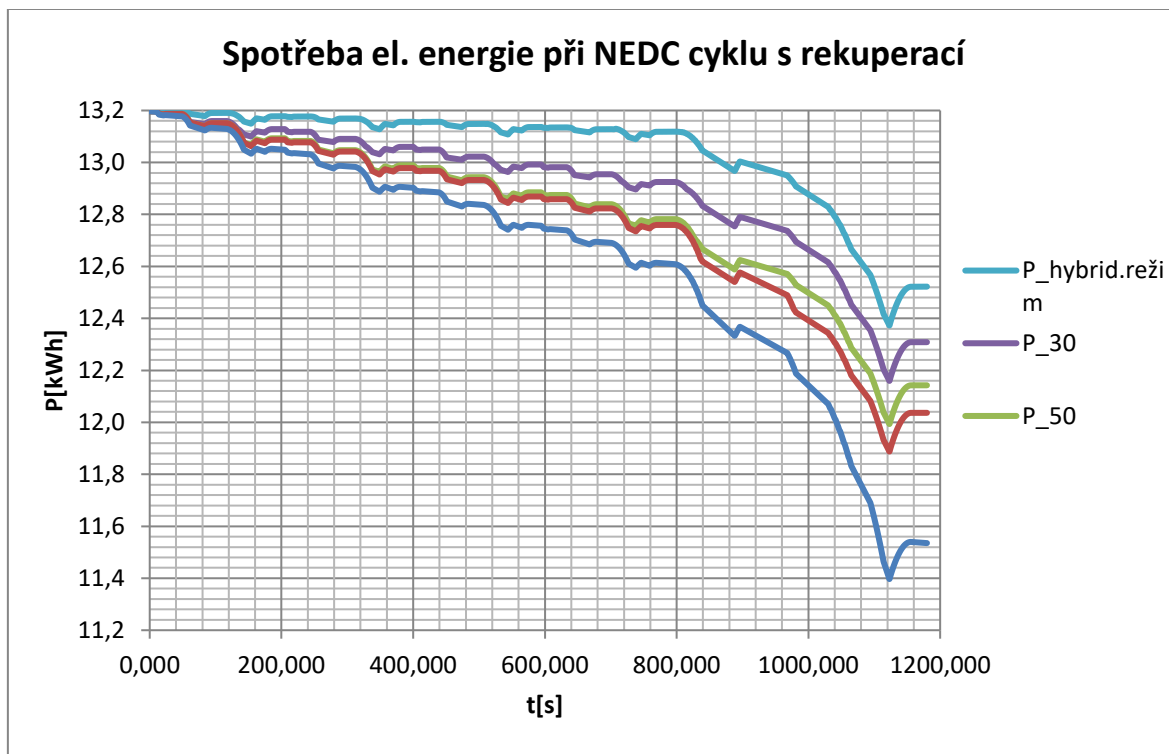
Obr. č. 18 Odpor vzduchu působící na vozidlo při NEDC cyklu

Dalším důležitou veličinou vypovídající o zátěži vozidla je proud baterií. Graf proudu odebíraného/dodávaného z/do baterie při jízdě pouze na elektřinu je na obr. č. 19. Z průběhu proudu je vidět nárůst proudu ve chvíli kdy vozidlo zrychluje, konstatní hodnota při jízdě konstantní rychlostí a záporné hodnoty při brždění, kdy elektromotor funguje jako generátor a dodává energii zpět do baterie. Zdůvodu omezení počtu vzorků je použita vzorkovací frekvence 1 Hz. Ve skutečnosti nedosáhneme PID regulací tak hladkého průběhu.

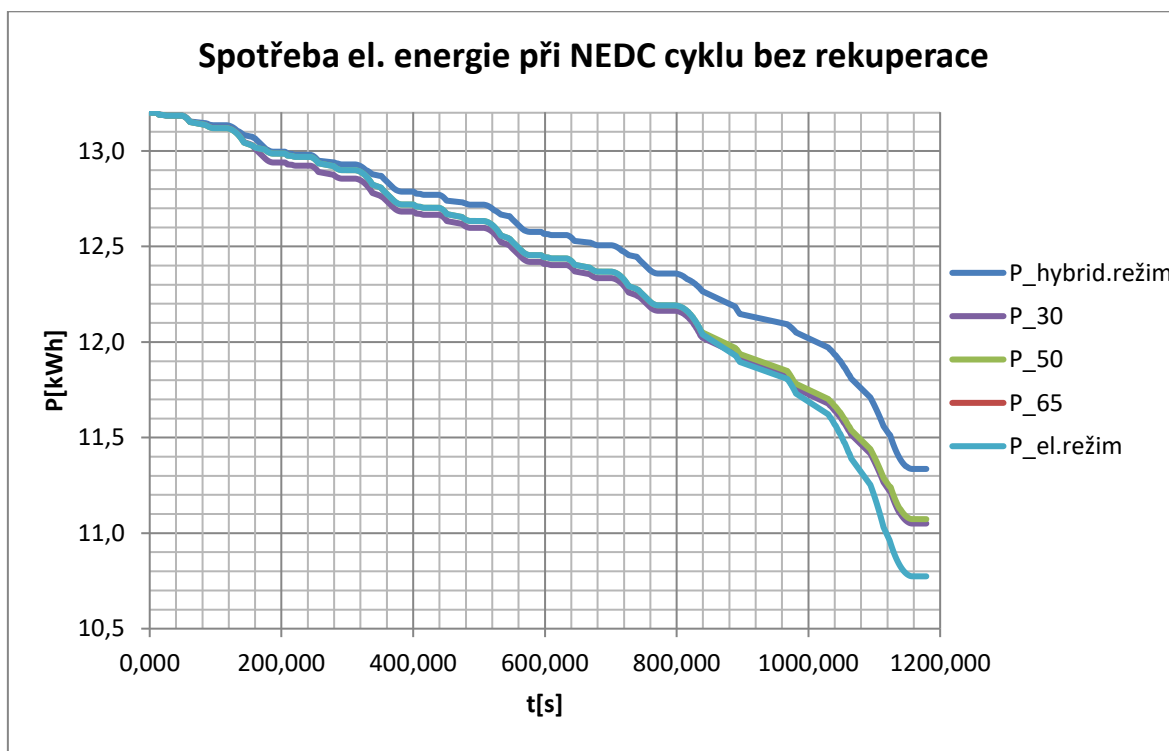


Obr. č. 19 Průběh proudu baterií

Z průběhů proudů při různých režimech jízdy se vypočítává stav baterie SOC. Průběhy vybíjení baterie jsou na obr. 20 a 21. Na Obr. č. 20 můžeme vidět, že průběhy nejsou pouze klesající a dochází zde i dobíjení baterie díky rekuperaci, zatímco na Obr. č. 21 energie uložená v baterii pouze ubývá.

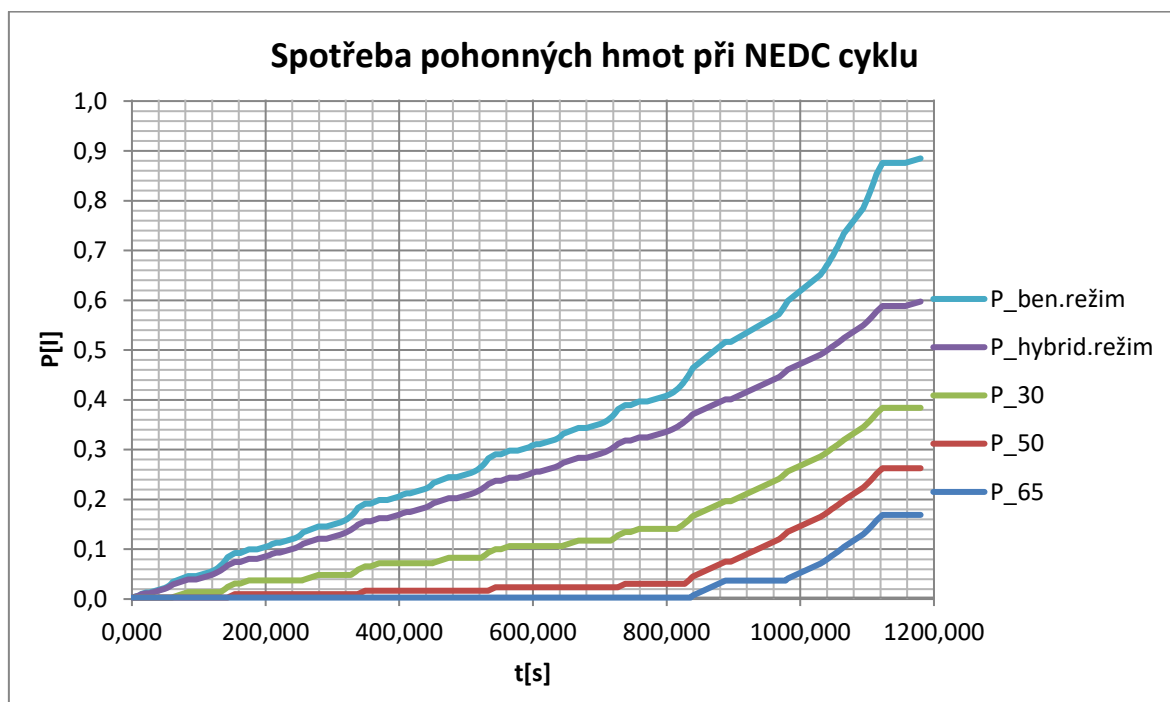


Obr. č. 20 Stav baterie v různých módech s povolenou rekuperací



Obr.č. 21 Stav baterie v různých módech bez rekuperace

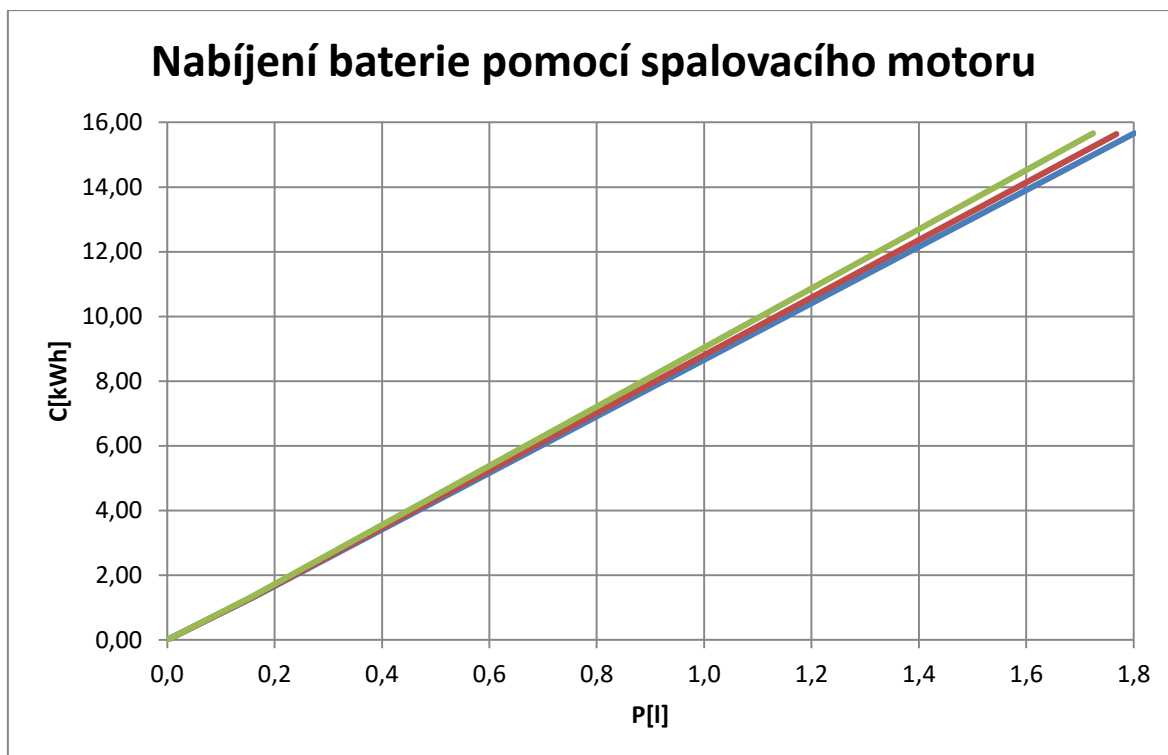
Poslední a neméně důležitou měřenou veličinou je spotřeba pohonných hmot. Množství spotřebovaného paliva během různých jízdních módů zobrazuje Obr. č. 22.



Obr. č. 22. Spotřeba pohonných hmot během různých jízdních módů

Existuje metoda jak se podle NEDC určuje průměrná spotřeba HEV, která se skládá ze dvou částí. Vstupní podmínky jsou pro obě části stejné. Baterie musí být zahřátá na provozní teplotu a musí být plně nabitá. První část se nazývá úplné vyčerpání náboje (CD), kdy dochází k opakování NEDC cyklů dokud není baterie na své spodní hranici nabití SOC_{min} . Tím se taktéž zjistí celkový dojezd vozidla v elektrickém režimu. Následně se nechá baterie dobít do původního stavu pomocí spalovacího motoru a elektromotoru v generátorickém režimu. Udržení náboje (CS) je druhou částí metody určení průměrné spotřeby HEV. Zde dochází k pouze jednomu opakování cyklu NEDC a následnému dobíjení baterie pomocí spalovacího motoru. Průběhy dobíjení baterie v závislosti na pracovním bodě spalovacího motoru jsou na Obr. č. 23. Z toho se získá ekvivalent spotřebovaného paliva pomocí rovnice:[15]

$$C = \frac{C_1 D_e + C_2 D_p}{D_e + D_p} \quad (12)$$



Obr. č.23 Nabíjení baterie pomocí spalovacího motoru

V tabulce 5 najdeme hodnoty spotřebované energie vozidlem v různých jízdních režimech, kdy je během průběhu cyklu povoleno regenerativní brzdění. V tabulce 6 jsou z toho vypočtené hodnoty emisí. Hodnoty CO₂ jsou 2338gCO₂/l benzínu a 2819gCO₂/kg uhlí[16]. Dalším faktorem je použitá účinnost elektrárny při výrobě elektrické energie, průměrná hodnota účinnosti je 35%. V tabulkách 7 a 8 najdeme stejně získané hodnoty, pouze zde není povolena rekuperace.

Tab.5 Spotřeba vozidla v různých režimech s rekuperací

	kwh	kwh/100km	kwh/100.el	l	l/100km	kwh/100km	kwh/100celk
El.režim	1,67	15,64	44,68	0,00	0,00	0,00	44,68
v>65	1,16	10,90	31,13	0,17	1,56	13,86	44,99
v>50	1,05	9,90	28,29	0,26	2,44	21,68	49,97
v>30	0,89	8,34	23,84	0,38	3,58	31,81	55,65
Hybrid.režim	0,67	6,33	18,10	0,60	5,64	50,14	68,24
Benzin.režim	0,00	0,00	0,00	0,89	8,34	74,14	74,14

Tab. 6 Vypočtené hodnoty CO₂/km s rekuperací

	gCO ₂ /km.el	gCO ₂ /km.ben	gCO ₂ /km
El.režim	188,00	0,00	188,00
v>65	130,99	36,44	167,43
v>50	119,03	57,02	176,06
v>30	100,30	83,66	183,95
Hybrid.režim	76,14	131,87	208,01
Benzin.režim	0,00	194,99	194,99

Tab.7 Spotřeba vozidla v různých režimech bez rekuperace

	kwh	kwh/100km	kwh/100.el	l	l/100km	kwh/100km	kwh/100celk
El.režim	2,43	22,78	65,10	0,00	0,00	0,00	65,10
v>65	2,15	20,18	57,67	0,17	1,56	13,86	71,53
v>50	2,13	19,97	57,07	0,26	2,44	21,68	78,75
v>30	1,86	17,50	50,01	0,38	3,58	31,81	81,82
Hybrid.režim	1,59	14,98	42,79	0,60	5,64	50,14	92,93
Benzin.režim	0,00	0,00	0,00	0,89	8,34	74,14	74,14

Tab. 8 Vypočtené hodnoty CO2/km bez rekuperace

	gCO2/km.el	gCO2/km.ben	gCO2/km
El.režim	273,89	0,00	273,89
v>65	242,65	36,44	279,09
v>50	240,11	57,02	297,13
v>30	210,41	83,66	294,07
Hybrid.režim	180,03	131,87	311,90
Benzin.režim	0,00	194,99	194,99

7 Řídící algoritmus

Pro splnění požadavků uživatele na výkon vozidla, jsou parametry hybridních elektrických vozidel (HEV) optimalizovány tak, aby udržovaly stav nabití baterie a snižovaly spotřebu paliva vozidla. To se nevztahuje pouze na návrhové parametry energetického systému, ale také na parametry strategie řízení energie. Pro zlepšení výkonu HEV z hlediska úspory paliva a zajištění kvalitního jízdního výkonu je nutná současná optimalizace hlavních parametrů součástí hnacího ústrojí a řídicího systému.[2]

Evoluční algoritmy se používají k optimalizaci řídicích parametrů HEV, což účinně zlepšuje spotřebu paliva. Algoritmy řízení energie založené na adaptivních víceúrovňových režimech navržených k řešení problémů různých jízdních cyklů by měly být vybaveny různými regulačními algoritmy. Výše uvedené optimalizační algoritmy se používají k optimalizaci parametrů energetického systému nebo strategie řízení energie HEV. K optimalizaci parametrů energetického systému a strategie řízení se používá několik algoritmů, jako je algoritmus optimalizace hejnem částic (PSO) a víceúčelový genetický algoritmus. Metoda globální optimalizace algoritmu DIRECT byla použita pro kalibraci parametrů strategie řízení energie vozidla z hlediska úspory paliva. Ve srovnání s uvedenými optimalizačními algoritmy má simulovaná optimalizace žíhání částic (SA-PSO) výhody dosažení globálně optimálního řešení. Je obtížné, ale nutné vyvinout sadu globálních optimálních řešení pro současnou optimalizaci energetického systému a regulačních parametrů.[2]

Účinnost strategie řízení energie pro HEV je do značné míry ovlivněna jízdními vzory. Optimalizované parametry HEV založené na určitém vzoru řízení však nemusí udržovat požadavky na nabití baterie v jiných vzorech, nemluvě o nejlepší spotřebě paliva. Proto se vytváří i strategie řízení energie založené na rozpoznávání vzorů řízení. Pro optimalizaci výkonu vozidla na náhodném vzoru řízení se pro HEV vyvinul algoritmus řízení v různých režimech využívající rozpoznávání vzoru řízení. Inteligentní správa energie pro paralelní HEV založená na identifikaci jízdního cyklu se navrhuje pomocí fuzzy neuronové sítě. Metody strojového učení inteligentně a automaticky rozlišují mezi jízdními podmínkami. Byl navržen nový optimalizační rámec pro stanovení okamžité optimalizované strategie řízení spotřeby, aby se vyřešil problém víceúčelové optimalizace pro dlouhou životnost a energetickou účinnost systému skladování energie, který vykazuje vynikající výkon v reálném čase pro optimalizaci výkonu vůči neznámým jízdním cyklům

a provozním podmínkám.

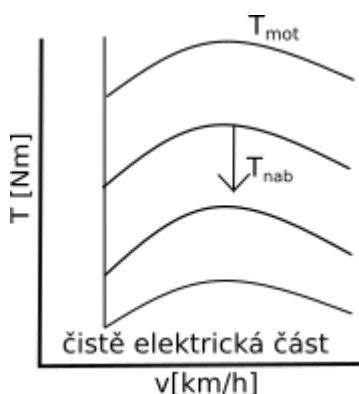
V uvedených optimalizacích parametrů se ale nezohledňuje systém skladování energie, který je také velmi důležitý pro účinnost strategie řízení energie. Jak je uvedeno výše, výhodou SA-PSO ve srovnání s jinými optimalizačními algoritmy je to, že může získat výsledky globální optimalizace, takže je smysluplné využít SA-PSO k realizaci optimalizace parametrů na základě více jízdnicích cyklů. Mezitím by systém strategie řízení energie založený na rozpoznávání vzoru řízení měl využívat optimalizované parametry. Málo studií však komplexně analyzovalo, jak kombinovat optimalizované parametry strategie řízení energie na základě rozpoznávání vzorů řízení. Kromě toho by systém strategie řízení energie založený na rozpoznávání vzorů řízení měl více zdůrazňovat vliv rozsahu nabití baterie při současném zaměření na spotřebu paliva vozidla.[2]

Aby bylo dosaženo co nejlepší spotřeby paliva, aniž by došlo ke snížení dynamického výkonu byla navržena metodika optimalizace parametrů pomocí algoritmu SA-PSO,. Parametry energetického systému a strategie řízení pro HEV jsou optimalizovány na základě více jízdnicích cyklů.[2]

7.1 Návrh řídicího algoritmu

Uvažovaný hybridní energetický systém obsahuje spalovací motor a elektromotor, které jsou spojeny pomocí hlavní spojky a každý z nich může řídit vozidlo samostatně. Elektromotor lze také použít jako generátor pro nabíjení baterie.

Jak je znázorněno na *obr. č. 24*, základní strategií řízení jsou logické prahové hodnoty založené na pravidlech, které se odkazují na několik režimů nebo stavů provozu a jejich rozhodnutí změnit režimy závisí na požadavku na zrychlení nebo zpomalení, SOC baterie a rychlosti vozidla. Aby bylo zajištěno, že motor pracuje více v oblastech s vysokou účinností, jsou koeficienty točivého momentu navrženy tak aby motor pracoval v regionech s vysokou účinností. Když je SOC baterie vyšší než dolní limit SOC_{min} a pokud je požadovaná rychlost nižší než určitá hodnota v_1 , vozidlo bude pracovat v čistě elektrickém režimu. Když je SOC baterie nižší než SOC_{min} , je pro nabití baterie vyžadován další točivý moment T_{nab} ze spalovacího motoru. Proto je navržen revidovaný EMS založený na pravidlech, jak je uvedeno v tabulce 9.



Obr. č. 24 Prahové hodnoty řízení

Tab. 9 Pravidla jízdních režimů

Jízdní režim	Vstupní podmínky	Rozdělení točivého momentu
Elektrický režim	$0 \leq T_v < T_{elmax}$, $SOC_{max} < SOC < SOC_{min}$, $v > v_1$; $T_v > T_{el}$, $SOC_{max} < SOC < SOC_{min}$, $v < v_1$	$T_v = T_{el}$ $T_{mot} = 0$
Režim dobíjení	$T_{elmax} < T_v < T_{min}$, $SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$, $v > v_1$; $0 < T_v < T_{max}$	$T_v = T_{mot} - T_{nab}$
Benzínový režim	$T_{min} < T_v < T_{mot}$ $SOC \geq SOC_{max}$ $v > v_1$	$T_v = T_{mot}$
Hybridní režim	$T_v > T_{mot}$ $SOC > SOC_{min}$ $v > v_1$	$T_v = T_{mot} + T_{el}$
Regenerativní brzdění	$T_v < 0$; $SOC < SOC_{max}$ $T_v < 0$; $SOC \geq SOC_{max}$	$T_v = T_{reg} + T_{br}$ $T_v = T_{br}$

Pro dosažení nejlepší spotřeby paliva ve skutečných podmínkách jízdního cyklu byla navržena optimalizace parametrů energetického systému a strategie řízení HEV na základě více jízdních cyklů. Použije se více typických cyklů s ohledem na vliv městského zatížení, příměstských a dálničních podmínek. Omezení dynamického výkonu vozidla jsou uvedena v tabulce 10. Příklady typů jízdních cyklů je uvedeno v tabulce 11. Parametry energetického systému vozidla jsou uvedeny v tabulce 12. Metoda optimalizace hlavních parametrů energetického systému a strategie řízení založená na více jízdních cyklech je zobecněna takto:

- (1) Předpoklad, že pro HEV se použije revidovaná strategie řízení energie založená na pravidlech.
- (2) Jsou vybrány počáteční parametry energetické soustavy a strategie řízení a jsou vybrány jejich hodnoty.
- (3) Vybrané jízdní cykly jsou sloučené do komplexního jízdního cyklu.
- (4) Současná optimalizace hlavních parametrů energetického systému a strategie řízení se provádí pomocí algoritmu SA-PSO s omezeními výkonu vozidla.

(5) Optimální energetický systém a řídicí parametry se aplikují na strategii řízení energie HEV.

Tab.10 Omezení dynamického výkonu

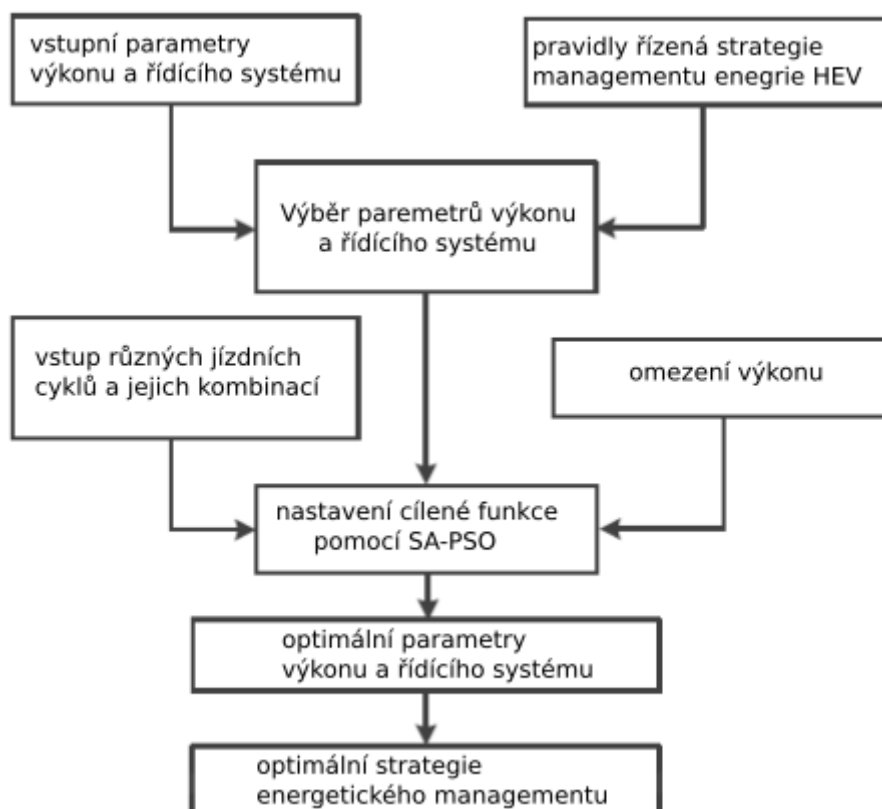
	Maximální rychlost vozidla [km/h]		Stoupání [%]
	Spalovací motor	Elektromotor	
Normální režim	160	30	0
	160	50	5
Elektrický režim	0	135	-
Sportovní režim	240	240	-

Tab.11 Vybrané jízdní cykly

Cyklus	UDC	EUDC	WLTP	HWFET	US06_HWY
Typ cyklu	Městský	Příměstský		Dálniční	

Tab.12 Původní parametry systému

Parametr	Spalovací motor	elektromotor
Výkon [kW]	147	81,2
Točivý moment [Nm]	300	320



Obr. č. 25 Diagram optimalizace ve více jízdních cyklech

Parametry energetického systému a strategie řízení jsou optimalizovány tak, aby spalovací motor a elektromotor pracovaly v regionech s vysokou účinností, za předpokladu

splnění požadavků na dynamický výkon. Variace každého konstrukčního parametru energetického systému se odhadují na přibližně 70% oproti výchozím hodnotám. Řídící parametry jsou navrženy tak, aby zajistily, že motor bude schopen pracovat v oblastech s vysokou účinností bez vzájemného ovlivňování, jak je uvedeno v tabulce 13.

Tab. 13 Návrh optimálních hodnot

Parametr	Optimální hodnota
$T_{mot}[\text{Nm}]$	220-240
$T_{el}[\text{Nm}]$	260-280
$T_{el_{max}}[\text{Nm}]$	50-100
$T_{min}[\text{Nm}]$	110-150
$T_{max}[\text{Nm}]$	180-210
$SOC_{max}[\%]$	75-90
$SOC_{min}[\%]$	15-25
$v_1[\text{km/h}]$	30-50

Aby se vyloučil vliv SOC na hodnocení spotřeby paliva ve vozidle, měla by být použita metoda korekce SOC v baterii pro korigování úspory paliva v případě, že počáteční a konečná SOC baterie nejsou během jízdního cyklu stejné. Metoda korekce spotřeby paliva pomocí SOC baterie:

$$\Delta paliva = \frac{\Delta SOC Q_{bat} U_{bat} \eta_{nab}}{\rho} \quad (13)$$

Při zohlednění charakteristik různých jízdních cyklů je cílem optimalizace parametrů energetické soustavy a strategie řízení energetického managementu dosažení souboru optimálních parametrů, aby se co nejvíce snížila spotřeba paliva, aniž by se narušil dynamický výkon. Spotřeba paliva je cílem optimalizace s omezením dynamického výkonu. Aby se předešlo nadměrným změnám SOC baterie, a zejména aby nedošlo k překročení dolní meze rozsahu SOC, je nastaven váhový koeficient $\Delta paliva$ je nastaven tak, aby při různých jízdních cyklech mohl elektromotor pohánět vozidlo sám. Funkce je následující:

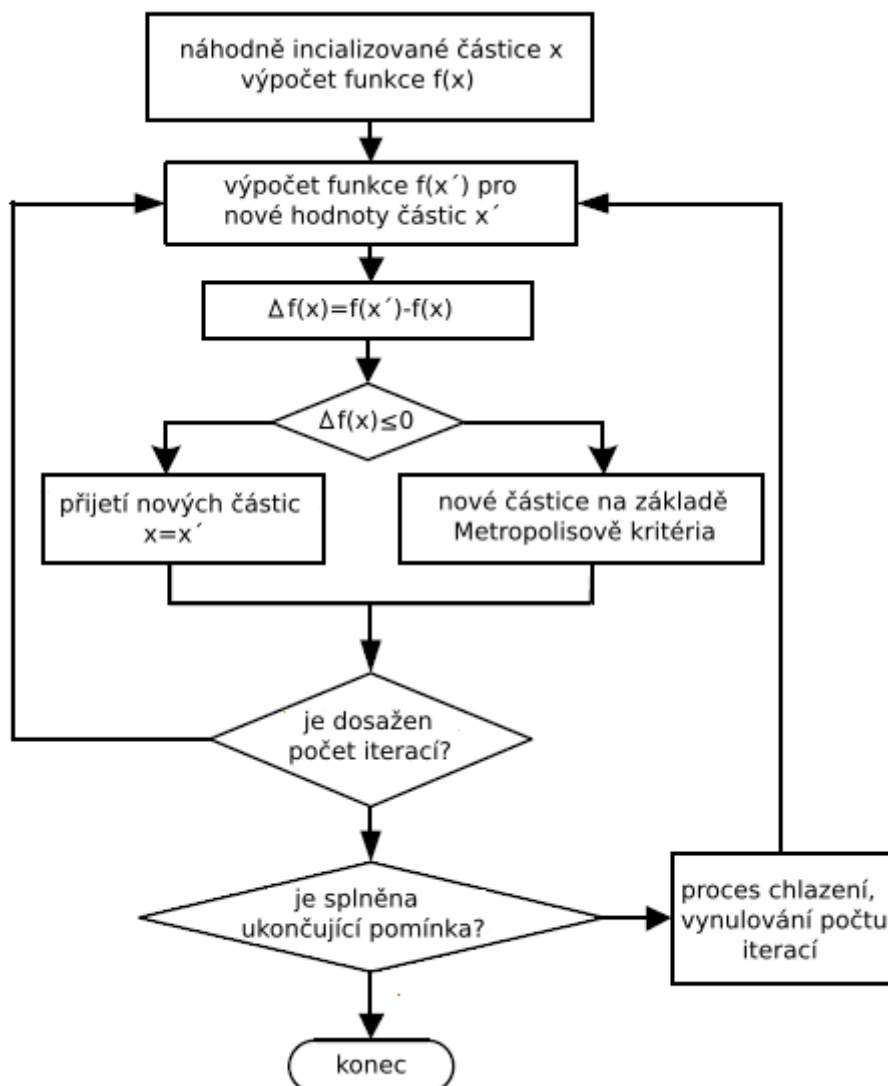
$$\text{Min} f_m(x) = \int palivo_t dt + \sum_{n=1}^p w_n |\Delta paliva_n| \quad (14)$$

Algoritmus SA-PSO je optimalizační algoritmus, který kombinuje PSO s metodou simulovaného žihání. Tato metoda má vysokou účinnost při hledání globální minimální hodnoty a vlastností, která je snadno realizovatelná, a má výhody algoritmů SA i PSO. Po nepřetržitých iteracích se roj částic přiblíží k optimálnímu řešení. Pozice a rychlosti všech částic jsou aktualizovány podle následujících vzorců:

$$v_i^{t+1} = m(t)v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (p_{gi}^t - x_i^t) \quad (15)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (16)$$

Na základě výše uvedené analýzy je kompletní vývojový diagram algoritmu SA-PSO zobrazen na obr. č. 26.



Obr. č. 26 Optimalizační model SA-PSO algoritmu

Vysvětlení podrobného postupu optimalizace parametrů SA-PSO:

Krok 1: Inicializování skupiny náhodných částic. Setrvačnost by měla být zvolena tak, aby poskytovala rovnováhu mezi globálním a místním průzkumem. Inicializace se skládá z následujících hlavních parametrů:

Počet iterací: 15; konstanty: c_1 a c_2 : nejčastěji $c_1=c_2=2$; náhodné parametry r_1 a $r_2 \in [0,1]$; počáteční teplota T : 6000 °C; konečná teplota T_0 : 0,05 °C; koeficient ochlazení K : 0,9.

Krok 2: Vypočítání a aktualizování funkce $f(x)$ všech částic. Určete p_i^t a p_{gi}^t aktuálního kroku. Aktualizování nové rychlosti a polohy každé částice podle rovnic (15) a (16).

Krok 3: Vypočítejte rozdíl mezi optimální a neoptimální funkční hodnotou $\Delta f(x)$. Přijměte

optimální řešení, pokud $\Delta f(x)$ je větší než 0, jinak vygenerujte náhodné číslo $r(0, 1)$.

Krok 4: Zavedení simulovaného žihacího mechanismu. Zastavte program a vydejte optimální řešení, pokud jsou splněna konvergenční kritéria, jinak proveďte proces žihání a příkaz $T = K \times T$.

Závěr

Dle výsledků simulace můžeme vidět, že model HEV se velmi blíží reálnému vozidlu. Maximální rychlost modelu je pouze o 2,9 km/h odlišná od rychlosti skutečného vozidla. To je nejspíše způsobeno nepřesnou hodnotou účinnosti regenerativního brždění nebo parametry modelů ztrát motorů a hlačích ústrojí. Mnohem důležitějším parametrem vozidla než jeho maximální rychlost je ale jeho spotřeba. Model se jen velmi těsně nevešel do rozmezí spotřeby udávané výrobcem se spotřebou 1,72 l/100km při vhodném pracovním bodě spalovacího motoru. Pokud by vozidlo nemělo systém rekuperace energie, stoupla by jeho spotřeba na 2,51 l/100km. Bohužel takovéto testy neodráží skutečnou spotřebu, jelikož by vozidlo muselo jezdit pouze na elektrickou energii s omezeným dojezdem a výkonem. Následně by musela být baterie dobíjena pouze pomocí spalovacího motoru. Proto byl model podroben dalším testům v podobě různých jízdních režimů. Z výsledků těchto testů v tabulkách 6 a 8 z pohledu na vypouštěné emise vozidlem nejlépe vychází nejlépe jízda, kde se spalovací motor spouští až v rychlostech nad 65 km/h.

Seznam literatury

- [1] ZHANG, Xi, MI, Chris. *Vehicle power management*. New York: Springer London Dordrecht Heidelberg, 2011. 346 s. ISBN 978-0-85729-735-8
- [2] ZHENZHEN, Lei a spol. *A Dynamic Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Parameter Optimization for Multiple Driving Cycles and Driving Pattern Recognition*. China, 2017. 20 s.
- [3] Osm technologií pro úspornější vozidla. [online]. Poslední změna 14.4.2014 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/1371>
- [4] Gyrobus. [online]. Poslední změna 5.1.2020 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gyrobus>
- [5] How does the Lead Acid Battery Work?[online]. Poslední změna 30.5.2019 [cit. 1.6.2020]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries
- [6] How does a supercapacitor work?[online]. Poslední změna 17.4.2019 [cit. 1.6.2020]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor
- [7] Types of Lithium-ion. [online]. Poslední změna 10.7.2019 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [8] Lithium-polymer: Substance or Hype? [online]. Poslední změna 31.7.2017 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: https://www.automobile-catalog.com/car/2020/2919245/ds_7_crossback_e-tense_4x4.html
- [9] 2020 DS 7 Crossback E-Tense 4x4 (aut. 8). [online]. Poslední změna 1.6.2020 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype
- [10] Regenerativní brzdění. [online]. Poslední změna 1.6.2020 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/regenerativni-brzdeni/>
- [11] Working Of Hybrid Cars. [online]. Poslední změna 1.6.2020 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/working-of-hybrid-cars>
- [12] How Hybrid Cars Work. [online]. Poslední změna 20.7.2000 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/hybrid-car2.htm>
- [13] The different driving cycles. [online]. Poslední změna 1.6.2020 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: <https://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/>
- [14] New European Driving Cycle. [online]. Poslední změna 26.3.2020 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle
- [15] Measuring fuel consumption and CO2 emissions of phev's. [online]. Poslední změna 28.7.2017 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-PHEV_ICCT-Briefing-Paper_280717_vF.pdf
- [16] Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. [online]. Poslední změna 4.4.2014 [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf

Přílohy na CD

Model vybraného vozidla v prostředí MATLAB/Simulink