



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

NÍZKONAPĚŤOVÝ TRAKČNÍ POHON S PALIVOVÝM ČLÁNKEM

LOW-VOLTAGE TRACTION DRIVE WITH FUEL CELL

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Jan Hejkrlík

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO 2011

Abstrakt

Cílem práce je výzkum a vývoj elektromobilu s palivovými články jako primárními zdroji elektrické energie, které budou řízeny s ohledem na co nejvyšší dojezd a účinnost přeměny vodíku v elektřinu. První část práce je věnována koncepci pohonu jako celku, část druhá se věnuje řešení dynamiky vozidla. V části třetí je popsán návrh matematických modelů jednotlivých komponent pohonu a v části čtvrté jsou uvedeny výsledky simulací provozu na dané trati při různých způsobech řízení palivových článků a různých rychlostech vozidla.

Abstract

The main aim of this work is a development of an electric car. This car includes fuel cells as a primary source of electrical energy which will be performed with respect to the maximum action radius and to the maximum efficiency of hydrogen conversion into electricity. The first part is dedicated to the concept of whole drive, the second part is dedicated to vehicle dynamics. The third part describes mathematical models of drive components. Part four gives the results of traffic simulations using different ways of fuel cells managing at various vehicle speed.

Klíčová slova

Vodík, palivový článek, měnič, asynchronní motor, akumulátor, Li-Fe-Po, elektromobil

Keywords

Hydrogen, fuel cell, inverter, induction machine, accumulator, Li-Fe-Po, electric car

Bibliografická citace

HEJKRLÍK, J. *Nízkonapěťový trakční pohon s palivovým článkem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 107 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „NÍZKONAPĚŤOVÝ TRAKČNÍ POHON S PALIVOVÝM ČLÁNKEM“ zpracoval samostatně a použil jen prameny uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

V úvodu práce bych rád poděkoval Doc. Ing. Pavlu Vorlovi, Ph.D. za významnou odbornou pomoc při řešení této práce a dále děkuji Ing. Daliboru Červinkovi, Ph.D. za pomoc při realizaci zmiňovaných zařízení.

Obsah

1. Úvod	- 8 -
2. Současný stav	- 9 -
2.1 Historie automobilismu	- 9 -
2.2 Historie značky JAWA	- 10 -
2.3 Alternativní pohony	- 10 -
2.4 Alternativní paliva	- 11 -
2.4.1 Vodík - historie	- 13 -
2.4.1.1 Vodík	- 14 -
2.4.1.2 Výroba vodíku	- 14 -
2.4.1.3 Palivové články	- 16 -
2.4.1.4 Účinnost	- 18 -
2.4.1.5 Skladování	- 20 -
3. Cíle dizertační práce	- 22 -
4. Koncepce pohonu	- 23 -
4.1 Palivový článek	- 26 -
4.2 Stabilizační měnič	- 27 -
4.2.1 Návrh měniče	- 27 -
4.2.2 Konstrukce měniče	- 36 -
4.3 Trakční akumulátor	- 40 -
5. Dynamika	- 42 -
5.1 Obecné řešení akcelerace	- 42 -
5.2 Zohlednění momentové charakteristiky motoru	- 48 -
5.3 Ověření rovnic dle kapitol 5.1 a 5.2 simulacemi	- 52 -
6. Matematický model dynamiky vozu	- 56 -
6.1 Matematický model dynamiky SEM H_2	- 57 -
6.1.1 Matematický model dynamiky vozidla	- 57 -
6.2 Matematický model účinnosti pohonu	- 62 -
6.3 Matematický model zdroje energie	- 62 -
6.3.1 Matematický model palivového článku	- 64 -
6.3.1.1 Odezva palivového článku	- 65 -
6.3.2 Matematický model tlakové láhve	- 67 -
6.3.3 Matematický model trakčního akumulátoru	- 68 -
6.3.4 Matematický model pro výpočet střídavy	- 69 -
6.4 Matematický model kalkulátoru ceny provozu palivového článku	- 70 -
6.5 Matematický model řidiče	- 70 -
7. Simulace provozu vozidla	- 72 -
7.1 Matematický model trasy	- 72 -
7.2 Provoz vozidla na trakční akumulátor	- 73 -
7.3 Provoz palivových článků v oblasti maximální účinnosti	- 75 -
7.4 Provoz palivových článků v oblasti maximálního výkonu	- 79 -
7.5 Provoz palivových článků dle středního příkonu motoru	- 82 -
7.5.1 Průjezd trasy rychlostí 12,5m/s	- 83 -
7.5.2 Průjezd trasy rychlostí 10m/s	- 86 -

7.5.3 Průjezd trasy rychlostí 5m/s	- 89 -
7.5.4 Průjezd trasy různými rychlostmi	- 92 -
8. Závěr	- 96 -
9. Literatura	- 99 -
Přílohy	- 102 -
Seznam použitých symbolů	- 102 -
Seznam obrázků	- 103 -
Seznam tabulek	- 105 -
Seznam zkratk	- 105 -

1. Úvod

Za posledních 240 let došlo k nesmírnému vývoji v oblasti dopravy. Na počátku této epochy jsme měli parní stroj v rozličných podobách, palivem bylo uhlí a o ekologii provozu se nedalo hovořit, vlastně v této době pojem “ekologie” ještě neexistoval. Postupným vývojem jsme se dostali ke spalovacím motorům, jejichž palivem je převážně motorová nafta a benzín. Spalovací motory dnešní doby pracují s přímým vstřikem paliva do válce, s propracovanými systémy přeplňování a eliminace škodlivin ve výfukových plynech.

V průběhu celého vývoje automobilizmu zaznamenáváme pokusy s vozidly na elektřinu – elektromobily. O těchto pokusech se nejvíce mluvilo vždy v období ropných krizí, protože elektřina je logickou náhradou fosilních paliv. Ovšem největším problémem s elektřinou v oblasti dopravy je neposupnost takových akumulátorů, které by svojí energetickou kapacitou mohly konkurovat klasické nádrži na pohonné hmoty. Za poslední dvě desetiletí prošel vývoj akumulátorů takovými změnami, které činí otázku elektromobilizmu aktuální. Pomohl tomu také globální zájem o globální oteplování, které je prý zapříčiněno zvýšenými emisemi CO₂ [1], [2].

Ať jsou důvody jakékoli, je určitě správné zabývat se myšlenkami snižování ztrát, zvyšování výkonu a snižování zátěže životního prostředí. Obecně, pro lidstvo, je třeba žít ve vzestupné tendenci myšlení a vývoje. Kapkou do moře nápadů a technických řešení by měla být i tato práce, která se zabývá trakčním pohonem s akumulátorem a palivovými články. Výsledkem snažení měla být přestavba konvenčního pohonu vozu JAWA CHIC na elektropohon s výše zmíněnými zdroji elektrické energie.

2. Současný stav

2.1 *Historie automobilismu*

Naši předkové se poprvé zmocnili ohně někdy šerém dávnověku, řekněme, že se za tu dobu narodilo a umřelo dvacet tisíc generací lidí. Kdybychom tyto prapředky postavili do řady těsně za sebou, vznikl by asi desetikilometrový zástup. Až po několika statisíciletích, tedy asi po osmi kilometrech tohoto zástupu, teprve narazíme na onoho neandrtálce, který vynalezl umělé rozněcování ohně. A pak skoro po celém dalším stotisíciletí, tedy už jen asi sto metrů před koncem této fronty, jiný náš předchůdce začal ohněm tavit rudy. Na myšlenku, že by oheň mohl něčím pohybovat, přišel tento průvod až skoro úplně na samém konci, jen čtyři metry od nás. Tam někde teprve stojí Newcomen, Polzunov a Watt, lidé kteří vyvinuli a vylepšili parní stroj [1]. Pro nás všechny, co žijeme v roce 2011, je i parní stroj „kousek pravěku“. Od října 1829, kdy se George Stephenson zúčastnil závodu se svou lokomotivou Raketa, uplynulo spousta času a stihly se narodit a umřít další tři generace lidí. Za tuto dobu se v dopravě obecně staly dramatické změny. Na začátku byl parní stroj, dnes disponujeme vyspělými spalovacími motory, elektromobily prožívají renesanci a hlavně my lidé začínáme přemýšlet s úctou k přírodě. V rámci tohoto vývoje probíhalo i zrození automobilu. Nejvýznamnější etapa historie automobilů se začala psát koncem 18. století, kdy byly realizovány první úspěšné pokusy s vozidly poháněnými parním strojem. K jejich prvním konstruktérům patřili Skot James Watt a nebo Francouz Nicolas Joseph Cugnot. Jeho parní stroj uvezl v roce 1769 čtyři pasažéry a dokázal vyvinout rychlost až 9 km/h. Počátek 19. století byl stále doménou parních strojů, které se postupně zlepšovaly a zrychlovaly. To ovšem neměnilo nic na jejich provozní náročnosti a těžkopádnosti. Zvrat nastal ve druhé polovině 19. století, kdy se konstruktérům podařilo zprovoznit první spalovací motory. V letech 1862 až 1866 vyvinul Nicolaus Otto první čtyřdobý spalovací motor. Vlastní vývoj dnešních automobilů začal v roce 1885 v německém Mannheimu u Karla Benze, který si nechal patentovat svoji motorovou tříkolku. První dálkovou jízdu s automobilem podnikla Bertha Benzová 5. srpna 1888, a to cestu z Mannheimu do Pforzheimu. V roce 1887 začal zcela nezávisle na Karlu Benzovi stavět automobily také Gottlieb Daimler, který při výrobě motorů spolupracoval s Wilhelmem Maybachem. V roce 1897 pak Rakušan Rudolf Diesel sestrojil první provozuschopný vznětový motor. Prvním automobilem zkonstruovaným na území dnešní České republiky byl v roce 1897 Präsident (na počest prezidenta rakouského autoklubu) postavený v Kopřivnické továrně pro výrobu a prodej kolejových vozidel (Nesselsdorfer wagenbaufabriksgesellschaft – ve zkratce NW) [2]. V roce 1898 následoval první nákladní automobil. Koncem 19. století se rovněž objevily první elektromobily. Soutěž mezi automobily s parním, elektrickým a spalovacím motorem trvala téměř až do konce prvního desetiletí 20. století. Poté začaly dominovat automobily se spalovacím motorem, i když z hlediska efektivity přenosu energie je i po století vývoje výhodnější elektromobil. Ve dvacátém století se benzínem či naftou poháněné automobily staly nejvýznamnějším dopravním prostředkem. Revoluci ve výrobě a masové rozšíření automobilů odstartoval v USA Henry Ford tím, že vymyslel

a vyrobil lidově dostupný automobil. Slavný Ford T byl uveden na trh v roce 1908 a byl vyráběn až do roku 1927 [1], [2].

2.2 Historie značky JAWA

Historie značky JAWA se začíná psát roku 1929, kdy její majitel Ing. František Janeček zakoupil licenci od německé továrny, která vyráběla motocykly pod značkou Wanderer. Tato značka vznikla spojením slov Janeček a Wanderer. Úspěch na poli výroby motocyklů dovolil firmě zareagovat na stoupající zájem o malé automobily a roku 1934 byla zahájena výroba vozu podle zakoupené licence od DKW s označením JAWA 700. Vůz byl vybaven kapalinou chlazeným dvoudobým agregátem o výkonu 14,7kW. Firma zakoupila nejen licenci, ale i vybavení dílen, stroje a náhradní díly, čímž získala prostor pro vývoj svého vlastního automobilu JAWA Minor 1. Licenčně vyráběnou JAWU 700 v roce 1937 nahradil vůz vlastní konstrukce JAWA 600. Výrobu Minorů ukončila 2. světová válka, v továrně zůstalo rozpracováno 8 500 motocyklů a 706 automobilů, mezi nimi i vojenský prototyp s pohonem všech kol, jímž JAWA reagovala na bezprostřední ohrožení republiky. V průběhu 2. světové války byla firma využívána jako opravna německých vojenských vozidel. Probíhaly také pokusy s různými typy vozidel, jako poslední vyšel Minor 2. Poválečná výroba byla přesunuta do leteckých závodů, kde ještě vznikl prototyp Minoru 3 s moderní celokovovou karosérií, ale výroba byla v r. 1951 zastavena. Během studené války vzrostly požadavky na výrobu letadel natolik, že pro automobily už nezbyly výrobní kapacity. Na další sériový vůz s pohonem předních kol si musel československý průmysl počkat téměř 40 let.

Vůz JAWA CHIC má navázat na tuto tradici výroby automobilů, jedná se ovšem o zahraniční vozidlo u nás v republice prodávané pod značkou JAWA.

2.3 Alternativní pohony

Možností, jak nahradit spalování fosilních paliv v konvenční dopravě, je používat takové pohony, které potřebují jiné zdroje energie. Snad nejznámějším a nejperspektivnějším zástupcem alternativních pohonů je elektropohon. Na začátku rozvoje automobilismu konkurovaly elektromobily vozidlům poháněným spalovacím motorem. S vývojem spalovacích motorů se od elektropohonů postupně upouštělo, protože se spalovacími motory bylo možné dosáhnout větší objemové hustoty výkonu, tedy i větší rychlosti a dynamiky vozidla. Hlavními výhodami elektropohonů jsou snadné spouštění, tichý chod, jednoduchá konstrukce a ekologický provoz. První elektromobil, který jezdil po našem území, postavil v roce 1885 Ing. František Křižík, byl to dvoumístný vozík se stejnosměrným elektromotorem o výkonu 3kW. Počátkem 70-tých let minulého století bylo Výzkumným ústavem elektrických strojů (VÚES) v Brně a katedrou spalovacích motorů a motorových vozidel FS VUT v Brně vyvinuto několik funkčních vzorků elektromobilů EMA (elektrický městský automobil). V dnešní době existují koncepty elektromobilů jako je Tesla Roadster, Citroen C-Zero, atd [3].

Hlavní nevýhodou elektromobilů je nízký dojezd způsobený absencí akumulátorů schopných pojmout takové množství elektrické energie, které odpovídá množství energie plné palivové nádrže na fosilní paliva. Možností, jak prodloužit dojezd, je instalace „mobilní nabíječky“ trakčního akumulátoru například v podobě palivového článku. Tímto způsobem se přeneseme problém s hmotností i objemovou hustotou

energie z trakčního akumulátoru na „zdroj vodíku“, například v podobě tlakové láhve. V našem případě hmotnostní i objemová hustota energie tlakové láhve s vodíkem je vyšší než u trakčního akumulátoru.

Další možností je kombinace několika pohonů, tyto pohony pak nazýváme jako hybridní. Hybridní pohony můžeme rozdělit do třech základních podskupin – sériové, paralelní a smíšené uspořádání. Ve zkratce lze sériové uspořádání popsat jako spalovací motor na společném hřídeli s generátorem, který pracuje do např. stejnosměrného meziobvodu s akumulátorem, ze kterého je pak napájen motor-generátor. V paralelním uspořádání pracuje spalovací motor s motorem-generátorem do společné zátěže. Smíšené uspořádání pak kombinuje obě topologie. Je tedy jasné, že řízením toku energie můžeme provozovat hybridní pohon jako elektromobil, nebo jako vozidlo se spalovacím motorem. Lze také pohony kombinovat a dosáhnout tak krátkodobého navýšení momentu, při brzdění pak energii rekuperovat a snížit tak spotřebu pohonných hmot/zvýšit dojezd vozidla. Mezi nejznámější zástupce vozidel s hybridním pohonem patří Toyota Prius, ostatní automobilky představují také své koncepty, např. Citroen C4 E-Hdi (E-Hdi je zkratka pro mikrohybridní systém. Jedná se v podstatě o START-STOP systém, kdy vozidlo při stání samo vypíná spalovací motor. Před zastavením vozidla se rekuperací brzdné energie nabije kondenzátor, který je poté zdrojem energie pro nastartování).

Za alternativní pohon lze také považovat pohon na stlačený vzduch. Vozidla s tímto pohonem mají tlakovou nádobu se vzduchem pod vysokým tlakem (cca 300bar). Tento pohon má však zásadní nevýhodu v přípravě stlačeného vzduchu. Zhruba 95% energie spotřebované na výrobu, se v kompresorech přeměňuje v teplo. Užívání takového pohonu je absolutně neekonomické a má spíše jen pedagogický efekt.

Zajímavou možností je pohon vozidla pomocí setrvačníku. Setrvačník jako akumulátor byl použit pro pohon autobusu Oerlikon bez zdroje energie patřícího k zařízení vozidla. Roztáčení setrvačníku se provádělo elektromotorem napájeným ze sítě po dobu stání autobusu ve stanici. Existuje také studie supresportovního hybridu Porsche 918 RSR. Vozidlo je vybaveno osmiválcem o výkonu 563 koní a dvěma elektromotory o výkonu 204 koní. Energie vzniklá rekuperativním brzděním se neukládá do akumulátoru, ale do setrvačníku. Ten pracuje na otáčkách až 36000 ot./min.

Existují i záznamy o pokusech s nukleárním pohonem vozidel, které v období studené války prováděla firma WESTINGHOUSE.

2.4 Alternativní paliva

Existují dva důvody pro užívání alternativních paliv. Prvním důvodem je snížení škodlivin ve výfukových plynech a druhým fakt, že produkce ropy klesá, zatímco spotřeba stoupá. Ropa je také nazývána černým zlatem, toto slovní spojení asi nejlépe vystihuje její ekonomický význam.

Je třeba si uvědomit, že žádné přírodní zdroje nejsou bezedné a že k vyčerpání zdrojů musí jednou dojít. Otázkou je, kdy k vyčerpání dojde a zda na to budeme ekonomicky připraveni. Podle teorie PEAK-OIL jsme již za bodem zlomu produkce ropy a množství vytěžené ropy bude klesat. Tuto teorii, která byla dlouhou dobu zpochybňována, začínají světové velmoci jako např. Německo a Velká Británie brát velice vážně a podle níž máme zásoby ropy na několik dalších desetiletí při stávající úrovni těžby. Pokud se nepodaří nalézt další ložiska, lze očekávat ekonomický kolaps. Systematicky ale

nalezení nových ložisek problém s ropou nevyřeší, pouze se důsledky o několik desetiletí oddálí. Jde ovšem o to, jak tento čas využijeme. Tímto se otevírá prostor pro vývoj nových technologií a alternativních paliv.

V dnešní době používáme převážně jako palivo pro vozidla se spalovacím motorem benzín a motorovou naftu. Jako náhradu za obě tato paliva se považují zejména stlačený zemní plyn (CNG – compressed natural gas), zkapalněné ropné rafinérské plyny (LPG – liquefied petroleum gas), bioplyn, bionafta a paliva na základě metylesteru řepkového oleje, paliva s využitím alkoholů (ethanol a methanol) a vodík.

V současnosti je nejrozšířenějším alternativním palivem propan-butan (LPG). Propan-butan je směs uhlovodíků získaná jako vedlejší produkt rafinace ropy. Tento plyn je možné ochlazením nebo stlačením převést do kapalného stavu, ve kterém má malý objem. Přestavba zážehového motoru na pohon LPG je velice jednoduchá. Propan-butan však otázku paliva pro budoucí automobily neřeší. Verze s tímto pohonem někteří výrobci nabízejí, ale i tady je několik problémů, které brání širšímu rozvoji. Proti příznivé ceně paliva třeba mluví vyšší spotřeba, úbytek výkonu a zvýšení hmotnosti vozidla. Tedy jen v případě, kdy může být vozidlo poháněno jak benzínem, tak i plynovým palivem.

Perspektivním alternativním palivem, které se dá dobře využít v jenom lehce upraveném zážehovém motoru, je zemní plyn (CNG). Zemní plyn je ale také fosilním palivem, při jehož hoření se uvolňují škodliviny, byť v daleko menším množství.

Bioplyn se získává metanogenním kvašením organických látek. Nejčastěji jsou těmito látkami chlévská mrva, prasečí kejda nebo odpady v městských čistírnách (kalový plyn). Bioplyn je tvořen směsí plynů: 55-75% metan, 25-40% oxid uhličitý a 1-3% dalších plynů (vodík, dusík, sirovodík). Používá se ve většině případů pro pohon stabilních motorů využívaných pro výrobu elektrické energie s plným využitím odpadního tepla (kogenerační jednotky).

Od sedmdesátých let minulého století je zkoumána možnost využití řepkového oleje pro pohon vznětových motorů. Ukázalo se, že pohon na řepkový olej u běžných naftových motorů není možný. Bylo tedy nutno naftový motor pro pohon řepkovým olejem přestavět, nebo přepracovat řepkový olej na metylester (MEŘO). Olej je možné získat z více než 300 druhů různých rostlin, mezi něž patří např. řepka olejná, slunečnice, olivy, sója, kokosový ořech, aj. Olej se v nich ukládá v semenech nebo v plodech. Ikdyž mezi těmito oleji existují značné rozdíly ve viskozitě, všechny je možné použít ve vznětových motorech jako náhradu za naftu. O tom, že se Rudolf Diesel, konstruktér vznětového motoru, vážně zabýval rostlinnými oleji, svědčí i fakt, že už v roce 1900 představil na světové výstavě v Paříži motor, který běžel na olej z podzemnice olejné. V roce 1912 Diesel napsal, že „ačkoli je použití rostlinných olejů v současnosti bezvýznamné, v budoucnosti budou tyto oleje stejně důležité, jako je petrolej nebo uhlí“.

Bionafta první generace je vyrobena esterifikací různých olejů. Podle použitého oleje je označována následujícími zkratkami: RME – metylester řepkového oleje, SME – metylester slunečnicového oleje, SOME – metylester ze sóji, FAME – metylester z živočišných tuků, VUOME – metylester z použitých fritovacích olejů.

Bionafta druhé generace byla vyvinuta z RME. Jedná se o směsné palivo metylesteru s ropnými uhlovodíky.

Alkoholy nižších skupin mají obdobné vlastnosti jako paliva konvenční (ropná). Použití alkoholů jako paliva vyžaduje konstrukční úpravy stávajících motorů. Při použití alkoholových paliv je nutné používat aditiva zlepšující mazací vlastnosti. U alkoholů lze zvýšit kompresní poměr zážehových motorů díky vysoké antidetonační odolnosti. Při tvorbě směsi dochází k vnitřnímu ochlazování díky vysokému výparnému teplu a tím k výrazně lepšímu plnění válců. Výhřevnost alkoholů je sice nižší než u benzínu, ale spalování je rychlejší a dokonalejší. Z celosvětového hlediska jsou nejrozšířenější tzv. alkoholová paliva - ethanol a methanol, která se vyrábějí z obilí, kukuřice a cukrové třtiny. Jednou z výhod těchto biopaliv je, že při jejich spalování se tvoří méně škodlivin. Souvisí to s tím, že mají jednodušší strukturu než benzín nebo nafta, lépe hoří a celý proces vede k menší tvorbě nespálených zbytků. Z tohoto pohledu je methanol o něco lepším palivem než ethanol.

Zajímavým alternativním palivem, se kterým mají obzvláště ve Francii dobré zkušenosti, je emulze obsahující 85% motorové nafty, 13% vody a 2% dalších přísad – převážně emulgačních činidel, která zajišťují velmi malou velikost kapek rozptýlené vody. Emulgovaná nafta, kterou vyrábí společnost ELF, nese obchodní označení AQUAZOLE. Vozidla provozovaná na běžnou motorovou naftu mohou bez úprav spalovat i AQUAZOLE. Takový provoz vykazuje významná snížení emisních hodnot u tuhých částic (až o 80%) a oxidů dusíku (až o 30%) vzhledem k emisím vznikajících při spalování klasické motorové nafty. AQUAZOLE připravovaný z nafty s velmi malým obsahem síry je ve zkušebním provozu a umožňuje použití katalytických filtrů pevných částic [3].

Jistou možností náhrady benzínu pro spalovací motory je užití vodíku. Automobily jako např. BMW a PEUGEOT představily koncepty automobilů se spalovacími motory na vodík.

Hlediskem pro zjištění energetické výtěžnosti paliva je poměr energie získané z jedné objemové jednotky ku energii vynaložené za získání jedné objemové jednotky paliva. Obecně tento poměr, označovaný jako ERoEI (Energy Returned on Energy Invested), lze aplikovat na vše a díky němuž byla ropa dlouhou dobu levným palivem.

Je udáván poměr ERoEI z počátku těžby ropy do 50. let minulého o hodnotě 100, nyní 30. Toto je způsobeno vyšší energetickou náročností těžby. Pokud se tímto pohledem podíváme na výrobu elektrické energie, pak jsou čísla následující: vodní elektrárny 200, současně budované jaderné elektrárny 59, větrná energie v ČR 20, solární energie v ČR 18. Spodní hranicí tohoto poměru je hodnota 1.

2.4.1 Vodík - historie

První palivový článek (Fuel Cell - FC) sestrojil roku 1839 Sir William Grove a byl pokládán spíše za laboratorní kuriozitu (reverzní děj k elektrolýze). V polovině 20. století anglický vědec Francis Thomas Bacon sestrojil se svými spolupracovníky 5kWattový alkalický článek schopný pohánět svářecí stroj. Palivové články sloužily také v misi Apollo jako zdroj elektrické energie a pitné vody pro astronauty.

V současné době se provozují desítky stacionárních FC, které slouží jako záložní zdroj elektrické energie. Větší automobilky mají jeden nebo několik prototypů vozidel s palivovými články. Existují funkční prototypy FC pro mobilní zařízení jako jsou notebooky, kamery apod [24].

2.4.1.1 Vodík

Je třeba si uvědomit, že vodík není palivem v klasickém slova smyslu, ale energetickým nosičem, což ve výsledku znamená, že jej nelze levně těžit a užívat k produkci primární energie, ale naopak, že jej musíme pracně a s nenulovými ztrátami vyrábět. V konečném důsledku je tedy vodík tak ekologicky čistým palivem, jak ekologicky čistá je jeho výroba. O vodíku se nejčastěji mluví jako o palivu, které by v dopravě mohlo nahradit benzín a naftu a to hlavně z důvodu snížení emisí a závislosti na dodávkách ropy z nestabilních oblastí. Je třeba si uvědomit, že zdroje ropy nejsou bezedné (OIL – PEAK), takže nalezení alternativního paliva je systémově správné.

Vodík je nejhojnějším prvkem ve vesmíru a třetím nejhojnějším prvkem na Zemi a jako prvek je velmi reaktivní, proto se jeho atomy navzájem spojují a vytvářejí molekuly o dvou atomech. Oproti atomovému vodíku je molekulový vodík poměrně stabilní a díky vysoké energii vazeb také málo reaktivní. Abychom vodík mohli hodnotit jako palivo, je třeba jej srovnat s běžně využívanými fosilními palivy.

Palivo (20°C) druh/skupenství	Hustota [kg/m ³]	Měrný Objem [l/kg]	Měrný objem vzt. k benzínu	Výhřevnost [MJ/kg]	Hustota Energie [MJ/l]	Hustota energie vzt. k benzínu
Vodík 1 bar	0.084	11939	8354.7	119	0.01	0.0003
Vodík 250 bar	17	58.8	41.15	119	2.024	0.065
Vodík 350 bar	22.2	45.2	31.6	119	2.64	0.085
Vodík 700 bar	39	25.9	18.14	119	4.6	0.15
Vodík kapalný (-253 °C)	71.08	14.1	9.85	119	8.46	0.27
Propan kapalný	498	2	1.4	46.3	23.08	0.74
Benzín kapalný	700	1.43	1	44.5	31.15	1

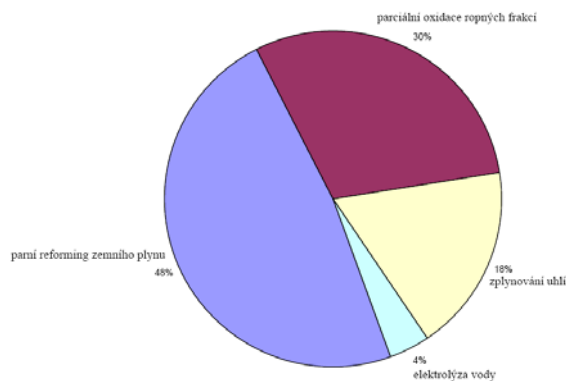
Tab. 2.4.1.1.1: Srovnávací tabulka chemicko-fyzikálních parametrů vodíku, propanu a benzínu¹

Z tabulky 2.4.1.1.1 je zřejmé, že vodík má největší výhřevnost ze všech uvažovaných paliv. Pro většinu aplikací je mnohem důležitějším parametrem objemová hustota energie, která vyjadřuje množství energie na daný objem paliva a je přímo úměrná výhřevnosti a hustotě paliva. Kapalný vodík má přibližně desetinou měrnou hustotu a přibližně čtvrtinovou objemovou hustotu energie ve srovnání s benzínem. Pokud uvažujeme o použití vodíku pro mobilní aplikace, je technologicky mnohem jednodušší použít stlačený vodík. Podle použitého tlaku (250, 350, popř. 700 bar) je objemová hustota energie dokonce dvanásobně (350 bar) až sedminásobně (700 bar) nižší oproti benzínu [24].

2.4.1.2 Výroba vodíku

Vodík je vyráběn mnoha způsoby, v současné době dominuje výroba z fosilních paliv. Procentuálně lze rozdělit výrobu vodíku takto: 48% parní reforming zemního plynu, 30% parciální oxidace ropných frakcí, 18% zplynování uhlí, 4% elektrolýza vody.

¹ Tabulka převzata z: www.hytep.cz



Obr.2.4.1.2.1: Výroba vodíku

Využívání takto vyrobeného vodíku nemá ekologický efekt, vede pouze k méně hospodárnému využívání primární energie a s tím souvisejícímu nárůstu produkce oxidu uhličitého. Jednou z možností je výroba vodíku z obnovitelných zdrojů, z nichž se vodík získává pomocí elektrolýzy vody, vysokoteplotního rozkladu vody anebo zplyňováním či pyrolýzou biomasy. Pro výrobu vodíku přímo z vody se jeví vhodné také některé vyvíjené jaderné reaktory čtvrté generace, kde vysoká teplota chladiva na výstupu z reaktoru je postačující pro některé perspektivní chemické cykly i vysokoteplotní elektrolýzu. Hlavním důvodem rozvoje vodíkového hospodářství je nalezení alternativy k využívání fosilních paliv a to především v dopravním sektoru. Výroba vodíku pro tyto účely z fosilních paliv by proto byla z výše uvedených důvodů neobhajitelná.

Stručný přehled výrobních technologií vodíku:

- 1) *Parní reforming zemního plynu* - tato technologie je v současnosti nejlevnějším a nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku. Teplo pro reformní reakci i následnou konverzi oxidu uhelnatého je dodáváno z přímého spalování části zemního plynu. Účinnost produkce vodíku je závislá na poměru páry a uhlíku ve směsi a pohybuje se okolo 80 %. Značnou nevýhodou je produkce vysokého množství oxidu uhličitého - na 1 kg vodíku se vyprodukuje 7,05 kg CO₂.
- 2) *Elektrolýza* - konvenční elektrolýza je výhodná zejména tam, kde je levná elektřina a dostatek vody (Island). Elektrolytické zařízení je modulární, může být navrženo jako velká centrální jednotka či jako malé zařízení pro lokální použití se stejnou účinností. Výhodou elektrolýzy je možnost použití různých zdrojů vstupní energie a vysoká čistota elektrolytického vodíku. Nevýhodou jsou vysoké náklady na membránu v elektrolyzátoru a vysoké ceny el. energie. Celková účinnost elektrolýzy se pohybuje přibližně v rozmezí 25 - 35 %.
- 3) *Vysokoteplotní elektrolýza (parní elektrolýza)* - při vysokoteplotní elektrolýze se část energie dodává ve formě elektrické energie a část energie je přivedena ve formě tepla. Do elektrolyzátoru vstupuje pára a vodík, z něho pak vystupuje obohacená směs obsahující 75 % hmotnostních vodíku a 25 % hmotnostních páry, ze které je na anodě oddělen iont kyslíku, který prochází skrze membránu, vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce. Výhodou je zvýšení účinnosti procesu díky snížené spotřebě elektrické energie a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Při růstu teploty vstupní páry klesá spotřeba elektrické energie, celková energie mírně roste, což je způsobeno právě nutným ohřevem páry. Výhodou je cirkulace samotných H₂O,

H₂ a O₂ bez jiných chemických látek, což odstraňuje problémy s korozí. Celková účinnost vysokoteplotní elektrolýzy může dosahovat až 45 %.

4) *Termochemické cykly* - při termochemickém štěpení vody je voda rozdělena na kyslík a vodík pomocí série chemických reakcí, které jsou iniciované teplem.

5) *Hybridní termochemické cykly* - hybridní termochemický proces kombinuje termochemický cyklus a elektrolytické štěpení vody.

6) *Výroba vodíku z biomasy* - přeměna biomasy na vodík je jedna z nejúčinnějších možností jejího energetického využití.

Parní reformování biomasy - parní reformování biomasy sestává ze dvou základních kroků. Prvním z nich je pyrolýza, při které vznikají z biomasy převážně plynné produkty (methan, vodík, oxid uhelnatý). Poté následuje druhá fáze, ve které jsou zbylé organické pevné látky a methan převedeny pomocí vodní páry na oxid uhelnatý a vodík. Substráty zpracovatelné touto metodou tvoří široké spektrum od pevného komunálního odpadu, přes odpady z potravinářského průmyslu, oleje, cíleně pěstovanou nebo odpadní zemědělskou biomasu, až po paliva fosilního původu např. uhlí.

Vodík z derivátů biomasy - zajímavou alternativou k přímé výrobě vodíku z biomasy je využití jejích derivátů. Ty jsou nejčastěji získávány biotechnologickými procesy a jedná se zejména o bioethanol a bioplyn. Tato metoda je zajímavá zejména z důvodu obtížné skladovatelnosti a distribuce vodíku v mobilních aplikacích. Jedná se o tzv. on-board reforming, kde je vodík ze zásobní látky vyráběn až přímo ve vozidle.

Katalytické parní reformování bioplynu - během procesu parního reformování reaguje plyn obsahující methan s vodní parou při teplotě 500-950°C za přítomnosti katalyzátoru, obvykle niklu.

Katalytické parní reformování bioethanolu

Dekarbonizace uhlovodíků pomocí slunečního záření

Biotechnologická produkce vodíku

Vodíková fermentace

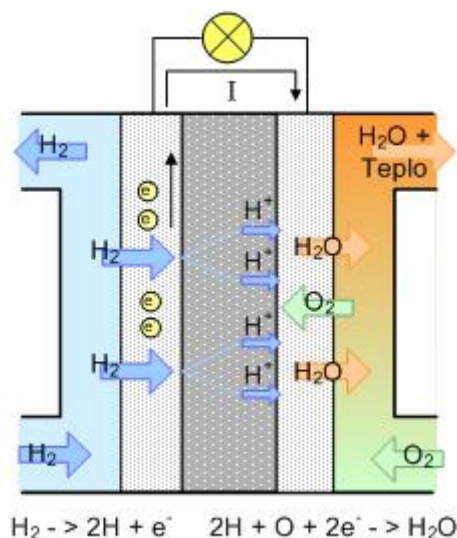
Fotofermentace - fotofermentace je proces při kterém jsou organické látky, například acetát bakteriemi přeměňovány na vodík a CO₂ za využití světla. Jednou ze skupin mikroorganismů schopných fotofermentace jsou purpurové bakterie [24].

V oblasti produkce vodíku z biomasy je studováno rozmanité spektrum technologií. Jejich hlavní výhodou je kromě obnovitelnosti primárního zdroje také využití biologických odpadů, které dnes běžně bez užitku končí na skládkách a tak zbytečně zatěžují životní prostředí. Ačkoli samotný vodík z biomasy nebude zřejmě schopen pokrýt budoucí potřeby, je vysoce pravděpodobné, že i tyto technologie pro jeho výrobu naleznou uplatnění.

2.4.1.3 Palivové články

Palivový článek pomocí elektrochemické reakce přeměňuje chemickou energii kontinuálně přiváděného paliva a oxidačního činidla na energii elektrickou. Účinnost přeměny v těchto zařízeních je vyšší, až 50%, oproti soustrojím s tepelným strojem, protože neobsahuje mechanický mezistupeň. Palivové články použité v našem projektu jsou palivové články s tenkou polymerní membránou, která od sebe odděluje elektrody,

na jejichž povrchu je slabá vrstva uhlíku obsahující malé množství platiny – katalyzátoru. Vodík se přivádí na anodu, kde na vrstvě katalyzátoru dochází k jeho rozkladu na kladné ionty (protony) a elektrony. Protony procházejí skrze polymerní vrstvu a elektrony jsou nuceny procházet externím okruhem, kde konají elektrickou práci. Na katodě pak sloučením dvou protonů, dvou elektronů a atomu kyslíku vzniká voda, která ze systému odchází ve formě páry. Na katodu je přiváděn kyslík jako součást vzduchu.



Obr. 2.4.1.3.1: Schématické znázornění palivového článku²

Typy palivových článků

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Zde jako elektrolyt slouží iontoměničová polymerní membrána - většinou na bázi kyselých flourovaných polymerů, která je protonovým vodičem. Pro efektivní provoz je klíčovou podmínkou tzv. vodní režim; podmínky musí být nastaveny tak, aby se produkt - voda - neodpařovala rychleji než je produkována. Vysoký stupeň hydratace membrány je podmínkou pro dobrou protonovou vodivost.

Alkaline Fuel Cell (AFC)

Elektrolytem je KOH umístěný v porézním materiálu (azbest). Výhodou tohoto typu je užití levnějších katalyzátorů (Ni, Ag, vzácné kovy). Nevýhodou je náchylnost na čistotu paliva a oxidačního činidla (i malé množství CO₂ způsobuje znehodnocování elektrolytu).

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

Elektrolytem je kyselina fosforečná (H₃PO₄) umístěná v SiC.

² Obrázek převzat z: www.hytep.cz

Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

Elektrolytem je směs alkalických uhličitů, které jsou zadržovány v matrixu LiAlO_2 .

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

U tohoto typu je elektrolyt je pevný neporézní kovový oxid (Y_2O_3 stabilizovaný ZrO_2).

Palivové články jsou technologicky vyspělá a bezpečná zařízení, jejichž komerčnímu rozšíření brání vysoká cena daná převážně kusovou výrobou a cenou použitých materiálů. Životnost námi užitých článků je minimálně 1500 provozních hodin [24].

2.4.1.4 Účinnost

Účinnost řetězce přeměny chemické energie paliva až po kola vozidla popisuje tzv. Well to Wheel analýza (WtW). Takto vyjádřená účinnost pohonu respektuje celý výrobní proces paliva včetně těžby, zpracování a distribuce, následně pak i celkovou účinnost vozidla zahrnující ztráty v motoru, převodovém zařízení a všech ostatních systémech nezbytných pro provoz vozidla. Bývá také vyjádřena jako součin dílčích účinností, jejichž dělicím prvkem je nádrž, popř. jiný energetický koncentrátor energie. Ztráty ve výrobě a distribuci paliva popisuje Well to Tank analýza (WtT), ztráty ve vozidle pak popisuje Tank to Wheel analýza (TtW).

Produkt/účinnost	Těžba	Výroba	Logistika	Komprese/Nabíjení	Celkem
	%	%	%	%	%
Ropná paliva	88		95	-	84
Vodík elektrolyza	25-30		95	70	17-20
Vodík reforming	90	80	95	70	43
Vodík termochemické procesy	-	55-60	95	70	30-33
Elektrická energie (akumulátory)	-	30-35	90	90	27-31

Tab. 2.4.1.4.1: Účinnosti při výrobě energií³

Z tabulky 2.4.1.4.1 je patrné, že jak výroba elektrické energie, tak výroba vodíku je zatížena nemalými ztrátami energie. Cena za množství paliva o stejném energetickém obsahu do určité míry vždy odráží energetickou náročnost procesu jeho výroby.

Palivový článek

Účinnost palivového článku je závislá na proudovém zatížení elektrod a s rostoucím proudovým zatížením klesá. Při velmi vysokých zatíženích se účinnost dále snižuje v závislosti na technickém řešení (např. o spotřebu vzduchového kompresoru). Účinnost je dána těmito druhy ztrát: *aktivační ztráty* - způsobeny pomalou kinetikou reakce na povrchu elektrod; *přechod paliva, vnitřní proudy* - způsobena nedokonalostí elektrolytu, dochází k průniku paliva z anody ke katodě a průchodem elektronů přes membránu; *ohmické ztráty* - pokles napětí je způsoben el. odporem elektrolytu, elektrod a elektrických propojení; *koncentrační ztráty* - způsobeny snížením koncentrace reaktantů v důsledku nedokonalého přenosu hmoty. K dalším ztrátám v palivovém článku dochází vlivem spojování jednotlivých cel do větších celků (zvyšuje se hydrodynamický odpor toku paliva), vlivem nečistot v palivu (odfuk malé části paliva vně článku) a nutností přetlakování při vyšším proudovém zatížení. Uvažováním všech

³ Tabulka převzata z www.hytep.cz

výše uvedených ztrát se dostáváme se do reálné oblasti účinnosti palivových článků v rozsahu od 35 % do přibližně 45 % dle konkrétní realizace a zatížení. Instalovaný výkon palivového článku ve vozidle obvykle vychází z kompromisu mezi vysokou účinností (tato varianta vede k vyššímu instalovanému výkonu) a velikostí článku. Moderní vozidla s pohonem na bázi palivového článku bývají navíc vybavena sekundárním zdrojem elektrické energie (baterie).

Akumulátor

Akumulátory jsou z hlediska účinnosti skladování energie velmi kvalitním koncentrátorem energie. Při procesu nabíjení dochází přibližně k 10 % ztrátám a podobně je tomu i při vybíjení.

Elektrický motor

Nejčastěji používanými motory pro účely elektrické trakce jsou synchronní motory s permanentními magnety a asynchronní motory. Účinnost těchto motorů je vysoká, typicky se pohybuje nad 90 %.

Spalovací motor

Účinnost spalovacího motoru je závislá na konstrukci motoru, ale především na podmínkách provozu (okolní podmínky, otáčky, přeplňování). Účinnost celého pohonného systému je pak dále zatížena účinností převodu mechanické práce motoru na kola vozidla a pohonem pomocných zařízení (např. generátor elektrické energie). Bez podrobnějšího přiblížení budeme uvažovat průměrnou účinnost pohonu se spalovacím motorem cca 25 - 30 % (motor, převodovka, pomocné systémy, atd.).

V předchozích odstavcích již máme uvedeny všechny reprezentativní hodnoty pro závěrečnou zjednodušenou TtW a WtW analýzu viz. tab. 2.4.1.4.2 a tab. 2.4.1.4.3.

Typ pohonu	Zdroj energie	Měnič/Převodovka	Motor	Celkem
	%	%	%	%
FC	40-50	90	92	33-41
Bateriový	81	90	92	70
Spalovací motor	-	90	22-28	20-25

Tab. 2.4.1.4.2: TtW přehled⁴

Budeme-li posuzovat pouze účinnost koncových zařízení (tab. 2.4.1.4.2), nejúčinnějším zařízením bude elektromobil napájený z baterií. Z výsledků WtW analýzy (tab. 2.4.1.4.3) plyne, že elektromobil napájený z baterií je jediným konkurenceschopným konceptem k vozidlům se spalovacím motorem. Zásadní nevýhodou elektromobilů napájených z akumulátorů je nízká dojezdnost. Existuje ale koncept „čerpací stanice“, kde se zcela automaticky provádí výměna vybitého trakčního akumulátoru za nabitý, doba tankování u těchto automatických systémů trvá necelou minutu i s bezhotovostní platbou. Takovéto čerpací stanice jsou jedním z předpokladů náhrady fosilních paliv v osobní dopravě [24].

⁴ Tabulka převzata z www.hytep.cz

Varianta palivo/koncept	WtT	TtW	WtW
	%	%	%
Vodík elektrolýza/FC	17-20	33-41	6-8
Vodík reforming/FC	43		14-18
Vodík termo. pr./FC	30-33		10-14
Vodík elektrolýza/spal. motor	17-20	20-25	3-5
Vodík reforming/spal. motor	43		9-11
Vodík termo. pr./spal. motor	30-33		6-8
El. Energie/bateriový	27-31	66	18-20
Fosilní paliva/spal. motor	84	20-25	18-21

Tab. 2.4.1.4.3: WtW přehled⁵

2.4.1.5 Skladování

Pro využívání vodíkových technologií a palivových článků v budoucnosti je klíčovou záležitostí vývoj bezpečného, cenově dostupného a energeticky efektivního způsobu uskladnění. Vodík má ze všech paliv nejmenší hustotu a nejnižší bod varu, což značně komplikuje jeho skladování. Technologie pro skladování vodíku lze obecně rozdělit na konvenční a alternativní. Konvenční technologií jsou tlakové nádoby pro plyný a kryogenní nádoby pro zkapalněný vodík. Alternativní technologií je např. skladování vodíku v metalydridech, komplexních hydridech, v nanostrukturách uhlíku a jako součást chemických látek.

Skladování vodíku v plynné fázi:

Pro statické aplikace se nejvíce používají ocelové bezešvé láhve z nízkouhlíkaté nebo legované oceli, v mobilních aplikacích pak kompozitní tlakové nádoby, jejich vnitřní povrch tvoří obvykle tenká vrstva kovu případně speciálního polymeru, která zabraňuje úniku plynu přes strukturu kompozitu. Typickým provozním tlakem je 350 bar, v nejnovějších aplikacích potom 450 až 700 bar.

Skladování vodíku v kapalně fázi:

Kapalný vodík je skladován při teplotě -253 °C, s tím souvisejí zvýšené nároky na použité materiály a vysoké energetické nároky na zkapalnění. Pro uskladnění se používají vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s maximálním přetlakem 5 barů, musejí být vybaveny přetlakovým mechanismem, kterým je regulován maximální přípustný přetlak. Při skladování vodíku v kryogenních nádobách dochází vlivem přestupu tepla z okolí k postupnému odpařování a zvyšování tlaku uvnitř nádoby. Aby nedošlo k destrukci nádrže, je přebytečný tlak je regulován odpouštěním odpařeného vodíku.

Hydridy

Metalhydridy

Principy skladování vodíku v hydridech jsou založeny na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů, při této reakci je vyvíjeno teplo. Uvolňování vodíku z materiálů je naopak dosaženo dodáním tepla.

⁵ Tabulka převzata z: www.hytep.cz

Alanáty

Alanáty jsou sloučeniny na bázi hliníku.

Borohydridy

Borohydridy jsou komplexní sloučeniny vodíku, ve kterých se společně s borem vyskytují kovy, případně prvky alkalických zemin.

Uhlíkové nanotrubic

Základním stavebním prvkem nanotrubic je grafit, který je formou uhlíku s atomy tvořícími šestiúhelníkovou krystalovou mříž. Nanotrubic jsou tvořeny jednou příp. několika vrstvami stočenými do trubice konečné délky, zakončené polovinou fullerenu (fulleren - sférická molekula složená z navzájem chemickou vazbou spojených atomů uhlíku). Průměr trubic se pohybuje od 0,7 - 3 nm.

Skleněné mikrokuličky

Skleněné mikrokuličky jsou duté kuličky z křemitého skla, polyamidu, atd. Typické rozměry jsou 25 - 200 μm při tloušťce stěny 0,5 - 20 μm . Mohou být plněny plynným vodíkem až do přetlaku 100 MPa. Plnění probíhá mechanismem difúze molekul vodíku skrze stěnu při zvýšené teplotě (200 °C) a vysokém tlaku. Uvolňování vodíku je dosaženo opětovným zvýšením teploty. Skleněné mikrokuličky naplněné vodíkem je možné čerpat do nádrže podobně jako tekutinu. Prázdné mikrokuličky mohou být poté opět odčerpány a znovu plněny [24].

3. Cíle dizertační práce

Tématem této dizertační práce je návrh, realizace a ověření parametrů napájecího bloku malého elektromobilu, který sestává ze sériové dvojice palivových článků, stabilizačního měniče a trakčního akumulátoru. Palivové články zde slouží jako primární zdroj elektrické energie, trakční akumulátor pak k vykrývání proudových špiček při rozjezdu a k pohlcování vyrekuperované energie.

Cíle práce lze definovat následovně:

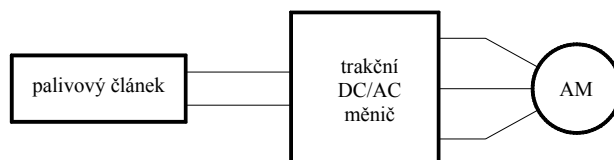
1. Nalezení nejvhodnější topologie napájecího bloku
2. Návrh a realizace stabilizačního měniče a ochranných obvodů trakčního akumulátoru
3. Vytvoření matematického modelu celého automobilu včetně vodíkové soustavy
4. Návrh a simulace způsobu řízení stabilizačního měniče s ohledem na:
 - dojezd
 - co nejvyšší účinnost přeměny vodíku na elektrickou energii
 - co nejnižší náklady na ujetý kilometr
5. Experimentální ověření výsledků simulací na vozidle JAWA CHIC

4. Koncepce pohonu

Cílem projektu je návrh a vývoj vodíkového elektropohonu do vozidla JAWA CHIC. Továrně je do tohoto auta instalován diesellový agregát o výkonu 4kW, přenos výkonu do kol je řízen variátorem (s klínovým řemenem), převodovkou (dopředu – neutrál – vzad) a diferenciálem. Vozidlo je koncepčně navrženo tak, aby jej mohli užívat řidiči od 15let (dvoumístné, maximální rychlost 50km/h). Pro naše účely vozidlo vyhovuje svou velikostí (délka 2,78 m, šířka 1,46m, výška 1,512 m) a hmotností (celková hmotnost 500kg). Mechanická koncepce pohonu bude spočívat v náhradě spalovacího motoru a variátoru asynchronním elektromotorem. Elektrická koncepce má několik variant řešení, které si blíže rozebereme.

Elektromobily lze rozdělit do dvou skupin. Na elektromobily se závislou a nezávislou trakcí. Elektromobily se závislou trakcí jsou vybaveny elektromotorem a sběracím ústrojím, které do vozidla přivádí elektřinu. Výhodou je možnost napájení ze sítě (prakticky neomezený dojezd a výkon vozidla), nevýhodou je pak nutnost jezdit po elektrifikované trase. Je tedy z principu předurčen k přepravě větších hmotností na předurčených trasách. Tohoto uspořádání se hojně využívá u kolejových vozidel (městská hromadná doprava, železniční doprava), u silničních vozidel snad jen v městské hromadné dopravě. Elektromobily s nezávislou trakcí jsou vybaveny zdrojem elektrické energie. Jako zdroje může být užito akumulátorové baterie, palivových článků, solárních článků atp. Hlavní nevýhodou je omezený dojezd daný kapacitou zdroje energie (podobně u vozidel se spalovacím motorem objemem palivové nádrže). Výhodou je pak nezávislost na trase. U obou druhů elektromobilů můžeme z principu využívat možnosti rekuperativního brzdění. U vozidel s konvenčním pohonem při akceleraci odebíráme energii z „nádrže“ a při deceleraci ji zbůhdarma marníme v teplo v mechanických brzdách – přenos energie není reciproký. Elektromechanický přenos energie už z principu reciproký je. Je tedy dobré zařadit do topologie elektropohonu akumulátor energie (akumulátorovou baterii, ultrakapacitor, setrvačnick). Samotný akumulátor ovšem i v dnešní době neřeší otázku dojezdu vozidla. Je dobré jej kombinovat s jinými zdroji, jistou možností je použití palivových článků.

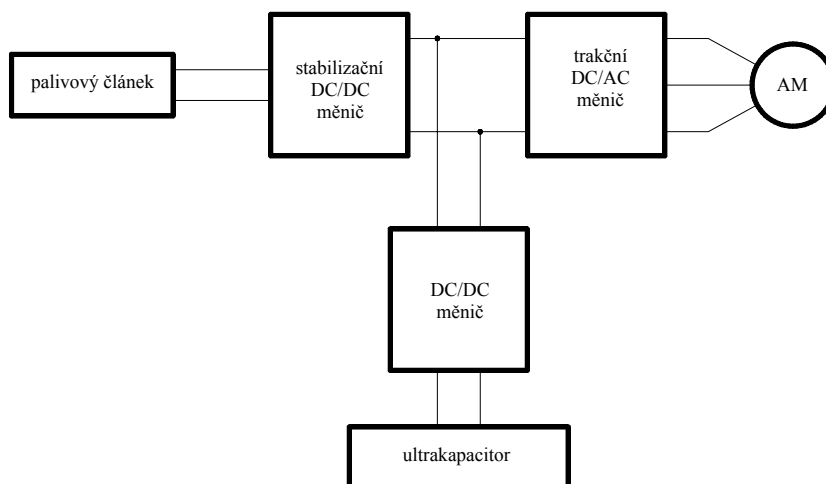
Cílem tohoto projektu je návrh a vývoj vodíkového elektropohonu.



Obr. 4.1: Topologie pohonu s palivovým článkem

Budeme-li napájet trakční měnič přímo z palivového článku, dostaneme nejlevnější možné řešení s palivovým článkem za cenu výrazně horších jízdních parametrů oproti

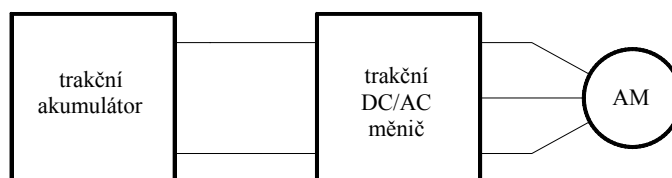
konvenčnímu továrnímu provedení. Článek sám o sobě musí reagovat na změnu zátěže zvýšením průtoku vzduchu pro chemickou reakci, protože při rozjezdu a akceleraci je třeba dodat krátký nárazový výkon, který by palivový článek musel být schopen dodat. V těchto ohledech by pro naše vozidlo musel být instalován výkonnější, rozměrově větší, těžší a samozřejmě také dražší článek. Navíc při deceleraci by se vyrekuperovaná energie musela vytopit v odpornících. Jistou možností je do topologie zařadit ultrakapacitor. Před rozjezdem bychom však museli kondenzátor nabít, v průběhu jízdy jej plně vybit, aby byl připraven na rekuperativní brzdění. Během rozjezdu by se palivový článek doreguloval na potřebný výkon.



Obr. 4.2: Topologie pohonu s palivovým článkem a ultrakapacitorem

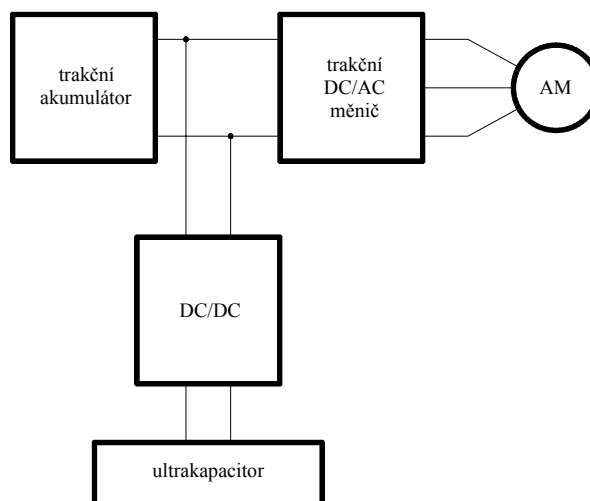
Výhodou této koncepce je výrazně lepší akcelerace vozidla, nevýhodou nutnost ultrakapacitor nabít před rozjezdem. Vše může ovšem probíhat zcela automaticky. Hlavní nevýhodou je drahý ultrakapacitor a nutnost dalšího měniče pro maximální využití jeho možností.

Logickou a snad i nejlevnější možností je užití pouze trakčního akumulátoru dobíjeného ze sítě. Akumulátor je možno krátkodobě přetěžovat při akceleraci, při deceleraci do něj ukládat rekuperovanou energii. Nevýhodou jsou pak úbytky na vnitřním odporu akumulátoru v důsledku čehož se snižuje účinnost. Tuto nevýhodu lze částečně eliminovat výběrem vhodné chemie akumulátorů. Tato možnost ovšem neodpovídá zadání, je zde uvedena jako příklad.



Obr. 4.3: Topologie pohonu s trakčním akumulátorem

Abychom se vyhnuli úbytkům na vnitřním odporu akumulátoru, můžeme předchozí topologii doplnit ultrakapacitorem.

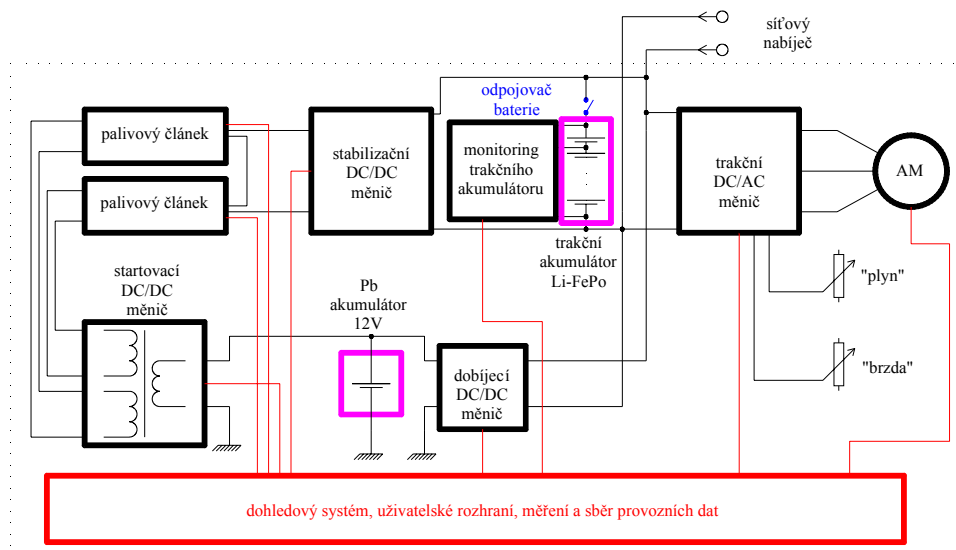


Obr. 4.4: Topologie pohonu s trakčním akumulátorem a ultrakapacitorem

Výsledná, námi použitá koncepce pohonu (obr. 4.5) spočívá v užití palivových článků a trakčního akumulátoru. Palivové články jsou použity dva v sérii (celkem 2,4kW) a je jimi pomocí stabilizačního měniče dobíjen trakční akumulátor. Pohon vozidla je navržen na 8kW výkonu, který je akumulátor krátkodobě schopen dodat. Dle odběru energie je trakční akumulátor odlehčován a průběžně dobíjen jak palivovými články tak rekuperativním brzděním. Je zde také možnost volby režimu provozu. Vozidlo můžeme provozovat jako ryzí elektromobil (provoz pouze na trakční akumulátor – jízda po krátké definované trase, kde víme, že na množství energie v akumulátoru dojedeme, popřípadě dobíjení ze sítě, režim vhodný pro provoz ve městě, (nákupy, atd.)). Další možností je užití palivových článků jako „mobilní nabíječky“ (palivové články pracují pouze v případě, kdy dojde k vybití trakčního akumulátoru). Třetí možností je dobíjení trakčního akumulátoru během jízdy, kde se kombinují různé spouštěcí hladiny energie v akumulátoru s režimem provozu palivových článků v oblasti maximální účinnosti a maximálního výkonu. Tyto různé mechanismy řešíme pomocí simulací viz. kap.7.

Použité akumulátory jsou chemie Li-FePo s velmi nízkým vnitřním odporem, akumulátor je schopen dobře pojímat energii z rekuperativního brzdění a dobře energii vydávat pro akceleraci. Samotný akumulátor je schopen pojmout energii cca 3,4MJ. Pomocí tlakové láhve o vodním objemu 20l a dvojice palivových článků jsme schopni vyrobit 19MJ energie v režimu maximální účinnosti a 15MJ energie v režimu maximálního výkonu. Každopádně je to skoro 4,5 násobek energie oproti energetické kapacitě akumulátoru.

Ve vozidle byl nahrazen konvenční pohon se spalovacím motorem pohonem s motorem asynchronním. V důsledku této úpravy jsme přišli o možnost dobíjení provozního Pb akumulátoru. Akumulátor je tedy dobíjen z trakčního akumulátoru a je zde také zamezeno zpětnému toku energie z provozního akumulátoru do akumulátoru trakčního. Provozní akumulátor je zapotřebí pro napájení spotřebičů ve vozidle (světlomety, směrová světla, brzdová a obrysová světla, ventilátor topení, atd.) a pro startování palivových článků. V praxi může nastat situace, kdy dojde k vybití akumulátoru (například špatně zvolený režim jízdy) a budeme potřebovat nastartovat palivové články (elektromagnetický ventil přívodu vodíku, diagnostika a řídicí elektronika, ventilátor chlazení a kompresor), takže provozní akumulátor zde slouží i jako energetická „KPZ“ [13, [14], [15], [16].



Obr. 4.5: Zvolená topologie pohonu

Pro využití možnosti rekuperativního brzdění byla ve vozidle upravena pedálová skupina (obr. 4.6), kde sešlápnutím pedálu v první polovině dráhy dochází k brzdění rekuperativnímu (pouze přední náprava) a v části druhé pak i k brzdění mechanickému (obě nápravy). Polohy brzdového a plynového pedálu jsou snímány indukčními čidly.



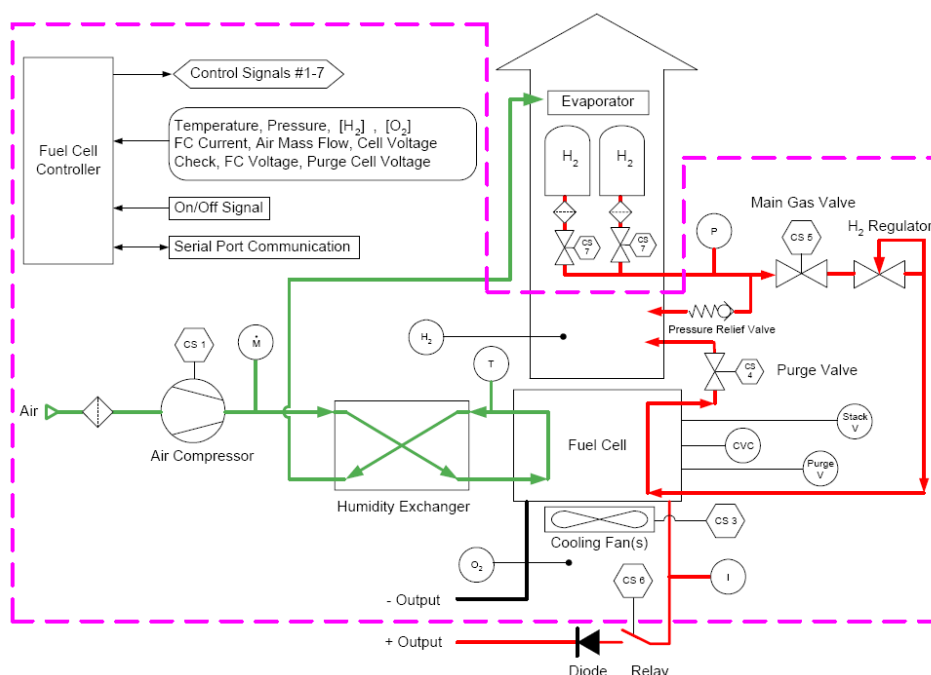
Obr. 4.6: Úprava pedálové skupiny

4.1 Palivový článěk

V tomto projektu slouží palivový článěk jako primární zdroj elektrické energie. Jsou zde použity dva PEM palivové články BALLARD NEXA POWER MODULE zapojené do série. Výstupní napětí se pohybuje v rozmezí 84,5 – 54V podle zatěžovací charakteristiky, maximální výkon této dvojice je 2,4kW. Palivové články byly ve vozidle instalovány v prostoru kufru společně s tlakovou lahví. Jako zdroj vodíku byla použita tlaková láhev s 20l vodním objemem od firmy Linde Gas, vodík E949, produkt č. 3190122 (3,6m³ vodíku při tlaku 200bar). Láhev byla osazena redukčním ventilem, který snižoval tlak vodíku na asi 1bar. Na výstupu redukčního ventilu byl osazen „T“

kus, z něj byl vodík veden k jednotlivým článkům tlakovými hadicemi. Palivové články byly instalovány na ocelový rám připevněný ke karoserii vozidla prostřednictvím silent bloků pro tlumení vibrací, láhev obdobným způsobem.

Palivové články potřebují k nastartování chemické reakce napětí v rozsahu 18-30V, výkonově cca. 60W na článek (pro diagnostiku chyb v průběhu startu, pro napájení kompresoru, atd.). Jelikož máme palivové články řazené do série a jelikož je „zem“ výstupního napětí totožná se „zemí“ napětí startovacího, je nutné tato startovací napětí galvanicky oddělit. Jediný zdroj, který k těmto účelům lze použít, je olověný akumulátor, který slouží k napájení spotřebičů ve vozidle (popsáno viz. kapitola 4. Koncepce pohonu). Na akumulátoru je napětí 12V, které je nevyhovující. Potřebu dvou navzájem od sebe galvanicky oddělených napětí ve správném rozsahu jsme řešili instalací zvyšujícího měniče napětí s transformátorem, díky kterému bylo možné galvanicky oddělit i palubní síť ve vozidle. Tento měnič se spouštěl pouze za účelem nastartování palivových článků, po rozběhnutí reakce se články napájí samy [11].



Obr. 4.1.1.: Blokové schéma palivového článku⁶

4.2 Stabilizační měnič

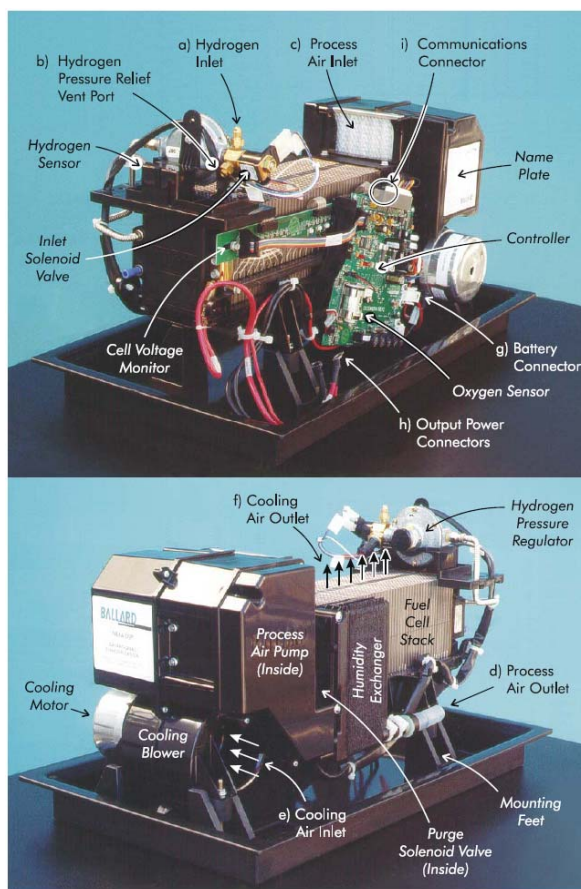
V pohonu je zařazen stabilizační měnič, který zajišťuje nabíjení trakčního akumulátoru. Tato kapitola popisuje jeho návrh a konstrukci.

4.2.1 Návrh měniče

Měnič má ve vozidle funkci výkonového přizpůsobení palivových článků trakční baterii. V tomto textu si popíšeme návrh kondenzátorové baterie na vstupu měniče,

⁶ Obrázek převzat z: Nexa™ Power Module User's Manual: MAN5100078

dimenzování diody a tranzistoru, návrh a konstrukci vyhlazovací tlumivky na výstupu měniče.



Obr. 4.1.2: Fotografie palivových článků⁷

Na obrázku 4.2.1.1 je znázorněna zatěžovací charakteristika (červená barva) palivového článku, který jsme užili ve vozidle. V grafu je také vynesena aproximace zatěžovací charakteristiky (černá barva), ze které vycházíme při návrhu.

Hodnoty odečtené z grafu:

Napětí naprázdno: $U_{f0}=41,20\text{V}$

Napětí při plné zátěži ($I_{max}=45\text{A}$): $U_Z=25,15\text{V}$

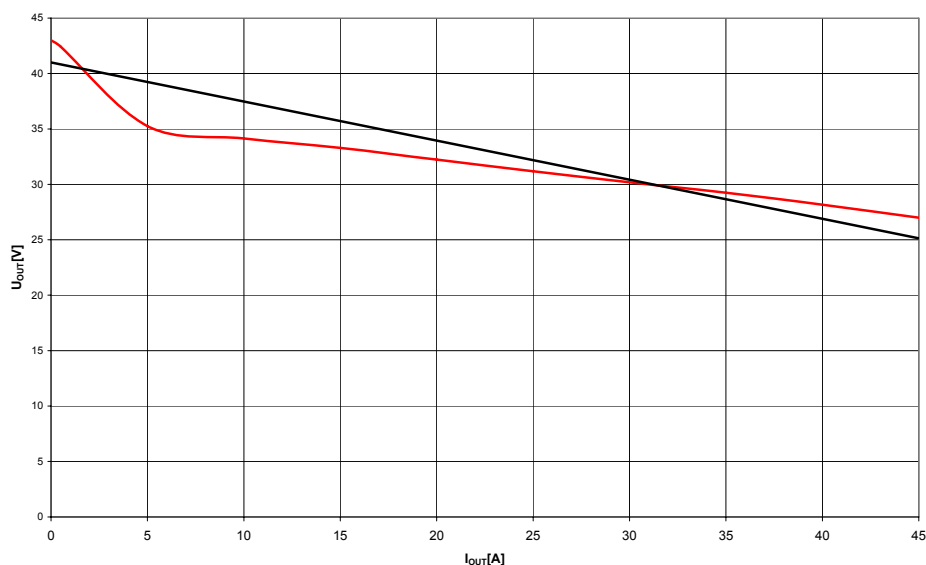
Vnitřní odpor sériové dvojice palivových článků je tedy:

$$R_i = 2 \cdot \frac{U_{f0} - U_Z}{I_{max}} = 2 \cdot \frac{41,2 - 25,15}{45} = 0,72\Omega \quad (1)$$

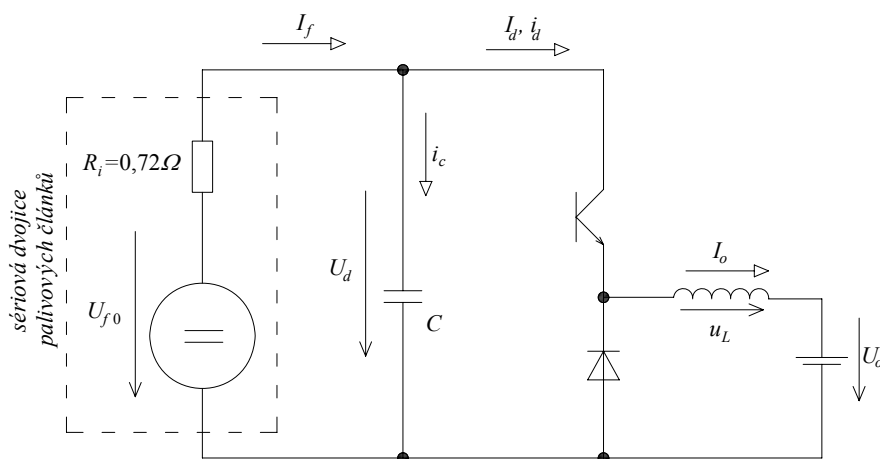
Návrhu kondenzátorové baterie byla věnována značná pozornost, protože proud odebíraný měničem je pulzního charakteru. Následující odvození kapacity

⁷ Obrázek převzat z: Nexa™ Power Module User's Manual: MAN5100078

kondenzátorové baterie vychází z předpokladu, že kapacita je dostatečně velká, pak je z palivových článků odebírána střední hodnota pulzního proudu odebíraného měničem.

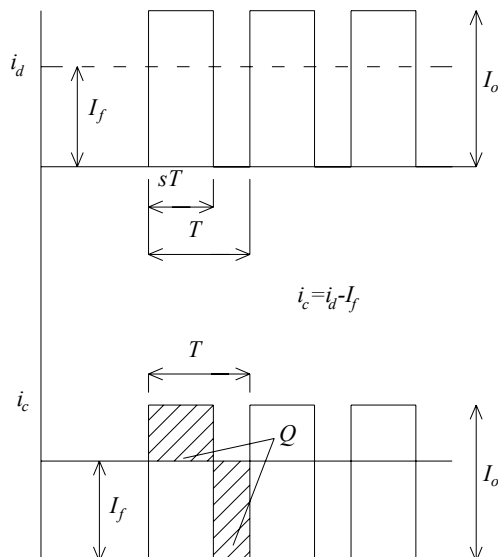


Obr. 4.2.1.1: Zatěžovací charakteristika palivového článku



Obr. 4.2.1.2: Principiální schéma stabilizačního měniče

- Legenda:
- U_D – napětí ve stejnosměrném meziobvodu měniče
 - R_i – vnitřní odpor palivového článku
 - U_{f0} – napětí naprázdno palivového článku
 - U_o – výstupní napětí měniče (napětí baterií)
 - u_L – okamžitá hodnota napětí na tlumivce
 - I_F – proud palivovým článkem
 - i_c – proud kondenzátorem ve stejnosměrném obvodu
 - I_d – vstupní proud měniče střední hodnota
 - i_d – vstupní proud měniče pulzní
 - I_o – výstupní proud měniče



Obr. 4.2.1.3: Průběhy proudů měničem a kondenzátorem

Proud i_d je pulzní o velikosti pulzu I_o a šířkou pulzu $s \cdot T$ (kmitočet nosné měniče 40kHz, perioda je tedy 25μs). Proud kondenzátorem i_c je dán rozdílem proudů i_d a I_f a sledujeme jej po dobu zapnutí tranzistoru měniče. Velikostně odpovídá rozdílu proudů $I_o - I_f$. Odvozujeme závislost náboje Q (viz obr. 4.2.1.3) na stříde měniče (střední hodnota proudu kondenzátorem je samozřejmě nulová). První derivaci výsledného vztahu položíme rovnu nule a zjistíme, při jaké stříde je flukтуаční náboj Q největší. Na tuto hodnotu dimenzujeme kapacitu s ohledem na zvlnění napětí. To je samozřejmě přímo úměrné velikosti náboje Q . Při návrhu měniče je třeba zohlednit fakt, že vstupní napětí měniče není konstantní a výstupní napětí konstantní je (trakční akumulátor). Situace je tedy opačná, než jak je tomu ve většině případů návrhu tohoto typu měniče. Proto pomocí střídy dopočítáváme vstupní napětí z výstupního.

Vstupní podmínka: s_{min} je taková, aby $U_d < U_{f0}$, jinak neteče I_f

$$\text{Vstupní napětí: } U_d = \frac{U_o}{s} \quad (2)$$

$$\text{Platí tedy: } s_{min} = \frac{U_o}{U_{f0}} = \frac{46,2}{82,4} = 0,56 \quad (3)$$

$$\text{Při splnění } s > s_{min} \text{ platí: } I_f = \frac{U_{f0} - U_d}{R_i} = \frac{U_{f0} - \frac{U_o}{s}}{R_i} \quad (4)$$

$$\text{a také: } I_o = \frac{I_f}{s} = \frac{U_{f0} - \frac{U_o}{s}}{s \cdot R_i} \quad (5)$$

Náboj, který dovádá kondenzátorová baterie je tedy:

$$Q = (I_o - I_f) \cdot s \cdot T = \left(\frac{U_{f0} - \frac{U_o}{s}}{s \cdot R_i} - \frac{U_{f0} - \frac{U_o}{s}}{R_i} \right) \cdot s \cdot T = \frac{U_{f0} - \frac{U_o}{s}}{R_i} \cdot (1 - s) \cdot T \quad (6)$$

$$\text{Derivujeme a pokládáme rovno nule: } \frac{dQ}{ds} = -\frac{U_{f0}}{R_i} \cdot T + \frac{U_o}{R_i} \cdot T \cdot s^{-2} = 0 \quad (7)$$

$$-U_{f0} + \frac{U_o}{s^2} = 0 \Rightarrow s = \sqrt{\frac{U_o}{U_{f0}}} = \sqrt{\frac{46,2}{82,4}} = 0,748 \quad (8)$$

Maximální náboj dodávaný kondenzátorovou baterií:

$$Q_{\max} = \frac{U_{f0} - \frac{U_o}{\sqrt{\frac{U_o}{U_{f0}}}}}{R_i} \cdot \left(\sqrt{\frac{U_{f0}}{U_o}} - 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{U_o}{U_{f0}}} \cdot T \quad (9)$$

$$Q_{\max} = \frac{82,4 - \frac{46,2}{\sqrt{\frac{46,2}{82,4}}}}{0,7} \cdot \left(\sqrt{\frac{82,4}{46,2}} - 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{46,2}{82,4}} \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 185,7 \mu\text{C} \quad (10)$$

Zvlnění napětí je dáno:

$$\Delta U = \frac{Q_{\max}}{C} \quad (11)$$

Výsledná kapacita je tedy (volíme $\Delta U = 80\text{mV}$):

$$C = \frac{Q_{\max}}{\Delta U} = \frac{185,7 \cdot 10^{-6}}{80 \cdot 10^{-3}} = 2322 \mu\text{F} \quad (12)$$

Musíme však zajistit, aby efektivní hodnota proudu kondenzátorem nepřesáhla hodnotu stanovenou pro daný typ. Dále pak odvozujeme vztah pro výpočet tohoto proudu. Abychom zjistili, v jaký okamžik je proud nejvyšší, derivujeme tento vztah a pokládáme jej roven nule. Zjistíme, při jaké střídě je proud nejvyšší a na tuto hodnotu dimenzujeme kondenzátor. Dle velikosti efektivního proudu a hodnoty, kterou snese kondenzátor samotný, určíme počet dílčích kondenzátorů. Pro výpočet efektivní hodnoty proudu vycházíme z energie, která se přemění v teplo na vnitřním odporu kondenzátorové baterie během jedné periody:

$$W_{R_C T} = R_C \cdot I_{CRMS}^2 \cdot T \quad (13)$$

V době zapnutí tranzistoru t_{on} je kondenzátorová baterie vybíjena rozdílem proudů $I_o - I_f$ a teplo vyzářené na vnitřním odporu v tuto dobu odpovídá energii:

$$W_{R_C t_{on}} = R_C \cdot (I_o - I_f)^2 \cdot t_{on} \quad (14)$$

V době vypnutí tranzistoru t_{off} je kondenzátorová baterie nabíjena proudem I_f a teplo vyzařené na vnitřním odporu v tuto dobu odpovídá energii:

$$W_{R_C t_{off}} = R_C \cdot I_f^2 \cdot t_{off} \quad (15)$$

Potom energie vyzařená za dobu celé periody odpovídá součtu dílčích energií:

$$W_{R_C T} = W_{R_C t_{on}} + W_{R_C t_{off}} \quad (16)$$

pak platí:

$$\begin{aligned} R_C \cdot I_{CRMS}^2 \cdot T &= R_C \cdot (I_o - I_f)^2 \cdot t_{on} + R_C \cdot I_f^2 \cdot t_{off} = \\ R_C \cdot (I_o - I_f)^2 \cdot t_{on} &+ R_C \cdot I_f^2 \cdot (T - t_{on}) \end{aligned} \quad (17)$$

Vynásobením rovnice (17) zlomkem $\frac{1}{R \cdot T}$ dostáváme:

$$I_{CRMS}^2 = (I_o - I_f)^2 \cdot s + I_f^2 \cdot (1 - s) \quad (18)$$

Odmocňujeme a dále upravujeme:

$$I_{CRMS} = \sqrt{(I_o - I_f)^2 \cdot s + I_f^2 \cdot (1 - s)} = \frac{U_{f0} - \frac{U_0}{s}}{R_i} \sqrt{\frac{1 - s}{s}} \quad (19)$$

Derivujeme rovnici (19), abychom zjistili, při které hodnotě střídý je proud kondenzátorovou baterií nejvyšší:

$$\frac{dI_{CRMS}}{ds} = -\frac{3}{2} \cdot U_o \cdot \frac{1}{\sqrt{s^5 - s^6}} = 0 \quad (20)$$

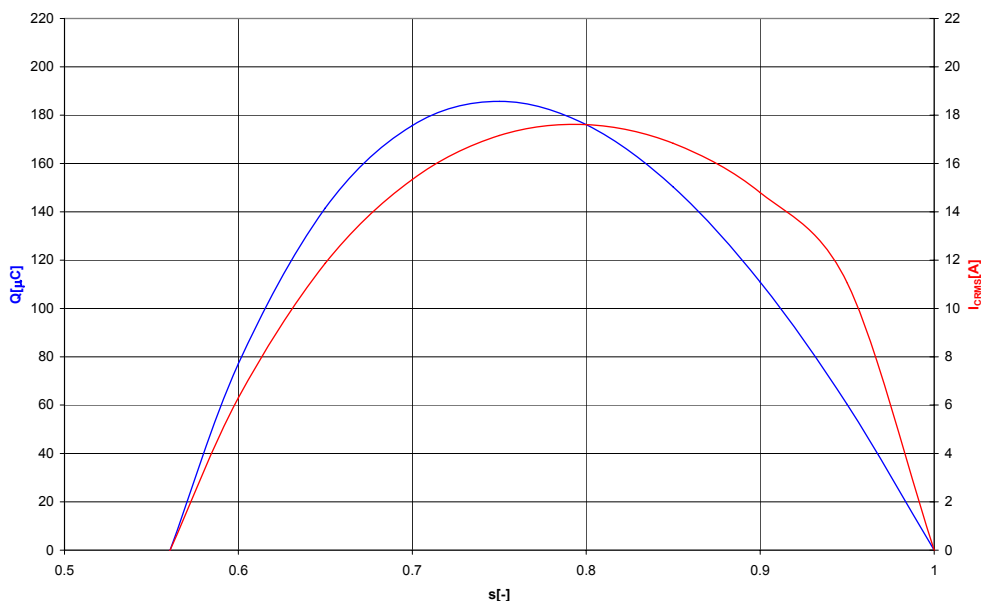
$$s = \frac{3U_o}{U_{f0} + 2U_o} = \frac{3 \cdot 46,2}{82,4 + 2 \cdot 46,2} = 0,793 \quad (21)$$

Největší hodnota proudu kondenzátorovou baterií je tedy:

$$I_{CRMS} = \frac{U_{f0} - \frac{U_0}{s}}{R_i} \sqrt{\frac{1 - s}{s}} = \frac{82,4 - \frac{46,2}{0,793}}{0,7} \sqrt{\frac{1 - 0,793}{0,793}} = 43,3 \text{ A} \quad (22)$$

Námi použité kondenzátory 100μ/160V jsou dimenzovány na 2A efektivní, celou baterii tedy složíme z 24ks těchto kondenzátorů. Výsledný proud jedním dílčím kondenzátorem bude 1,8A.

Obrázek 4.2.1.4 graficky znázorňuje závislost náboje kondenzátoru a efektivní proud kondenzátorem v závislosti na střídě. Situaci vyšetřujeme pro $s = \langle s_{min}; s_{max} \rangle$, tedy pro $s = \langle 0,56; 1 \rangle$.



Obr. 4.2.1.4: Závislost náboje a efektivního proudu kondenzátorem na střídě

Dále navrhujeme filtrační indukčnost na výstupu měniče:

V době t_{on} tedy platí:

$$u_L = U_d - U_o = \frac{U_o}{s} - U_o = U_o \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \quad (23)$$

a také

$$u_L = L \cdot \frac{\Delta I_o}{t_{on}} \quad (24)$$

potom:

$$\Delta I_o = \frac{U_o \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \cdot t_{on}}{L} = \frac{U_o \cdot T}{L} \cdot (1 - s) \quad (25)$$

$$L = \frac{U_o \cdot T}{\Delta I_o} \cdot (1 - s) \quad (26)$$

Dle rovnice (25) bude zvlnění nejvyšší při s_{min} a indukčnost vyhlazovací tlumivky pak dle (26) (volíme $\Delta I_o = 4A$):

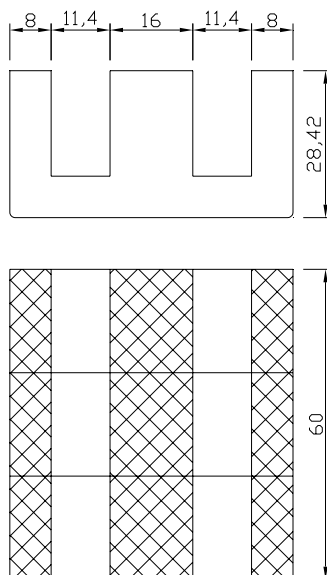
$$L = \frac{46,2 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot (1 - 0,56) = 115,5 \mu H \quad (27)$$

Pro konstrukci tlumivky volíme feritové jádro složené z „E“ profilů o rozměrech viz. obrázek 4.2.1.5, s parametry:

$S=960\text{mm}^2$ průřez jádra

$l_{Fe}=136,05\text{mm}$ délka magnetické siločáry v jádru

$\mu_r=1000$ relativní permeabilita



Obr. 4.2.1.5: Výkres jádra filtrační tlumivky stabilizačního měniče

Pro návrh tlumivky volíme:

$B_{max}=0,35\text{T}$ maximální sycení jádra tlumivky

$I_{max}=60\text{A}$ maximální proud tlumivkou

Při návrhu tlumivky s feromagnetickým jádrem vycházíme z rovnice:

$$N \cdot B_{max} \cdot S_{Fe} = L \cdot I_{max} , \quad (28)$$

ze které vyjádříme závity N :

$$N = \frac{L \cdot I_{max}}{B_{max} \cdot S_{Fe}} = \frac{115,5 \cdot 10^{-6} \cdot 60}{0,35 \cdot 960 \cdot 10^{-6}} = 20,625 \text{ závitů}, \quad (29)$$

volíme závitů 21, výsledná B_{max} bude nižší.

Pro dosažení požadované indukčnosti při zjištěných závitech je do magnetického obvodu vložena vzduchová mezera. Pro návrh tlumivky platí tedy rovnice (28) a zároveň:

$$L = N^2 \cdot \lambda_m \quad (30)$$

Rovnicí (30) je dána magnetická vodivost jádra. Jelikož se jedná o dvě magnetické vodivosti v sérii, platí:

$$\lambda_m = \frac{\lambda_{mFe} \cdot \lambda_{mv}}{\lambda_{mFe} + \lambda_{mv}} \quad (31)$$

a zároveň také platí:

$$\lambda_{mFe} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{S}{l_{Fe}} \quad (32)$$

a:

$$\lambda_{mv} = \mu_0 \cdot \frac{S}{l_v} \quad (33)$$

Sloučením rovnic (31), (32), (33) a úpravou dostáváme:

$$\lambda_m = \mu_0 \cdot S \cdot \frac{1}{l_v + \frac{l_{Fe}}{\mu_r}}, \quad (34)$$

Do rovnice (34) dosadíme rovnici (30) a vyjádříme l_v :

$$l_v = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{L} - \frac{l_{Fe}}{\mu_r} = \frac{21^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 960 \cdot 10^{-6}}{115,5 \cdot 10^{-6}} - \frac{136,05 \cdot 10^{-3}}{1000} = 4,47 \text{ mm} \quad (35)$$

Konstrukcí jádra jsou dány dvě vzduchové mezery v sérii. Mezi námi zvolené „E“ profily vložíme nemagnetický materiál o tloušťce 2,25mm. Výsledkem bude tedy vzduchová mezera o tloušťce 4,5mm. Výsledná indukčnost tlumivky bude dána sloučením rovnice (34) a (30):

$$\begin{aligned} L &= N^2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot \frac{1}{l_v + \frac{l_{Fe}}{\mu_r}} = \\ &= 21^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 960 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{4,5 \cdot 10^{-3} + \frac{136,05 \cdot 10^{-3}}{1000}} = 117,3 \mu\text{H} \end{aligned} \quad (36)$$

Konstrukčně je vinutí provedeno pásovým měděným vodičem 8x1,8mm, průřez vodiče je tedy 14,5mm². Tlumivka je navržena na proud 60A. Tomu odpovídá proudová hustota 4,2Amm⁻². Vzhledem k tomu, že maximální proud palivovými články je 45A, je tato proudová hustota dostačující [6], [7].

Dimenzování polovodičů měniče:

Jako MOSFET tranzistor byl použit vzorek od firmy International Rectifier, typ IRFP90N20D, parametry:

$U_{DSS}=200\text{V}$ maximální závěrné napětí

$R_{DSon}=0,023\Omega$ odpor v sepnutém stavu

$I_D=94\text{A}$ maximální proud

V měniči jsme užili tři tyto tranzistory. Díky zápornému teplotnímu koeficientu, který je výhodnou vlastností tranzistorů MOSFET, se proud rozdělí rovnoměrně mezi všechny tři tranzistory, tzn. že každý tranzistor bude zpracovávat 15A. Tranzistory jsou nejvíce namáhány při střídě $s=1$. Ztráty vedením se dají určit jako:

$$P_{T_{ztr.}} = R_{DSon} \cdot I_{Def}^2 = R_{DSon} \cdot \left(\frac{I_o}{3} \cdot \sqrt{s} \right)^2 = 0,023 \cdot \left(\frac{45}{3} \cdot \sqrt{1} \right)^2 = 5,175 \text{ W} \quad (37)$$

na jeden tranzistor, čili 15,525W ztrátového výkonu na všech tranzistorech.

Jako nulovou diodu jsme použili vzorek od téhož výrobce, typ 150EBU02, parametry:

$U_R=200\text{V}$ maximální závěrné napětí

$I_{F(AV)}=150\text{A}$ maximální proud

Užili jsme opět tři tyto diody, každá zpracovává třetinový proud. Diody jsou nejvíce namáhány při $s=s_{min.}$. Ztráty vedením se dle katalogového listu určují jako:

$$P_{D_{ztr.}} = U_{prah} \cdot I_{D_{stř}} = U_{prah} \cdot \left(\frac{I_o}{3} \cdot (1 - s_{min.}) \right) = 0,99 \cdot \left(\frac{45}{3} \cdot (1 - 0,56) \right) = 6,5 \text{ W} \quad (38)$$

na jednu diodu, čili 19,602W ztrátového výkonu na všech diodách [23].

Diody a tranzistory jsou umístěny na společném chladiči. Jejich rozmístění na plošném spoji bylo kritické z hlediska co nejnižších parazitních indukčností. Jsou proto umístěny uprostřed oboustranného plošného spoje, kde z jedné strany jsou připojeny k výkonovému obvodu a ze strany druhé k obvodům řídicím. Chladič byl opatřen ventilátorem řízeným elektronickým termostatem.

4.2.2 Konstrukce měniče

Obvodově se jedná o snižující měnič bez transformátoru s horním spínačem. Modul měniče obsahoval i proudová čidla LEM, podpurné obvody pro ně, podpurné obvody pro samotný měnič i propojení s deskou monitoringu trakčního akumulátoru. Byly zde také připraveny konektory pro připojení a připevnění desky řízení s digitálním signálním procesorem.

Fukčním jádrem celého modulu je snižující měnič tvořený MOS-FET tranzistory T1, T2, T3 a diodami D1, D2, D3. Elektrolytické kondenzátory C1-C24 slouží k vyhlazení odebíraného proudu z palivových článků, keramické kondenzátory C44-C46 potlačují vf složku. Tranzistory měniče jsou buzeny přes gateové odpory R1-R3 proti vývodům „source“ a toto s sebou nese nutnost galvanicky oddělit „zem“ budiče od „země“ měniče. Stejně tak nutné bylo galvanicky oddělit „zem“ prodových čidel LEM (LF305-S). Požadavek byl řešen pomocí výkonového oscilátoru (součástky IC3, Q1-Q4, T4-T7, R8-R12, C26-C28, C47) a malého feritového transformátoru o průměru 30mm a ploše jádra 20mm². Oscilátor byl postaven na bázi multivibrátoru 4047D (IC3). Keramický kondenzátor C47 slouží pro blokování vf složky napájecího napětí, RC člen R8 a C26 je zvolen tak, aby frekvence primárního napětí byla 140kHz. Tento kmitočet byl volen v ohledu na dostupný vodič, kterým byl transformátor vinut (vodič se silikonovou izolací). Výstupy multivibrátoru jsou „nizkovýkonové“ pracující v protitaktu, jsou proto proudově posíleny tranzistory MOS-FET zapojenými do H mostu, v jehož středu je zapojeno primární vinutí transformátoru.

Primární vinutí tvoří 15 závitů vodičem o průřezu 0,125mm². Sekundární vinutí jsou dvě s vyvedenými středy. Každé vinutí je tvořeno 2x15 závitů stejným. Za sekundárním vinutím následuje Graetzův můstek, stejnosměrné napětí je filtrováno elektrolytickými kondenzátory a blokováno kondenzátory keramickými. Napětí je dále stabilizováno

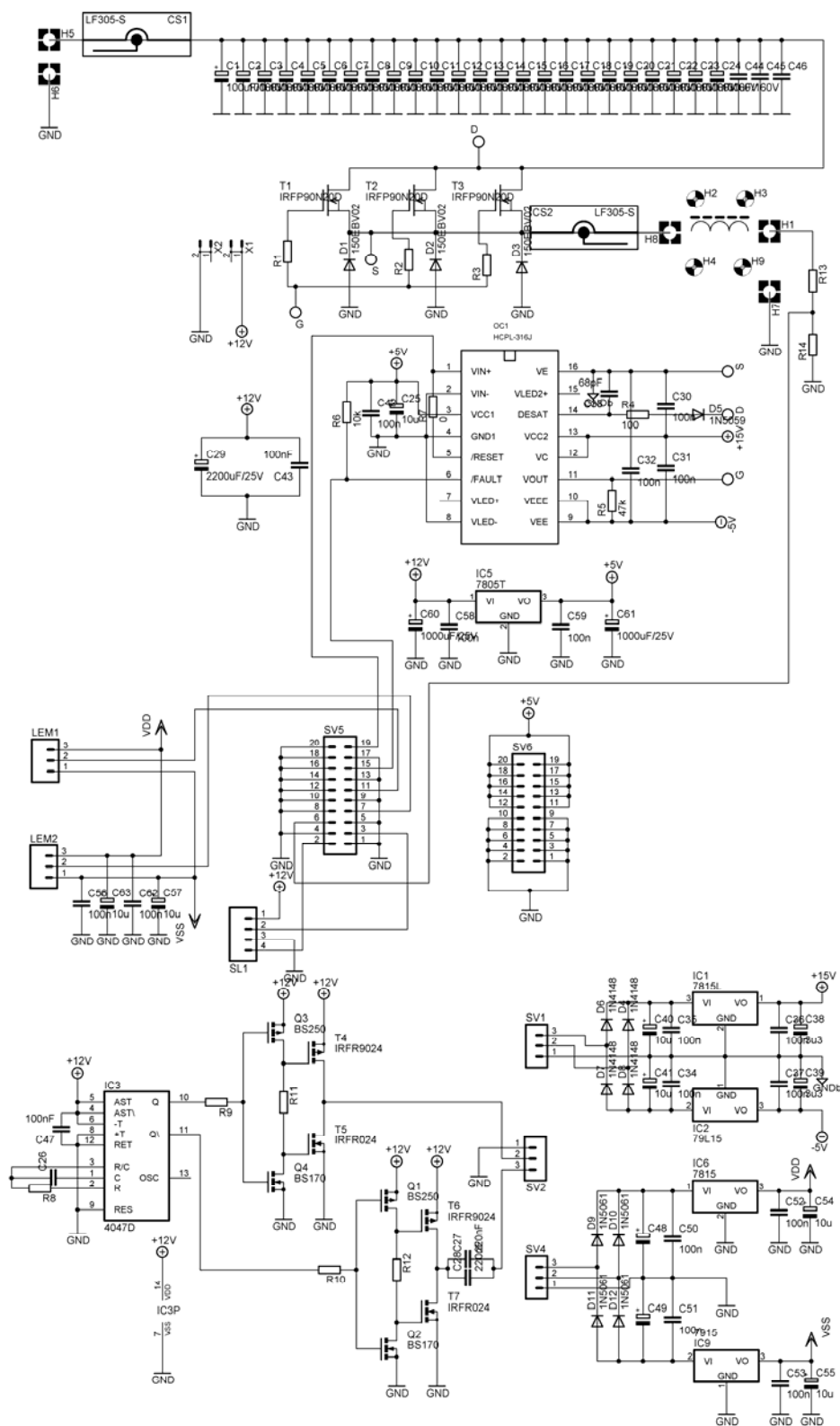
monolytickými stabilizátory 7815 a 7915 na jejichž výstupech jsou opět elektrolytické a keramické kondenzátory. Napájení budiče je tvořeno součástkami D4, D6-D8, C34-C41, IC1-IC2 (78L15, 79L15). Napájení proudových čidel pak součástkami D9-D12, C48-C55, IC6, IC9 (7815, 7915). Napájecí napětí pro proudová čidla je vyvedeno na konektory LEM1 a LEM2 a blokováno kondenzátory C56, C57, C62, C63. Z těchto konektorů je signál odpovídající měřené hodnotě proudu přiveden na konektor SV5. Na konektor SL1 je zapojen modul přepětových a podpětových ochran trakčního akumulátoru, výstupní signály („přepětí“ a „podpětí“) jsou vyvedeny na konektor SV5. Deska plošných spojů měniče obsahuje také stabilizátor pro napájení desky řízení měniče (IC5, C58-C61) s výstupním napětím je 5V vyvedeným na konektor SV6 s proudovou zatížitelností do 2A. Napájení celého modulu je přivedeno na konektory FASTON X1, X2 (palubní napětí 12V, Pb akumulátor) a filtrováno elektrolytickým kondenzátorem C29, blokováno keramickým kondenzátorem C43. Výstupní napětí z palivových článků je do modulu připojeno pomocí svorek H5, H6, trakční akumulátor je připojen na svorky H1, H7. K těmto svorkám je také připojen dělič tvořený rezistory R13, R14 jehož střed je vyveden na konektor SV5 (slouží k měření napětí na trakčním akumulátoru). Na svorky H1, H8 je připojena filtrační tlumivka. Proudová čidla LEM jsou na desce osazena tak, aby vodič připojovaný ke svorkám H5 a H1 musel být nimi nejprve provléknut. Touto úpravou jsme dosáhli zmenšení zastavěného prostoru a zjednodušení konstrukce. Všechny svorky ve schématu značené písmenem „H“ jsou provedeny jako zaletované mosazné šrouby M8 s šestihrannou hlavou.

Na konektor SV5 jsou také připojeny signály z/do budiče výkonových tranzistorů měniče, signály „chyba“ a „otevření tranzistorů“.

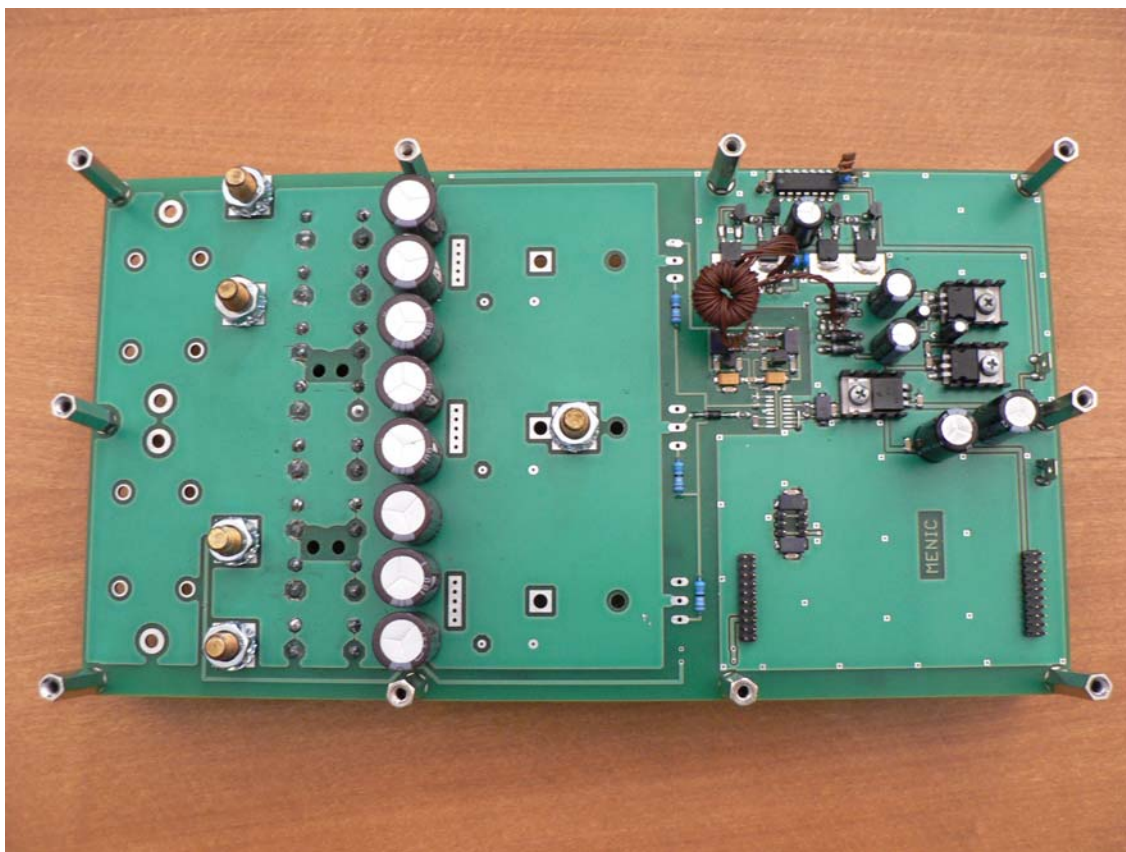
Samotný budič je postaven na integrovaném obvodu OC1 (HCPL-316J, někdy značen též jako A316J) fy Agilent (Hewlett Packard). Je to obvod navržený právě pro buzení výkonových MOS-FET a IGBT tranzistorů (max. 2A) obsahující i saturační ochranu [8], [10]. Obvod sleduje v sepnutém stavu napětí na tranzistoru a když toto napětí v důsledku přetížení dosáhne hodnoty větší jak cca. 2V (tato mez se dá nastavit), vyhlásí chybu. V našem zapojení je tato ochrana nastavena jako regenerativní (dojde-li k chybě, obvod vypne, při dalším impulzu k sepnutí výkonových tranzistorů se chyba resetuje). Obvod budiče je tvořen součástkami OC1, D5, C25, C30-C33, C42, R4-R7. Celkové schéma modulu je na obrázku 4.2.2.1. Měnič je proveden na dvouvrstvé desce plošných spojů (tloušťka spojů je 0,1mm), spoje jsou navrženy s ohledem na co nejnižší parazitní indukčnosti.

Na obrázku 4.2.2.4 je fotografie rozpracovaného měniče. Konečná podoba není zdokumentována, měnič ale lze vidět na fotografii prostoru motoru mezi vestavěným trakčním akumulátorem a trakčním měničem, obr. 4.3.1, kapitola 4.3.

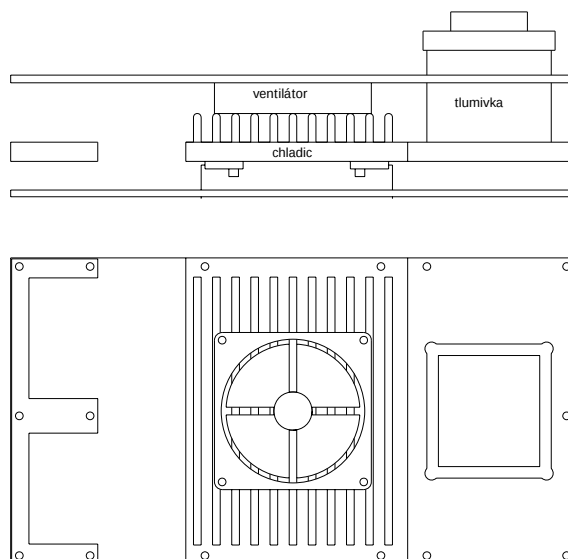
NÍZKONAPĚŤOVÝ TRAKČNÍ POHON S PALIVOVÝM ČLÁNKEM



Obr. 4.2.2.1: Schéma stabilizačního měniče



Obr. 4.2.2.2: Fotografie rozpracovaného měniče

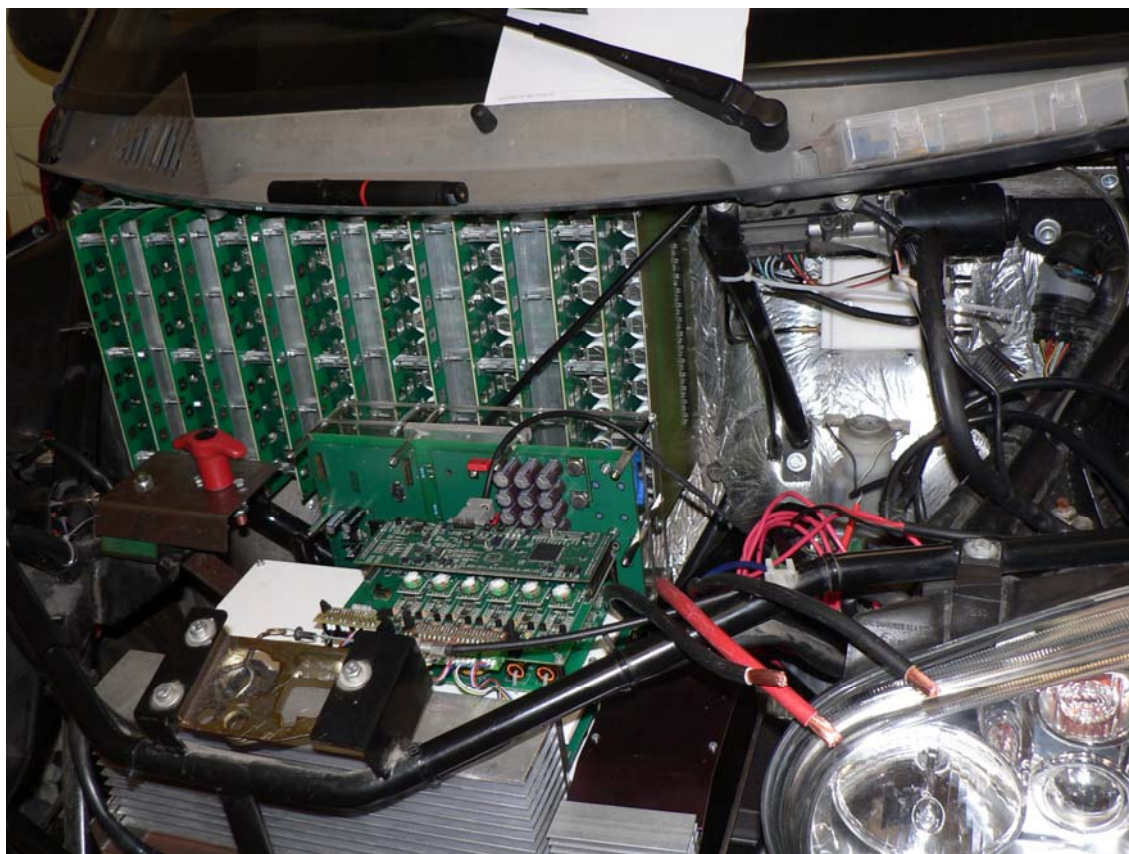


Obr. 4.2.2.3: Mechanické uspořádání stabilizačního měniče

4.3 Trakční akumulátor

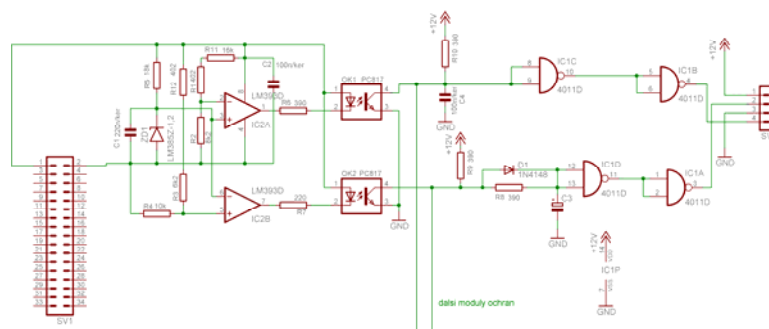
Akumulátor je sestaven z LiFe-Po článků amerického výrobce A123Systems, Inc. Baterie plní funkci špičkového zdroje pro rozjezd a spotřebiče pro rekuperativní brzdění. Dle režimu dobíjení také umožňuje palivové články provozovat v režimu nejvyšší účinnosti, to má příznivý vliv na spotřebu vodíku.

Konstrukčně je akumulátor řešen jako soustava článků typu ANR26650M1A v serioparalelní kombinaci [12]. Konkrétně bylo použito 9x14 kusů, tedy 9ks paralelně v jednom patře, 14 pater v sérii. Pro nominální napětí jednoho článku 3,3V je výsledným napětím baterie 46,2V. Akumulátor byl ve vozidle umístěn v prostoru motoru, v pravé části. Nosným prvkem všech čtrnácti pater bylo plechové šasi připevněné na nosníky z jöklů. Umístění baterie v prostoru motoru mělo několik konstrukčních důvodů. Především se tímto uspořádáním měly snížit ztráty ve vodičích způsobené průchodem vysokého proudu (pro výkon 8kW při napětí 46,2V protékal vodiči akumulátoru proud okolo 170A). Uspořádání v prostoru motoru je patrné z obrázku 4.3.1. Při pohledu zepředu je vidět trakční měnič s řízením, nalevo odpojovač baterie, za trakčním měničem je stabilizační měnič, za ním pak akumulátor.



Obr. 4.3.1: Zástavba akumulátoru ve vozidle

Akumulátorová sestava je doplněna deskou podpět'ových a přepět'ových ochrany, která sleduje napětí na každém patře, deska obsahuje čtrnáct dílčích ochrany od sebe galvanicky oddělených. Vyhodnocení chyb je provedeno obvodem viz. schéma obr. 4.3.2.



Obr. 4.3.2: Schéma ochran akumulátoru

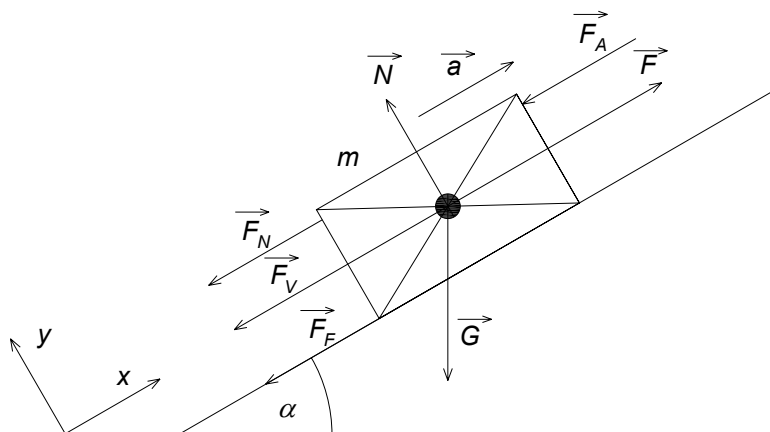
Obvod ochran funguje na základu dvou komparátorů. Na konektor SV1 je přivedeno napětí ze všech čtrnácti pater, obsazeny jsou piny 1-28, piny 29-34 jsou nevyužity. Vždy lichý pin má kladný a každý sudý pin záporný potenciál. Jako zdroj referenčního napětí je použit stabilizátor LM385Z-1,2 napájený přes rezistor R5. Referenční napětí je přivedeno na neinvertující vstup IC2A (obvod ochran přepětí) a invertující vstup IC2B (obvod ochran podpětí) a porovnává se s napětím z děliče R3,R4,R12 (podpětí – neinvertující vstup) a R1,R2,R11 (přepětí – invertující vstup). Dojde-li k chybovému stavu (podpětí – napětí na článku nižší než 2V, přepětí – napětí na článku vyšší než 3,6V), komparátory překloupí a výstupy optočlenu „stáhnou“ vstupy invertorů do logické „0“. V obvodu přepětí slouží kondenzátor C4 k potlačení rušení. V obvodu podpětí je zařazen D1,R8,C3 člen, který zavádí do cesty dopravní zpoždění. V důsledku akcelerace dochází k proudovým nárazům a tedy k poklesu napětí vlivem vnitřního odporu akumulátoru. Dojde-li tedy k zatížení akumulátoru a poklesu napětí pod 2V, optočlen stáhne R9,R8,D1 na nízký potenciál a začne přes odpor R8 vybíjet kondenzátor C3. Pokud dojde k odlehčení akumulátoru dříve, než klesne napětí na C3 pod 6V (rozhodovací mez hradel $\frac{1}{2}$ UCC), nadřazený systém pokles nezaznamená a přes diodu D1 dojde k rychlému nabití kondenzátoru C3 zpět na původní hodnotu napětí. Hradla IC1 slouží jako „proudový“ zesilovač (tvarovač). Na konektor SV2 jsou vyvedeny chybové informace ve formě logických hodnot (log. 0 – podpětí, přepětí – 0V; log. 1 – baterie OK – 12V) společně s napájením ochran. Vývody SV2: 1 +12V, 2 podpětí, 3 GND, 4 přepětí. Konstrukčně je modul ochran osazen na jednostranné desce plošných spojů stejné velikosti jako desky s články a je připevněn k akumulátoru. Optočleny, dioda D1, elektrolytický kondenzátor C3, rezistor R8 a zdroje referenčních napětí jsou vývodové součástky, integrované obvody, keramické kondenzátory a rezistory jsou v provedení SMD osazené ze strany plošných spojů. Elektricky je modul ochran připojen ke stabilizačnímu měniči, ze kterého je napájen a do jehož řízení jsou vedeny signály přepětí a podpětí. Řízení měniče v chybových stavech akumulátoru odpojí palivové články a akumulátor samotný.

5. Dynamika

5.1 Obecné řešení akcelerace

Při řešení akcelerace uvažujeme vozidlo jako hmotný bod a vycházíme z 2. Newtonova zákona vyjádřeného pomocí součtu sil působících na těleso (39) (rozložení sil viz. obrázek 5.1.1):

$$m \cdot \vec{a} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i, \quad (39)$$



Obr. 5.1.1: Rozložení sil působících na vozidlo (hmotný bod)

Uvažujeme všechny druhy ztrátových sil působících proti tažné síle F , které jsou způsobené suchým a valivým třením, viskozním třením, aerodynamickým odporem a odporovou silou způsobenou náklonem trati.

Ztrátovou sílu způsobenou suchým a valivým třením nahradíme souhrnnou silou F_F , která je závislá na náklonu roviny a nezávislá na rychlosti:

$$F_F = \xi N = \xi G \cos \alpha = \xi m g \cos \alpha, \quad (40)$$

ξ - koeficient ztrát suchého a valivého tření

m – hmotnost vozidla

g – gravitační zrychlení

N – normálová síla (kolmá k nakloněné rovině)

G – tíhová síla

α - náklon roviny

Ztrátová síla způsobená viskozním třením F_V je úměrná první mocnině rychlosti a je vyjádřena jako:

$$F_V = k_V v(t), \quad (41)$$

k_V – koeficient ztrát viskozního tření

$v(t)$ – okamžitá rychlost vozidla

Ztrátová síla způsobená odporem vzduchu F_A je úměrná druhé mocnině rychlosti a je vyjádřena jako:

$$F_A = \frac{1}{2} C_X \rho S v(t)^2, \quad (42)$$

C_X – koeficient aerodynamického odporu

ρ - hustota vzduchu

S – plocha kolmého průmětu čelní plochy

$v(t)$ – okamžitá rychlost vozidla

Síla působící proti/po směru tažné síly způsobená náklonem vozovky F_N je nezávislá na rychlosti a je vyjádřena jako:

$$F_N = G \sin \alpha = mg \sin \alpha, \quad (43)$$

m – hmotnost vozidla

g – gravitační zrychlení

G – tíhová síla

α - náklon roviny

Výpočet okamžité rychlosti (při náklonu roviny $\alpha=0^\circ$):

Podle (39) a obr. 5.1.1 platí:

$$\begin{aligned} ma = m \frac{dv(t)}{dt} &= F - F_N - F_F - F_V - F_A = \\ &= F - mg \sin \alpha - \xi mg \cos \alpha - k_V v(t) - \frac{1}{2} C_X \rho S v(t)^2 \end{aligned} \quad (44)$$

Vynásobením rovnice (44) zlomkem $\frac{1}{m}$ dostáváme diferenciální rovnici prvního řádu, kterou upravíme do tvaru:

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{1}{2m} C_X \rho S v(t)^2 - \frac{k_V}{m} v(t) - \frac{F - \xi mg \cos \alpha - mg \sin \alpha}{m} \quad (45)$$

pro formální zjednodušení zápisu zavedeme následující konstanty:

$$a = \frac{k_A S \rho}{2m} \neq 0, \quad (46)$$

$$b = \frac{k_V}{m}, \quad (47)$$

$$c = -\frac{F - mg \sin \alpha - \xi mg \cos \alpha}{m}, \quad (48)$$

$$\frac{1}{\tau} = \sqrt{b^2 - 4ac}, \quad (48a)$$

Konstanta a nesmí být nulová, v takovém případě by řešení bylo zcela jiné a jednodušší. Rovnici (45) lze řešit metodou separace proměnných. Po dosazení konstant a , b , c rovnici převedeme do separovaného tvaru:

$$dt = -\frac{dv(t)}{av^2(t) + bv(t) + c} \quad (49)$$

Separovanou rovnici (49) je možno přímo integrovat. Formálně pouze přeznačíme $v(t) \rightarrow x$. Způsob řešení integrálu velmi závisí na znaménku determinantu ($b^2 - 4ac$). Protože při akceleraci určitě platí:

$$F - mg \sin \alpha - F_F \geq 0, \quad (50)$$

je koeficient c záporný. Koeficient a je kladný. Proto je výraz ($b^2 - 4ac$) kladný a tudíž hledaný integrál rovnice (49) bude mít následující tvar:

$$t = -\int_{v_0}^{v(t)} \frac{dx}{ax^2 + bx + c} = -\tau \left[\ln \left| \frac{2ax + b - \frac{1}{\tau}}{2ax + b + \frac{1}{\tau}} \right| \right]_{v_0}^{v(t)} \quad (51)$$

Dolní integrační mez má význam počáteční rychlosti v_0 , ze které je akcelerace zahájena, horní mez má význam hledané okamžité rychlosti. Po dosazení obou mezí získáme výraz, který má význam celkového času akcelerace z rychlosti v_0 na aktuální okamžitou rychlost $v(t)$:

$$t = \tau \left[\ln \left| \frac{2av_0 + b - \frac{1}{\tau}}{2av_0 + b + \frac{1}{\tau}} \right| - \ln \left| \frac{2av(t) + b - \frac{1}{\tau}}{2av(t) + b + \frac{1}{\tau}} \right| \right]. \quad (52)$$

Odtud přímo plyne hledaná okamžitá rychlost během akcelerace:

$$v(t) = \frac{1}{2a\tau} \frac{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} + \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}}{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} - \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}} - \frac{b}{2a} \quad (53)$$

Limitní rychlost v_{lim} v ustáleném stavu určíme jako limitu pro $t \rightarrow \infty$:

$$v_{lim} = \frac{1}{2a\tau} - \frac{b}{2a} = \sqrt{2 \frac{F - mg \sin \alpha - \xi mg \cos \alpha}{C_X S \rho}} + \left(\frac{k_v}{C_X S \rho} \right)^2 - \frac{k_v}{C_X S \rho} \quad (54)$$

Derivací rovnice (53) podle času získáme zrychlení:

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{\left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right) \cdot \left(2av_0 + b + \frac{1}{\tau}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}{a\tau^2 \left[2av_0 + b + \frac{1}{\tau} - \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}\right]^2} \quad (55)$$

Energetická bilance při akceleraci

Za předpokladu, že nedochází k prokluzu ani v převodech ani na styku kola s tratí, je okamžitý mechanický výkon na hřídeli trakčního stroje dán rovnicí:

$$p(t) = F(t)v(t) = F \left(\frac{1}{2a\tau} \frac{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} + \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}}{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} - \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}} - \frac{b}{2a} \right) \quad (56)$$

$F(t)$ je ekvivalentní síla odpovídající momentu na hřídeli stroje.

Trvalý výkon P_{lim} v ustáleném stavu určíme jako limitu pro $t \rightarrow \infty$:

$$P_{lim} = \frac{F}{2a} \left(\frac{1}{\tau} - b \right) \quad (57)$$

Energie spotřebovaná v průběhu akcelerace v časovém intervalu 0 až t :

$$W(t) = \int_0^t p(t) dt = F \int_0^t \left(\frac{1}{2a\tau} \frac{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} + \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}}{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} - \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}} - \frac{b}{2a} \right) dt \quad (58)$$

Horní integrační mez je značena stejně jako proměnná t . Nejedná se o chybu, ale o vědomé zjednodušení značení. Po vyřešení integrálu:

$$W(t) = \frac{F}{2a} \left\{ \left(\frac{1}{\tau} - b \right) t + 2 \ln \left[\frac{\tau}{2} \left(2av_0 + b + \frac{1}{\tau} - \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] \right\} \quad (59)$$

První člen na pravé straně rovnice (59) reprezentuje trvalé ztráty v ustáleném stavu. Odpovídá jim konstantní výkon P_{lim} podle rovnice (57), spotřebováváný na krytí všech třecích ztrát při jízdě rychlostí v_{lim} .

Druhý člen na pravé straně rovnice (59) je záporný a říká, o kolik je celková energie menší v případě akcelerace, oproti energii spotřebované za stejný čas v ustáleném limitním stavu při konstantním výkonu $P_{lim} = Fv_{lim}$ (v průběhu akcelerace totiž platí $v(t) \leq v_{lim}$, takže $p(t) \leq P_{lim}$) [4], [5], [9].

Námi užitý asynchronní motor byl schopen vyvinout maximální moment 26Nm, což odpovídá ekvivalentní tažné síle 1130,43N. Kdyby tento motor nebyl omezen otáčkově a jeho moment s otáčkami neklesal, dokázali bychom s vozidlem vyvinout rychlost dle (54):

$$v_{\lim} = \frac{1}{2a\tau} - \frac{b}{2a} = \sqrt{2 \frac{F - mg \sin \alpha - \xi mg \cos \alpha}{C_x S \rho} + \left(\frac{k_v}{C_x S \rho} \right)^2} - \frac{k_v}{C_x S \rho} =$$

$$\sqrt{2 \frac{1134 - 500 \cdot g \cdot 0 - 0,02 \cdot 500 \cdot g \cdot 1}{0,4 \cdot 1,864 \cdot 1,29}} + \left(\frac{0,1}{0,4 \cdot 1,864 \cdot 1,29} \right)^2} - \frac{0,1}{0,4 \cdot 1,864 \cdot 1,29} = \quad (60)$$

$$= 46,31 \text{ ms}^{-1} = 167 \text{ kmh}^{-1},$$

Parametry vozidla: $m = 500 \text{ kg}$ (celková hmotnost vozidla)

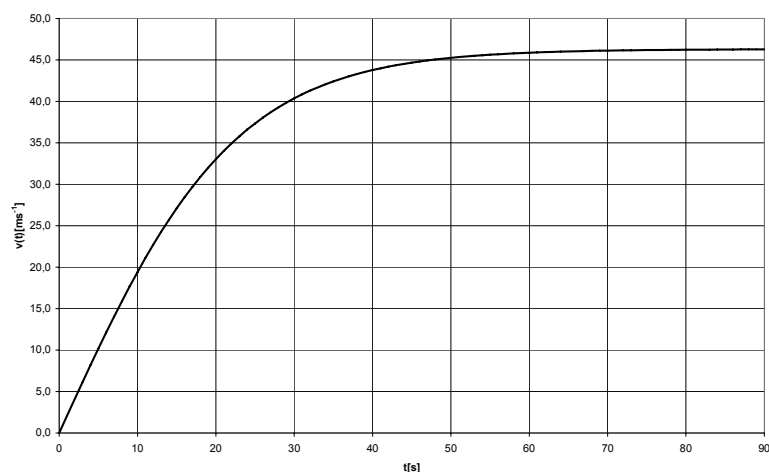
$S = 1.864 \text{ m}^2$ (čelní plocha vozidla)

$C_x = 0.4$ (koeficient aerodynamického odporu)

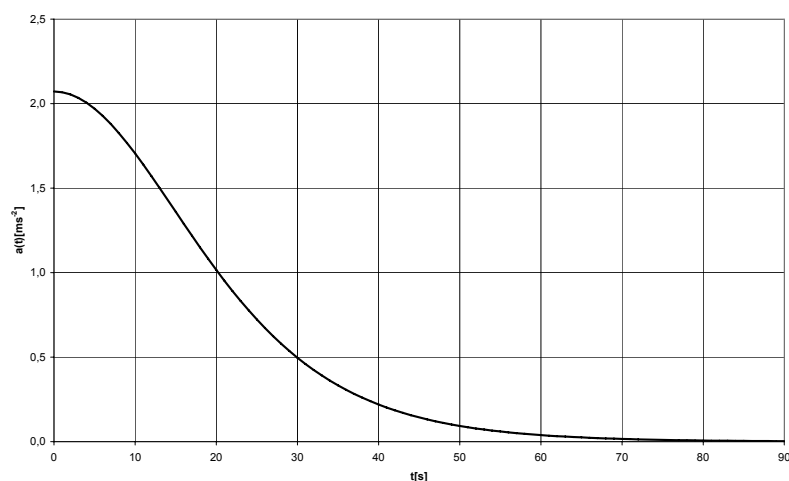
$\xi = 0.02$ (koeficient ztrát suchého a valivého tření)

$k_v = 0.1 \text{ kg/s}$ (koeficient ztrát viskozního tření)

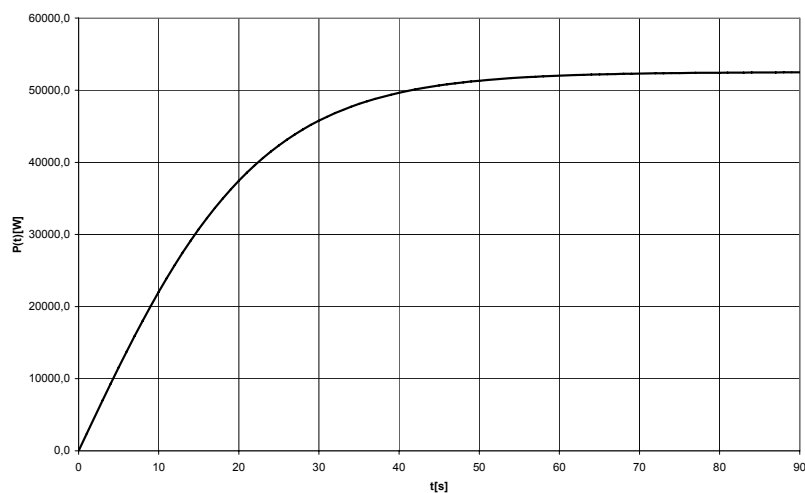
Charakteristiky dle rovnic (53), (55), (56) a (59):



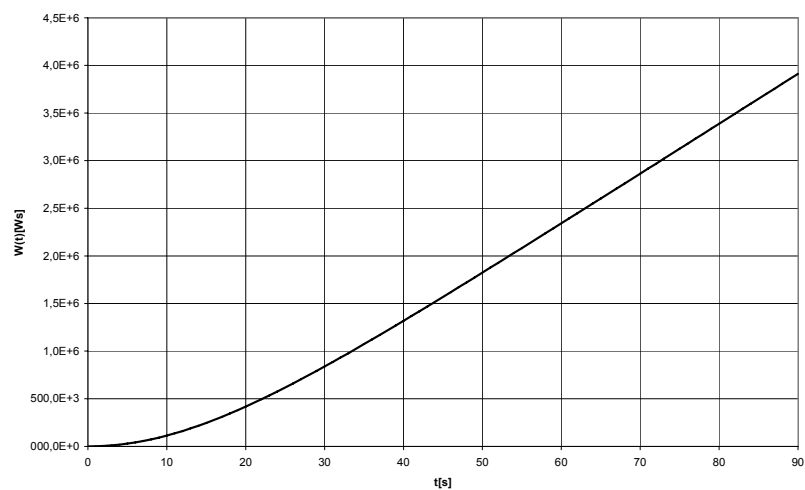
Obr. 5.1.1: Okamžitá rychlost



Obr. 5.1.2: Okamžité zrychlení



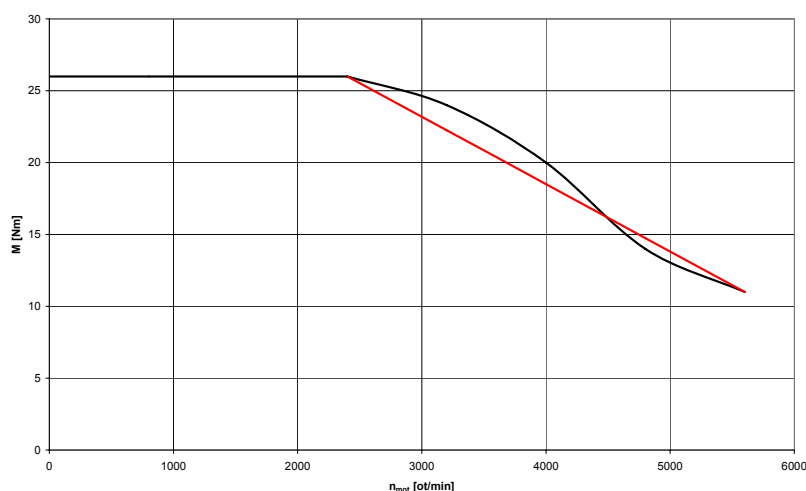
Obr. 5.1.3: Okamžitý výkon



Obr. 5.1.4: Odebraná energie

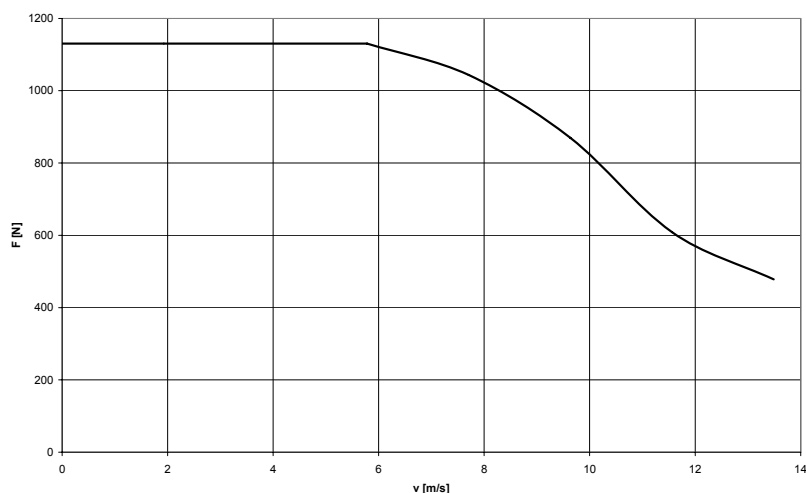
Skutečnost je ale taková, že nemáme motor, který by se dovedl takto chovat. Proto předchozí charakteristiky mají spíše informativní charakter a dále se zaměříme na zohlednění momentové charakteristiky motoru.

5.2 Zohlednění momentové charakteristiky motoru



Obr. 5.2.1: Momentová charakteristika pohonu vozidla

Vozidlo JAWA CHIC, do kterého jsme tento pohon instalovali, je navrženo a konstruováno na maximální rychlost 50km/h (13,89m/s). Pro tento účel byl převinut čtyřpólový asynchronní motor na nízké napětí a kotva vyvážena na maximální otáčky 5600 ot/min, které odpovídají nové maximální rychlosti vozidla 12,5m/s (45km/h). Momentovou charakteristiku můžeme také chápat jako grafickou závislost, která zobrazuje jakým maximálně možným momentem můžeme motor zatěžovat v závislosti na otáčkách hřídele. Pokud tuto charakteristiku přepočítáme na ekvivalentní tahnou sílu v závislosti na okamžité rychlosti, dostaneme následující závislost (obr. 5.2.2):



Obr. 5.2.2: Závislost maximální možné ekvivalentní tahné síly na rychlosti vozidla

V tabulce 5.2.1 jsou číselné hodnoty momentové charakteristiky. V prvním řádku jsou vyneseny hodnoty otáček, při kterých byl měřen moment motoru – řádek druhý. Ve třetím řádku jsou hodnoty aproximované momentové charakteristiky. Ve čtvrtém a pátém řádku jsou hodnoty rychlosti odpovídající otáčkám motoru a ekvivalentní tahné síly odpovídající momentu motoru.

n [ot/min]	0	800	1600	2400	3200	4000	4800	5600
M [N]	26	26	26	26	24	20	14	11
M _{aprox} [N]	26	26	26	26	22,25	18,5	14,75	11
v [m/s]	0,00	1,93	3,85	5,78	7,71	9,63	11,56	13,49
F [N]	1130,43	1130,43	1130,43	1130,43	1043,48	869,57	608,70	478,26

Tab. 5.2.1: Naměřené hodnoty momentové charakteristiky a hodnoty ekvivalentní tažné síly

Abychom v druhé části charakteristiky (odbuzený režim, síla s rychlostí klesá) mohli použít výpočet uvedený v kapitole 5.1 (uvažujeme všechny druhy ztrátových sil, ekvivalentní tažná síla je konstantní, nezávislá na rychlosti), aproximujeme část charakteristiky v odbuzeném režimu úsečkou (obr. 5.2.1, červená barva, vhodným způsobem řízení lze docílit, že síla neklesá hyperbolicky (konstantní výkon), ale přibližně lineárně) a další výpočet rozdělíme na dvě části. V první části (oblast konstantního momentu motoru, rychlost vozidla 0-5,78 m/s) platí řešení dle rovnic (39)-(53), (55).

V části druhé (oblast lineárního poklesu momentu, rychlost 5,78-12,5m/s) proto modifikujeme pohybovou rovnici (44) z důvodu lineárně klesající ekvivalentní tažné síly do tvaru (61) přidáním členu $-k \cdot v(t)$ na levou stranu rovnice.

$$F - kv(t) = m \frac{dv(t)}{dt} + mg \sin \alpha + \frac{1}{2} C_X \rho S v(t)^2 + k_v v(t) + \xi mg \cos \alpha . \quad (61)$$

Levá strana rovnice (61) (ekvivalentní tažná síla) přesně popisuje lineární aproximaci (obr. 5.2.1). Člen $-k \cdot v(t)$ převedeme na stranu pravou, čímž se formálně vrátíme ke tvaru rovnice s konstantní, na rychlosti nezávislou, ekvivalentní tažnou silou a její pokles formálně přisoudíme upravenému k_v viz. (61a).

$$F = m \frac{dv(t)}{dt} + mg \sin \alpha + \frac{1}{2} C_X \rho S v(t)^2 + k_v v(t) + kv(t) + \xi mg \cos \alpha \quad (61a)$$

Vytknutím $v(t)$ dostáváme:

$$F = m \frac{dv(t)}{dt} + mg \sin \alpha + \frac{1}{2} C_X \rho S v(t)^2 + v(t) \cdot (k_v + k) + \xi mg \cos \alpha \quad (61b)$$

Matematicky člen $-k \cdot v(t)$ vyjádříme pomocí rovnice (62):

$$kv(t) = (v(t) - v_0) \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right). \quad (62)$$

Dosazením (62) do (61a) dostáváme upravenou pohybovou rovnici:

$$F = m \frac{dv(t)}{dt} + mg \sin \alpha + \frac{1}{2} C_X \rho S v(t)^2 + (v(t) - v_0) \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right) + k_v v(t) + \xi mg \cos \alpha \quad (63)$$

Roznásobením členu $(v(t) - v_0) \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right)$ dostáváme (64):

$$F = m \frac{dv(t)}{dt} + mg \sin \alpha + \frac{1}{2} C_x \rho S v(t)^2 + v(t) \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right) - v_0 \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right) + k_v v(t) + \xi mg \cos \alpha \quad (64)$$

Převedením členu $v_0 \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right)$, který vyjadřuje navýšení ekvivalentní tažné síly, na levou stranu dostáváme (65). Člen $k_v + \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right)$ na pravé straně rovnice (65) vyjadřuje zvýšení koeficientu ztrát viskozním třením, dále jej značíme jako k_{vS} a veličiny v něm uvedené jsou: F - ekvivalentní tažná síla, $F_{\min}$ - velikost ekvivalentní tažné síly při nejvyšších otáčkách stroje, $v_{\max}$ - maximální rychlost vozidla, v_0 - počáteční rychlost vozidla, v tomto případě rychlost na zlomu momentové charakteristiky dle obr. 1, tj. $5,78 \text{ ms}^{-1}$.

$$F + v_0 \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right) = m \frac{dv(t)}{dt} + mg \sin \alpha + \frac{1}{2} C_x \rho S v(t)^2 + \left(k_v + \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right) \right) \cdot v(t) + \xi mg \cos \alpha \quad (65)$$

Upravená pohybová rovnice:

$$F + v_0 \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right) = m \frac{dv(t)}{dt} + mg \sin \alpha + \frac{1}{2} C_x \rho S v(t)^2 + k_{vS} v(t) + \xi mg \cos \alpha \quad (65a)$$

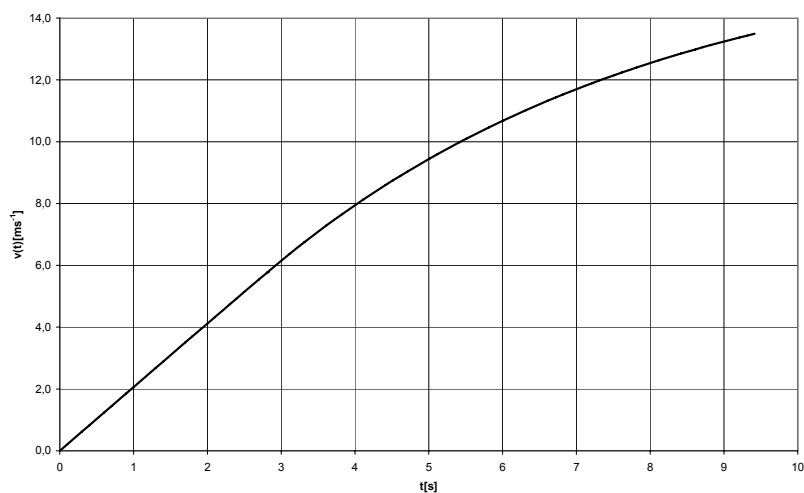
Úpravami viz. rovnice (61a)-(65a) se nám podařilo formálně zahrnout lineární úbytek momentu (v odbuzeném režimu) v závislosti na rychlosti, díky čemuž můžeme pro další výpočty použít rovnice (39)-(53), (55), do kterých dosadíme nové hodnoty ekvivalentní tažné síly F dle rovnice (66) a koeficientu ztrát viskozním třením dle rovnice (67).

$$F + v_0 \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right) = 1130,43 + 5,78 \cdot \left(\frac{1130,43 - 478,26}{13,49 - 5,78} \right) = 1619,35 \text{ N} \quad (66)$$

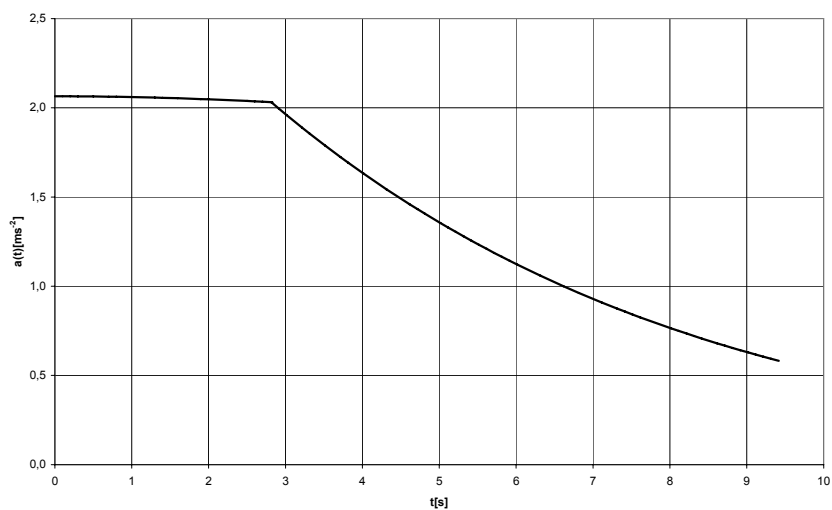
$$k_{vS} = k_v + \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right) = 0,1 + \left(\frac{1130,43 - 478,26}{13,49 - 5,78} \right) = 84,69 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (67)$$

Charakteristiku výkonu sestavíme podle rovnice:

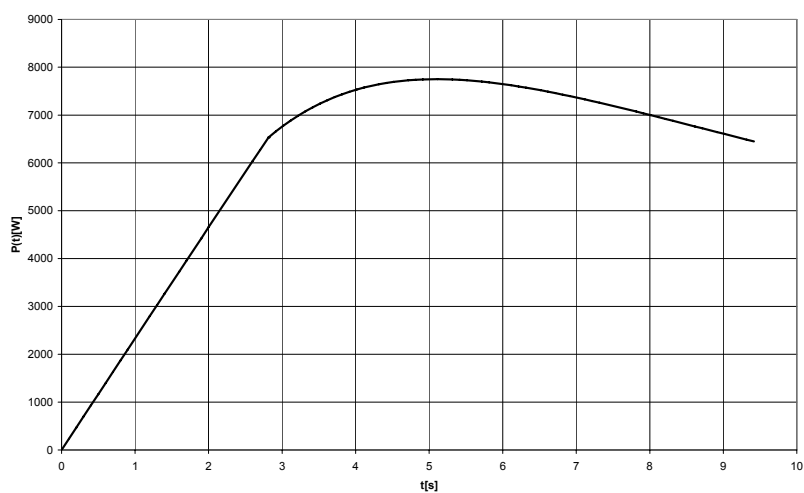
$$p(t) = F(t) \cdot v(t) = \left(F - (v(t) - v_0) \cdot \left(\frac{F - F_{\min}}{v_{\max} - v_0} \right) \right) \cdot v(t) \quad (68)$$



Obr. 5.2.3: Okamžitá rychlost



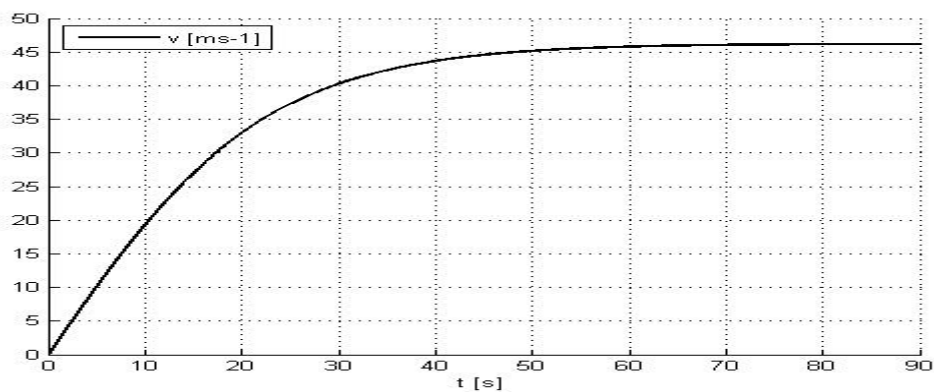
Obr. 5.2.4: Okamžité zrychlení



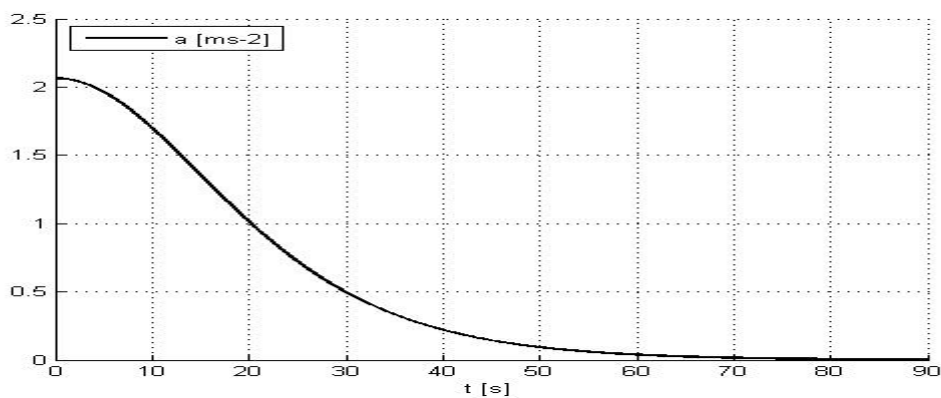
Obr. 5.2.5: Okamžitý výkon

5.3 Ověření rovnic dle kapitol 5.1 a 5.2 simulacemi

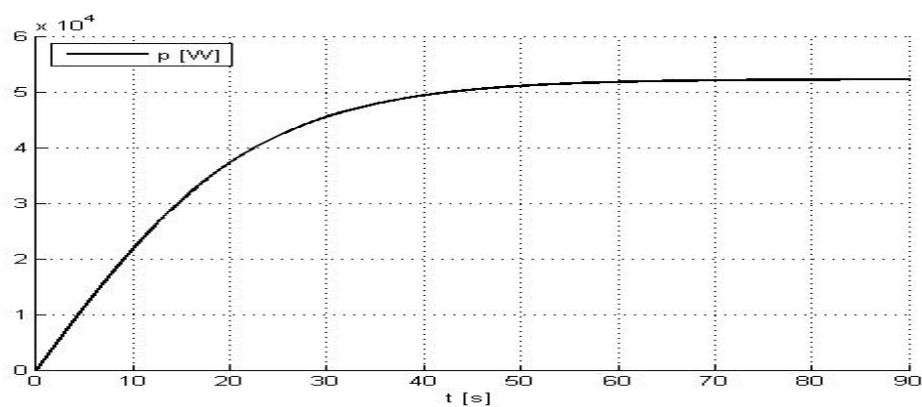
Simulací rovnice (45) v programu Matlab dostaneme následující charakteristiky. Ekvivalentní tažná síla je konstantní a je rovna $F_p=1130,43$. Pro simulace byl použit model dle obrázku 5.3.5.



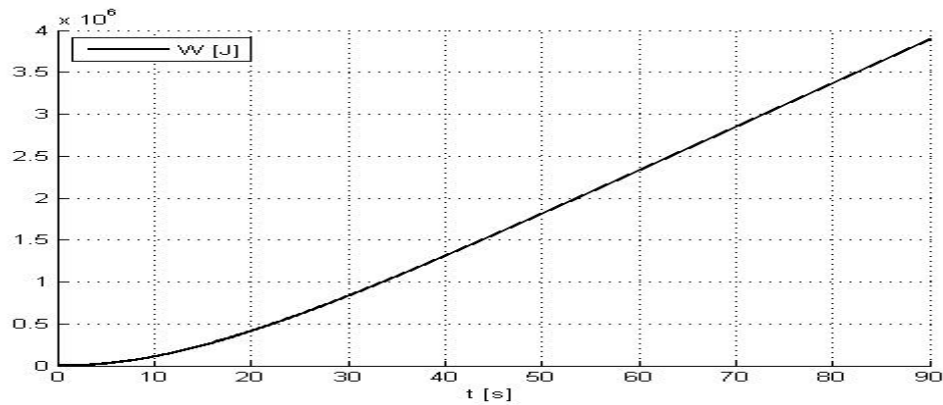
Obr. 5.3.1: Okamžitá rychlost



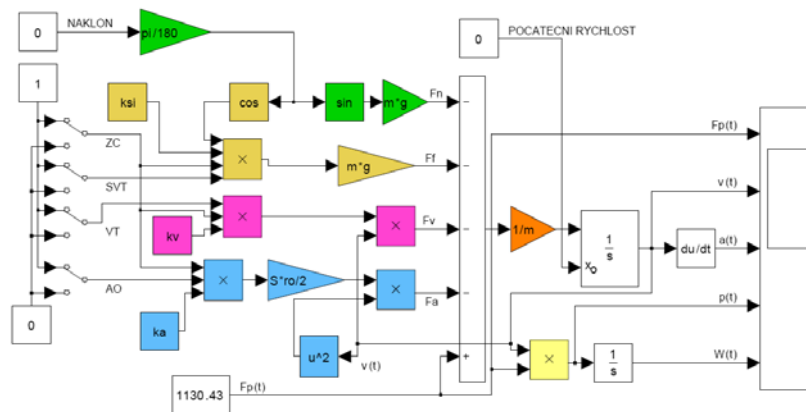
Obr. 5.3.2: Okamžité zrychlení



Obr. 5.3.3: Okamžitý výkon



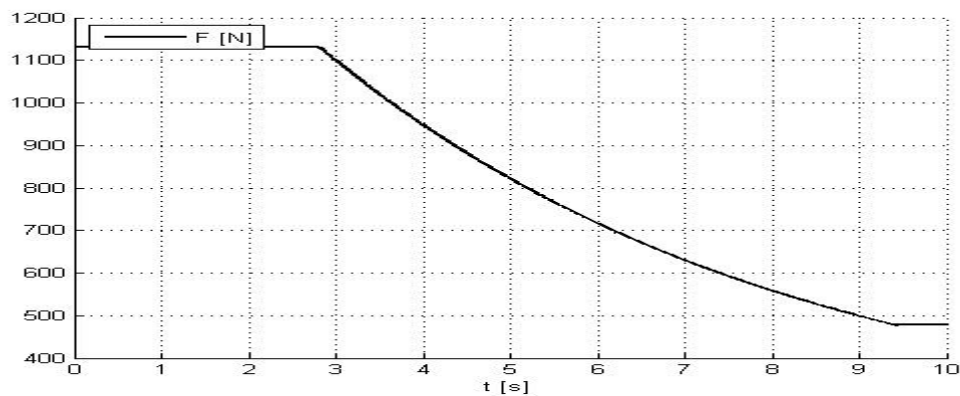
Obr. 5.3.4: Odebraná energie



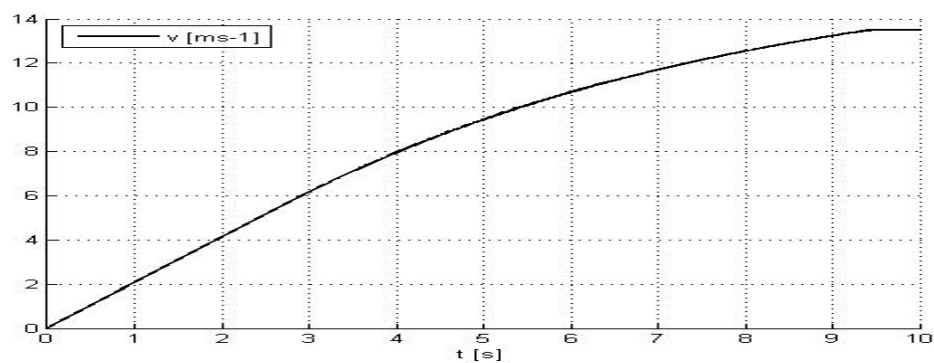
Obr. 5.3.5: Model pro simulaci rovnice (45)

Výsledky simulace rovnice (45) se shodují s výsledky výpočtů dle rovnic (39)-(53), (55), (56), (59).

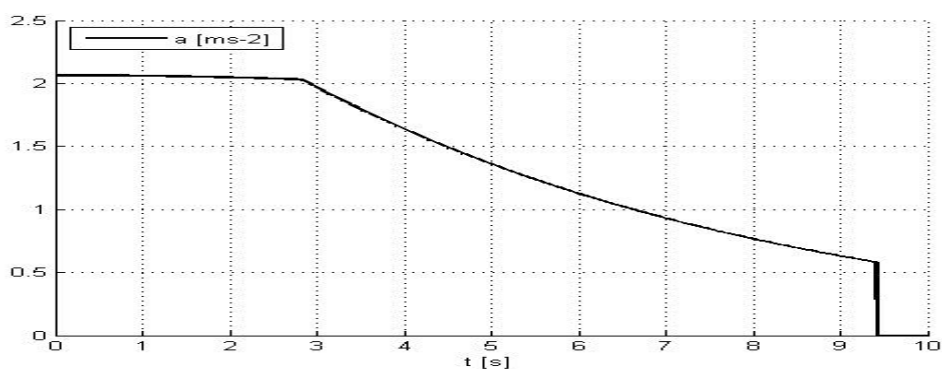
Pro zohlednění aproximované momentové charakteristiky je užit model z obr. 5.3.11 (červená LOOK-UP TABLE definuje maximální moment stroje v závislosti na rychlosti vozidla dle obr. 5.2.1, pomocí červených GAINů přepočítáváme moment na ekvivalentní tažnou sílu, dynamickou limitací červené barvy pak omezuje ekvivalentní tažnou sílu na velikost proporcionálně odpovídající červené LOOK-UP TABLE). Zde již rozlišujeme požadovanou tažnou sílu $F_p = 2000\text{N}$, která je konstantní a skutečnou tažnou sílu F , kterou je za vozidlo taženo.



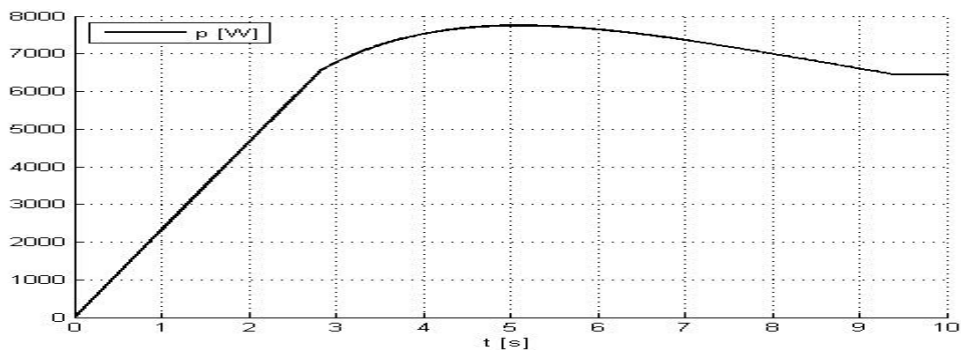
Obr. 5.3.6: Ekvivalentní tažná síla



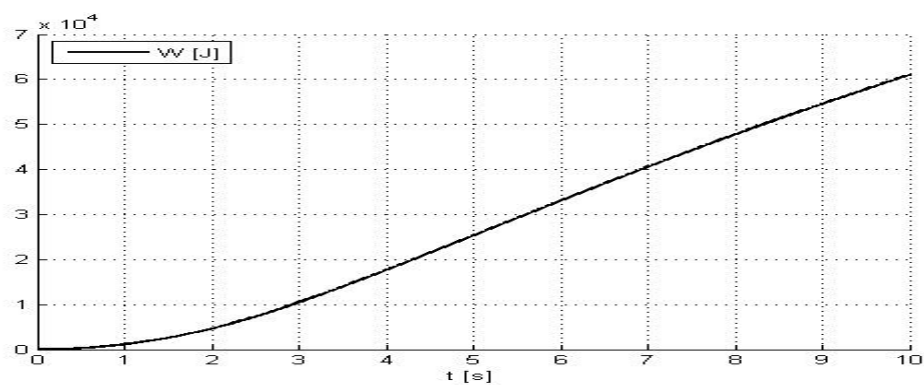
Obr. 5.3.7: Okamžitá rychlost



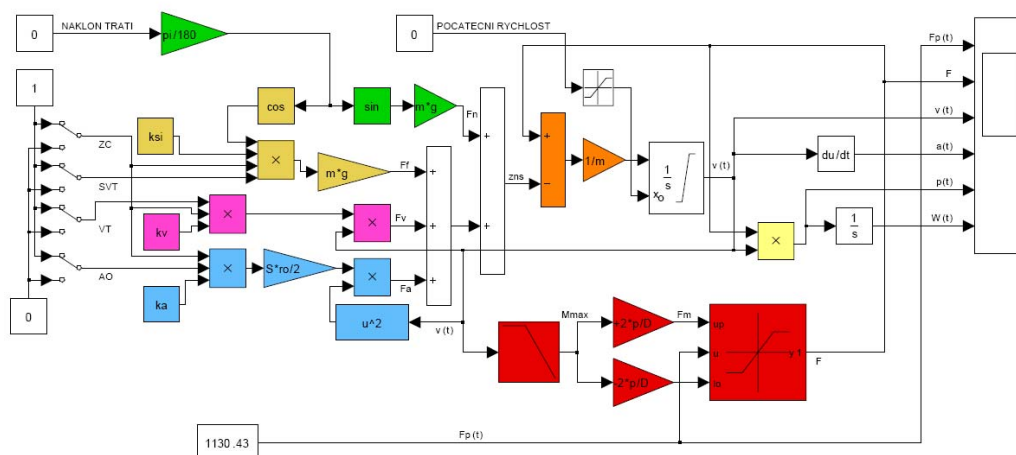
Obr. 5.3.8: Okamžité zrychlení



Obr. 5.3.9: Okamžitý výkon



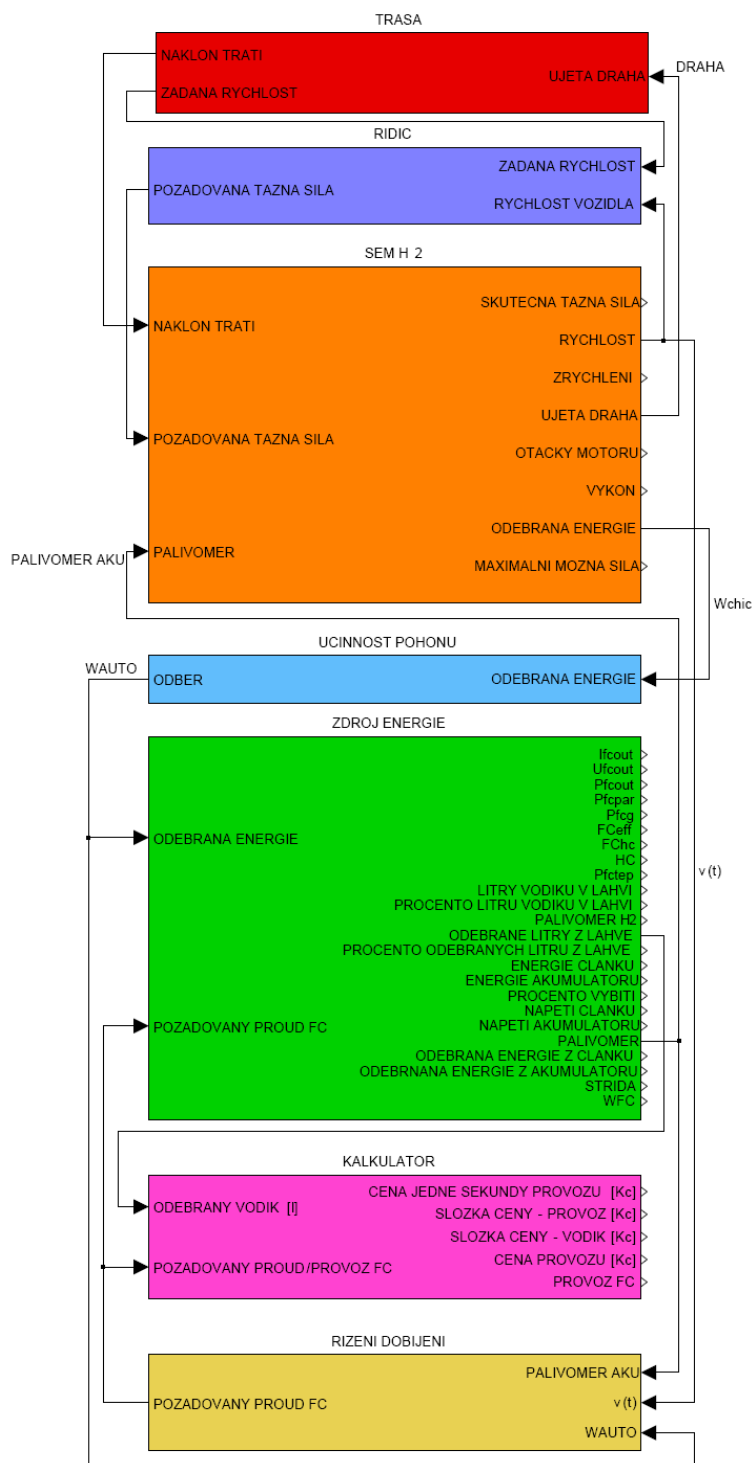
Obr. 5.3.10: Odebraná energie



Obr. 5.3.11: Model simulace rovnice (45) se zohledněnou momentovou charakteristikou pohonu

Výsledky simulace rovnice (45) se zohledněnou momentovou charakteristikou se shodují s výsledky výpočtů rovnic (42)-(53), (55) s upravenými koeficienty dle rovnic (66) a (67).

6. Matematický model dynamiky vozu



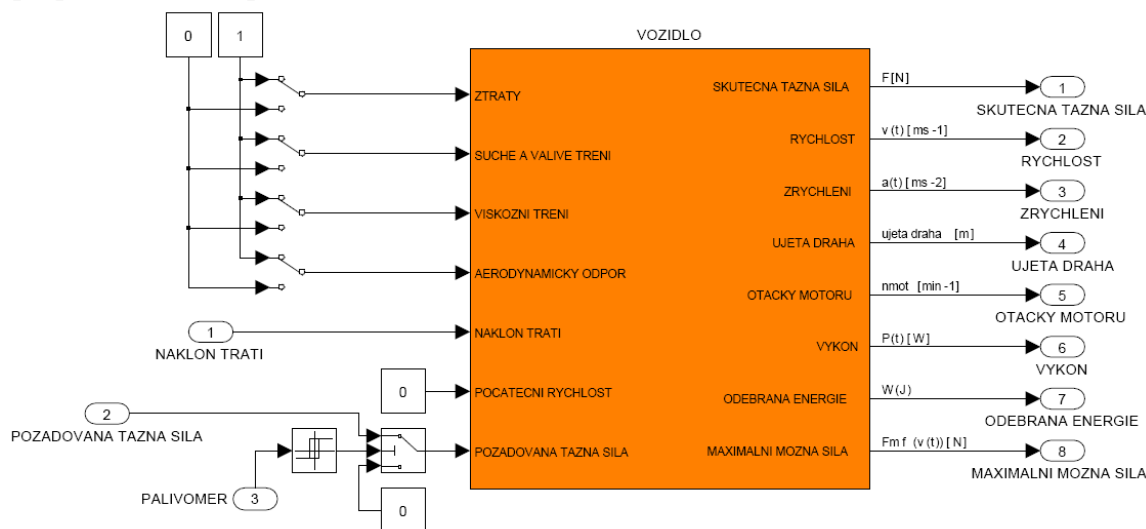
Obr. 6.1: Matematický model vozu

Na obrázku 6.1 je blokové schéma matematického modelu JAWA CHIC užíteho pro simulace. Bloky „trasa“ a „řidič“ nahrazují lidského řidiče „za volantem“. Oranžový blok „SEM H₂“ reprezentuje vozidlo od hřídele motoru po kola na vozovce. Vývod „odebraná energie“ z tohoto bloku dává informaci o odebrané energii za výstupu motoru – hřídeli. Aby tato energie odpovídala energii elektrické, odebrané z trakčního akumulátoru, je dále zařazen modrý blok účinnosti pohonu. V tomto bloku se navyšuje energie odebraná na hřídeli motoru o energii, která se v pohonu přemění v teplo (ztráty v motoru a měniči). Zelený blok „zdroj energie“ představuje soustavu trakčního akumulátoru, dvojice palivových článků a tlakové láhve s vodíkem. Fialový blok „kalkulátor“ počítá náklady na jeden kilometr ujeté trasy.

6.1 Matematický model dynamiky SEM H₂

Model SEM H₂ používá jako subsystém model VOZIDLO. Struktura je takto navržena proto, aby samotný model VOZIDLO bylo možné použít i pro jiné simulace. Přepínači zařazujeme do simulace ztráty, konstantou nula nastavíme nulovou počáteční rychlost. Vstupem do tohoto modelu je informace o náklonu trati, signál požadované tažné síly a informace o stavu „paliva“. Je-li na začátku simulace v „nádrži“ více jak 95% paliva, je za vozidlo táhnuto silou ze vstupu 2. Dojde-li v průběhu simulace k úplnému vybití trakčního akumulátoru, zařadí se nulová tažná síla. Fakticky je tak simulována situace, kdy po spotřebování veškerého paliva z nádrže vozidlo dojíždí svojí setrvačností.

Výstupy tohoto modelu jsou: skutečná tažná síla (zohledněna momentová charakteristika motoru), rychlost, zrychlení, ujetá dráha, otáčky motoru, výkon na hřídeli motoru, odebraná energie z hřídele motoru a maximální možná síla (proporcionálně odpovídá omezení momentovou charakteristikou).



Obr. 6.1.1: Matematický model SEM H₂

6.1.1 Matematický model dynamiky vozidla

Matematický model vozidla a pohonu vychází z upravené pohybové rovnice (44) (viz. kapitola 5):

$$F = m \frac{dv}{dt} + mg \sin \alpha + \xi mg \cos \alpha + k_v v(t) + \frac{k_A S \rho v^2(t)}{2}. \quad (69)$$

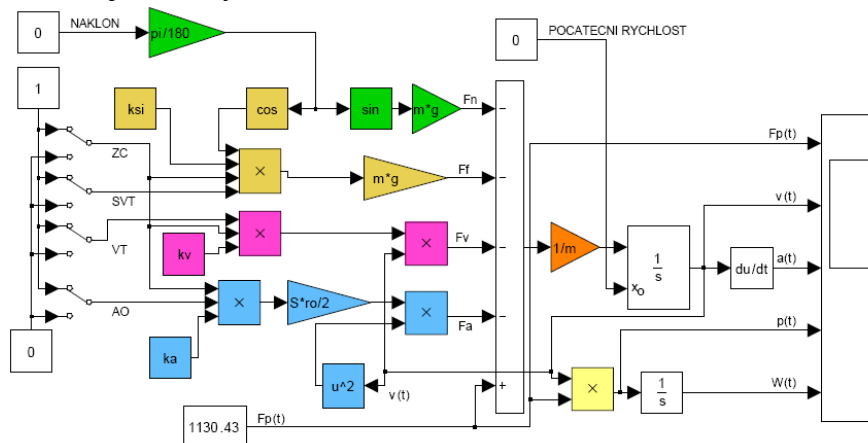
Složka $m \cdot g \cdot \sin \alpha$ vyjadřuje sílu k překonání náklonu vozovky. Při jízdě do kopce působí proti tažné síle, při jízdě s kopce se k tažné síle přičítá.

Složce $\xi \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$ odpovídá síla potřebná k překonání suchého tření. Tato síla bude vždy působit proti tažné síle, je závislá na náklonu trati a nezávislá na rychlosti.

Složka $k_v \cdot v(t)$ je složkou vyjadřující odporovou sílu způsobenou viskozním třením, tato síla je lineárně závislá na rychlosti.

Složka $\frac{k_A \cdot S \cdot \rho \cdot v^2(t)}{2}$ vyjadřuje vliv aerodynamického odporu karoserie, na kterou má rozhodující vliv její tvar vyjádřený součinem koeficientu aerodynamického odporu a plochy karoserie kolmé k tažné síle $k_A \cdot S$, závislá na kvadrátu rychlosti.

Základní model, ze kterého se vycházelo při návrhu matematického modelu je uveden na obrázku 6.1.1.1 a je totožný s obrázkem 5.3.5.



Obr. 6.1.1.1: Základní model vozidla

Pro sestavení modelu bylo zapotřebí vyjádřit derivaci z pohybové rovnice:

$$\frac{dv}{dt} = \left(F - mg \sin \alpha - \xi mg \cos \alpha - k_v v(t) - \frac{k_A S \rho v^2(t)}{2} \right) \cdot \frac{1}{m}, \quad (70)$$

tato derivace je vedena do bloku integrátoru, na jehož výstupu dostáváme informaci v podobě aktuální rychlosti ($v(t)$). Derivací signálu rychlosti je signál zrychlení ($a(t)$). Součinem aktuální rychlosti a tažné síly je aktuální výkon „tažného“ zařízení ($p(t)$). Integrací výkonu dostaneme informaci o spotřebované energii během akceleraace, dodané energii během rekuperačního brzdění ($W(t)$).

Pomocí bloku součtu jsou od tažné síly odečítány jednotlivé složky ztrát a složka náklonu vozovky. U složek ztrát jsou záměrně připojeny násobičky a přepínače s konstantami „0“ a „1“, abychom mohli ztráty deaktivovat. Tato úprava nemá žádný fyzikální smysl, sloužila pouze k odladění modelu a jeho detailnímu pochopení. Na součtový blok jsou přivedeny signály jednotlivých ztrát a signál tažné síly. Bloky zelené barvy reprezentují složku sil pro náklon vozovky, běžové bloky suché a valivé tření, růžové bloky viskozni tření a modré bloky vyjadřují aerodynamickou složku ztrát.

Ve vozidle je jako zdroj ekvivalentní tažné síly instalován asynchronní motor s převodovkou, která ve vozidle zůstala z původního pohonu. Samotný motor lze popsat momentovou charakteristikou, kterou je třeba v simulaci zohlednit.

$n [\text{min}^{-1}]$	0	800	1600	2400	3200	4000	4800	5600
$M [\text{Nm}]$	26	26	26	26	24	20	14	11
$v [\text{ms}^{-1}]$	0	1,9268	3,8537	5,7805	7,7074	9,6342	11,5611	13,4879

Tab. 6.1.1.1: Momentová charakteristika stroje – naměřené hodnoty

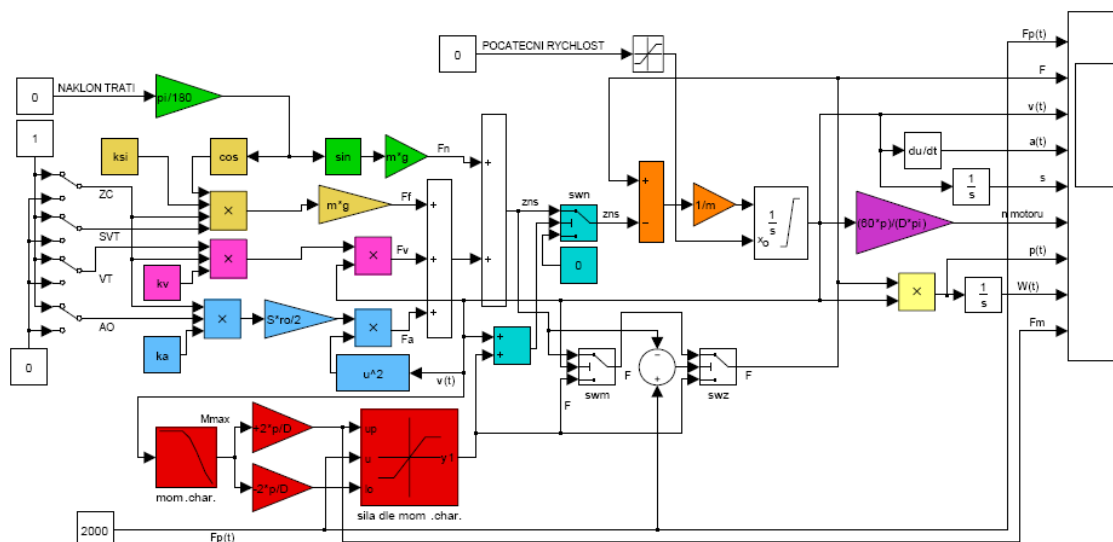
V tabulce 6.1.1.1 jsou naměřené hodnoty momentové charakteristiky námi užitého asynchronního motoru. První řádek tabulky odpovídá bodům, ve kterých byl měřen moment motoru (druhý řádek) a v posledním řádku je otáčkám odpovídající rychlost automobilu. Otáčky motoru proporcionálně odpovídají rychlosti vozidla.

Model z obr. 6.1.1.1 byl doplněn o fialový blok přepočtu rychlosti na otáčky motoru $[\text{min}^{-1}]$ a bloky červené. GAIN přepočtu rychlosti na otáčky motoru sloužil pouze k odkontrolování modelu. V červené LOOK-UP table s názvem „mom. char“ jsou zapsány hodnoty z tabulky 6.1.1.1 (okamžité rychlosti odpovídá nějaký maximální moment motoru). Následujícími GAINy je moment přepočítáván na tažnou sílu (okamžité rychlosti odpovídá nějaká maximální tažná síla, kterou je motor schopen vyvinout přes převodovku a kola). Pomocí dynamické limitace omezujeme požadovanou tažnou sílu na hodnotu, kterou je motor schopen vyvinout. Jinými slovy, pokud žádáme hodnotu tažné síly nižší, než je v tu danou rychlost motor schopen vyvinout, „táhneme za automobil“ touto silou. Pokud je požadovaná síla vyšší, než je v tu danou rychlost motor schopen vyvinout, pak za vozidlo táhneme silou, která odpovídá v té dané rychlosti maximálnímu momentu motoru. Síla je tedy pomocí dynamické limitace omezována na $+F_m$ a $-F_m$ (F_m – maximální možná síla, kterou je v danou rychlost motor schopen vyvinout).

Další úprava modelu spočívá v zařazení přepínače SWM na výstup dynamické limitace, který reaguje na dosažení maximální rychlosti ($12,5 \text{ms}^{-1}$). Simulační program měl „potřebu“ do modelu vnucovat plnou velikost ekvivalentní tažné síly. Fyzikálně je situace ale taková, že pokud dojde k dosažení maximální rychlosti, přestane se

projevovat složka $m \frac{dv}{dt}$ a vozidlo odebírá pouze výkon potřebný k překonání

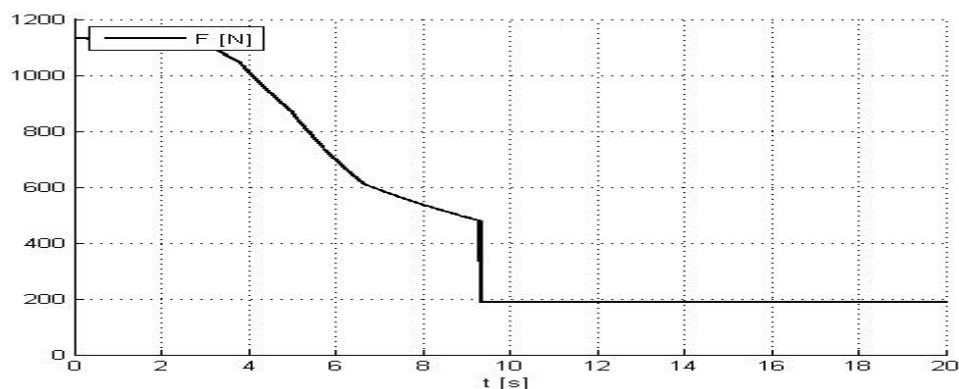
odporových sil a síly k překonání náklonu vozovky. Abychom mohli model brzdít, zastavovat a dále i akcelarovat, byl do modelu zařazen komparátor tvořený pomocí přepínače SWZ a předřazeného sumátoru. Reakce přepínače SWZ je dána kladnou hodnotou řídicího signálu. Je-li požadovaná tažná síla větší jak součet sil pokrývajících ztráty a náklon vozovky, je brána v úvahu síla z výstupu dynamické limitace, jdoucí přes přepínač SWM. Je-li vozidlo v akceleraci, táhne se silou z dynamické limitace, je-li rychlost konstantní maximální, táhne se silou pokrývajících ztráty a náklon vozovky. Pokud chceme vozidlo z konstantní maximální rychlosti zpomalit či zbrzdít, musíme tak učinit silou menší než je součet sil ztrátových a náklonu vozovky, poté bude rozdíl sil na vstupu SWZ záporný a přepínač SWZ překloupí a zařadí tažnou sílu přímo z výstupu dynamické limitace. Budeme-li vozidlo táhnout (brzdít) silou v intervalu <odporová síla suchého a valivého tření + síla pokrývajících náklon vozovky; ztrátové síly + síla pokrývajících náklon vozovky>, vozidlo zpomalí a jeho rychlost se ustálí v intervalu $<0; v_{\max}>$. Pokud budeme za vozidlo táhnout silou menší, a to v intervalu $<-F_m$; odporová síla suchého a valivého tření + síla pokrývajících náklon vozovky>, vozidlo zastaví. Čím bude tažná síla menší, tím vozidlo zastaví rychleji.



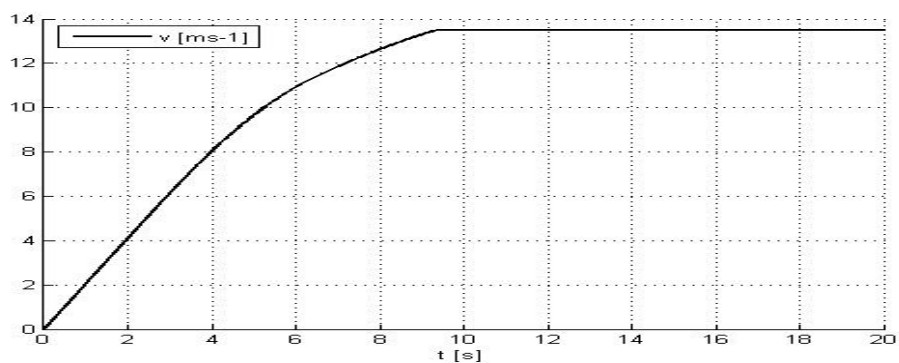
Obr. 6.1.1.2: Koncová podoba modelu použitá pro další simulace

V modelu je navíc zařazen přepínač SWN, který v podstatě představuje mechanickou brzdou, držící vozidlo v zabrzděném stavu dokud nezačne působit tažná síla. Například ve vozech Citroen je tato funkce nazývána HILL ASISTENT (rozejzdový asistent). Jinými slovy, je-li vozidlo v klidu, na vozovce s jakýmkoli náklonem, je brzděno jiným způsobem než elektromotorem. Z pohledu konstrukce modelu je užití přepínače SWN výhodné, protože jakmile vozidlo zastaví, tak bez vnějšího zásahu (tažná síla) se nerozjede. Model vozidla je konstruován pouze pro jízdu vpřed. Jízda couváním za účelem parkování není v této práci simulována ani uvažována.

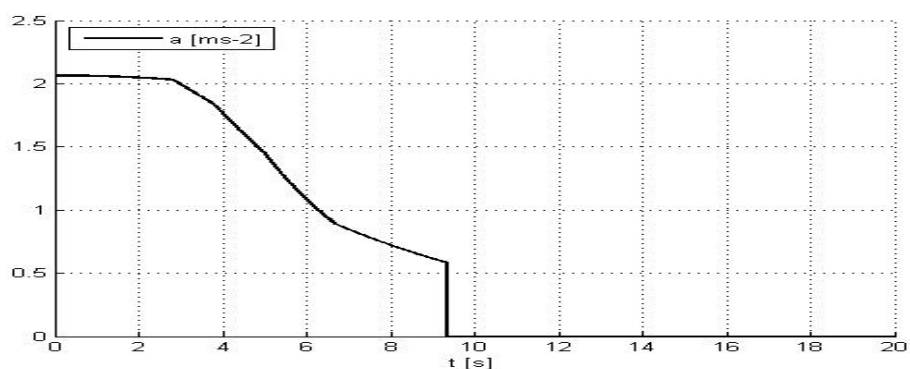
Odezva modelu z obr. 6.1.1.2 na požadovanou konstantní tažnou sílu $F_p=2000\text{N}$:



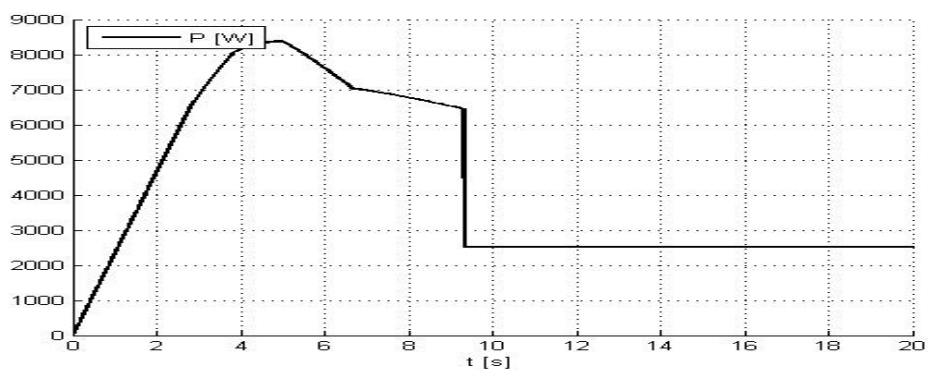
Obr. 6.1.1.3: Skutečná ekvivalentní tažná síla



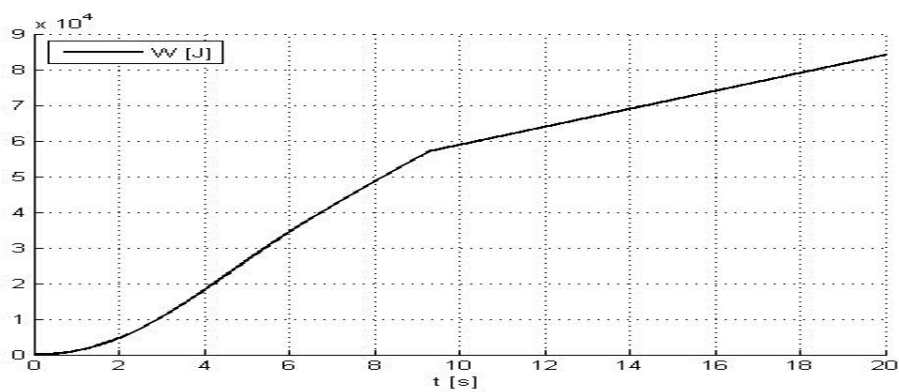
Obr. 6.1.1.4: Okamžitá rychlost



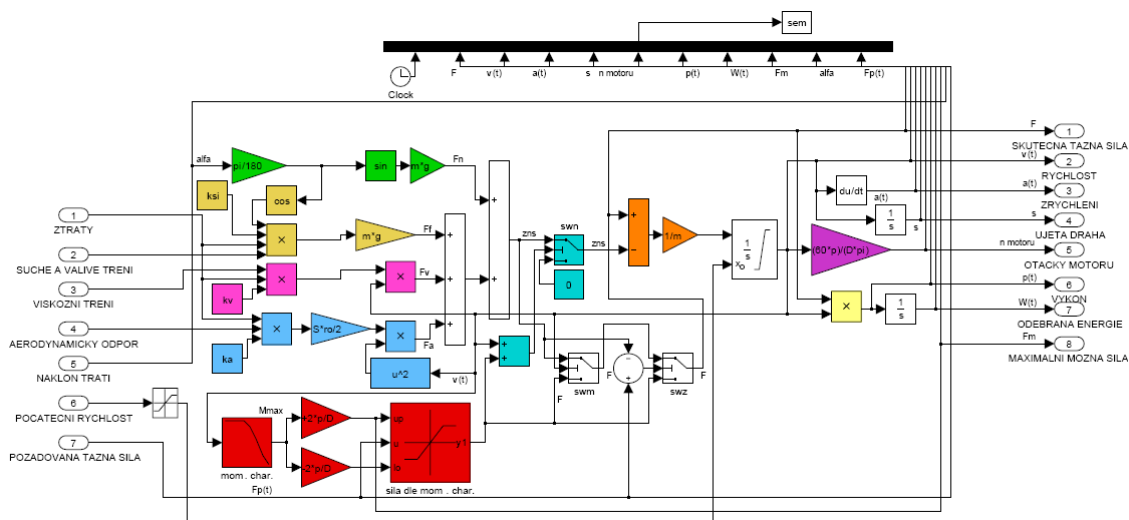
Obr. 6.1.1.5: Zrychlení



Obr. 6.1.1.6: Výkon



Obr. 6.1.1.7: Odebraná energie

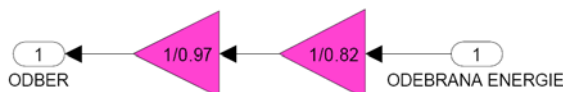


Obr. 6.1.1.8: Koncová podoba modelu upravená jako subsystém pro model SEM H₂

6.2 Matematický model účinnosti pohonu

Signál “odebraná energie” na bloku SEM H₂, obr. 6.1, kapitola 6. **Matematický model vozu** má charakter spotřebované mechanické energie během jízdy. Abychom zohlednili ztráty v motoru a trakčním měniči, je mezi výstup bloku SEM H₂ “odebraná energie” a vstup bloku ZDROJ ENERGIE “odebraná energie” zařazen blok ÚČINNOST POHONU. Vnitřní schéma bloku je na obr. 6.2.1.

Mechanická energie odebraná během jízdy je povýšena o ztráty energie, výstup bloku má charakter elektrické energie odebrané z trakčního akumulátoru.



Obr. 6.2.1: Vnitřní schéma bloku ÚČINNOST POHONU

6.3 Matematický model zdroje energie

Matematický model zdroje energie využívá čtyři subsystémy: model sériové dvojice palivových článků, model tlakové láhve, model trakčního akumulátoru a model pro výpočet střídý řídicího signálu stabilizačního měniče.

Trakční akumulátor zde slouží jako špičkový zdroj energie pro akceleraci a jako špičkový spotřebič při rekuperativním brzdění. Ve výchozím stavu uvažujeme akumulátor plně nabitý (počáteční stav baterie – 100%). Energie spotřebovaná (dodaná) vozidlem se sčítá s energií dodanou palivovými články. Rozdíl se pak odebrává (ukládá) z (do) trakčního akumulátoru. Vstupy systému jsou: 1 – „odebraná energie“ a 2 – „požadovaný proud FC“. Řízením dobíjení sledujeme hladinu energie v trakčním akumulátoru a nastavujeme požadovaný proud na výstupu palivových článků. Je-li množství vodíku v tlakové láhvi rovno nule – láhev je prázdná – přepínač na vstupu modelu sériové dvojice palivových článků nastaví požadovaný proud na hodnotu nula. Nelze totiž vyrábět elektrickou energii bez vodíku. Model palivových článků je

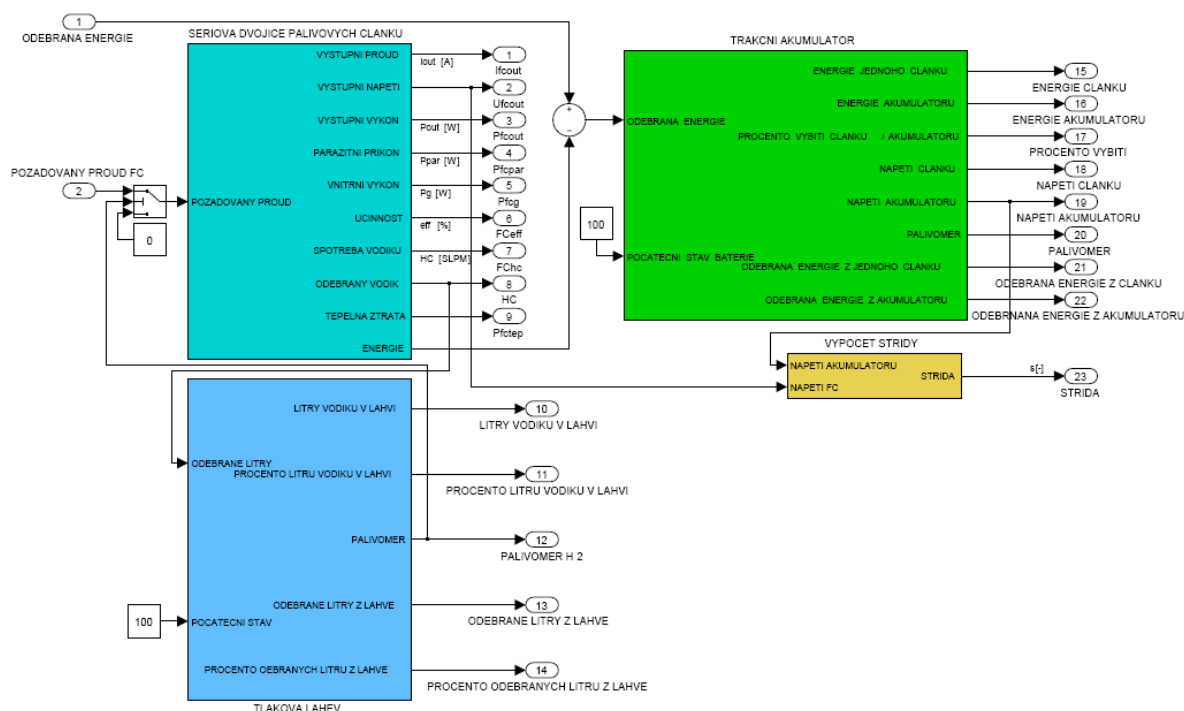
„napájen“ z modelu tlakové láhve. Vstupy tohoto modelu jsou „odebrané litry“ – množství odebraného vodíku palivovými články a „počáteční stav“ – výchozí množství vodíku v láhvi (v tomto případě 100%). Jedním z výstupů je bezrozměrná informace o množství vodíku v láhvi – výstup „palivoměr“, kterým ovládáme přepínač na vstupu modelu sériové dvojice palivových článků.

Model trakčního akumulátoru má dva vstupy: 1 – „odebraná energie“ a 2 – „počáteční stav baterie“, v našem případě uvažujeme na začátku simulace trakční akumulátor plně nabitý (100%).

Blok výpočtu střidy vyhodnocuje poměr výstupního napětí sériové dvojice palivových článků a napětí trakčního akumulátoru, výsledkem je informace o střídě řídicího signálu stabilizačního měniče.

Výstupy modelu zdroje energie jsou tyto: 1 – „ I_{fcout} “ – výstupní proud palivových článků, 2 – „ U_{fcout} “ – výstupní napětí palivových článků, 3 – „ P_{fcout} “ – výstupní výkon palivových článků, 4 – „ P_{fcpar} “ – parazitní výkon palivových článků, 5 – „ P_{fcg} “ – vnitřní výkon palivových článků, 6 – „ FC_{eff} “ – účinnost palivových článků, 7 – „ FC_{hc} “ – spotřeba vodíku palivových článků, 8 – „ HC “ – odebraný vodík palivovými články, 9 – „ P_{fctep} “ – tepelná ztráta palivových článků, 10 – „litry vodíku v láhvi“ – množství vodíku v láhvi, 11 – „procento litrů vodíku v láhvi“ – poměrné množství vodíku v láhvi, 12 – „palivoměr H_2 “ – bezrozměrná informace o množství vodíku v láhvi, 13 – „odebrané litry z láhve“ – množství odebraného vodíku z láhve, 14 – „procento odebraných litrů z láhve“ – poměrné množství odebraného vodíku z láhve, 15 – „energie článku“ – množství energie v jednom článku trakčního akumulátoru, 16 – „energie akumulátoru“ – množství energie v trakčním akumulátoru, 17 – „procento vybití“ – poměrná hodnota vybití trakčního akumulátoru (jednoho článku trakčního akumulátoru), 18 – „napětí článku“ – napětí jednoho článku trakčního akumulátoru, 19 – „napětí akumulátoru“ – napětí trakčního akumulátoru, 20 – „palivoměr“ – bezrozměrná informace o množství energie v akumulátoru, 21 – „odebraná energie z článku“ – odebraní energie z jednoho článku trakčního akumulátoru, 22 – „odebraná energie z akumulátoru“ – odebraná energie z trakčního akumulátoru v průběhu simulace, 23 – „střída“ – střída řídicího signálu trakčního akumulátoru.

Model má charakter kombinované nádrže elektrické energie.



Obr. 6.3.1: Vnitřní schéma bloku ZDROJ ENERGIE

6.3.1 Matematický model palivového článku

Matematický model je postaven na čtyřech základních charakteristikách palivového článku, které jsou uvedeny v uživatelském manuálu⁸. Jsou to funkční závislosti výstupního napětí, parazitního výkonu, tepelné ztráty a spotřeby vodíku na výstupním proudu. Výstupním napětím se myslí napětí na výstupních svorkách, parazitním výkonem výkon potřebný k pokrytí spotřeby řídicí a monitorovací elektroniky a výkon, který spotřebovává kompresor a ventilátor na chlazení systému. Tepelná ztráta je zrtátový tepelný výkon, který vznikne při chemické reakci. Charakteristika spotřeby vodíku je závislost odběru vodíku ve funkční závislosti na proudu.

Model má jeden vstup 1 – „požadovaný proud“ [A]. U tohoto vstupu se vyhodnocuje velikost žádaného proudu pomocí bloku přepínače. Pokud je žádaný proud vyšší nebo roven 0,5A, na výstupu přepínače je logická 1, která odblokuje odpovídající veličiny na výstupech 1-9 (signál ENABLE). Pokud je požadavek menší, jsou tyto výstupy zablokovány. Hranice 0,5A je hodnota, od které jsou dle manuálu definovány charakteristiky, úpravou je v simulaci zohledněno zapnutí a vypnutí palivových článků. Při zapnutí palivových článků musí nejprve dojít k „nastartování“ chemické reakce, tato doba je dle manuálu 120s a k jejímu zohlednění slouží blok ODEZVA.

Samotný požadovaný proud je ihned za vstupem omezen limitací na interval $\langle 0,5; 45 \rangle$ A. Pro proud menší než 0,5A nejsou definovány charakteristiky, proud 45A odpovídá maximálnímu možnému proudu, který jsou palivové články schopny vytvořit. Na výstupu limitace je signál omezeného proudu označen jako „proud“ a je veden na vstupy všech charakteristik a také do bloku násobičky a jako druhý signál je připojen signál „ENABLE“. Součin pak odpovídá výstupu 1 – „výstupní proud“ [A]. Tento výstup je zde zařazen kvůli bloku limitace na vstupu 1.

⁸ Charakteristiky převzaty z: Nexa™ Power Module User's Manual: MAN5100078

Jednotlivé charakteristiky jsou vytvořeny pomocí LOOK-UP table, které byly přeneseny z uživatelského manuálu pomocí digitálního posuvného měřítka a trojčlenky. Výstupní napětí je odvozeno pomocí charakteristiky „napětí“ a na výstupu LOOK-UP table je násobeno dvěma (sériová dvojice palivových článků). Pomocí následující násobičky je na výstup 2 – „výstupní napětí“ [V] vyveden signál s hodnotou výstupního napětí odpovídající intervalu $\langle 0,5;45 \rangle$ A. Součinem signálů „napětí“, „proud“ a „ENABLE“ dostáváme „výstupní (elektrický) výkon“ [W] na výstupu 3. Charakteristika parazitního výkonu je odvozena pomocí LOOK-UP table „parazitní výkon“, její výstup je násoben dvěma a pomocí součinu se signálem „ENABLE“ tvoří výstup 4 – „parazitní příkon“ [W]. Stejně tak charakteristika „tepelná ztráta“ je na výstupu násobena dvěma a opět pomocí součinu se signálem „ENABLE“ tvoří výstup 9 – „tepelná ztráta“ [W]. Součtem signálů „parazitní výkon“ a „výstupní výkon“ a součinem se signálem „ENABLE“ dostáváme výstup 5 – „vnitřní výkon“ [W].

Účinnost přeměny energie je definována pomocí rovnice:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{"výstupní výkon"}}{\text{"tep. ztráta"} + \text{"parazitní výkon"} + \text{"výstupní výkon"}} = \\ &= \frac{\text{"výstupní výkon"}}{\text{"tep. ztráta"} + \text{"vnitřní výkon"}} = \\ &= \frac{\text{"výstupní výkon"}}{\text{"celkový výkon"}} \end{aligned} \quad (71)$$

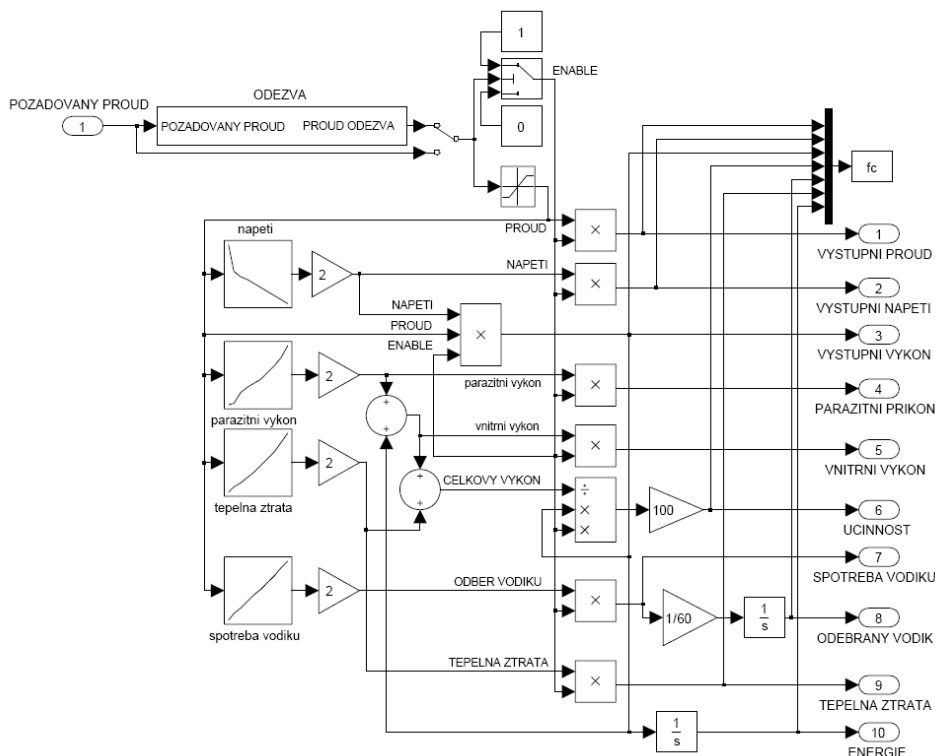
V modelu je rovnice realizována blokem násobičky/děličky, kde se „výstupní výkon“ dělí signálem „celkový výkon“ a celý zlomek je násoben signálem „ENABLE“. Výstup násobičky/děličky je násoben konstantou 100 a veden na výstup 6 – „účinnost“ [%].

Charakteristika odběru vodíku v závislosti na požadovaném proudu je realizována pomocí LOOK-UP table „spotřeba vodíku“. Její výstup je násoben dvěma a pomocí součinu se signálem „ENABLE“ tvoří výstup 7 – „spotřeba vodíku“ [l/min.]. Výstup 7 je dělen konstantou 60 pro převod na rozměr litry/s. Dále je signál integrován, tímto získáme výstup 8 – „odebraný vodík“ [l]. Integrací veličiny na výstupu 3 – „výstupní výkon“ získáváme výstup 10 – „energie“ [J], tento výstup ukazuje kolik energie bylo dodáno palivovými články do systému v průběhu simulace.

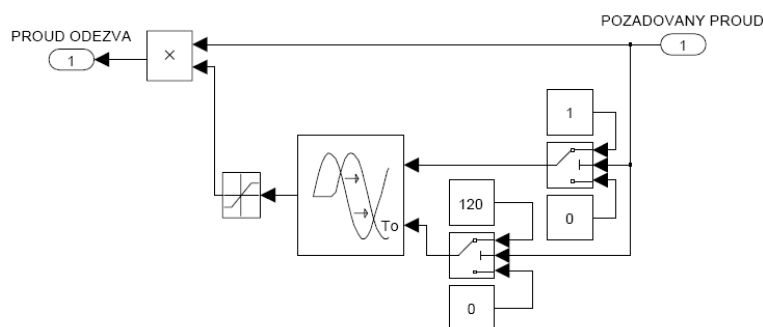
6.3.1.1 Odezva palivového článku

Při zapnutí palivových článků musí nejprve dojít k nastartování chemické reakce (prodleva dlouhá max. 120s při studeném startu). Pro zohlednění této vlastnosti slouží blok ODEZVA, jehož schéma je na obr. 6.3.1.1.1. Vstupem bloku ODEZVA je signál „požadovaný proud“, který je veden na násobičku a následující dva přepínače. První přepínač slouží k vyhodnocení požadavku. Je-li požadavek na proud roven nule, je na výstupu tohoto přepínače nula, zároveň je také nula na vstupu a výstupu násobičky. Nulový požadovaný proud zapříčiní také požadavek na nulové dopravní zpoždění pomocí druhého přepínače. Vznikne-li požadavek na nenulový proud, pak je tento požadavek veden na vstup násobičky, kde se čeká na jeho povolení na výstup na druhém vstupu této násobičky. Nenulový požadovaný proud také změní hodnotu výstupu na prvním přepínači na logickou jedničku a na přepínači druhém hodnotu výstupu na 120s dopravního zpoždění. Na bloku dopravního zpoždění je tedy signál ve

formě logické jedničky zpožděný o 120s proti požadavku na nenulový požadovaný proud. Tento signál je následně filtrovaný limitací, může tedy nabývat hodnot pouze v intervalu $<0;120>s$. Při odlaďování tohoto modelu se totiž ukázalo, že simulační program nějakým způsobem vytváří na začátku simulace záporné jehlové pulzy, které zkreslovaly výsledek. Signál z výstupu limitace je veden na druhý vstup násobičky a má ve své podstatě funkci ENABLE. Na výstupu násobičky je signál při náběžné hraně požadavku zpožděný o 120s, při hraně sestupné zpožděný o 0s. Tímto jsme dosáhli simulace startu chemické reakce palivových článků. Při vypínání palivových článků výstupní relé odpojí zátěž okamžitě, stejně tak jako model ihned při požadavku na nulový proud zablokuje výstup násobičky.



Obr. 6.3.1.1: Matematický model bloku SÉRIOVÁ DVOJICE PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

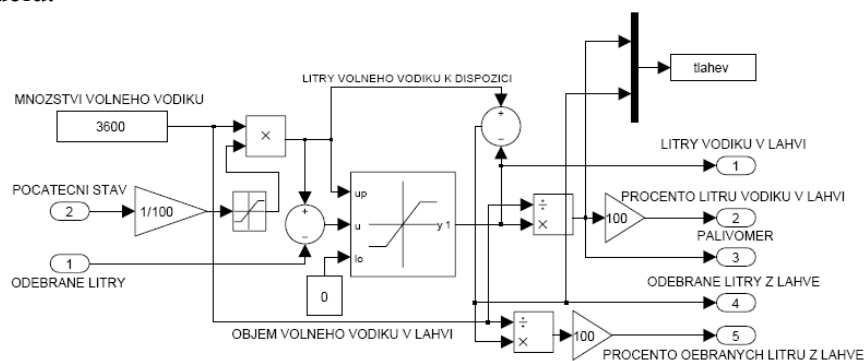


Obr. 6.3.1.1.1: Matematický model bloku ODEZVA

6.3.2 Matematický model tlakové láhve

Tlaková láhev s vodíkem slouží jako zdroj paliva pro palivové články. Jako konkrétní produkt firmy Linde Gas a.s. byla použita láhev s vodíkem E949 o vodním objemu 20l s vodíkem při tlaku 200bar (kód produktu: 3190122) [22]. Dle katalogového listu vypouštěním z láhve získáme 3600l volného vodíku.

Matematický model tlakové láhve založen na konstantě, která odpovídá množství volného vodíku, od které se odečítá množství vodíku odebraného palivovými články. Jsou zde zohledněny stavy reálné tlakové láhve, které mohou v průběhu provozu nastat. Především nelze z nádoby odebrat více vodíku, než který je schopna pojmout, dále také výchozí množství paliva, které je na začátku simulace k dispozici. Jako vstupy do systému jsou zde dvě proměnné. První proměnnou na vstupu 1 - „odebrané litry“ [l] – je množství odebraného vodíku, tuto informaci získáváme z matematického modelu sériové dvojice palivových článků. Druhou proměnnou na vstupu 2 – „počáteční stav“ [%] – je výchozí množství vodíku v láhvi, které je k dispozici na začátku simulace. Tato hodnota je zadána pomocí konstanty, pro další zpracování je dělena konstantou 100 a limitací omezena na interval $\langle 0;1 \rangle$. Konstantu („objem volného vodíku v láhvi“) násobíme přepočítanou a limitovanou hodnotou „počátečního stavu“ a dostáváme „litry volného vodíku k dispozici“ – hodnota reprezentuje množství vodíku v láhvi na začátku simulace, která zároveň slouží jako horní mez dynamické limitace (slouží k zohlednění faktu, že z nádoby nelze odebrat více vodíku než v ní fakticky je) a od této hodnoty je odčítán vodík spotřebovaný palivovými články. Rozdíl je omezen dynamickou limitací a může tedy nabývat hodnot v intervalu $\langle -;0 \rangle$; litry volného vodíku k dispozici“ $\langle -;0 \rangle$ a je k dispozici na prvním výstupu („litry vodíku v láhvi“). Podílem výstupu 1 - „litry vodíku v láhvi“ a konstanty „objem volného vodíku v láhvi“ získáme výstup 3 – „palivoměr“ [-]. Tento výstup nám dále poslouží ke spouštění palivových článků. Vynásobením výstupu 3 konstantou 100 dostaneme výstup 2 – „procento litrů vodíku v láhvi“ – tato hodnota v průběhu simulace indikuje kolik procent z celkové kapacity v láhvi ještě zbývá. Tento výstup musí na začátku simulace odpovídat vstupu 2 – „počáteční stav“. Rozdílem konstanty „litry volného vodíku k dispozici“ a hodnoty „litry volného vodíku v láhvi“ dostaneme výstup 4 – „odebrané litry z láhve“, který dále použijeme pro výpočet ceny ujeté trasy. Podílem výstupu 4 a konstanty „objem volného vodíku v láhvi“ a jejím následným vynásobením konstantou 100 dostaneme výstup 5 – „procento odebraných litrů z láhve“ [%] – což znamená, kolik procent z celkového objemu volného vodíku, který je láhev schopna pojmout, bylo v průběhu simulace odebráno. Při simulacích jsou výstupy 1, 2 a 5 nevyužity, při sestavování sloužily k odladění modelu.

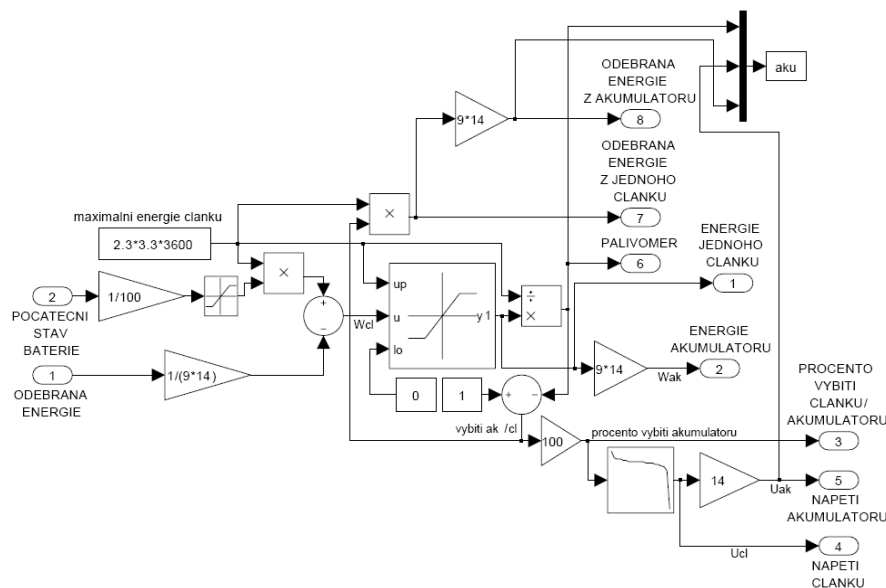


Obr. 6.3.2.1: Matematický model bloku TLAKOVÁ LÁHEV

6.3.3 Matematický model trakčního akumulátoru

Matematický model akumulátoru je založen na konstantě reprezentující množství energie, kterou je schopen pojmout jeden článek baterie, odebraná/dodaná energie je k této konstantě připočítávána. Energie je definována jako *kapacita · nominální napětí akumulátoru*, tedy $2,3\text{Ah} \cdot 3,3\text{V} \cdot 3600$, což odpovídá energii 27324J na jeden článek.

Model akumulátoru má dva vstupy. Na první vstup „odebraná energie“ se přivádí rozdíl energie odebrané pohonem a dodané palivovými články. Tento rozdíl se dále přepočítává na jeden článek a je veden do součtového členu. Druhý vstup „počáteční stav baterie“ nastavuje množství energie v akumulátoru na začátku simulace. V praxi by to znamenalo, jestli je akumulátor plně nabitý, vybitý nebo v jakémkoli stavu mezi těmito dvěma hranicemi. Hodnota je zadána konstantou [%] a přepočítávána a omezena na interval $\langle 0;1 \rangle$. Touto hodnotou je násobena konstanta akumulátoru a součin je veden na druhý vstup součtového členu. Rozdílem je energie W_{el} zapojená na vstup dynamické limitace. Tato hodnota má charakter energie, která v akumulátoru ještě zbývá. Dynamická limitace je z vrchu omezena konstantou akumulátoru a zespod konstantou nula. Nelze totiž do akumulátoru dodat více energie, než kterou je schopen pojmout a odebrat více, než kterou je schopen dodat, čili číselně je maximem 27324J, minimem 0J. Výstup dynamické limitace je zároveň výstup 1 „energie jednoho článku“[J], tj. energie která v jednom článku fakticky je. Pomocí přepočtu $9 \cdot 14$ získáme hodnotu na výstupu 2 „energie akumulátoru“[J], tj.energie která v akumulátoru fakticky je. Podílem výstupu 1 a konstanty akumulátoru získáme výstup 6 „palivoměr“[-]. Na začátku simulace musí tato hodnota proporcionálně odpovídat vstupu 2. Rozdílem konstanty 1 a hodnoty výstupu 6 dostáváme informaci o vybití akumulátoru/článku v intervalu $\langle 0;1 \rangle$, 0 pro minimální vybití (maximální množství energie v článku/akumulátoru), 1 pro maximální vybití článku/akumulátoru a zároveň výstup 3 „procento vybití akumulátoru/článku“. Užití tohoto signálu se může na první pohled jevit jako nelogické, má však opodstatnění pro užití následující LOOK-UP table, která je definovaná pro procento vybití a jejíž výstupem je informace o napětí článku – výstup 4 „napětí článku“ (charakteristika „napětí/procento vybití článku“ je převzata z datasheetu výrobce, tento způsob určování napětí jednoho článku trakčního akumulátoru není zcela přesný, zde ale tento signál sloužil pouze pro informaci a k odladění modelu, napětí článku se s vybíjením příliš nemění a ve skutečnosti by bylo měřeno přímo na akumulátoru). Vynásobením výstupu 4 konstantou 14 získáme výstup 5 „napětí akumulátoru“. Informaci o napětí akumulátoru potřebujeme pro výpočet střídavého řídicího signálu měniče. Součinem signálu vybití akumulátoru/článku na výstupu součtového členu a konstanty akumulátoru dostáváme výstup 7 „odebraná energie z jednoho článku“, následným vynásobením konstantou $9 \cdot 14$ pak výstup 8 „odebraná energie z akumulátoru“.

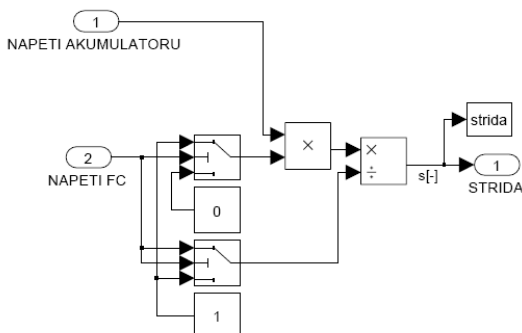


Obr. 6.3.3.1: Matematický model bloku TRAKČNÍ AKUMULÁTOR

6.3.4 Matematický model pro výpočet střídý

V tomto modelu se vychází z rovnice pro výpočet střední hodnoty napětí, na kterou se nabíjí trakční akumulátor: $U_{TA} = U_{FC} \cdot s \Rightarrow s = \frac{U_{TA}}{U_{FC}}$. Jelikož dle potřeby zapínáme

palivové články, v průběhu simulace je napětí palivových článků i nulové. Pro nulu ve jmenovateli není definována hodnota podílu, jsou zde proto zařazeny přepínače, které v těchto intervalech definují nulovou hodnotu zlomku. Nulová hodnota střídý znamená, že je stabilizační měnič vypnut. Informace o hodnotě napětí ze vstupu 1 – „napětí akumulátoru“ je vedena do bloku násobičky, která povoluje průchod informace do bloku děličky pouze v případě, kdy je hodnota napětí palivových článků nenulová. Tohoto dosáhneme přepínačem se zavedenou konstantou nula. V případě, kdy je napětí palivových článků nulové se tato nulová hodnota „nedostala“ do „jmenovatele“, zapracuje přepínač se zavedenou konstantou jedna a do jmenovatele uměle dosadí tuto konstantu. Výsledkem v případě nulového napětí palivových článků pak je nulová střída na výstupu modelu. Je-li, čistě teoreticky, nulové napětí baterie, střída na výstupu je též nulová. Tomuto stavu je ovšem zabráněno ochrannými obvody trakčního akumulátoru.



Obr. 6.3.4: Matematický model bloku VÝPOČET STŘÍDY

6.4 Matematický model kalkulátoru ceny provozu palivového článku

Cílem projektu je návrh, konstrukce a realizace nízkonapětového trakčního pohonu. Mimo položky uvedené v zadání je určitě vhodné zabývat se alespoň okrajově ekonomikou provozu. V dnešní době, kdy je kladen veliký důraz na ekonomii ekologie provozu, jsou parametry vozidel srovnatelné. Ne každý systém instalovaný v konvenčních vozidlech je shodný, proto je ekonomika provozu zajímavým parametrem. V následující kalkulaci je uvažována jen pořizovací cena palivových článků a náklady na vodík. Náklady na pneumatiky a případně na elektřinu ze sítě na nabíjení akumulátoru nejsou uvažovány, v průběhu simulace vyplynulo, že by tyto položky vzhledem k ceně provozu palivových článků kalkulaci ovlivnily jen minimálně. Dle uživatelského manuálu k palivovým článkům, je životnost palivového článku limitována dvěma faktory – zaručeným počtem START/STOP cyklů a zaručenými provozními hodinami. Dle manuálu je to 500 START/STOP cyklů a 1500 provozních hodin. Ze samotné simulace vyplynulo, že na životnost těchto palivových článků bude mít větší důraz počet provozních hodin.

Základní úvahou při návrhu modelu bylo tedy promítnutí ceny provozní časové jednotky a ceny množstevní jednotky vodíku do celkové kalkulace. Model má dva vstupy – 1 „odebraný vodík“ a 2 „provoz palivového článku“. Na vstup 1 je přiváděna informace z modelu tlakové láhve o množství odebraného vodíku a je násobena cenou jednoho litru vodíku, tímto dostáváme složku ceny za odebraný vodík – výstup 3 „složka ceny vodík“. Cena jednoho litru vodíku jde vypočítávána z konstanty „cena 20l vodíku při 200bar“ násobená výší DPH a dělená konstantou „množství volného vodíku“. Na vstup 2 je přiváděna informace o provozu palivových článků v podobě žádaného proudu v intervalu $\langle 0,5;45 \rangle$ A. Informace je upravena na podobu logické 0 a 1. Je-li žádaný proud 0A, výstup je nastaven na logickou 0. Je-li žádaný proud v intervalu $\langle 0,5;45 \rangle$ A, palivové články jsou tedy v provozu, je výstup nastaven na logickou 1 a je umožněno integrování ceny provozu. Cena provozní časové jednotky je vypočítávána jako dvojnásobek pořizovací ceny jednoho palivového článku (ve voze jsou instalovány dva palivové články) v podílu se zaručenými provozními hodinami [s] (dle uživatelského manuálu k palivovým článkům 1500h, což je v modelu přepočítáno na sekundy pomocí GAINU 3600). Výstupem je tedy „cena sekundy provozu“ a tato hodnota je k dispozici na výstupu 1 „cena jedné sekundy provozu“ a pomocí bloku násobení je povolena k integraci jen při „spuštěných“ palivových člancích. Výstup integrátoru je k dispozici na výstupu 2 „složka ceny – provoz“. Součtem jednotlivých složek „složka ceny – provoz“ a „složka ceny – vodík“ je celková cena za provoz palivových článků. Výstup 5 – „provoz FC“ sloužil k odladění modelu.

6.5 Matematický model řidiče

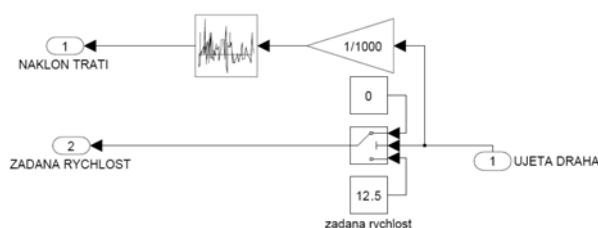
Vstupní veličinou do modelu vozidla je vektor tažné síly. My ovšem pro snadnější představu a „ovládání“ vozidla potřebujeme uvažovat rychlost vozidla, ze které pak vypočítáváme ujetou vzdálenost apod. Model tedy funguje jako regulační smyčka, kde na vstupech jsou „rychlost vozidla“ a „rychlost požadovaná“, výstupem pak požadovaná tažná síla. Signály rychlostí jsou vedeny do rozdílového členu, regulační odchylka je pak zesílena a přivedena na první vstup součtového členu, zároveň je také integrována a následně zesílena a přivedena na druhý vstup součtového členu. Rozdíl vstupních rychlostí je také sledován pro průchod nulou do záporných hodnot. Je-li tento rozdíl

7. Simulace provozu vozidla

7.1 Matematický model trasy

Matematický model trasy slouží k tomu, abychom mohli simulovat provoz a jízdu vozidla. Vstupem modelu je signál „ujetá dráha“, výstupem jsou signály „náklon trati“ a „žádaná rychlost“. Model trasy je řešen pomocí LOOK-UP table, GAINU, přepínače a dvou konstant. Vstupní signál „ujetá dráha“ je v metrech, pomocí GAINU je přepočítán na kilometry a veden do LOOK-UP TABLE na jejímž výstupu je signál s informací o náklonu trati. Jedná se o přenesený profil tratě Žamberk – Líšnice – Nekoř – Pastviny – Klášterec nad Orlicí – Kunvald – Bartošovice v Orlických horách – Rokytnice v Orlických horách – Pěčín – Kameničná - Žamberk, vzdálenost asi 53,7km. Rozdíl v nadmořské výšce nejvyššího bodu trasy proti nejnižšímu bodu trasy je 330m.

Vstupní signál je také přiveden na řídicí vstup přepínače, který zajišťuje zastavení vozidla po ujetí nastavené dráhy (53,7km). Je-li tedy ujetá dráha v intervalu $<0;53700>$ m, je požadovaná rychlost vozidla nastavena na hodnotu $12,5\text{ms}^{-1}$ (45km/h).



Obr. 7.1.1: Matematický model bloku TRASA

Dráha [km]	0	0.5	0.8	1	1.1	1.2	1.5	2	2.9	4.3
Náklon [°]	0	-3.82	-2.87	5.74	0	-1.91	-1.15	0.64	0	1.91
Dráha [km]	4.6	5.6	5.9	6.2	6.9	7.1	7.8	8.3	8.4	9.1
Náklon [°]	-0.57	9.59	1.91	0	2.87	-3.28	-2.29	0	3.28	1.64
Dráha [km]	9.8	10.2	10.4	10.6	11.3	11.7	11.8	12.1	12.9	13.4
Náklon [°]	-2.87	0	5.74	-1.64	1.43	5.74	1.91	-1.43	-1.15	3.44
Dráha [km]	13.9	14.4	14.9	15.7	16.4	17.1	17.6	18.9	19.2	21.6
Náklon [°]	-1.15	-2.29	0.72	-0.82	2.46	1.15	0.88	1.91	-2.15	1.64
Dráha [km]	22.3	23.6	24.4	24.6	24.8	25.4	26	26.3	27.6	27.7
Náklon [°]	3.53	3.58	2.87	2.87	-1.91	2.87	7.66	-3.53	-5.74	2.87
Dráha [km]	28.3	28.9	29.5	29.9	30.2	30.6	30.8	31.1	31.3	31.7
Náklon [°]	1.91	1.91	1.43	1.91	1.43	5.74	1.91	2.87	1.43	2.87

NÍZKONAPĚŤOVÝ TRAKČNÍ POHON S PALIVOVÝM ČLÁNKEM

Dráha [km]	31.9	32.1	32.5	32.9	33.5	34.1	34.8	35.2	36.2	37
Náklon [°]	2.87	-1.43	-2.87	0	-2.87	-2.46	-2.87	-2.29	-1.43	-0.72
Dráha [km]	37.8	38.7	39.4	39.9	40.9	41.5	42.1	42.3	42.9	44.4
Náklon [°]	0	-2.46	-1.15	-0.57	-0.95	0.95	2.87	0	-1.91	-1.43
Dráha [km]	45.2	45.9	46.7	47.7	49.1	50.6	51	51.3	52.3	52.5
Náklon [°]	0	1.43	-0.57	-0.41	-1.53	-2.87	0	0	5.74	2.46
Dráha [km]	53.2	53.7								
Náklon [°]	0									

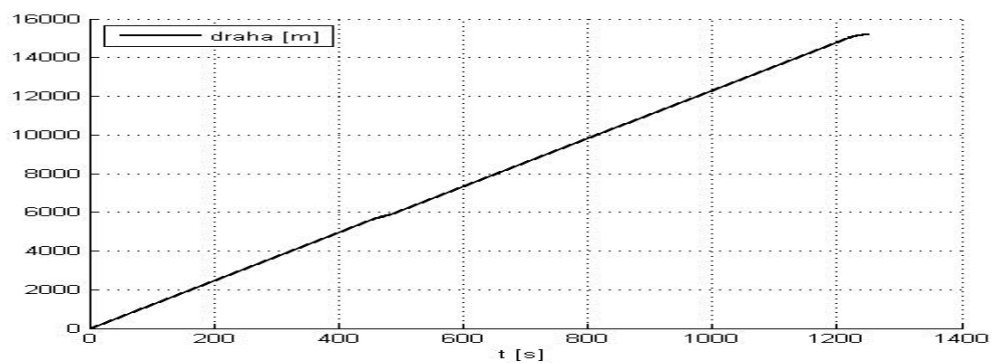
Tab. 7.1.1: Náklon trati v závislosti na ujeté dráze – profil trati

Jak bylo popsáno v kapitole 3. *Cíle disertační práce*, je třeba najít nejvhodnější způsob řízení palivových článků. Samotný trakční akumulátor dokáže pojmout asi 3,4MJ energie, palivové články v oblasti vysokého výkonu dokážou vyprodukovat 15MJ energie a v oblasti vysoké účinnosti dokonce 19MJ. Trakční akumulátor je tvrdým zdrojem energie, avšak provoz pouze na akumulátor výrazně sníží dojezd automobilu. Oproti tomu palivové články dokážou vyprodukovat až 5,6 násobek energie, kterou dokáže pojmout trakční akumulátor, ale za cenu odběru středního výkonu. Kompromisem mezi co nejnižší složitostí (hmotností) celého napájecího systému, ale co nejvyšší užitnou hodnotou (schopností akcelerace vozidla) je koncepce popsána v kapitole 4. *Koncepce pohonu*. Nejlepším způsobem, jak regulovat palivové články je logicky režim, ve kterém bychom pomocí nich dokázali vyprodukovat 19MJ energie. S ohledem na reálné podmínky trasy a provozu je tento způsob prakticky nemožný. Budeme tedy provozovat palivové články v intervalu vyprodukované energie <15MJ; 19MJ> se snahou co nejvíce se přiblížit hranici 19MJ. Při pohledu z druhé strany, je třeba z hlediska bezpečnosti provozu zbytečně nesnižovat akcelerační schopnost vozidla. Výstupem bude tedy takový způsob řízení palivových článků, pomocí kterého: a) dojedeme do cíle trasy, b) dojedeme do cíle trasy s co nejnižšími náklady na jeden ujetý km. Nejsilnějším parametrem celého zkoumání bude dojezd vozidla a cena ujetého kilometru bude parametrem druhořadým. Simulace je prováděna na matematickém modelu trasy viz. kapitola 7. *Matematický model trasy*.

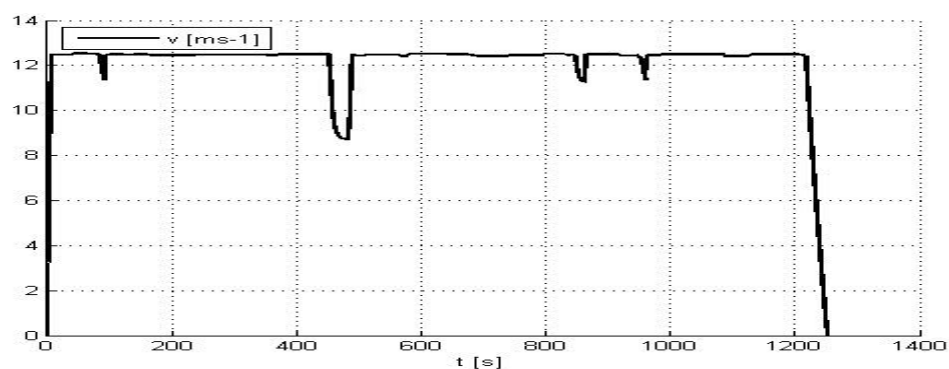
7.2 Provoz vozidla na trakční akumulátor

Jak bylo popsáno výše, je možné automobil provozovat pouze na trakční akumulátor. Tento způsob provozu neodpovídá zadání práce, slouží spíše pro srovnání s ostatními možnostmi. Vstupními podmínkami pro simulaci je žádaná rychlost $12,5\text{ms}^{-1}$ (45km/h), trasa dle kapitoly 7.1 a plně nabitý trakční akumulátor.

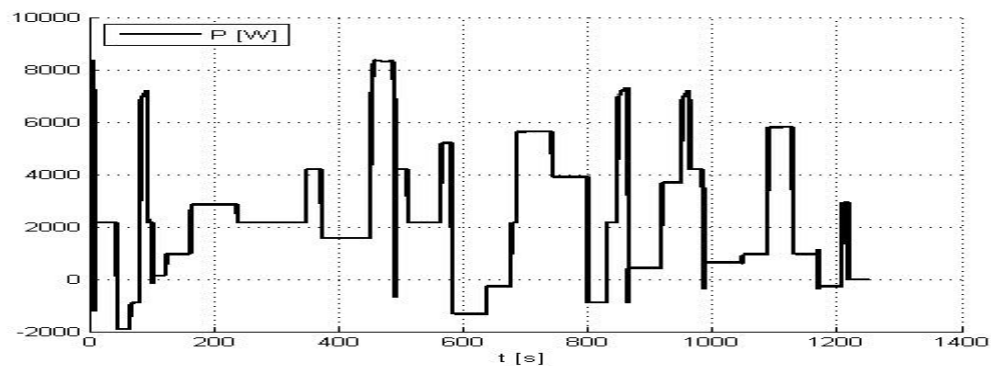
Poklesy okamžité rychlosti (obráz. 7.2.2) jsou způsobeny velkým náklonem trati, kde motor při otáčkách odpovídajících rychlosti 45km/h nedokáže již vyvinout dostatečný moment. Dojezd vozidla napájeného z trakčního akumulátoru je pouze 15,2km.



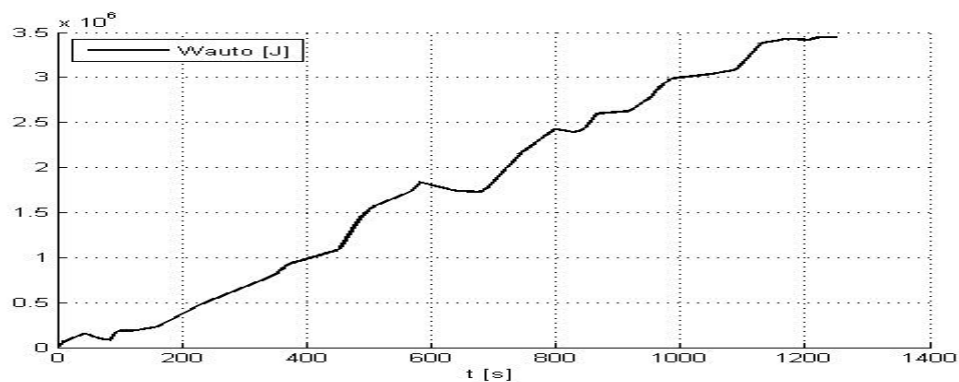
Obr. 7.2.1: Ujetá dráha



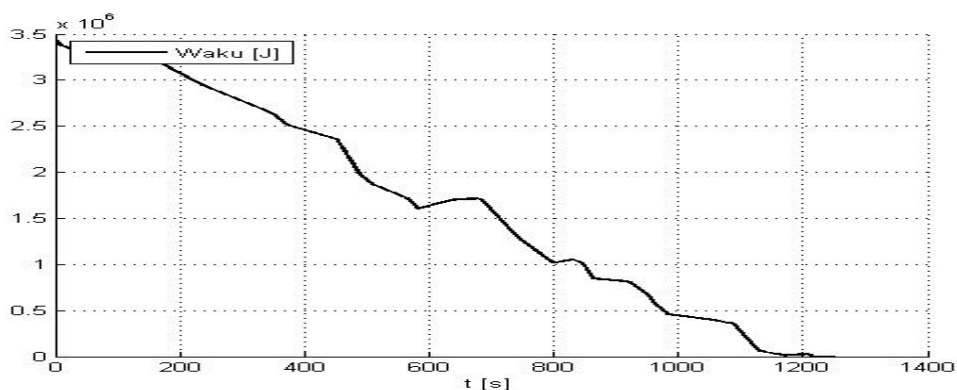
Obr. 7.2.2: Okamžitá rychlost vozidla



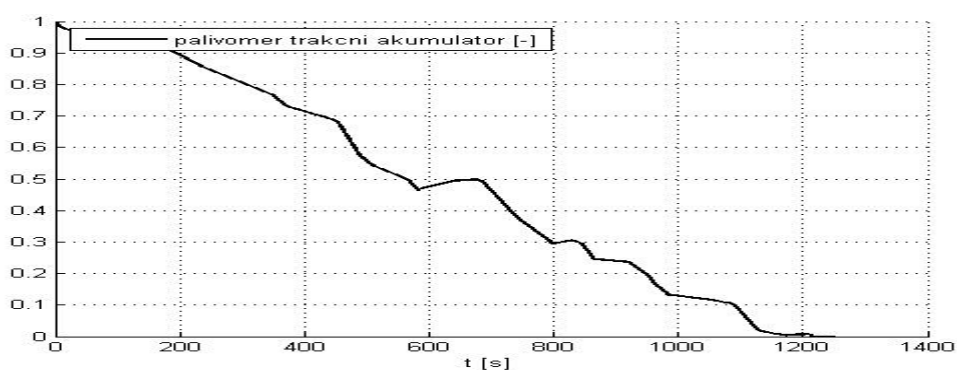
Obr. 7.2.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru



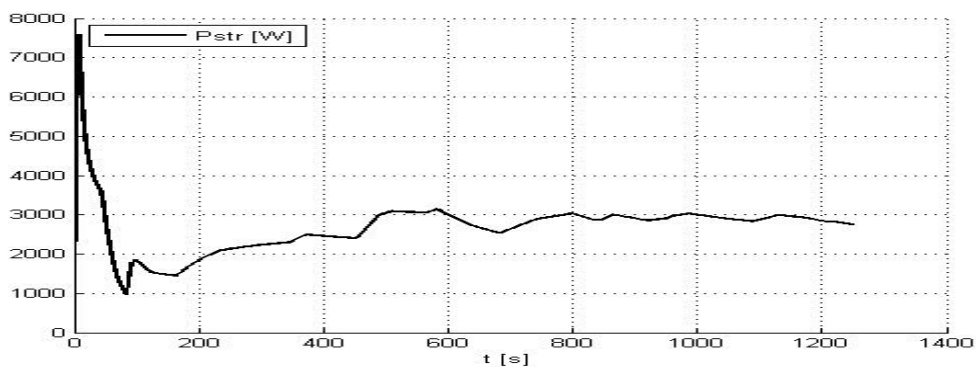
Obr. 7.2.4: Energie odebraná vozidlem



Obr. 7.2.5: Energie v trakčním akumulátoru



Obr. 7.2.6: Okamžitý stav akumulátoru

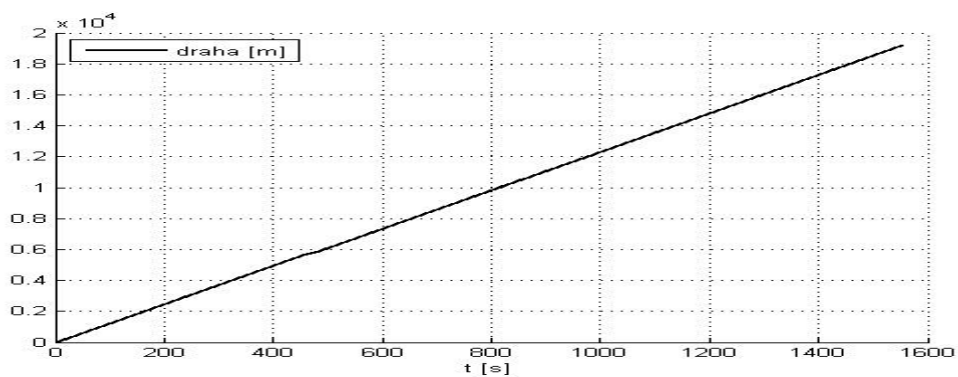


Obr. 7.2.7: Střední příkon motoru

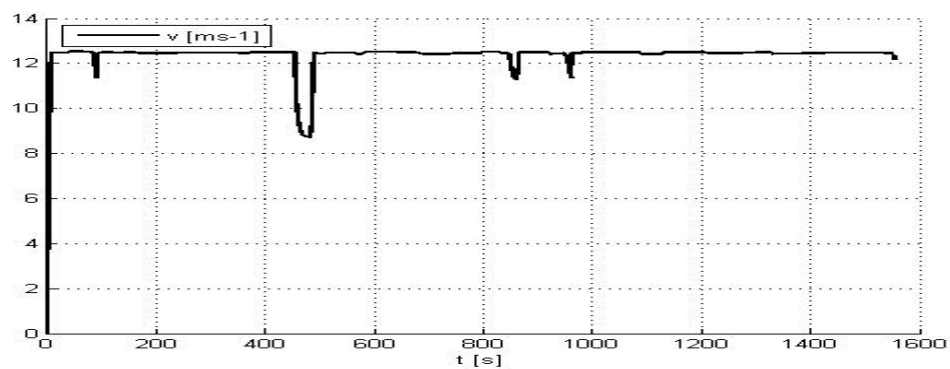
7.3 Provoz palivových článků v oblasti maximální účinnosti

Pro zvýšení dojezdu vozidla použijeme palivových článků jako primárního zdroje energie pracujícího v oblasti maximální účinnosti (15A výstupní proud). Vstupními podmínkami pro simulaci je žádaná rychlost $12,5\text{ms}^{-1}$ (45km/h), trasa dle kapitoly 7.1., plně nabitý trakční akumulátor a plná tlaková láhev. Palivové články spustíme jakmile klesne množství energie v trakčním akumulátoru pod 99%.

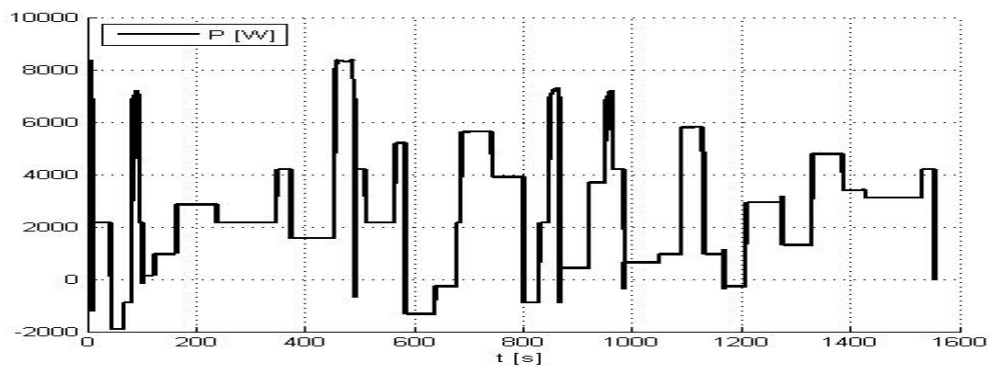
Tímto způsobem dobíjení palivových článků jsme projeli pouze část trasy (obr. 7.3.1, 19,8km na cenu 202Kč, obr. 7.3.9).



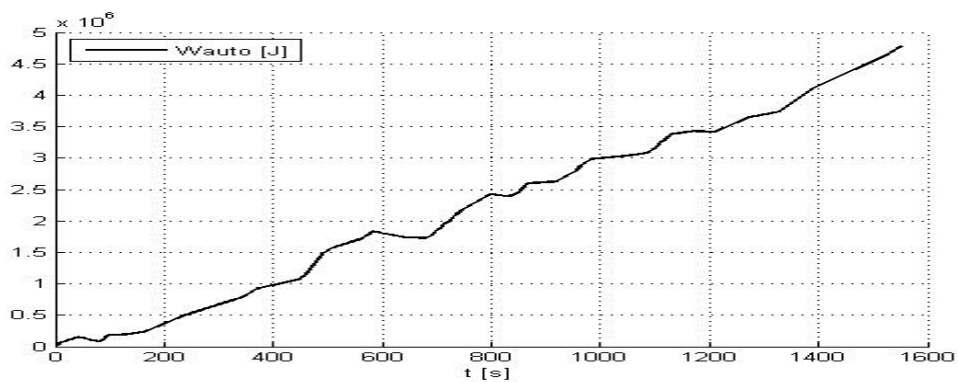
Obr. 7.3.1: Ujetá dráha



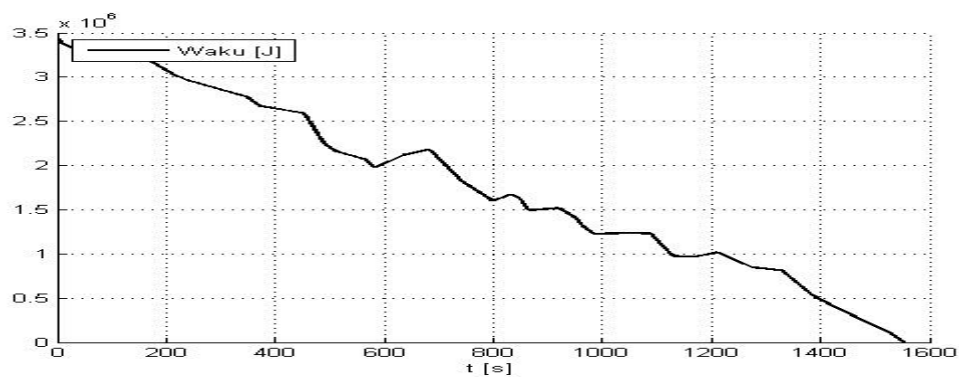
Obr. 7.3.2: Okamžitá rychlost vozidla



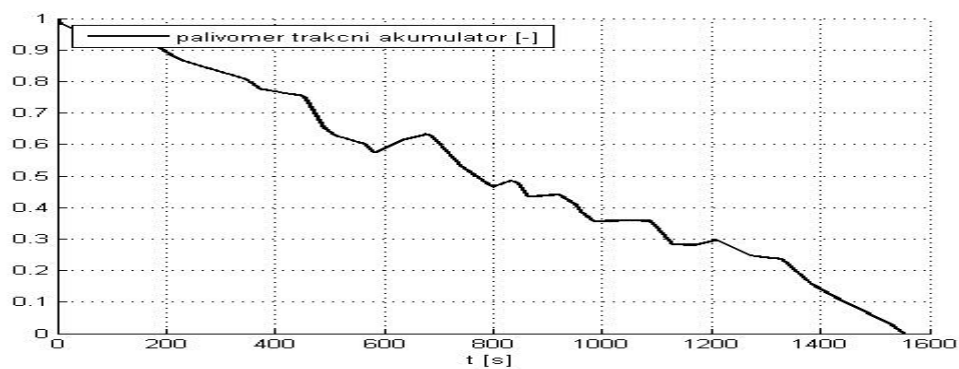
Obr. 7.3.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru



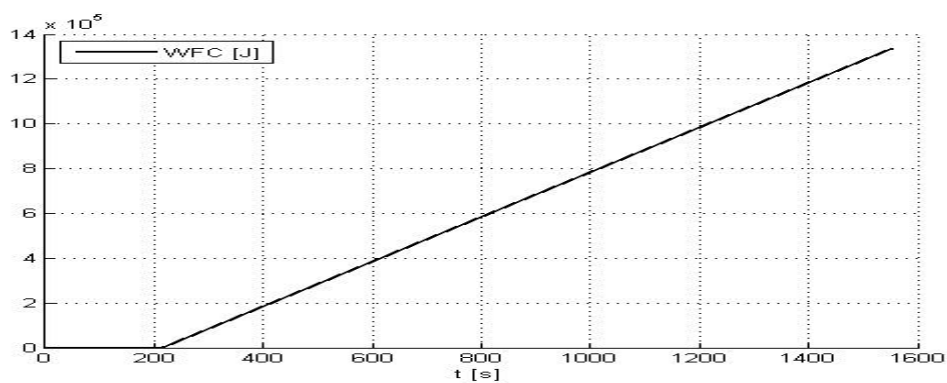
Obr. 7.3.4: Energie odebraná vozidlem



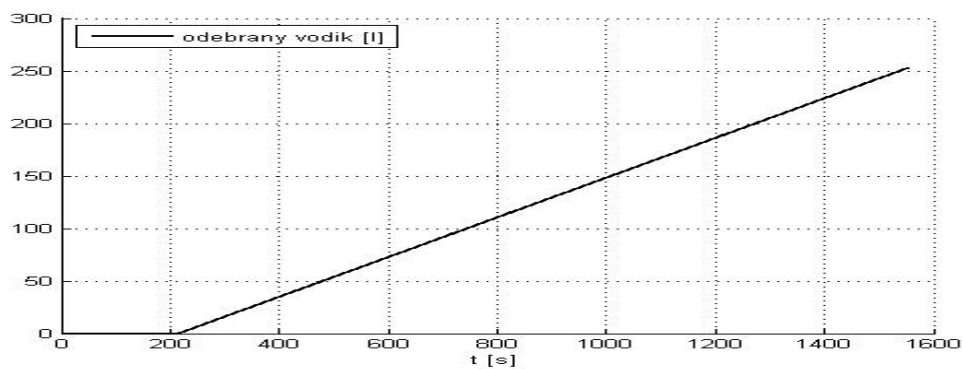
Obr. 7.3.5: Energie v trakčním akumulátoru



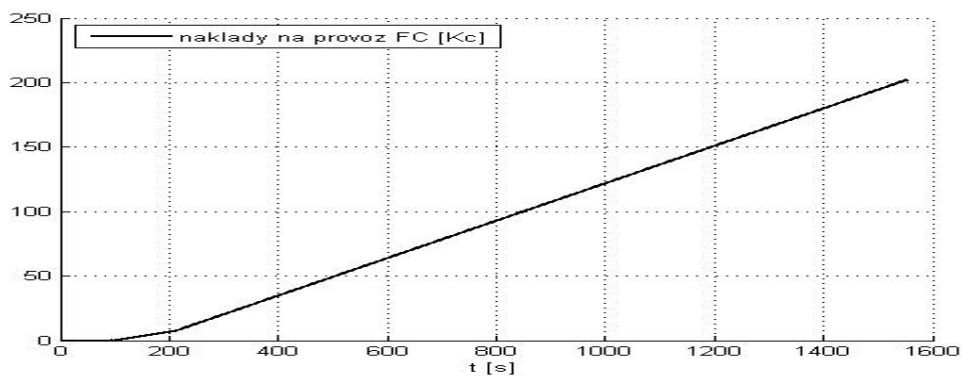
Obr. 7.3.6: Okamžitý stav akumulátoru



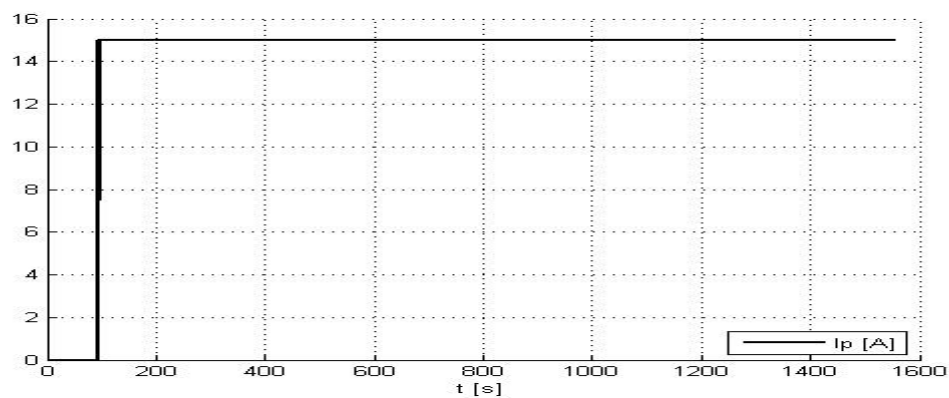
Obr. 7.3.7: Energie dodaná palivovými články



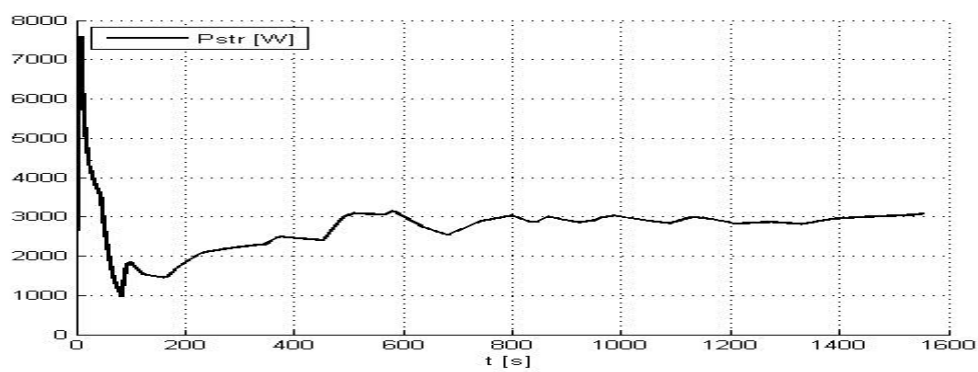
Obr. 7.3.8: Odebraný vodík



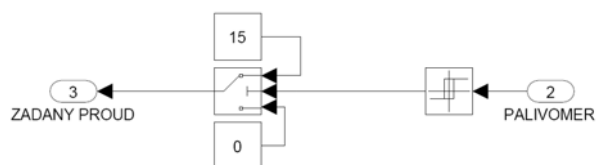
Obr. 7.3.9: Náklady na provoz palivových článků



Obr. 7.3.10: Žádaný dobíjecí proud



Obr. 7.3.11: Střední příkon motoru

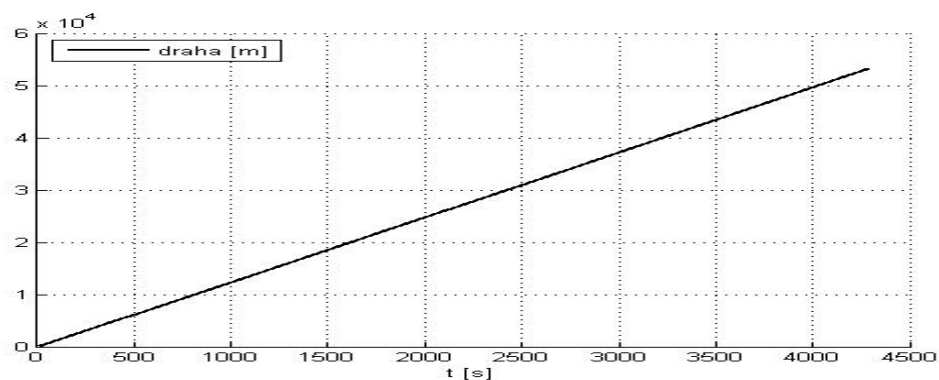


Obr. 7.3.12: Schéma řízení na maximální účinnost palivových článků

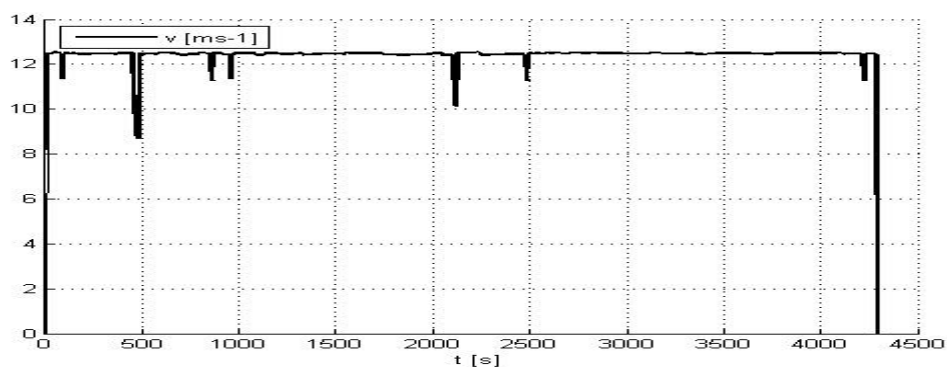
7.4 Provoz palivových článků v oblasti maximálního výkonu

Trakční akumulátor budeme nyní dobíjet maximálním (45A) proudem, simulaci provedeme za stejných podmínek (rychlost $12,5\text{ms}^{-1}$ (45km/h), plně nabitý trakční akumulátor a plná vodíková láhev, trasa dle kapitoly 7.1).

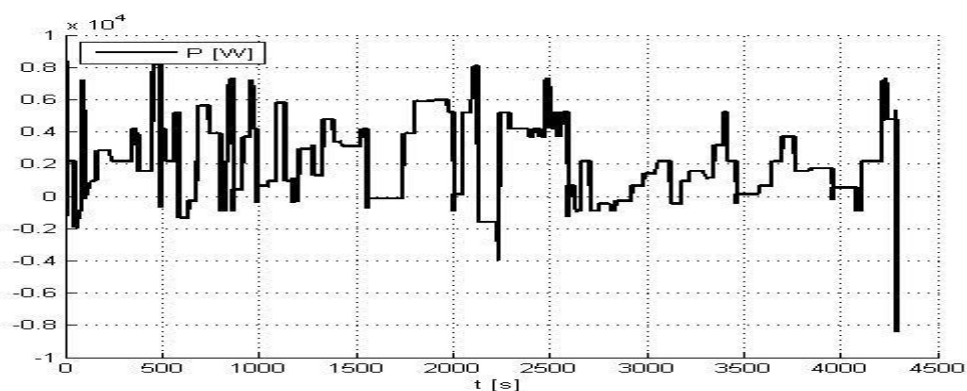
Pomocí tohoto řízení jsme trasu projeli celou, s náklady na provoz 1262,50Kč. Trakční akumulátor je na konci simulace nabit na 50,2% své celkové kapacity.



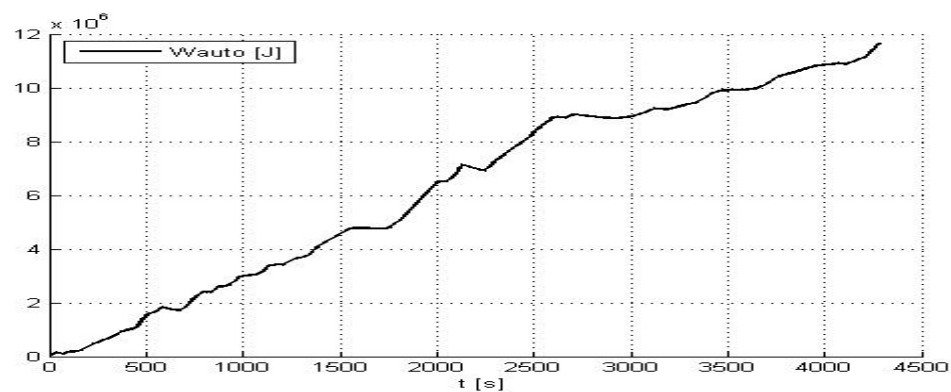
Obr. 7.4.1: Ujetá dráha



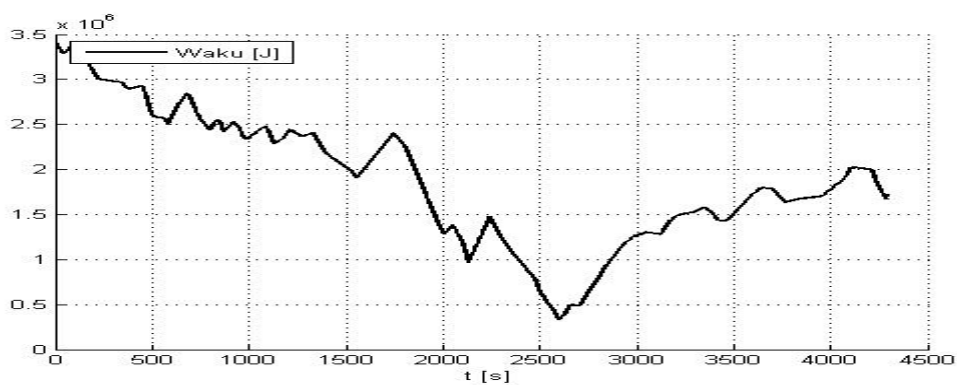
Obr. 7.4.2: Okamžitá rychlost vozidla



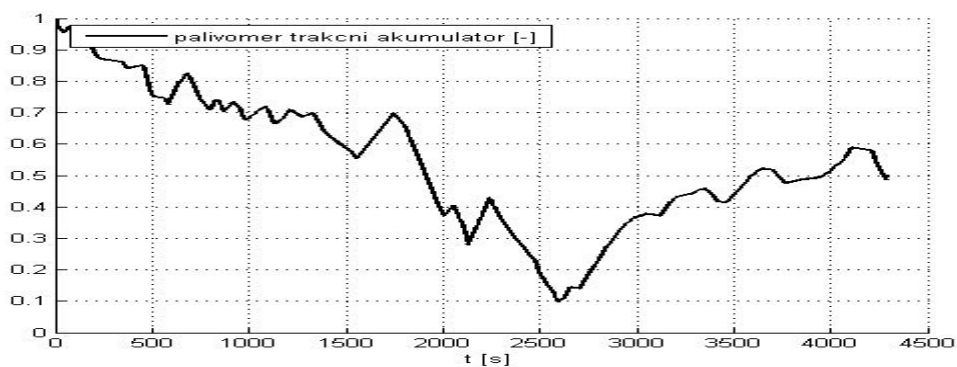
Obr. 7.4.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru



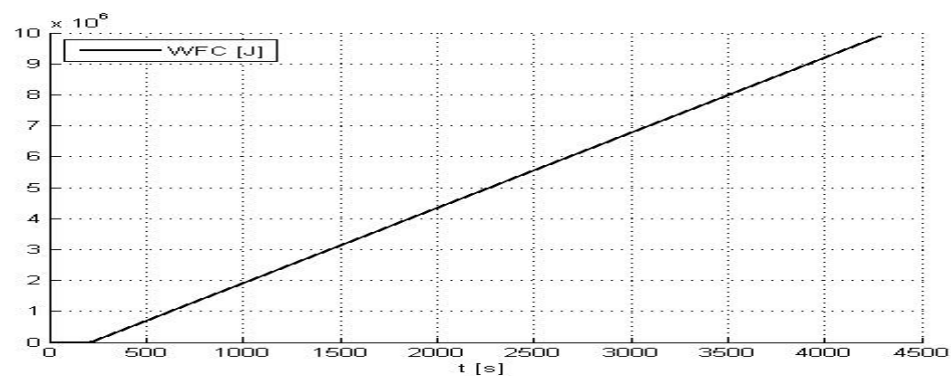
Obr. 7.4.4: Energie odebraná vozidlem



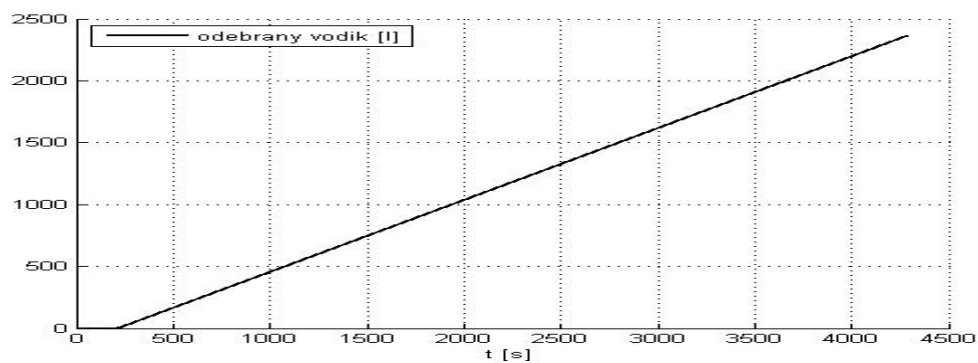
Obr. 7.4.5: Energie v trakčním akumulátoru



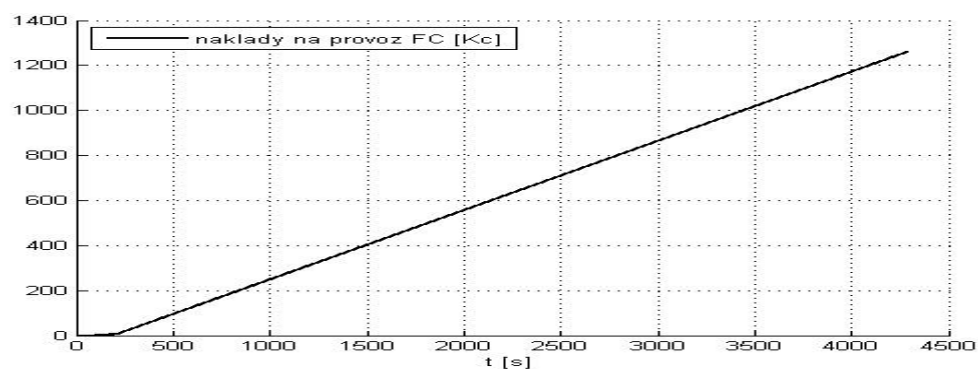
Obr. 7.4.6: Okamžitý stav akumulátoru



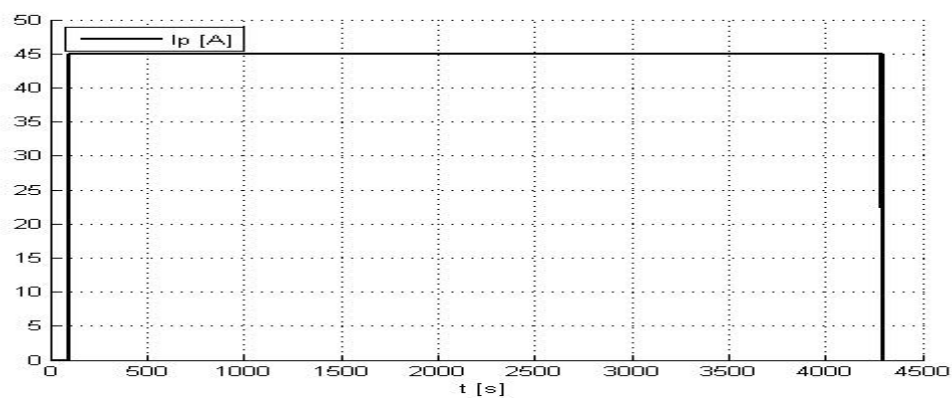
Obr. 7.4.7: Energie dodaná palivovými články



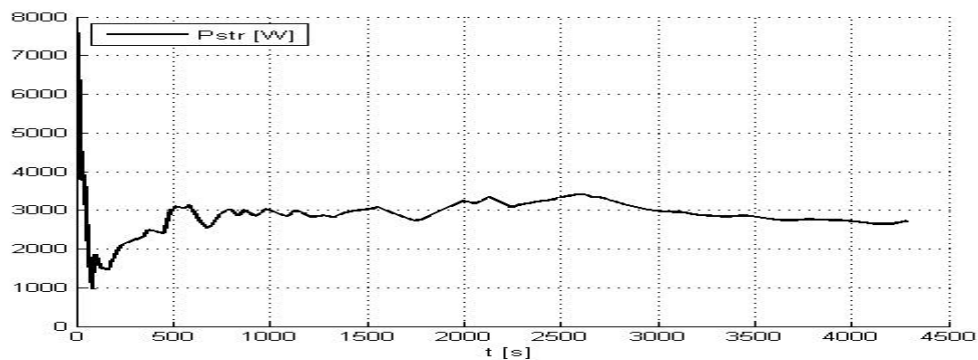
Obr. 7.4.8: Odebraný vodík



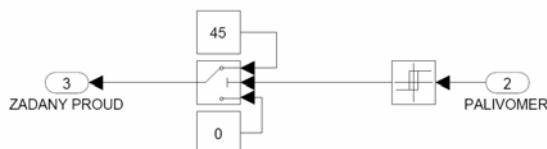
Obr. 7.4.9: Náklady na provoz palivových článků



Obr. 7.4.10: Žádaný dobíjecí proud



Obr. 7.4.11: Střední příkon motoru

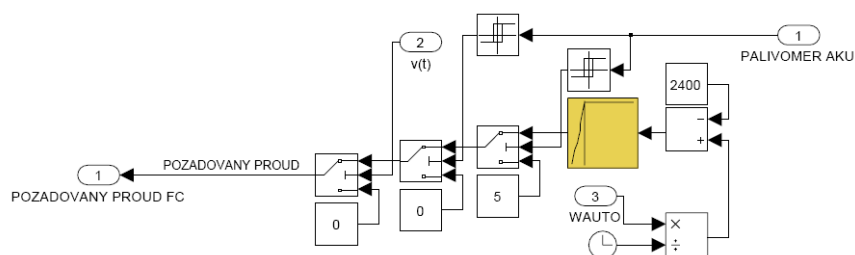


Obr. 7.4.12: Schéma řízení na maximální proud palivových článků

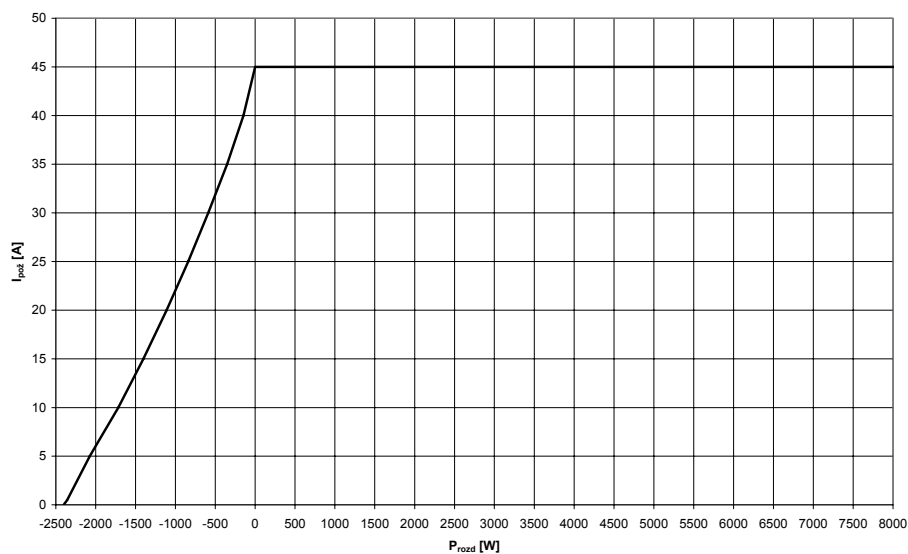
7.5 Provoz palivových článků dle středního příkonu motoru

Budeme-li v průběhu simulace sledovat vývoj středního příkonu pohonu a srovnávat jej s maximálním výkonem dvojice palivových článků, dostaneme přehled o tom, kdy palivové články stačí zásobovat svojí vyprodukovanou energií pohon a kdy tomu tak není. Podle tohoto přehledu upravíme požadavek na výstupní proud palivových článků. Bude-li výkon palivových článků menší jak střední příkon pohonu, pak musíme za každou cenu udržovat palivové články na maximálním výkonu i za cenu zvýšených ztrát, stejně tak, bude-li rozdíl nulový. Bude-li situace opačná, požadovaný výstupní proud palivových článků bude menší. Charakteristika tohoto převodu je na obr. 7.5.2 a kopíruje závislost výstupního výkonu palivových článků v závislosti na požadovaném proudu. Pokusy s různými druhy tratí (horská trať viz. kapitola 7.1 *Matematický model trati*, plošší trať se spoupaním a klesáním, trať s pozvolným klesáním) se ukázalo, že střední příkon motoru během simulace není závislý na průběhu trati, ale na rychlosti, jakou trať projíždíme. Systém je ošetřen tak, že se palivové články zapínají při množství energie v trakčním akumulátoru menším než 90% a vypínají při plném nabití trakčního akumulátoru. V průběhu jízdy, hlavně při požadované rychlosti nižší než 11m/s, může nastat stav, kdy je v trakčním akumulátoru poměrně dost energie a palivové články pracují na velký výkon. Abychom zamezili přebíjení akumulátoru, systém stáhne jejich výkon na minimum (požadovaný výstupní proud 5A). Tímto budou palivové články připravené v provozu na další požadavek a přitom pozvolně dobíjejí trakční akumulátor s maximální účinností. Do tohoto režimu se palivové články přepínají při množství energie v trakčním akumulátoru vyšším než 94% a při množství nižším než 92% se přepnou zpět do režimu řízení podle středního příkonu motoru.

Průjezd trasy dle kapitoly 7.1 budeme simulovat při rychlostech 12,5m/s, 10m/s a 5m/s.



Obr. 7.5.1: Schéma řízení palivových článků dle středního příkonu motoru

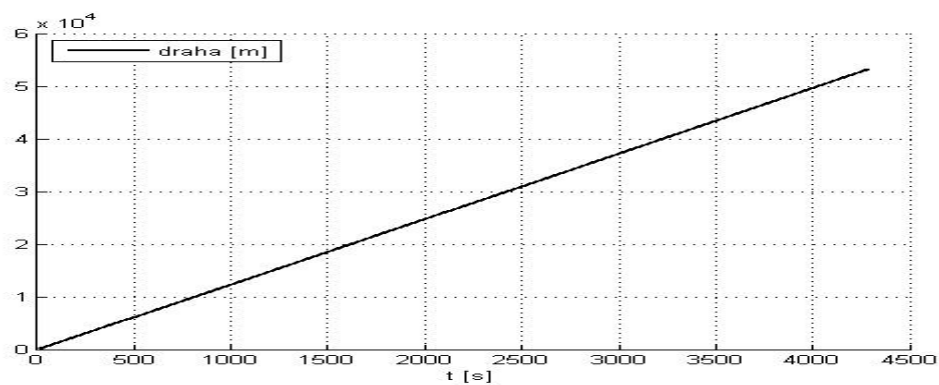


Obr. 7.5.2: Charakteristika převodu (běžová LOOK-UP TABLE)

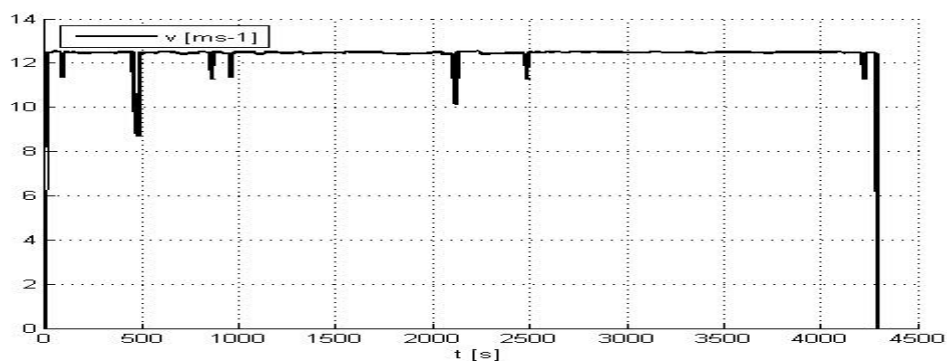
7.5.1 Průjezd trasy rychlostí 12,5m/s

Vstupními podmínkami pro simulaci je žádaná rychlost $12,5\text{ms}^{-1}$ (45km/h), trasa dle kapitoly 7.1., plně nabitý trakční akumulátor a plná tlaková láhev.

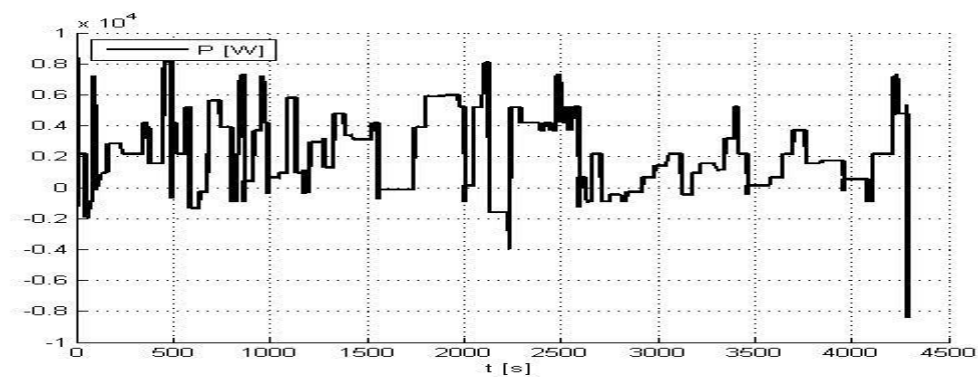
Výsledkem simulace je průjezd celé trasy s náklady 1205Kč. Trakční akumulátor je na konci simulace nabit na 50,2% své celkové kapacity.



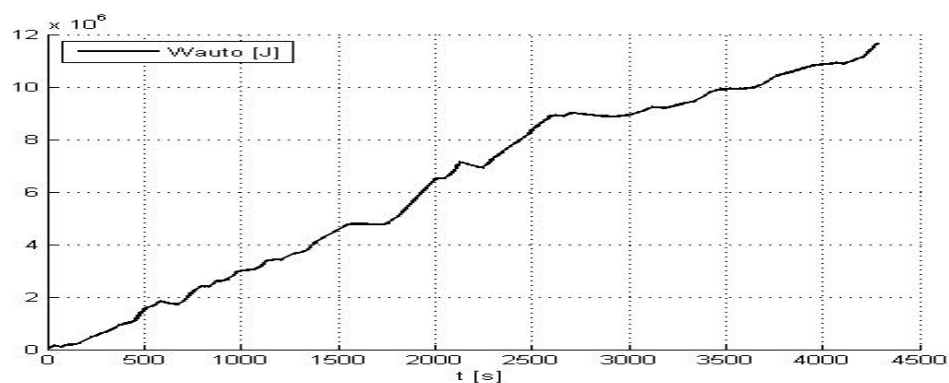
Obr. 7.5.1.1: Ujetá dráha



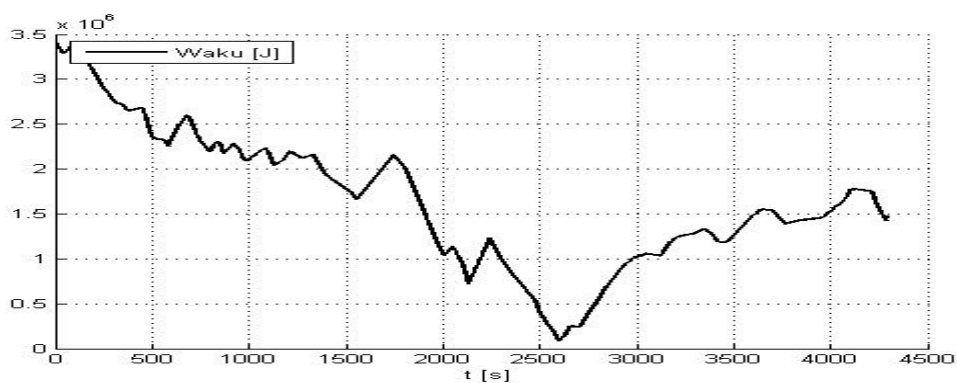
Obr. 7.5.1.2: Okamžitá rychlost vozidla



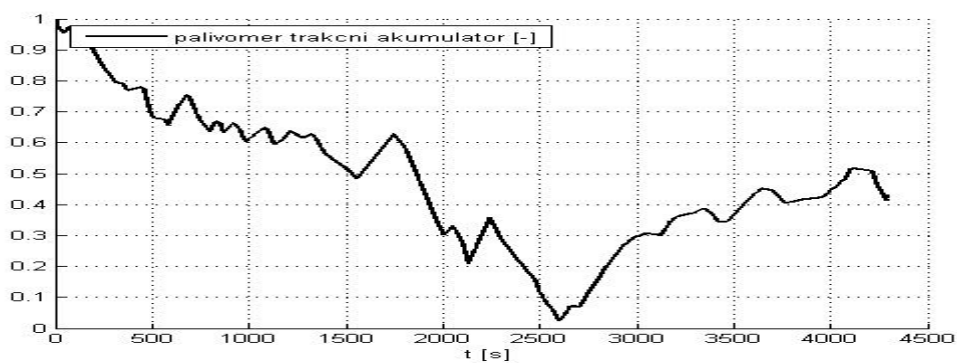
Obr. 7.5.1.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru



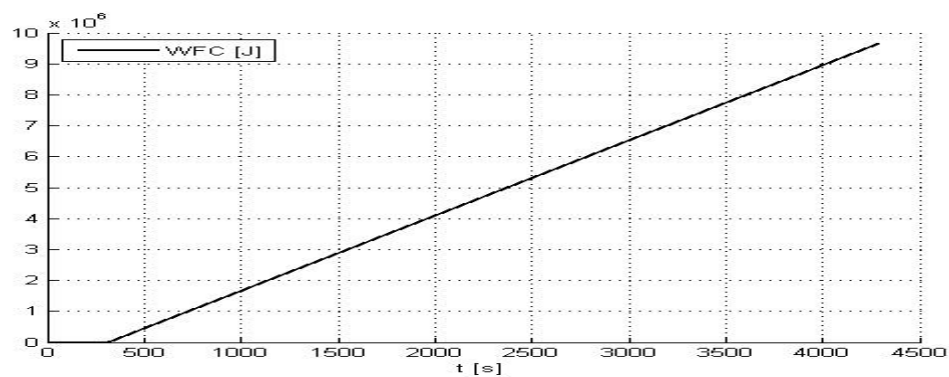
Obr. 7.5.1.4: Energie odebraná vozidlem



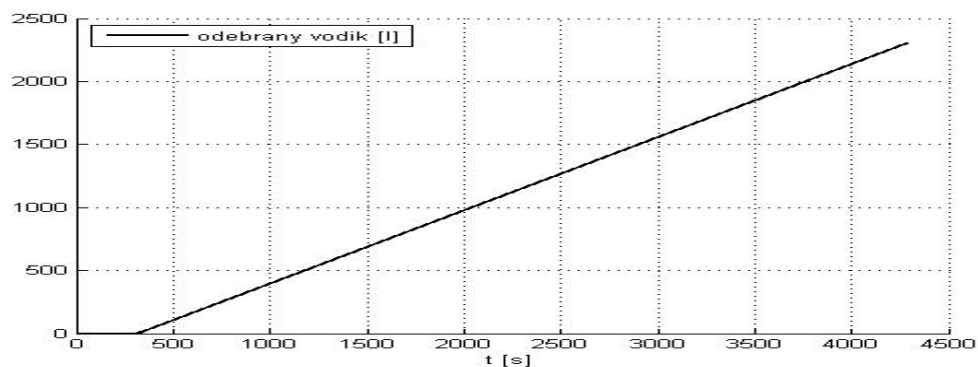
Obr. 7.5.1.5: Energie v trakčním akumulátoru



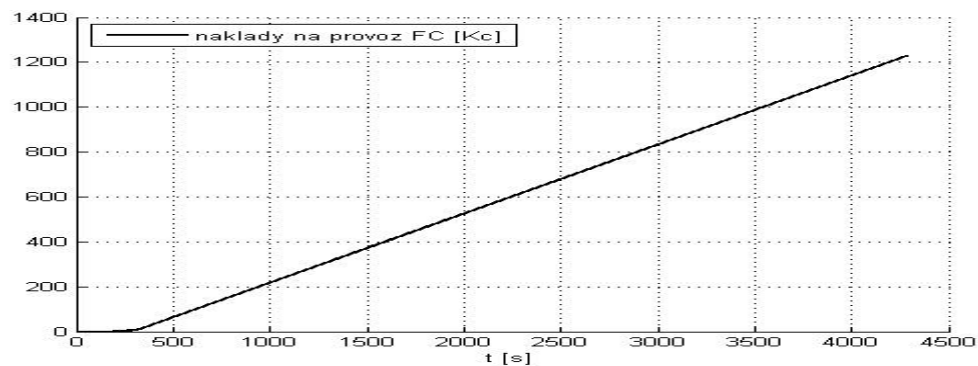
Obr. 7.5.1.6: Okamžitý stav akumulátoru



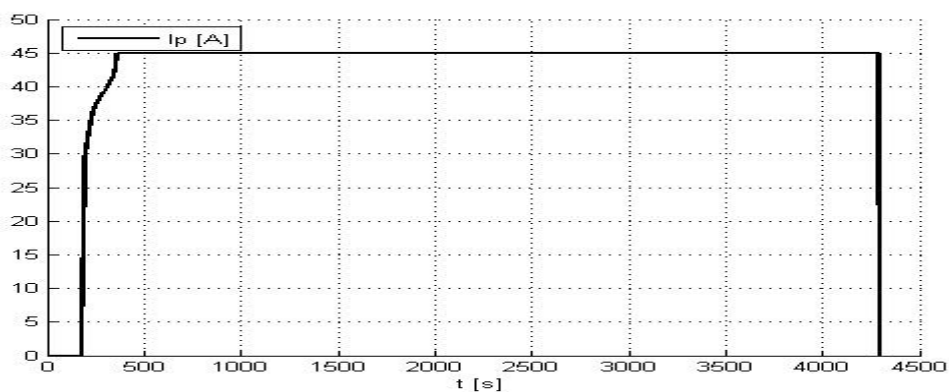
Obr. 7.5.1.7: Energie dodaná palivovými články



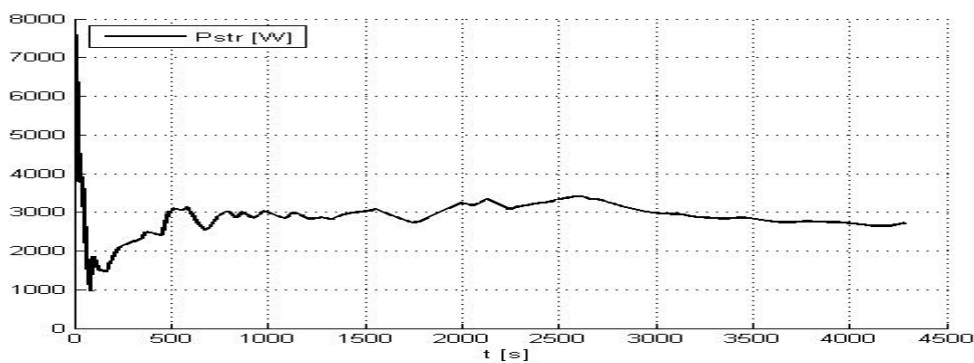
Obr. 7.5.1.8: Odebraný vodík



Obr. 7.5.1.9: Náklady na provoz palivových článků



Obr. 7.5.1.10: Žádaný dobíjecí proud

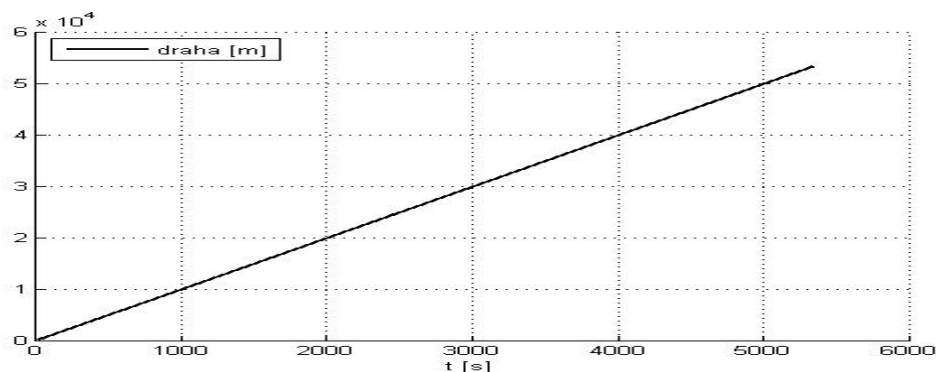


Obr. 7.5.1.11: Střední příkon motoru

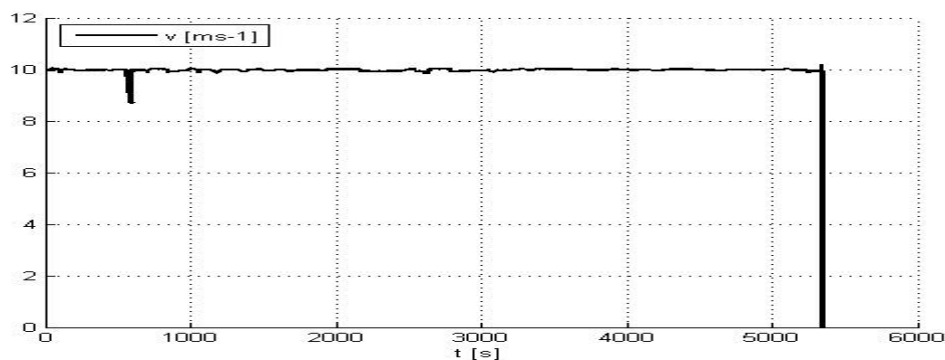
7.5.2 Průjezd trasy rychlostí 10m/s

V předchozím případě nebyl regulační účinek patrný (střední příkon motoru je o 320W vyšší než jsou palivové články schopny vyrobit). Zkusíme proto změnit vstupní podmínky simulace a to konkrétně rychlost na 10ms^{-1} (36km/h), trasa dle kapitoly 7.1., plně nabitý trakční akumulátor a plná tlaková láhev.

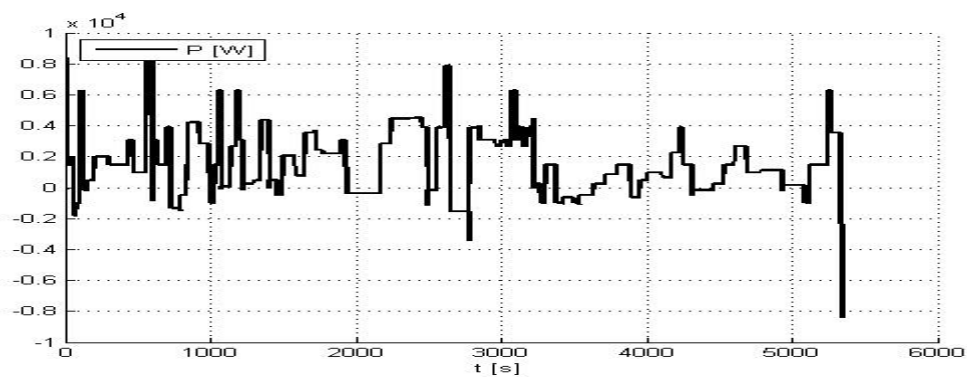
Při průjezdu tratě s rychlostí 10m/s (36km/h) dojde ke snížení středního příkonu pohonu vozidla na 1788W. Výsledkem jsou lepší podmínky regulace a důsledkem méně odebrané energie za celou dobu jízdy. Po skončení simulace je trakční akumulátor nabit na 89% celkové kapacity.



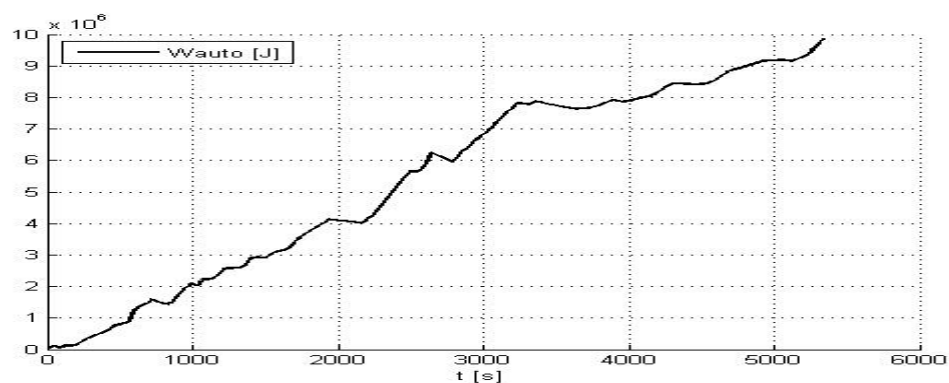
Obr. 7.5.2.1: Ujetá dráha



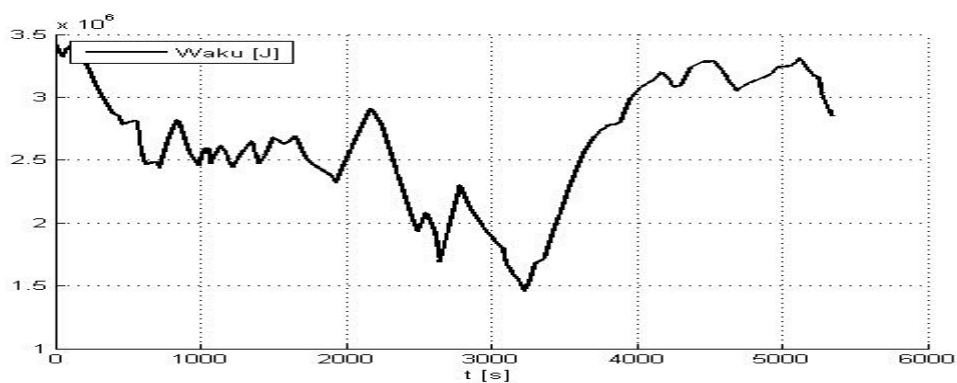
Obr. 7.5.2.2: Okamžitá rychlost vozidla



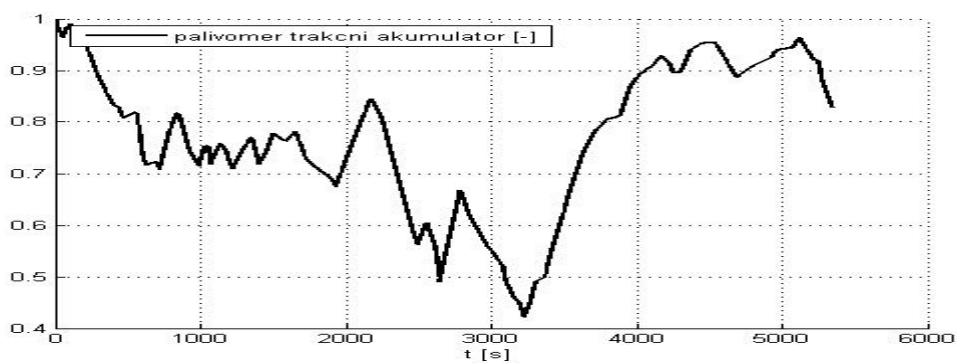
Obr. 7.5.2.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru



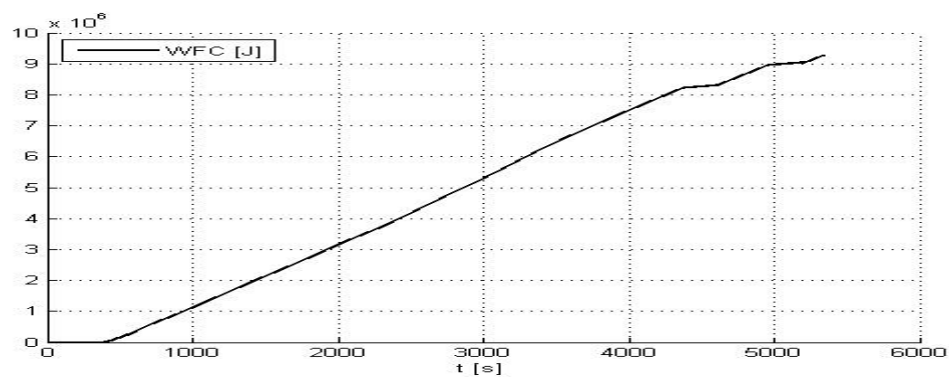
Obr. 7.5.2.4: Energie odebraná vozidlem



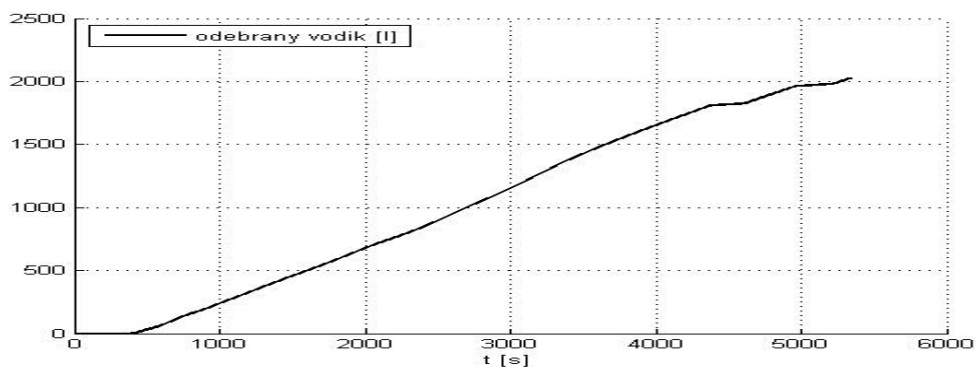
Obr. 7.5.2.5: Energie v trakčním akumulátoru



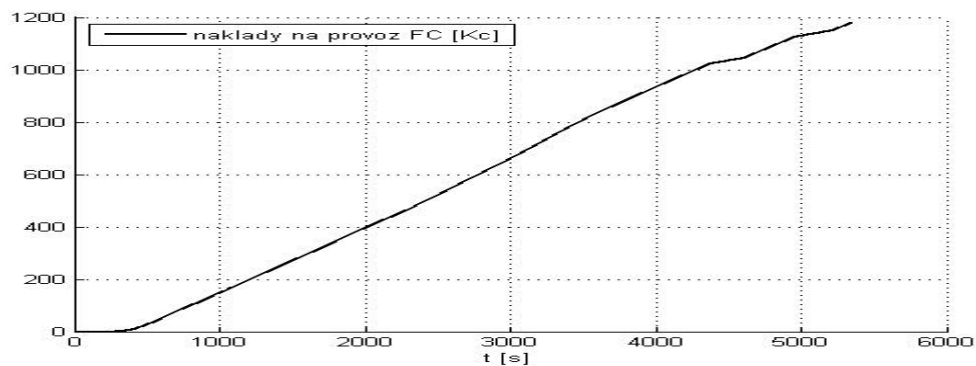
Obr. 7.5.2.6: Okamžitý stav akumulátoru



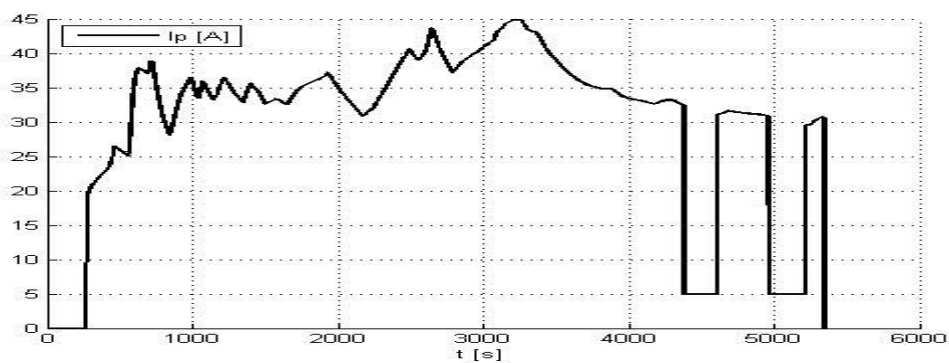
Obr. 7.5.2.7: Energie dodaná palivovými články



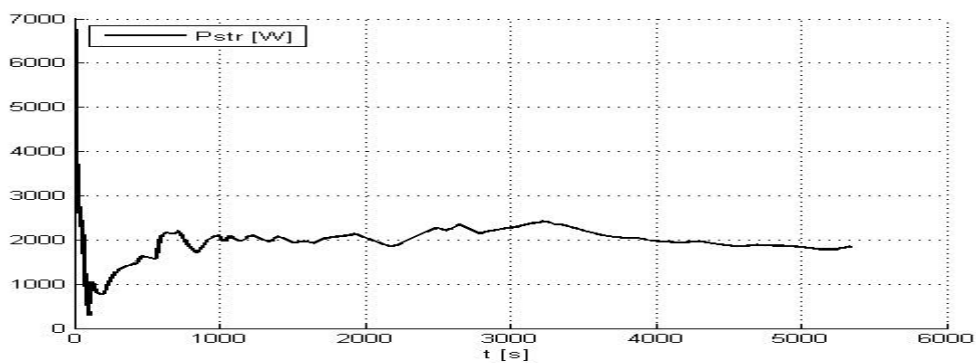
Obr. 7.5.2.8: Odebraný vodík



Obr. 7.5.2.9: Náklady na provoz palivových článků



Obr. 7.5.2.10: Žádaný dobíjecí proud

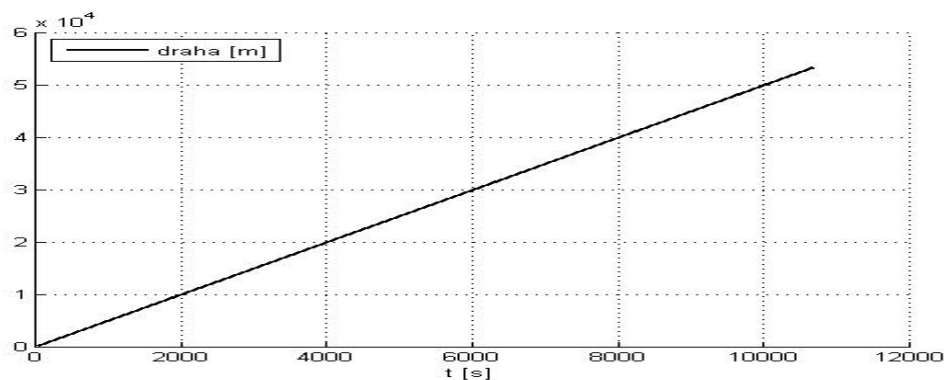


Obr. 7.5.2.11: Střední příkon motoru

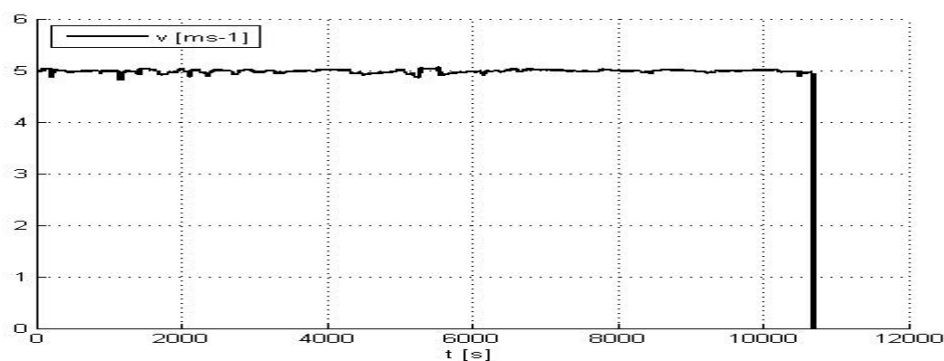
7.5.3 Průjezd trasy rychlostí 5m/s

Vstupními podmínkami pro simulaci je žádaná rychlost 5ms^{-1} (18km/h), trasa dle kapitoly 7.1., plně nabitý trakční akumulátor a plná tlaková láhev.

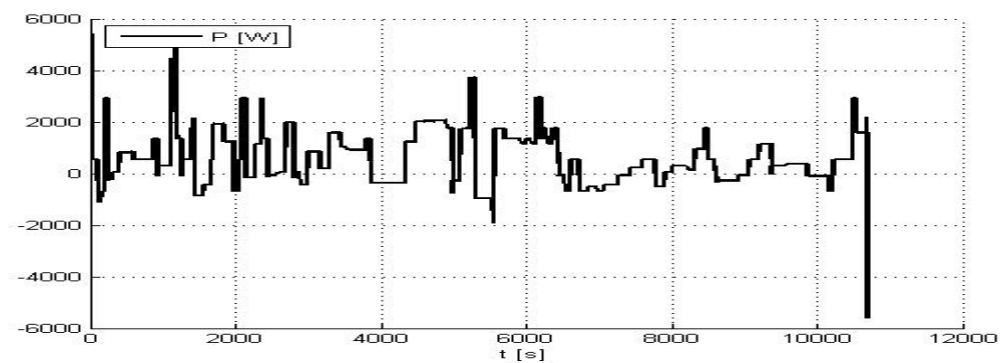
Při průjezdu tratě rychlostí 5m/s (18km/h) dojde k dalšímu snížení středního příkonu pohonu vozidla (664W) a regulace výkonu palivových článků probíhá v oblasti maximální účinnosti. Po skončení simulace je trakční akumulátor nabit na 94,5% celkové kapacity.



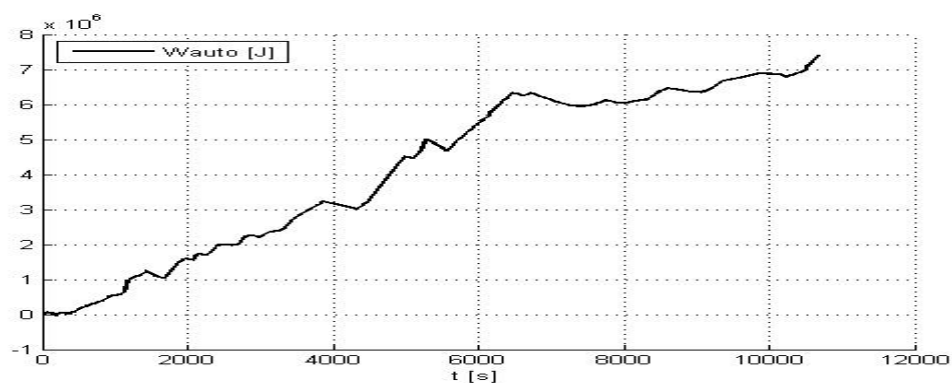
Obr. 7.5.3.1: Ujetá dráha



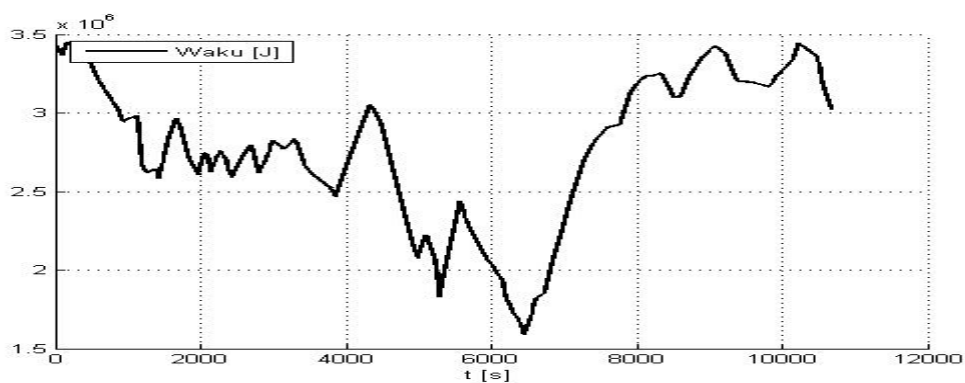
Obr. 7.5.3.2: Okamžitá rychlost vozidla



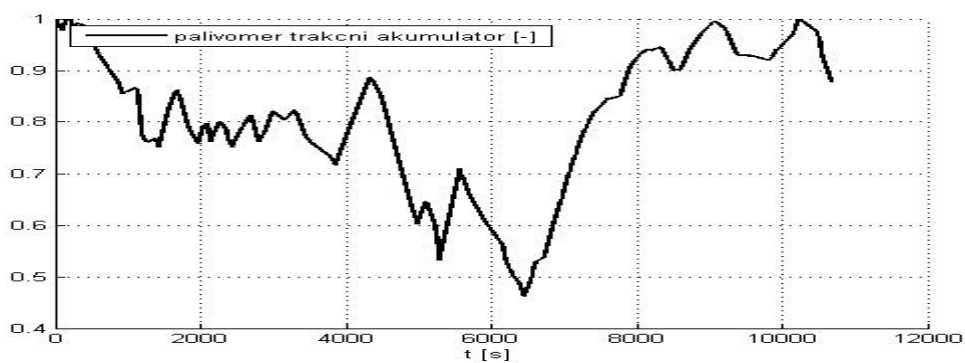
Obr. 7.5.3.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru



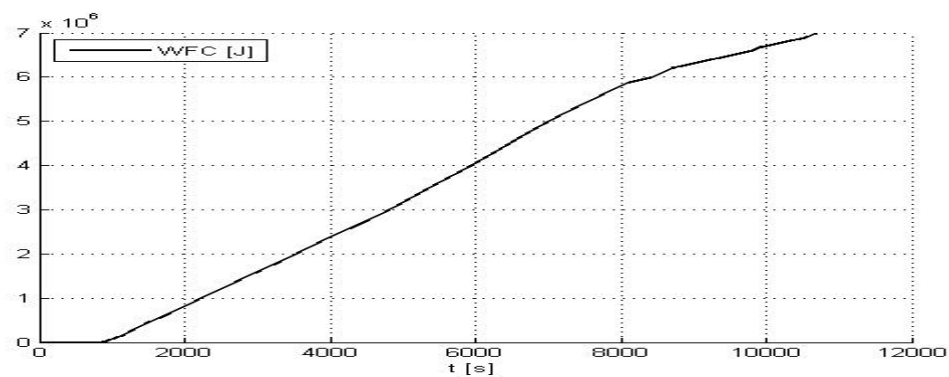
Obr. 7.5.3.4: Energie odebraná vozidlem



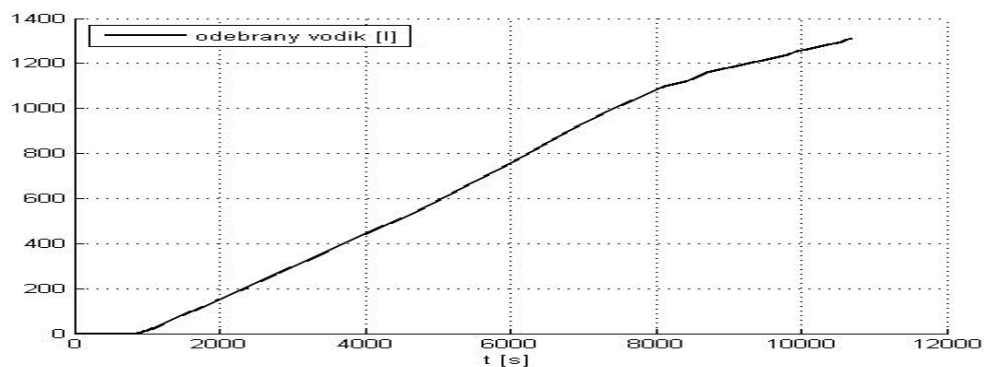
Obr. 7.5.3.5: Energie v trakčním akumulátoru



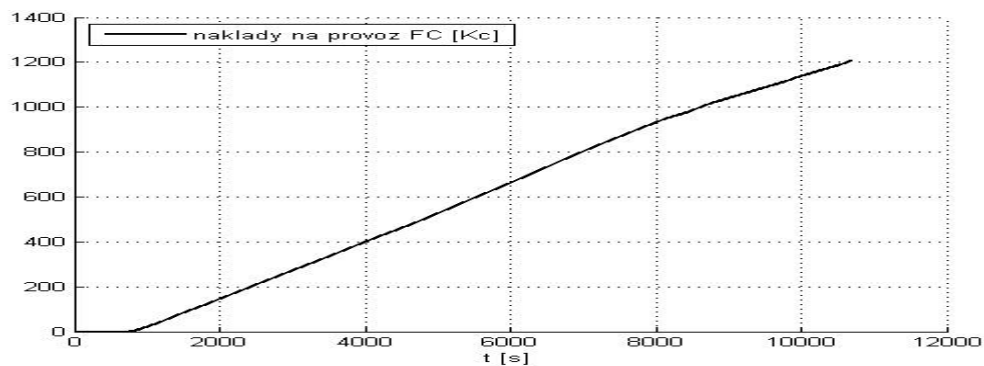
Obr. 7.5.3.6: Okamžitý stav akumulátoru



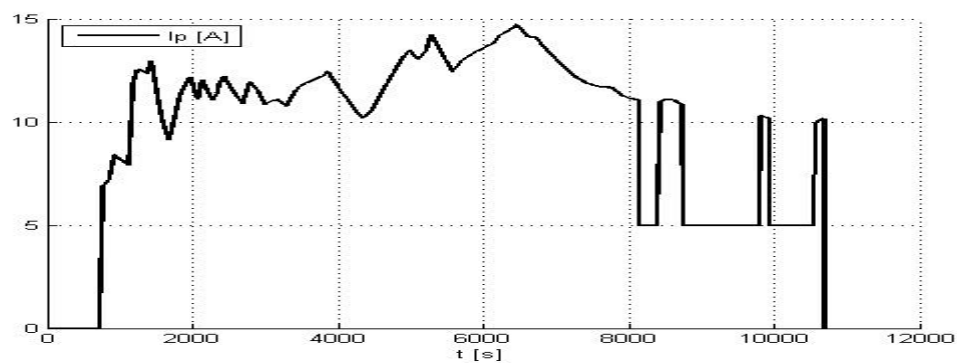
Obr. 7.5.3.7: Energie dodaná palivovými články



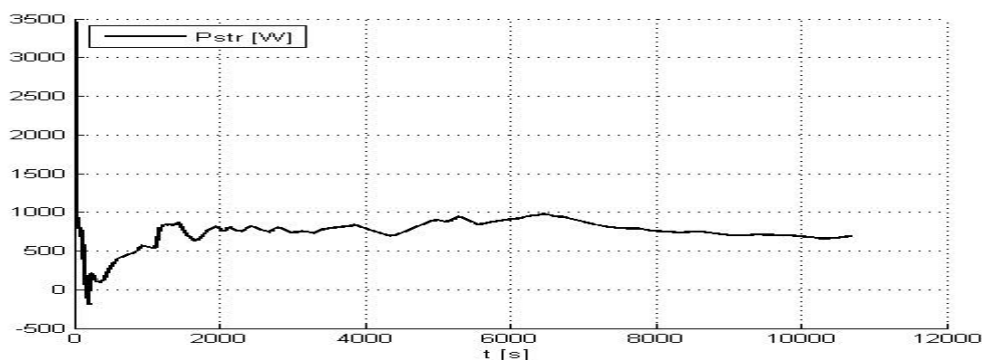
Obr. 7.5.3.8: Odebraný vodík



Obr. 7.5.3.9: Náklady na provoz palivových článků



Obr. 7.5.3.10: Žádaný dobíjecí proud

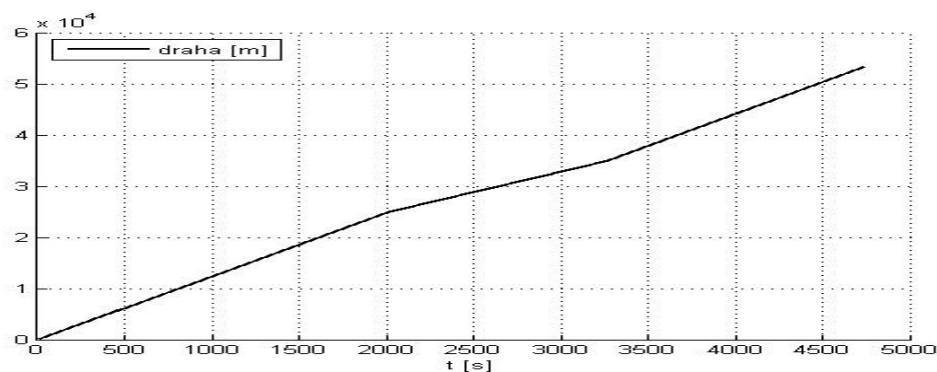


Obr. 7.5.3.11: Střední příkon motoru

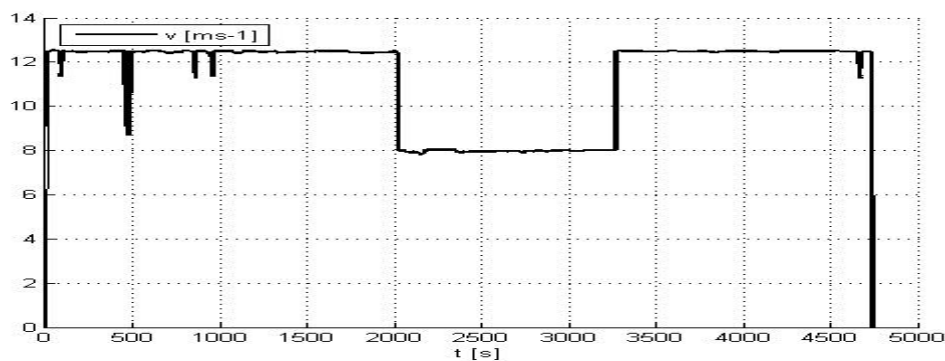
7.5.4 Průjezd trasy různými rychlostmi

Trat' dle kapitoly 7.1 jsme při mapování projížděli v úseku prvních 25km rychlostí 50km/h, dalších 10km nejnáročnější trasy rychlostí asi 40km/h a zbývajících 25km rychlostí 50km/h. Následující výsledky odpovídají průjezdu trasy prvních 25km rychlostí 45km/h (12,5m/s), následujících 10km trasy rychlostí 29km/h (8m/s) a zbývajících 25km rychlostí 45km/h. Vstupními podmínkami jsou plně nabitý trakční akumulátor, plná tlaková lahev a trasa dle kapitoly 7.1.

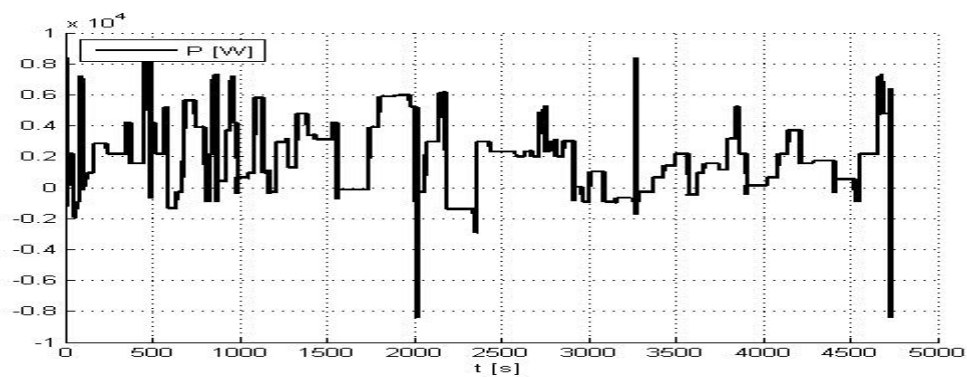
Výsledkem simulace je nižší střední příkon motoru, díky čemuž došlo k lepší regulaci výkonu palivových článků (obr. 7.5.4.10).



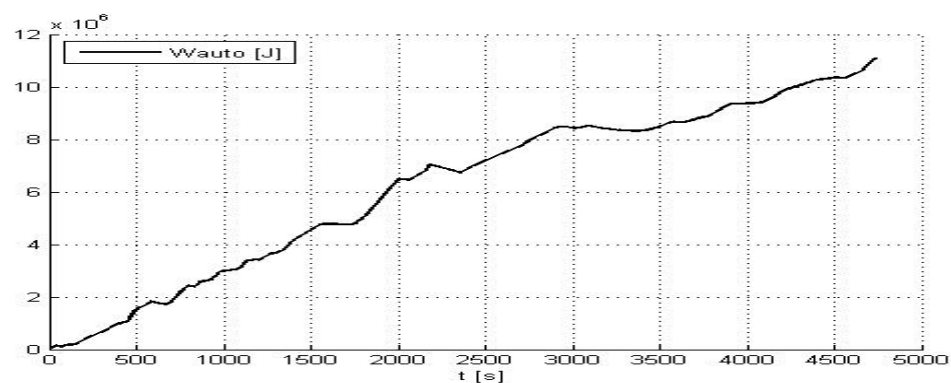
Obr. 7.5.4.1: Ujetá dráha



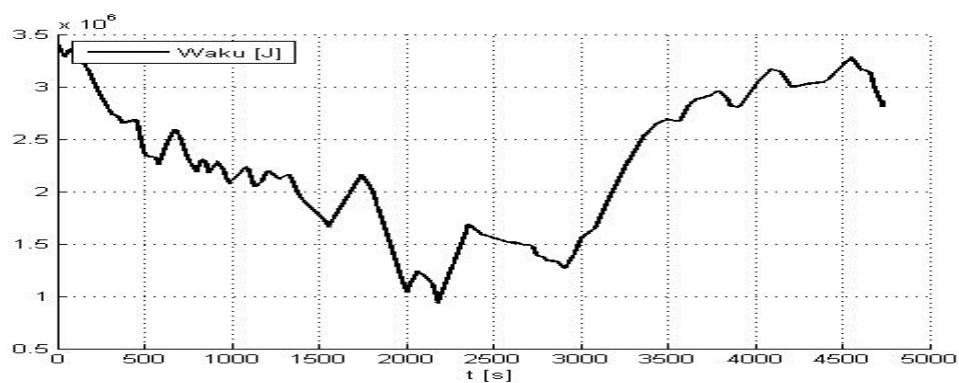
Obr. 7.5.4.2: Okamžitá rychlost vozidla



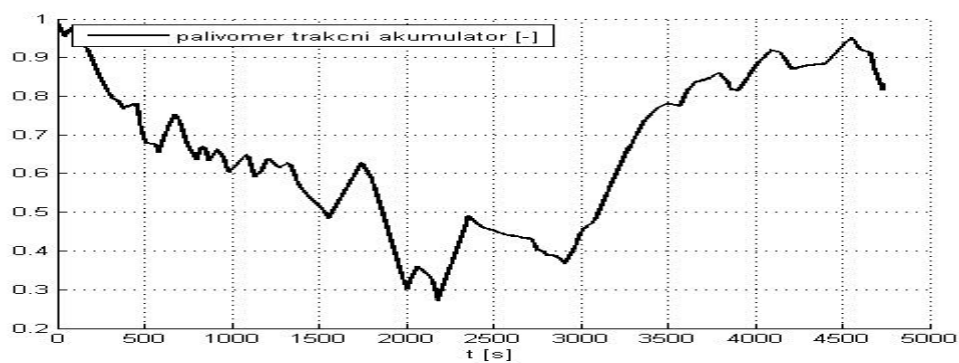
Obr. 7.5.4.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru



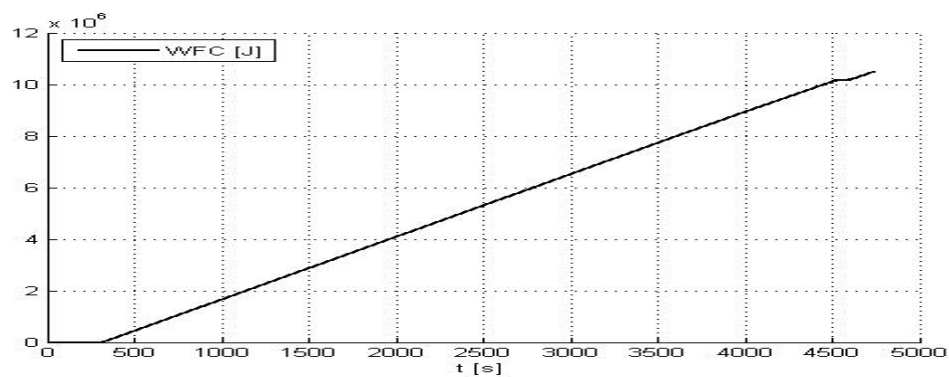
Obr. 7.5.4.4: Energie odebraná vozidlem



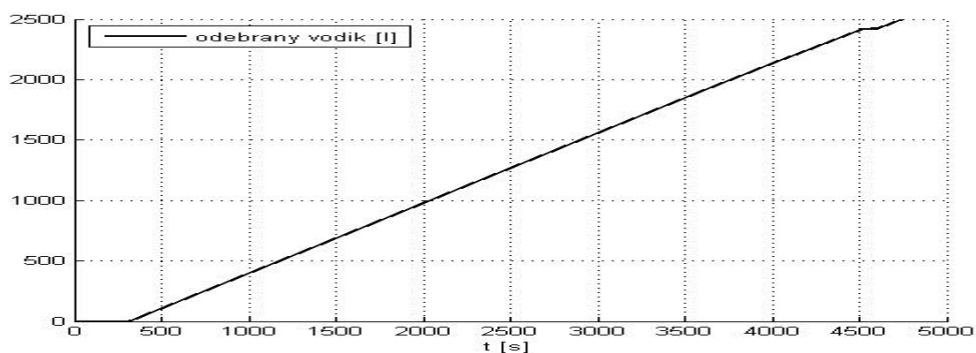
Obr. 7.5.4.5: Energie v trakčním akumulátoru



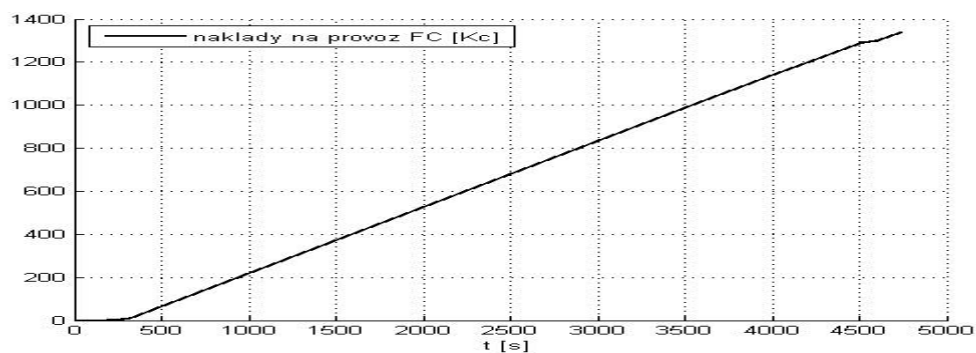
Obr. 7.5.4.6: Okamžitý stav akumulátoru



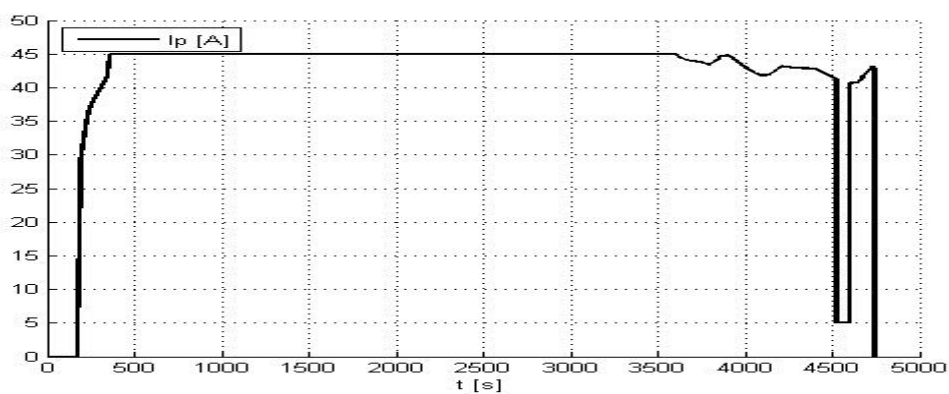
Obr. 7.5.4.7: Energie dodaná palivovými články



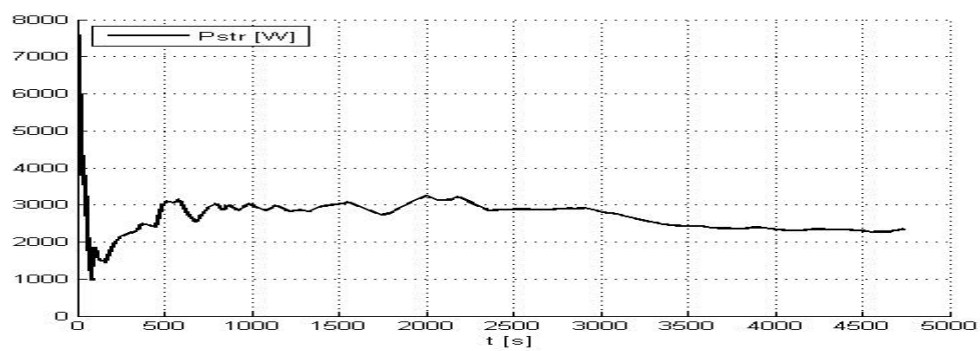
Obr. 7.5.4.8: Odebraný vodík



Obr. 7.5.4.9: Náklady na provoz palivových článků



Obr. 7.5.4.10: Žádaný dobíjecí proud



Obr. 7.5.4.11: Střední příkon motoru

8. Závěr

Cílem dizertační práce bylo vyvinutí nízkonapěťového trakčního pohonu s palivovými články 2x1200W, které slouží jako primární zdroj energie. Jako špičkový zdroj je užitá baterie LiFe-Po akumulátorů, která je schopna krátkodobě dodat proud až 360A při akceleraci a je také schopna pojímat energii vyrobenou rekuperativním brzděním. Samotný pohon je realizován 3f DC/AC měničem a asynchronním motorem.

Při řešení byly vyřešeny tyto dílčí cíle dizertační práce:

- Nalezení vhodné topologie napájecí části pohonu. Výsledkem rozboru je užití dvou palivových článků výkonově přizpůsobených k trakčnímu akumulátoru pomocí stabilizačního měniče. Problematika řešena v kap. 4.
- Návrh a realizace stabilizačního měniče zařazeného mezi palivové články a trakční akumulátor (kapitola 4.2.1. a 4.2.2). Realizace obvodů ochrany trakčního akumulátoru (kapitola 4.3.).
- Návrh a ověření matematického modelu vozu a jednotlivých komponent energetického řetězce. Návrhy matematických modelů jsou řešeny v kapitole 6.
- Návrh matematického modelu řízení výkonu palivových článků s ohledem primárně na co nejvyšší účinnost přeměny vodíku v elektrickou energii, sekundárně na co nejvyšší dojezd a simulace provozu vozidla na matematickém modelu trati. Problematika řešena v kapitole 7.

Opodstatnění užití palivových článků v napájecím řetězci je dokázáno výsledky z kapitoly 7.2, kde je automobil napájen pouze z trakční baterie. Dojezd vozidla na trase dle kapitoly 7.1 činil jen 15,2km (při rychlosti 15,2km/h, tedy 45km/h).

Zavedením dobíjení palivových článků proudem (15A) odpovídajícím provozu v oblasti maximální účinnosti bylo dosaženo prodloužení dojezdu na 19,2km (délka celé trati 53,2km) s náklady na provoz palivových článků 202Kč. Výsledky jsou uvedeny v kapitole 7.3.

Zvýšením dobíjecího proudu na hodnotu (45A) odpovídající provozu v oblasti maximálního výkonu bylo docíleno projetí celé trasy s náklady na provoz palivových článků 1262,50Kč, po skončení simulace zbylo v trakčním akumulátoru 50,2% energie. Výsledky jsou uvedeny v kapitole 7.4.

Simulacemi bylo také zjištěno, že střední příkon odebíraný pohonem vozidla není příliš závislý na profilu trati, nýbrž spíše na rychlosti kterou je trať projížděna. Při maximální rychlosti 45km/h je tento příkon vyšší (2720W) než maximální výkon (2400W) palivových článků. Důsledkem je skutečnost, že v této výkonové sestavě palivové články nelze provozovat v oblasti maximální účinnosti (důkaz v kapitole 7.3), ale spíše v oblasti maximálního výkonu.

Řízením výkonu palivových článků dle středního příkonu motoru bylo dosaženo snížení nákladů na provoz palivových článků (1205Kč) a po skončení simulace byl trakční akumulátor nabit na 43,1% své celkové kapacity. Oproti výsledkům z kapitoly 7.4 došlo

sice ke snížení nákladů o 57,50Kč, ale také ke snížení množství energie v trakčním akumulátoru po skončení simulace. Tento fakt lze ale považovat za výhodu, která spočívá v přípravě energie do trakčního akumulátoru. Dle výsledků z kapitoly 7.4 a 7.5.1 bylo v prvním případě v trakčním akumulátoru připraveno o 7,1% energie více, ale s nižší účinností přeměny. S výsledky z kapitol 7.4 a 7.5.1 se dají za určitých podmínek srovnat také s výsledky z kapitoly 7.5.4, ve které byla trasa projížděna různými rychlostmi. Budeme-li v těchto třech případech srovnávat parametry: množství energie v trakčním akumulátoru po skončení simulace, střední příkon motoru, množství spáleného vodíku a náklady na provoz palivových článků, dospějeme k následujícím závěrům.

- V kapitole 7.4 bylo v průběhu simulace spáleno 2368l vodíku, střední příkon motoru činil 2720W, akumulátor po skončení simulace obsahoval 50,2% a náklady na provoz činily 1262,50Kč.
- V kapitole 7.5.1 bylo v průběhu simulace spáleno 2308l vodíku, střední příkon motoru činil 2720W, akumulátor po skončení simulace obsahoval 43,1% a náklady na provoz činily 1205Kč.
- V kapitole 7.5.4 bylo v průběhu simulace spáleno 2495l vodíku, střední příkon motoru činil 2348W, akumulátor po skončení simulace obsahoval 83,3% a náklady na provoz činily 1338Kč.

S ohledem na náklady je určitě vhodnější (za stejných počátečních podmínek simulace) mít na konci simulace v akumulátoru méně připravené energie z drahého vodíku za cenu nižších provozních nákladů. Z tohoto důvodu je řízení výkonu palivových článků dle středního příkonu motoru určitě vhodnější. Budeme-li srovnávat výsledky kapitol 7.5.1 a 7.5.4 (v obou kapitolách je výkon řízen podle středního příkonu motoru), zjistíme jakým způsobem se projevilo odlehčení motoru v časovém intervalu 2000-3250s (snížení požadované rychlosti vozidla z 12,5m/s (45km/h) na 8m/s (29km/h)). Poklesem rychlosti vozidla došlo i k poklesu středního příkonu motoru, k poklesu energie odebrané jízdou a k lepší regulaci výkonu palivových článků. Výsledkem je proto více energie (o 40,2%) po skončení simulace v trakčním akumulátoru za cenu zvýšených nákladů.

Budeme-li trasu projíždět nižší konstantní rychlostí, docílíme lepších regulačních výsledků. Výsledky jsou uvedeny v kapitolách 7.5.2 a 7.5.3.

- V kapitole 7.5.2 (rychlost 10m/s (36km/h)) bylo v průběhu simulace spáleno 2028l vodíku, střední příkon motoru činil 1847W, akumulátor po skončení simulace obsahoval 84% a náklady na provoz činily 1180Kč.
- V kapitole 7.5.3 (rychlost 5m/s (18km/h)) bylo v průběhu simulace spáleno 1311l vodíku, střední příkon motoru činil 693W, akumulátor po skončení simulace obsahoval 88% a náklady na provoz činily 1205Kč.

Je tedy zřejmé, že se snižující se rychlostí klesne spotřeba vodíku (zlepší se regulace dobíjení) i střední příkon motoru a stoupne množství energie v trakčním akumulátoru po skončení simulace. Na první pohled je ale zarážející, že stouply i náklady na provoz palivových článků. Tyto náklady sestávají ze dvou položek, kde první položka je cena za spálený vodík a k ní se připočítává cena jedné časové jednotky provozu palivových článků násobená dobou simulace.

Pokud uvážíme všechny výsledky uvedené v předchozích odstavcích, dojdeme k závěru, že pro zlepšení regulace (přeměna vodíku v elektřinu) je třeba užít palivový

článek s vyšším výkonem, nebo použít tři kusy namísto dvou kusů stávajících palivových článků (námi užití palivové články jsou pro rychlost 12,5m/s (45km/h) slabé). Ve stávající koncepci se jako nejlepší způsob řízení výkonu palivových článků jeví regulace proudu podle středního příkonu motoru.

Vzhledem k požáru v laboratořích, při němž došlo také ke zničení pokusného vodíkového automobilu nebylo možné experimentálně ověřit parametry koncepce pohonu a výsledky simulací.

Prostor pro pokračování výkumu se nachází například ve zvýšení výkonu palivového článku a v zavedení algoritmů pro dokonalejší řízení výkonu. Jednou z možností je užití samoučícího se algoritmu, který by sledoval jízdní styl řidiče.

9. Literatura

- [1] JÍLEK, František. *Zrození velkých vynálezců : Příběhy mužů, kteří změnili život*. 1. vydání. Praha : Práce, 1988. 488 s. ISBN 24-001-88.
 - [2] MAYER, Daniel. *Pohledy do minulosti elektrotechniky*. 2. doplněné vydání. České Budějovice : KOPP, 2004. 427 s. ISBN 80-7232-219-2.
 - [3] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. 1.vydání. Brno : Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2004. 232 s. ISBN 80-239-1602-5.
 - [4] VLK, František. *Úlohy z dynamiky motorových vozidel*. 1. vydání. Brno : Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2001. 221 s. ISBN 80-238-6574-9.
 - [5] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
 - [6] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek I*. Brno : Zdeněk Novotný, 2000. 61 s. ISBN 80-214-1736-6.
 - [7] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek II*. Brno : Zdeněk Novotný, 2004. 175 s. ISBN 80-214-2743-4.
 - [8] HEJKRLÍK, Jan. *Vysokonapěťový spínaný zdroj*. Brno, 2006. 45 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické, FEEC, UVEE.
 - [9] PATOČKA, M.; PROCHÁZKA, P. ANALYTIC SOLUTION OF THE ELECTRIC CAR DYNAMICS . In *Proceeding of 16th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics*. EDPE. Fakulta elektrotechniky a informatiky, TU Košice, Slovenská rep.: Slovenská elektrotechnická spoločnosť, pobočka pri TU v Košiciach, Slovenská rep., 2007. s. 235-239. ISBN: 978-80-8073-868-6.
 - [10] VOREL, P. Budiče výkonových tranzistorů MOSFET a IGBT. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2004, roč. 2004, č. 30, s. 1-15. ISSN: 1213-1539.
 - [11] *Nexa™ Power Module User's Manual: MAN5100078*. Ballard Power Systems Inc., 2003. 114 s. Dostupné z WWW: <<http://faculty.stut.edu.tw/~wcchang/MAN5100078.pdf>>.
 - [12] *A123Systems* [online]. 2007-2011 [cit. 2011-05-04]. Products. Dostupné z WWW: <http://www.a123systems.com/cms/product/pdf/1/_ANR26650M1A.pdf>.
 - [13] An approach to connect ultracapacitor to fuel cell powered electric vehicle and emulating fuel cell electrical characteristics using switched mode converter. In *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE* [online]. Minneapolis : Minnesota Univ., 2003 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?reload=true&arnumber=1280102>.
 - [14] *Maxwell Technologies* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Ultracapacitors. Dostupné z WWW: <<http://www.maxwell.com/ultracapacitors/products/modules/bmod0083-48-6v.asp>>.
 - [15] *Centrum dopravního výzkumu* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdv.cz/>>.
 - [16] PATOČKA, M., PROCHÁZKA, P., KLÍMA, B. et al. Elektromobil s vodíkovými palivovými články. In *XXII Medzinárodné sympóziu učiteľov elektrických pohonov SYMEP08*. Trenčín: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 2008. s. 89-100. ISBN: 978-80-8075-337-5.
 - [17] *Tesla motors* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.teslamotors.com.cz/>>.
 - [18] *Citroen* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.citroen.cz/>>.
 - [19] *Toyota* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.toyota.cz/>>.
-

- [20] *Bmw* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.bmw.cz/>>.
- [21] *Peugeot* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.peugeot.cz/>>.
- [22] *Linde Gas a.s.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.linde-gas.cz/>>.
- [23] *International Rectifier* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.irf.com/>>.
- [24] *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.hytep.cz/>>.

Curriculum Vitae

Jméno: Jan Hejkrlík
Narozen: 14.10.1981 v Ústí nad Orlicí
Kontakt: xhejkr00@stud.feec.vutbr.cz

Vzdělání

1997-2001 Střední průmyslová škola elektrotechnická a Vyšší odborná škola Pardubice
2001-2006 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně
2006-2011 doktorské studium na UVEE, FEKT VUT Brno

Praxe

2006-2009 Technický pracovník na UVEE, FEKT VUT Brno

Účast na řešení projektů

2008 Spoluřešitel grantového projektu FRVŠ s názvem „Dvě laboratorní úlohy s vodíkovým palivovým článkem 1,2 kW“.

Přílohy

Seznam použitých symbolů

U_D	[V]	napětí ve stejnosměrném meziobvodu měniče
R_i	[Ω]	vnitřní odpor palivového článku
U_{j0}	[V]	napětí naprázdno palivového článku
U_o	[V]	výstupní napětí měniče (napětí baterií)
u_L	[V]	okamžitá hodnota napětí na tlumivce
I_F	[A]	proud palivovým článkem
I_c	[A]	proud kondenzátorem ve stejnosměrném obvodu
I_D	[A]	vstupní proud měniče
I_o	[A]	výstupní proud měniče
N	[-]	závity
B_{max}	[T]	maximální hodnota indukce
S_{fe}	[m ²]	průřez feromagnetického jádra
L	[H]	indukčnost
I_{max}	[A]	maximální hodnota proudu
λ_m	[Hzáv. ⁻²]	magnetická vodivost
λ_{mfe}	[Hzáv. ⁻²]	magnetická vodivost feromagnetického jádra
l_{fe}	[m]	délka magnetické siločáry ve feromagnetickém jádře
μ_0	[Hm ⁻¹]	permeabilita vakua
μ_r	[-]	permeabilita relativní
l_v	[m]	délka vzduchové mezery
U_{DSS}	[V]	maximální závěrné napětí tranzistoru
R_{DSon}	[V]	odpor tranzistoru v sepnutém stavu
I_D	[A]	maximální proud tranzistoru
P_{Tztr}	[W]	ztrátový výkon na tranzistoru
I_{def}	[A]	efektivní proud tranzistorem
s	[-]	střída
s_{min}	[-]	minimální hodnota střidy
P_{Dztr}	[W]	ztrátový výkon na diodě
U_{prah}	[V]	prahové napětí diody
$I_{Dstř}$	[A]	střední proud diodou
U_R	[V]	maximální závěrné napětí diody
$I_{F(AV)}$	[A]	maximální proud diody
ξ	[-]	koeficient ztrát suchého a valivého tření
m	[kg]	hmotnost vozidla
g	[ms ⁻²]	gravitační zrychlení
k_V	[kgs ⁻¹]	koeficient ztrát viskozního tření
$v_{(t)}$	[ms ⁻¹]	okamžitá rychlost vozidla
$a_{(t)}$	[ms ⁻²]	okamžité zrychlení vozidla
C_X	[-]	koeficient aerodynamického odporu
ρ	[kgm ⁻³]	hustota vzduchu (1,29kg/m ³)
S	[m ²]	plocha kolmého průmětu čelní plochy
α	[°]	náklon trati
F	[N]	ekvivalentní tažná síla
F_N	[N]	odporová síla způsobená náklonem trati
F_F	[N]	odporová síla způsobená suchým a valivým třením
F_V	[N]	odporová síla způsobená viskozním třením
F_A	[N]	odporová síla způsobená aerodynamickým odporem
F_p	[N]	požadovaná ekvivalentní tažná síla
P	[W]	výkon
P_{str}	[W]	střední příkon motoru
I_p	[A]	požadovaný dobíjecí proud
U_{cl}	[V]	napětí jednoho článku trakčního akumulátoru

U_{ak}	[V]	napětí trakčního akumulátoru
W	[J]	energie
W_{FC}	[J]	dodaná palivovými články
W_{AKU}	[J]	energie v trakčním akumulátoru
W_{AUTO}	[J]	energie odebraná vozidlem
W_{cl}	[J]	energie jednoho článku trakčního akumulátoru
W_{ak}	[J]	energie v trakčním akumulátoru
M	[Nm]	moment

Seznam obrázků

Obr.2.4.1.2.1: Výroba vodíku	- 15 -
Obr. 2.4.1.3.1: Schématické znázornění palivového článku	- 17 -
Obr. 4.1: Topologie pohonu s palivovým článkem	- 23 -
Obr. 4.2: Topologie pohonu s palivovým článkem a ultrakapacitorem	- 24 -
Obr. 4.3: Topologie pohonu s trakčním akumulátorem	- 24 -
Obr. 4.4: Topologie pohonu s trakčním akumulátorem a ultrakapacitorem	- 25 -
Obr. 4.5: Zvolená topologie pohonu	- 26 -
Obr. 4.6: Úprava pedálové skupiny	- 26 -
Obr. 4.1.1.: Blokové schéma palivového článku	- 27 -
Obr. 4.1.2: Fotografie palivových článků	- 28 -
Obr. 4.2.1.1: Zatěžovací charakteristika palivového článku	- 29 -
Obr. 4.2.1.2: Principiální schéma stabilizačního měniče	- 29 -
Obr. 4.2.1.3: Průběhy proudů měničem a kondenzátorem	- 30 -
Obr. 4.2.1.4: Závislost náboje a efektivního proudu kondenzátorem na střídě	- 33 -
Obr. 4.2.1.5: Výkres jádra filtrační tlumivky stabilizačního měniče	- 34 -
Obr. 4.2.2.1: Schéma stabilizačního měniče	- 38 -
Obr. 4.2.2.2: Fotografie rozpracovaného měniče	- 39 -
Obr. 4.2.2.3: Mechanické uspořádání stabilizačního měniče	- 39 -
Obr. 4.3.1: Zástavba akumulátoru ve vozidle	- 40 -
Obr. 4.3.2: Schéma ochrany akumulátoru	- 41 -
Obr. 5.1.1: Rozložení sil působících na vozidlo (hmotný bod)	- 42 -
Obr. 5.1.1: Okamžitá rychlost	- 46 -
Obr. 5.1.2: Okamžité zrychlení	- 46 -
Obr. 5.1.3: Okamžitý výkon	- 47 -
Obr. 5.1.4: Odebraná energie	- 47 -
Obr. 5.2.1: Momentová charakteristika pohonu vozidla	- 48 -
Obr. 5.2.2: Závislost maximální možné ekvivalentní tažné síly na rychlosti vozidla	- 48 -
Obr. 5.2.3: Okamžitá rychlost	- 51 -
Obr. 5.2.4: Okamžité zrychlení	- 51 -
Obr. 5.2.5: Okamžitý výkon	- 51 -
Obr. 5.3.1: Okamžitá rychlost	- 52 -
Obr. 5.3.2: Okamžité zrychlení	- 52 -
Obr. 5.3.3: Okamžitý výkon	- 52 -
Obr. 5.3.4: Odebraná energie	- 53 -
Obr. 5.3.5: Model pro simulaci rovnice (45)	- 53 -
Obr. 5.3.6: Ekvivalentní tažná síla	- 53 -
Obr. 5.3.7: Okamžitá rychlost	- 54 -
Obr. 5.3.8: Okamžité zrychlení	- 54 -
Obr. 5.3.9: Okamžitý výkon	- 54 -
Obr. 5.3.10: Odebraná energie	- 54 -
Obr. 5.3.11: Model simulace rovnice (45) se zohledněnou momentovou charakteristikou pohonu	- 55 -
Obr. 6.1: Matematický model vozu	- 56 -
Obr. 6.1.1: Matematický model SEM H ₂	- 57 -
Obr. 6.1.1.1: Základní model vozidla	- 58 -
Obr. 6.1.1.2: Koncová podoba modelu použitá pro další simulace	- 60 -
Obr. 6.1.1.3: Skutečná ekvivalentní tažná síla	- 60 -

Obr. 6.1.1.4: Okamžitá rychlost	- 61 -
Obr. 6.1.1.5: Zrychlení	- 61 -
Obr. 6.1.1.6: Výkon	- 61 -
Obr. 6.1.1.7: Odebraná energie	- 61 -
Obr. 6.1.1.8: Koncová podoba modelu upravená jako subsystém pro model SEM H ₂	- 62 -
Obr. 6.2.1: Vnitřní schéma bloku ÚČINNOST POHONU	- 62 -
Obr. 6.3.1: Vnitřní schéma bloku ZDROJ ENERGIE	- 64 -
Obr. 6.3.1.1: Matematický model bloku SÉRIOVÁ DVOJICE PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	- 66 -
Obr. 6.3.1.1.1: Matematický model bloku ODEZVA	- 66 -
Obr. 6.3.2.1: Matematický model bloku TLAKOVÁ LÁHEV	- 67 -
Obr. 6.3.3.1: Matematický model bloku TRAKČNÍ AKUMULÁTOR	- 69 -
Obr. 6.3.4: Matematický model bloku VÝPOČET STŘÍDY	- 69 -
Obr. 6.4.1: Model bloku KALKULÁTOR CENY PROVOZU PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	- 71 -
Obr. 6.5.1: Matematický model bloku ŘIDIČ	- 71 -
Obr. 7.1.1: Matematický model bloku TRASA	- 72 -
Obr. 7.2.1: Ujetá dráha	- 74 -
Obr. 7.2.2: Okamžitá rychlost vozidla	- 74 -
Obr. 7.2.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru	- 74 -
Obr. 7.2.4: Energie odebraná vozidlem	- 74 -
Obr. 7.2.5: Energie v trakčním akumulátoru	- 75 -
Obr. 7.2.6: Okamžitý stav akumulátoru	- 75 -
Obr. 7.2.7: Střední příkon motoru	- 75 -
Obr. 7.3.1: Ujetá dráha	- 76 -
Obr. 7.3.2: Okamžitá rychlost vozidla	- 76 -
Obr. 7.3.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru	- 76 -
Obr. 7.3.4: Energie odebraná vozidlem	- 76 -
Obr. 7.3.5: Energie v trakčním akumulátoru	- 77 -
Obr. 7.3.6: Okamžitý stav akumulátoru	- 77 -
Obr. 7.3.7: Energie dodaná palivovými články	- 77 -
Obr. 7.3.8: Odebraný vodík	- 77 -
Obr. 7.3.9: Náklady na provoz palivových článků	- 78 -
Obr. 7.3.10: Žádaný dobíjecí proud	- 78 -
Obr. 7.3.11: Střední příkon motoru	- 78 -
Obr. 7.3.12: Schéma řízení na maximální účinnost palivových článků	- 78 -
Obr. 7.4.1: Ujetá dráha	- 79 -
Obr. 7.4.2: Okamžitá rychlost vozidla	- 79 -
Obr. 7.4.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru	- 79 -
Obr. 7.4.4: Energie odebraná vozidlem	- 80 -
Obr. 7.4.5: Energie v trakčním akumulátoru	- 80 -
Obr. 7.4.6: Okamžitý stav akumulátoru	- 80 -
Obr. 7.4.7: Energie dodaná palivovými články	- 80 -
Obr. 7.4.8: Odebraný vodík	- 81 -
Obr. 7.4.9: Náklady na provoz palivových článků	- 81 -
Obr. 7.4.10: Žádaný dobíjecí proud	- 81 -
Obr. 7.4.11: Střední příkon motoru	- 81 -
Obr. 7.4.12: Schéma řízení na maximální proud palivových článků	- 82 -
Obr. 7.5.1: Schéma řízení palivových článků dle středního příkonu motoru	- 82 -
Obr. 7.5.2: Charakteristika převodu (běžová LOOK-UP TABLE)	- 83 -
Obr. 7.5.1.1: Ujetá dráha	- 83 -
Obr. 7.5.1.2: Okamžitá rychlost vozidla	- 83 -
Obr. 7.5.1.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru	- 84 -
Obr. 7.5.1.4: Energie odebraná vozidlem	- 84 -
Obr. 7.5.1.5: Energie v trakčním akumulátoru	- 84 -
Obr. 7.5.1.6: Okamžitý stav akumulátoru	- 84 -
Obr. 7.5.1.7: Energie dodaná palivovými články	- 85 -
Obr. 7.5.1.8: Odebraný vodík	- 85 -
Obr. 7.5.1.9: Náklady na provoz palivových článků	- 85 -
Obr. 7.5.1.10: Žádaný dobíjecí proud	- 85 -
Obr. 7.5.1.11: Střední příkon motoru	- 86 -
Obr. 7.5.2.1: Ujetá dráha	- 86 -

Obr. 7.5.2.2: Okamžitá rychlost vozidla	- 86 -
Obr. 7.5.2.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru	- 87 -
Obr. 7.5.2.4: Energie odebraná vozidlem	- 87 -
Obr. 7.5.2.5: Energie v trakčním akumulátoru	- 87 -
Obr. 7.5.2.6: Okamžitý stav akumulátoru	- 87 -
Obr. 7.5.2.7: Energie dodaná palivovými články	- 88 -
Obr. 7.5.2.8: Odebraný vodík	- 88 -
Obr. 7.5.2.9: Náklady na provoz palivových článků	- 88 -
Obr. 7.5.2.10: Žádaný dobíjecí proud	- 88 -
Obr. 7.5.2.11: Střední příkon motoru	- 89 -
Obr. 7.5.3.1: Ujetá dráha	- 89 -
Obr. 7.5.3.2: Okamžitá rychlost vozidla	- 89 -
Obr. 7.5.3.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru	- 90 -
Obr. 7.5.3.4: Energie odebraná vozidlem	- 90 -
Obr. 7.5.3.5: Energie v trakčním akumulátoru	- 90 -
Obr. 7.5.3.6: Okamžitý stav akumulátoru	- 90 -
Obr. 7.5.3.7: Energie dodaná palivovými články	- 91 -
Obr. 7.5.3.8: Odebraný vodík	- 91 -
Obr. 7.5.3.9: Náklady na provoz palivových článků	- 91 -
Obr. 7.5.3.10: Žádaný dobíjecí proud	- 91 -
Obr. 7.5.3.11: Střední příkon motoru	- 92 -
Obr. 7.5.4.1: Ujetá dráha	- 92 -
Obr. 7.5.4.2: Okamžitá rychlost vozidla	- 92 -
Obr. 7.5.4.3: Okamžitý výkon na hřídeli motoru	- 93 -
Obr. 7.5.4.4: Energie odebraná vozidlem	- 93 -
Obr. 7.5.4.5: Energie v trakčním akumulátoru	- 93 -
Obr. 7.5.4.6: Okamžitý stav akumulátoru	- 93 -
Obr. 7.5.4.7: Energie dodaná palivovými články	- 94 -
Obr. 7.5.4.8: Odebraný vodík	- 94 -
Obr. 7.5.4.9: Náklady na provoz palivových článků	- 94 -
Obr. 7.5.4.10: Žádaný dobíjecí proud	- 94 -
Obr. 7.5.4.11: Střední příkon motoru	- 95 -

Seznam tabulek

Tab. 2.4.1.1.1: Srovnávací tabulka chemicko-fyzikálních parametrů vodíku, propanu a benzínu.....	- 14 -
Tab. 2.4.1.4.1: Účinnosti při výrobě energií	- 18 -
Tab. 2.4.1.4.2: TtW přehled.....	- 19 -
Tab. 2.4.1.4.3: WtW přehled.....	- 20 -
Tab. 5.2.1: Naměřené hodnoty momentové charakteristiky a hodnoty ekvivalentní tažné síly	- 49 -
Tab. 6.1.1.1: Momentová charakteristika stroje – naměřené hodnoty	- 59 -
Tab. 7.1.1: Náklon trati v závislosti na ujeté dráze – profil trati.....	- 73 -

Seznam zkratek

LiFe-Po	chemie článků trakčního akumulátoru
3f DC/AC	trakční měnič
SMD	součástky pro povrchovou montáž
MOS-FET	tranzistor řízený polem
IGBT	tranzistor s izolovanou bází
RME	metylester řepkového oleje,
SME	metylester slunečnicového oleje
SOME	metylester ze sóji,
FAME	metylester z živočišných tuků
VUOME	metylester z použitých fritovacích olejů.
MEŘO	metylester řepkového oleje (česká zkratka)

CNG	stlačený zemní plyn
LPG	propan-butan
PEAK-OIL	teorie těžby ropy
EMA	elektrický městský automobil
ERoEI	poměr energie vrácené proti energii vložené
FC	palivový článek
PEMFC	palivový článek s iontoměničovou polymerní membránou
AFC	palivový článek s alkalickým elektrolytem
PAFC	palivový článek s kyselinou fosforečnou jako elektrolytem
MCFC	palivový článek se směsí alkalických uhličitů jako elektrolytem
SOFC	palivový článek s neporézním kovovým oxidem jako elektrolytem
WtW	Well to Wheel analýza – vyjadřuje účinnost přeměny chem. en. paliva až po kola vozidla
WtT	Well to Tank analýza – popisuje ztráty ve výrobě a distribuci paliva
TtW	Tank to Wheel analýza – popisuje ztráty ve vozidle
GND	kostra
SEM H ₂	pokusný vodíkový automobil
MDZ	minimální doba života
SWN	přepínač reprezentující mechanickou brzdu
SWM	přepínač zařazující tažnou sílu odpovídající ztrátám nebo skutečnou ekvivalentní tažnou sílu v závislosti na rychlosti
SWZ	přepínač zařazující tažnou sílu odpovídající ztrátám nebo skutečnou ekvivalentní tažnou sílu v závislosti na ztrátových silách a zároveň na požadované tažné síle