



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Zařízení pro prodloužení dojezdu elektrických vozidel

Range extender for electric vehicles

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Dopravní, letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Josef Morkus CSc.

Bc. Jan Dokoupil

Praha 2016

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dokoupil** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **440243**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zařízení pro prodloužení dojezdu elektrických vozidel

Název diplomové práce anglicky:

Range extender for electric vehicles

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši vozidel s elektrickým pohonem vybavených zařízením pro prodloužení dojezdu. Navrhněte metodu pro dimenzování zařízení pro prodloužení dojezdu elektromobilů a elektrobuseů. Navrhněte zařízení pro prodloužení dojezdu elektrobuse na bázi palivového článku s tuhými oxidy v kombinaci se spalovací mikroturbínou.

Seznam doporučené literatury:

VISWANATHAN, B a M SCIBIOH. Fuel cells: principles and applications. Hyderabad: Universities Press, 2007. ISBN 978-1-4200-6028-7. WINKLER, Wolfgang a Hagen LORENZ. Design studies of mobile applications with SOFC?heat engine modules. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)01065-5. ISBN 10.1016/S0378-7753(01)01065-5. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775301010655> přednášky Hybridní pohony Internetové podklady

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

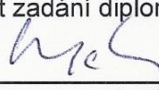
Ing. Josef Morkus CSc.

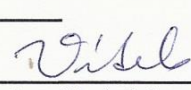
Jméno a pracoviště konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **18.04.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **30.06.2016**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

25.4.2016

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel. V úvodu je zpracována rešerše typů zařízení pro prodloužení dojezdu elektrických vozidel, provedených realizací v produkčních vozidlech, prototypch a konceptů a srovnání jednotlivých typů systémů. V další části se na modelovém případě hodnotí vlivy na provoz elektrických vozidel a jsou stanoveny požadavky na zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla. Je zpracována metodika pro dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel za pomoci hodnotících parametrů a aplikována na sedm tříd osobních vozidel a dva typy autobusů. Je proveden návrh systému, používající jako palivo zemní plyn, na bázi palivového článku s tuhými oxidy (SOFC) v kombinaci se spalovací turbínou, obsahující výpočty teplot, hmotnostních průtoků a výkonů jednotlivých komponent systému, kterými jsou palivový článek, plynová turbína, kompresor a tepelné výměníky. Systém je pak aplikován jako zařízení na prodloužení dojezdu na elektrobuse. V závěru je diskutován další možný směr vývoje týkající se navrhovaného systému.

Klíčová slova

zařízení na prodloužení dojezdu, palivový článek, mikroturbína, SOFC, elektromobil, elektrobuse, hybridní pohon

Abstract

This thesis deals with range extender systems for electric vehicles. The introduction contains research of range extender systems and their realizations and comparison. In the next section is evaluation of operation impacts on model case of electric vehicle. Requirements for range extender are defined. It is processed Methodology for dimensioning of device power and it is applied to seven classes of passenger cars and two types of busses. CNG fueled Solid oxide fuel cell (SOFC) combined with gas turbine based system is designed. Calculations concerning the mass flow rates, temperature and the performance of system components. System comprises SOFC, gas turbine, compressor and heat exchangers. Its application as range extender is implemented on electric bus. Discussion at the conclusion examines designed system development trends.

Keywords

range extender, fuel cell, microturbine, SOFC, electric vehicle, electric bus, hybrid drivetrain

Bibliografická citace

Bibliografická citace

DOKOUPIL, Jan. *Zařízení pro prodloužení dojezdu elektrických vozidel*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016.

Čestné prohlášení

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Josefa Morkuse CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 28. června 2016

.....

Jan Dokoupil

Poděkování

Poděkování

Děkuji rodině, přítelkyni Lence Kopečinské a mému nejbližšímu okolí za trpělivost a podporu při studiu.

Obsah

Úvod.....	9
1 Hybridní pohony	11
1.1 Sériový hybridní pohon	11
1.2 Paralelní hybridní pohon	12
1.3 Kombinovaný (sério – paralelní) hybridní pohon	12
2 Zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel	13
2.1 Spalovací motor jako RE	13
2.1.1 Čtyřdobý zážehový motor	13
2.1.2 Dvoudobý zážehový motor	17
2.1.3 Wankelův motor	17
2.2 Mikroturbína jako RE	18
2.3 Palivový článek jako RE	20
3 Srovnání zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel	21
4 Vozidla s elektrickým pohonem a zařízením na prodloužení dojezdu	22
4.1 Produkční vozidla	22
4.1.1 BMW i3 (Range Extender).....	22
4.1.2 General Motors.....	22
4.1.3 Designline ECO Saver IV™	23
4.1.4 Solaris Urbino 18.75 electric.....	23
4.2 Funkční prototypy, koncepty, studie	24
4.3 Četnosti jednotlivých systémů u realizací vozidel s RE	27
5 Vlivy na energetickou potřebu pro provoz elektrických vozidel	28
5.1 Modelový případ elektrického vozidla.....	28
5.2 Požadavky na zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel.....	34
6 Dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel	35
6.1 Hodnotící parametr p	35
6.1.1 Stanovení parametru p	35
6.1.2 Vlastnosti parametru p	37
6.2 Hodnotící parametr r	38
6.2.1 Stanovení parametru r	38
6.2.2 Vlastnosti parametru r	39
6.3 Dimenzování RE – osobní vozidla.....	40

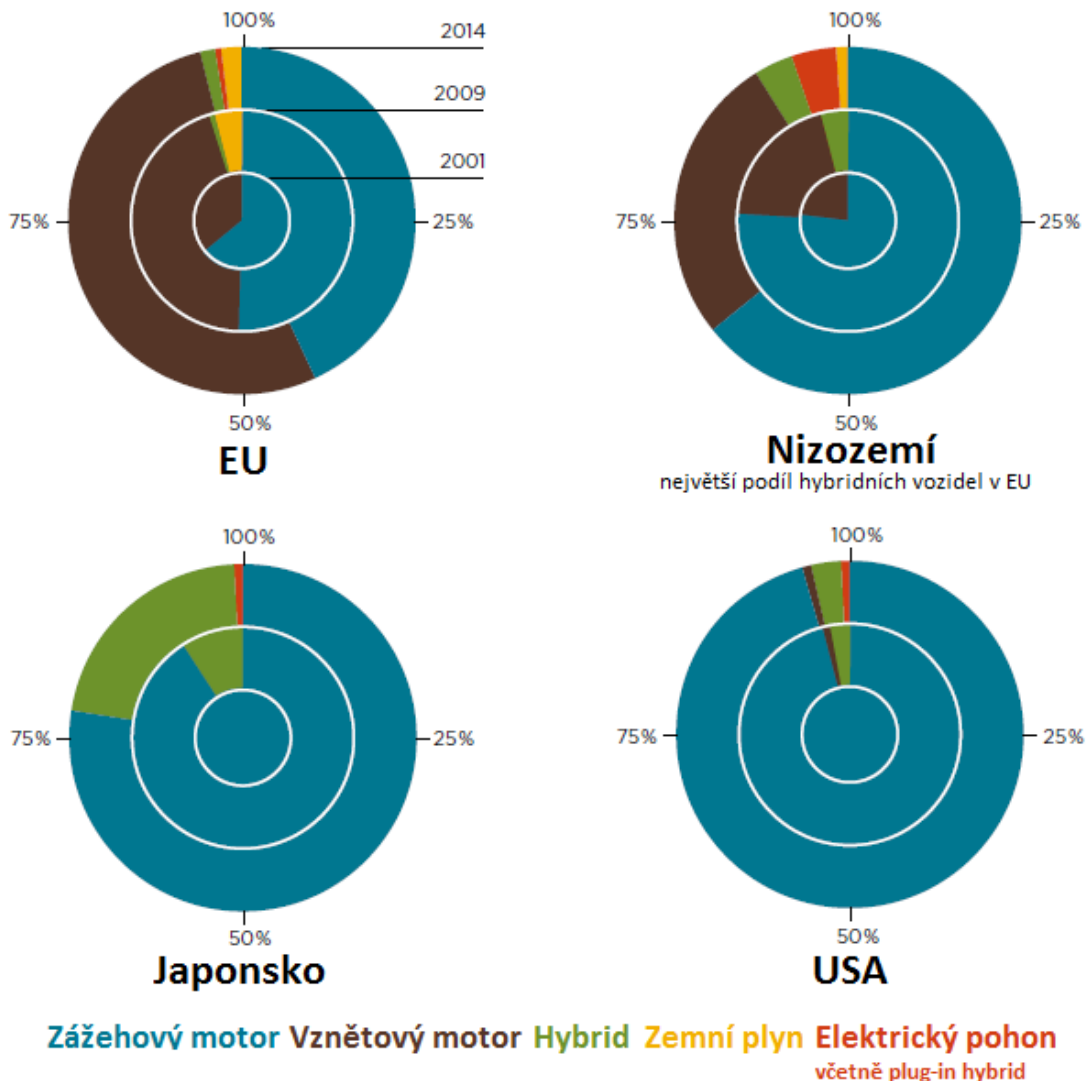
Obsah

6.4	Dimenzování RE – autobusy	45
6.5	Dimenzování RE – shrnutí	48
7	Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla	50
7.1	Palivové články	50
7.1.1	AFC	51
7.1.2	PAFC	51
7.1.3	SOFC	52
7.1.4	MCFC	52
7.1.5	PEMFC	52
7.2	Kombinace SOFC s plynovou turbínou	53
7.3	Zvolená koncepce	54
7.3.1	Parametry zvoleného SOFC	55
7.3.2	Příprava paliva – reforming	56
7.3.3	Potřebné množství vzduchu	57
7.3.4	Výkon kompresoru	58
7.3.5	Měrné tepelné kapacity	59
7.3.6	Spalovací komora	61
7.3.7	Plynová turbína	64
7.3.8	Tepelná bilance systému – výkon tepelných výměníků	66
7.3.9	Schéma a vypočtené hodnoty systému	69
7.4	Aplikace systému – zařízení na prodloužení dojezdu elektrobuse	71
7.4.1	SOR EBN 11	71
7.4.2	Energetická potřeba a výkon RE	72
7.4.3	Hmotnosti a rozměry RE60	74
7.4.4	Systém RE60 – shrnutí	78
7.5	Provoz systému RE60	79
	Diskuze	84
	Závěr	87
	Použité informační zdroje	88
	Seznam použitých zkratk a symbolů	94

Úvod

Pro pohon vozidla, tedy překonávání jízdních odporů, je zapotřebí mechanické energie rotačního pohybu jakožto její konečné formy [1]. Jako vstupní formy energie v hnacím ústrojí vozidel se nejčastěji využívá chemické energie paliva na bázi uhlovodíků (benzin, nafta, CNG...), v poslední době se však stále častěji kombinuje s energií elektrickou či se používá pouze čistě elektrická. Chemickou vstupní energii je nutné, v případě spalovacího motoru, převést nejdříve na energii tepelnou a až poté je možné energii tepelnou převést na mechanickou práci potřebnou pro pohon vozidla. Elektrickou energii lze převádět na mechanickou práci přímo.

U hnacích ústrojí produkčních vozidel se lze v současnosti setkat převážně se spalovacími motory na benzin, naftu a plyn (LPG, CNG). V poslední době se začínají prosazovat hybridní pohony kombinující zpravidla spalovací motor a elektromotor. Čistě elektrický pohon se vyskytuje ojediněle, ale je velmi často diskutován a dostává se v omezené míře do produkce velkých výrobců. Orientační přehled o podílu jednotlivých typů pohonů vozidel lze získat z obrázku 1.



Obrázek 1 - podíly jednotlivých typů pohonů vozidel [2]

Úvod

Elektricky poháněná vozidla s akumulátorem elektrické energie aktuálně prochází intenzivní fází vývoje. Jedním z hlavních omezení u těchto vozidel je zatím relativně nízká energetická hustota baterií, což má vliv na jejich dojezd a celkovou hmotnost. Další důvod, proč elektromobily nejsou více rozšířeny, je jejich nekonkurenceschopná cena, daná především cenou baterií.

Pomocí hybridního pohonu lze využít výhod a naopak částečně eliminovat nevýhody jednotlivých druhů pohonů, ze kterých je složen. Zejména dochází ke zvýšení účinnosti celého poháněcího ústrojí a s tím souvisejícího snížení spotřeby pohonných hmot a produkovaných emisí ve výfukových plynech.

V této diplomové práci je rozebrán specifický druh hybridního pohonu na bázi elektricky poháněného vozidla s akumulátorem elektrické energie vybaveného navíc dalším zdrojem elektrické energie ve formě přídavného zařízení, jež má zabezpečit zvýšení dojezdu.

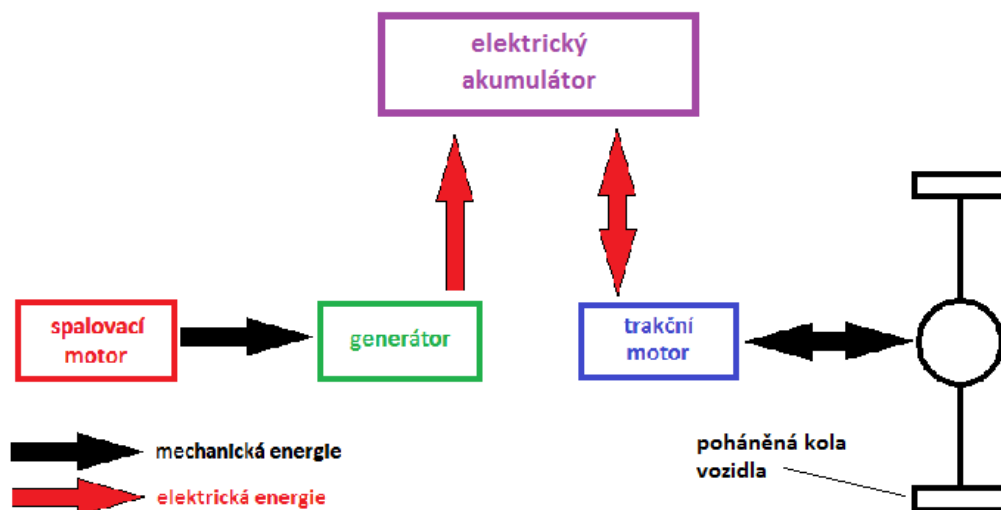
1 Hybridní pohony

Jak bylo naznačeno v úvodu, hybridní pohon kombinuje v rámci jednoho hnacího ústrojí vozidla nejméně dva pohony na různé vstupní formy energie. Tato energie je uchovávána v akumulátoru a v případě potřeby je využita pro provoz vozidla. Energie do akumulátoru může být dodána z vnějšího zdroje nebo v rámci hnacího ústrojí. Vnější zdroj se rozumí například u elektrického akumulátoru nabíjecí stanice a čerpací stanice u akumulátoru ve formě nádrže paliva. Dodání energie do akumulátoru v rámci hnacího ústrojí vozidla je myšleno například dobíjení elektrického akumulátoru vozidla spalovacím motorem nebo rekuperací kinetické energie při brzdění vozidla. Další formy energie, které lze akumulovat jsou hydraulická, pneumatická a mechanická.

Jako příklady propojení jednotlivých pohonů do jednoho hnacího ústrojí hybridního pohonu jsou provedení sériové, paralelní nebo kombinované (série – paralelní). V následujících popisech zapojení je uvažována kombinace spalovacího motoru a elektromotoru.

1.1 Sériový hybridní pohon

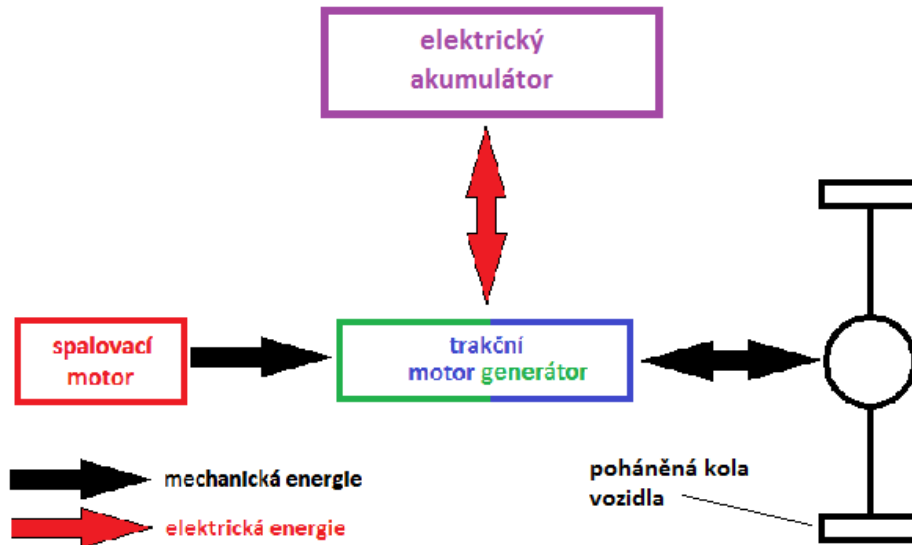
Spalovací motor pohání generátor, který nabíjí elektrický akumulátor. Energie z akumulátoru se využívá na elektrický pohon vozidla elektromotorem. Mezi spalovacím motorem a koly vozidla není mechanická vazba. Výhodou tohoto uspořádání je, že spalovací motor může pracovat v optimálním režimu jak z hlediska spotřeby, tak i z hlediska produkce emisí. V hnacím ústrojí pak není třeba vícestupňové převodovky a hnacích hřídelů. Nevýhodou je pak třeba vícenásobná změna energie, čímž se snižuje účinnost hnacího ústrojí a vyšší hmotnost systému.



Obrázek 2 - schéma sériového hybridního pohonu

1.2 Paralelní hybridní pohon

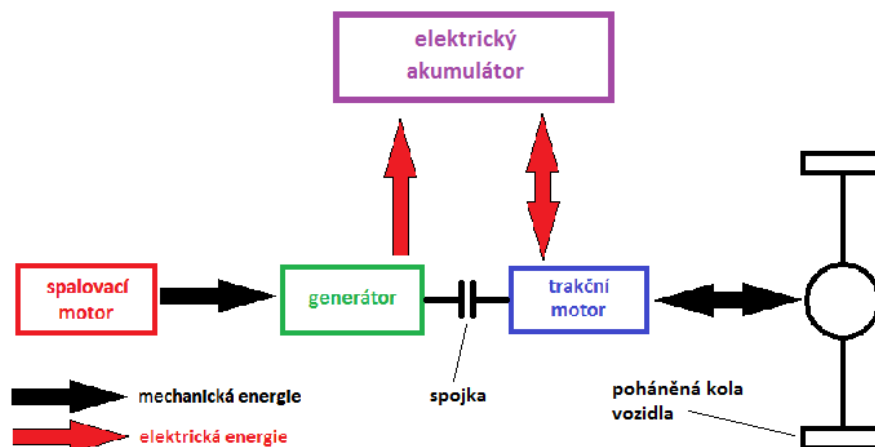
Spalovací motor i elektromotor mají mechanickou vazbu na kola vozidla a je možné jej pohánět oběma motory v různých režimech (každým zvlášť, oběma zároveň, dělení výkonu v různých poměrech...). Účinnost hnacího ústrojí je díky mechanickému propojení vyšší než u sériového hybridu. Jedná se o nejčastější provedení hybridního pohonu u produkčních vozidel. Dělení mechanického a elektrického výkonu v hnacím ústrojí může být provedeno například pomocí planetového soukolí nebo elektrického děliče výkonu na základě speciálně konstruovaných elektromotorů. Příklad uspořádání je na obrázku 3.



Obrázek 3 - schéma paralelního hybridního pohonu

1.3 Kombinovaný (série - paralelní) hybridní pohon

Jedno z možných provedení vychází ze sériového hybridu s možností mechanického propojení spalovacího motoru s koly vozidla. Na schématu v obrázku 4 je propojení realizováno pomocí spojky. S tímto řešením pak lze využít vlastností obou typů hybridních pohonů.



Obrázek 4 - kombinovaný (série - paralelní) hybridní pohon

2 Zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

Zařízením na prodloužení dojezdu elektricky poháněného vozidla (anglicky range extender – dále jen RE) se rozumí další zdroj elektrické energie, který ji během svého provozu dodává do elektrického akumulátoru a tak je možné dosáhnout většího dojezdu vozidla či doby provozu, než by umožnil pouze samotný plně nabitý akumulátor.

Možné schéma pohonu elektrického vozidla s RE je shodné s uvedeným schématem sériového hybridního pohonu na obrázku 2. Rozdíl oproti sériovému hybridnímu pohonu je především v jiném poměru výkonů jednotlivých částí systému. Elektrické vozidlo s RE je primárně koncipováno pro čistě elektrický pohon a přídatný energetický zdroj (např. spalovací motor) nebývá dostatečně výkonný pro plnohodnotný provoz vozidla. V této kapitole jsou dále rozebrány různé možnosti realizace RE.

2.1 Spalovací motor jako RE

2.1.1 Čtyřdobý zážehový motor

Malé motory s jedním až čtyřmi válci o zdvihovém objemu 325 cm³ až 1490 cm³ o výkonech 10 kW až 75 kW.

2.1.1.1 Lotus Range Extender

Lehký a kompaktní řadový tříválec se dvěma ventily na válec vyvinutý firmou Lotus Engineering [3] o zdvihovém objemu 1300 cm³ vystavený v roce 2011 na autosalonu v Ženevě. Systém pracuje podle potřeby s výkonem motoru 15 kW při 1500 min⁻¹ nebo 35 kW při 3500 min⁻¹ pro atmosférickou variantu. U verze přepřítvanané řemenem hnaným dmychadlem je výkon motoru 50 kW při 3500 min⁻¹. Lze provozovat na benzín, plyn nebo palivo na bázi alkoholu. Na klikový hřídel přímo připojený generátor od firmy Fagor Ederlan funguje zároveň jako startér pro motor. Hmotnost celého systému je 85 kg (92 kg s přepřítváním), z toho na samotný motor připadá 51 kg (58 kg). Motor, generátor a výkonová elektronika jsou z důvodu lepší komunikace a účinného chodu systémů řízeny jednou řídicí jednotkou Lotus.



Obrázek 5 - Lotus Range Extender [3]

2.1.1.2 *BMW range extender*

Dvouválcový řadový motor, převzatý ze skútru BMW C650 GT. [4] Zdvihový objem 647 cm³ se čtyřmi ventily na válec a maximálním výkonem 25 kW při 4300 min⁻¹. Motor plní emisní normu EURO 6. Hmotnost systému 120 kg. Vyráběno od roku 2013.



Obrázek 6 - BMW range extender [5]

2.1.1.3 *KSPG range extender*

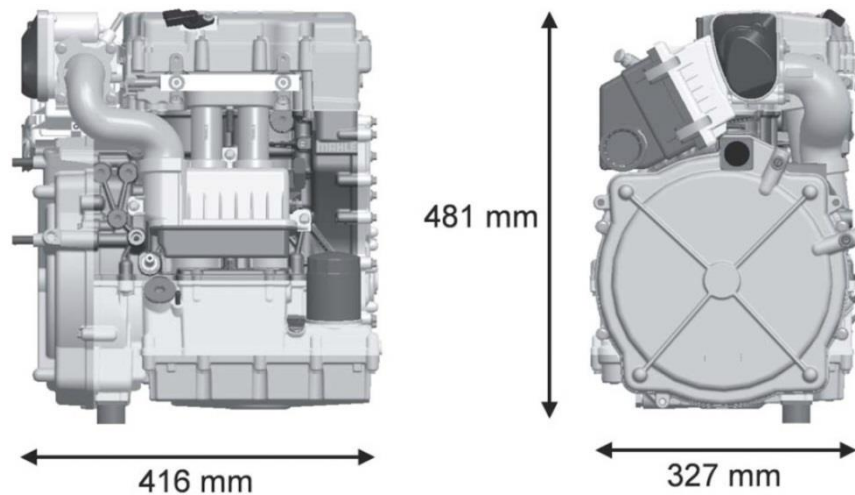
Vidlicový dvouválec s rozevřením 90° o zdvihovém objemu 799 cm³ s rozvodem OHV a dvěma ventily na válec. [6] Maximální výkon 30 kW při 4500 min⁻¹. Maximum točivého momentu 66 Nm při 3500 min⁻¹. Synchronní generátor se třemi páry pólových dvojic a permanentními magnety o elektrickém výkonu 2x15 kW je připojený přes převod 1:2. Motor plní emisní normu EURO 6. Hmotnost zařízení 62 kg. Rozměry: délka 665 mm, šířka 550 mm, výška 355 mm. Vyvinuto společnostmi KSPG AG a FEV GmbH a představeno v roce 2014.



Obrázek 7 - KSPG range extender [6]

2.1.1.4 **MAHLE compact range extender engine**

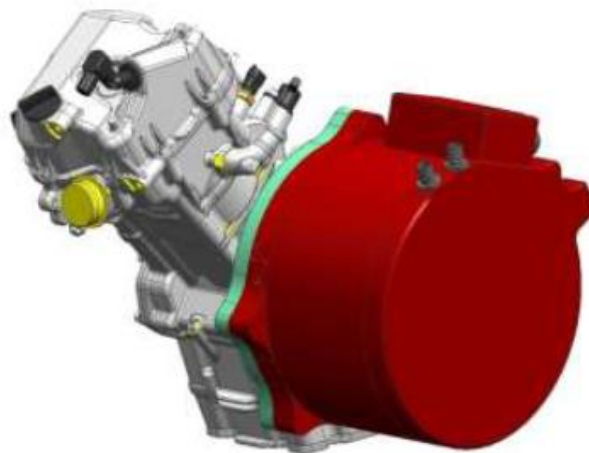
Řadový dvouválec o zdvihovém objemu 900 cm^3 s výkonem 30 kW při 4000 min^{-1} , eventuálně až 50 kW při použití přeplňování elektrickým dmychadlem. [7] Vyvinutý firmou MAHLE a představený v roce 2014. Cílem projektu byla zejména nízká cena, malý prostor pro zástavbu, nízká úroveň hluku a vibrací a příznivá spotřeba. Systém mazání motoru je navržen tak, aby byla možná jeho instalace v horizontální i vertikální poloze. Kompaktních rozměrů bylo dosaženo například začleněním axiálního generátoru do prostoru vzniklého úpravou bloku motoru.



Obrázek 8 - MAHLE compact range extender engine [7]

2.1.1.5 **SWISSAUTO REX**

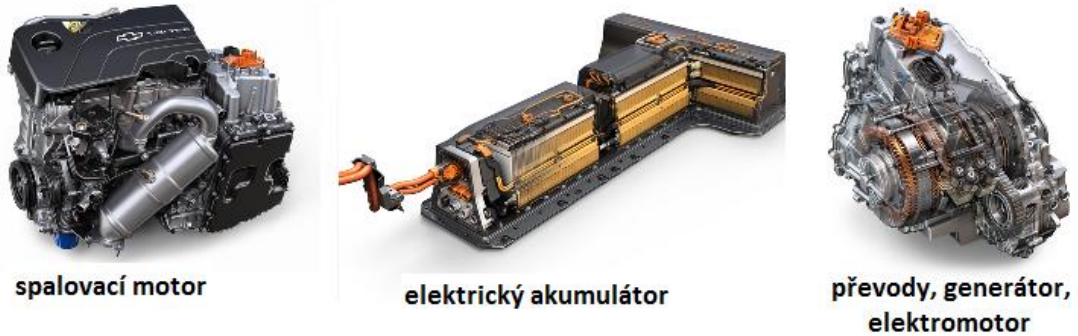
Jednoválec 325 cm^3 s výkonem 26 kW při 7000 min^{-1} . [8] Hmotnost 38 kg . Motor vyvinut firmou SWISSAUTO a představen v roce 2010. Integrovaný generátor od firmy Brusa o jmenovitém výkonu 30 kW . Elektrický výkon systému je 22 kW . Na uložení klikové hřídele a vačkových hřídelů byly použity valivá ložiska se sníženým třením.



Obrázek 9 - SWISSAUTO REX [8]

2.1.1.6 GM Voltec

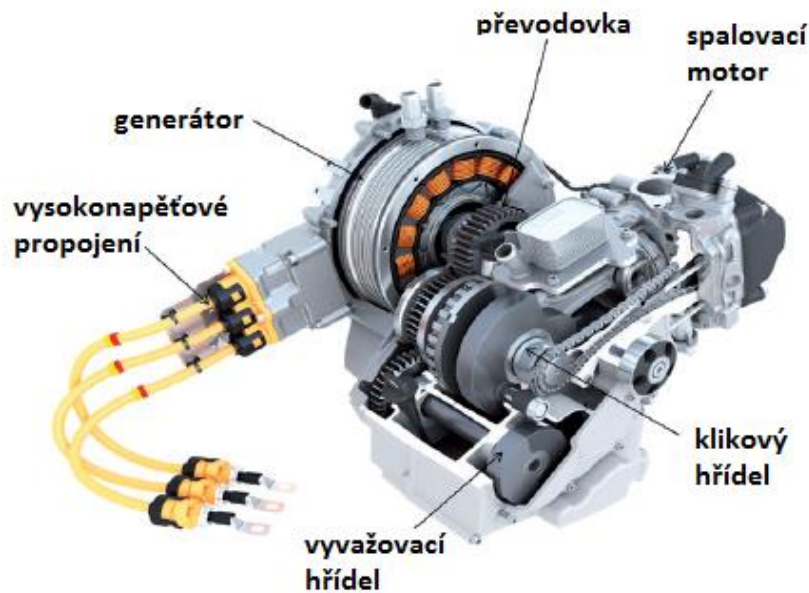
Systém hybridního pohonu elektrického vozidla s prodlouženým dojezdem firmy General Motors pro modelový rok 2016. [9] Jako RE slouží celohliníkový řadový čtyřválec 1500 cm³ DOHC s proměnným časováním ventilů a přímým vstřikováním o výkonu 75 kW při 5600 min⁻¹. Elektrický výkon generátoru je 45 kW. Systém pohonu je na principu sério – paralelního hybridu, pracující ve více provozních módech, s možností mechanického propojení spalovacího motoru s poháněnými koly vozidla. Nejedná se o typické uspořádání pohonu elektrického vozidla s RE, automobilka ale tento systém jako RE prezentuje a proto je zde uveden.



Obrázek 10 - komponenty systému GM Voltec [9]

2.1.1.7 ROTAX Range Extender

Čtyřventilový jednoválec zdvihového objemu 1000 cm³ o výkonu 25 kW při 6000 min⁻¹ rakouské firmy ROTAX [10] vyvinutý společně s firmou AVL. Hmotnost systému 54,4 kg. Nízkou úroveň hluku a vibrací zajišťují dva vyvažovací hřídele. Dále firma nabízí řadový dvouválec o výkonu 32 kW při 6500 min⁻¹.

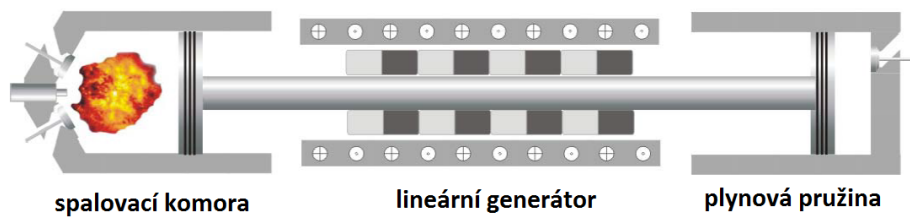


Obrázek 11 - ROTAX Range Extender [10]

2.1.2 Dvoudobý zážehový motor

2.1.2.1 Motor s volným pístem

Motor na principu zážehového motoru bez klikové hřídele. [11] Ojnice koná pouze přímočarý vratný pohyb. Vývoji tohoto řešení se věnuje například German Aerospace Center. Jejich koncepce je na bázi dvoudobého motoru s lineárním generátorem a plynovou pružinou. Výměna náplně ve válci je zajištěna elektromagnetickými ventily. Toto řešení vykazuje lepší účinnost oproti běžnému zážehovému motoru v řádech jednotek procent. Systém o výkonu 20 kW je vyvíjen v konfiguraci s centrální spalovací komorou, jenž má hmotnost 56 kg a s oddělenými spalovacími komorami o hmotnosti 69 kg.



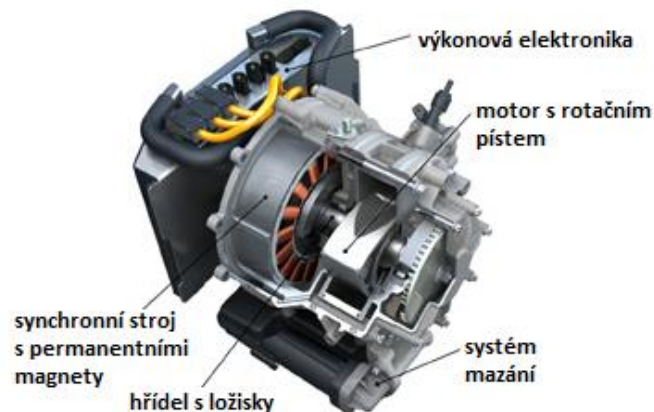
Obrázek 12 - Motor s volným pístem [11]

2.1.3 Wankelův motor

Systémy poháněné motorem s rotačním pístem.

2.1.3.1 AVL

Jedno rotorový motor s objemem pracovního prostoru 254 cm³ vyvinutý firmou AVL. [12] Maximální výkon 18 kW při 5000 min⁻¹. Hmotnost motoru 29 kg, celého systému pak 65 kg. Synchronní generátor s permanentními magnety má elektrický výkon 15 kW.



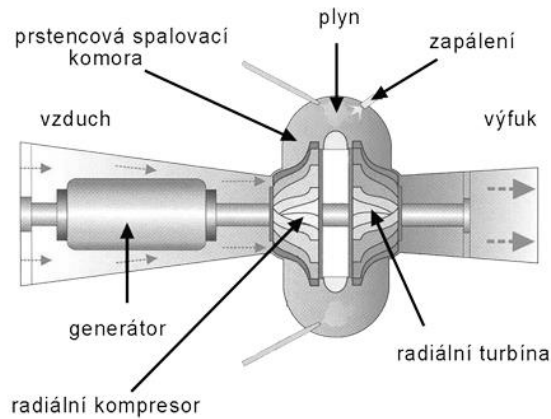
Obrázek 13 - AVL RE s Wankelovým motorem [12]

2.1.3.2 MAZDA

Jedno rotorový motor s objemem pracovního prostoru 333 cm³ s maximálním výkonem 19 kW při 2000 min⁻¹. [13] Hmotnost systému cca 100 kg.

2.2 Mikroturbína jako RE

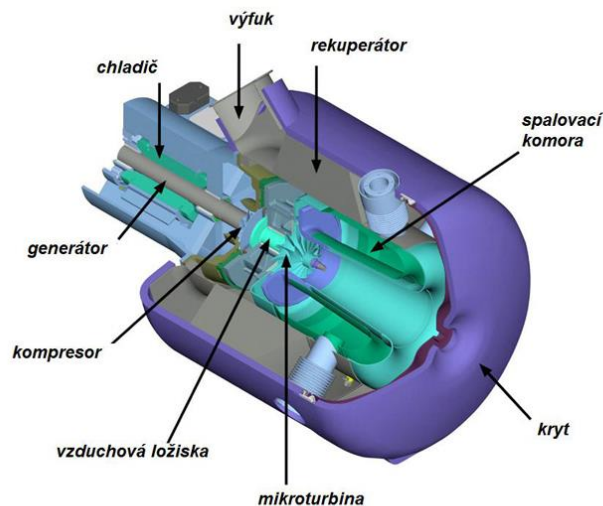
Spalovací turbína v kombinaci s generátorem, pracujících v řádech desetitisíců otáček o výkonech desítek kilowatt.



Obrázek 14 - princip mikroturbíny [14]

2.2.1 Capstone C30

Systémový elektrický výkon 30 kW při účinnosti 26%. S využitím odpadního tepla je celková účinnost až 90%. [15] Točivé soustrojí uloženo na vzduchových, aerodynamických ložiskách, vyžadujících malou údržbu. Podstata funkce aerodynamického ložiska je shodná například s ložiskem hydrodynamickým. Díky relativnímu pohybu dvou částí se v malé mezeře mezi nimi vytváří tenký film tekutiny (zde stlačeného vzduchu), který odděluje oba povrchy. [16] Provoz turbíny je možný na plyná i kapalná paliva (nafta, kerosin, CNG, LPG). Hmotnost systému 91 kg. Výrobce Capstone nabízí i výkonovou variantu 65 kW.



Obrázek 15 - Capstone C30 [14]

2.2.2 *Bladon Jets*

Anglická firma, zabývající se vývojem mikroturbín. [17] V jejich podání se jedná o zmenšeninu tryskového motoru. Podobně jako u Capstone je rotor rovněž uložen na aerodynamických ložiscích a je možné použití více druhů paliva. Nenabízí konkrétní produkt, pouze studie.



Obrázek 16 - Bladon Jets [17]

2.2.3 *MTT turbine RE*

Studie systému pro osobní vozidla holandské firmy MTT z roku 2010 o elektrickém výkonu 12 kW a hmotnosti 50 kg. [18] Základ tvoří komerční sériově vyráběné turbodmychadlo pro spalovací motory díky čemuž je možné snížení nákladů na vývoj celého systému.

2.3 Palivový článek jako RE

Více o principu a typech palivových článků v kapitole 7.1.

2.3.1 Ballard FCvelocity®

Kanadská firma Ballard nabízí moduly o výkonech 30 kW (FCvelocity® – MD) přes 100 kW (FCvelocity® – HD) až po 200 kW (FCvelocity® – XD) v hmotnostech 165 kg až 1300 kg pro použití v silniční, kolejové a lodní dopravě. [19] Systém pracuje na principu PEM vodíkového palivového článku a dále zahrnuje zařízení pro dodávku vzduchu pro palivový článek a chlazení. Výrobce uvádí provozní životnost vyšší než 20000 hodin. Modulární provedení usnadňuje zástavbu.



Obrázek 17 - Ballard FCvelocity® [19]

2.3.2 Proton Motor HyRange®

RE se systémovým výkonem 25 kW a hmotností 190 kg na bázi PEM vodíkového palivového článku. [20] Životnost přes 10000 hodin a až 15000 start/stop cyklů. Dále má výrobce Proton Motor v portfoliu modul s výkonem 8 kW o hmotnosti 180 kg.



Obrázek 18 - Proton Motor HyRange® [20]

2.3.3 Symbio FCell ALP5

RE o výkonech 5 kW a 20 kW s PEM vodíkovým palivovým článkem, vyvinuté pro elektricky poháněná vozidla. [21] Životnost přes 10000 hodin.



Obrázek 19 - Symbio FCell ALP5 [21]

3 Srovnání zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

Porovnání RE částečně převzato z [11]. Shrnuje ho tabulka 1, ze které jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými systémy.

Jako nejlehčí se jeví RE s Wankelovým motorem. Vykazuje ovšem nejmenší účinnost a tak je vhodný spíše pro vozidla s větší kapacitou baterie a nepříliš častým využitím RE. Spalovací motor se hodí pro často užívaný RE, kde je pak výhodou jeho vyšší účinnost. RE s mikroturbínou lze využít pro vozidla s menší kapacitou baterie, ale je nutné počítat s větším zástavbovým prostorem a vyšší hmotností. Nejlepší volbou pro RE je dle srovnání vodíkový PEM palivový článek, který je však pro běžné použití zatím příliš drahý a pro který neexistuje dostatečná infrastruktura čerpacích stanic.

	mikroturbína	PEM palivový článek	wankelův motor	4 dobý motor
účinnost [%]	25 ÷ 35	60	19 ÷ 27	20 ÷ 30
měrný výkon zařízení [W/dm ³]	95	825	640	315
hustota výkonu zařízení [W/kg]	400	650	860	430 ÷ 500
výrobní náklady	větší než u 4 dobého motoru	vysoké	závisí na velikosti produkce	závisí na velikosti produkce
potřeba systému snižování emisí	ne	ne	ano	ano
provoz na více druhů paliva	ano	ne	je možné	je možné
míra hluku a vibrací	malá	velmi nízká	střední	vyšší
rozběh [s]	10 ÷ 90	3 ÷ 30	<1	<1

Tabulka 1 - srovnání zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

4 Vozidla s elektrickým pohonem a zařízením na prodloužení dojezdu

4.1 Produkční vozidla

Vozidla sériově vyráběná, dostupná na trhu a použitelná v běžném provozu.

4.1.1 BMW i3 (Range Extender)

Automobilka nabízí pro svůj elektromobil BMW i3 [23] představený v roce 2013 volitelně BMW Range Extender, který je ve vozidle umístěn před zadní nápravou. Elektromotor pro pohon zadních kol má špičkový výkon 125 kW a vůz je vybaven elektrickým akumulátorem s kapacitou 18,8 kWh (nebo 27,2 kWh) umístěným v podlaze vozidla. Palivová nádrž pro RE je na 9 litrů benzínu. Výrobce udává čistě elektrický dojezd 130 km (200 km), s využitím RE pak 270 km (330 km). Pohotovostní hmotnost vozidla je 1415 kg (1440 kg), celková pak 1755 kg (1760 kg). Co se týká zákazníků, kteří zvolili nadstandardní výbavu vozidla s RE, tak v USA je jejich podíl vyrovnaný půl na půl [22] V EU je to cca 55% ve prospěch RE, přičemž celkové prodeje modelu i3 v EU byly za rok 2014 9744 kusů a v roce 2015 12047 kusů. [4]



Obrázek 20 - BMW i3 [23]

4.1.2 General Motors

Vozidla GM Volt pro americký trh a Opel (Vauxhall) Ampera pro evropský trh vybavené hybridním pohonem GM Voltec vyráběná od roku 2013. K těmto čtyřdveřovým sedanům přibylo o rok později na stejném základu postavené kupé Cadillac ELR. U GM Volt modelového roku 2016 se uvádí dojezd vozidla na elektrický pohon 80 km a při využití RE až 650 km. Spalovací motor je umístěn vpředu napříč a palivová nádrž je na 35 litrů benzínu. Akumulátor elektrické energie je umístěn ve středovém tunelu a v místě pod zadními sedadly. Skládá se celkem ze 192 článků a jeho kapacita je 18,4 kWh. Celkový výkon pro pohon vozidla o pohotovostní hmotnosti 1607 kg je 111 kW na předních kolech. [9] U Opelu Ampera byla vzhledem ke slabým prodejním výsledkům ukončena výroba.



Obrázek 21 - 2016 Chevrolet Volt [9]

4.1.3 Designline ECO Saver IV™

Americkým výrobcem Designline [24] vyvinutý autobus pro severoamerický trh, kde byl provozován na městských linkách (Denver, Disneyland, NY...), ale prodával se i do Austrálie, Anglie, Hong Kongu a Japonska. Pohon dvěma elektromotory o výkonu 120 kW každého z nich. Lithium Ion baterie s kapacitou 26 kWh dobíjí RE s 30 kW výkonnou mikroturbínou Capstone C30. Společnost zkrachovala v roce 2013.



Obrázek 22 - Designline ECO Saver IV™ [24]

4.1.4 Solaris Urbino 18.75 electric

Elektrický autobus polského výrobce [25] se nabízí volitelně s RE firmy Ballard na bázi vodíkového palivového článku s výkonem 101 kW, který se spouští jen v případě, že má být využita všechna energie 120 kWh Lithium Ion baterie. Autobus je poháněn asynchronním 240 kW elektromotorem. Pro uskladnění vodíku jsou instalovány tři tlakové lahve o celkovém objemu 205 l.



Obrázek 23 - Solaris Urbino 18.75 electric [25]

4.2 Funkční prototypy, koncepty, studie

Na bázi systému Lotus Range Extender je založeno více konceptů. Sportovní vůz Lotus Evora 414E na základech stejnojmenného vozidla je vybaven pohonem o celkovém špičkovém výkonu 305 kW, napájený bateriemi s kapacitou 14,4 kWh. Výrobce vůz prezentoval v roce 2012 a udal jeho celkový dojezd přes 480 km. [26] Na platformě Lotus Evora 414E představila taky například téhož roku automobilka Infinity, patřící pod Nissan Motors, koncept Emerg-e. Automobil spíše do města s RE od Lotusu vyvinutý malajským výrobcem Proton EMAS debutoval v roce 2010 na autosalonu v Ženevě. Design navrholo studio Italdesign Giugiaro. Baterie s kapacitou 11,5 kWh má spolu s RE zajistit jeho dojezd na vzdálenost 350 km. Anglická společnost MIRA, zabývající se vývojem automobilů, zabudovala systém v roce 2009 do limuzíny Jaguar

XJ poháněnou elektromotorem o výkonu 125 kW, jejíž celkový dojezd byl udáván na 600 km oproti dojezdu 48 km pouze na elektrický pohon.



Obrázek 24 - Lotus Evora 414E [3]

Společnosti vyvíjející RE je často aplikují do konkrétních vozidel, aby demonstrovali a testovali použitelnost systémů. Firma SWISSAUTO zabudovala svůj systém roku 2011 do VW Polo přestavěné na pohon 85 kW elektromotorem s 14 kWh bateriemi. Jeho dojezd na elektřinu je 100 km a 800 km s RE. [8]

MAHLE pro svůj předváděcí vůz (range extender demonstrator vehicle) použila základ z AUDI A1. Z parametrů byla uvedena pohotovostní hmotnost 1350 kg, čistě elektrický dojezd 70 km a celkový dojezd 500 km.

Firma AVL svůj RE s Wankelovým motorem zabudovala v roce 2011 do MINI a roku 2014 představila AUDI A1-E tron s 75 kW elektromotorem, bateriemi o kapacitě 12 kWh. Celkový dojezd činí 250 km, pouze na elektřinu z akumulátoru pak 50 km. [27] Švýcarská firma BRUSA Elektronik AG, zabývající se výrobou a vývojem elektrických a elektronických systémů vozidel, demonstrovala své technologie v roce 2012 na vozidle VW GOLF páté generace nazvaným eQmotion. Vybaven je RE firmy SWISSAUTO a elektrickým pohonem o výkonu 150 kW. Výrobce motorových dílů KSPG z Německa umístil vlastní RE v roce 2014 do FIATU 500 poháněného synchronním elektromotorem s permanentními magnety o výkonu 45 kW a pohotovostní hmotnosti 1290 kg a kapacitou baterií 12 kWh s čistě elektrickým dojezdem 65 km a dojezdem s pomocí RE 430 km. [6]



Obrázek 25 - AUDI A1-E tron [27]

Alternativu za tradiční londýnské taxi, odkazující se na ně především svým designem, se snaží vytvořit Ecotive Limited projektem The new Metrocab. Jeho pohon tvoří dvojice na sobě nezávislých bezkartáčových elektrických motorů o celkovém výkonu 100 kW. Lithium Ion polymerová baterie má kapacitu 12,2 kWh a s pomocí litrového spalovacího motoru RE vozidlo ujede až 560km. V současné době (2016) probíhá testovací provoz několika těchto vozidel. RE zabudovaný do elektromobilu

Vozidla s elektrickým pohonem a zařízením na prodloužení dojezdu

prezentovala roku 2013 i automobilka Mazda u prototypu svého modelu 2 EV. Využíval Wankelův motor, s jehož vývojem má automobilka velké zkušenosti. Elektromotor o výkonu 74 kW se stará o pohon vozidla o pohotovostní hmotnosti 1300 kg a bateriemi s kapacitou 20 kWh. Celkový dojezd uváděn 320 km.

Vývojem a optimalizací konceptu plně integrovaného RE se zabýval do roku 2014 projekt OptiMoRE [28] financovaný z fondů EU. Navazoval na projekt FUEREX, který měl za cíl vývoj tří kompaktních RE a to pro lehké užitkové vozidlo (IVECO Daily), osobní vůz (VOLVO C30) a malý vůz (AVL EVARE – MINI/AUDI A1).

RE s mikroturbínou Capstone C30 se dočkal realizace v roce 2006 firmou LP Engineering v Anglii. Zařízení bylo zabudováno do vozidla Ford S-Max. Stejný typ mikroturbíny pak v roce 2009 ve spojených státech využili pro stavbu vozu CMT-380. Toto sportovní auto se 165 kW výkonným elektromotorem a 24 kWh baterií má dojezd na elektřinu 130 km a s RE v chodu až 750 km. [29] Koncept supersportovního vozu Jaguar C-X75 představený roku 2010 měl být vybavený mikroturbínami Bladon Jets. Do produkce se nakonec nedostal, ale automobilka ho stále vyvíjí. Obdobný koncept superauta AT96/GT96 s mikroturbínou prezentovala čínská start-up firma Techrules na ženevském autosalonu 2016. Projektovaných 1030 koňských sil pohonu má vyvinout šest elektromotorů.



Obrázek 26 - CMT-380 [29]

Vodíkový PEM palivový článek k běžnému využití intenzivně vyvíjí francouzská firma Symbio FCell. Do testovacího provozu francouzské pošty v roce 2015 nasadila užitkové vozidlo Renault Maxity o celkové hmotnosti 4,5 tun. O elektrický pohon vozidla se stará motor o výkonu 47 kW a akumulátor kapacity 42 kWh, se kterým vozidlo ujede 100 km. Spolu s RE o výkonu 20 kW pak dosahuje dojezdu až 200 km. Firma nabízí i malou dodávku Renault HyKangoo s výkonem elektromotoru 44 kW a celkovém dojezdu 482

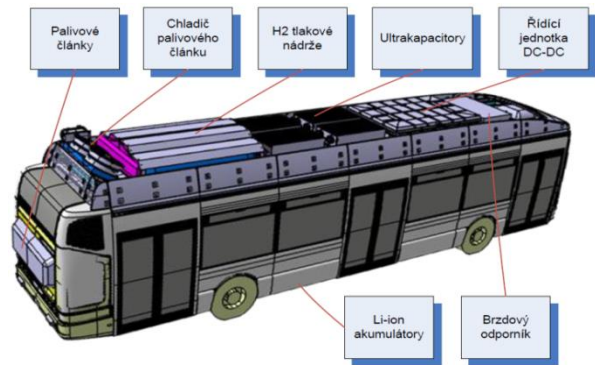


Obrázek 27 - Symbio FCell Renault Maxity [21]

km. [21] Také německá Proton Motor nabízí aplikaci RE s 5 kW PEM palivovým článkem pro dodávkové vozidlo na bázi Ford Transit s elektromotorem 90 kW a baterií 40 kWh.

Vozidla s elektrickým pohonem a zařízením na prodloužení dojezdu

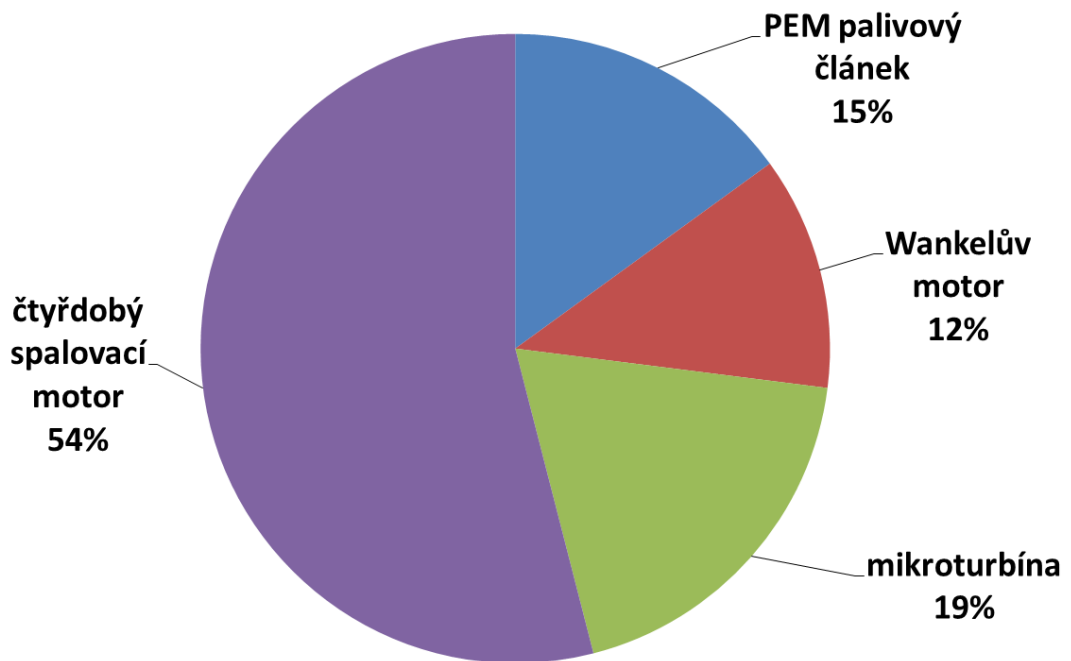
Zajímavým projektem, koordinovaným ÚJV Řež, a. s. byla stavba a následný provoz autobusu nazvaným TriHyBus poháněný palivovým článkem Proton Motor s maximálním výkonem 50 kW a vybavený trakční baterií Li-Ion s kapacitou 27 kWh a ultrakapacitorem s vybíjecím výkonem až 200 kW. Jeho Pohon zajišťuje asynchronní motor 120 kW. [30] S ohledem na výkon zdroje energie má systém pohonu blízko ke kategorii RE. Výkon 50 kW palivového článku je pro pokrytí rozsahu potřebných výkonů na pohon autobusu nedostatečný a výkonové špičky se pokrývají z baterií a ultrakapacitoru.



Obrázek 28 – TriHyBus [30]

4.3 Četnosti jednotlivých systémů u realizací vozidel s RE

Z grafu četnosti systémů RE, zahrnujících všech dvacet šest uvedených vozidel, je patrné převažující využití čtyřdobého spalovacího motoru. Tento fakt je zřejmě dán tím, že technologie těchto motorů je rozšířená a velmi dobře zvládnutá. Ostatní systémy jsou v různých stádiích vývoje a i přesto, že můžou v menších sériích fungovat, tak zatím nejsou konkurenceschopné. Není ale vyloučeno, že některý z nich se v budoucnosti rozšíří, zejména jestli dojde k vývoji kupříkladu v materiálových vědách, což se ale neobejde bez velkých investic.



Graf 1 - četnost jednotlivých u realizací vozidel s RE

5 Vlivy na energetickou potřebu pro provoz elektrických vozidel

Elektricky poháněná vozidla s akumulátorem elektrické energie musí všechny své energetické potřeby pokrýt z tohoto zdroje. Energetickými potřebami se rozumí v případě pohonu překonání jízdních odporů a přídavné spotřeby.

5.1 Modelový případ elektrického vozidla

Pro grafické znázornění energetické potřeby elektrického vozidla se zde vychází z jednoduchého modelu podélné dynamiky vozidla, kde jízdní odpory reprezentuje valivý odpor a odpor vzduchu a přídavné spotřeby jsou vyjádřeny jednou hodnotou konstantního příkonu.

Valivý odpor se stanoví ze vztahu

$$O_f = m \cdot g \cdot f \quad (1)$$

kde: O_f je valivý odpor vozidla [N]

m je hmotnost vozidla [kg]

g je gravitační zrychlení (zvoleno $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

f je součinitel valivého odporu (zvoleno $f = 0,02$ například dle [1])

Pro výpočet odporu vzduchu je třeba znát čelní plochu vozidla. Vzhledem k tomu, že tuto hodnotu výrobce často neuvádí, lze použít zjednodušený vztah

$$S_x = b \cdot h \quad (2)$$

kde: S_x je přibližná čelní plocha vozidla [m^2]

b je rozchod předních kol vozidla [m]

h je celková výška vozidla [m]

Odpor vzduchu se vypočítá

$$O_v = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot S_x \cdot \rho_v \cdot v^2 \quad (3)$$

kde: O_v je odpor vzduchu [N]

c_x je součinitel odporu vzduchu [$-$]

ρ_v je hustota vzduchu (zvoleno $\rho_v = 1,24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

v je rychlost vozidla [$m \cdot \text{s}^{-1}$]

Vlivy na energetickou potřebu pro provoz elektrických vozidel

Výkony jízdních odporů pak vyplynou ze vztahů

$$P_f = O_f \cdot v \quad (4)$$

$$P_v = O_v \cdot v \quad (5)$$

kde: P_f je výkon valivého odporu [W]

P_v je výkon odporu vzduchu [W]

Celkový výkon, potřebný pro pohon vozidla je dán vztahem

$$P_c = P_f + P_v + P_{aux} \quad (6)$$

kde: P_c je potřebný výkon pro pohon vozidla [W]

P_{aux} je příkon všech přídavných spotřeb [W]

Spotřeba energie na kilometr C_c [$Wh \cdot km^{-1}$] se pak vypočítá z

$$C_c = \frac{P_c}{v \cdot 3,6} \quad (7)$$

Hodnoty pro konkrétní vozidlo BMW i3 jsou zvoleny dle údajů výrobce [23]:

$$C_{ci3} = 135 Wh \cdot km^{-1}$$

$$b_{i3} = 1,571 m$$

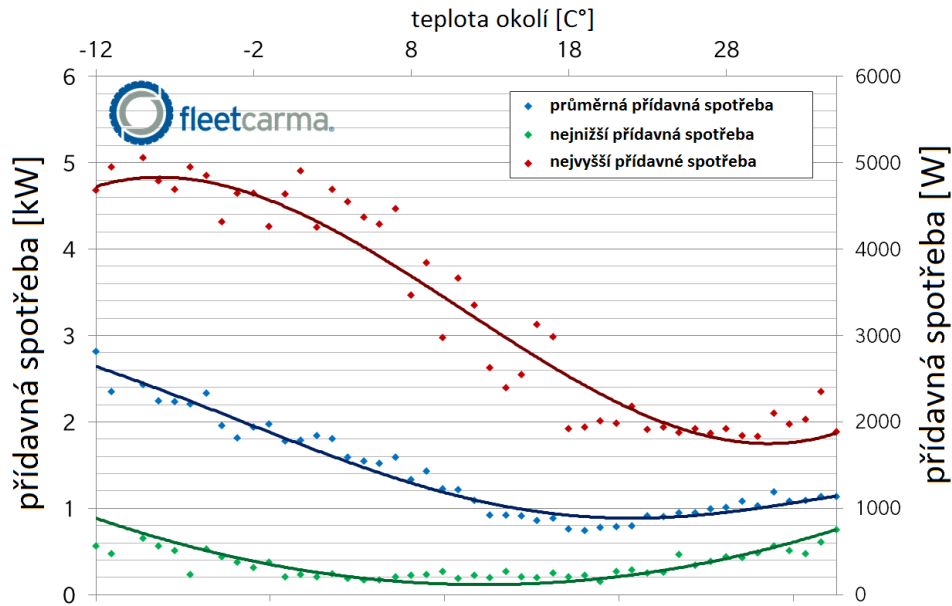
$$h_{i3} = 1,578 m$$

$$c_{xi3} = 0,29$$

$$m_{i3} = 1390 kg$$

Příkon přídavných spotřeb zahrnuje napájení systémů pro provoz vozidla, aktivní bezpečnosti a komfort posádky. Konkrétně tedy řídicí jednotky, posilovače řízení a brzd, motorky stěračů, motorky stahování skel a nastavení zpětných zrcátek, asistenční systémy, osvětlení vozidla, vytápění a klimatizace, audio a video systémy, navigace, nabíječku pro mobilní telefon, vyhřívání a chlazení součástí vozidla atd. Vzhledem k tomu, že zejména vytápění a klimatizace prostoru pro posádku vozidla je značně energeticky náročné, je tedy zřejmé, že hodnota příkonu přídavných spotřeb vozidla bude závislá na teplotě okolí (klimatických podmínkách). Touto závislostí se zabývala v jednom ze svých průzkumů kanadská firma FleetCarma, která spravuje rozsáhlou flotilu vozidel, mezi nimiž jsou i elektromobily. Závislost přídavné spotřeby na teplotě okolí zpracovala ze 7375 jízd vozidel Nissan Leaf v reálném provozu. [31] a je znázorněna v grafu 2.

Vlivy na energetickou potřebu pro provoz elektrických vozidel



Graf 2 - závislost přídatné spotřeby na teplotě okolí [31]

Pro další zpracování byly z grafu 2 odečteny hodnoty průměrných přídatných spotřeb

$$P_{aux-10^{\circ}\text{C}} = 2500 \text{ W pro teplotu okolí } -10^{\circ}\text{C}$$

$$P_{aux5^{\circ}\text{C}} = 1450 \text{ W pro teplotu okolí } 5^{\circ}\text{C}$$

$$P_{aux20^{\circ}\text{C}} = 900 \text{ W pro teplotu okolí } 20^{\circ}\text{C}$$

$$P_{aux35^{\circ}\text{C}} = 1150 \text{ W pro teplotu okolí } 35^{\circ}\text{C}$$

Jelikož BMW i3 a Nissan Leaf patří do podobného segmentu vozidel, vychází model energetických potřeb z kombinace podélné jízdní dynamiky BMW i3 a přídatných spotřeb Nissan Leaf.

Pro rychlost $v_{NEDC} = \frac{33,6}{3,6} = 9,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, teplotu okolí 20°C a po dosažení hodnot rozměrů a hmotností BMW i3 je hodnota spotřeby energie $C_{cm} = 113,33 \text{ Wh} \cdot \text{km}^{-1}$. Hodnoty rychlosti a teploty okolí zvoleny tak, aby odpovídaly podmínkám stanovení spotřeby energie uváděné výrobcem při testovacím cyklu NEDC. [76] Protože $C_{cm} \neq C_{ci3}$, tak pro přiblížení se uváděným hodnotám spotřeby energie zavedeme korekční koeficient do vztahu pro výpočet valivého odporu

$$O_{fk} = m_{i3} \cdot g \cdot f \cdot k_f \quad (8)$$

kde: O_{fk} je korigovaný valivý odpor vozidla [N]

k_f je korekční koeficient valivého odporu vozidla [–]

Vlivy na energetickou potřebu pro provoz elektrických vozidel

Korekční koeficient se stanoví ze vztahu

$$k_f = \left(C_{ci3} - \frac{P_{vi3}}{v_{NEDC} \cdot 3,6} - \frac{P_{aux20^\circ C}}{v_{NEDC} \cdot 3,6} \right) \cdot \frac{3,6}{m_{i3} \cdot g \cdot f} = 1,286 \quad (9)$$

kde: P_{vi3} je výkon odporu vzduchu z dosažených hodnot pro BMW i3 [W]

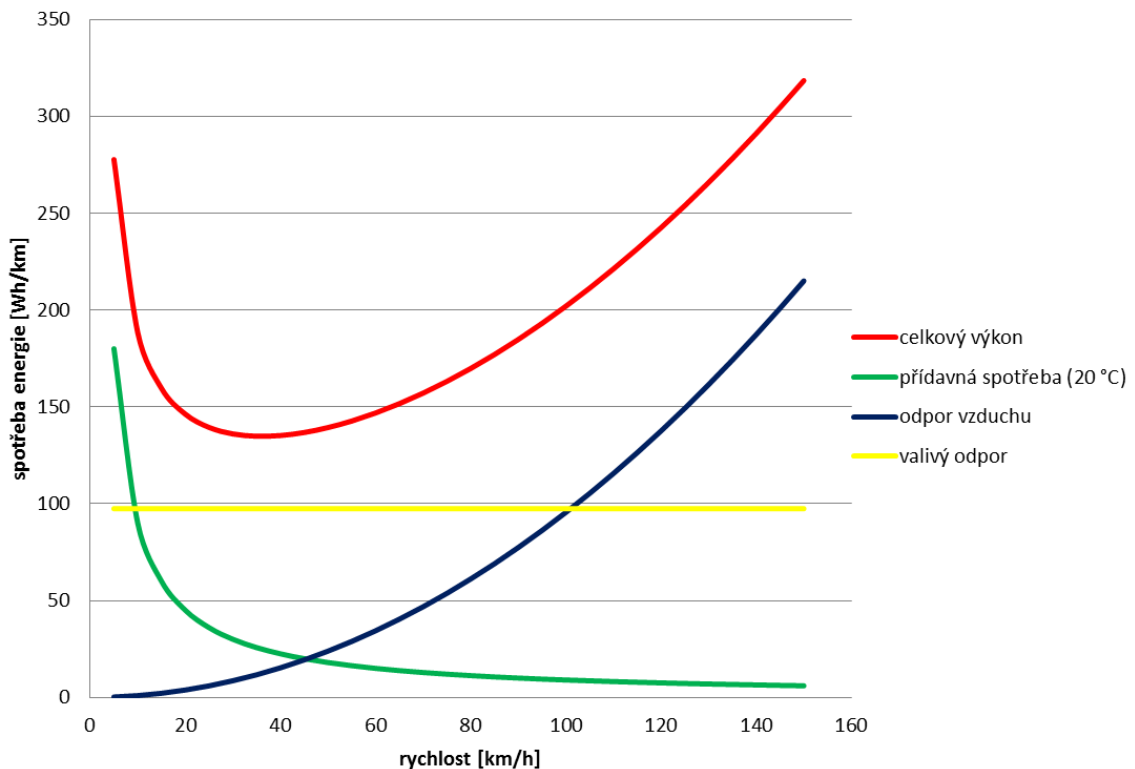
Korigovaná spotřeba energie se pak vypočítá

$$C_{cmk} = \frac{P_{fk} + P_{vi3} + P_{aux}}{v \cdot 3,6} \quad (10)$$

kde: C_{cmk} je korigovaná spotřeba energie [$Wh \cdot km^{-1}$]

P_{fk} je korigovaný výkon valivého odporu [W]

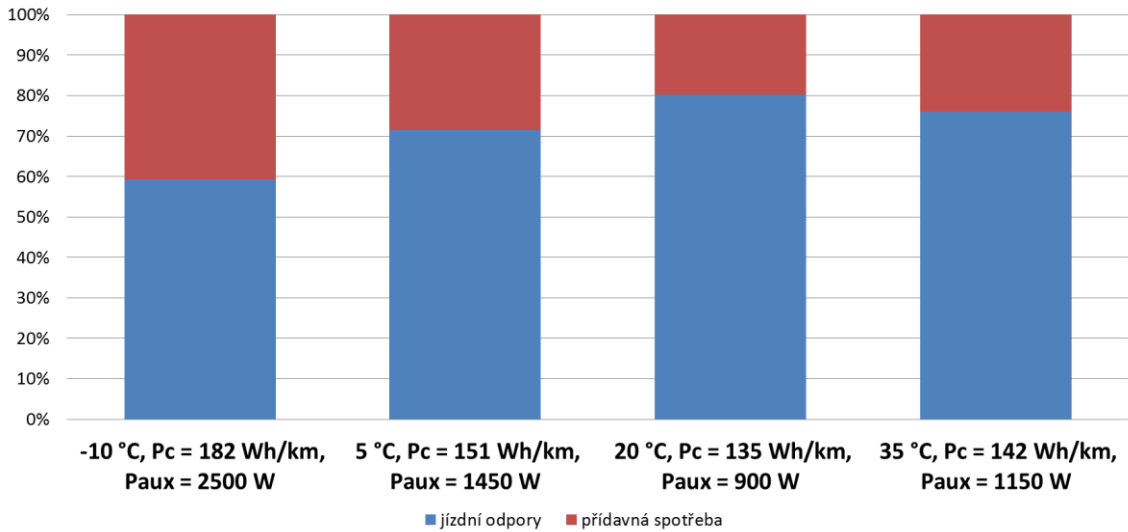
Touto korekcí tak bylo zohledněno to, že celkový výkon P_c je zde uvažován pro vozidlo jedoucí konstantní rychlostí v , kdežto testovací cyklus NEDC je složen z úseků, kde se akceleruje, brzdí i jede konstantní rychlostí. Pro korekci byla záměrně zvolena složka valivého odporu z důvodu, že jako jediný v tomto modelu není závislý na rychlosti. V grafu 3 jsou pak znázorněny průběhy celkové spotřeby energie a dílčích spotřeb výkonů přídavné spotřeby, valivého odporu a odporu vzduchu v závislosti na rychlosti.



Graf 3 – závislost spotřeby energie dílčích složek výkonů na rychlosti

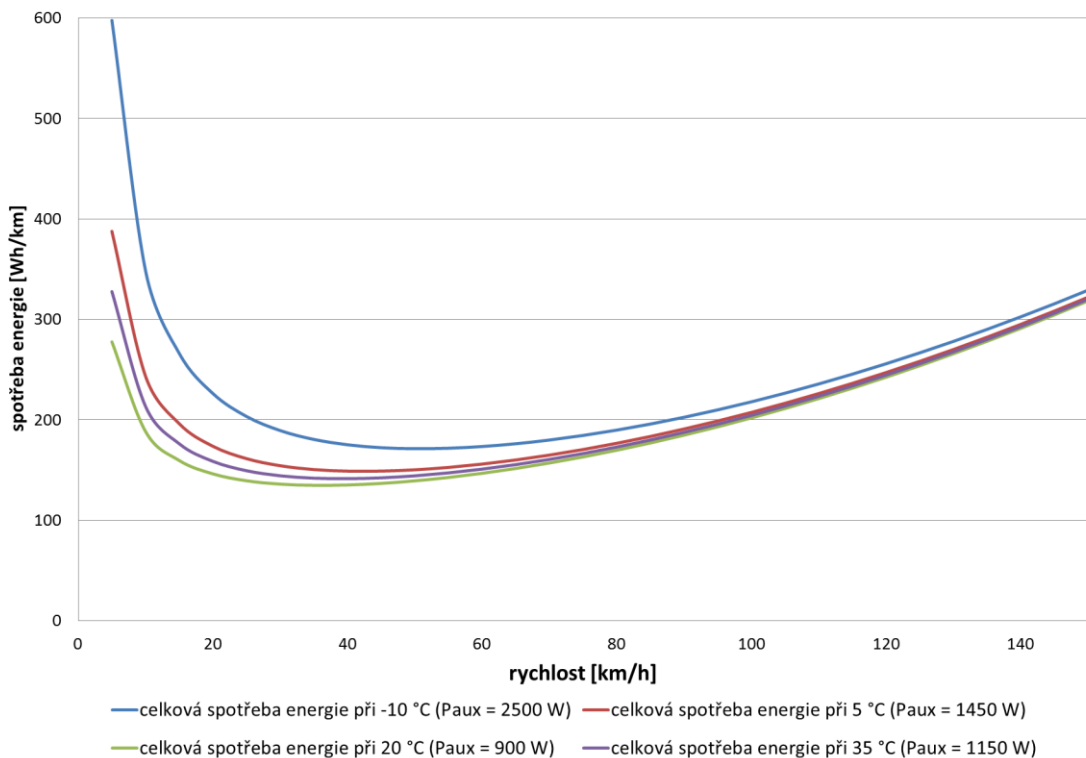
Vlivy na energetickou potřebu pro provoz elektrických vozidel

Procentuální podíly přídatné spotřeby a jízdního odporu na celkové spotřebě energie při rychlosti v_{NEDC} při různých teplotách okolí jsou znázorněny v grafu 4.



Graf 4 - podíl přídatné spotřeby a jízdního odporu na celkové spotřebě energie při rychlosti v_{NEDC}

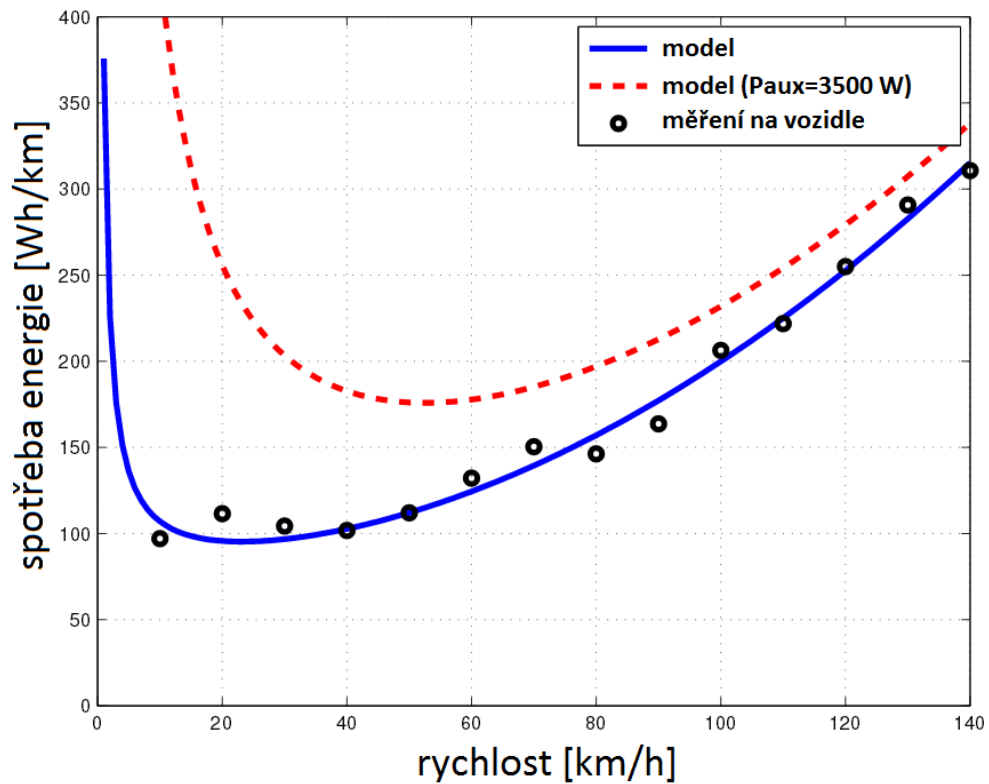
Závislosti spotřeby energie na rychlosti při různých teplotách okolí znázorňuje graf 5.



Graf 5 - závislost spotřeby energie na rychlosti při různých teplotách okolí

Vlivy na energetickou potřebu pro provoz elektrických vozidel

Pro porovnání průběhů hodnot v grafu 5 může sloužit graf 6 převzatý z [32]. Tento graf byl publikován v rámci projektu, který analyzoval spotřebu elektrického vozidla při 20000 km dlouhém testovacím provozu. Matematický model pro stanovení hodnot v grafu 6 byl stanoven na základě naměřených hodnot v provozu vozidla. Z grafů 5 a 6 jsou patrné podobné průběhy znázorněných hodnot.



Graf 6 - závislost spotřeby energie na rychlosti [32]

5.2 Požadavky na zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

Z uvedených grafů plynou vlivy na energetickou potřebu elektrických vozidel s akumulátorem elektrické energie. Klimatické podmínky mají vliv na přídatnou spotřebu, jež může při uvažované průměrné rychlosti v_{NEDC} tvořit v závislosti na teplotě okolí 20 až 40 procent z celkové spotřeby energie na provoz vozidla. Při vyšších rychlostech (nad 100 km/h) začíná mít dominantní podíl výkon na překonání odporu vzduchu, přičemž závislost přídatné spotřeby na teplotě klesá. Vzhledem k tomu, že příkon přídatných spotřeb je konstantní a spotřeba je vztažena na jednotku dráhy, pak k výraznému nárůstu spotřeby energie dochází se snižováním rychlosti. Při jejich nízkých průměrných hodnotách (pod 10 km/h) se může v závislosti na teplotě spotřeba zvýšit více jak dvojnásobně. Na průměrnou rychlost má například v městském provozu vliv hustota provozu v závislosti na dopravních špičkách. V závislosti na denní době se tak průměrná rychlost jízdy na některých místech výrazně mění (příklad: Praha, Jižní spojka, úsek Vídeňská – Průmyslová, průjezd bez provozu 8 minut – odpovídá 70 km/h, průjezd ve špičce 12 minut – odpovídá 46 km/h, průjezd v pátek v 16 hodin 22 minut – odpovídá 25 km/h [33]).

Požadavkem na zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla je tak zajistit přísun energie na provoz vozidla při zvýšených nárocích na energetickou potřebu danou klimatickými podmínkami, dopravní situací, průměrnou cestovní rychlostí a nároky na zajištění komfortu posádky. Zajistí se tak delší doba provozu vozidla bez nutnosti dobíjet elektrický akumulátor z vnějšího zdroje a tím i větší kilometrový dojezd vozidla.

6 Dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

V této části je navržena metoda pro dimenzování výkonu RE pro vozidla s elektrickým pohonem. Hodnocené kategorie jsou osobní vozidla a autobusy. Srovnávacím kritériem je hodnotící parametr pro jednotlivé stupně výkonu RE pro každého zástupce dané kategorie. Metoda umožňuje určit potřebný výkon RE s ohledem na požadovaný dojezd nebo dobu provozu.

6.1 Hodnotící parametr p

Pro vyhodnocení daného výkonu RE pro konkrétní vozidlo je použit parametr p , který udává podíl kilometrového dojezdu vozidla s RE v nepřetržitém provozu ke kilometrovému dojezdu vozidla na čistě elektrický pohon. Nepřetržitým provozem RE se rozumí jeho chod po celou dobu provozu vozidla při jízdě po dráze s_{RE} .

6.1.1 Stanovení parametru p

Parametr vyjadřuje tedy navýšení dojezdu vozidla při použití RE a základní vztah pro jeho určení je

$$p = \frac{s_{RE}}{s_{el}} \quad (11)$$

kde: p je hodnotící parametr [–]

s_{RE} je dojezd vozidla s RE v nepřetržitém chodu [km]

s_{el} je dojezd vozidla na čistě elektrický pohon [km]

Pro stanovení dojezdu čistě na elektrický pohon je třeba znát hodnoty spotřeby energie a využitelné kapacity baterie. Dojezd se pak vypočítá ze vztahu

$$s_{el} = \frac{E_b \cdot 100}{C_s} \quad (12)$$

kde: E_b je využitelná kapacita elektrické energie z akumulátoru [kWh]

C_s je dráhová spotřeba energie [kWh · 100 km⁻¹]

Dále platí, že

$$s_{RE} = v_p \cdot t_{RE} \quad (13)$$

kde: v_p je provozní průměrná rychlost [km · h⁻¹]

t_{RE} je doba nepřetržitého provozu RE po dráze s_{RE} [h]

Při uvažování energetické rovnováhy

$$E_c - E_b - E_{RE} = 0 \quad (14)$$

kde: E_c je energie potřebná na ujetí dráhy s_{RE} [kWh]

E_{RE} je využitelná energie, dodaná z RE [kWh]

Dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

Ize vyjádřit

$$E_c = \frac{v_p \cdot t_{REC} \cdot C_s}{100} \quad (15)$$

$$E_{RE} = P_{RE} \cdot t_{REC} \quad (16)$$

kde: P_{RE} je využitelný výkon, dodaný z RE [kW]

Po dosazení do rovnice energetické rovnováhy a úpravě se vyjádří

$$t_{REC} = \frac{E_b}{\left(\frac{C_s \cdot v_p}{100} - P_{RE}\right)} \quad (17)$$

a tedy

$$s_{RE} = v_p \cdot t_{REC} = \frac{v_p \cdot E_b}{\left(\frac{C_s \cdot v_p}{100} - P_{RE}\right)} \quad (18)$$

Vztah pro výpočet parametru je pak

$$p = \frac{v_p \cdot E_b}{\left(\frac{C_s \cdot v_p}{100} - P_{RE}\right) \cdot s_{el}} \quad (19)$$

6.1.2 Vlastnosti parametru p

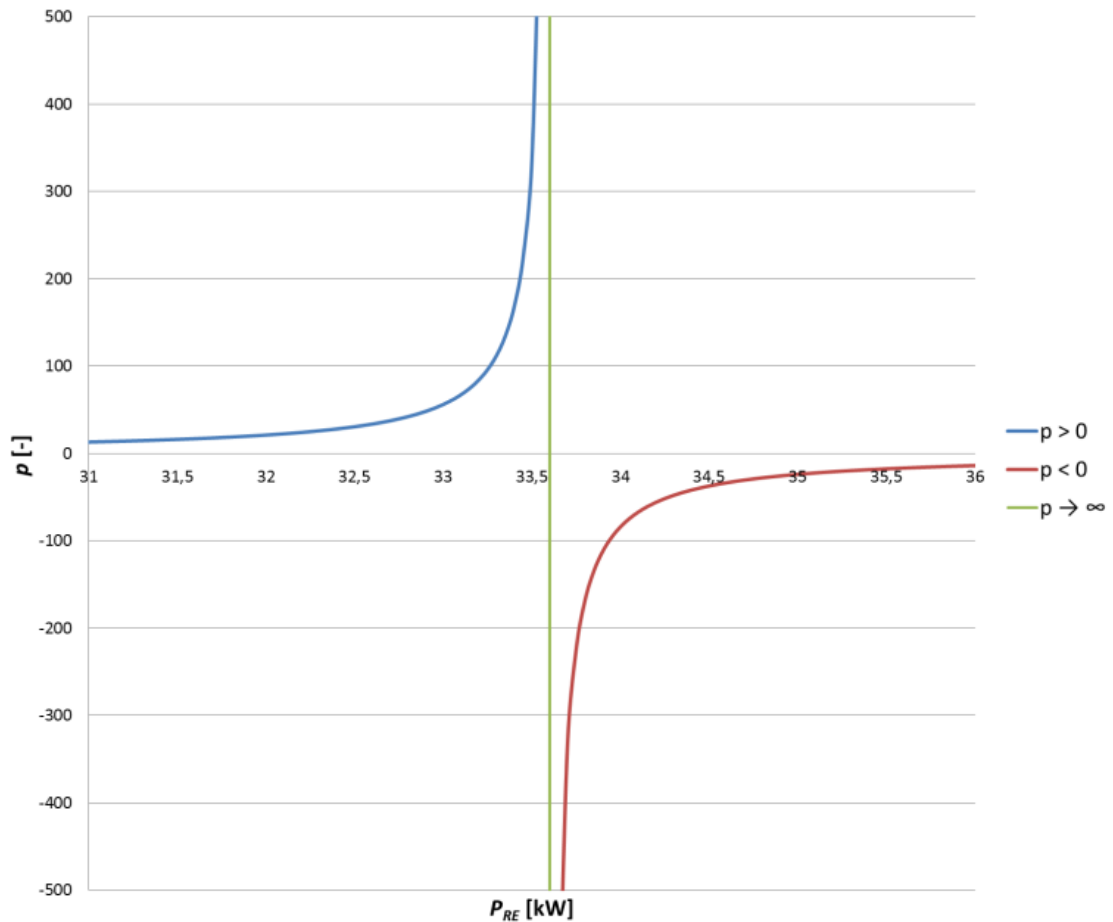
Uvažován případ vozidla s hodnotami dráhová spotřeby energie, využitelné kapacity baterie a provozní rychlosti

$$C_s = 100 \text{ kWh} \cdot 100 \text{ km}^{-1}$$

$$E_b = 100 \text{ kWh}$$

$$v_p = 33,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

V grafu 7, vyjadřující závislost parametru p na výkonu RE v intervalu $P_{RE} \in (31 \text{ kW}, 36 \text{ kW})$, je zřejmý růst hodnoty p , blížící se v hodnotě $P_{RE} = 33,6 \text{ kW}$ k $\pm\infty$ z čehož plyne, že při takovém výkonu RE vozidlo ujede libovolnou vzdálenost. V případě vyššího výkon RE pak není třeba, aby pro libovolný dojezd vozidla byl RE neustále v chodu. Pro tyto případy, tedy $p < 0$, lze stanovit parametr r taky z důvodu, že záporný parametr p nemá potřebnou kvalitativně vypovídající hodnotu.



Graf 7 – závislost parametru p na výkonu RE

6.2 Hodnotící parametr r

Jak již bylo uvedeno, pro případy, kdy parametr $p < 0$ lze stanovit parametr r . Je vyjádřen v procentech a poskytuje informaci o potřebné délce doby, po kterou má být RE v chodu tak, aby na konci dráhy ujeté vozidlem byl akumulátor elektrické energie plně nabitý. Tento provozní režim, udržující baterii nabitou například pro využití její energie pro čistě elektrický pohon v centrech měst, má třeba Chevrolet Volt volitelný jako mód „battery hold“. [34]

6.2.1 Stanovení parametru r

Vyjádření tohoto parametru vztahem je

$$r = \frac{t_{RE}}{t_c} \cdot 100 \quad (20)$$

kde r je hodnotící parametr [–]

t_{RE} je potřebná doba chodu RE pro udržení plně nabité baterie [h]

t_c je celková doba jízdy [h]

Při uvažování energetické rovnováhy

$$E_b - E_{RE} = 0 \quad (21)$$

lze vyjádřit

$$E_b = P_{RE} \cdot t_{RE} \quad (22)$$

Pro celkovou dobu jízdy platí

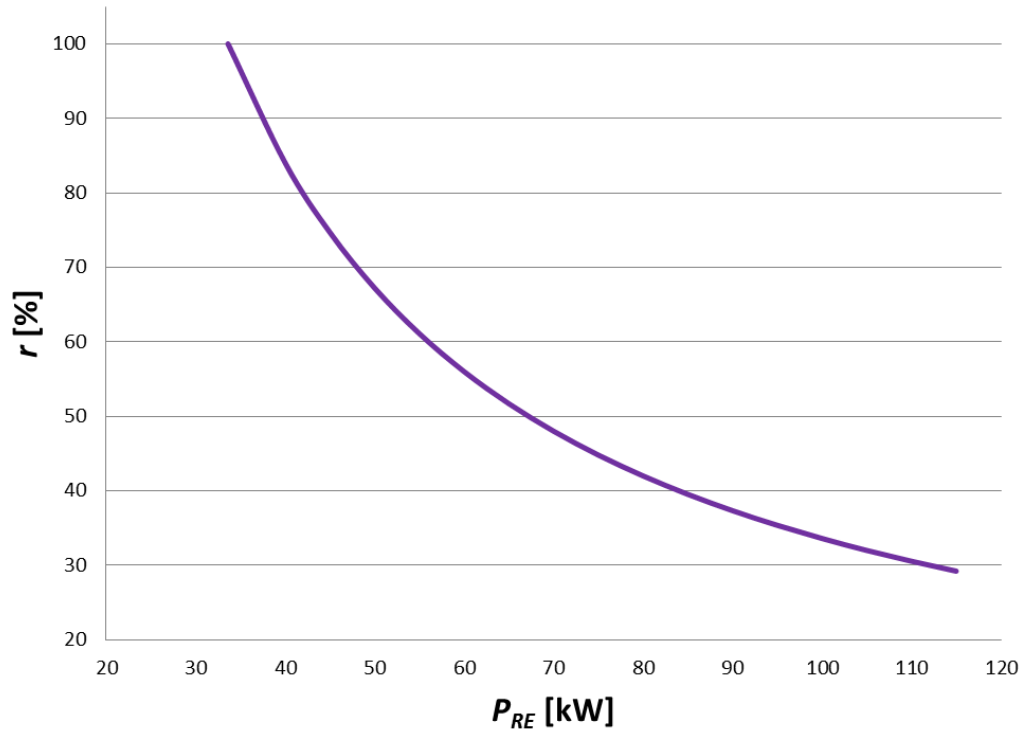
$$t_c = \frac{s_{el}}{v_p} \quad (23)$$

Vztah pro vypočítání parametru je pak

$$r = \frac{E_b \cdot v_p}{P_{RE} \cdot s_{el}} \cdot 100 \quad (24)$$

6.2.2 Vlastnosti parametru r

Jelikož výpočet parametru r vychází ze stejných hodnot jako parametr p , má i jeho závislost na výkonu RE obdobný průběh (zde výpočet z hodnot zvolených v 6.1.2), ale v kladné polovině, tak jak je znázorněno v grafu 8.



Graf 8 - závislost parametru r na výkonu RE

6.3 Dimenzování RE – osobní vozidla

Metoda dimenzování RE je u kategorie osobních vozidel provedena celkem pro sedm tříd. Každou třídu reprezentuje pět vybraných typických zástupců. Byla snaha pokrýt třídami co nejvíce segmentů osobních vozidel dostupných na trhu. Všechna vozidla jsou se zážehovým motorem a modelovými roky mezi 2008 a 2011. Jednotlivé třídy a jejich zástupci jsou:

Třída	Zástupci
CITY	VOLKSWAGEN Polo 1.4, CITROEN C2 1.4i, FIAT 500 1.4 16v, FORD Fiesta 1.4, HONDA Jazz 1.4 i-DS
HATCHBACK	VOLKSWAGEN Golf VI 1.6, AUDI A3 1.6, BMW 1 Series 118i, CITROEN C4 1.616v, FIAT Bravo 1.4 16v
SEDAN	VOLKSWAGEN Passat 1.8 TSI, AUDI A4 2.0, BMW 3 Series 320i, CITROEN C5 2.0i 16v, FORD Mondeo 2.0
FAMILY	VOLKSWAGEN Sharan 2.0, CITROEN Grand C4 Picasso 1.6i 16v, FORD Galaxy 2.0, RENAULT Espace 2.0 16V, VAUXHALL Zafira 2.2i 16v
LIMOUSINE	VOLKSWAGEN Phaeton 4.2 V8, AUDI A8 4.2 V8 FSI quattro, BMW 7 Series 740i, JAGUAR CARS XJ 4.2L, MERCEDES-BENZ S-Class S500
SUV	VOLKSWAGEN Touareg 3.6 V6, AUDI Q7 3.6 V6 FSI quattro, BMW X5 xDrive48i, MERCEDES-BENZ GL-Class GL500 4MATIC, HUMMER H3 3.7
SUPERSPORT	AUDI R8 5.2 V10 FSI quattro, FERRARI F430, PORSCHE 911 Turbo, JAGUAR CARS XKR8 5.0L Supercharged, LAMBORGHINI Gallardo

Pro stanovení dráhové spotřeby energie pro pohon vozidla dané třídy je vycházeno z kombinované spotřeby paliva jednotlivých vozidel, uváděnou výrobcem. [35] Spotřeba paliva dané třídy je reprezentována průměrem spotřeb jejich zástupců. Přepočtení dráhovou spotřebu energie je pak pomocí vztahu

$$C_s = \frac{C_p \cdot H_b \cdot \eta_{mz} \cdot \eta_p \cdot k_{sp}}{3,6} \quad (25)$$

kde: C_p je kombinovaná spotřeba paliva vozidla udávaná výrobcem [$l \cdot 100 \text{ km}^{-1}$]

H_b je výhřevnost benzínu o hodnotě $H_b = 32,69 \text{ MJ} \cdot l^{-1}$ dle [36]

η_{mz} je celková účinnost zážehového motoru o hodnotě $\eta_{mz} = 0,275$ dle [1]

η_p je hodnota účinnosti převodového ústrojí o hodnotě $\eta_p = 0,9$ [37]

k_{sp} je koeficient navýšení spotřeby paliva o zvolené hodnotě $k_{sp} = 1,15$ vycházející z odchylky hodnoty skutečné spotřeby oproti udávané výrobcem na základě zpětné vazby uživatelů dle [38]

Dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

Jelikož vybraná vozidla jsou poháněná spalovacím motorem a zde prováděná úvaha se týká elektricky poháněných vozidel, je třeba provést nahrazení hnacího ústrojí tak, aby platilo

$$m_{sm} + m_{pm} = m_{em} + m_{pe} + m_b \quad (26)$$

kde: m_{sm} je hmotnost spalovacího motoru [kg]

m_{pm} je hmotnost převodového ústrojí vozidla se spalovacím motorem [kg]

m_{em} je hmotnost elektromotoru [kg]

m_{pe} je hmotnost převodového ústrojí elektrického vozidla [kg]

m_b je hmotnost baterií elektrického vozidla [kg]

U všech uvedených agregátů je míněna hmotnost včetně příslušenství a provozních náplní.

Tato rovnováha je uvažována především z důvodu, aby při nahrazení hnacího ústrojí nebyla ovlivněna vyšetřovaná spotřeba energie změnou hmotnosti vozidla. Při velmi zjednodušujícím předpokladu, že

$$m_{pm} \approx m_{em} + m_{pe} \quad (27)$$

pak vyplývá

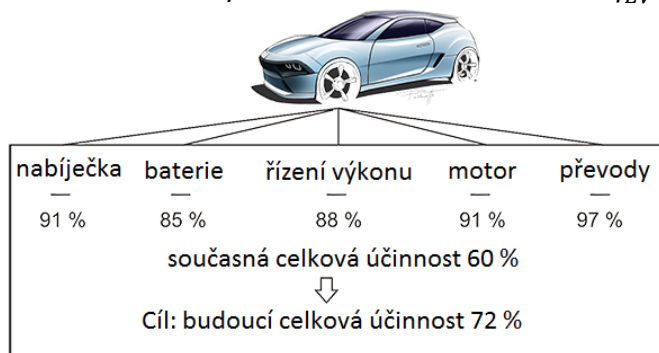
$$m_{sm} \approx m_b \quad (28)$$

Hmotnost motoru pro třídu vozidel se stanoví jako průměr hmotností motorů odpovídajících jednotlivým vozidlům třídy. [39] Ta pak tedy odpovídá hmotnosti baterií a na té závisí jejich využitelná kapacita určená vztahem

$$E_b = \frac{m_b \cdot c_b \cdot \eta_{EV}}{1000} \quad (29)$$

kde: c_b je měrná kapacita akumulátoru o zvolené hodnotě $c_b = 95 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ [40]

η_{EV} je zvolená účinnost elektrického pohonu zahrnující účinnosti baterie, výkonové elektroniky a elektromotoru o hodnotě $\eta_{EV} = 0,68$ dle [41]



Obrázek 29 - účinnost elektrických vozidel [41]

Dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

Z hodnot využitelné kapacity baterie a spotřeby energie pak lze určit dráhový dojezd na náhradní elektrický pohon. Výchozí a vypočtené hodnoty pro třídy vozidel shrnuje tabulka 2.

hodnota třída vozidel	m [kg]	C_p [l/100 km]	m_b [kg]	E_b [kWh]	C_s [kWh/100 km]	s_{el} [km]
CITY	998	6,12	96,3	6,22	15,82	39,3
HATCHBACK	1204	6,64	128,8	8,32	17,16	48,5
SEDAN	1468	7,64	146,0	9,43	19,75	47,8
FAMILY	1654	8,52	130,4	8,42	22,02	38,3
LIMOUSINE	1956	11,4	229,2	14,81	29,46	50,3
SUV	2241	12,96	184,3	11,90	33,50	35,5
SUPERSPORT	1568	14,4	231,8	14,97	37,22	40,2

Tabulka 2 - výchozí a vypočtené hodnoty pro třídy vozidel

Pro výkonovou řadu RE je vypracována tabulka 3 parametrů p vypočtených pro všechny třídy vozidel. Výkonová řada byla zvolena tak, aby byla škálovatelná a z menších výkonových jednotek se tak daly vzájemnou kombinací poskládat systémy o vyšších výkonech. Pro výkony RE, u kterých je $p < 0$ je vypočítán pro daný výkon i parametr r . Pro výpočet parametrů je uvažována rychlost $v_p = 33,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ odpovídající průměrné rychlosti jízdního cyklu NEDC, při kterém je měřena výrobcem udávaná spotřeba C_p . Dále byla zvolena podmínka denního dojezdu o vzdálenosti 300 km, jíž odpovídá vypočtený parametr

$$p_{300} = \frac{300 \text{ km}}{s_{el}} \quad (30)$$

Hodnoty parametru, vyhovující podmínce jsou napravo od hranice, zvýrazněné v tabulce parametrů čárkovanou čarou.

třída vozidla	$P_{RE} [kW]$									
	2	3	4	5	7,5	10	15	20	25	p_{300}
CITY	1,603	2,296	4,043	16,890	-2,432	-1,134	-0,549	-0,362	-0,270	7,625
HATCHBACK	1,531	2,085	3,265	7,525	-3,326	-1,362	-0,624	-0,405	-0,300	6,190
SEDAN	1,432	1,825	2,518	4,059	-7,667	-1,971	-0,793	-0,496	-0,361	6,281
FAMILY	1,370	1,682	2,177	3,084	-73,149	-2,844	-0,973	-0,587	-0,420	7,842
LIMOUSINE	1,253	1,435	1,678	2,020	4,125	-98,872	-1,941	-0,980	-0,656	5,970
SUV	1,216	1,363	1,551	1,799	2,998	8,971	-3,005	-1,287	-0,819	8,443
SUPERSPORT	1,190	1,316	1,470	1,666	2,498	4,992	-5,012	-1,668	-1,001	7,458

Tabulka 3 - vypočtené hodnoty parametru p pro jednotlivé třídy vozidel a výkony RE

Dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

Barevné zvýraznění odpovídá intervalům vypočtené hodnoty parametru p uvedených v tabulce 4. V závorce uvedený rozsah procent odpovídá stavu nabití (využitelné kapacity) baterie po ujetí vzdálenosti s_{el} pro případ, že na začátku této dráhy byla baterie plně nabitá.

$0 < p < 1,33$ (0% ÷ 25%)
$1,33 < p < 2$ (25% ÷ 50%)
$2 < p < 4$ (50% ÷ 75%)
$4 < p$ (75% ÷ 100%)
$p < 0$

Tabulka 4 - barevné zvýraznění odpovídající intervalu parametru p

třída vozidla \ P_{RE} [kW]	7,5	10	15	20	25
CITY	70,86	53,15	35,43	26,57	21,26
HATCHBACK	76,88	57,66	38,44	28,83	23,06
SEDAN	88,46	66,35	44,23	33,17	26,54
FAMILY	98,65	73,99	49,33	36,99	29,60
LIMOUSINE	x	99,00	66,00	49,50	39,60
SUV	x	x	75,03	56,27	45,02
SUPERSPORT	x	x	83,37	62,53	50,02

Tabulka 5 – vypočtené hodnoty parametru r pro jednotlivé třídy vozidel a výkony RE

U elektrických vozidel s RE je uvažován primárně čistě elektrický provoz. Smyslem RE je pak prodloužení dojezdu elektrického vozidla pomocí zařízení, které slouží jako přídatný zdroj energie. Pro stanovenou podmínku dojezdu 300 km není tedy nezbytně nutné udržování stavu plného nabití baterií, jemuž odpovídá provoz RE, pro nějž se stanovuje parametr r .

Parametr r_p lze pak stanovit pro případ, že se kromě podmínky dojezdu uvažuje ještě podmínka stavu určité úrovně využitelné kapacity baterie po ujetí této vzdálenosti. Vychází se ze vztahu

$$r_p = \frac{t_{REp}}{t_{cp}} \cdot 100 \quad (31)$$

kde: r_p je podmíněný parametr udávající dobu chodu RE [%] z celkové doby jízdy po uvažované dráze (podmínka dojezdu) tak, aby na konci této dráhy byla zbytková využitelná kapacita baterie na určité úrovni

t_{REp} je doba chodu RE během jízdy po dráze s_{cp} [h]

t_{cp} je doba jízdy po dráze s_{cp} [h], která se stanoví

$$t_{cp} = \frac{s_{cp}}{v_p} \quad (32)$$

Dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

kde: s_{cp} je zvolená podmínka dojezdu $s_{cp} = 300 \text{ km}$

Energetická rovnováha je pak uvažována jako

$$E_{cp} - E_{REp} - k_{cp} \cdot E_b = 0 \quad (33)$$

kde: E_{cp} je celková energie potřebná pro ujetí dráhy s_{cp} [kWh]

E_{REp} je energie dodaná RE během jízdy [kWh] po dráze s_{cp} tak, aby na konci této dráhy byla zbytková využitelná kapacita baterie na určité úrovni

k_{cp} je koeficient využitelnosti kapacity baterie o zvolené hodnotě $k_{cp} = 0,7$

Hodnota koeficientu k_{cp} se volí s ohledem na uvažovanou podmínku zbytkové využitelné kapacity baterie po ujetí dráhy s_{cp} . Součin $k_{cp} \cdot E_b$ pak vyjadřuje množství energie, o kterou se sníží kapacita baterie po ujetí dráhy s_{cp} z uvažovaného plně nabitého stavu na začátku této dráhy. V případě zvolené hodnoty k_{cp} to tedy znamená 30% využitelné kapacity baterie na konci dráhy s_{cp} .

Doba chodu RE se stanoví

$$t_{REp} = \frac{E_{REp}}{P_{RE}} \quad (33)$$

Potřebná celková energie vyplývá ze vztahu

$$E_{cp} = \frac{s_{cp} \cdot C_s}{100} \quad (34)$$

Podmíněný parametr se pak po dosazení vyjádří vztahem

$$r_p = \frac{\left(\frac{s_{cp} \cdot C_s}{100} - k_{cp} \cdot E_b\right) \cdot v}{P_{RE} \cdot s_{cp}} \cdot 100 \quad (35)$$

V tabulce 6 je pak pro jednotlivé třídy vozidel vypočítaný parametr r_p pro všechny výkony P_{RE} , splňující podmínku dojezdu s_{cp} .

třída vozidla \ P_{RE} [kW]	5	7,5	10	15	20	25
CITY	96,54	64,36	48,27	32,18	24,13	19,31
HATCHBACK	102,28	68,19	51,14	34,09	25,57	20,46
SEDAN	x	78,60	58,95	39,30	29,48	23,58
FAMILY	x	89,85	67,38	44,92	33,69	26,95
LIMOUSINE	x	x	87,39	58,26	43,70	34,96
SUV	x	x	103,21	68,81	51,61	41,29
SUPERSPORT	x	x	x	75,54	56,66	45,33

Tabulka 6 - vypočtené hodnoty parametru r_p pro jednotlivé třídy vozidel a výkony RE

6.4 Dimenzování RE – autobusy

U autobusů hodnoty spotřeb a dojezdů na elektrický pohon vycházejí z testovacího provozu provedeného společností Dopravní podnik města Brna, a.s. [42] Vyhodnocení je provedeno pro autobusy o délce osmi (Stratos LE 30e) a dvanácti metrů (ŠKODA PERUN HE). Navíc pro každý z nich jsou uvažovány varianty s poloviční a třetinovou celkově využitelnou kapacitou baterií a pro každou tuto variantu ještě provoz s přídatnou zátěží reprezentující zejména vytápění a klimatizaci o výkonu 5 kW pro osmimetrový a 12 kW pro dvanáctimetrový bus. [43] Provozní rychlost pro autobusy je zvolena o velikosti $v_p = 16,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ na základě údaje Dopravního podniku hl. m. Prahy. [44] Celková spotřeba energie se určí

$$C_c = C_s + \frac{P_{aux} \cdot 100}{v_p \cdot 1000} \quad (36)$$

kde: C_c je celková dráhová spotřeba zahrnující přídatnou spotřebu [$\text{kWh} \cdot 100 \text{ km}^{-1}$]

Dojezd na elektrický pohon s uvažováním přídatných spotřeb se pak vypočítá ze vztahu

$$s_{elaux} = \frac{E_b \cdot 100}{C_c} \quad (37)$$

kde: s_{elaux} je dojezd vozidla na čistě elektrický pohon s přídatnou spotřebou [km]

Souhrn vstupních a vypočtených hodnot pro autobusy je v tabulce 7.

8 m (Stratos LE 30e)						
E_b [kWh]	C_s [kWh/100 km]	s_{el} [km]	P_{aux} [W]	C_c [kWh/100 km]	s_{elaux} [km]	hodnota / poznámka
75	50	150,0	5000	80	93,8	
37,5	50	75,0	5000	80	46,9	poloviční kapacita baterie
25	50	50,0	5000	80	31,3	třetinová kapacita baterie
12 m (ŠKODA PERUN HE)						
182	130	140,0	12000	202	90,1	
91	130	70,0	12000	202	45,0	poloviční kapacita baterie
61	130	46,9	12000	202	30,2	třetinová kapacita baterie

Tabulka 7 - souhrn vstupních a vypočtených hodnot pro autobusy

Různé kapacity baterií jsou uvedeny pro názornost použití metody například pro posuzování více variant dimenzí elektrických akumulátorů. U autobusů jsou uvažovány podmínky pro denní provoz po dobu 16 hodin a dojezd 300 km. Parametr p_{16} pro tuto dobu provozu se stanoví výpočtem

$$p_{16} = \frac{16 \cdot v_p}{s_{el}} \quad (38)$$

Pro vyhodnocení se pak uvažuje z parametrů p_{16} a p_{300} ten, který nabývá vyšší hodnoty. U osmimetrového autobusu se denní provoz hodnotí z hlediska parametru p_{16} a u dvanáctimetrového dle p_{300} . Hodnoty těchto vypočtených parametrů pro stupně výkonu RE jsou v tabulkách 8 a 11. Hodnoty parametrů r jsou pak v tabulkách 9 a 11.

Dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

→ 16 hod

varianta \ $P_{RE} [kW]$	2	3	4	5	7,5	10	15	20	25	p_{16}
bus 8 m	1,315	1,561	1,920	2,493	9,824	-5,061	-1,256	-0,717	-0,502	1,781
bus 8 m ($E_b/2$)	1,315	1,561	1,920	2,493	9,824	-5,061	-1,256	-0,717	-0,502	3,563
bus 8 m ($E_b/3$)	1,315	1,561	1,920	2,493	9,824	-5,061	-1,256	-0,717	-0,502	5,344
bus 8 m	1,176	1,290	1,427	1,598	2,280	3,976	-8,146	-2,012	-1,148	2,850
bus 8 m ($E_b/2$) + aux	1,176	1,290	1,427	1,598	2,280	3,976	-8,146	-2,012	-1,148	5,700
bus 8 m ($E_b/3$) + aux	1,176	1,290	1,427	1,598	2,280	3,976	-8,146	-2,012	-1,148	8,550

Tabulka 8 - vypočtené hodnoty parametru p pro jednotlivé varianty busu 8 m a výkony RE

varianta \ $P_{RE} [kW]$	10	15	20	25
bus 8 m	83,50	55,67	41,75	33,40
bus 8 m ($E_b/2$)	83,50	55,67	41,75	33,40
bus 8 m ($E_b/3$)	83,50	55,67	41,75	33,40
bus 8 m	x	89,07	66,80	53,44
bus 8 m ($E_b/2$) + aux	x	89,07	66,80	53,44
bus 8 m ($E_b/3$) + aux	x	89,07	66,80	53,44

Tabulka 9 - vypočtené hodnoty parametru r pro jednotlivé varianty busu 8 m a výkony RE

Aby se dal osmimetrový autobus vyhodnotit i z hlediska parametru r_p je třeba upravit vztah pro jeho výpočet z důvodu, že podmínka pro dojezd není stanovena požadovanou dráhou ale dobou provozu. Uvažovaná podmínka stavu využitelné kapacity baterie je stejná jako u osobních vozidel, tedy 30% na konci dráhy s_{cp} . Pro provoz po dobu $t_c = 16 h$ se ujetá dráha stanoví

$$s_{cp} = v_p \cdot t_c \quad (39)$$

Vztah pro výpočet parametru je pak

$$r_p = \frac{\left(\frac{s_{cp} \cdot C_s}{100} - k_{cp} \cdot E_b\right)}{P_{RE} \cdot t_c} \cdot 100 \quad (40)$$

Vypočtené hodnoty parametru r_p jsou pak pro jednotlivé varianty osmimetrového autobusu a výkony RE v tabulce 10.

varianta \ $P_{RE} [kW]$	4	5	7,5	10	15	20	25
bus 8 m	126,72	101,38	67,58	50,69	33,79	25,34	20,28
bus 8 m ($E_b/2$)	x	x	89,46	67,09	44,73	33,55	26,84
bus 8 m ($E_b/3$)	x	x	96,75	72,56	48,38	36,28	29,03
bus 8 m	x	x	x	100,79	67,19	50,39	40,32
bus 8 m ($E_b/2$) + aux	x	x	x	x	78,13	58,60	46,88
bus 8 m ($E_b/3$) + aux	x	x	x	x	81,78	61,33	49,07

Tabulka 10 - vypočtené hodnoty parametru r_p pro jednotlivé varianty busu 8 m a výkony RE

Dimenzování zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel

→ 300km

P_{RE} [kW]	5	7,5	10	15	20	25	30	35	p_{300}
bus 12 m	1,299	1,528	1,854	3,235	12,696	-6,599	-2,619	-1,634	2,143
bus 12 m ($E_b/2$)	1,299	1,528	1,854	3,235	12,696	-6,599	-2,619	-1,634	4,286
bus 12 m ($E_b/3$)	1,299	1,528	1,854	3,235	12,696	-6,599	-2,619	-1,634	6,393
bus 12 m	1,174	1,286	1,421	1,801	2,456	3,862	9,034	-26,646	3,330
bus 12 m ($E_b/2$) + aux	1,174	1,286	1,421	1,801	2,456	3,862	9,034	-26,646	6,659
bus 12 m ($E_b/3$) + aux	1,174	1,286	1,421	1,801	2,456	3,862	9,034	-26,646	9,934

Tabulka 11 - vypočtené hodnoty parametru p pro varianty busu 12 m a výkony RE

P_{RE} [kW]	25	30	35
bus 12 m	86,84	72,37	62,03
bus 12 m ($E_b/2$)	86,84	72,37	62,03
bus 12 m ($E_b/3$)	86,84	72,37	62,03
bus 12 m	x	x	96,38
bus 12 m ($E_b/2$) + aux	x	x	96,38
bus 12 m ($E_b/3$) + aux	x	x	96,38

Tabulka 12 - vypočtené hodnoty parametru r pro jednotlivé varianty busu 12 m a výkony RE

Provozní podmínky jsou u dvanáctimetrového autobusu shodné s podmínkami u osobních vozidel a tedy parametr r_p se stanoví stejným způsobem. Jeho hodnoty jsou v tabulce 13.

P_{RE} [kW]	15	20	25	30	35
bus 12 m	97,45	73,09	58,47	48,73	41,77
bus 12 m ($E_b/2$)	x	90,82	72,66	60,55	51,90
bus 12 m ($E_b/3$)	x	96,67	77,33	64,44	55,24
bus 12 m	x	x	106,57	88,81	76,12
bus 12 m ($E_b/2$) + aux	x	x	x	100,63	86,25
bus 12 m ($E_b/3$) + aux	x	x	x	x	89,59

Tabulka 13 - vypočtené hodnoty parametru r_p pro jednotlivé varianty busu 12 m a výkony RE

6.5 Dimenzování RE – shrnutí

Použitá metoda pro stanovení vhodného výkonu RE pomocí kvalitativních parametrů p a r , umožňuje provést dimenzování RE pro požadovanou podmínku dojezdové vzdálenosti, nebo dobu provozu pro různé druhy vozidel. Navíc lze uvažovat i podmínku stavu určité úrovně využitelné kapacity baterie po ujetí požadované dojezdové vzdálenosti v případě, že baterie byla na začátku jízdy plně nabitá. Vyhodnoceny byly modelové případy tříd osobních vozidel a autobusů. U osobních vozidel v závislosti na třídách splňují danou podmínku minimálního dojezdu 300 km a využitelné kapacity baterie 30% po ujetí této vzdálenosti RE o výkonech v intervalu 5 kW až 15 kW. U osmimetrového autobusu jsou pro podmínku 16 hodin provozu a využitelné kapacity baterie 30% po této době dostačující výkony 7,5 kW až 15 kW. Pro podmínky stejné jako u osobních vozidel je u dvanáctimetrového autobusu interval dostačujících výkonů RE 15 kW až 35 kW. U autobusů je potřebný výkon závislý na velikosti baterie a přídatné spotřebě. Zvyšováním výkonu RE u konkrétního vozidla se od určité hranice ($p < 0$) snižuje potřebná doba chodu RE pro udržení plně nabitého stavu baterie. RE o výkonu splňující podmínku požadovaného dojezdu nemusí zároveň splňovat podmínku požadovaného stavu zbytkové využitelné kapacity baterie na konci ujeté požadované dráhy. Při vyhodnocení hodnot parametru r u skutečných vozidel uvedených v kapitole 4 jsou pro RE na bázi spalovacího čtyřdobého motoru hodnoty tohoto parametru v rozmezí 15% až 50%, tedy jsou spínány dle aktuální potřeby. Osobní vozidlo s mikroturbínou má hodnotu parametru r 30% a systém s Wankelovým motorem 65%. U autobusu s mikroturbínou a vozidly s palivovým článkem jsou hodnoty parametru nad 75% a lze u těchto systémů už uvažovat o nepřetržitém chodu RE při provozu. Názorně to shrnuje tabulka 14.

osobní vozidla	autobusy
reálná vozidla s RE	
spalovací motor $r \approx 15 \div 50 \%$	
<i>Wankelův motor</i> $r \approx 65 \%$	
mikroturbína $r \approx 30\%$	mikroturbína $r \approx 75\%$
H ₂ palivový článěk $r \approx 80\%$	
modelové případy splňující podmínky dojezdu a zbytkové kapacity baterie	
$P_{REmin} \approx 5 \div 15 \text{ kW}$ $r_{pmin} \approx 69 \div 97 \%$	<u>8 m</u> $P_{REmin} \approx 7,5 \div 15 \text{ kW}$ $r_{pmin} \approx 68 \div 97 \%$
	<u>12m</u> $P_{RE} \approx 15 \div 35 \text{ kW}$ $r_{pmin} \approx 89 \div 98 \%$

Tabulka 14 – hodnoty parametrů pro vozidla z rešerše a shrnutí výsledků modelových případů vozidel

Metodika dimenzování je zpracována velmi obecně. Nebyly brány v úvahu vlivy, jako využití rekuperované energie z regenerativního brzdění, přídavné spotřeby u osobních vozidel. U akumulátoru elektrické energie nebyly uvažovány jeho nabíjecí a vybíjecí charakteristiky. Z důvodu, že se posuzuje pouze výkon RE využitelný pro pohon vozidla a ne konkrétní koncepce, tak dále nebyla brána v úvahu hmotnost systému samotného RE, která by mohla ovlivnit spotřebu elektrické energie. I přes velké zjednodušení dává tato metoda rámcovou představu o případných výkonech RE pro různé kategorie vozidel.

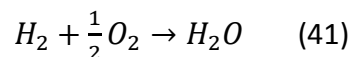
7 Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

V této části je proveden návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla. Jak bylo zmíněno v kapitole 3, je palivový článek vhodný pro využití jako RE elektrických vozidel.

7.1 Palivové články

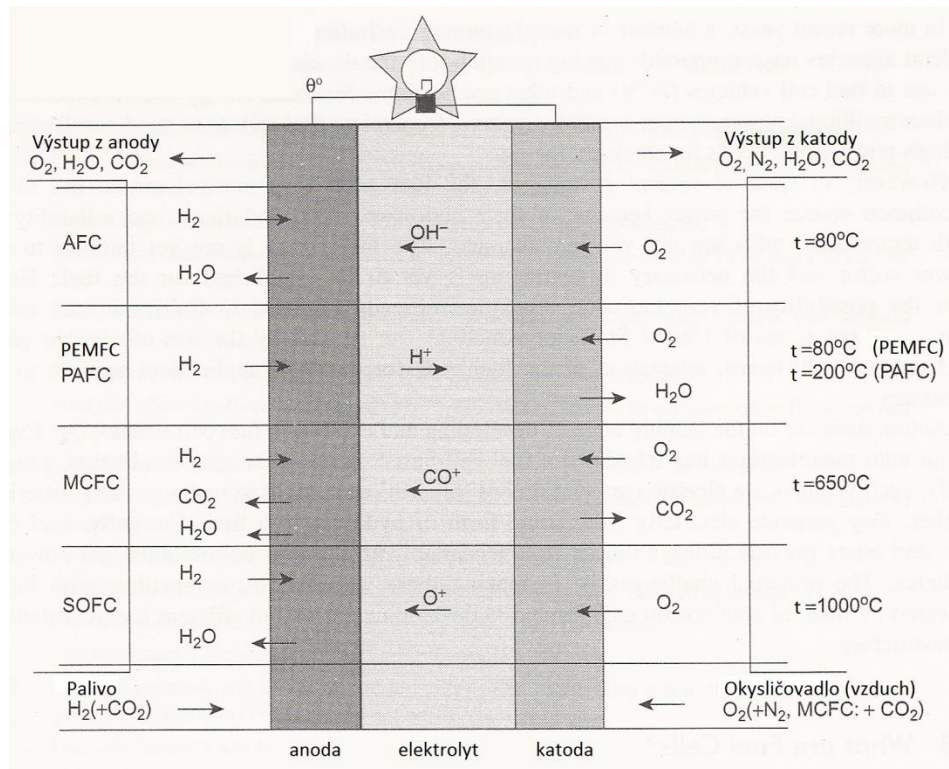
Princip je známý od roku 1839, kdy Sir William Robert Grove, velšský soudce, fyzik a vynálezce při tvoření směsi vodíku a kyslíku za přítomnosti elektrolytu produkoval elektřinu a vodu. Množství elektřiny bylo však tak malé, že vynález později známý jako palivový článek nebyl v té době ještě prakticky použitelný. Až v druhé polovině dvacátého století byl využíván jako zdroj elektrické energie například ve vesmírných aplikacích. Vodík, jakožto palivo pro palivový článek, představuje alternativní zdroj energie k palivům na ropné bázi a je vnímán jako zdroj „čisté energie“ s potenciálem uspokojit řadu energetických potřeb a zároveň snížit znečištění vznikající z tradičních zdrojů. Vývoj palivových článků postupuje stále vpřed a i přesto, že je nyní tato technologie pro masové rozšíření stále příliš nákladná, je pravděpodobné že v budoucnu nalezne široké uplatnění. [45]

Palivové články (dále jen FC – z anglického fuel cell) jsou elektrochemická zařízení přeměňující volnou energii chemické reakce na elektrickou energii a vedlejší produkty. V případě, že reaktanty jsou pouze vodík H_2 a kyslík O_2 , jsou vedlejšími produkty teplo a vodní pára H_2O . Při použití uhlovodíkového paliva u některých typů FC jsou pak vedlejšími produkty ještě oxid uhličitý a zbytková množství uhlovodíků. Jelikož v FC neprobíhá spalovací proces, nedochází ke vzniku oxidů dusíku. Struktura FC je shodná s bateriemi s tím rozdílem, že v baterii je chemická energie uložena a po jejím vybití je ji třeba nabít, či znovu doplnit. U FC je produkce elektrické energie zajištěna, dokud trvá přívod paliva. FC se skládá (podobně jako baterie) z elektrolytu, který může být tekutý nebo tuhý, spojeným s elektrodami. Přičemž na anodě dochází k oxidaci paliva a na katodě se redukuje kyslík. Celková základní chemická reakce FC je vyjádřena rovnicí



Uspořádání jednoduchého článku různých typů FC je na obrázku 30. Rozdělení FC je možné provést podle různých parametrů, kupříkladu podle použitého paliva, provozní teploty atd. Obvyklé je dělení FC na základě použitého elektrolytu popsané dále a shrnuté v tabulce 15.

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla



Obrázek 30 - uspořádání jednoduchého článku různých typů FC [45]

7.1.1 AFC

Alkalický palivový článek přímou elektrochemickou reakcí za nízkých teplot přeměňuje kontrolované množství vodíku a kyslíku v plynném skupenství na elektřinu. Vyvinut do funkčního systému byl v roce 1930 ve Velké Británii Francisem Baconem a na základech jeho výzkumů byl od sedmdesátých let dvacátého století aplikován jako primární zdroj elektrické energie při letech do vesmíru americké agentury NASA. Jednotlivé články jsou složeny ze dvou porézních elektrod a mezi nimi se nachází tekutý elektrolyt na bázi hydroxidu draselného (*KOH*). Anody a katody FC jsou složeny z více tenkých aktivních a hydrofobních pro plyn propustných vrstev. Jako katalyzátory se používají oxidy niklu a stříbra v případné kombinaci s menším množstvím platiny.

7.1.2 PAFC

FC s kyselinou fosforečnou jako elektrolytem je vyvinutá technologie připravená pro komerční uplatnění. Lze ji využít pro stacionární energetické zdroje a aktuálních několik set instalací o výkonu 0,2 MW až 20 MW je rozmístěno po celém světě na vojenských základnách, hotelech, nemocnicích atd. Fungují na různé typy paliva jako zemní plyn, propan, bioplyn, které pro extrakci vodíku v nich obsaženém musí projít reformujícím procesem mimo FC. Pracovní teplota FC se pohybuje nad bodem varu vody (373 K až 493 K) a to je důvodem použití kyseliny fosforečné jako elektrolytu i přes její nižší elektrickou vodivost. Ostatní kyselé elektrolyty totiž vyžadují pro svoji vodivost přítomnost vody. Kyselina fosforečná vykazuje též dobrou tepelnou, chemickou a elektrochemickou stabilitu a nemá tendenci vysychat. Elektrolyt je obvykle držen v matici z karbidů křemíku. Elektrody jsou na bázi platinových katalyzátorů na uhlíkových nosičích, což činí tuto technologii stále příliš nákladnou.

7.1.3 SOFC

Vysokoteplotní FC nabízí potenciál využití pro kogeneraci elektřiny a tepla. Tuhý elektrolyt je typicky ve formě keramické membrány z oxidu zirkoničitého stabilizovaného oxidem yttritým. Vzhledem k tomu, že na materiál elektrod není třeba vzácných kovů, nejsou z tohoto hlediska nákladné, jako jiné typy FC. Vyskytují se však jiné problémy, související s vysokými provozními teplotami. Technologie je ve vývojové fázi a funkční systémy jsou ve výkonech desítek kW s tím, že plány na výkon největších celků jsou v jednotkách MW. Tento typ FC je dále rozebírán v kapitolách 7.2 a 7.3.

7.1.4 MCFC

Z anglického molten carbonate fuel cell. Elektrolytem je tavenina vysoce vodivých solí ze směsi alkalických uhličitánů (lithium, sodík, draslík) u níž vodivost zajišťuje CO_3^{-II} skupina. Materiál elektrod je nikl pro anodu a oxidy niklu u katody. Technologie se přibližuje po více než půlstoletí vývoje komerčnímu využití. Zkonstruovány a demonstrovány byly systémy o výkonech 250 kW až 2 MW.

7.1.5 PEMFC

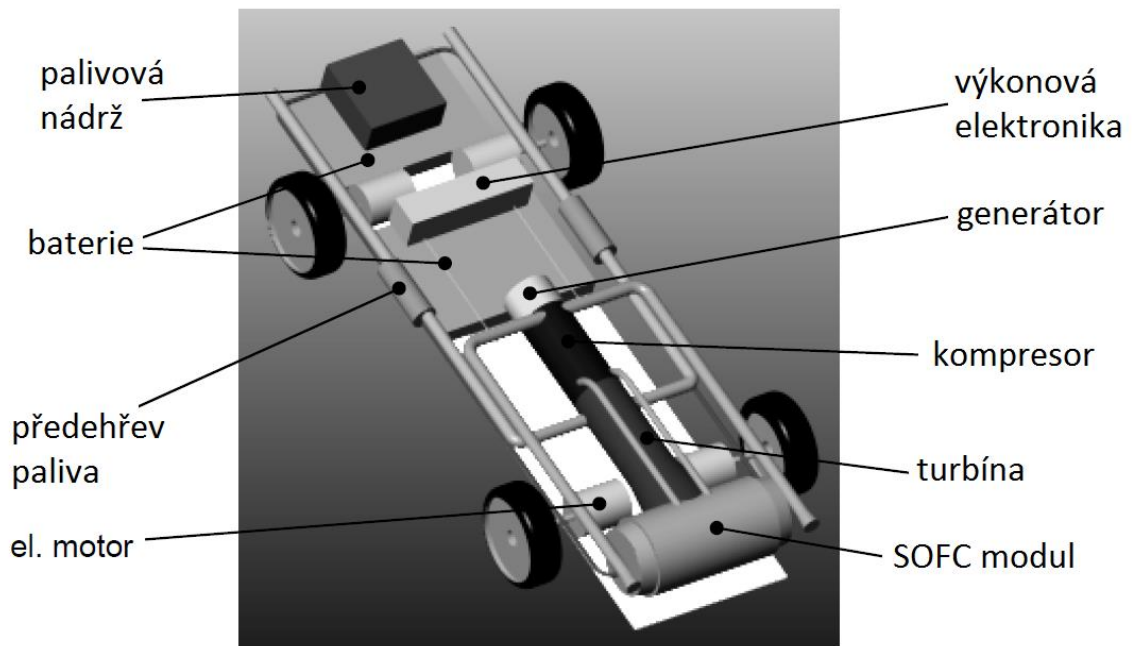
Elektrolytem je polymerová membrána, která je vodivá pro vodíkové ionty. Jako katalyzátor na elektrodách je použita platina a její slitiny jak pro oxidaci vodíku, tak i pro redukci kyslíku. Tento typ FC patří mezi nejvyvinutější a vykazuje vyšší specifický výkon, než ostatní typy. Z tohoto důvodu vede v použití v dopravních aplikacích a v malých a přenosných energetických jednotkách. V současnosti jsou dostupné funkční systémy o výkonech desítek kW, využitelné k pohonu vozidel.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
pracovní teplota [K]	303 ÷ 353	353 ÷ 373	373 ÷ 493	923 ÷ 1123	973 ÷ 1273
proudová hustota	vysoká	vysoká	střední	střední	vysoká
vhodné aplikace	výroba elektřiny doprava přenosné systémy	vojenské vesmírné obytné domy	výroba elektřiny doprava	výroba elektřiny	výroba elektřiny
výhody	nízká provozní teplota rychlý start pevný elektrolyt	vysoký výkon jednoduchá konstrukce	vysoká účinnost při kogeneraci necitlivost na nečistoty ve vodíkovém palivu	vysoká účinnost možnost použití více druhů paliva vnitřní reforming paliva necitlivý na CO/CO ₂	vysoká účinnost možnost použití více druhů paliva pevný elektrolyt vnitřní reforming paliva
nevýhody	citlivost na nečistoty v palivu (CO)	náročné odstranění CO ₂ z paliva/okysličovadla	malý výkon velikost, hmotnost problém s těsností	vysoká teplota - koroze delší start teplotní namáhání cykly defekty částí článků	vysoká teplota - koroze delší start teplotní namáhání cykly defekty částí článků
elektrody	Pt	oxidy Ni/Ag vzácné kovy	Pt	anoda Ni katoda NiO	anoda Co-ZrO ₂ , Ni-ZrO ₂ katoda Sr-LaMnO ₃
nosič el. náboje	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
reakce na anodě	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + 2OH ⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻	H ₂ + O ²⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻
reakce na katodě	½O ₂ + 2e ⁻ + 2H ⁺ → H ₂ O	½O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ → H ₂ O	½O ₂ + 2e ⁻ + 2H ⁺ → H ₂ O	½O ₂ + CO ₂ + 2e ⁻ → CO ₃ ²⁻	½O ₂ + 2e ⁻ → O ²⁻

Tabulka 15 - dělení FC na základě použitého elektrolytu [45]

7.2 Kombinace SOFC s plynovou turbínou

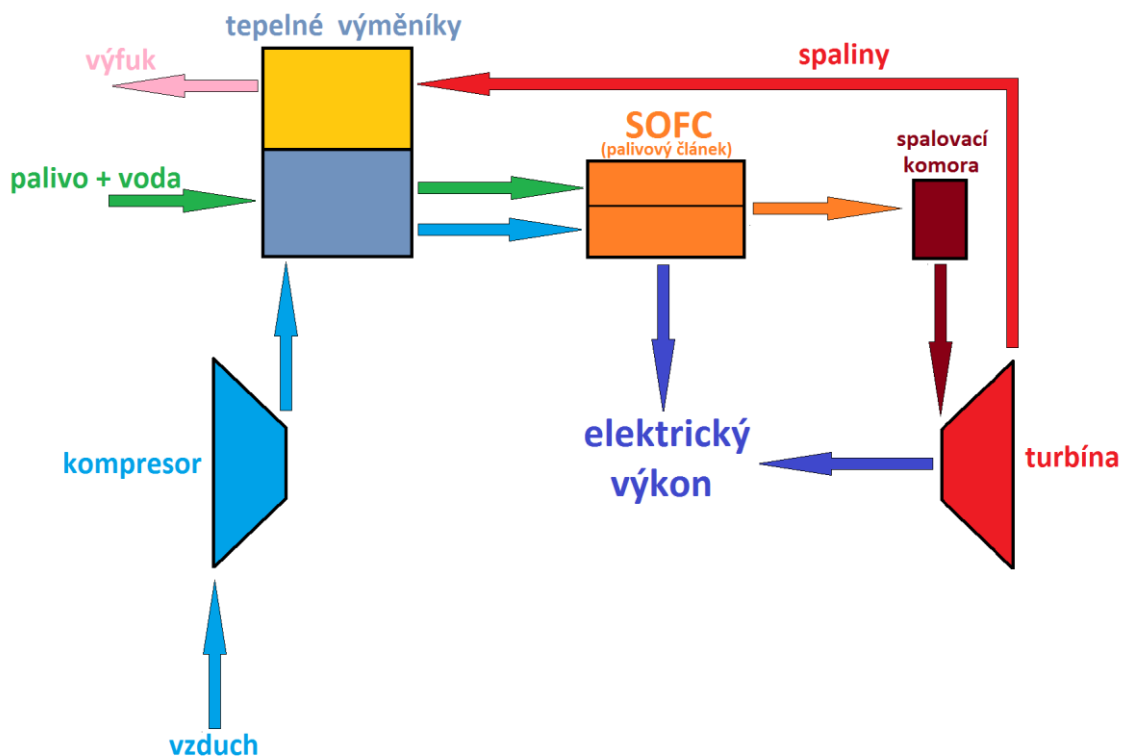
U palivového článku typu SOFC, který je konstruován pro práci při zvýšeném tlaku, je možné využít plyných produktů reakce v článku k expanzi v plynové turbíně. [46] Praktické realizaci se věnuje v Holandsku firma Siemens Westinghouse. Ta vyvinula stacionární jednotky produkující elektřinu a teplo. Jednotka SCE-220 má elektrický výkon 220 kW. Elektrická účinnost je uváděna 57 % při jmenovitém výkonu. Publikované studie uvádí teoretickou možnost dosažení až 70 % elektrické účinnosti takových kombinovaných systémů. [47] Profesor Winkler ze strojní fakulty university v Hamburku se zabýval návrhem mobilní aplikace SOFC v kombinaci s tepelným motorem nebo mikroturbínou v celkovém výkonu 75 kW.



Obrázek 31 - návrhem mobilní aplikace SOFC v kombinaci s mikroturbínou [47]

7.3 Zvolená koncepce

Vzhledem k zaměření zadavatele této práce na vývoj vysokootáčkových aplikací kompresorů a turbodmychadel byl pro návrh zařízení pro prodloužení dojezdu elektrického vozidla zvolen koncept na bázi SOFC v kombinaci s mikroturbínou. Základními částmi systému jsou palivový článek, kompresor, turbína, spalovací komora a tepelné výměníky. Jednotlivé komponenty jsou rozebrány dále. Zjednodušené schéma systému je na obrázku 32. Stanovení parametrů systému se nejdříve provede pro zvolený SOFC.



Obrázek 32 - zjednodušené schéma systému SOFC s plynovou turbínou

Jako systémové palivo je uvažován zemní plyn. Z důvodu, že pro použití v SOFC musí dojít k reformingu paliva, se k němu na vstupu do systému přidává voda. Společně tak vstupují do tepelného výměníku, kde se zvyšuje jejich teplota před vstupem do palivového článku, čímž se jim zároveň dodává tepelná energie pro reforming paliva. Kompresor zásobuje systém potřebným množstvím stlačeného kyslíčovadla (vzduchu), který se rovněž v tepelném výměníku ohřívá na požadovanou teplotu pro vstup do SOFC. V SOFC dochází k elektrochemické reakci látek reformovaného paliva a kyslíčovadla a generuje se převážná část elektrického výkonu systému. Palivo, které se nevyužije pro reakce v SOFC se spálí ve spalovací komoře a vzniklými plyny se pohání plynová turbína, která generuje menší část z celkového elektrického výkonu systému. Spaliny z výfuku turbíny se dále odvádí do horké části tepelných výměníků a jejich tepelný výkon se využije pro ohřátí vstupních látek do systému, jak je popsáno výše.

7.3.1 Parametry zvoleného SOFC

Vzhledem komezené nabídce a dostupnosti informací o technických údajích a vlastnostech SOFC byl pro navrhované zařízení vybrán Mk200 německého výrobce Staxera (dnes Sunfire). [48] Jedná se o tzv. „stack“ složený z třiceti článků o celkovém jmenovitém elektrickém výkonu 500 W. Parametry udané výrobcem využitelné pro další výpočty jsou

teplota na vstupu do SOFC	$t_{SOFCin} = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$T_3 = t_{SOFCin} + 273,16 = 873,16\text{ K}$
provozní teplota	$t_{SOFC} = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$T_4 = t_{SOFC} + 273,16 = 1123,16\text{ K}$
provozní tlak	$p_3 = 200000\text{ Pa}$
napětí článku	$U_{cell} = 0,7\text{ V}$
proudová hustota	$J = 800\text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$
plocha článku	$S_{cell} = 0,0305\text{ m}^2$
počet článků zapojených do série	$n_{stack} = 30$
diferenční tlak	$\Delta p_{SOFC} = 2000\text{ Pa}$



Obrázek 33 - SOFC stack – Mk200 [48]

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

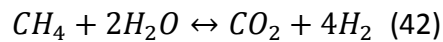
Uvažovaným palivem je pro navrhovaný systém zemní plyn. Pro zjednodušení je nahrazen metanem (CH_4), jenž tvoří hlavní složku zemního plynu (cca 98%). [49] Výpočet SOFC se provede pomocí výpočetního programu v prostředí MS Excel. Tento program byl jedním z výsledků projektu BIO FUEL CELLS - CONCEPTS FOR LOCAL ENERGY, který se zabýval inovativními řešeními energetických potřeb a byl řešen do roku 2000 na skotské universitě v Strathclyde. [50]

Využitelné hodnoty pro SOFC vypočítané na základě zadaných hodnot

elektrický výkon	$P_{el} = 500 \text{ W}$
spotřeba paliva	$\dot{m}_{CH_4} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
využitelnost paliva	70%
tepelný výkon potřebný na reforming	$P_{tref} = 218 \text{ W}$
spotřeba vody pro reforming	$\dot{m}_{H_2Oref} = 4,72 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

7.3.2 Příprava paliva – reforming

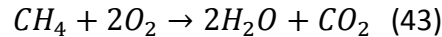
S ohledem na fakt, že elektrochemická reakce v FC probíhá za přísunu vodíku a kyslíku, je třeba uvažované palivo metan upravit tak, aby bylo pro FC použitelné. Tento proces se nazývá reforming a celkově ho popisuje rovnice chemické reakce



Vzhledem k vysoké pracovní teplotě SOFC může reforming probíhat přímo uvnitř FC. Pro průběh chemické reakce je ale třeba dodat teplo a vodu.

7.3.3 Potřebné množství vzduchu

Celková chemická reakce v FC bude uvažována podle rovnice



Pro stanovení potřebného množství vzduchu je potřeba zjistit množství kyslíku potřebného pro reakci. Vychází se z hodnoty spotřeby paliva a předpokladu součinitele přebytku vzduchu $\lambda = 1$. Hmotnost metanu vstupujícího do reakce tedy je

$$m_{CH_4} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ kg} = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ g} \quad (44)$$

pak

$$n = \frac{m_{CH_4}}{M_{CH_4}} = \frac{2,1 \cdot 10^{-2} \text{ g}}{16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 1,3125 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \quad (45)$$

kde: m_{CH_4} hmotnost metanu vstupujícího do reakce [kg]

n je odpovídající látkové množství [mol]

M_{CH_4} je molární hmotnost metanu dle [57] [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]

odpovídající množství kyslíku se stanoví

$$m_{O_2} = 2 \cdot n \cdot M_{O_2} \cdot \lambda = 2 \cdot 1,3125 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot 1 \quad (46)$$

$$m_{O_2} = 0,084 \text{ g} = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

kde: m_{O_2} je hmotnost potřebného reakčního kyslíku [kg]

M_{O_2} je molární hmotnost kyslíku [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]

Pro zjednodušení se předpokládá složení vzduchu pouze s kyslíku a dusíku v hmotnostním poměru například dle [51]

$$\frac{m_{N_2}}{m_{O_2}} = \frac{76,84}{23,16} \quad (47)$$

kde: m_{N_2} je hmotnost dusíku [kg]

a tedy

$$m_{N_2} = \frac{m_{O_2}}{23,16} \cdot 76,84 = \frac{8,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}{23,16} \cdot 76,84 = 2,78694 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \quad (48)$$

Hmotnost potřebného vzduchu je

$$m_{vzd} = m_{O_2} + m_{N_2} \quad (49)$$

$$m_{vzd} = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg} + 2,78694 \cdot 10^{-4} \text{ kg} = 3,62694 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

Spotřebě paliva pak odpovídá spotřeba vzduchu

$$\dot{m}_{vzd} = 3,62694 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

7.3.4 Výkon kompresoru

Kompresor slouží k dodání potřebného množství vzduchu při požadovaném tlaku. Zjednodušujícím předpokladem je neuvažování ztrát ve vedení vzduchu (i ve vedení ostatních látek v systému). Zahrnuty jsou pouze tlakové diference na sání (filtr). Dále je vzduch pro určení měrné tepelné kapacity považován za suchý. Pro výpočet výkonu kompresoru jsou zvoleny hodnoty

teplota nasávaného vzduchu	$t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
	$T_1 = t_1 + 273,16 = 293,16 \text{ K}$
atmosférický tlak	$p_1 = 101325 \text{ Pa}$
diferenční tlak na sání dle [52]	$\Delta p_s = 50 \text{ Pa}$
diferenční tlak tepelného výměníku dle [53]	$\Delta p_v = 5000 \text{ Pa}$
měrná tepelná kapacita vzduchu	$c_{pl} = 1022 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Poissonova konstanta pro vzduch dle [54]	$\kappa_l = 1,4$
isoentropická účinnost kompresoru dle [55]	$\eta_k = 0,75$

Výkon kompresoru se pak stanoví dle [56] ze vztahu

$$P_k = \frac{\dot{m}_{vzd} \cdot c_{pl} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_3 + \Delta p_v}{p_1 - \Delta p_s} \right)^{\frac{\kappa_{vzd} - 1}{\kappa_{vzd}}} - 1 \right]}{\eta_k} \doteq 32,34 \text{ W} \quad (50)$$

Protože platí

$$P_k = \dot{m}_{vzd} \cdot c_{pl} \cdot (T_2 - T_1) \quad (51)$$

pak teplotu stlačeného vzduchu vyjádříme

$$T_2 = T_1 \cdot \left[\left(\left(\frac{p_3 + \Delta p_v}{p_1 - \Delta p_s} \right)^{\frac{\kappa_{vzd} - 1}{\kappa_{vzd}}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_k} + 1 \right] \doteq 380,41 \text{ K} \quad (52)$$

Hodnota měrné tepelné kapacity je závislá na teplotě. Pro výpočet se stanoví její hodnota pro střední teplotu uvažovaného děje. Střední teplota se v tomto případě vypočítá ze vztahu

$$T_{12} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{2} = 336,79 \text{ K} \quad (53)$$

Protože teplota T_2 není předem známa, musí se pro první orientační výpočet provést její odhad. Pro stanovenou střední teplotu se pak určí měrná tepelná kapacita c_{pl} , která se dosazuje do rovnice (50). Z rovnice (52) vyjde pak hodnota teploty T_2 . V případě, že se odlišuje od odhadnuté teploty, na základě které byla stanovena c_{pl} , celý proces se opakuje s tím rozdílem, že c_{pl} se stanoví pomocí vypočtené hodnoty teploty T_2 a proces výpočtu se opakuje (iteruje), dokud se poslední vypočtená teplota T_2 neliší od teploty vypočtené v předchozí iteraci v řádech setin. K. Vzhledem k tomu,

že v tomto případě se dosahovalo zpřesnění výsledku cca po páté iteraci, nebylo třeba použít automatizace výpočtu.

7.3.5 Měrné tepelné kapacity

Pro výpočet výkonu kompresoru byla hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu (myšleno za stálého tlaku) stanovena z tabelovaných hodnot. V zamýšleném systému se vyskytují směsi plynů, pro které nejsou dostupné tabelované hodnoty. Každé jednotlivé složce směsi je však možné měrnou tepelnou kapacitu stanovit výpočtem například dle [57]. Je-li pak známa koncentrace jednotlivých složek ve směsi, lze pak stanovit i její měrnou tepelnou kapacitu.

Existuje polynom, který je pro danou látku v plynném stavu funkcí závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě. Tento polynom je ve tvaru

$$c_{pm} = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (54)$$

kde: c_{pm} je molární měrná tepelná kapacita [$\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

A, B, C, D jsou koeficienty polynomu [-]

T je teplota, pro kterou se měrná tepelná kapacita určuje [K]

Koeficienty polynomu jsou pro jednotlivé látky uvedeny v tabulce 16.

Složka		A	B	C	D
metan	CH ₄	19,25	$5,213 \cdot 10^{-2}$	$1,197 \cdot 10^{-5}$	$-1,132 \cdot 10^{-8}$
kyslík	O ₂	28,106	$-3,68 \cdot 10^{-6}$	$17,46 \cdot 10^{-6}$	$-10,65 \cdot 10^{-9}$
dusík	N ₂	31,150	$-1,357 \cdot 10^{-2}$	$26,796 \cdot 10^{-6}$	$-11,681 \cdot 10^{-9}$
oxid uhličitý	CO ₂	19,795	$7,344 \cdot 10^{-2}$	$-5,602 \cdot 10^{-5}$	$1,715 \cdot 10^{-8}$
voda	H ₂ O	32,243	$19,238 \cdot 10^{-4}$	$10,535 \cdot 10^{-6}$	$-3,596 \cdot 10^{-9}$

Tabulka 16 - koeficienty polynomu funkce závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě pro jednotlivé látky [57]

Přepoččet na měrnou tepelnou kapacitu hmotnostní pak je

$$c_p = \frac{c_{pm}}{M} \cdot 1000 \quad (55)$$

kde: c_p je měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

M je molární hmotnost látky viz tabulka 17 [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]

složka	CH ₄	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O
$M[\text{kg/kmol}]$	16	32	28	44	18

Tabulka 17 - fyzikálně chemické konstanty [57]

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Měrná tepelná kapacita za stálého objemu se pak určí ze vztahu

$$c_v = c_p - \frac{R}{M} \cdot 1000 \quad (56)$$

kde: c_v je měrná tepelná kapacita za stálého objemu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

R je univerzální plynová konstanta $R = 8,3144598 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$

Poissonova konstanta pak plyne ze vztahu

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (57)$$

U směsi, která obsahuje více složek, se měrná tepelná kapacita určí

$$c_{ps} = \sum_i c_{pi} \cdot \frac{m_i}{m_s} \quad (58)$$

kde: c_{ps} je měrná tepelná kapacita směsi [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

c_{pi} je měrná tepelná kapacita i -té složky směsi [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

m_i je hmotnost i -té složky směsi [kg]

m_s je hmotnost směsi [kg]

7.3.6 Spalovací komora

Ve spalovací komoře umístěné za SOFC probíhá spálení paliva, které není využito při reakcích probíhajících v SOFC. Spalováním dochází k chemickému procesu rychlé oxidace, při kterém se přeměňuje chemická energie vázaná ve spalovaném palivu na energii tepelnou. Množství energie, která se uvolní dokonalým spálením jednoho kilogramu paliva, se nazývá výhřevnost paliva. Tepelný výkon spalování je pak při uvážení 70% využití paliva v SOFC

$$P_{sp} = 0,3 \cdot H_{CH_4} \cdot \dot{m}_{CH_4} = 315,06 \text{ W} \quad (59)$$

kde: P_{sp} je tepelný výkon spalování [W]

H_{CH_4} výhřevnost paliva o uvažované hodnotě $H_{CH_4} = 50009 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ dle [58]

Pro další výpočty je třeba znát teplotu spalin za spalovací komorou. Platí zákon zachování hmoty, tedy

$$\dot{m}_{sp} = \dot{m}_{sofc} = \dot{m}_{vzd} + \dot{m}_{CH_4} + \dot{m}_{H_2Oref} \quad (60)$$

kde: \dot{m}_{sp} je hmotnostní tok spalin za spalovací komorou [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

\dot{m}_{sofc} je hmotnostní tok plynů za SOFC [kg]

Dále platí

$$P_{sp} = \dot{m}_{sp} \cdot c_{psp} \cdot (T_5 - T_1) - \dot{m}_{sofc} \cdot c_{pSOFC} \cdot (T_4 - T_1) \quad (61)$$

kde: c_{psp} je měrná tepelná kapacita spalin [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T_5 je teplota spalin za spalovací komorou [K]

c_{pSOFC} je měrná tepelná kapacita plynů za SOFC [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Pro stanovení měrné tepelné kapacity směsi plynů je třeba znát složení této směsi. Látky vstupující do SOFC a z něj vystupující lze zapsat jako rovnost hmotností

$$m_{CH_4} + m_{O_2} + m_{N_2} + m_{H_2Oref} = 0,3 \cdot m_{CH_4} + 0,3 \cdot m_{O_2} + m_{N_2} + m_{H_2Oref} + m_{CO_2sofc} + m_{H_2Osofc} \quad (62)$$

kde: m_{CO_2sofc} je hmotnost oxidu uhličitého, vzniklého z reakce, na výstupu z SOFC [kg]

m_{H_2Osofc} je hmotnost vody, vzniklé z reakce, na výstupu z SOFC [kg]

Látkové množství odpovídající reakci 70% paliva je

$$n_{70\%} = 0,7 \cdot n = 0,7 \cdot 1,3125 \cdot 10^{-3} \text{ mol} = 9,1875 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \quad (63)$$

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Hmotnosti látek, vzniklých při reakci v SOFC jsou pak

$$m_{H_2O_{sofc}} = 2 \cdot n_{70\%} \cdot M_{H_2O} = 3,3075 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \quad (64)$$

$$m_{CO_2_{sofc}} = n_{70\%} \cdot M_{CO_2} = 4,0425 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \quad (65)$$

Přítomný dusík se reakcí v SOFC neúčastní a proto je jeho hmotnost ve všech částech procesu stejná. Pro zjednodušení se stejně uvažuje o vodě, potřebné pro reforming paliva.

Dílčí měrné tepelné kapacity jednotlivých složek se stanoví dle kapitoly 7.3.6. Jako teplota T_{14} pro výpočet se uvažuje střední hodnota teplot určená ze vztahu

$$T_{14} = T_1 + \frac{T_4 - T_1}{2} = 708,16 \text{ K} \quad (66)$$

Měrná tepelná kapacita směsi plynů za SOFC se pak stanoví ze vztahu

$$c_{pSOFC} = c_{pCH_4T_{14}} \cdot \frac{0,3 \cdot m_{CH_4}}{m_{sp}} + c_{pO_2T_{14}} \cdot \frac{0,3 \cdot m_{O_2}}{m_{sp}} + c_{pN_2T_{14}} \cdot \frac{m_{N_2}}{m_{sp}} + c_{pCO_2T_{14}} \cdot \frac{m_{CO_2sofc}}{m_{sp}} + c_{pH_2OT_{14}} \cdot \frac{m_{H_2Osofc} + m_{H_2Oref}}{m_{sp}} \quad (67)$$

$$c_{pSOFC} = 1381,45 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde: $c_{pCH_4T_{14}}$ je měrná tepelná kapacita metanu při teplotě T_{14} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$c_{pO_2T_{14}}$ je měrná tepelná kapacita vodíku při teplotě T_{14} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$c_{pN_2T_{14}}$ je měrná tepelná kapacita dusíku při teplotě T_{14} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$c_{pCO_2T_{14}}$ je měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého při teplotě T_{14} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$c_{pH_2OT_{14}}$ je měrná tepelná kapacita vody při teplotě T_{14} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

U spalin lze hmotnostní rovnici vyjádřit jako

$$m_{sp} = m_{N_2} + m_{CO_2sp} + m_{H_2Osp} + m_{H_2Oref} \quad (68)$$

Hmotnosti složek oxidu uhličitého a vody vzniklých při spalování se vypočítají

$$m_{H_2Osp} = 2 \cdot n \cdot M_{H_2O} = 4,725 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \quad (69)$$

$$m_{CO_2sp} = n \cdot M_{CO_2} = 5,775 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \quad (70)$$

kde: m_{H_2Osp} je hmotnost vody obsažené ve spalinách [kg]

m_{CO_2sp} je oxidu uhličitého obsaženého ve spalinách [kg]

Dílčí měrné tepelné kapacity složek spalin se určí pro teplotu

$$T_{15} = T_1 + \frac{T_5 - T_1}{2} = 992,2 \text{ K} \quad (71)$$

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Měrná tepelná kapacita spalin se stanoví ze vztahu

$$c_{p\text{sp}} = c_{pN_2T_{15}} \cdot \frac{m_{N_2}}{m_{\text{sp}}} + c_{pCO_2T_{15}} \cdot \frac{m_{CO_2\text{sp}}}{m_{\text{sp}}} + c_{pH_2OT_{15}} \cdot \frac{m_{H_2O\text{sp}} + m_{H_2O\text{ref}}}{m_{\text{sp}}} \quad (72)$$

$$c_{p\text{sp}} = 1343,11 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde: $c_{pN_2T_{15}}$ je měrná tepelná kapacita dusíku při teplotě T_{15} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$c_{pCO_2T_{15}}$ je měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého při teplotě T_{15}
[$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$c_{pH_2OT_{15}}$ je měrná tepelná kapacita vody při teplotě T_{15} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Teplota spalin se pak stanoví

$$T_5 = \frac{P_{\text{sp}} + \dot{m}_{\text{sofc}} \cdot c_{p\text{SOFC}} \cdot (T_4 - T_1) + \dot{m}_{\text{sp}} \cdot c_{p\text{sp}} \cdot T_1}{\dot{m}_{\text{sp}} \cdot c_{p\text{sp}}} = 1691,23 \text{ K} \quad (73)$$

Pro stanovení měrné tepelné kapacity $c_{p\text{sp}}$ se z důvodu, že není známa teplota T_5 postupuje obdobně jako v kapitole 7.3.4 tedy opakovaním postupu výpočtu (iteracemi) až do dosažení potřebné přesnosti výsledku. I zde není nutné pro malý počet opakování výpočet automatizovat.

7.3.7 Plynová turbína

Pracovní látkou plynové turbíny jsou spaliny. Turbína je stroj, který mění tepelnou a tlakovou energii pracovní látky na mechanickou práci. Pro stanovení výkonu dle [56] plynové turbíny byly zvoleny hodnoty

$$\text{vstupní tlak} \quad p_5 = p_3 - \Delta p_{SOFC} = 198000 \text{ Pa}$$

$$\text{výstupní tlak} \quad p_6 = p_1 + \Delta p_v = 106325 \text{ Pa}$$

$$\text{isentropická účinnost turbíny dle [55]} \quad \eta_T = 0,65$$

$$\text{měrná tepelná kapacita spalin na výstupu} \quad c_{p_{spT}} = 1381,79 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Poissonova konstanta} \quad \kappa_T = 1,353$$

I v tomto případě je třeba z důvodu neznámé hodnoty teploty T_6 stanovit pro zpřesnění výpočtu (bez nutné automatizace výpočtu) měrnou tepelnou kapacitu spalin opakováním postupu výpočtu (iterací) podobně jako v kapitole 7.3.4. Navíc se kromě zpřesnění hodnoty $c_{p_{spT}}$ zpřesňuje i hodnota Poissonovy konstanty κ_T .

$$T_{56} = T_6 + \frac{T_5 - T_6}{2} = 1608,91 \text{ K} \quad (74)$$

kde: T_6 je teplota spalin na výstupu z turbíny [K]

$$M_{sp} = M_{CO_2} \cdot \frac{m_{CO_2sp}}{m_{sp}} + M_{N_2} \cdot \frac{m_{N_2}}{m_{sp}} + M_{H_2O} \cdot \frac{m_{H_2Osp} + m_{H_2Oref}}{m_{sp}} \quad (75)$$

$$M_{sp} \doteq 27,36 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

kde: M_{sp} je molární hmotnost spalin [$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$]

Potom lze vypočítat

$$c_{v_{spT}} = c_{p_{spT}} - \frac{R}{M_{sp}} \cdot 1000 = 1021,22 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (76)$$

kde: $c_{v_{spT}}$ je měrná tepelná kapacita spalin za stálého objemu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Poissonova konstanta se pak vypočítá jako poměr

$$\kappa_T = \frac{c_{p_{spT}}}{c_{v_{spT}}} \quad (77)$$

Výkon turbíny se stanoví ze vztahu

$$P_T = \dot{m}_{sp} \cdot c_{p_{spT}} \cdot T_5 \cdot \eta_T \cdot \left(1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{\kappa_T - 1}{\kappa_T}} \right) = 98,03 \text{ W} \quad (78)$$

Pro stanovení teploty na výstupu z turbíny se uvažuje platnost rovnice

$$c_{p_{spT}} \cdot (T_5 - T_6) = c_{p_{spT}} \cdot T_5 \cdot \eta_t \cdot \left(1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{\kappa_T - 1}{\kappa_T}} \right) \quad (79)$$

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Teplota spalin na výstupu z turbíny se vyjádří

$$T_6 = T_5 \cdot \left[1 - \eta_T \cdot \left(1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{\kappa_T - 1}{\kappa_T}} \right) \right] = 1526,59 \text{ K} \quad (80)$$

7.3.8 Tepelná bilance systému – výkon tepelných výměníků

Tepelné výměníky slouží v systému k využití vzniklého odpadního tepla zejména pro dodání tepla potřebného pro reforming paliva a ohřátí vzduchu na potřebnou teplotu před vstupem do SOFC.

Odpadní teplo ze spalin za turbínou lze vyjádřit

$$P_{to} = \dot{m}_{sp} \cdot c_{pspo} \cdot (T_6 - T_7) \quad (81)$$

kde: P_{to} je tepelný výkon odpadního tepla spalin za turbínou [W]

c_{pspo} je měrná tepelná kapacita spalin za turbínou o hodnotě
 $c_{pspo} = 1318,56 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Měrná tepelná kapacita spalin za turbínou je stanovena pro střední teplotu T_{67}

$$T_{67} = T_7 + \frac{T_6 - T_7}{2} = 909,88 \text{ K} \quad (82)$$

kde: T_7 je teplota na výstupu ze systému, pro kterou platí $T_7 = T_1$ [K]

Hodnota odpadního tepelného výkonu spalin za turbínou je pak

$$P_{to} = 700,78 \text{ W}$$

U SOFC se zjednodušeně předpokládá, že energie využitého z paliva při chemických reakcích je shodná jako energie, která se z daného množství paliva uvolní při dokonalém spálení ve formě tepelné energie. Tepelný výkon využitého paliva v SOFC se tedy vyjádří

$$P_{pSOFC} = 0,7 \cdot \dot{m}_{CH_4} \cdot H_{CH_4} = 735,13 \text{ W} \quad (83)$$

kde: P_{pSOFC} je tepelný výkon paliva využitého v SOFC [W]

Palivo se v článku přemění na elektřinu a teplo. Pro stanovení části tepla, uvolněného při reakcích v SOFC a které z něj neodchází ve formě výstupních plynů, je třeba uvažovat s vlastnostmi vstupujících a vystupujících plynů a jejich daných teplot.

Pro výpočet se pro střední teplotu T_{13}

$$T_{13} = T_1 + \frac{T_3 - T_1}{2} = 583,16 \text{ K} \quad (84)$$

určí měrné tepelné kapacity

vzduchu při teplotě T_{13} $c_{pIT_{13}} = 1047 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

paliva při teplotě T_{13} $c_{pCH_4T_{13}} = 3127,24 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

vody při teplotě T_{13} $c_{pH_2OT_{13}} = 2013 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Pro SOFC se pak uvažuje rovnice

$$P_{pSOFC} + (\dot{m}_{vzd} \cdot c_{pLT_{13}} + \dot{m}_{CH_4} \cdot c_{pCH_4T_{13}} + \dot{m}_{H_2Oref} \cdot c_{pH_2OT_{13}}) \cdot (T_3 - T_1) = P_{el} + P_{tSOFC} + \dot{m}_{sofc} \cdot c_{pSOFC} (T_4 - T_1) \quad (85)$$

kde: P_{tSOFC} je tepelný výkon SOFC, který neodchází s výstupními plyny [W]

Jeho vyjádření a výsledná hodnota je pak

$$P_{tSOFC} = P_{pSOFC} + (\dot{m}_{vzd} \cdot c_{pLT_{13}} + \dot{m}_{CH_4} \cdot c_{pCH_4T_{13}} + \dot{m}_{H_2Oref} \cdot c_{pH_2OT_{13}}) \cdot (T_3 - T_1) - P_{el} - \dot{m}_{sofc} \cdot c_{pSOFC} (T_4 - T_1) \quad (86)$$

$$P_{tSOFC} = 54,52 \text{ W}$$

Odvod přebytečného tepla je třeba vyřešit prostřednictvím vhodného média, tak aby byla u SOFC zajištěna požadovaná provozní teplota.

Podle výrobce SOFC by teplotní gradient vstupu a výstupu neměl být vyšší než 250 K. Je to zejména z důvodu mechanického namáhání teplotní roztažností. Vstupní látky je tedy potřeba ohřát na teplotu T_3 .

Pro ohřev vstupního vzduchu se stanoví

$$P_{tvzd} = \dot{m}_{vzd} \cdot c_{pLT_{23}} \cdot (T_3 - T_2) \quad (87)$$

kde: P_{tvzd} je tepelný výkon potřebný pro ohřev vzduchu z teploty T_2 na teplotu T_3 [W]

$c_{pLT_{23}}$ měrná tepelná kapacita vzduchu pro střední teplotu T_{23}
[J · kg⁻¹ · K⁻¹]

Střední teplotě

$$T_{23} = T_2 + \frac{T_3 - T_2}{2} = 626,79 \text{ K} \quad (88)$$

pak odpovídá

$$c_{pLT_{23}} = 1055 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Pro ohřátí vzduchu před vstupem do SOFC je třeba tepelný výkon o hodnotě

$$P_{tvzd} = 188,55 \text{ W}$$

Obdobně pro ohřátí paliva, kde se ale uvažuje jeho počáteční teplota T_1 se vyjádří

$$P_{tCH_4} = \dot{m}_{CH_4} \cdot c_{pCH_4T_{13}} \cdot (T_3 - T_1) = 38,09 \text{ W} \quad (89)$$

kde: P_{tCH_4} je tepelný výkon potřebný pro ohřev paliva z teploty T_1 na teplotu T_3 [W]

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

V případě vody potřebné pro reforming paliva se také předpokládá její vstupní teplota T_1 . Při jejím ohřevu je ale potřeba projít změnou skupenství. Zjednodušeně se uvažuje se vztah

$$P_{tH2Oref} = \dot{m}_{H2Oref} \cdot \left(c_{pkH2OT_{1v}} \cdot (T_v - T_1) + l_v + c_{pH2OT_{v3}} \cdot (T_3 - T_v) \right) \quad (90)$$

kde:	$P_{tH2Oref}$	je tepelný výkon potřebný pro ohřev vody z teploty T_1 na teplotu T_3 [W]
	$c_{pkH2OT_{1v}}$	je měrná tepelná kapacita vody pro střední teplotu T_{1v} v kapalném skupenství o hodnotě $c_{pkH2OT_{1v}} = 4181,6 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ dle [54]
	l_v	je měrné skupenské teplo varu o hodnotě $l_v = 2256 kJ \cdot kg^{-1}$ dle [59]
	$c_{pH2OT_{v3}}$	je měrná tepelná kapacita vody pro střední teplotu T_{v3} v plynném skupenství o hodnotě $c_{pH2OT_{v3}} = 2036,8 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
	T_v	je teplota varu vody $T_v = 373,15 K$ dle [59]

Střední teploty jsou

$$T_{1v} = T_1 + \frac{T_v - T_1}{2} = 333,16 K \quad (91)$$

$$T_{v3} = T_v + \frac{T_3 - T_v}{2} = 623,16 K \quad (92)$$

Tepelný výkon pro ohřev vody je pak

$$P_{tH2Oref} = 170,34 W$$

Tepelná bilance systému se vyjádří

$$P_{to} + P_{tSOFC} = P_{tref} + P_{tH2Oref} + P_{tCH4} + P_{tvzd} + P_{tzb} \quad (93)$$

kde: P_{tzb} je zbytkový tepelný výkon systému [W], který se vyjádří

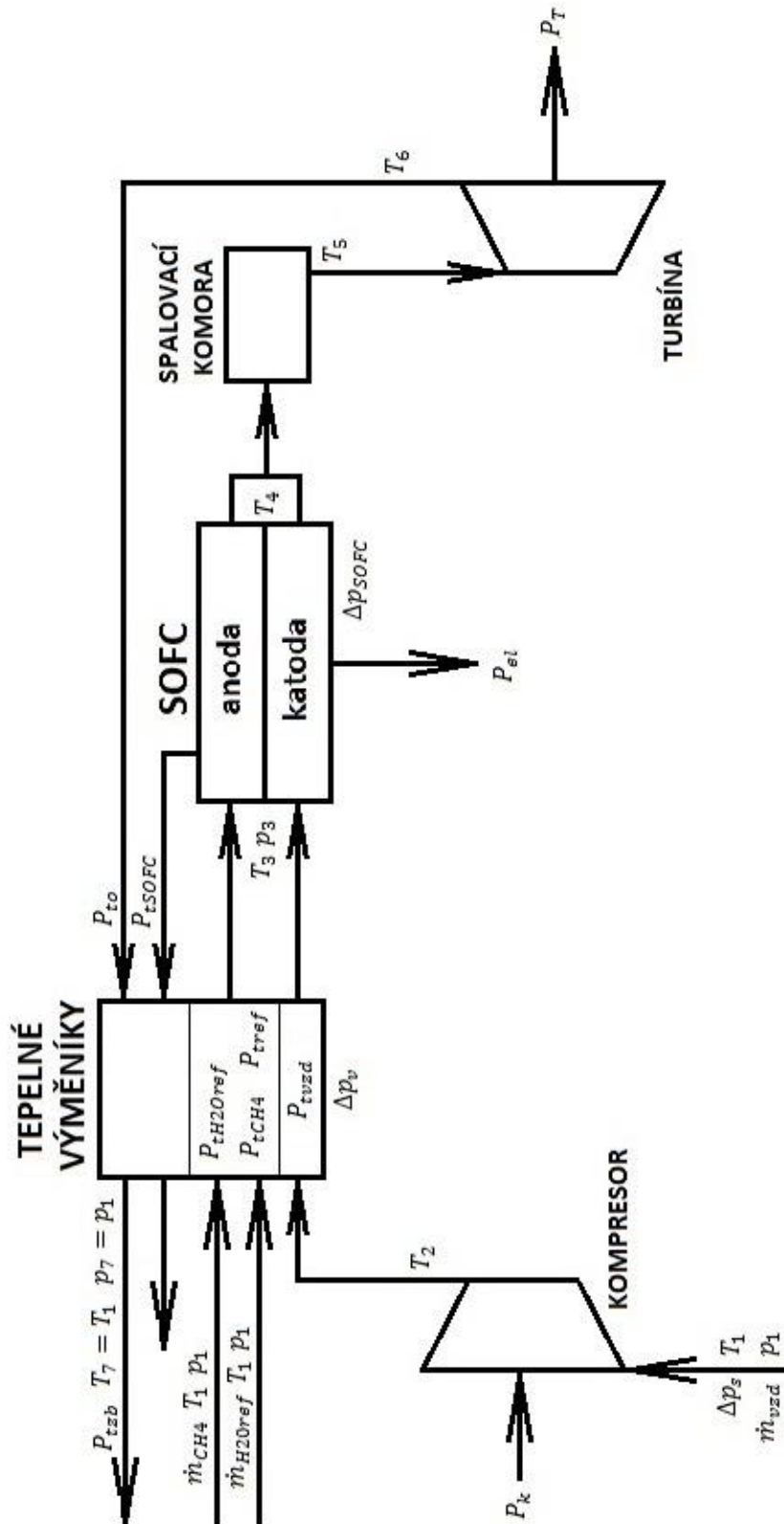
$$P_{tzb} = P_{to} + P_{tSOFC} - P_{tref} - P_{tH2Oref} - P_{tCH4} - P_{tvzd} \quad (94)$$

a má hodnotu

$$P_{tzb} = 140,32 W$$

7.3.9 Schéma a vypočtené hodnoty systému

Blokové schéma systému je na obrázku 34. Popis a hodnoty veličin uvedených ve schématu jsou pak v tabulce 18. Je to zároveň souhrnný přehled o parametrech systému a vypočítaných hodnotách jednotlivých komponent.



Obrázek 34 – schéma systému SOFC v kombinaci s plynovou turbínou

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

veličina	označení	jednotka	hodnota
KOMPRESOR			
spotřeba vzduchu	\dot{m}_{vzd}	$kg \cdot s^{-1}$	$3,62694 \cdot 10^{-5}$
teplota nasávaného vzduchu	t_1	$^{\circ}C$	20
	T_1	K	293,16
teplota stlačeného vzduchu	T_2	K	380,41
atmosférický tlak	p_1	Pa	101325
diferenční tlak na sání	Δp_s	Pa	50
výkon kompresoru	P_k	W	32,34
TEPELNÉ VÝMĚNÍKY			
spotřeba paliva	\dot{m}_{CH_4}	$kg \cdot s^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$
spotřeba vody pro reforming	\dot{m}_{H_2Oref}	$kg \cdot s^{-1}$	$4,72 \cdot 10^{-5}$
tepelný výkon potřebný na reforming	P_{tref}	W	218
diferenční tlak tepelného výměníku	Δp_v	Pa	5000
tepelný výkon SOFC, který neodchází s výstupními plyny	P_{tSOFC}	W	54,52
tepelný výkon potřebný pro ohřev vzduchu před vstupem do SOFC	P_{tvzd}	W	188,55
tepelný výkon potřebný pro ohřev paliva před vstupem do SOFC	P_{tCH_4}	W	38,09
tepelný výkon potřebný pro ohřev vody pro reforming před vstupem do SOFC	P_{tH_2Oref}	W	170,34
zbytkový tepelný výkon systému	P_{tzb}	W	140,32
tepelný výkon odpadního tepla spalín za turbínou	P_{to}	W	700,78
SOFC			
teplota na vstupu do SOFC	t_{SOFCin}	$^{\circ}C$	600
	T_3	K	873,16
provozní teplota SOFC (teplota na výstupu)	t_{SOFC}	$^{\circ}C$	850
	T_4	K	1123,16
provozní tlak SOFC	p_3	Pa	200000
diferenční tlak SOFC	Δp_{SOFC}	Pa	2000
elektrický výkon SOFC	P_{el}	W	500
využitelnost paliva		$\%$	70
SPALOVACÍ KOMORA A TURBÍNA			
teplota spalín za spalovací komorou	T_5	K	1691,23
teplota spalín na výstupu z turbíny	T_6	K	1526,59
výkon turbíny	P_T	W	98,03

Tabulka 18 – popis a hodnoty jednotlivých veličin systému SOFC v kombinaci s plynovou turbínou

7.4 Aplikace systému – zařízení na prodloužení dojezdu elektrobuse

V předchozím textu je provedeno stanovení parametrů systému palivového článku v kombinaci s plynovou turbínou. Tyto hodnoty platí pro jeden zvolený stack SOFC. V případě potřeby je možné systém multiplikovat, tak aby se dosáhlo požadovaného výkonu. Jako možná aplikace pro tento typ systému byl zvolen elektrobuse SOR EBN 11

7.4.1 SOR EBN 11

Jedná se o elektrický autobus českého výrobce SOR Libchavy spol. s r.o. Vozidlo je částečně nízkopodlažní konstrukce. Karoserie je svařena z ocelových profilů a opláštění je provedeno kombinací plechových a plastových částí. Spodní část skeletu je zhotovena z nerezové oceli, zejména z důvodů zvýšení antikorozi odolnosti. Další vybrané technické údaje dle [60] jsou

délka x šířka x výška	11100 mm x 2525 mm x 2920 mm
rozvor náprav	6320 mm
pohotovostní hmotnost	10000 kg
maximální technicky přípustná hmotnost	16500 kg
celková obsaditelnost	92 + 1 osoba
typ elektromotoru	asynchronní šestipólový, vodou chlazený
výkon motoru/točivý moment	120 kW /968 Nm
typ akumulátoru	Lithium – ion
výrobce akumulátoru	Winston Battery
kapacita akumulátoru	172 kWh

Elektrický autobus SOR EBN 11 je nasazen od 1.9.2015 do testovacího provozu Dopravního podniku hl. m. Prahy na linkách 163 a 213. Jelikož kapacita akumulátoru není dostatečná pro celodenní provoz, je třeba ho během dne dobíjet z trolejového vedení. Alternativou je využití zařízení na prodloužení dojezdu na bázi systému SOFC s plynovou turbínou.



Obrázek 35 - SOR EBN 11 v testovacím provozu při nabíjení akumulátoru z trolejového vedení [61]

7.4.2 Energetická potřeba a výkon RE

Pro stanovení energetické potřeby se vychází ze spotřeby uvedeného testovacího provozu v prosinci 2015. Vzhledem k tomu, že se jednalo o zimní měsíc, byla spotřeba navýšena o nutnost vytápění prostoru pro cestující. Při relativně teplejších dnech, kdy venkovní teplota byla až $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, vykazoval autobus spotřebu cca $1,6\text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$. V případě, že teplota dosáhla přes den až k $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, spotřeba se zvýšila až na $1,97\text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$. Vychází-li se z hodnoty průměrné spotřeby $1,73\text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$ za celý měsíc, pak spotřeba pro stanovení energetické potřeby se bude uvažovat s rezervou 15%. Tedy

$$C_{sor} = 1,73 \cdot 1,15 \doteq 1,99\text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1} \quad (95)$$

Pro stanovení celkové denní potřeby energie se vychází z předpokladu nasazení do dvousměnného provozu, celkem tedy šestnáct hodin. Provozní rychlost je stejná jako již uvedená v kapitole 6.4. Pak

$$s_{sor} = t_{sor} \cdot v_p = 267,2\text{ km} \quad (96)$$

$$E_{sor} = s_{sor} \cdot C_{sor} = 531,59\text{ kWh} \quad (97)$$

kde: s_{sor} je požadovaný denní kilometrový dojezd [km]

t_{sor} je doba trvání denního provozu $t_{sor} = 16\text{ h}$

E_{sor} denní energetická potřeba pro provoz [kWh]

S ohledem na životnost baterie výrobce doporučuje vybíjení maximálně na 30% její kapacity. Požadovaná energie dodaná RE se pak stanoví jako

$$E_{RESor} = E_{sor} - 0,7 \cdot E_{BSor} = 411,19\text{ kWh} \quad (98)$$

$$P_{RESor} = \frac{E_{RESor}}{t_{sor}} \doteq 25,70\text{ kW} \quad (99)$$

kde: E_{RESor} je požadovaná energie dodaná RE pro denní provoz [kWh]

E_{BSor} je kapacita akumulátorů o hodnotě $E_{BSor} = 172\text{ kWh}$ dle [60]

P_{RESor} je potřebný výkon dodaný RE pro denní provoz [kW]

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Pro stanovení počtu potřebných stacků SOFC na dodání požadovaného výkonu je třeba počítat s účinnostmi jednotlivých komponent. Uvažuje se mechanicky propojené soustrojí kompresoru s turbínou a generátorem, tedy

$$P_{elef} = \left[(P_{el} + P_T \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_G) \cdot \eta_{PE} - \frac{P_k}{\eta_{mech}} \right] \cdot \eta_{CH} = 429,61 \text{ W} \quad (100)$$

kde: P_{elef} je využitelný výkon systému o jednom stacku pro provoz vozidla [W]

η_{mech} je mechanická účinnost kompresoru a turbíny o hodnotě $\eta_{mech} = 0,98$ dle [55]

η_G je účinnost elektrického generátoru na turbíně o hodnotě $\eta_G = 0,77$ dle [62]

η_{PE} je účinnost výkonové elektroniky RE o hodnotě $\eta_{PE} = 0,88$ dle [41]

η_{CH} je účinnost nabíjení akumulátoru o hodnotě $\eta_{CH} = 0,91$ dle [41]

Potřebný počet stacků SOFC pro RE se pak stanoví

$$n_{RE} = \frac{P_{REsor} \cdot 1000}{P_{elef}} = 59,82 \approx 60 \quad (101)$$

z toho plyne

$$P_{RE60} = n_{RE} \cdot P_{elef} = 25776,31 \text{ W} \quad (102)$$

kde: P_{RE60} je využitelný výkon systému s šedesáti stacky SOFC (RE60) pro provoz vozidla [W]

Další vybrané parametry RE60 vycházející z šedesátinásobku hodnot systému s jedním SOFC stackem jsou

výkon kompresoru $P_{k60} = 1940,42 \text{ W}$

výkon turbíny $P_{T60} = 5881,56 \text{ W}$

tepelný výkon výměníků $P_{tv60} = 36898,68 \text{ W}$

zbytkový tepelný výkon $P_{tzb60} = 8419,34 \text{ W}$

spotřeba paliva $C_{CH4RE60} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

7.4.3 Hmotnosti a rozměry RE60

Pro stanovení přibližné hmotnosti systému R60 se vychází z vypočítaných hodnot, údajů výrobců komponent a kvalifikovaného odhadu. Hmotnost stacku SOFC uvádí výrobce [48] a tedy jejich celková hmotnost je

$$m_{SOFCRE60} = m_{SOFC} \cdot n_{RE} = 720 \text{ kg} \quad (103)$$

kde: m_{SOFC} je hmotnost stacku SOFC o hodnotě $m_{SOFC} = 12 \text{ kg}$

Pro soustrojí kompresoru s turbínou je zvolen jako ekvivalent systém GTU-003S. [63] Jedná se o mikroturbínu s kompresorem a tepelným výměníkem o elektrickém výkonu 3 kW . Dle dostupných údajů lze vypočítat

$$P_{tvGTU} = \dot{m}_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{vin} - T_{vout}) = 34484,92 \text{ W} \quad (104)$$

$$T_{io} = T_{vout} + \frac{T_{vin} - T_{vout}}{2} = 662 \text{ K} \quad (105)$$

kde: P_{tvGTU} je tepelný výkon výměníku systému GTU-003S [W]

\dot{m}_g je hmotnostní tok plynů v systému GTU-003S o hodnotě
 $\dot{m}_g = 0,079 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

c_{pg} je měrná tepelná kapacita spalin v systému GTU-003S pro střední teplotu T_{io} o hodnotě $c_{pg} = 1212,55 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T_{vin} je teplota spalin systému GTU-003S vstupujících do výměníku o hodnotě
 $T_{vin} = 842 \text{ K}$

T_{vout} je teplota spalin systému GTU-003S vystupujících z výměníku o hodnotě
 $T_{vout} = 482 \text{ K}$

T_{io} je střední teplota spalin systému GTU-003S ve výměníku [K]

Měrná tepelná kapacita je stanovena postupem popsaným v kapitole 7.3.4 pro složení spalin vzniklých dokonalým spálením metanu dle rovnice (72).

Výkonové parametry systému GTU-003S lze považovat za srovnatelné s výkonovými parametry v systému R60 a proto je uvažována

$$m_{TKV} = 200 \text{ kg}$$

kde: m_{TKV} je ekvivalentní hmotnost soustrojí kompresoru a turbíny s tepelným výměníkem [kg]

Jako hmotnostní ekvivalent výkonové a řídicí elektroniky je uvažován frekvenční měnič firmy Siemens SINAMICS G120P o jmenovitém výkonu 30 kW . [64] Odpovídá mu

$$m_{PE} = 15 \text{ kg}$$

kde: m_{PE} je ekvivalentní hmotnost výkonové a řídicí elektroniky RE60 [kg]

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Hmotnost paliva potřebného pro denní provoz se stanoví

$$m_{dCH_4} = C_{CH_4RE60} \cdot t_{sor} \cdot 3600 = 72,576 \approx 75 \text{ kg} \quad (106)$$

kde: m_{dCH_4} je hmotnost paliva potřebná pro denní provoz RE60 [kg]

Uskladnění paliva na vozidle je uvažováno v tlakových lahvích. [65] Potřebný objem se vyjádří pomocí stavové rovnice

$$V_{dCH_4} = \frac{m_{dRE60}}{\rho_{CH_4}} \quad (107)$$

$$V_{tl} = \frac{p_1 \cdot V_{CH_4}}{p_{tl}} = 0,562 \text{ m}^3 \quad (108)$$

kde: V_{dCH_4} je objem paliva potřebného pro denní provoz RE60 při tlaku p_1 a teplotě T_1 [m³]

ρ_{CH_4} je hustota paliva při tlaku p_1 a teplotě T_1 [kg · m⁻³] dle [66]

V_{tl} je objem paliva v stlačeného na tlak p_{tl} při teplotě T_1 [m³]

p_{tl} je tlak paliva v tlakové lahvi o hodnotě $p_{tl} = 20 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ dle [65]

Pro zvolené lahve odpovídá

$$n_{tl} = \frac{V_{tl}}{V_{tl52}} = 10,8 \approx 11 \quad (109)$$

$$m_{tl} = n_{tl} \cdot m_{tl52} = 495 \text{ kg} \quad (110)$$

kde: n_{tl} je potřebný počet tlakových lahví pro denní provoz RE60 [-]

V_{tl52} je objem zvolené tlakové lahve o hodnotě $V_{tl52} = 0,052 \text{ m}^3$

m_{tl52} je hmotnost zvolené tlakové lahve o hodnotě $m_{tl52} = 45 \text{ kg}$

Voda potřebná pro reforming paliva na denní provoz se stanoví z

$$m_{dH_2O} = \dot{m}_{H_2Oref} \cdot n_{stack} \cdot t_{sor} \cdot 3600 = 163,12 \text{ kg} \approx 165 \text{ kg} \quad (111)$$

$$m_{pH_2O} = 45 \text{ kg}$$

kde: m_{dH_2O} je hmotnost vody potřebná pro reforming paliva na denní provoz RE60 [kg]

m_{pH_2O} je ekvivalentní hmotnost nádrže na vodu pro reforming paliva RE60 [kg]

Jako ekvivalent hmotnosti nádrže na vodu RE60 s příslušenstvím a vodním hospodářstvím je uvažována zásobní nádrž TESY EV 200. [67]

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Tepelná izolace systému je provedena keramickou pěnou ITM-Fibermax. [68] Tloušťka tepelně izolační vrstvy je stanovena bez termodynamických výpočtů pouze jako doplňující uvažovaný údaj. Izolační vrstva je u RE60 aplikována na tělesa SOFC stacků a soustrojí mikroturbíny s kompresorem a tepelným výměníkem. Vychází se z rozměrů SOFC stacku [48]

$$\text{délka/šířka/výška} \quad a_1 = 0,168 \text{ m}/b_1 = 0,182 \text{ m}/c_1 = 0,105 \text{ m}$$

Zvolená konfigurace SOFC stacků RE60 je 10x3x2. Pro umístění uvažovaného uložení a těsnění je délka každé strany je prodloužena o 20% a tomu odpovídají vnější rozměry tělesa

$$\text{délka/šířka/výška} \quad a_2 = 2,016 \text{ m}/b_2 = 0,655 \text{ m}/c_2 = 0,252 \text{ m}$$

Rozměry soustrojí mikroturbíny s kompresorem a tepelným výměníkem jsou dle [63]

$$\text{délka/šířka/výška} \quad a_3 = 0,7 \text{ m}/b_3 = 0,8 \text{ m}/c_3 = 0,5 \text{ m}$$

Potřebná izolace se pak určí

$$V_{iz} = 2 \cdot t_i \cdot [(a_2 + 2 \cdot t_i) \cdot (b_2 + 2 \cdot t_i) + (a_2 \cdot c_2) + (b_2 \cdot c_2) + (a_3 + 2 \cdot t_i) \cdot (b_3 + 2 \cdot t_i) + (a_3 \cdot c_3) + (b_3 \cdot c_3)] \doteq 0,844 \text{ m}^3 \quad (112)$$

$$m_{iz} = \rho_{iz} \cdot V_{iz} = 109,66 \text{ kg} \approx 110 \text{ kg} \quad (113)$$

kde: V_{iz} je potřebný objem tepelně izolačního materiálu pro RE60 [m^3]

t_i je tloušťka tepelně izolačního materiálu o zvolené hodnotě $t_i = 0,1 \text{ m}$

m_{iz} je hmotnost tepelně izolačního materiálu pro RE60 [kg]

ρ_{iz} je hustota tepelně izolačního materiálu ITM-Fibermax dle [68]
o hodnotě $\rho_{iz} = 130 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Celková hmotnost systému RE60 je pak

$$m_{RE60} = k_{RE60} \cdot (m_{SOFCRE60} + m_{TKV} + m_{PE} + m_{dCH_4} + m_{tl} + m_{dH_2O} + m_{pH_2O} + m_{iz}) \doteq 1920 \text{ kg} \quad (114)$$

kde: k_{RE60} je korekční koeficient hmotnosti systému RE60 o hodnotě $k_{RE60} = 1,05$

Korekční koeficient k_{RE60} navyšuje součet všech stanovených hmotností jednotlivých komponent o 5%, což má reprezentovat hmotnost upevňovacích, propojovacích a těsnících prvků.

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Další, dosud neuvedené rozměry komponent systému R60 jsou rozměry tlakové lahve na palivo dle [65]

$$\text{vnější průměr/délka} \quad D_{tl} = 0,222 \text{ m}/l_{tl} = 1,6 \text{ m}$$

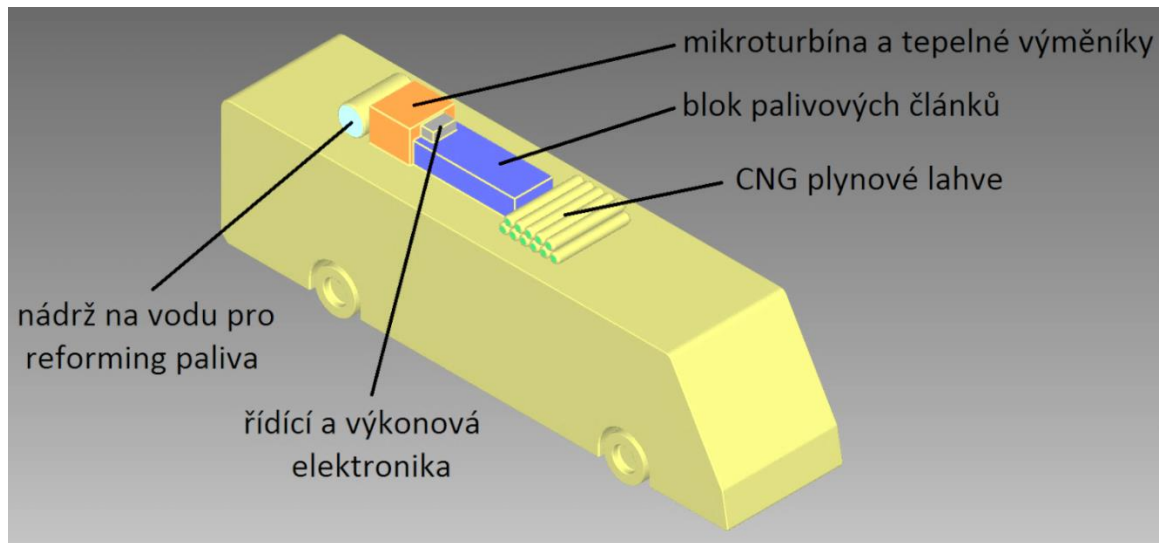
rozměry nádrže na vodu potřebnou pro reforming paliva dle [67]

$$\text{vnější průměr/délka} \quad D_{bt} = 0,6 \text{ m}/l_{bt} = 1,19 \text{ m}$$

a rozměry modulu výkonové a řídicí elektroniky dle [64]

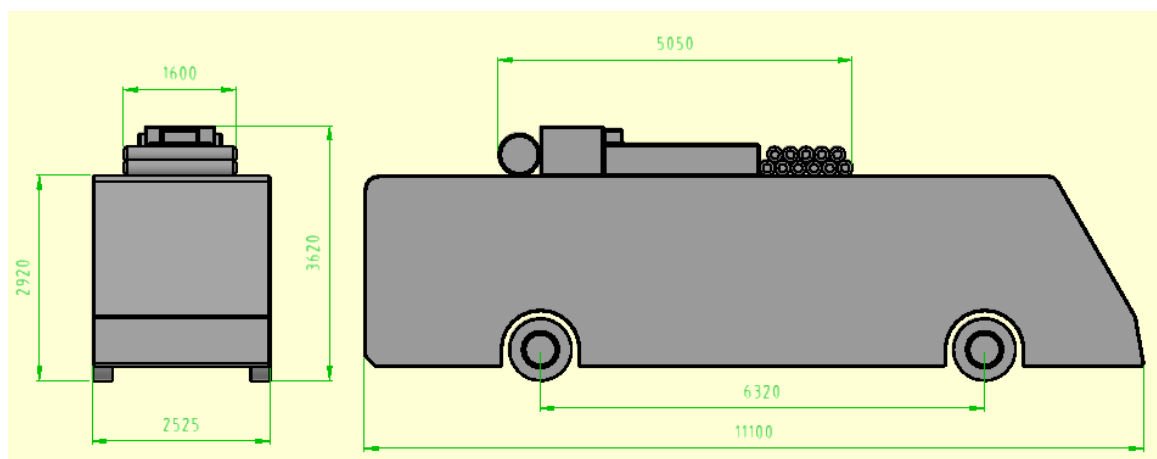
$$\text{délka/šířka/výška} \quad a_4 = 0,512 \text{ m}/b_4 = 0,275 \text{ m}/c_4 = 0,204 \text{ m}$$

Možné umístění jednotlivých komponent na vozidle je na obrázku 36.



Obrázek 36 – možné umístění komponent systému RE60

Základní rozměry aplikace RE60 jsou znázorněny na obrázku 37.



Obrázek 37 - základní rozměry aplikace RE60

7.4.4 Systém RE60 – shrnutí

Požadované a stanovené hodnoty systému RE60 pro SOR EBN 11 jsou v tabulce 19.

popis	označení	jednotka	hodnota
VSTUPNÍ HODNOTY PRO DIMENZOVÁNÍ SYSTÉMU RE60			
kilometrová spotřeba energie	C_{SOR}	kWh/km	1,99
požadovaný denní kilometrový dojezd	s_{SOR}	km	267,2
denní energetická potřeba pro provoz	E_{SOR}	kWh	531,59
využitelná kapacita akumulátorů	$0,7 \cdot E_{BSOR}$	kWh	120,4
požadovaná energie dodaná RE pro denní provoz	E_{RESOR}	kWh	411,19
doba denního provozu	t_{SOR}	h	16
potřebný výkon dodaný RE pro denní provoz	P_{RESOR}	kW	25,7
PARAMETRY SYSTÉMU RE60			
počet stacků SOFC pro RE	n_{stack}	-	60
využitelný výkon systému pro provoz vozidla	P_{RE60}	W	25776,31
výkon kompresoru	P_{k60}	W	1940,42
výkon turbíny	P_{T60}	W	5881,56
tepelný výkon výměníků	P_{v60}	W	36898,68
spotřeba paliva	$C_{CH4RE60}$	kg/h	4,54
HMOTNOSTI SYSTÉMU RE60			
60x stack SOFC	$m_{SOFCRE60}$	kg	720
soustrojí kompresoru a turbíny s tepelným výměníkem	m_{TKV}	kg	200
výkonová a řídicí elektroniky	m_{PE}	kg	15
palivo potřebného pro denní provoz	m_{dCH4}	kg	75
hmotnost tlakových lahví	m_{tl}	kg	495
voda potřebná pro reforming paliva na denní provoz	m_{dH2O}	kg	165
nádrž na vodu pro reforming paliva	m_{pH2O}	kg	45
tepelně izolační materiál	m_{iz}	kg	110
celý systém	m_{RE60}	kg	1920

Tabulka 19 – shrnutí systému RE60

7.5 Provoz systému RE60

U systému typu RE60 je uvažován kontinuální provoz. Setrvačnost dějů v systému je velká a z toho plyne tedy i malá dynamika odezvy na případný řídicí zásah. S ohledem na použité materiály v SOFC je žádoucí pomalé zahřívání na relativně vysokou provozní teplotu pro omezení rizika mechanického poškození z důvodu teplotních roztažností. Výrobce uvažovaného SOFC stacku doporučuje zahřívání a ochlazování rychlostí 4 °C za minutu. To znamená náběh na provozní teplotu cca tři a půl hodiny. Toto může být pro některé druhy provozu limitující. Stav technologie naznačuje i udávaný počet třiceti termálních cyklů, tedy počet možných spuštění SOFC, dále garantovaná životnost pět tisíc hodin provozu a degradace článku 5% za každých tisíc hodin provozu.

I s ohledem na stav techniky komponent systému RE60, lze pro uvažované provozní nasazení na základě provedených výpočtů provést rámcové srovnání s jinými druhy pohonů z ekonomického i environmentálního pohledu.

Systém RE60 je pro elektrobus SOR EBN 11 dimenzován na uvažovanou maximální spotřebu, která během celoročního provozu může nastat. Dle výrobce však spotřeba během roku může dosáhnout až hodnoty $0,89 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$. Jako průměrná roční spotřeba je tedy uvažována střední hodnota

$$C_{\text{SORstř}} = 1,44 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$$

a z toho vyplývající

$$E_{\text{SORD}} = C_{\text{SORstř}} \cdot s_{\text{SOR}} \doteq 384,77 \text{ kWh} \quad (115)$$

$$E_{\text{RE60D}} = E_{\text{SORD}} - 0,7 \cdot E_{\text{BSOR}} = 264,37 \text{ kWh} \quad (116)$$

$$E_{\text{BSít}} = \frac{0,7 \cdot E_{\text{BSOR}}}{\eta_{\text{CH}}} \doteq 132,31 \text{ kWh} \quad (117)$$

$$C_{\text{RE60D}} = \frac{E_{\text{RE60D}}}{P_{\text{RE60}}} \cdot C_{\text{CH4RE60}} \cdot 3600 \doteq 46,52 \text{ kg} \quad (118)$$

kde: E_{SORD} je střední denní energetická potřeba pro provoz [kWh]

E_{RE60D} je střední požadovaná energie dodaná RE pro denní provoz [kWh]

$E_{\text{BSít}}$ je střední požadovaná energie dodaná z elektrické sítě pro denní provoz [kWh]

C_{RE60D} je střední denní spotřeba paliva systému RE60 [kg]

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Jako porovnávací ekonomický parametr jsou zvoleny náklady na energii bez DPH na ujetí jednoho kilometru. U elektrobuse vybaveného systémem RE60 se vychází z předpokladu, že vyjíždí do provozu s plnou kapacitou elektrického akumulátoru nabitého z elektrické sítě a RE60 je pak provozován na plynné palivo (stlačený zemní plyn – CNG). Náklady na energii se pak stanoví

$$M_{RE60} = \frac{C_{RE60D} \cdot M_{pl} + E_{Bsít} \cdot M_{el}}{s_{sor}} = 5,35 \text{ Kč} \cdot \text{km}^{-1} \quad (119)$$

kde: M_{RE60} je cena za energii pro elektrobuse se systémem RE60 na ujetí jednoho km [$\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}$]

M_{pl} je cena za kilogram CNG odpovídající $M_{pl} = 21,50 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$ dle [69]

M_{el} je cena za jednotku elektrické energie ze sítě odpovídající $M_{el} = 3,24 \text{ Kč} \cdot \text{kWh}^{-1}$ dle [70]

Pro srovnání s cenou za jednotku elektrické energie ze sítě lze vypočítat cenu za jednotku elektrické energie vyrobenou RE60 využitelnou k pohonu elektrobuse z vztahu

$$M_{elRE60} = \frac{C_{CH4RE60} \cdot M_{pl} \cdot 3600 \cdot 1000}{P_{RE60}} = 3,78 \text{ Kč} \cdot \text{kWh}^{-1} \quad (120)$$

U autobusu čistě na elektrický pohon se vyjádří

$$M_{EB} = \frac{C_{sorstř}}{\eta_{CH}} \cdot M_{el} = 5,13 \text{ Kč} \cdot \text{km}^{-1} \quad (121)$$

kde: M_{EB} je cena za energii pro elektrobuse na ujetí jednoho km [$\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}$]

Pro autobus poháněný dieselovým motorem se ekonomický parametr stanoví

$$M_{diesel} = \frac{C_{diesel} \cdot M_{NM}}{100} = 9,9 \text{ Kč} \cdot \text{km}^{-1} \quad (122)$$

kde: M_{diesel} je cena za palivo pro dieselový autobus na ujetí jednoho km [$\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}$]

C_{diesel} je spotřeba paliva dieselového autobusu o hodnotě $C_{diesel} = 45 \text{ l} \cdot 100 \text{ km}^{-1}$ dle [71]

M_{NM} je cena litru motorové nafty odpovídající $M_{diesel} = 22 \text{ Kč} \cdot \text{l}^{-1}$ dle [72]

A pro autobus poháněný motorem na CNG se vyjádří

$$M_{CNG} = \frac{C_{CNG} \cdot M_{pl}}{100} = 7,95 \text{ Kč} \cdot \text{km}^{-1} \quad (123)$$

kde: M_{CNG} je cena za palivo pro CNG autobus na ujetí jednoho km [$\text{Kč} \cdot \text{km}^{-1}$]

C_{CNG} je spotřeba paliva CNG autobusu o hodnotě $C_{CNG} = 36,96 \text{ kg} \cdot 100 \text{ km}^{-1}$ dle [71]

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Při uvažování provozu autobusu šest dnů v týdnu tomu odpovídá ročně provozních 312 dní. Dále Dopravní podnik hl. m. Prahy uvažuje provozní životnost autobusů devět let a tedy

$$s_{živ} = 312 \cdot 9 \cdot s_{sor} \approx 750000 \text{ km} \quad (124)$$

kde: $s_{živ}$ je kilometrový průběh během provozní životnosti autobusu [km]

Náklady na energii pro provoz během uvažované provozní životnosti při zjednodušeném předpokladu neměnných cen za celou dobu životnosti se stanoví pro autobus

se systémem RE60 $M_{živRE60} = s_{živ} \cdot M_{RE60} = 4012500 \text{ Kč} \quad (125)$

na elektrický pohon $M_{živEB} = s_{živ} \cdot M_{EB} = 3847500 \text{ Kč} \quad (126)$

s dieselovým motorem $M_{živdiesel} = s_{živ} \cdot M_{diesel} = 7425000 \text{ Kč} \quad (127)$

s motorem na CNG $M_{živCNG} = s_{živ} \cdot M_{CNG} = 5962500 \text{ Kč} \quad (128)$

Pro autobusy poháněné dieselovým motorem a motorem na CNG oznamuje Ministerstvo dopravy každoročně ceny jednotlivých typů pro účely výpočtu přiměřeného zisku. [73] Pak lze vyjádřit

$$M_{\Sigma diesel} = M_{živdiesel} + M_{cenadiesel} = 11945000 \text{ Kč} \quad (129)$$

$$M_{\Sigma CNG} = M_{živCNG} + M_{cenaCNG} = 11712500 \text{ Kč} \quad (130)$$

kde: $M_{\Sigma diesel}$ jsou celkové náklady na pořízení a palivo po dobu životnosti autobusu s dieselovým motorem [Kč]

$M_{cenadiesel}$ je cena autobusu s dieselovým motorem
 $M_{cenadiesel} = 4520000 \text{ Kč}$

$M_{\Sigma CNG}$ jsou celkové náklady na pořízení a palivo po dobu životnosti autobusu s motorem na CNG [Kč]

$M_{cenaCNG}$ je cena autobusu s motorem na CNG $M_{cenaCNG} = 5750000 \text{ Kč}$

U elektrického busu SOR EBN 11 je pořizovací cena dle výrobce cca 8 miliónů Kč, přičemž je potřeba po ujetí cca 400 tisíc kilometrů počítat s investicí cca 2 miliónů Kč na výměnu baterií. Jinak lze zjednodušeně považovat náklady na údržbu a opravy za stejné jako u autobusů se spalovacím motorem. Pro elektrobus tedy lze uvažovat

$$M_{\Sigma EB} = M_{živEB} + 10 \text{ mil} = 13847500 \text{ Kč} \quad (131)$$

kde: $M_{\Sigma EB}$ jsou celkové náklady na pořízení a energii po dobu životnosti elektrobusu [Kč]

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Aby tedy byl elektrobus se systémem RE60 konkurenceschopný měl by vyhovovat podmínce

$$M_{\Sigma RE60} \approx 12000000 \text{ Kč} \quad (132)$$

z čehož plyne

$$M_{cenaRE60} \approx 8000000 \text{ Kč}$$

kde: $M_{\Sigma RE60}$ jsou celkové náklady na pořízení a palivo po dobu životnosti elektrobusu se systémem RE60 [Kč]

$M_{cenaRE60}$ je pořizovací cena elektrobusu se systémem RE60 [Kč]

Z environmentálního pohledu má elektrický bus nulové lokální emise. U autobusu s dieslovým motorem lze emise oxidu uhličitého stanovit zjednodušeným přepočtem dle [74]

$$e_{diesel} = \frac{C_{diesel} \cdot 2,6}{100} = 1,17 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1} \quad (133)$$

kde: e_{diesel} jsou emise CO₂ produkované autobusem s dieslovým motorem [$\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$]

Podobně u autobusu na CNG dle [75]

$$e_{CNG} = \frac{C_{CNG} \cdot 2,8}{100} = 1,035 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1} \quad (134)$$

kde: e_{CNG} jsou emise CO₂ produkované autobusem s motorem na CNG [$\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$]

U elektrobusu se systémem R60 se produkované emise stanoví

$$e_{RE60} = \frac{E_{RE60D} \cdot m_{CO2sp} \cdot 60 \cdot 3600}{P_{RE60} \cdot S_{SOR}} = 0,479 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1} \quad (135)$$

kde: e_{RE60} jsou emise CO₂ produkované elektrobusem se systémem RE60 [$\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$]

Náklady na energii a produkované lokální emise jsou shrnuty v tabulce 20.

	náklady na km		lokální emise	
	Kč/km		kg/km	
elektrobus s RE60	5,35	100%	0,479	100%
elektrobus	5,13	96%	0	0%
dieslový bus	9,9	185%	1,17	244%
CNG bus	7,95	149%	1,035	216%

Tabulka 20 - náklady na energii a produkované lokální emise

Návrh zařízení na prodloužení dojezdu elektrického vozidla

Elektrickou účinnost systému RE60 pak lze stanovit jako

$$\eta_{elRE60} = \frac{P_{RE60}}{H_{CH_4} \cdot C_{CH_4RE60}} \cdot 100 = 40,91\%$$

Vypočítané parametry systému RE 60 jsou stacionární a nejsou uvažované přechodové stavy, jako je například rozběh nebo zastavení systému. Vzhledem ke zmíněnému omezení malým množstvím termálních cyklů je možné uvažovat provoz systému jako nepřetržitý, s tím že vyprodukovaná energie při odstavení vozidla (v noci, při nevytížení) může být využita pro nabíjení baterií vozidla, nebo pro její akumulování do jiného úložiště. Cena produkované elektrické energie využitelné pro provoz vozidla je v tomto případě asi jen o 6% vyšší oproti ceně využitelné elektřiny ze sítě ($\frac{M_{el}}{\eta_{CH}}$). V případě omezené možnosti regulace výkonu RE60 lze pak s ohledem na předpokládanou spotřebu, v závislosti na ročním období nebo obsluhované lince, vyhodnotit energetickou potřebu na daný den a není například nutné vyjíždět do provozu s plně nabitou baterií.

Diskuze

Aplikace RE60, tak jak je rozebrána v předchozím textu naráží na řadu omezení, z nichž se jako velmi významná jeví vysoká hmotnost celého systému. V případě jeho umístění na střeše, jak je uvažováno, by si toto řešení vyžádalo navíc konstrukční úpravy skeletu karoserie, což by patrně dále navýšilo pohotovostní hmotnost vozidla. Navyšování pohotovostní hmotnosti u autobusu je nežádoucí, protože se tím snižuje obsaditelnost a tedy stoupají náklady na přepravu jedné osoby. Jen při úvaze aplikace samotného systému RE60 se obsaditelnost elektrobusu SOR EBN 11 sníží cca o 30% (uvažována pohotovostní hmotnost 11,92 t, celková 16,5 t a hmotnost osoby 70 kg). Na obsluhu linky by pak bylo nutné nasazení většího počtu autobusů, z čehož plynou například vyšší pořizovací a provozní náklady.

Relativně nízké provozní hodnoty elektrobusu se systémem RE60 z kapitoly 7.5, vnímané v souvislosti s obsaditelností, se po přepočtu na jednu přepravenou osobu navýší. U nákladů na energii na ujetý kilometr by pak systém RE60 dosahoval cca stejných hodnot jako autobus s motorem na CNG (elektrobus se systémem RE60 obsazený maximálně 64 osobami má náklady $0,084 \text{ Kč/osoba} \cdot \text{km}$ a při maximálním obsazení 92 osobami jsou náklady elektrobusu $0,055 \text{ Kč/osoba} \cdot \text{km}$, autobusu s naftovým motorem $0,107 \text{ Kč/osoba} \cdot \text{km}$ a autobusu s motorem na CNG $0,086 \text{ Kč/osoba} \cdot \text{km}$), což je ale stále příznivé. Obdobně lze porovnat lokální emise (elektrobus se systémem RE60 $0,007 \text{ kg/osoba} \cdot \text{km}$, autobus s naftovým motorem $0,013 \text{ kg/osoba} \cdot \text{km}$ a $0,011 \text{ kg/osoba} \cdot \text{km}$ u autobusu s motorem na CNG). U lokálních emisí tedy i s omezením obsaditelnosti vychází jejich produkce systémem RE60 výrazně nižší než u ostatních druhů pohonu. Celkové emise autobusů na elektrický pohon by pak závisely na energetickém mixu dané země, ve které by byly provozovány a nebudou zde rozebírány.

Z hlediska dalšího vývoje systému RE by bylo vhodné se tedy zaměřit na redukci hmotnosti. Ocelové plynové lahve lze nahradit například lahvemi kompozitními, mající cca třetinovou hmotnost. [77] Rovněž navýšení skladovacího tlaku paliva v lahvích by vedlo k úspoře hmotnosti z důvodu, že by bylo možné použít méně lahví. Co se týká samotného SOFC článku, tak dle [45] je potenciál této technologie u proudové hustoty až $4000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, což je pětikrát více, než bylo uvažováno u výpočtu na základě parametrů SOFC stacku v této práci. To by tak vedlo při stejném výkonu k menšímu počtu stacků a tedy i menší hmotnosti bloku palivových článků. Odpadní teplo systému lze využít pro vytápění prostoru pro cestující, eventuálně pro absorpční chlazení, využívající tepelné energie k výrobě chladu. [78] Tím by se tak dosáhlo nižší přídavné spotřeby energie, což by ale znamenalo větší složitost celého systému. V případě separace vody z par ve výfukových plynech a jejího opětovného využití v systému by nebylo třeba pro reforming paliva tak objemné nádrže s vodou, což by na hmotnost a objem systému mělo taky vliv. V úvahu také připadá snížení kapacity baterií a tím snížení hmotnosti elektrobusu. Toto by si ale vyžádalo jinak dimenzovaný RE.

Diskuze

Konkrétně u elektrobusu SOR EBN 11 by dle výrobce ale změna kapacity současně montované baterie měla velice negativní vliv na její životnost.

Další důvody, proč usilovat o redukci hmotnosti je, že systém RE60 vykazuje hustotu využitelného výkonu cca $24 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ (bez paliva, vody a jejich nádrží) což je zhruba šestkrát méně ve srovnání se systémy Ballard a Proton z kapitoly 2.3. V souvislosti s jízdní dynamikou je pak při umístění systému na střeche autobusu změněna poloha těžiště směrem nahoru, což má vliv na jízdní vlastnosti vozidla, přičemž čím je systém těžší, tím je změna polohy těžiště výraznější.

Omezením systému RE60 jsou vypočítané teploty spalin. Vstupní teploty do plynových turbín (ekvivalentně turbodmychadel zážehových motorů) jsou v současnosti až 1050 °C. [79] Vypočítaná teplota v systému na vstupu do mikroturbíny je však cca o 35% vyšší. To by kladlo vysoké nároky na použité materiály a tedy i cenu komponent systému. Toto platí i pro tepelné výměníky. Teplotu v systému by bylo možné snížit například změnou směšovacího poměru paliva a okysličovadla λ , případně snížením provozní teploty SOFC, což by ale znamenalo snížení jeho účinnosti. Nejeftivnější je SOFC okolo 1000 °C. [45] Takto vysoké teploty ale podobně jako u turbíny znamenají použití dražších materiálů na těleso, keramiku a propojení jednotlivých FC. Snížení pracovní teploty SOFC je proto vnímáno jako jedna z podmínek dosažení nízkých nákladů na výrobu. Nižší teplotou by se také dosáhlo menšího namáhání aktivních keramických součástí teplotní roztažností a mohlo by tak vést k větší životnosti.

Cenu systému RE60 nelze s určitostí stanovit z důvodu, že pro jednotlivé komponenty, jako je SOFC, mikroturbína, kompresor a tepelné výměníky, se na trhu nenabízí ekvivalentní produkt, jelikož se buď jedná o technologie dostupné zatím jen v omezené míře, například ve stádiu testovacího provozu, nebo se jejich parametry liší od běžně dostupné produkce. V každém případě je splnění podmínky ze vztahu (132) nereálné, už jen s ohledem na cenu samotného elektrobusu (viz kapitola 7.5).

Samotná technologie SOFC, přes uvedené omezení dané stavem techniky již například zmíněné v kapitole 7.5, skýtá velký potenciál. Dle [45] se očekává životnost článků až 80000 hodin provozu. Oproti jiným typům FC, není pro jejich výrobu nutné použití vzácných kovů, jako je platina a ruthenium, jejichž nevýhodou není jen vysoká cena ale i dostupnost dostatečného množství pro velkoobjemovou výrobu. SOFC je flexibilní při volbě paliva a umožňuje využití uhlovodíkových paliv jako je zemního plyn, metan, bioplyn atd. přičemž citlivost na nečistoty v palivu, jako je například síra, není vysoká. Výhodou je i možnost vnitřního reformingu paliva a tím snížených nákladů na systém. Pro stacionární aplikace SOFC je důležitá jejich vysoká účinnost přeměny energie paliva na elektřinu s možností kogenerace tepla, případně při vhodně zvoleném elektro katalytickém materiálu anody i kogenerace chemických sloučenin. Při obrácení procesu v SOFC lze elektrolýzou vyrábět vodík. Díky tomu, že samotný SOFC neobsahuje žádné pohyblivé části, je jeho provoz prostý na vibrace a hlučnost. Z hlediska konstrukce se

jedná o modulární, jednolitý systém, u něž je snadná výkonová škálovatelnost. Tuhý elektrolyt pak nevyžaduje údržbu a snadno se s ním manipuluje. Elektrický odpor elektrolytu je však stále příliš vysoký, stejně jako polarizace elektrod (článkem teče menší proud, než odpovídá napětí na elektrodách, což neodpovídá Ohmově zákonu). Křehké keramické komponenty SOFC působí obtíže při plochách článku nad $0,2 \text{ m}^2$. To limituje zejména při skládání do vyšších systémových výkonů. Dalšímu vývoji se nelze vyhnout, ani co se týká technologie výroby elektrolytu a jeho homogenity. Potřebné vyšší investice do vývoje systému tak zatím brzdí vstup SOFC na trh ve větší míře.

Z enviromentálního pohledu SOFC produkuje zanedbatelné emise oxidu uhelnatého z důvodů jeho eliminace přeměnou na oxid uhličitý při vysoké provozní teplotě SOFC. Oxid uhelnatý lze navíc využít i jako palivo pro SOFC. Protože nedochází během elektrochemických reakcí v SOFC ke spalování, neprodukuje se ani škodliviny typu NO_x a SO_x . Produkce těchto škodlivin by tak u systému SOFC s mikroturbínou mohla nastat z části paliva spáleného pro pohon turbíny. Vzhledem k tomu, že mikroturbína tvoří menší část výkonu celého systému, lze předpokládat i nízkou produkci škodlivin. Rovněž emise CO_2 jsou díky vysoké účinnosti SOFC značně zredukovány. Emise CO_2 jsou produkovány v případě, že je používáno palivo na bázi uhlovodíků. V případě použití vodíku jako paliva jsou odpadními produkty jen teplo a voda.

Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou zařízení pro prodloužení dojezdu elektrického vozidla. V rešerši byly rozebrány známá technická řešení tohoto zařízení na bázi pístových motorů, mikroturbín a palivových článků jak z hlediska koncepcí samotných systémů, tak i jejich konkrétních aplikací do vozidel. Převládající bylo řešení na základě soustrojí čtyřdobého spalovacího motoru s elektrickým generátorem. Dále byly na modelovém případě zhodnoceny vlivy na energetickou potřebu vozidel s elektrickým pohonem a definovány požadavky na zařízení na prodloužení dojezdu.

Byla stanovena metodika pro obecné dimenzování výkonu zařízení na prodloužení dojezdu elektrických vozidel použitelná pro různé třídy osobních vozidel a autobusů, případně srovnání reálných aplikací. Vyhodnocení vhodného výkonu probíhá pomocí hodnotících parametrů a podmínek na požadovaný dojezd a zbytkovou využitelnou kapacitu baterie pro pohon vozidla.

Pro návrh konkrétního zařízení byla vybrána koncepce palivového článku s tuhými oxidy (SOFC) v kombinaci s plynovou turbínou se zemním plynem jako uvažovaným palivem pro provoz systému. Pro základní SOFC stack o jmenovitém elektrickém výkonu 500 W byly provedeny výpočty ostatních komponent systému, a to kompresoru, turbíny a tepelných výměníků. Výpočty se týkaly především hmotnostních průtoků provozních látek (palivo, oksyličovadlo, spaliny), teplot v jednotlivých částech systému a výkonů komponent.

Aplikace vypočteného zařízení byla provedena na elektrobus SOR EBN 11, přičemž jeho dimenze byla stanovena na základě energetické potřeby pro dané vozidlo. Požadované parametry aplikace splňovalo zařízení skládající se z šedesáti základních SOFC stacků a tedy i parametry ostatních komponent byly multiplikovány ve stejném poměru. Výsledný elektrický výkon zařízení, využitelný pro provoz vozidla, je 25,78 kW při elektrické účinnosti cca 41% a celkové hmotnosti systému 1920 kg. Dále byly vyhodnoceny provozně ekonomické hodnoty a produkované emise.

Diskuze se zaměřila na systém a možnosti jeho vylepšení dalším vývojem. SOFC byl hodnocen z hlediska potenciálu této technologie do budoucna.

S ohledem na současný stav techniky se v této práci navrhnuté zařízení pro prodloužení dojezdu elektrických vozidel prozatím jeví jako obtížně realizovatelné. Pro mnohé výhody je SOFC perspektivní technologií, která přeměňuje energii vázanou v palivech na elektřinu a teplo s vysokou účinností a lze si ji představit jako vhodnou alternativu k tradičním systémům. Bude-li jí věnována dostatečná pozornost a vývojové kapacity, můžeme se její spolehlivé aplikace jak v hybridních pohonech vozidel, tak stacionární dočkat v blízké budoucnosti.

Použité informační zdroje

1. SVOBODA, Jiří. *Teorie dopravních prostředků: vozidla silniční a terénní*. Vyd. 3. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01613-7.
2. MOCK, Peter (ed.). *EUROPEAN VEHICLE MARKET STATISTICS: Pocketbook 2015/16* [online]. Berlin: International Council on Clean Transportation, 2015 [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://eupocketbook.theicct.org>
3. Range Extender Engines. *Lotus cars*. [online]. 30.5.2015 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://www.lotuscars.com/engineering/range-extender-engines>
4. BMW i3. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001- [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/BMW_i3
5. BMW i3 18.8 kWh (170 Hp) Range Extender Technical information. *AutoData1*. [online]. 6.6.2016 [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.autodata1.com/en/car/bmw/i3/i3-188-kwh-170-hp-range-extender>
6. *Range Extender Data Record Sheet*. Neckarsulm, Germany: KSPG AG, 2014.
7. MAHLE Compact Range Extender Engine. *MAHLE Powertrain*. [online]. 6.6.2016 [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.mahle-powertrain.com/en/experience/mahle-compact-range-extender-engine/>
8. SWISS HIGH TECH for the automotive world of tomorrow. *MOTOREX MAGAZINE*, 2010, vol. 42, no. 91, s. 10–13.
9. NICOLAS, Romain. The 2016 Volt and its Voltec propulsion system. *Car-engineer.com*. [online]. 1.12.2015 [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.car-engineer.com/2016-volt-voltec-propulsion-system/>
10. Rotax Powertrains – BRP-Rotax. *ROTAX*. [online]. 6.6.2016 [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <https://www.rotax.com/en/products/rotax-powertrains/applications/others.html>
11. HERON, Alex a Frank Rinderknecht. *Comparison of Range Extender Technologies for Battery Electric Vehicles* [online]. 2013. [cit. 2016-06-06]. ISBN 978-1-4673-5269-7 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6521579&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F6518068%2F6521505%2F06521579.pdf%3Farnumber%3D6521579>
12. ZOIA, David. Rotary Engine Finally Could Find Home in Future Hybrids. *WardsAuto* . [online]. 16.7.2010 [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://wardsauto.com/news-analysis/rotary-engine-finally-could-find-home-future-hybrids>
13. COBB, Jeff. Mazda Could Produce Mazda2 EV With Rotary Range Extender. *HybridCars.com*. [online]. 1.7.2014 [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.hybridcars.com/mazda-could-produce-mazda2-ev-with-rotary-range-extender/>

Použité informační zdroje

14. Mikroturbína. *Asociace mikroturbín, o.s.* [online]. [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.mikroturbina.cz/mikroturbina>
15. C30 :: Capstone Turbine Corporation. *Capstone Turbine Corporation* [online]. [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.capstoneturbine.com/products/c30>
16. PESLAR, Jiří. *Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska*. Brno, 2008.
17. Bladon Jets. *Gas Turbine Engines for use in aerospace, hybrid vehicle and power generation applications* [online]. 2016 [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.bladonjets.com/technology/gas-turbines/>
18. *MTT Range Extender for EV's and PHEV's: Micro turbine based superior Range Extender technology*. Eindhoven: Micro Turbine Technology BV, 2010.
19. *BALLARD FCveloCity®: FUEL CELL POWERED ZERO EMISSION HEAVY DUTY MOTIVE MODULES*. Burnaby: Ballard Power Systems Inc., 2016.
20. *HyRange®: Fuel cell system for electric vehicles*. Puchheim: Proton Motor Fuel Cell GmbH, 2014.
21. Symbio FCell. *Range Extenders* [online]. [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.symbiofcell.com/range-extenders/>
22. 2014 BMW i3 sales split between BEV and REx versions mirrors overall market. *TorqueNews.com* [online]. Hareyan Publishing company, 2014 [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.torquenews.com/1083/bmw-i3-sales-split-between-bev-and-rex-models-mirrors-overall-market>
23. BMW i3: Technické údaje. *BMW Česká republika* [online]. 2016 [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.bmw.cz/cs/all-models/bmw-i/i3/2016/technicke-udaje.html#tab-0>
24. *ECO Saver IV™ Hybrid Electric Bus*. Charlotte: DesignLine USA, 2010.
25. *Urbino electric*. Owińska: Solaris Bus & Coach S.A., 2014.
26. *Lotus Evora 414E Hybrid: MEDIA INFORMATION*. Norwich: GROUP LOTUS PLC, 2012.
27. Audi Innovation - Audi UK. *Audi e-tron technology* [online]. [cit. 2015-06]. Dostupné z: <https://www.audi.co.uk/audi-innovation/concept-cars/a1-e-tron.html>
28. *Optimore* [online]. [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.optimore-project.eu/>
29. *CMT-380: Microturbine Supercar*. Chatsworth: Capstone Turbine Corporation, 2009.
30. POLÁK, Lukáš. *Projekt TriHyBus: 5 let provozních zkušeností*. ÚJV Řež, a. s.
31. Real-world range ramifications: heating and air conditioning. *FleetCarma Updates* [online]. 2014 [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: <http://www.fleetcarma.com/electric-vehicle-heating-chevrolet-volt-nissan-leaf/>

Použité informační zdroje

32. BESSELINK, Igo, Kobus HEREIJGERS, Paul VAN OORSCHOT a Henk NIJMEIJER. *Evaluation of 20000 km driven with a battery electric vehicle*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2011.
33. Worst Corridors: INRIX 2015 Traffic Scorecard. *INRIX* [online]. 2016 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <http://inrix.com/worst-corridors/>
34. Chevrolet Volt. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet_Volt
35. *Car fuel data, CO2 and vehicle tax tools* [online]. [cit. 2016-06-09]. Dostupné z: <http://carfueldata.direct.gov.uk/>
36. *Výhřevnost paliv* [online]. [cit. 2016-06-09]. Dostupné z: http://rojek.cz/pdf/TTP/Vyhrevnost_paliv.pdf
37. Hydrostatické prevody v mobilnej poľnohospodárskej technike (1. časť). *Agroporadenstvo* [online]. 2013 [cit. 2016-06-09]. Dostupné z: <http://www.agroporadenstvo.sk/index.php?start&t=stroje-rozne&t2=&article=335>
38. *Autoplenum.de* [online]. [cit. 2016-06-09]. Dostupné z: <http://www.autoplenum.de/>
39. Engine weight. *Fast Fairlane* [online]. 2014 [cit. 2016-06-09]. Dostupné z: <http://www.fastfairlane.com/Engines/engweight.htm>
40. Electric Vehicle (EV). *Battery University* [online]. 2016 [cit. 2016-06-09]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev
41. *MOTORBRAIN* [online]. 2014 [cit. 2016-06-09]. Dostupné z: <http://www.motorbrain.eu/>
42. ČERNÝ, Jiří. *Testing of Five Different Types of Electric Buses*. Brno: Dopravní podnik města Brna, a.s., 2015.
43. *AC 136 AE (all electric) Roof-mounted AC system for electric vehicles*. Renningen: Eberspächer, 2016.
44. *Výroční zpráva 2014*. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová společnost, 2015.
45. VISWANATHAN, B. a M. Aulice SCIBIOH. *Fuel cells: principles and applications*. Hyderabad: Universities Press, 2007. ISBN 978-1-4200-6028-7.
46. HORÁK, Bohumil, Zbyszek SZELIGA a Miroslav KOPŘIVA. *STUDIE INSTALACE STACIONÁRNÍHO VYSOKOTEPLTNÍHO PALIVOVÉHO ČLÁNKU*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2005.

Použité informační zdroje

47. WINKLER, Wolfgang a Hagen LORENZ. The design of stationary and mobile solid oxide fuel cell–gas turbine systems. *Journal of Power Sources*. 2002, **105**(2), 222-227. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00943-0. ISSN 03787753. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775301009430>
48. *Staxera SOFC stack – Mk200, Article 186: Product data sheet*. Dresden: Staxera GmbH, 2007.
49. *Zemní plyn: Co je zemní plyn* [online]. Praha: GAS s.r.o., 2007 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.zemniplyn.cz/plyn/>
50. *BIO FUEL CELLS CONCEPTS FOR LOCAL ENERGY* [online]. The Green Box Systems Group, 2000 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/99-00/bio_fuel_cells/groupproject/pageframe.htm
51. *Vzduch: Fyzikální a chemické vlastnosti vzduchu* [online]. Jiří Bureš, 2002 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
52. Filtrační média. *KLIMAIR* [online]. [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: http://www.klimair.cz/filtracni_media.html
53. *Fuel Cells a & Process Technology: Data Sheets & INFORMATION*. Dresden: EBZ Entwicklungs- und Vertriebsgesellschaft Brennstoffzelle mbH, 2013.
54. PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac., V Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2409-5.
55. VISSER, W. P. J., S. A. SHAKARIYANTS a M. OOSTVEEN. Development of a 3 kW Microturbine for CHP Applications. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2011, **133**(4), 042301-. DOI: 10.1115/1.4002156. ISSN 07424795. Dostupné také z: <http://GasTurbinesPower.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1428204>
56. MACEK, Jan. *Přepřívání a chlazení: Lecture 5*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014.
57. *Chemie - cvičení 5 – Projekt P1: Výpočet vybraných návrhových parametrů zařízení* [online]. Praha: Ústav procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT, 2004 [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/1rocnik/chemie1r/cvvyvpoct/cvpr5.pdf>
58. Výhřevnost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDh%C5%99evnost>
59. Skupenská tepla. *Fázové přechody* [online]. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/8_3

Použité informační zdroje

- 60 *Elektrobus SOR EBN 8/9,5/11: městský/meziměstský* [online]. Libchavy: SOR Libchavy spol. s r.o., 2014 [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <http://www.sor.cz/site/download/SOR-listy-CZ-1427718666.pdf>
61. *Testování elektrobusu SOR nyní na linkách číslo 163 a 213* [online]. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová společnost, 2015 [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <http://www.dpp.cz/elektrobus-sor-zamiril-do-bezneho-provozu-s-cestujicimi/>
62. *Nová řada Bosch „Efficiency Line“ Alternátory s vyšší účinností: Tisková zpráva*. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2009.
63. SMIRNOV, Alexander. Gas turbine package rated at 3 kW: development prospects. *Gas Turbo Technology: Specialised Information and Analytical Edition*. Rybinsk: Federal Relation and Mass Communication Supervision Agency, **2011**(1), 2-4.
64. *SINAMICS Inverters for Single-Axis Drives and SIMOTICS Motors: Motion Control Drives*. Postfach: Siemens AG, 2014.
65. *Katalog - Ocelové lahve* [online]. Vítkovice Cylinders a.s. [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <http://www.vitkovice.cz/cng-storage>
66. Methan. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Methan>
67. Buffer tanks for domestic hot water: EV 200 60 F40 TP3. *TESY LTD.* [online]. [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: http://www.tesy.com/en/products/indirect_heated_storage_heaters_and_buffers/buffers/buffer_tanks_for_domestic_hot_water/ev_200_60_f40_tp3/
68. *ITM-Fibermax®: Polycrystalline Mullite/Alumina (PCW) Wool and Needled Blankets up to 1600 °C (2912 °F)*. Aachen: M.E. SCHUPP Industriekeramik GmbH & Co. KG, 2016.
69. *CNG* [online]. RWE Energo, s.r.o. [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <http://www.cng.cz>
70. SCHINDLER, Jan. *Srovnání cen elektřiny a plynu v Evropě* [online]. Praha: TZB-info, 2015 [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/12823-srovnani-cen-elektřiny-a-plynu-v-evrope>
71. *Studie využití stlačeného zemního plynu (CNG) v dopravě v Karlovarském kraji*. Ostrava: MMC euroconsult CZ s.r.o., 2010.
72. *Aktuální ceny benzínu, cena nafty* [online]. Kurzy.cz, spol. s r.o. [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: <http://www.kurzy.cz/komodity/benzin-nafta-cena/>
73. *VĚSTNÍK DOPRAVY: Informace z resortu Ministerstva dopravy*. Praha: Ministerstvo dopravy, 2015, (13). ISSN 1805-9627.
74. MÅRTENSSON, Lars. *Emissions from Volvo's trucks*. Göteborg: Volvo Trucks, 2014.

Použité informační zdroje

75. Combustion of Fuels - Carbon Dioxide Emission. *The Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2016-06-13]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html

76 New European Driving Cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle

77. *Ullit: Why to choose ULLIT's technology* [online]. Diors: Ullit, 2016 [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: http://www.ullit.com/index.php?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=57&lang=en

78. Absorpční chladiče: princip chlazení. *GB ENERGY HOLDING s.r.o.* [online]. Brno: GB ENERGY HOLDING s.r.o., 2015 [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: <http://www.gbenergy.eu/gb/chlazení-princip.html>

79. Turbocharger for an exhaust temperature of 1050°C. 2016. *BorgWarner: Turbo Systems* [online]. Kirchheimbolanden: BorgWarner [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: <http://www.turbos.bwauto.com/products/turbochargerExhaustTemperature.aspx>

Seznam použitých zkratk a symbolů

A, B, C, D	koeficienty polynomu pro výpočet molární měrné tepelné kapacity $[-]$
$a_1/b_1/c_1$	délka/šířka/výška rozměrů SOFC stacku $[m]$
$a_2/b_2/c_2$	délka/šířka/výška vnějších rozměrů tělesa šedesáti SOFC stacků $[m]$
$a_3/b_3/c_3$	délka/šířka/výška rozměrů soustrojí mikroturbíny s kompresorem a tepelným výměníkem $[m]$
$a_4/b_4/c_4$	délka/šířka/výška rozměrů modulu výkonové a řídicí elektroniky $[m]$
b	rozchod předních kol vozidla $[m]$
b_{i3}	rozchod předních kol BMW i3 $[m]$
c_b	měrná kapacita akumulátoru $[Wh \cdot kg^{-1}]$
C_c	spotřeba energie na kilometr $[Wh \cdot km^{-1}]$
C_{ci3}	spotřeba energie na kilometr BMW i3 $[Wh \cdot km^{-1}]$
C_{cm}	spotřeba energie na kilometr modelového případu $[Wh \cdot km^{-1}]$
C_{cmk}	korigovaná spotřeba energie $[Wh \cdot km^{-1}]$
C_{CNG}	spotřeba paliva CNG autobusu $[kg \cdot 100 km^{-1}]$
C_{diesel}	spotřeba paliva dieselového autobusu $[l \cdot 100 km^{-1}]$
CNG	stlačený zemní plyn
CO_2	oxid uhličitý
C_p	kombinovaná spotřeba paliva vozidla udávaná výrobcem $[l \cdot 100 km^{-1}]$
c_p	měrná tepelná kapacita za stálého tlaku $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pCO_2T_{14}}$	měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého při teplotě T_{14} $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pCO_2T_{15}}$	měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého při teplotě T_{15} $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_{pg}	měrná tepelná kapacita spalín v systému GTU-003S pro střední teplotu T_{io} $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pH_2OT_{13}}$	měrná tepelná kapacita vody při teplotě T_{13} $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pH_2OT_{14}}$	měrná tepelná kapacita vody při teplotě T_{14} $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

Seznam použitých zkratk a symbolů

$c_{pH2OT_{15}}$	měrná tepelná kapacita vody při teplotě T_{15} [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$c_{pH2OT_{v3}}$	měrná tepelná kapacita vody pro střední teplotu T_{v3} v plynném skupenství [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$C_{CH4RE60}$	spotřeba paliva systému RE60 [$kg \cdot s^{-1}$]
$c_{pCH4T_{13}}$	měrná tepelná kapacita paliva při teplotě T_{13} [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$c_{pCH4T_{14}}$	měrná tepelná kapacita metanu při teplotě T_{14} [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{pi}	měrná tepelná kapacita i -té složky směsi [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$c_{pkH2OT_{1v}}$	měrná tepelná kapacita vody pro střední teplotu T_{1v} v kapalném skupenství [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{pl}	měrná tepelná kapacita vzduchu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$c_{plT_{13}}$	měrná tepelná kapacita vzduchu při teplotě T_{13} [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$c_{plT_{23}}$	měrná tepelná kapacita vzduchu pro střední teplotu T_{23} [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{pm}	molární měrná tepelná kapacita [$kJ \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$]
$c_{pN2T_{14}}$	měrná tepelná kapacita dusíku při teplotě T_{14} [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$c_{pN2T_{15}}$	měrná tepelná kapacita dusíku při teplotě T_{15} [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
$c_{pO2T_{14}}$	měrná tepelná kapacita vodíku při teplotě T_{14} [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{ps}	měrná tepelná kapacita směsi [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{pSOFC}	měrná tepelná kapacita plynů za SOFC [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{psp}	měrná tepelná kapacita spalín pro spalovací komoru [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{pspo}	měrná tepelná kapacita spalín za turbínou [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{pspT}	měrná tepelná kapacita spalín pro turbínu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
C_{RE60D}	střední denní spotřeba paliva systému RE60 [kg]
C_s	dráhová spotřeba energie [$kWh \cdot 100 km^{-1}$]
C_{sor}	dráhová spotřeba energie elektrobuse SOR EBN 11 [$kWh \cdot km^{-1}$]
$C_{sorstř}$	průměrná roční dráhová spotřeba energie elektrobuse SOR EBN 11 [$kWh \cdot km^{-1}$]

Seznam použitých zkratk a symbolů

c_v	měrná tepelná kapacita za stálého objemu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_{vspT}	měrná tepelná kapacita spalin pro turbínu za stálého objemu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_x	součinitel odporu vzduchu [-]
c_{xi3}	součinitel odporu vzduchu BMW i3 [-]
D_{bt}/l_{bt}	vnější průměr/délka rozměrů nádrže na vodu potřebnou pro reforming paliva [m]
D_{tl}/l_{tl}	vnější průměr/délka rozměrů tlakové lahve na palivo [m]
E_b	využitelná kapacita elektrické energie z akumulátoru [kWh]
$E_{Bsít}$	střední požadovaná energie dodaná z elektrické sítě pro denní provoz elektrobuse SOR EBN 11 [kWh]
E_{BSor}	kapacita akumulátorů elektrobuse SOR EBN 11 [kWh]
E_c	energie potřebná na ujetí dráhy s_{RE} [kWh]
e_{CNG}	emise CO ₂ produkované autobusem s motorem na CNG [$kg \cdot km^{-1}$]
E_{cp}	celková energie potřebná pro ujetí dráhy s_{cp} [kWh]
e_{diesel}	emise emise CO ₂ produkované autobusem s dieselovým motorem [$kg \cdot km^{-1}$]
E_{RE}	využitelná energie, dodaná z RE [kWh]
e_{RE60}	emise CO ₂ produkované elektrobusem se systémem RE60 [$kg \cdot km^{-1}$]
E_{RE60D}	střední požadovaná energie dodaná RE pro denní provoz elektrobuse SOR EBN 11 [kWh]
E_{REp}	energie dodaná RE během jízdy [kWh] po dráze s_{cp} tak, aby na konci této dráhy byla zbytková využitelná kapacita baterie na určité úrovni
E_{REsor}	požadovaná energie dodaná RE pro denní provoz elektrobuse SOR EBN 11 [kWh]
E_{Sor}	denní energetická potřeba pro provoz elektrobuse SOR EBN 11 [kWh]
E_{SorD}	střední denní energetická potřeba pro provoz elektrobuse SOR EBN 11 [kWh]
f	součinitel valivého odporu [-]

Seznam použitých zkratk a symbolů

g	gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
h	celková výška vozidla [m]
H_2	vodík
H_2O	voda
H_b	výhřevnost benzínu [$MJ \cdot l^{-1}$]
H_{CH_4}	výhřevnost paliva [$J \cdot kg^{-1}$]
h_{i3}	celková výška BMW i3 [m]
CH_4	metan
J	proudová hustota článku SOFC [$A \cdot m^{-2}$]
k_{cp}	koeficient využitelnosti kapacity baterie [-]
k_f	korekční koeficient valivého odporu vozidla [-]
k_{RE60}	korekční koeficient hmotnosti systému RE60 [-]
k_{sp}	koeficient navýšení spotřeby paliva oproti hodnotě udávané výrobcem [-]
l_v	měrné skupenské teplo varu vody [$kJ \cdot kg^{-1}$]
M	molární hmotnost látky [$g \cdot mol^{-1}$]
m	hmotnost vozidla [kg]
m_b	hmotnost baterií elektrického vozidla [kg]
$M_{cenaCNG}$	cena autobusu s motorem na CNG [Kč]
$M_{cenaDiesel}$	cena autobusu s dieselovým motorem [Kč]
$M_{cenaRE60}$	pořizovací cena elektrobusu se systémem RE60 [Kč]
m_{CO_2sp}	hmotnost oxidu uhličitého obsaženého ve spalínách [kg]
m_{dH_2O}	hmotnost vody potřebná pro reforming paliva na denní provoz RE60 [kg]
m_{dCH_4}	hmotnost paliva potřebná pro denní provoz RE60 [kg]
\dot{m}_g	hmotnostní tok plynů v systému GTU-003S [$kg \cdot s^{-1}$]

Seznam použitých zkratk a symbolů

m_{H_2Osofc}	hmotnost vody, vzniklé z reakce, na výstupu z SOFC [kg]
M_{CH_4}	molární hmotnost metanu [$g \cdot mol^{-1}$]
m_{CH_4}	hmotnost metanu vstupujícího do reakce [kg]
\dot{m}_{CH_4}	spotřeba paliva stacku SOFC [$kg \cdot s^{-1}$]
M_{CNG}	cena za palivo pro CNG autobus na ujetí jednoho km [$Kč \cdot km^{-1}$]
m_{CO_2sofc}	hmotnost oxidu uhličitého, vzniklého z reakce, na výstupu z SOFC [kg]
M_{diesel}	cena za palivo pro dieselový autobus na ujetí jednoho km [$Kč \cdot km^{-1}$]
M_{EB}	cena za energii pro elektrobuses na ujetí jednoho km [$Kč \cdot km^{-1}$]
M_{el}	cena za jednotku elektrické energie ze sítě [$Kč \cdot kWh^{-1}$]
M_{elRE60}	cena za jednotku elektrické energie vyrobenou RE60 využitelnou k pohonu elektrobusesu [$Kč \cdot kWh^{-1}$]
m_{em}	hmotnost elektromotoru [kg]
\dot{m}_{H_2Oref}	spotřeba vody pro reforming paliva stacku SOFC [$kg \cdot s^{-1}$]
m_{H_2Osp}	hmotnost vody obsažené ve spalínách [kg]
m_i	hmotnost i -té složky směsi [kg]
m_{i3}	provozní hmotnost BMW i3 [kg]
m_{iz}	hmotnost tepelně izolačního materiálu pro RE60 [kg]
m_{N_2}	hmotnost dusíku [kg]
M_{NM}	cena litru motorové nafty [$Kč \cdot l^{-1}$]
M_{O_2}	molární hmotnost kyslíku [$g \cdot mol^{-1}$]
m_{O_2}	hmotnost potřebného reakčního kyslíku [kg]
m_{PE}	ekvivalentní hmotnost výkonové a řídicí elektroniky RE60 [kg]
m_{pe}	hmotnost převodového ústrojí elektrického vozidla [kg]
m_{pH_2O}	ekvivalentní hmotnost nádrže na vodu pro reforming paliva RE60 [kg]
M_{pl}	cena za kilogram CNG [$Kč \cdot kg^{-1}$]
m_{pm}	hmotnost převodového ústrojí vozidla se spalovacím motorem [kg]

Seznam použitých zkratk a symbolů

M_{RE60}	cena za energii pro elektrobus se systémem RE60 na ujetí jednoho km [Kč · km ⁻¹]
m_{RE60}	celková hmotnost systému RE60 [kg]
m_s	hmotnost směsi [kg]
m_{sm}	hmotnost spalovacího motoru [kg]
m_{SOFC}	hmotnost stacku SOFC [kg]
\dot{m}_{sofc}	hmotnostní tok plynů za SOFC [kg]
$m_{SOFCRE60}$	hmotnost šedesáti stacků SOFC [kg]
M_{sp}	molární hmotnost spalín [kg · kmol ⁻¹]
m_{sp}	hmotnost spalín [kg]
\dot{m}_{sp}	hmotnostní tok spalín za spalovací komorou [kg · s ⁻¹]
m_{Tkv}	ekvivalentní hmotnost soustrojí kompresoru a turbíny s tepelným výměníkem [kg]
m_{tl52}	hmotnost zvolené tlakové lahve o hodnotě [kg]
m_{vzd}	hmotnost potřebného vzduchu [kg]
\dot{m}_{vzd}	spotřeba paliva stacku SOFC [kg · s ⁻¹]
$M_{živCNG}$	náklady na energii pro provoz během uvažované provozní životnosti autobusu s motorem na CNG [Kč]
$M_{živdiesel}$	náklady na energii pro provoz během uvažované provozní životnosti autobusu s dieselovým motorem [Kč]
$M_{živEB}$	náklady na energii pro provoz během uvažované provozní životnosti elektrobusu [Kč]
$M_{živRE60}$	náklady na energii pro provoz během uvažované provozní životnosti elektrobusu se systémem RE60 [Kč]
$M_{\Sigma CNG}$	celkové náklady na pořízení a palivo po dobu životnosti autobusu s motorem na CNG [Kč]
$M_{\Sigma diesel}$	celkové náklady na pořízení a palivo po dobu životnosti autobusu s dieselovým motorem [Kč]

Seznam použitých zkratk a symbolů

$M_{\Sigma EB}$	celkové náklady na pořízení a energii po dobu životnosti elektrobusu [Kč]
$M_{\Sigma RE60}$	celkové náklady na pořízení a palivo po dobu životnosti elektrobusu se systémem RE60 [Kč]
n	odpovídající látkové množství [mol]
N_2	dusík
$n_{70\%}$	látkové množství odpovídající reakci 70% [mol]
n_{RE}	potřebný počet stacků SOFC pro RE pro elektrobuse SOR EBN 11 [-]
n_{stack}	počet článků ve stacku SOFC zapojených do série [-]
n_{tl}	potřebný počet tlakových lahví pro denní provoz RE60 [-]
O_2	kyslík
O_f	valivý odpor vozidla [N]
O_{fk}	korigovaný valivý odpor vozidla [N]
O_v	odpor vzduchu [N]
p	hodnotící parametr [-]
p_1	atmosférický tlak [Pa]
p_3	provozní tlak SOFC [Pa]
p_5	vstupní tlak do turbíny [Pa]
p_6	výstupní tlak z turbíny [Pa]
p_{16}	hodnotící parametr pro podmínku denního provozu po dobu 16 h [-]
p_{300}	hodnotící parametr pro podmínku denního dojezdu o vzdálenosti 300 km [-]
P_{aux}	příkon všech přídatných spotřeb [W]
$P_{aux-10^\circ C}$	příkon všech přídatných spotřeb pro teplotu okolí -10 °C [W]
$P_{aux5^\circ C}$	příkon všech přídatných spotřeb pro teplotu okolí 5 °C [W]
$P_{aux20^\circ C}$	příkon všech přídatných spotřeb pro teplotu okolí 20 °C [W]
$P_{aux35^\circ C}$	příkon všech přídatných spotřeb pro teplotu okolí 35 °C [W]

Seznam použitých zkratk a symbolů

P_c	potřebný výkon pro pohon vozidla [W]
P_{el}	elektrický výkon stacku SOFC [W]
P_{elef}	využitelný výkon systému o jednom SOFC stacku pro provoz vozidla [W]
P_f	výkon valivého odporu [W]
P_{fk}	korigovaný výkon valivého odporu [W]
P_k	výkon kompresoru [W]
P_{k60}	výkon kompresoru systému RE60 [W]
P_{pSOFC}	tepelný výkon paliva využitého v SOFC [W]
P_{RE}	využitelný výkon dodaný z RE [kW]
P_{RE60}	využitelný výkon systému s šedesáti stacky SOFC pro provoz vozidla [W]
P_{RESOR}	potřebný výkon dodaný RE pro denní provoz elektrobusu SOR EBN 11 [kW]
P_{sp}	tepelný výkon spalování [W]
P_T	výkon turbíny [W]
P_{T60}	výkon turbíny systému RE60 [W]
P_{tH_2Oref}	tepelný výkon potřebný pro ohřev vody z teploty T_1 na teplotu T_3 [W]
P_{tCH_4}	tepelný výkon potřebný pro ohřev paliva z teploty T_1 na teplotu T_3 [W]
p_{tl}	tlak paliva v tlakové lahvi o hodnotě [Pa]
P_{to}	tepelný výkon odpadního tepla spalin za turbínou [W]
P_{tref}	tepelný výkon potřebný na reforming paliva stacku SOFC [W]
P_{tSOFC}	tepelný výkon SOFC, který neodchází s výstupními plyny [W]
P_{tv60}	tepelný výkon výměníků systému RE60 [W]
P_{tvGTU}	tepelný výkon výměníku systému GTU-003S [W]
P_{tvzd}	tepelný výkon potřebný pro ohřev vzduchu z teploty T_2 na teplotu T_3 [W]
P_{tzb}	zbytkový tepelný výkon systému [W]
P_{tzb60}	zbytkový tepelný výkon systému RE60 [W]

Seznam použitých zkratk a symbolů

P_v	výkon odporu vzduchu [W]
P_{vi3}	výkon odporu vzduchu u BMW i3 [W]
R	univerzální plynová konstanta [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]
r	hodnotící parametr [%]
RE	zařízení na prodloužení dojezdu elektricky poháněného vozidla (z anglického range extender)
RE60	zařízení pro prodloužení dojezdu elektrického vozidla s šedesáti stacky SOFC a mikroturbínou
r_p	podmíněný hodnotící parametr [%]
S_{cell}	plocha článku SOFC [m^2]
S_{cp}	zvolená podmínka dojezdu [km]
S_{el}	dojezd vozidla na čistě elektrický pohon [km]
S_{elaux}	dojezd vozidla na čistě elektrický pohon s přídatnou spotřebou [km]
SOFC	palivový článek s elektrolytem z tuhých oxidů (z anglického solid oxide fuel cell)
S_{RE}	dojezd vozidla s RE v nepřetržitém chodu [km]
S_{sor}	požadovaný denní kilometrový dojezd elektrobuse SOR EBN 11 [km]
S_x	přibližná čelní plocha vozidla [m^2]
$S_{živ}$	kilometrový průběh během provozní životnosti autobusu [km]
T	teplota, pro kterou se určuje molární měrná tepelná kapacita [K]
T_1	teplota nasávaného vzduchu kompresoru [K]
t_1	teplota nasávaného vzduchu kompresoru [$^{\circ}C$]
T_{12}	střední teplota mezi T_1 a T_2 [K]
T_{13}	střední teplota mezi T_1 a T_3 [K]
T_{14}	střední teplota mezi T_1 a T_4 [K]
T_{15}	střední teplota mezi T_1 a T_5 [K]
T_{1v}	střední teplota mezi T_1 a T_v [K]

Seznam použitých zkratk a symbolů

T_2	teplota stlačeného vzduchu [K]
T_{23}	střední teplota mezi T_2 a T_3 [K]
T_3	teplota na vstupu do SOFC [K]
T_4	provozní teplota SOFC [K]
T_5	teplota spalin za spalovací komorou [K]
T_{56}	střední teplota mezi T_5 a T_6 [K]
T_6	teplota spalin za turbínou [K]
T_{67}	střední teplota mezi T_6 a T_7 [K]
T_7	teplota na výstupu ze systému [K]
t_c	celková doba jízdy [h]
t_{cp}	doba jízdy po dráze s_{cp} [h]
t_i	tloušťka tepelně izolačního materiálu [m]
T_{io}	střední teplota spalin systému GTU-003S ve výměníku [K]
t_{RE}	potřebná doba chodu RE pro udržení plně nabitě baterie [h]
t_{REC}	doba nepřetržitého provozu RE po dráze s_{RE} [h]
t_{REp}	doba chodu RE během jízdy po dráze s_{cp} [h]
t_{SOFC}	provozní teplota SOFC [°C]
t_{SOFCin}	teplota na vstupu do SOFC [°C]
t_{sor}	doba trvání denního provozu elektrobuse SOR EBN 11 [h]
T_v	teplota varu vody [K]
T_{v3}	střední teplota mezi T_v a T_3 [K]
T_{vin}	teplota spalin systému GTU-003S vstupujících do výměníku [K]
T_{vout}	teplota spalin systému GTU-003S vystupujících z výměníku [K]
U_{cell}	napětí článku SOFC [V]
v	rychlost vozidla [$m \cdot s^{-1}$]
V_{dCH_4}	objem paliva potřebného pro denní provoz RE60 při tlaku p_1 a teplotě T_1 [m^3]

Seznam použitých zkratk a symbolů

V_{iz}	potřebný objem tepelně izolačního materiálu pro RE60 [m^3]
v_{NEDC}	rychlost vozidla odpovídající testovacímu cyklu NEDC [$m \cdot s^{-1}$]
v_p	provozní průměrná rychlost [$km \cdot h^{-1}$]
V_{tl}	objem paliva v stlačeného na tlak p_{tl} při teplotě T_1 [m^3]
V_{tl52}	objem zvolené tlakové lahve [m^3]
Δp_s	diferenční tlak na sání [Pa]
Δp_{SOFC}	diferenční tlak vstupu a výstupu SOFC [Pa]
Δp_v	diferenční tlak tepelného výměníku [Pa]
η_{elRE60}	elektrická účinnost systému RE 60 [%]
η_{EV}	účinnost elektrického pohonu [-]
η_G	účinnost elektrického generátoru na turbíně [-]
η_{CH}	účinnost nabíjení akumulátoru [-]
η_k	isentropická účinnost kompresoru [-]
η_{mech}	mechanická účinnost kompresoru a turbíny [-]
η_{mz}	celková účinnost zážehového motoru [-]
η_p	účinnost převodového ústrojí [-]
η_{PE}	účinnost výkonové elektroniky RE [-]
η_T	isentropická účinnost turbíny [-]
κ	Poissonova konstanta [-]
κ_l	Poissonova konstanta pro vzduch [-]
κ_T	Poissonova konstanta spalín pro turbínu [-]
λ	součinitele přebytku vzduchu [-]
ρ_{CH4}	hustota paliva při tlaku p_1 a teplotě T_1 [$kg \cdot m^{-3}$]
ρ_{iz}	hustota tepelně izolačního materiálu ITM-Fibermax [$kg \cdot m^{-3}$]
ρ_v	hustota vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$]