



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Pohonná jednotka hybridního vozidla

Hybrid vehicle propulsion

bakalářská práce

Autor práce:	Petr Kohel
Vedoucí práce:	Ing. Vojtěch Klír, Ph.D.
Akademický rok:	2015/2016
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor:	Studijní program je bezoborový

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kohel** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **420493**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Pohonná jednotka hybridního vozidla

Název bakalářské práce anglicky:

Hybrid vehicle powertrain

Pokyny pro vypracování:

1. Uveďte přehled hybridních pohonných ústrojí 2. Zpracujte rešerši pohonných jednotek používaných v stávajících hybridních vozidlech 3. Na základě zjištěných poznatků proveďte srovnání hybridního pohonného ústrojí s planetovým děličem toku výkonu s uspořádáním, které využívá pohonnou jednotku jako prodlužovač dojezdu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vojtěch Klír Ph.D.

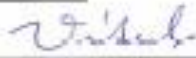
Jméno a pracoviště konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2016** Termín odevzdání bakalářské práce: **30.06.2016**

Platnost zadání bakalářské práce:



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

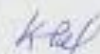


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

21.4.2016

Datum převzetí zadání



Podpis studenta(ky)



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Byl jsem seznámen s mými právy a povinnostmi, které mi ukládá zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském podle § 60 vztahující se na školní díla.

Datum.....

.....

Petr Kohel



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat celé své rodině za oporu a pochopení během mého dosavadního studia. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat také vedoucímu své práce, panu Vojtěchu Klírovi, za jeho cenné rady a připomínky po celou dobu psaní práce. Velký dík také patří všem mým známým a přátelům.

ANOTACE

Tato práce se zabývá zpracováním rešerše používaných hybridních pohonných ústrojí se zaměřením na používané pohonné jednotky a akumulátory. Krátké pojednání je věnováno metodám určování spotřeby vozidla a velikosti jízdních odporů. Na základě zjištěných poznatků je provedeno srovnání dvou nejpoužívanějších hybridních uspořádání z hlediska spotřeby energie. Jedná se o uspořádání s děličem toku výkonu a uspořádání, které používá pohonnou jednotku jako prodlužovač dojezdu.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with research processing of used hybrid propulsions, with focus on used internal combustion engines and batteries. Short part is dedicated to the methods of determining fuel consumption and size of vehicle resistance forces. The comparison of two most used hybrid propulsions is made in terms of fuel consumption, based on previously learned knowledges. It is about propulsion, which use planetary power split device and propulsion, which use internal combustion engine like a range extender.

Obsah:

1.	Cíl bakalářské práce	7
2.	Definice hybridního vozidla.....	7
3.	Historie vozidel s hybridním pohonem	8
4.	Koncepce hybridních automobilů	10
4.1	Dělení hybridních vozidel podle stupně hybridizace	10
4.1.1	Micro hybrid.....	10
4.1.2	Mild hybrid	11
4.1.3	Full hybrid.....	11
4.1.4	Plug-in hybrid.....	12
4.1.5	Hybridní elektromobil.....	12
4.1.6	Range extender.....	12
4.2	Dělení hybridních vozidel podle uspořádání pohonných prvků.....	13
4.2.1	Sériové uspořádání	13
4.2.2	GM Voltec.....	14
4.2.3	Audi A1 e-tron	21
4.2.4	BMW i3 REx.....	22
4.2.5	Paralelní uspořádání	23
4.2.6	Integrated Motor Assist (IMA)	24
4.2.7	Kombinované uspořádání.....	25
4.2.8	Hybrid Synergy Drive	26
4.3	Srovnání používaných pohonných jednotek	32
4.4	Srovnání používaných akumulátorů.....	32
4.4.1	Lithium – iontové akumulátory (Li-Ion)	32
4.4.2	Nikl – metal hydridové akumulátory (Ni-MH)	32
4.4.3	Nikl - kadmiové akumulátory	33
4.4.4	Srovnání hlavních parametrů baterií	33
5.	Metody určování spotřeby energie při provozu vozidla.....	34
6.	Přímé srovnání reálných pohonných ústrojí z hlediska velikosti jízdních odporů.....	35
7.	Simulace jednotlivých pohonných ústrojí v programu Matlab Simulink.....	37
7.1	Simulace uspořádání s děličem toku výkonu	37
7.2	Simulace uspořádání s prodlužovačem dojezdu.....	39
8.	Závěr	42
9.	Seznam použité literatury.....	43
10.	Seznam obrázků	45
11.	Seznam tabulek	45

1. Cíl bakalářské práce

Hybridní pohony jsou dynamicky se rozvíjející obor, který bude nepochybně v následujících letech získávat na čím dál větší důležitosti. Důvodů je hned několik. Především je to však tlak úřadů na snižování emisí současných vozidel, který neustále nutí výrobce hledat nové cesty, jak se s tímto tlakem vypořádat. Jednou z cest je použití hybridního pohonu. U hybridního pohonu je například možné naladit spalovací motor tak, aby pracoval pouze v ideálním pracovním bodě a tím výrazně snížit emise i spotřebu. Hlavní nevýhodou současných hybridních vozidel je však zatím vysoká cena oproti konvenčním automobilům poháněným spalovacím motorem. Alespoň jedno vozidlo s hybridním pohonem má dnes v nabídce již většina automobilek. Tuzemská automobilka Škoda plánuje uvést na trh svůj první model s hybridním pohonem v roce 2019.

Bakalářská práce si klade za cíl zpracovat rešerši v dnešní době používaných hybridních systémů v automobilech. Na základě zjištěných poznatků pak bude provedeno srovnání dvou nejpoužívanějších hybridních ústrojí – pohonného ústrojí s planetovým děličem toku výkonu a ústrojí, které používá spalovací motor jako prodlužovač dojezdu.

2. Definice hybridního vozidla

Hybridním vozidlem se rozumí takové vozidlo, které kombinuje pro pohon dva a více zdrojů energie. Nejčastěji se jedná o kombinace pohonu pomocí spalovacího motoru, elektromotoru a akumulátoru, palivového článku a setrvačnicku. Dnes se nejčastěji používá kombinace spalovacího motoru, elektromotoru a akumulátoru.

3. Historie vozidel s hybridním pohonem

Ač se může zdát, že hybridní vozidla jsou doménou přelomu 20. a 21. století, tak to není pravda. S myšlenkou na hybridní pohon přišel už v 17. století vlámský jezuitský kněz působící v Číně. Ten vytvořil plány na malý parní povoz pro čínského císaře, který mohl být kromě parního pohonu také tažen koňským spřežením. Není však jasné, zda se tento vynález dočkal realizace.

První hybridní vozidlo takové koncepce, jakou známe dnes, vzniklo už v roce 1900. Jeho vynálezce byl konstruktér českého původu Ferdinand Porsche a jednalo se o automobil zvaný Lohner-Porsche Semper Vivus. Porsche však pro společnost Lohner nejprve zkonstruoval o dva roky dříve elektromobil, který byl revoluční především svým uložením elektromotorů do nábojů kol. Po tomto modelu následovala ještě závodní verze, která měla elektromotory zabudované v nábojích všech kol. Tato verze byla nejen prvním vozem s pohonem všech kol na světě, ale také prvním vozem s brzdami na všech čtyřech kolech.

Po úspěších těchto vozidel na mezinárodních výstavách se Porsche rozhodl zkombinovat elektrický pohon se spalovacím motorem. Tehdy vzniklo vozidlo zvané Semper Vivus. V dnešní době bychom takovou koncepci pohonu označili jako sériovou. Uprostřed vozu se nacházeli dva zážehové jednoválcové motory DeDion Bouton o výkonu 2,6 kW, které poháněly dynamo o výkonu 1,84 kW. Elektřina z dynam pak přímo poháněla dva motory umístěné v nábojích předních kol. Přebytková energie se ukládala do baterií. Bonusem dynam bylo, že se daly použít jako startéry spalovacích motorů. V praxi se však toto vozidlo potýkalo s množstvím problémů, z nichž největší byla velká hmotnost, která se blížila k sedmácti stům kilogramům a problematická synchronizace činnosti motorů, akumulátoru a generátorů. Porsche proto přišel v roce 1901 s přepracovaným konceptem, nazvaným Mixte. Zde už Porsche použil výkonný, vpředu uložený čtyřválcový motor o výkonu 18 kW. Motor pak opět poháněl generátor, který byl uložený pod sedadly. Generátor mohl být, stejně jako u Semperu, použit ke startování spalovacího motoru. Aby snížil hmotnost, snížil Porsche kapacitu baterií. Na rozdíl od prvního konceptu se Mixte dostalo do sériové výroby, ale nemělo velký prodejní úspěch, který byl zaviněn především vysokou cenou. Později vznikla ještě verze s pohonem všech čtyř kol, která dosahovala na tu dobu neuvěřitelné rychlosti 110 kilometrů v hodině. [1]



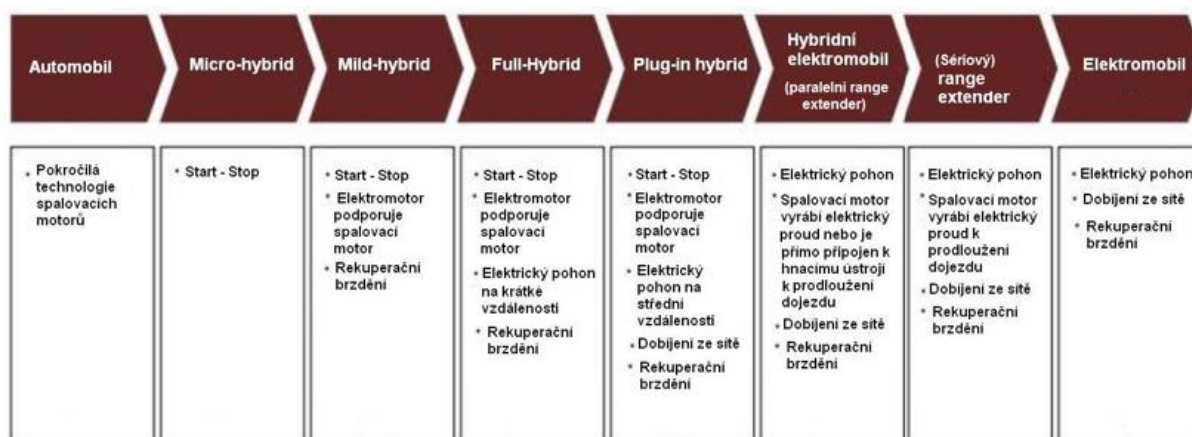
Obrázek 1: Lohner Porsche - Semper Vivus [1]

Přestože v té době vzniklo ještě několik konceptů hybridních vozidel, tak zlevňování ropy a současný vývoj spalovacích motorů na dlouhou dobu vytlačily hybridní pohony do pozadí. Trvalo bezmála 70 let, než se znovu začaly hybridní pohony do vozidel vracet. Například automobilka Audi přišla v roce 1989 s modelem Duo, který měl standardní přední pohon spalovacím motorem, ale disponoval navíc samostatným pohonem zadní nápravy pomocí elektromotoru o výkonu 12,5 k. Většího úspěchu se tento vůz nedočkal. Revoluci v tomto ohledu způsobila až automobilka Toyota, která přišla v roce 1997 s modelem Prius. [2]

4. Koncepce hybridních automobilů

Hybridní vozidla rozlišujeme podle dvou hledisek. Prvním hlediskem je dělení podle stupně hybridizace. Jedná se dělení podle pomyslné stupnice, kdy na jedné straně stojí vozidlo s konvenčním pohonem pomocí spalovacího motoru a na druhé straně ryzí elektromobil. Stupeň hybridizace pak vyjadřuje, v jaké poměru se jednotlivé zdroje energie podílejí na pohonu. Druhým hlediskem je pak dělení podle uspořádání pohonných prvků vozidla. Zde rozlišujeme vozy se sériovým, paralelním a kombinovaným uspořádáním.

4.1 Dělení hybridních vozidel podle stupně hybridizace



Obrázek 2: Úplné rozdělení hybridů podle stupně hybridizace [3]

4.1.1 Micro hybrid

Jedná se spíše o marketingový výraz. Nejedná se přímo o hybridní systém, protože elektromotor neslouží k pohonu vozidla. Automobil, označovaný jako micro hybrid, má pak zesílené elektrické příslušenství (alternátor, startér, baterie) a je navíc vybaven systémem start-stop. Takové vozidlo vypíná motor při dojezdu a zastavení. Pokud je ale v chodu hlavní spalovací motor, nedodává žádný dodatečný výkon.

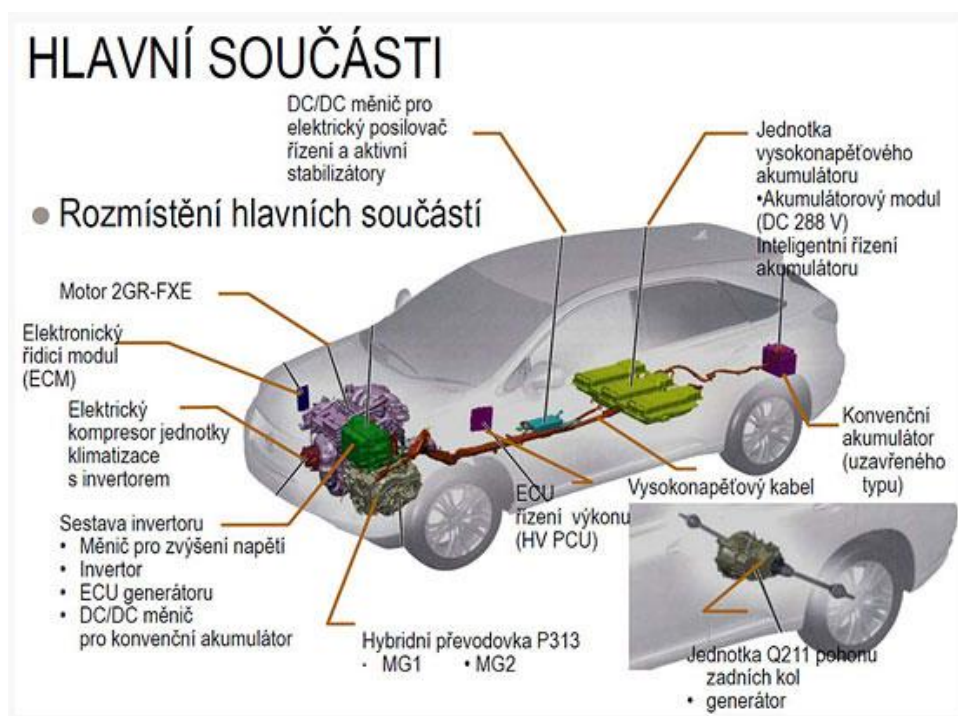
Systémem start-stop je dnes vybavena většina nových automobilů na evropském trhu. Při měření emisí podle v současné době platného jízdního cyklu NEDC (New European Driving Cycle) lze zaznamenat, při použití systému start-stop, výrazné snížení spotřeby paliva a emisí.

4.1.2 Mild hybrid

Takzvaný mírně asistovaný hybrid. Hlavní pohonnou jednotkou je spalovací motor. Integrovaný elektromotor je schopen dodávat energii odpovídající až 10 % celkového výkonu spalovacího motoru. Elektromotor podporuje spalovací motor, když nepracuje s optimální účinností, jako například při zrychlování a při vysokých výkonech. Mild hybrid je obvykle také vybaven systémem start-stop a funkcí regenerativního brzdění. Spotřeba mild hybridu je nižší než spotřeba vozu se spalovacím motorem. Zástupci mild hybridů na trhu jsou například vozy Honda vybavené systémem IMA, BMW ActiveHybrid 7 nebo také Ferrari LaFerrari.

4.1.3 Full hybrid

Takové vozidlo může být poháněno buď pouze spalovacím motorem, pouze elektromotorem nebo kombinací obou. Proto musí být vozidlo vybaveno děličem výkonu. Elektrický pohon je využíván k rozjezdu a v pomalých rychlostech. Ve vyšších rychlostech se automaticky připojí spalovací motor, který může být podporován elektromotorem (v případě další akcelerace). Tato vozidla jsou běžně vybavena systémem regenerativního brzdění, který slouží k dobíjení vysokonapěťového akumulátoru. Typické vozidlo této kategorie je Toyota Prius a Lexus RX 450h.



Obrázek 3: Schéma typického full hybridu - vozu Lexus RX 450h [7]

4.1.4 Plug-in hybrid

Jedná se o normální full hybrid, který je ale možné dobíjet z veřejné sítě. Takový automobil má navíc oproti full hybridu mnohem větší dojezd na elektřinu, řádově v desítkách kilometrů. Díky větší kapacitě akumulátoru má také výrazně nižší spotřebu a emise při městském provozu.

Dnes má plug-in hybrid v nabídce skoro každá větší automobilka. Namátkou se jedná o modely Toyota Prius plug-in, VW Golf GTE, Volvo V60 plug-in, BMW i8 a mnohé další.

4.1.5 Hybridní elektromobil

Jinými slovy také paralelní range extender. Jedná se o vozidlo, které je primárně poháněno elektrickou cestou a lze jej dobíjet z veřejné sítě. Spalovací motor pohání jak generátor pro výrobu elektrické energie, tak jej lze také pevně spojit s poháněnou nápravou. Toto vozidlo je vybaveno planetovým děličem toku výkonu. Kapacita akumulátoru je výrazně vyšší než u běžného plug-in hybridu.

Typickým zástupcem této kategorie je Chevrolet Volt se svým systémem Voltec, který je popsán níže.

4.1.6 Range extender

Jako jediný ze všech výše popsaných typů, je range extender, jinak také nazývaný sériový range extender, poháněný výhradně elektrickou energií. Spalovací motor zde pouze pohání generátor elektrického proudu, který následně nabíjí akumulátor. Vlastnosti range extenderu odpovídají vlastnostem sériově uspořádaných hybridů, popsaným v kapitole 4.2.1.

Zvláštní kategorií jsou tzv. externí range extendery. Jedná se o klasické elektromobily, které mají spalovací motor – range extender připojen externě, například ve formě přípojného zařízení. Takové zařízení předvedla na letošním ženevském autosalonu společnost EP Tender.



Obrázek 4: Externí range extender EP Tender [8]

4.2 Dělení hybridních vozidel podle uspořádání pohonných prvků

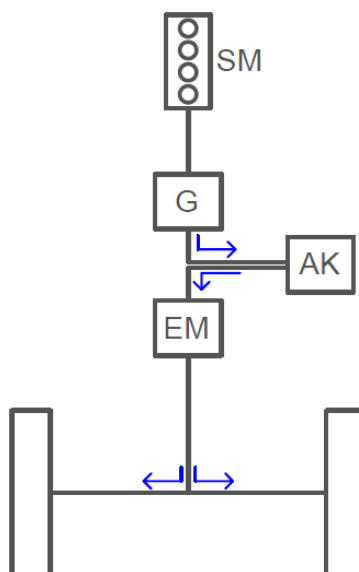
4.2.1 Sériové uspořádání

Jednotlivé komponenty sériového hybridního vozidla jsou zapojeny sériově, tedy za sebou. Vozidlo je podobně jako elektromobil poháněno výhradně elektromotorem. Pro pohon je možné použít i více elektromotorů a umístit je například do nábojů kol (viz Porsche a jeho Semper Vivus). Spalovací motor zde není určen pro pohon, není přímo spojen s poháněnou nápravou. Jeho jedinou funkcí je pohon generátoru, který vzniklým proudem buď přímo roztáčí elektromotor, nebo nabíjí akumulátor. Akumulátor je výrazně menší než u klasického elektromobilu. Tento typ vozidla se také označuje jako REEV – Range-Extended Electric Vehicle, v překladu elektromobil s prodlužovačem dojezdu. Podle předchozího dělení bychom tato vozidla označili jako hybridní elektromobily a range extendery.

Hlavní výhodou sériového uspořádání je to, že spalovací motor není přímo určen pro pohon. Je možné ho proto naladit tak, aby fungoval pouze ve velmi úzkém rozsahu otáček, kdy má nejideálnější pracovní charakteristiky a nejvyšší účinnost. Lze dosáhnout teoretické účinnosti až 37 %, zatímco v běžných autech se účinnost spalovacího motoru pohybuje kolem 20 %.

Nevýhodou je především vícenásobná přeměna energie. Mechanická účinnost mezi spalovacím motorem a hnanou nápravou je maximálně 55 %.

Ve srovnání s paralelním uspořádáním má vyšší účinnost při pomalé jízdě po městě, ve větších rychlostech je naopak účinnější paralelní pohon.



Obrázek 5: Schéma typického sériového hybridního ústrojí [6]

4.2.2 GM Voltec

Voltec je systém vyvinutý v roce 2010 americkou společností General Motors. V současné době se používá již druhá generace tohoto systému ve vozidle Chevrolet Volt.

Systém Voltec je označován sériový plug-in hybrid, nebo také hybridní elektromobil. Hlavními komponenty jsou spalovací motor, elektrická pohonná jednotka a baterie. O přenos výkonu se stará, podobně jakou u systému Hybrid Synergy Drive popsaném níže, planetový dělič toku výkonu, který je integrovaný v elektrické pohonné jednotce.

Spalovací motor zde slouží jako tzv. prodlužovač dojezdu. Jedná se o motor z rodiny GM Small Gasoline Engines (malé benzínové motory). Tyto motory jsou konstruovány s ohledem na co největší výkon v malém a lehkém balení. Jejich blok i hlava jsou vyrobeny ze slitin hliníku. Blok motoru má otevřenou konstrukci s vložkami válců o tloušťce stěny pouze 1,5 mm. Tento motor má přibližně o 20 % vyšší výkon než motor použitý v první generaci systému Voltec. Zajímavostí je, že motor první generace pracoval pouze s prémiovým vysokooktanovým palivem, zatímco aktuální motor již používá běžné palivo.

Hybridní pohony vozidel

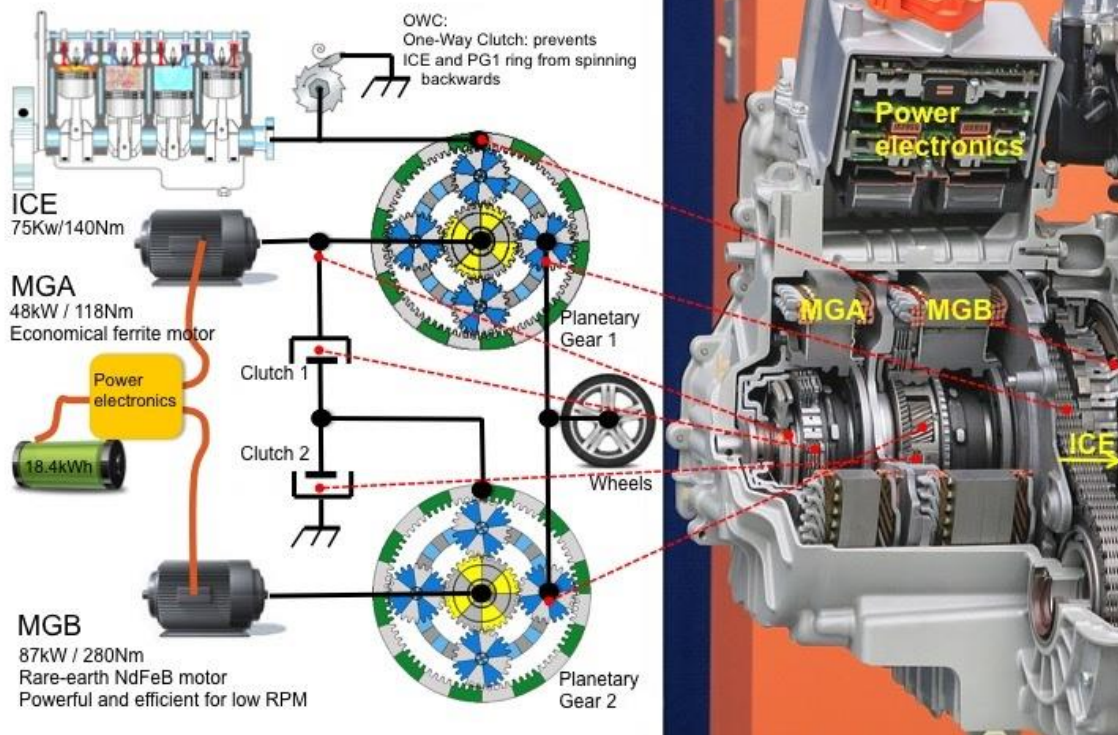
Typ	atmosféricky plněný zážehový řadový čtyřválec
Objem	1490 cm ³
Rozvod	DOHC, 16 ventilů
Kompresní poměr	12,5:1
Vrtání x zdvih	74 mm x 86,6 mm
Max. výkon	75 kW v 5600 ot./min
Max. točivý moment	140 Nm v 4300 ot./min

Tabulka 1: Parametry spalovacího motoru systému Voltec [11]

Elektrická pohonná jednotka se skládá ze dvou třífázových synchronních elektromotorů s permanentními magnety a planetových děličů toku výkonu. Primární elektromotor B má výkon 87 kW a neodymové (NdFeB) magnety na rotoru. Sekundární elektromotor A má výkon 48 kW a feritové magnety na motoru. Oproti první generaci, druhá generace systému Voltec může v elektrickém módu pohánět vozidlo současně oběma elektromotory. Díky tomu bylo možné snížit výkon, a tím i velikost motorů, přestože maximální výkon v elektrickém módu narostl. Voltec používá dva planetové děliče. Výkon elektromotorů je přiváděn na planetová kola jednotlivých planetových děličů. Výstupní hřídel spalovacího motoru je pak spojen s korunovým kolem děliče spojeného s motorem A. Výkon posílaný na poháněnou nápravu je odebírán z jednotlivých unašečů. Nezbytnou součástí jsou také tři spojky. Spojka (clutch) 1 po sepnutí spojí mechanicky planetové kolo na prvním planetovém děliči (planetary gear) a jeho motor MGA s korunovým kolem druhého planetového děliče. Spojka 2 po sepnutí spojí korunové kolo druhého planetového děliče s klecí pohonné jednotky, tím pádem zablokuje jeho otáčení. Jednosměrná spojka OWC (one-way clutch) umístěná mezi spalovacím motorem a prvním planetovým děličem umožňuje rotaci pouze v jednom směru. Zabraňuje tedy zpětné rotaci klikové hřídele motoru.

NEW 2016 VOLTEC

Based on US patent 8,602,938 + GM SAE presentation

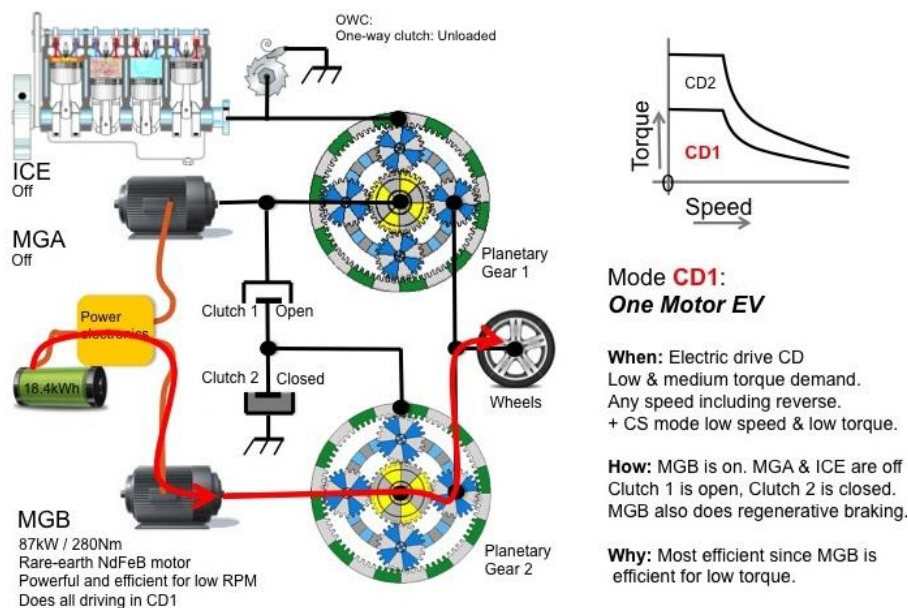


Obrázek 6: Schéma druhé generace systému GM Voltec [9]

Druhá generace Voltecu disponuje baterií s kapacitou 18,4 kWh. Nová baterie je složena z méně článků s vyšší kapacitou a celkově je také lehčí. To vše při vyšší kapacitě oproti předchozí generaci. Díky tomu se zvýšil dojezd v elektrickém režimu až na 85 km.

Režimy pohonného ústrojí:

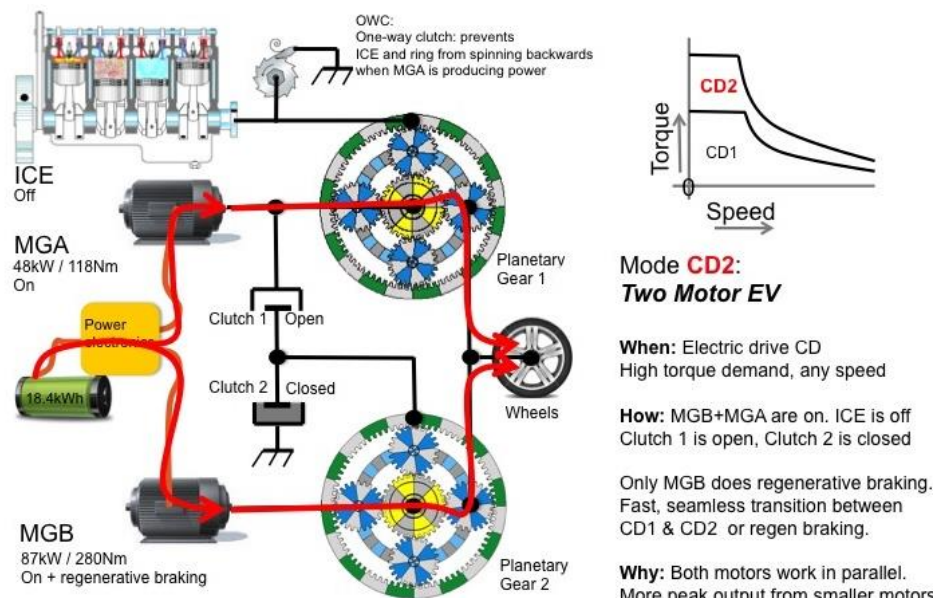
One motor EV mode (elektrický režim – jeden motor)



Obrázek 7: Režim one motor EV mode [9]

V tomto režimu pohání vozidlo pouze výkonnější motor MGB, zatímco motor MGA a spalovací motor jsou vypnuty. Spojka 1 je rozepnutá a spojka 2 sepnutá. Jedná se proto o pohon s pevným převodem. Uplatňuje se při nízkých a středních hodnotách krouticího momentu. Tento režim obstarává i couvání.

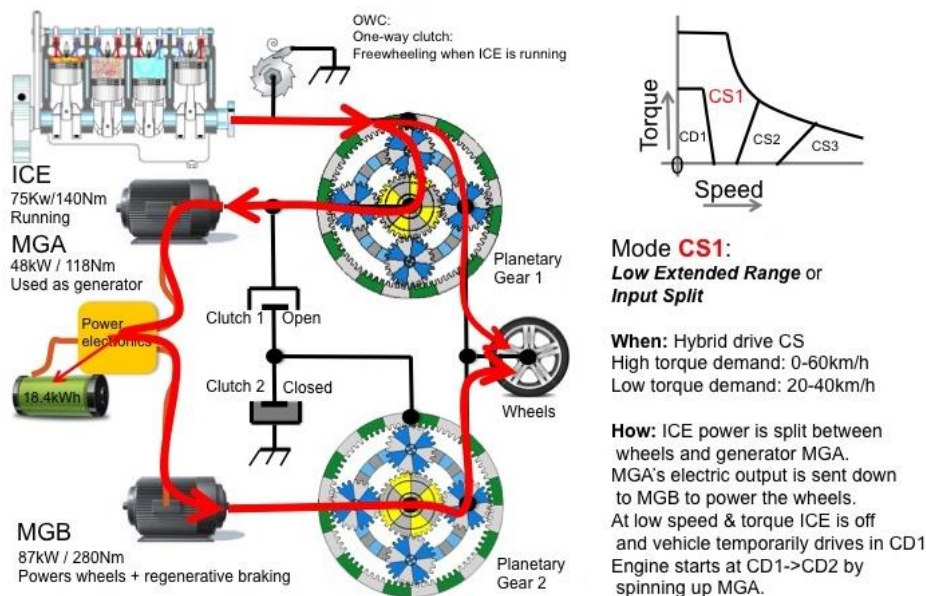
Two motor EV mode (elektrický režim – dva motory)



Obrázek 8: Režim two motor EV mode [9]

Pokud je potřeba vyšší krouticí moment, zapne druhý elektromotor MGA. Korunové kolo prvního planetového děliče je zablokováno spojkou OWC. Oba planetové děliče tedy fungují jako reduktory s pevným převodovým poměrem.

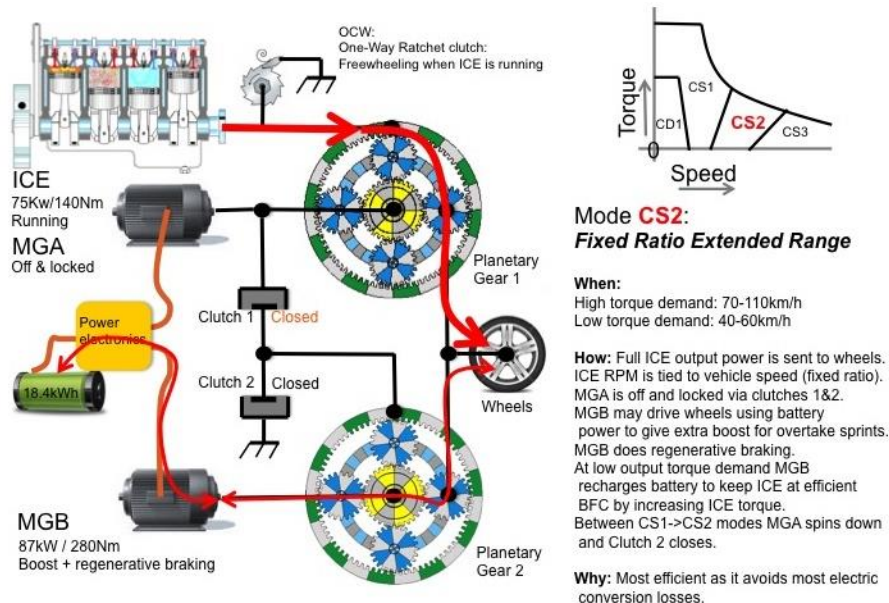
Low extended range mode (režim prodloužení dojezdu – slabý)



Obrázek 9: Režim low extended range [9]

V tomto režimu již dojde k nastartování spalovacího motoru, jehož výkon je mechanicky dělen mezi přímý pohon vozidla a pohon motoru MGA. Motor MGA zde funguje jako generátor, kdy vzniklým proudem přímo pohání motor MGB. Při malém krouticím momentu pracuje tento režim v rychlostech 20 – 40 km/h, při vyšším krouticím momentu pracuje již od nulové rychlosti až do 60 km/h. Při nízkém krouticím momentu a rychlosti se spalovací motor vypne a vůz přejde do režimu elektrického pohonu jedním elektromotorem.

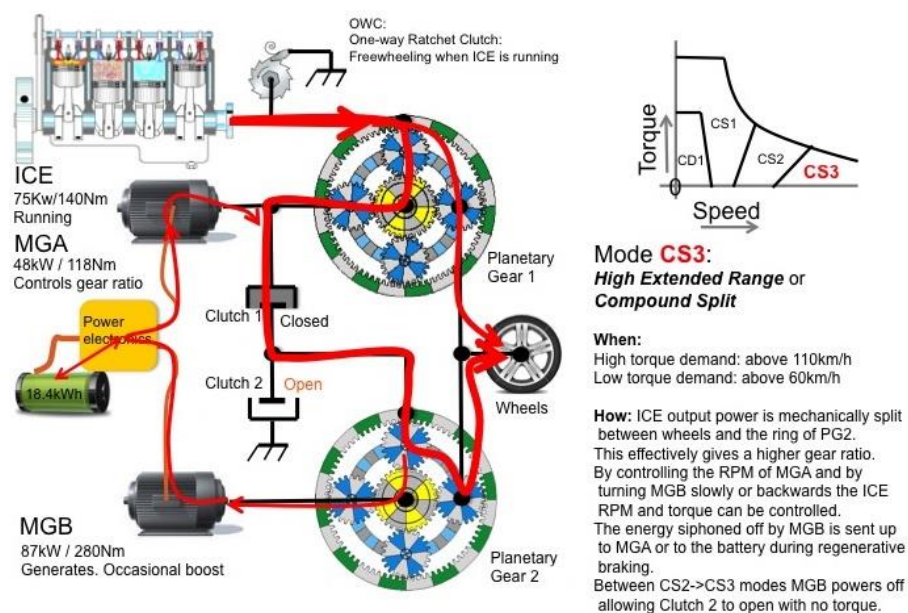
Fixed ratio extended range mode (režim prodloužení dojezdu – s pevným převodovým poměrem)



Obrázek 10: Režim fixed ratio extended mode [9]

V tomto režimu je sepnuta spojka 1 a díky tomu je veškerý výkon spalovacího motoru poslán na poháněnou nápravu. Opět se, podobně jako při elektrickém pohonu, jedná o pohon s pevným převodovým poměrem. MGB se může chovat jako elektromotor a dodávat přídatný výkon, například při předjíždění. Při nízkých hodnotách krouticího momentu, kdy spalovací motor nepracuje s optimální účinností, se však chová jako generátor a dobíjí baterii. Tím musí dojít ke zvýšení výkonu, a v tomto případě i ke zlepšení účinnosti při zachování totožné rychlosti. Při malém krouticím momentu pracuje tento režim v rychlostech 40 – 60 km/h, při vyšším krouticím momentu pracuje v rychlostech 70 – 110 km/h. Celkově pracuje tento režim s nejlepší účinností, protože jsou minimální ztráty při přenosu elektrické energie.

High extended range mode (režim prodloužení dojezdu – silný)

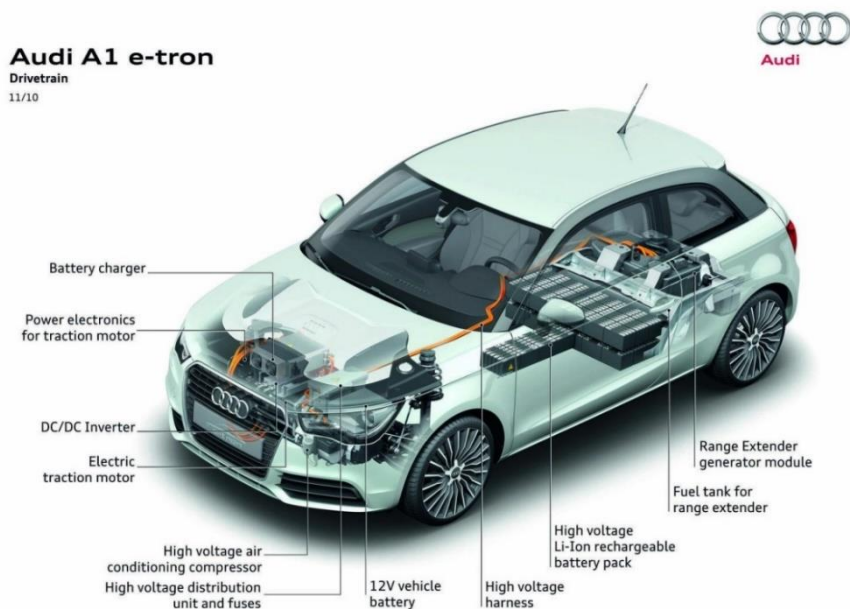


Obrázek 11: Režim high extended mode [9]

Při rychlostech nad 60 km/h při nízkém a rychlostech nad 110 km/h při vysokém krouticím momentu se rozeptne spojka 2. Díky tomu je výkon spalovacího motoru mechanicky dělen mezi přímým pohonem vozidla a pohonem korunového kola druhého planetového děliče.

4.2.3 Audi A1 e-tron

Audi A1 e-tron je koncept městského vozidla představený v roce 2010 na autosalonu v Ženevě. Jedná se o sériový range extender, který na rozdíl od koncepce GM Voltec nemá spalovací motor přímo spojen s poháněnou nápravou.



Obrázek 12: Schéma pohonného ústrojí vozu Audi A1 e-tron [12]

O pohon předních kol se stará příčně uložený synchronní elektromotor o maximálním výkonu 75 kW (102 k) a trvalém výkonu 45 kW (61 k). Maximální točivý moment je 240 Nm, trvalý 150 Nm. Motor je napájen lithium-iontovými akumulátory s kapacitou 12 kWh. Akumulátory jsou uloženy pod zadními sedadly ve tvaru písmene T. Pokud poklesne energie pod určitou úroveň, automaticky se nastartuje spalovací motor pohánějící generátor.

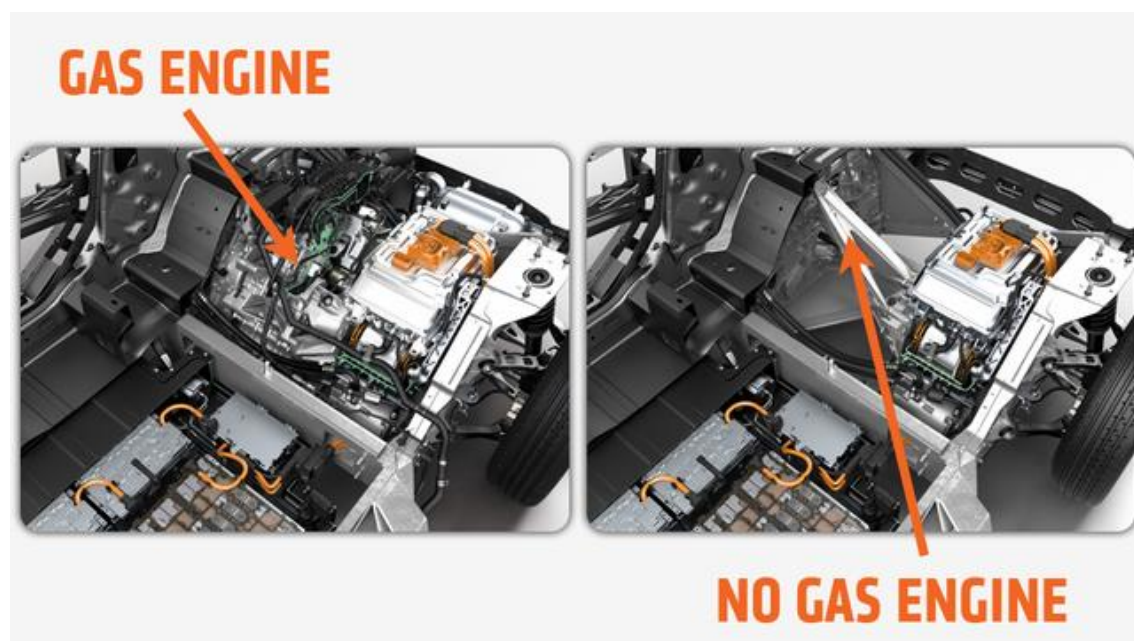
Spalovací motor má neobvyklou konstrukci, jedná se o motor s jedním rotačním pístem typu Wankel. Motor má objem 254 cm³ a výkon 15 kW (20k) a je uložen v kompaktní jednotce pod podlahou zavazadlového prostoru. Tato kompaktní jednotka zahrnuje samotný motor, generátor, chladicí, sací a výfukovou soustavu a váží pouze 70 kg. Jediný prvek mimo tuto jednotku je nádrž na 12 litrů paliva.

Dojezd vozidla bez zapojení generátoru je 50 km, s pomocí range extenderu stoupne dojezd až na 250 km. Dobíjení akumulátorů se také částečně řídí údaji ze satelitní navigace, kdy si vozidlo samo před náročnými úseky automaticky začne akumulátory dobíjet.

V roce 2013 automobilka oznámila vylepšení původního konceptu, jednalo se především o navýšení výkonu jednotlivých komponent. Maximální výkon elektromotoru stoupl ze 102 koní na 115 a maximální točivý moment narostl na hodnotu 300 Nm. Kapacita akumulátorů vzrostla na 13,3 kWh. Objem motoru narostl na 354 cm³ a jeho výkon je teď 34 koní. Stále se ale jedná o prototyp, u kterého není jasné, zda se dostane do sériové výroby. [13]

4.2.4 BMW i3 REx

BMW i3 je malý elektromobil, který může být volitelně vybaven prodlužovačem dojezdu. Taková varianta je pak označena přívlakem REx. Koncept tohoto vozidla byl představen v roce 2011 a do sériové výroby se vozidlo dostalo v roce 2013. Podle metodiky agentury EPA je elektromobil BMW i3 nejúčinnější vozidlo ve své třídě, s odhadovanou spotřebou elektrické energie 13,8 kWh/100km. Toho bylo dosaženo velmi nízkou hmotností celého vozu a především lehkou karoserií, která je z velké části vyrobena z kompozitních materiálů. [19]



Obrázek 13: Zástavba modulu s prodlužovačem dojezdu [21]

O pohon zadní nápravy se stará synchronní elektromotor o výkonu 125 kW (170k) a krouticím momentu 250 Nm. Elektromotor váží pouze 50 kg a je přes jednostupňovou převodovku s převodovým poměrem 9,7 spojen s poháněnou nápravou. Pod podlahou uložený lithium-iontový akumulátor má kapacitu 22 kWh a hmotnost 230 kg.

Elektromobil i3 má teoretický dojezd až 190 km, reálný dojezd je však 130 km. Při osazení vozidla prodlužovačem dojezdu sice dojde k navýšení hmotnosti z 1195 kg na 1315 kg, ale dojezd se zvýší až na teoretických 300 km. V reálném provozu je ale udávaný dojezd 200 km. Jedná se vlastně o řadový dvouválcový spalovací motor, použitý ve skútru BMW C650 GT. Pokud množství energie uložené v akumulátoru klesne pod 6 % své maximální kapacity, dojde k automatickému nastartování pohonné jednotky, která začne pohánět generátor. Už při poklesu energie v bateriích na 75 % maximální hodnoty je ale možné prodlužovač dojezdu nastartovat manuálně. Ten pak se automaticky vypíná při zpomalení pod 24 km/h. Automatické vypnutí je podmíněno množstvím alespoň 3 % energie v baterii. Palivová nádrž pojme 9 litrů paliva.

Typ	atmosféricky plněný zážehový řadový dvouválec
Objem	647 cm ³
Rozvod	DOHC, 8 ventilů
Kompresní poměr	11,6:1
Vrtání x zdvih	79 mm x 66 mm
Max. výkon	25 kW v 4300 ot./min
Max. točivý moment	55 Nm v 4300 ot./min

Tabulka 2: Parametry spalovacího motoru varianty REx [18], [20]

V roce 2017 plánuje automobilka BMW uvést druhou generaci elektromobilu i3. Vylepšení spočívá především ve zvýšené kapacitě lithium-iontových akumulátorů, která vzroste na 33 kWh a zvýšení objemu palivové nádrže. Zvýšené kapacity bylo dosaženo pokrokem ve vývoji lithium-iontových článků, které mají oproti první generaci vyšší hustotu energie.

4.2.5 Paralelní uspořádání

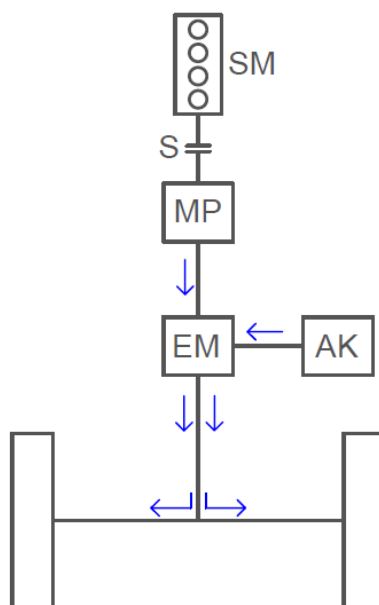
Podle předchozího dělení bychom tato vozidla přirovnali k mild hybridům. Jednotlivé komponenty jsou zapojeny paralelně a oba zdroje energie se podílejí na pohonu. Elektromotor je umístěn buď mezi spalovacím motorem a převodovkou nebo na výstupním hřídeli převodovky. Elektromotor také slouží jako startér, alternátor a setrvačnick. Aby se maximalizovala účinnost spalovacího motoru, jsou spotřebiče elektrické energie (klimatizace, posilovač řízení) poháněny elektromotorem. Díky tomu je jejich chod nezávislý na chodu spalovacího motoru.

Jelikož jsou oba zdroje energie spojeny hřídelem, je jejich okamžitý výkon dán součtem momentů na jednotlivých motorech. Rozlišujeme dvě možná uspořádání –

jednohřídelové a dvouhřídelové. Pokud je u jednohřídelového uspořádání používán pouze jeden motor, tak druhý buď rotuje naprázdno a nedodává žádný výkon nebo je odpojen přes spojku. U dvouhřídelového uspořádání se používá pro dělení výkonu planetová převodovka.

Současným zapnutím obou zdrojů energie lze při nízkých otáčkách motoru zvýšit tažnou sílu. V běžném provozu je vozidlo tedy poháněno pouze spalovacím motorem a elektromotor se připojuje pouze v případě potřeby krátkodobého zvýšení výkonu, například při předjíždění.

Výhodou je, že při jízdě na spalovací motor nedochází k žádnému zhoršení jízdních a výkonových vlastností oproti normálnímu provozu vozidla. Paralelní hybrid má navíc až o 30 % vyšší účinnost než sériový hybrid a disponuje možností rekuperace energie.



Obrázek 14: Schéma typického paralelního hybridního ústrojí [6]

4.2.6 Integrated Motor Assist (IMA)

Jedná se o paralelní hybridní systém vyvinutý automobilkou Honda. Poprvé byl představen v roce 1999 ve vozidle Honda Insight. Synchronní elektromotor je umístěn mezi spalovacím motorem a převodovkou CVT. Dnes se s tímto systémem můžeme setkat například v modelech Honda Civic Hybrid, Accord Hybrid a CR-Z.

Elektromotor podporuje hlavní spalovací motor především při rozjezdech a při potřebě rychlé akcelerace. Při pomalé jízdě konstantní rychlostí se spalovací motor úplně

zastaví a rychlost vozidla je udržována pouze pomocí elektromotoru. Při zpomalování pak elektromobil v generátorickém režimu dobíjí akumulátory.

Pro systém IMA neexistuje jednotná pohonná jednotka. Honda Insight, která se vyráběla do roku 2014, používala zážehový řadový čtyřválec o objemu 1339 cm³. Aktuální modely Civic Hybrid a CR-Z používají zážehovou jednotku o objemu 1497 cm³ naladěnou na různé výkony. Maximum krouticího momentu se u samotného motoru pohybuje kolem 4500 ot./min, ale díky přídavnému elektromotoru je maximální krouticí moment dostupný již od 1000 ot./min. Kvůli snížení spotřeby jsou všechny motory vybaveny funkcí VCM – automatickým vypínáním spalování v jednotlivých válcích, například při zpomalování.

Typ	atmosféricky plněný zážehový řadový čtyřválec
Objem	1339 cm ³
Rozvod	SOHC, 8 ventilů
Kompresní poměr	10,8:1
Vrtání x zdvih	73 mm x 80 mm
Max. výkon	65 kW v 5800 ot./min
Max. točivý moment	121 Nm v 4500 ot./min

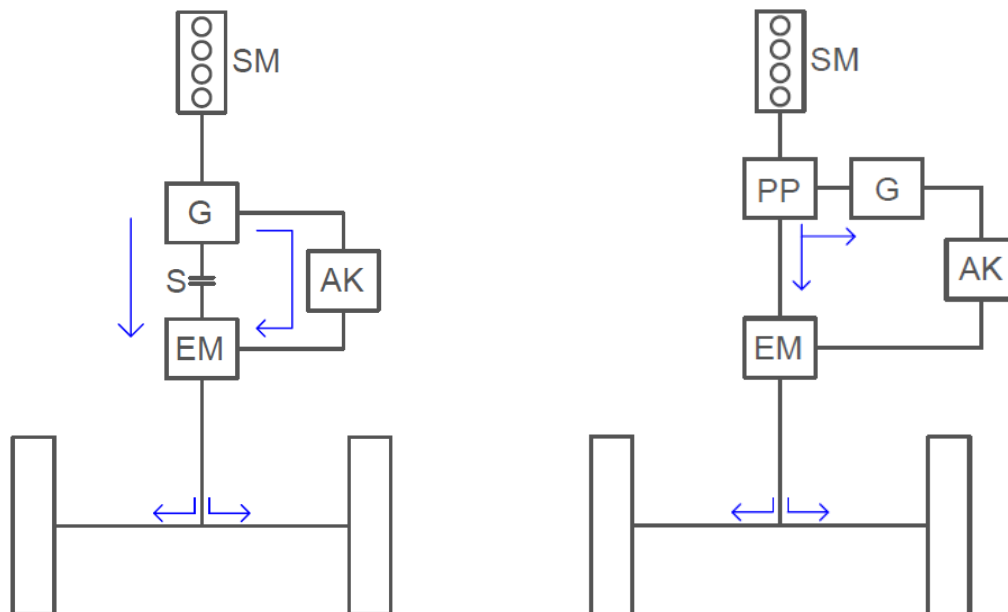
Tabulka 3: Parametry spalovacího motoru vozu Honda Insight [22], [24]

Akumulátor je uložený pod podlahou nákladového prostoru. Model Insight používá typ Ni-MH o nominální kapacitě 5,75 Ah při 100,8 V. Novější modely Civic Hybrid a CR-Z už používají typ Li-Ion s kapacitami 15 (CR-Z) a 20 (Civic) kWh při nominálním napětí 144 V. [24]

4.2.7 Kombinované uspořádání

Podle předchozího dělení bychom tato uspořádání nazvali full hybridem nebo plug-in hybridem. Samotné kombinované pohony dělíme na přepínatelné a s dělením výkonu. Přepínatelné pohony mohou v závislosti na sepnutí spojky pracovat buď jako čistě sériové nebo jako čistě paralelní hybridy. Pohon s dělením výkonu používá planetovou převodovku se dvěma stupni volnosti. Planetová převodovka dělí výkon mezi pohon hnané nápravy a pohon generátoru, který nabíjí akumulátor. Akumulátor pak podle potřeby napájí elektromotor mechanicky spojený s hnanou nápravou. Pohon může také pracovat v tzv. nadsynchronním režimu, kdy je zaměněna funkce obou elektrických strojů. Elektromotor tedy funguje jako generátor a naopak.

Výhodou pohonu s dělením výkonu je oproti sériovému uspořádání snížení ztrát a tím i vyšší účinnost. V současnosti jde o nejpoužívanější systém.

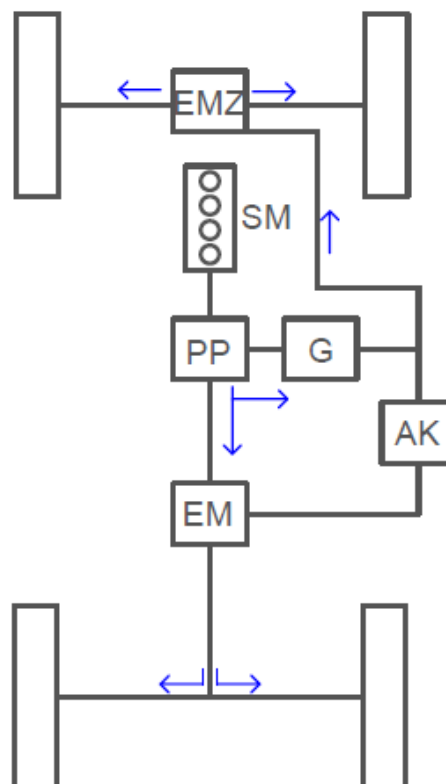


Obrázek 15: Schéma kombinovaných hybridních ústrojí (přepínatelný vlevo, s dělením výkonu vpravo) [6]

Automobilky Toyota a Lexus v poslední době nabízejí u některých modelů vylepšenou verzi stávajícího systému s děličem toku výkonu, který pohání pouze přední nápravu vozidla. Vylepšení spočívá v zástavbě třetího elektromotoru pro pohon zadní nápravy. Zadní elektromotor EMZ pracuje nezávisle na hlavním pohonném řetězci. Tato koncepce nachází uplatnění především u hybridních verzí vozidel kategorie SUV.

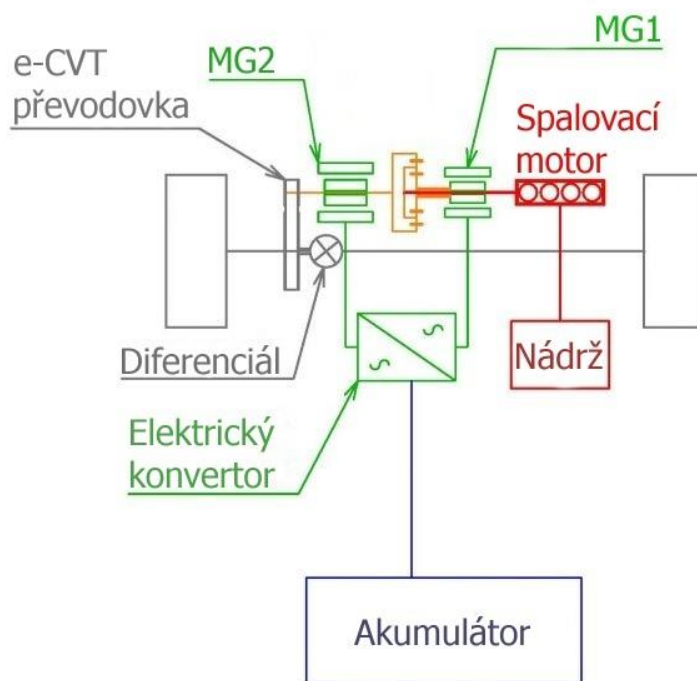
4.2.8 Hybrid Synergy Drive

Jedná se o kombinovaný hybridní systém vyvinutý společností Toyota v roce 2003. Tento systém nepoužívá jenom Toyota ve svých modelech Prius, Camry a Highlander, ale i Lexus v modelech RX 400h, GS 450h a LS 600h/LS 600hL.



Obrázek 16: Schéma kombinovaného uspořádání s děličem toku výkonu a pohonem všech čtyř kol

Systém se skládá ze spalovacího motoru, dvou synchronních elektromotorů s permanentními magnety, elektrického konvertoru, akumulátoru a děliče výkonu. O přenos výkonu z děliče výkonu na hnaná kola se stará převodovka e-CVT.

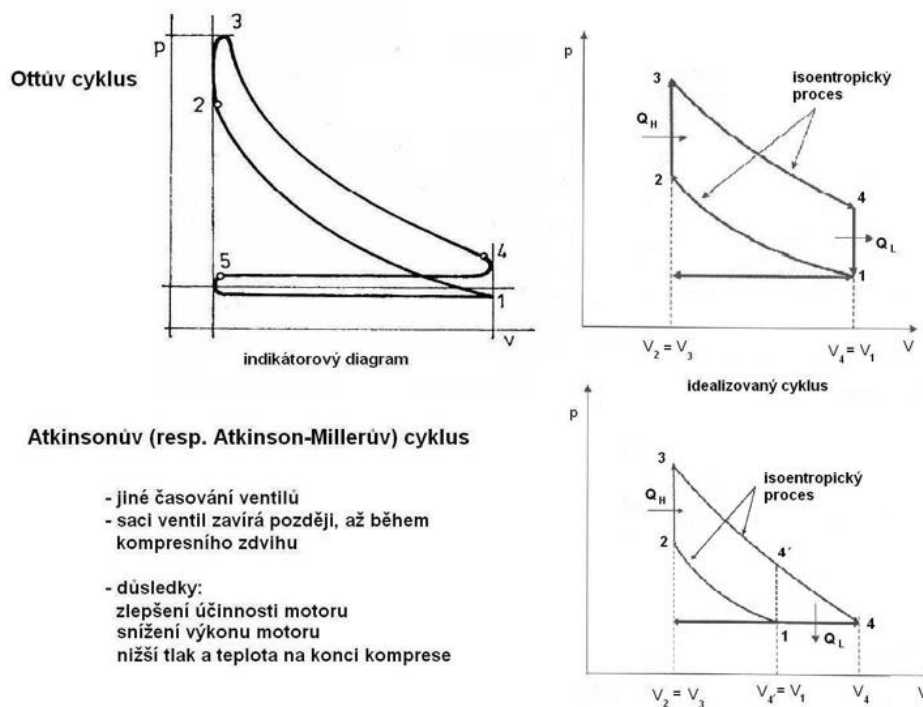


Obrázek 17: Schéma systému Hybrid Synergy Drive [5]

Aktuální Toyota Prius 4. generace používá nový zážehový řadový čtyřválec o objemu 1,8 litru. Tento motor dosahuje vysoké termodynamické účinnosti 40%. Toho bylo docíleno především díky vysokému objemu systému recirkulace výfukových plynů (EGR). Na rozdíl od běžných spalovacích motorů nepracuje motor s klasickým Ottovým cyklem, ale používá cyklus Atkinsonův. Ten je charakteristický tím, že zavírá sací ventil až za dolní úvratí a tím pádem je část komprese nevyužita a vzduch uniká zpět do sacího potrubí. Je to dáno požadavkem na menší množství vzduchu potřebné k naplnění válců při nižším zatížení a otáčkách. Expanzní dráha je delší než kompresní dráha. Díky tomu má motor lepší účinnost a spotřebuje méně paliva, ale výkon motoru klesne. [5]

Typ	zážehový řadový čtyřválec pracující s Atkinsoným cyklem
Objem	1798 cm ³
Rozvod	DOHC, 16 ventilů, časování VVT-i
Kompresní poměr	13,0:1
Vrtání x zdvih	80,5 mm x 88,3 mm
Max. výkon	73 kW v 5200 ot./min
Max. točivý moment	142 Nm v 4000 ot./min

Tabulka 2: Parametry spalovacího motoru systému HSD [16]



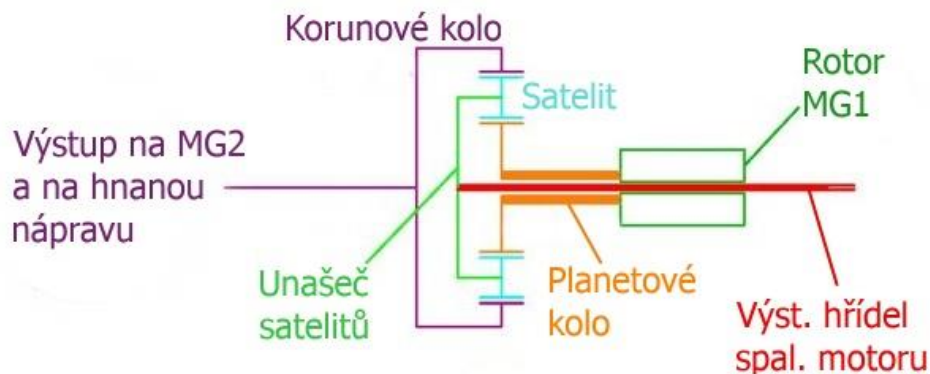
Obrázek 18: Srovnání Ottova a Atkinsonova cyklu [3]

Oba elektromotory mají podobnou konstrukci, ale liší se hlavně velikostí. Jedná se o třífázové synchronní elektromotory s permanentními magnety. Vinutí se nachází pouze ve statoru. Primární elektromotor MG2 o výkonu 53 kW má dostatečný výkon pro samostatný pohon vozidla. Během regenerativního brzdění pracuje jako generátor. Sekundární elektromotor MG1 o výkonu 42 kW, který je umístěn na výstupní hřídeli spalovacího motoru, pak pracuje jako startér spalovacího motoru a generátor elektrické energie.

Prius 4. generace poprvé používá (v závislosti na konkrétním trhu a modelu vozidla) dva typy akumulátorů – Ni-Mh a Li-Ion. Baterie Ni-Mh se skládá z 28 modulů, přičemž každý modul obsahuje 6 článků o napětí 1,2 V. Celkové nominální napětí baterie je 201,6V, nicméně díky DC-DC konvertoru je baterie schopna dodávat do elektromotorů potřebné napětí až 500 V. Kapacita této baterie je 1,3 kWh. Sedmístná verze Prius+ pak používá Li-Ion baterii s kapacitou 1 kWh. Verze Prius Plug-in hybrid používá také Li-Ion baterii, ale o kapacitě 4,4 kWh. S touto baterií má vozidlo odhadovaný dojezd 16 – 24 km pouze na elektrický pohon. [15]

Dělič výkonu je realizován jako planetový diferenciál se dvěma stupni volnosti. Planetový diferenciál má dva centrální členy. Prvním je korunové kolo s vnitřním ozubením a druhým je planetové kolo s vnějším ozubením. Jejich vzájemný kontakt

zprostředkovávají satelity. Satelity jsou nasazeny na unašeci, který je spojen s výstupem spalovacího motoru (červený hřídel). Planetové kolo je propojeno s rotorem generátoru MG1 a korunové kolo je propojeno s rotorem elektromotoru MG2. [2]

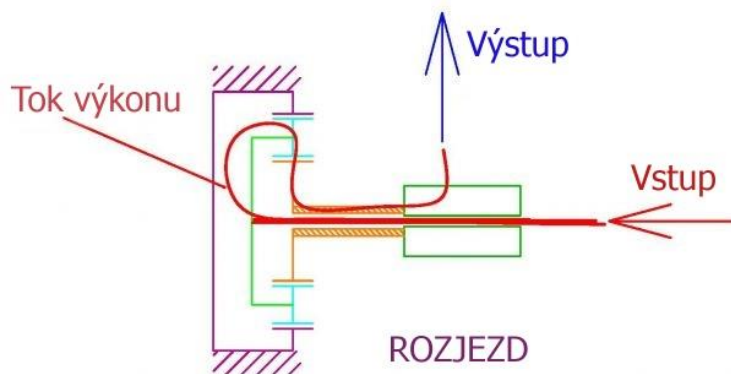


Obrázek 19: Detail děliče toku výkonu [5]

Režimy pohonného ústrojí:

Rozjezd

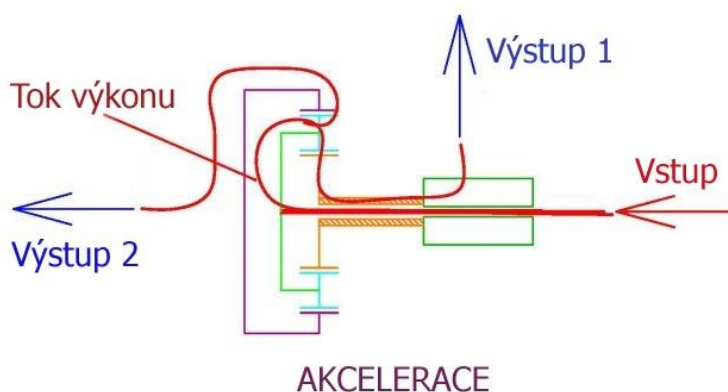
Při rozjezdu poháněná kola stojí a rozbíhají se z nulových otáček, což značí šrafování na korunovém kole. Korunové kolo je přes e-CVT převodovku spojeno s hnanou nápravou. Jelikož korunové kolo stojí, je výkon spalovacího motoru přes unašec a satelity přiveden na planetové kolo, které otáčí rotorem MG1. Ve statoru pak vzniká elektrický proud, který je přes konvertor spotřebován pro pohon elektromotoru MG2. Tok výkonu je naznačen křivkou na obrázku.



Obrázek 20: Režim rozjezd [5]

Akcelerace

Při akceleraci se již otáčí korunové kolo, které je spojené s poháněnou nápravou. Otáčení korunového kola způsobí pokles otáček planetového kola, které roztáčí generátor MG1. Dochází tedy k větvení výkonu. S rostoucími otáčkami korunového kola (poháněné nápravy) tedy klesají otáčky generátoru. Jinými slovy, roste podíl výkonu přenesený „paralelní“ cestou (výstup 2) vůči výkonu přenesenému „sériovou“ cestou (výstup 1).



Obrázek 21: Režim akcelerace [5]

Jízda vysokou rychlostí (dálnice)

Při jízdě vysokou rychlostí se již planetové kolo prakticky neotáčí (naznačeno šrafováním) a veškerý výkon spalovacího motoru je přes korunové kolo přiveden na poháněnou nápravu. Výkon je přenášen „paralelní cestou“. Díky tomu také generátor MG10 nepracuje.



Obrázek 22: Režim jízda vysokou rychlostí [5]

Brzdění (rekuperace)

Při brzdění a při jízdě na volnoběh se spalovací motor volně protáčí a nedodává výkon. Otáčející se kola se stávají zdrojem energie a otáčejí rotorem MG2. Při rozjezdu měl MG2 funkci elektromotoru, teď se z něj ale stává generátor a z vinutí jeho statoru je odebírán elektrický proud. Primárně slouží vzniklý elektrický proud k nabíjení akumulátoru. Pokud je ale akumulátor již plně nabit, řídicí jednotka začne posílat elektrický proud do vinutí statoru MG1, tím dochází k brzdění jeho rotoru a přes dělič výkonu i k brzdění spalovacího motoru.

Režim brzdění motorem lze aktivovat i ručně, posunutím voliče na přístrojové desce do polohy „B“. Tento režim značně ulehčuje brzdám, které díky němu mohou být menší. Takto lze ale brzdít pouze do určité rychlosti, protože s klesající rychlostí klesá účinnost brzdění motorem. Do nulové rychlosti se již brzdí klasickými kotoučovými brzdami.



Obrázek 23: Volič jízdních režimů ve vozidle Toyota Prius [17]

EV mód

Jedná se o čistě elektrický mód. U evropských verzí se aktivuje tlačítkem na palubní desce. Jak bylo již zmíněno výše, Prius plug-in s baterií o kapacitě 4,4 kWh má dojezd 16-24 km pouze v módu EV.

Couvání

Couvání je zajištěno přepólováním statoru MG2, kdy se rotor otáčí opačným směrem. Jak je vidět, couvání probíhá v elektrickém módu a proto je třeba mít dostatečně nabitě baterie. Případně však může být elektrická energie dodávána sériovou cestou z MG1.

4.3 Srovnání používaných pohonných jednotek

Většina dnešních hybridních ústrojí spoléhá na běžné atmosférické zážehové motory. Výjimkou jsou motory pro použití v range extenderech. Jelikož zde není motor určen přímo pro pohon vozidla, může mít výrazně menší velikost než je v automobilech běžné nebo atypickou konstrukci (A1 e-tron – wankel). Navíc je možné takový motor optimalizovat, aby pracoval s optimální účinností. Motory jsou konstruovány s ohledem na co nejvyšší hospodárnost a účinnost při zachování dostatečného výkonu. Nejdále je podle mého názoru v tomto ohledu automobilka Toyota, která ve svých hybridních modelech používá motory pracující s Atkinsonovým cyklem. Mimo jiné díky tomu dosahují tyto motory termodynamické účinnosti až 40 %.

4.4 Srovnání používaných akumulátorů

4.4.1 Lithium – iontové akumulátory (Li-Ion)

Baterie na bázi lithia jsou v dnešní době nepoužívanější akumulátory v hybridních ústrojích. Jedná se o v současnosti nejslibnější bateriovou technologii, která je stále ve vývoji. Mezi její hlavní výhody patří především vysoká hustota energie, dlouhá životnost, relativně nízké samovybití (2x nižší než u baterií na bázi niklu), nemá paměťový efekt a má vysoké nominální napětí 3,6 V. Mezi jejich nevýhody naopak patří vysoká cena, způsobena drahou výrobou (až o 40 % dražší než Ni baterie) a drahou dopravou. Další nevýhodou je, že s postupujícím časem ztrácí svou kapacitu.

4.4.2 Nikl – metal hydridové akumulátory (Ni-MH)

V dnešní době je to druhý nejpoužívanější typ baterií v hybridních vozidlech. Tyto baterie stále ve svých systémech používají automobilky Toyota a Lexus, ne ale ve všech – například Toyota Prius plug-in používá baterii Li-Ion. Jejich výhodou je hlavně nízká cena oproti lithiovým bateriím, mají až o 40 % vyšší hustotu energie než starší baterie NiCd, jsou ekologicky nenáročné, méně náchylné ke stárnutí oproti NiCd a mají vysokou

tepelnou odolnost. Mají nominální napětí 1,2 V. Jejich hlavní nevýhodou je samovybíjení. Baterie údajně ztratí do 24 hodin po nabití až 20 % energie a měsíc poté ještě dalších 10 %. Samovybíjení lze minimalizovat modifikací hydridů. Zápornou stránkou této modifikace je ale snížení hustoty energie.

4.4.3 Nikl - kadmiové akumulátory

Jedná se o starší typ baterie na bázi niklu. Mezi její výhody patří možnost velmi rychlého nabíjení, lze jí skladovat ve vybitém stavu, je možné ji vyrobit ve velkém množství různých tvarů, má dlouhou životnost a dobrou odolnost proti nízkým teplotám (až -85 °C). Hlavní nevýhodou je nízká hustota energie ve srovnání s novějšími typy baterií zmíněnými výše. Dále pak samovybíjení, paměťový efekt a fakt, že je vyrobena z toxického kadmia.

4.4.4 Srovnání hlavních parametrů baterií

	Měrná energie		Měrný výkon	Životnost
	[Wh/kg]	[Wh/l]	[W/kg]	[-]
Li-Ion	90 - 130	140 - 200	250 - 450	800 - 1200
Ni-MH	60 - 70	130 - 170	150 - 300	600 - 1200
Ni-Cd	40 - 60	80 - 110	150 - 300	600 - 1200
Benzín (Natural 95)	8890	12900	-	-

Tabulka 4: Parametry jednotlivých bateriových technologií [3], [4]

Ze srovnání je jasně vidět, že nejlepších parametrů dosahují lithium-iontové akumulátory. Z tabulky je také patrná největší slabost současných baterií, a to je jejich hustota uložené energie ve srovnání s fosilními palivy.

5. Metody určování spotřeby energie při provozu vozidla

Spotřeba energie se určuje pomocí metody posuzování životního cyklu produktu (Life cycle assesment) z hlediska jeho působení na životní prostředí. Metoda zahrnuje procesy od těžby samotných surovin, přes jejich zpracování a dopravu, výrobu produktu a jeho používání až do konce životního cyklu, kdy je zpracován jako odpad. Metoda zohledňuje dopad každé zmíněné fáze na životní prostředí.

Metodika Life Cycle Assesment má mnoho variant. K porovnávání vlivu jednotlivých alternativních pohonů a paliv se používá analýza od zdroje ke kolům (Well to Wheel). Výstupem analýzy jsou dvě hodnoty – spotřeba fosilní energie v MJ/100km a produkce CO_{2ek} (CO_{2ek} představuje součet všech složek škodlivých emisí přepočtených na produkci CO₂) na 1 ujetý kilometr. Analýza se dělí na dvě základní části. První fází je „od zdroje do nádrže“ (Well to Tank). Ta posuzuje energetický dopad během výroby paliva. Jedná se o cyklus, který předchází spálení paliva ve vozidle. Druhou fází je „z nádrže ke kolům“ (Tank to Wheel). Ta už stanovuje produkci emisí vzniklou při provozu vozidla. V této fázi je zohledněna i kvalita paliva a účinnost spalování paliva v motoru.

[5]

6. Přímé srovnání reálných pohonných ústrojí z hlediska velikosti jízdních odporů

Pro přímé porovnání z hlediska velikosti jízdních odporů si volím dvě nejpoužívanější hybridní pohonná ústrojí:

- kombinované hybridní ústrojí s planetovým děličem toku výkonu
- sériové hybridní ústrojí s prodlužovačem dojezdu

Kombinované hybridní ústrojí je zastoupeno vozidlem Toyota Prius 4. generace a sériové vozem BMW i3 REx. Pro srovnání uvažuji projetí jízdního cyklu NEDC. Parametry obou vozidel jsou v uvedeny tabulce. Hmotnost nákladu a fyzikální konstanty (hustota vzduchu, koeficient c_x atd.) jsem zvolil.

	kombinovaný s děličem toku výkonu - Prius	sériový s prodlužovačem dojezdu - i3 REx
pohotovostní hm. vozidla [kg]	1375 [16]	1415 [30]
hmotnost nákladu [kg]	100	100
hustota vzduchu [kg/m ³]	1,2	1,2
koeficient odporu vzduchu c_x [-]	0,24 [16]	0,3 [31]
čelní plocha vozidla [m ²]	2,22 * [32]	2,38 [31]
koeficient valivého odporu f [-]	0,015	0,015
tíhové zrychlení [m/s ²]	9,81	9,81
součinitel rotačních hmot δ [-]	1,06	1,06
maximální rychlost [km/h]	120 **	120 **
výkon spalovacího motoru [kW]	73 [16]	25 [20]
výkon elektromotoru [kW]	53 [16]	125 [30]
kombinovaný výkon [kW]	90 [16]	125 [30]
kapacita akumulátoru [kWh]	1,3 [16]	22 [30]

Tabulka 5: Parametry jednotlivých ústrojí

* - čelní plocha neodpovídá aktuální generaci Priusu (4.), ale předchozí generaci (3.). Čelní plochu aktuální generace Priusu jsem nenalezl.

** - pro účel výpočtu jsem pro obě vozidla zvolil totožnou maximální rychlost, která odpovídá maximální rychlosti vozidel v cyklu NEDC. Skutečné maximální rychlosti obou vozidel jsou vyšší.

Hlavními jízdními odpory jsou odpor vzduchu F_A , valivý odpor pneumatik F_R , odpor setrvačných hmot F_Z a odpor stoupání. Odpor stoupání zanedbám, jelikož se v jízdním cyklu NEDC neprojevuje.

Odpor vzduchu závisí na hustotě vzduchu ρ_{vzd} , koeficientu odporu vzduchu c_x , čelní ploše vozidla S a na rychlosti vozidla v . [27]

$$F_A = \frac{1}{2} \rho_{vzd} \cdot c_x \cdot S \cdot v^2$$

Valivý odpor pneumatik závisí na koeficientu valivého odporu f a na tíhové síle vozidla F_N . [27]

$$F_R = f \cdot F_N$$

Odpor setrvačných hmot závisí na součiniteli rotačních hmot δ a na hmotnosti vozidla m_v . Součinitel δ závisí na momentech setrvačnosti motoru při konstantním převodu a na momentech setrvačnosti jednotlivých kol vozidla. Pro zjednodušení se volí hodnoty δ z tabulky. Jíždě na nejvyšší rychlostní stupeň odpovídá hodnota 1,04 – 1,08. Pro výpočet jsem zvolil hodnotu 1,06. Výsledný jízdní odpor je tedy pouze odhadnutý. [28]

$$F_Z = \delta \cdot m_v$$

	kombinovaný s děličem toku výkonu - Prius	sériový s prodlužovačem dojezdu - i3 REX
odpor vzduchu F_A [N]	355,1	475,9
valivý odpor pneumatik F_R [N]	222,9	217
odpor zrychlení F_Z [N]	1563,5	1605,9
celkový jízdní odpor F_c [N]	2141,5	2298,8

Tabulka 6: Výčíslení jízdních odporů

Vyššího jízdního odporu při maximální rychlosti dosahuje vozidlo BMW i3 s prodlužovačem dojezdu. Hlavním důvodem je vyšší hmotnost celého vozidla způsobená vysokou kapacitou akumulátoru. A to i přes to, že je karoserie i3 oproti Priusu vyrobena z kompozitních materiálů a spalovací motor v jednotce prodlužovače dojezdu má ve srovnání s Priusem třetinový objem. BMW má navíc také vyšší čelní plochu a koeficient odporu vzduchu.

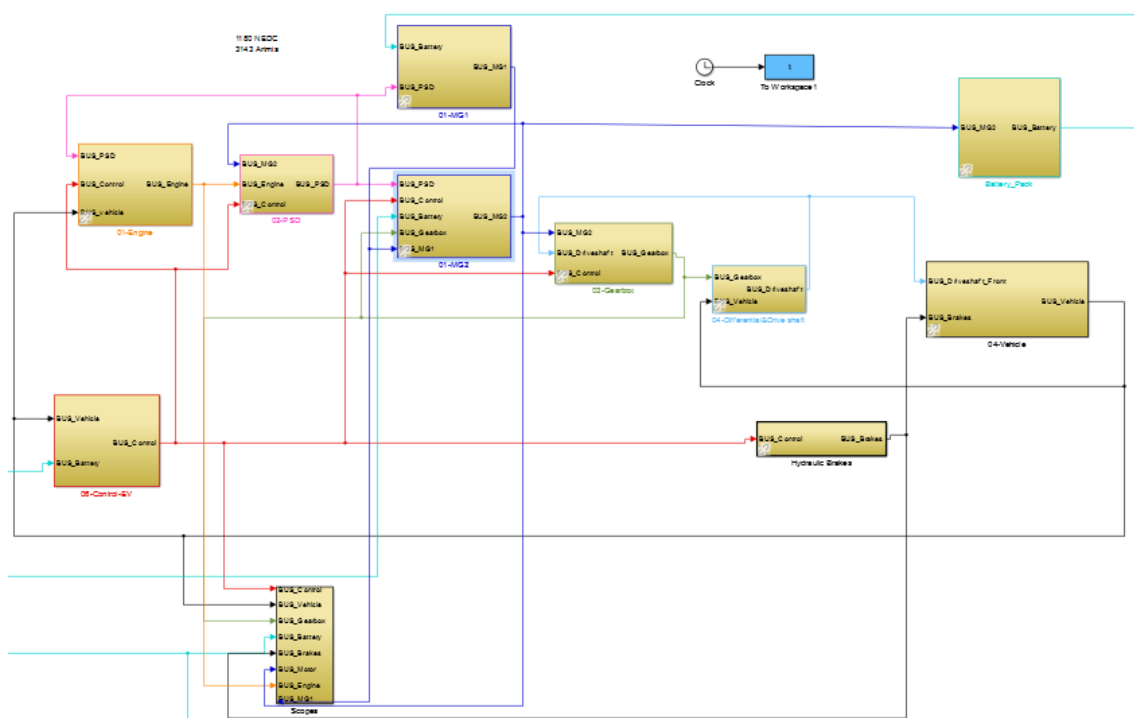
7. Simulace jednotlivých pohonných ústrojí v programu Matlab Simulink

Cílem této simulace je stanovení a porovnání spotřeby energie ve dvou výše zmíněných hybridních ústrojích:

Obě ústrojí budou simulována s totožnými vstupními fyzickými daty (hmotnost, rozměry, výkon jednotlivých komponent, koeficient odporu vzduchu, koeficient valivého odporu atd.). Hlavní rozdíl pak bude v uspořádání jednotlivých prvků pohonného ústrojí a v řídicí strategii.

7.1 Simulace uspořádání s děličem toku výkonu

Matematický model vozidla s děličem toku výkonu jsem převzal již funkční a odladěný od vedoucího své práce. Autorem modelu je ing. Adam Barák. Mým úkolem bylo tento model pochopit a následně jej optimalizovat pro koncepci hybridního uspořádání s prodlužovačem dojezdu.



Obrázek 24: Matematický model vozidla s děličem toku výkonu

Cílem tohoto modelu je simulovat projetí jízdního cyklu NEDC a během něj vyhodnotit spotřebu energie v kW/km. Model je sestaven pomocí blokových schémat a odpovídá uspořádání pohonného systému vozidla Toyota Prius Plug-In.

Hlavními komponentami modelu jsou: spalovací motor, elektromotory MG1 a MG2, planetový dělič tok výkonu (PSD), akumulátor, převodovka, diferenciál, hydraulické brzdy, vozidlo a řídicí jednotka. Řídicí jednotka na základě rychlosti vozidla, stavu nabití baterie (SOC) a poloze pedálu plynu určuje, v jakém jízdním režimu se bude vozidlo pohybovat. Na výběr je čistě elektrický režim, hybridní režim a režim maximálního výkonu.

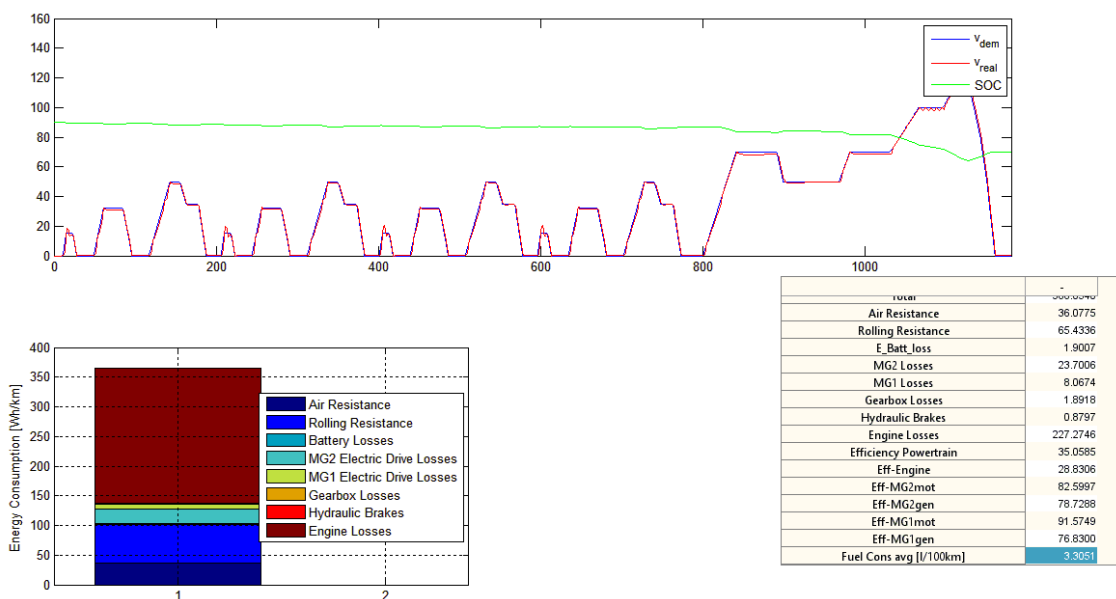
Elektrický režim je aktivován při rychlostech pod 65 km/h a deaktivován při překročení rychlosti 70 km/h. Stav nabití baterie musí v tomto režimu být vyšší než 30 % maximální kapacity. Na poloze pedálu plynu nezáleží.

Hybridní režim se aktivuje při překročení rychlosti 65 km/h a deaktivuje při zpomalení pod 65 km/h. Stav nabití baterie musí být nižší než 30 % maximální kapacity. Na poloze pedálu plynu opět nezáleží. Hybridní režim lze zapnout také manuálně.

Režim plného výkonu může být aktivován při jakékoliv rychlosti. Podmínkou aktivace je poloha pedálu plynu. Ten se musí nacházet buď v prvních 30 % dráhy, nebo na koncovém dorazu. Druhou podmínkou je stav nabití baterie, který musí být vyšší než 35 % maximální kapacity.

Model je pro simulaci zjednodušen a plně neodpovídá svému reálnému předobrazu, kterým je vozidlo Toyota Prius Plug-In. Prius je například vybaven převodovkou e-CVT s plynulou změnou převodového poměru. V modelu je ale použita šestistupňová převodovka.

Hybridní pohony vozidel



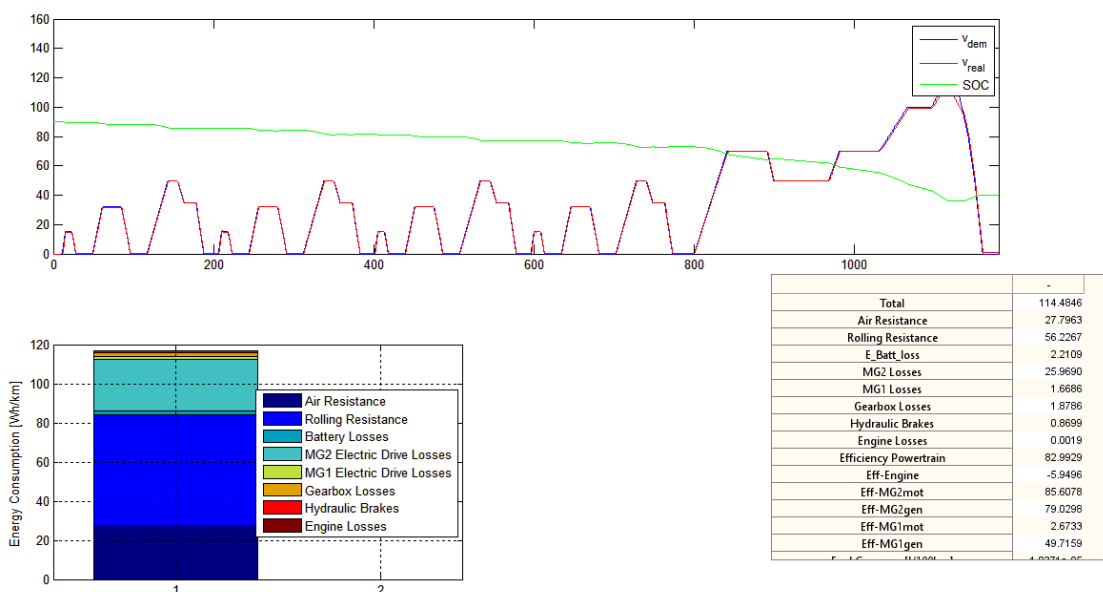
Obrázek 25: Vyhodnocení simulace chování vozidlo Toyota Prius

Na obrázku výše je zobrazeno vyhodnocení simulace v matematickém modelu. V horním grafu je zobrazen požadovaný a skutečný rychlostní profil. Oba jízdny profily jsou prakticky totožné. Třetí křivkou v tomto grafu je křivka zobrazující aktuální stav nabití akumulátoru. Je vidět, že k výraznějšímu poklesu energie dojde až ke konci cyklu při vysokých rychlostech. V dolním sloupcovém grafu zobrazeno vyčíslení spotřeby energie v jednotlivých komponentech pohonného ústrojí v jednotkách Wh na ujetý kilometr. Přesné hodnoty spotřeby energie jsou vypsány v tabulce. Nejvíce energie spotřebuje spalovací motor. Dalšími významnou položkou je energie potřebná na překonání odporu vzduchu a valivého odporu. Energie spotřebovaná v obou elektromotorech zaujímá pouze přibližně 10 % celkové spotřebované energie. Z toho většina připadá na elektromotor MG2. Zbylá energie spotřebovaná v baterii, převodovce a brzdách je zanedbatelná. Ve zmiňované tabulce jsou navíc ještě vyčísleny účinnosti jednotlivých komponent pohonného ústrojí a spotřeba paliva v l/100km. Celková účinnost ústrojí je pak 35 %.

7.2 Simulace uspořádání s prodlužovačem dojezdu

Mým cílem je vytvořit zjednodušený matematický model vozidla s prodlužovačem dojezdu.

V první fázi jsem upravil model tak, aby projel jízdní cyklus NEDC pouze pomocí elektrické energie. Toho jsem docílil úpravou řídicí strategie. Modifikací parametrů jsem upřednostnil elektrický režim a potlačil hybridní režim a režim plného výkonu.



Obrázek 26: Projetí jízdního cyklu v elektrickém režimu

Počáteční stav nabití baterie byl 90 % a po projetí jízdního cyklu v baterii zbylo 40 % energie.

Druhou fází bylo stanovení spotřeby paliva spalovacího motoru. Chtěl jsem docílit situace, kdy koncový stav nabití baterie po projetí cyklu v elektrickém režimu bude stejný, jako koncový stav nabití baterie po projetí cyklu hybridním vozidlem s děličem toku výkonu. Jak je vidět na obrázku 25, po projetí cyklu vozidlem Prius zůstává v baterii stále 70 % elektrické energie. Po projetí cyklu v elektrickém režimu mně v baterii zbylo 40 % energie. Vzniklý rozdíl 30 % energie jsem musel kompenzovat dobíjením pomocí spalovacího motoru.

Nejprve jsem určil potřebný výkon. Jmenovitá kapacita baterie je 6,5 Ah a jmenovité napětí 201,6 V. Jmenovitá kapacita v jednotkách kWh je tedy 1,31. 30 % z této hodnoty je 0,39 kWh.

Dále jsem si z grafu měrné spotřeby paliva stanovil pracovní bod motoru, ve kterém má motor měrnou spotřebu nejnižší a účinnost nejvyšší. Odečetl hodnotu měrné spotřeby $bsfc = 201 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$. Této hodnotě odpovídá točivý moment motoru 119 Nm a otáčky 3000 min^{-1} . Množství paliva spotřebovaného v jízdním cyklu NEDC jsem vypočetl podle následujícího vzorce.

$$m_{NEDC} = bsfc \cdot P = 201 * 0,39 = 79 \frac{g}{NEDC} = 0,079 \frac{kg}{NEDC}$$

Hustota paliva zvolená v parametrech matematického modelu je $749 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Dráha ujetá během jízdního cyklu NEDC je 10,875 km. Průměrná spotřeba na 100 km se pak spočte podle následujícího vzorce.

$$m_{100km} = \frac{79}{10,875} \cdot 100 = 726,4 \frac{g}{100 \text{ km}}$$

$$V_{100km} = \frac{m_{100km}}{\rho} = \frac{0,7264}{749} = 0,00097 \frac{\text{m}^3}{100 \text{ km}} = 0,97 \frac{l}{100 \text{ km}}$$

Výsledné množství paliva, které by bylo potřeba dodat spalovacímu motoru pohánějícímu generátor, je 0,97 l na 100 km jízdy. Vůz Prius s děličem toku výkonu naopak spotřebuje 3,3 l paliva na 100 km. Ve výpočtu nejsou uvažovány účinnosti přenosu energie, například účinnost generátoru.

8. Závěr

V první části jsem se věnoval zpracování rešerše všech nejdůležitějších hybridních ústrojí. Rešerši jsem zpracoval podle dvou hledisek, přičemž podrobněji jsem se věnoval dělení hybridních ústrojí podle uspořádání pohonných prvků. Při popisu jednotlivých hybridních pohonných systémů jsem se zaměřil především na používané pohonné jednotky, akumulátory a jízdní režimy. V páté kapitole jsem se krátce zmínil o metodách měření spotřeby energie při provozu vozidla.

V šesté kapitole jsem se věnoval přímému porovnání dvou nejpoužívanějších hybridních ústrojí z hlediska velikosti jízdních odporů. Jízdní odpory jsem vypočítal pomocí parametrů skutečných vozidel, která používají výše zmíněná hybridní ústrojí. Díky vyšší hmotnosti a aerodynamickému odporu klade větší jízdní odpor vozidlo s prodlužovačem dojezdu – BMW i3 REx.

V sedmé kapitole se věnuji srovnání obou hybridních ústrojí z hlediska spotřeby energie. V první části jsem převzal a prozkoumal již hotový matematický model vozidla s děličem toku výkonu. V druhé části jsem tento model nejprve upravil, aby projel jízdní cyklus pouze v elektrickém režimu. Abych simuloval funkci dobíjení baterie ve vozidle i3 s prodlužovačem dojezdu, vyslovil jsem požadavek, aby koncový stav nabití baterie po projetí cyklu v elektrickém režimu byl stejný, jako po projetí cyklu vozidlem Prius s děličem toku výkonu. Následně jsem spočítal spotřebu paliva spalovacího motoru, jakou by měl, aby kompenzoval úbytek energie v baterii při projetí cyklu pouze pomocí elektrické energie. Výsledná spotřeba paliva by byla 0,97 l na 100 km, což je přibližně třikrát nižší hodnota než u vozidla Prius. Tyto hodnoty odpovídají očekávání, jelikož ve vozidle Prius je spalovací motor hlavní pohonnou jednotkou. Naproti tomu spalovací motor ve vozidle i3 pouze pohání generátor elektrické energie, proto je možné jej optimalizovat pro fungování v omezeném spektru otáček, kdy funguje s nejvyšší účinností a nejnižší spotřebou.

Srovnání je velmi zjednodušené. Obě uspořádání se zásadně liší v uspořádání jednotlivých komponent, v řídicí strategii a i ve většině výkonových parametrů. Pro srovnání plně odpovídající realitě by bylo třeba od základu vytvořit matematický model vozidla s prodlužovačem dojezdu.

9. Seznam použité literatury

- [1] Prof. Ferdinand Porsche Created the First Functional Hybrid Car, [online]. Dostupné z: <http://press.porsche.com/news/release.php?id=642>.
- [2] Hybridní automobily – historie, [online]. Publikováno 3.8.2008. Dostupné z: <http://baracadaj.blog.auto.cz/2008-08/hybridni-automobily-historie/>.
- [3] Morkus, J.: Hybridní pohony – přednášky. České vysoké učení technické, fakulta strojní, 2015, Praha.
- [4] Khajepour A. a kol.: Electric and Hybrid Vehicles. Nakladatelství John Wiley & Sons Ltd, 1. vydání, 2014, Chichester, **9781118341513**.
- [5] Hromádka J.: Speciální spalovací motory a alternativní pohony. Nakladatelství Grada, 1.vydání, 2012, Praha, **978-80-247-4455-1**. Strany 65 – 73.
- [6] Čerovský Z. et al.: Hybridní pohony automobilů a výzkumné pracoviště hybridních pohonů. České vysoké učení technické, katedra elektrických pohonů a trakce, Praha.
- [7] Lexus RX 450h – full hybrid, coby optimum, [online]. Publikováno 27.7.2009. Dostupné z: <http://www.auto.cz/lexus-rx-450h-full-hybrid-coby-optimum-2083>.
- [8] Největší absurdita v Ženevě: přívěs s motorem pro pohon elektroauta, [online]. Publikováno 4.3.2016. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/prives-elektromobil-elektrocentrala-dwo-/automoto.aspx?c=A160303_180841_automoto_fdv.
- [9] Gen 2 Volt Transmission Operating Modes Explained, [online]. Publikováno 24.3.2014. Dostupné z: <http://gm-volt.com/2015/02/20/gen-2-volt-transmission-operating-modes-explained/>.
- [10] Deep dive: GM's New Small Engine Family, [online]. Publikováno 24.3.2014. Dostupné z: <http://blog.caranddriver.com/deep-dive-gms-new-small-engine-family/>.
- [11] Chevrolet Introduces All-New 2016 Volt [online]. Publikováno 1.12.2015. Dostupné z: <http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2015/Jan/naias/chevrolet/volt/0112-volt-2016-intro.html>.
- [12] Audi A1 e-tron: nakonec je z něj hybrid, [online]. Publikováno 15.11.2010. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/audi-a1-e-tron-nakonec-je-z-nej-hybrid-2>.
- [13] Audi A1 e-tron: v tichosti inovován hybrid s wankelem, [online]. Publikováno 12.6.2013. Dostupné z: <http://www.autoweb.cz/audi-a1-e-tron-v-tichosti-inovovan-hybrid-s-wankelem/>.
- [14] Case Study: Toyota Hybrid Synergy Drive. Wroclaw University of Technology. Publikováno 22.11.2014.
- [15] Toyota Introduces 2012 Prius Plug-in Hybrid, [online]. Publikováno 5.12.2011. Dostupné z: <http://pressroom.toyota.com/releases/toyota+introduces+2012+prius+plug-in+hybrid.htm>.
- [16] Katalog - PRIUS [online]. Dostupné z: https://www.toyota.cz/download/cms/czcs/PRIUS_katalog_CZ_2_tcm-1016-113204.pdf.

- [17] Nová generace Toyoty Prius je o 10 % úspornější a připomína Mirai, [online]. Publikováno 9.9.2016. Dostupné z <http://www.autorevue.cz/nova-generace-toyoty-prius-je-o-10--uspornejsi-a-pripomina-mirai>.
- [18] BMW C650GT, [online]. Publikováno 18.3.2013. Dostupné z <http://www.motorkari.cz/clanky/redakcni-testy/bmw/bmw-c650gt-23599.html?technika=1>.
- [19] The new 207 BMW i3 (94 Ah): More range Paired to high-level dynamic performance, [online]. Publikováno 2.5.2016. Dostupné z https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0259560EN_US/the-new-2017-bmw-i3-94-ah-:-more-range-paired-to-high-level-dynamic-performance.
- [20] BMW i3: První jízdni dojmy a české ceny, [online]. Publikováno 31.10.2013. Dostupné z <http://www.auto.cz/bmw-i3-prvni-jizdni-dojmy-77560>.
- [21] 40 kwh battery, [online]. Publikováno 2.2.2014. Dostupné z <http://www.mybmwi3.com/forum/viewtopic.php?f=5&t=427>.
- [22] Test Honda Insight: hybrid pro každého?, [online]. Publikováno 8.1.2010. Dostupné z http://www.autorevue.cz/test-honda-insight-hybrid-pro-kazdeho_7/ch-38582#articleStart.
- [23] The Honda Hybrid system: the engine is the main power source, [online]. Dostupné z <http://world.honda.com/automobile-technology/IMA/>.
- [24] Automobiles specifications, [online]. Dostupné z <http://automobiles.honda.com/>.
- [25] Is Lithium-ion the Ideal Battery?, [online]. Dostupné z http://batteryuniversity.com/learn/article/is_lithium_ion_the_ideal_battery.
- [26] BU-203: Nickel-based Batteries, [online]. Dostupné z http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries.
- [27] Barák, A., Klír, V.: Simulation of conventional, hybrid and electric vehicles in transient driving cycles. F2014-THM-044.
- [28] Kolář, J.: Úvod do dopravní techniky – přednášky. České vysoké učení technické, fakulta strojní, 2014, Praha. Strany 142 – 147.
- [29] 8 key questions about BMW i3 electric car, [online]. Publikováno 5.6.2014. Dostupné z <http://www.plugincars.com/8-key-questions-about-bmw-i3-electric-car-129816.html>.
- [30] BMW i3 – technické údaje, [online]. Dostupné z <http://www.bmw.cz/cs/all-models/bmw-i/i3/2016/technicke-udaje.html#tab-0>.
- [31] My BMW i3 – basic aerodynamics for i3, [online]. Publikováno 23.1.2014. Dostupné z <http://www.mybmwi3.com/forum/viewtopic.php?f=11&t=534>.
- [32] Tesla model S, Chevy Volt, Nissan Leaf, Prius compete in car & driver wind tunnel, [online]. Publikováno 11.6.2014. Dostupné z <http://insideevs.com/car-driver-aero-comparo-tesla-model-s-versus-volt-leaf-prius-video/>.

10. Seznam obrázků

Obrázek 1: Lohner Porsche - Semper Vivus [1]	9
Obrázek 2: Úplné rozdělení hybridů podle stupně hybridizace [3].....	10
Obrázek 3: Schéma typického full hybridu - vozu Lexus RX 450h [7].....	11
Obrázek 4: Externí range extender EP Tender [8]	13
Obrázek 5: Schéma typického sériového hybridního ústrojí [6].....	14
Obrázek 6: Schéma druhé generace systému GM Voltec [9]	16
Obrázek 7: Režim one motor EV mode [9]	17
Obrázek 8: Režim two motor EV mode [9]	17
Obrázek 9: Režim low extended range [9].....	18
Obrázek 10: Režim fixed ratio extended mode [9]	19
Obrázek 11: Režim high extended mode [9].....	20
Obrázek 12: Schéma pohonného ústrojí vozu Audi A1 e-tron [12].....	21
Obrázek 13: Zástavba modulu s prodlužovačem dojezdu [21]	22
Obrázek 14: Schéma typického paralelního hybridního ústrojí [6]	24
Obrázek 15: Schéma kombinovaných hybridních ústrojí (přepínatelný vlevo, s dělením výkonu vpravo) [6].....	26
Obrázek 16: Schéma kombinovaného uspořádání s děličem toku výkonu a pohonem všech čtyř kol.....	26
Obrázek 17: Schéma systému Hybrid Synergy Drive [5]	27
Obrázek 18: Srovnání Ottova a Atkinsonova cyklu [3]	28
Obrázek 19: Detail děliče toku výkonu [5]	29
Obrázek 20: Režim rozjezd [5]	29
Obrázek 21: Režim akcelerace [5]	30
Obrázek 22: Režim jízda vysokou rychlostí [5].....	30
Obrázek 23: Volič jízdních režimů ve vozidle Toyota Prius [17].....	31
Obrázek 24: Matematický model vozidla s děličem toku výkonu	37
Obrázek 25: Vyhodnocení simulace chování vozidla Toyota Prius	39
Obrázek 26: Projetí jízdního cyklu v elektrickém režimu.....	40

11. Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry spalovacího motoru systému Voltec [11]	15
Tabulka 2: Parametry spalovacího motoru varianty REx [20].....	23
Tabulka 3: Parametry spalovacího motoru vozu Honda Insight [22], [24].....	25
Tabulka 4: Parametry jednotlivých bateriových technologií [3], [4]	33
Tabulka 5: Parametry jednotlivých ústrojí.....	35
Tabulka 6: Vyčíslení jízdních odporů	36