

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

Ing. JAN HEJKRLÍK

NÍZKONAPĚŤOVÝ TRAKČNÍ POHON S PALIVOVÝM ČLÁNKEM

LOW-VOLTAGE TRACTION DRIVE WITH FUEL CELL

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor:	Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika
Školitel:	Doc. Ing. PAVEL VOREL, Ph.D.
Oponenti:	Prof. Ing. Aleš Richter, CSc. Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.
Datum obhajoby:	17.2.2012

Klíčová slova

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

Keywords

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

Místo uložení rukopisu: Vědecké oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Technická 10,
616 00 Brno.

© Jan Hejkrlik, 2011

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

Obsah

1 ÚVOD	4
2 VODÍK	5
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	6
4 KONCEPCE POHONU	7
4.1 Palivový článěk	7
4.2 Stabilizační měnič	7
4.3 Trakční akumulátor	9
5 DYNAMIKA	10
5.1 Obecné řešení akcelerace	10
6 SIMULAČNÍ MODEL DYNAMIKY VOZU	14
6.1 Simulační model dynamiky SEM H ₂	15
6.2 Simulační model účinnosti pohonu	17
6.3 Simulační model zdroje energie	18
6.4 Simulační model kalkulátoru ceny provozu palivového článku	23
6.5 Simulační model řidiče	24
7 SIMULACE PROVOZU VOZIDLA	25
7.1 Simulační model trasy	25
7.2 Provoz vozidla na trakční akumulátor	26
7.3 Provoz palivových článků v oblasti maximální účinnosti	26
7.4 Provoz palivových článků v oblasti maximálního výkonu	27
7.5 Provoz palivových článků dle středního příkonu motoru	27
8 ZÁVĚR	29
LITERATURA	30
CURRICULUM VITAE	31
ABSTRACT	32

1 ÚVOD

Za posledních 240 let došlo k nesmírnému vývoji v oblasti dopravy. 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 nedostupnost 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.

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, vestavěným do vozu JAWA CHIC.

2 VODÍK

Je třeba si uvědomit, že vodík není palivem v klasickém slova smyslu, ale energetickým nosičem, což ve výsledku znamená, 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 benzin 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.

Výroba vodíku

Vodík lze vyrábět 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. 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. Pro výrobu vodíku přímo z vody se jeví vhodné také některé vyvíjené jaderné reaktory čtvrté generace, kde vysoká teplota chladiwa 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 neobhájitelná. Mezi technologie pro výrobu vodíku patří: parní reforming zemního plynu, elektrolýza, vysokoteplotní elektrolýza (parní elektrolýza), termochemické cykly, hybridní termochemické cykly a také výroba vodíku z biomasy.

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. 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. Existuje několik druhů typů palivových článků: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC), Alkaline Fuel Cell (AFC), Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC), Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC), Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) [21].

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

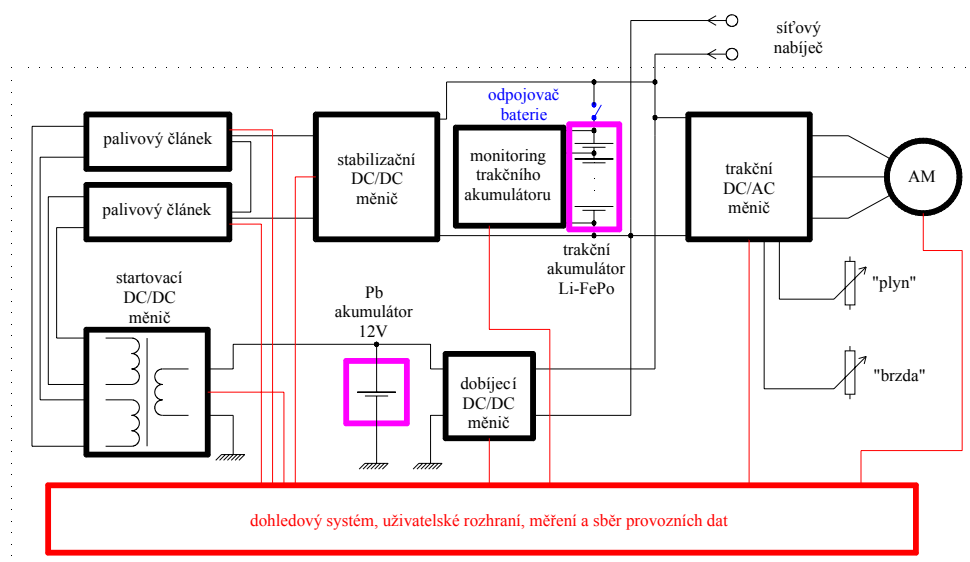
Tématem této dizertační práce je návrh, realizace a ověření parametrů napájecího bloku malého elektromobilu, který sestává ze sériové dvojice palivových článků, stabilizačního měniče a trakčního akumulátoru. Palivové články zde slouží jako primární zdroj elektrické energie, trakční akumulátor pak k vykrývání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

Cíle práce lze definovat následovně:

- Nalezení nejvhodnější topologie napájecího bloku
- Návrh a realizace stabilizačního měniče a ochranných obvodů trakčního akumulátoru
- Vytvoření matematického modelu celého automobilu včetně vodíkové soustavy
- Návrh a simulace způsobu řízení stabilizačního měniče s ohledem na:
 1. dojezd
 2. co nejvyšší účinnost přeměny vodíku na elektrickou energii
 3. co nejnižší náklady na ujetý kilometr
- 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 dieselový agregát o výkonu 4kW, přenos výkonu na kola je řízen variátorem, převodovkou a diferenciálem. Vozidlo je koncepčně navrženo tak, aby jej mohli užívat řidiči od 15let. 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 pohonu spočívá v užití palivových článků a trakčního akumulátoru. Palivové články jsou použity dva v sérii 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 [10], [11], [12], [13]. Topologie pohonu je uvedena na obr. 4.1.



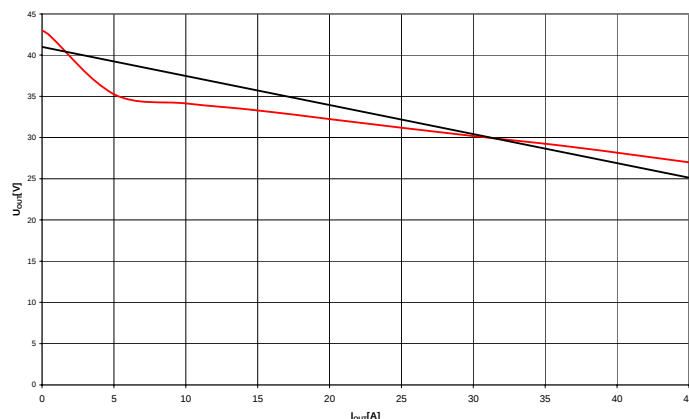
Obr. 4.1: Topologie pohonu

4.1 PALIVOVÝ ČLÁNEK

Palivový článek zde slouží jako primární zdroj elektrické energie. Jsou použity dva PEM palivové články BALLARD NEXA POWER MODULE zapojené do série. Výstupní napětí se pohybuje v rozmezí 84,5 – 54V, maximální výkon této dvojice je 2,4kW a byly ve vozidle instalovány v prostoru kufu společně s tlakovou lahví [8].

4.2 STABILIZAČNÍ MĚNIČ

Měnič má ve vozidle funkci napětového přizpůsobení palivových článků trakční baterii a v následujícím textu je popsán jeho návrh. Na obrázku 4.2.1 je znázorněna zatěžovací charakteristika (červená barva) palivového článku a její aproximace (černá barva), ze které vycházíme při návrhu, odečtené hodnoty jsou: napětí naprázdno $U_{j0}=41,20\text{V}$; napětí při plné zátěži ($I_{max}=45\text{A}$) $U_Z=25,15\text{V}$.

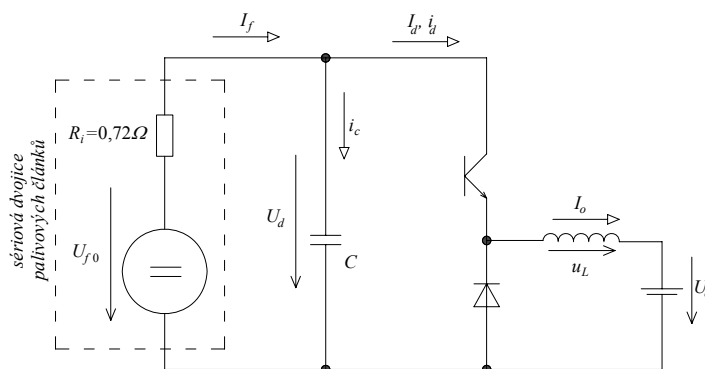


Obr. 4.2.1: Zatěžovací charakteristika palivového článku

Vnitřní odpor sériové dvojice palivových článků je tedy:

$$R_i = 2 \cdot \frac{U_{f0} - U_z}{I_{\max}} = 0,72\Omega \quad (1)$$

Návrhu kondenzátorové baterie byla věnována značná pozornost, protože proud odebíraný měničem je pulzního charakteru. Odvození kapacity kondenzátorové baterie vychází z předpokladu, že kapacita je dostatečně velká, pak je z palivových článků odebírána střední hodnota pulzního proudu odebíraného měničem.



Obr. 4.2.2: 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

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 na střídě měniče (střední hodnota proudu kondenzátorem je samozřejmě nulová). První derivaci výsledného vztahu položíme rovnu nule a zjistíme, při jaké střídě 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 tohoto měniče si je třeba uvědomit, že zde je situace opačná. Vstupní napětí měniče není konstantní jak je tomu ve většině případů, stejně tak je situace opačná i u výstupního napětí, které napětí konstantní je (trakční akumulátor). Proto pomocí střídý dopočítáváme vstupní napětí z výstupního.

Maximální náboj dodávaný kondenzátorovou baterií při střídě $s=0,748$ je definován vztahem:

$$Q_{\max} = \frac{U_{f0} - \frac{U_o}{\sqrt{\frac{U_o}{U_{f0}}}}}{R_i} \cdot \left(\sqrt{\frac{U_{f0}}{U_o}} - 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{U_o}{U_{f0}}} \cdot T = 185,7 \mu C \quad (2)$$

Kapacita kondenzátorové baterie při zvoleném zvlnění napětí $\Delta U=80\text{mV}$ je pak dána rovnicí:

$$C = \frac{Q_{\max}}{\Delta U} = 2322 \mu F \quad (3)$$

Dalším odvozením definujeme velikost efektivní hodnoty proudu (nejvyšší při $s=0,793$) kondenzátorovou baterií, která je dána vztahem:

$$I_{CRMS} = \sqrt{(I_o - I_f)^2 \cdot s + I_f^2 (1-s)} = \frac{U_{f0} - \frac{U_o}{s}}{R_i} \sqrt{\frac{1-s}{s}} = 43,3 A \quad (4)$$

Námi použité kondenzátory 100μ/200V jsou dimenzovány na 2A efektivní, celou baterii tedy složíme z 24ks těchto kondenzátorů. Výsledný proud jedním dílčím kondenzátorem bude 1,8A.

Indukčnost filtrační tlumivky na výstupu měniče při zvoleném zvlnění proudu ($\Delta I_o=4A$) je 115,5μH. Samotná tlumivka je realizována na jádře o průřezu 960mm², se vzduchovou mezerou 4,5mm; vinutá jednadvaceti závitů vodiče o průřezu 14,5mm².

Jako spínací prvek byly použity 3ks MOSFET tranzistorů IRFP90N20D s parametry $U_{DSS}=200V$, $R_{DSon}=0,023\Omega$ a $I_D=94A$ s tepelnou ztrátou 15,525W. Jako nulová dioda byly použity 3ks diod 150EBU02 s parametry $U_R=200V$ a $I_{F(AV)}=150A$ s tepelnou ztrátou 19,6W.

4.3 TRAKČNÍ AKUMULÁTOR

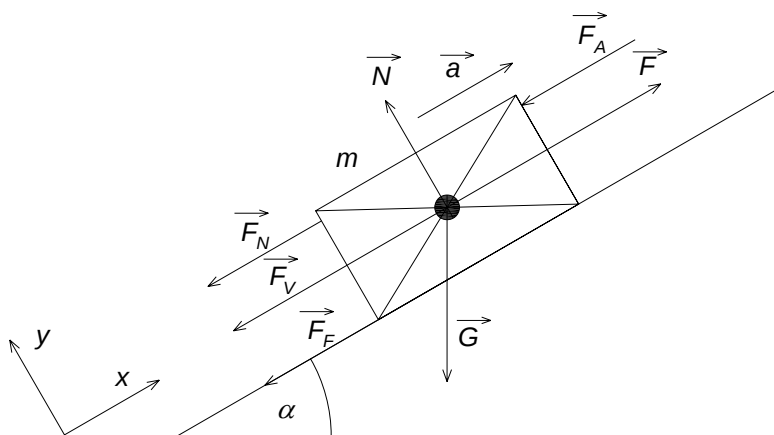
Akumulátor je sestaven z LiFe-Po článků amerického výrobce A123Systems, Inc. Baterie plní funkci špičkového zdroje pro rozjezd a spotřebiče pro rekuperativní brzdění. Dle režimu dobíjení také umožňuje palivové články provozovat v režimu nejvyšší účinnosti. Konstrukčně je akumulátor řešen jako soustava článků typu ANR26650M1A v serioparalelní kombinaci [9]. 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. Akumulátorová sestava je doplněna deskou podpětových a přepětových ochran.

5 DYNAMIKA

5.1 OBECNÉ ŘEŠENÍ AKCELERACE

Při řešení akcelerační uvažujeme vozidlo jako hmotný bod a vycházíme z 2. Newtonova zákona vyjádřeného pomocí součtu sil působících na těleso (5) (rozložení sil viz. obrázek 5.1.1):

$$m \cdot \vec{a} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i, \quad (5)$$



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:

$$F_F = \xi N = \xi G \cos \alpha = \xi m g \cos \alpha, \quad (6)$$

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:

$$F_V = k_V v(t), \quad (7)$$

k_V - koeficient ztrát viskozního tření

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

$$F_A = \frac{1}{2} C_X \rho S v(t)^2, \quad (8)$$

C_X – koeficient aerodynamického odporu

ρ - hustota vzduchu

S – plocha kolmého průmětu čelní plochy

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

a je vyjádřena jako:

$$F_N = G \sin \alpha = mg \sin \alpha, \quad (9)$$

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

Podle (5) a obr. 5.1.1 platí:

$$\begin{aligned} ma = m \frac{dv(t)}{dt} &= F - F_N - F_F - F_V - F_A = \\ &= F - mg \sin \alpha - \xi mg \cos \alpha - k_v v(t) - \frac{1}{2} C_X \rho S v(t)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Výsledkem odvození jsou následující vztahy:

Okamžitá rychlost vozidla:

$$v(t) = \frac{1}{2a\tau} \frac{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} + \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right) e^{-\frac{t}{\tau}}}{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} - \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right) e^{-\frac{t}{\tau}}} - \frac{b}{2a}. \quad (11)$$

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

$$v_{\lim} = \frac{1}{2a\tau} - \frac{b}{2a} = \sqrt{2 \frac{F - mg \sin \alpha - \xi mg \cos \alpha}{C_X S \rho} + \left(\frac{k_v}{C_X S \rho}\right)^2} - \frac{k_v}{C_X S \rho} \quad (12)$$

Zrychlení:

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{\left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right) \cdot \left(2av_0 + b + \frac{1}{\tau}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}{a\tau^2 \left[2av_0 + b + \frac{1}{\tau} - \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right) e^{-\frac{t}{\tau}}\right]^2} \quad (13)$$

Okamžitý mechanický výkon na hřídeli trakčního stroje:

$$p(t) = F(t) v(t) = F \left(\frac{1}{2a\tau} \frac{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} + \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{b}{2a}}{2av_0 + b + \frac{1}{\tau} - \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}} - \frac{b}{2a} \right) \quad (14)$$

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

$$W(t) = \frac{F}{2a} \left\{ \left(\frac{1}{\tau} - b \right) t + 2 \ln \left[\frac{\tau}{2} \left(2av_0 + b + \frac{1}{\tau} - \left(2av_0 + b - \frac{1}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] \right\} \quad (15)$$

Námi užitý asynchronní motor byl schopen vyvinout maximální moment 26Nm, což odpovídá ekvivalentní tažné síle 1130,43N. Kdyby tento motor nebyl omezen otáček a jeho moment s otáčkami neklesal, dokázali bychom s vozidlem vyvinout rychlost dle (12):

$$v_{\lim} = \frac{1}{2a\tau} - \frac{b}{2a} = \sqrt{2 \frac{F - mg \sin \alpha - \xi mg \cos \alpha}{C_x S \rho} + \left(\frac{k_v}{C_x S \rho} \right)^2} - \frac{k_v}{C_x S \rho} = \quad (16)$$

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

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

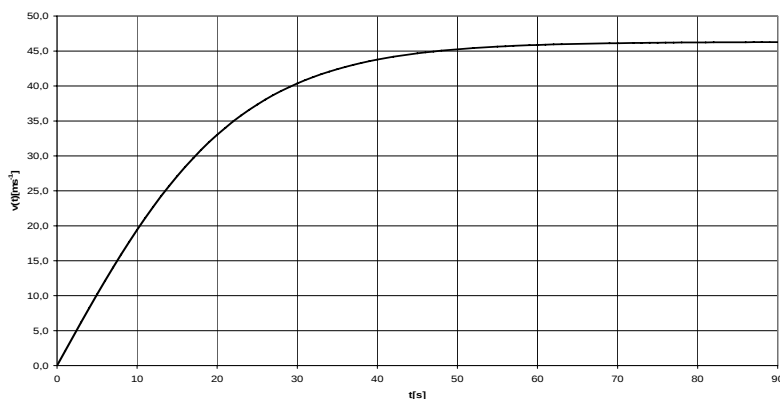
$S = 1.864\text{m}^2$ (čelní plocha vozidla)

$C_x = 0.4$ (koeficient aerodynamického odporu)

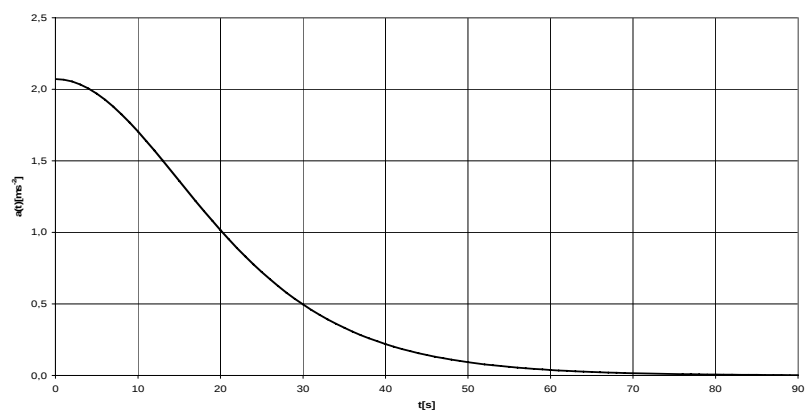
$\xi = 0.02$ (koeficient ztrát suchého a valivého tření)

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

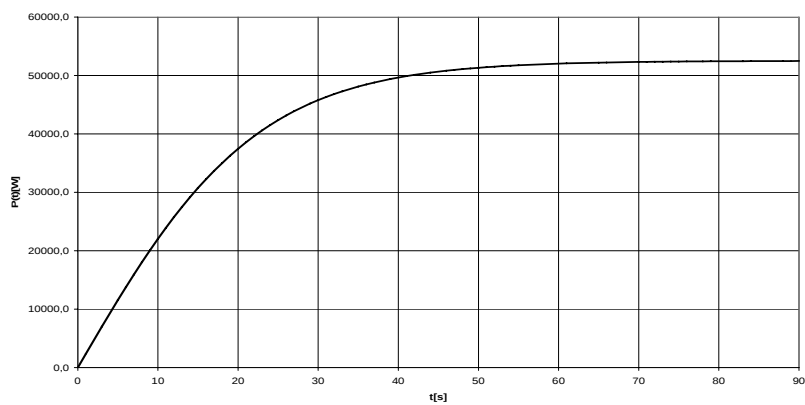
Vynesením časových závislostí, pomocí výše uvedených konstant, do rovnic (11), (13), (14) a (15) dostaneme následující charakteristiky:



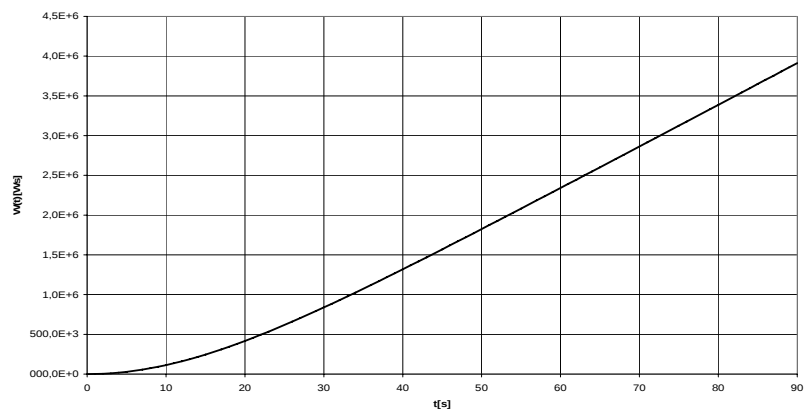
Obr. 5.1.2: Okamžitá rychlost



Obr. 5.1.3: Okamžité zrychlení

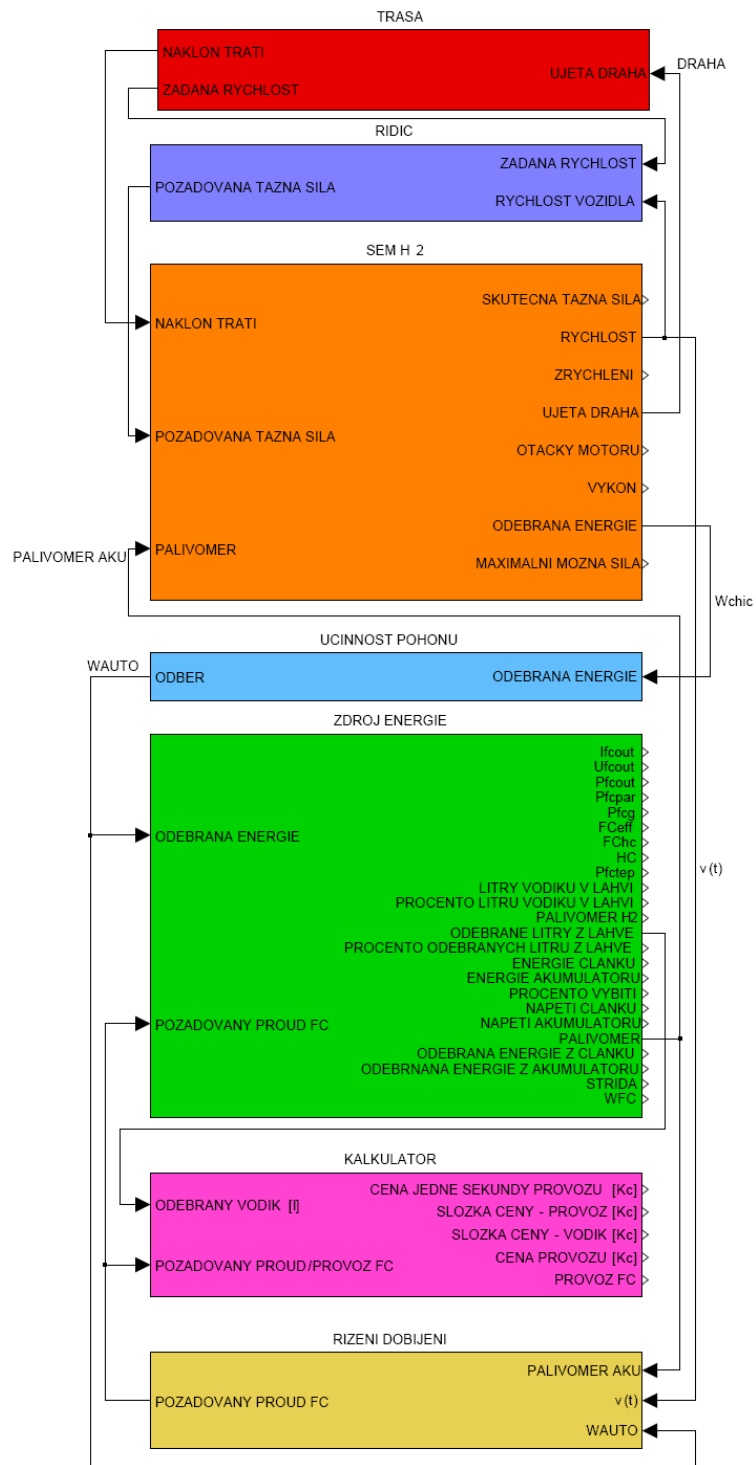


Obr. 5.1.4: Okamžitý výkon



Obr. 5.1.5: Odebraná energie

6 SIMULAČNÍ MODEL DYNAMIKY VOZU

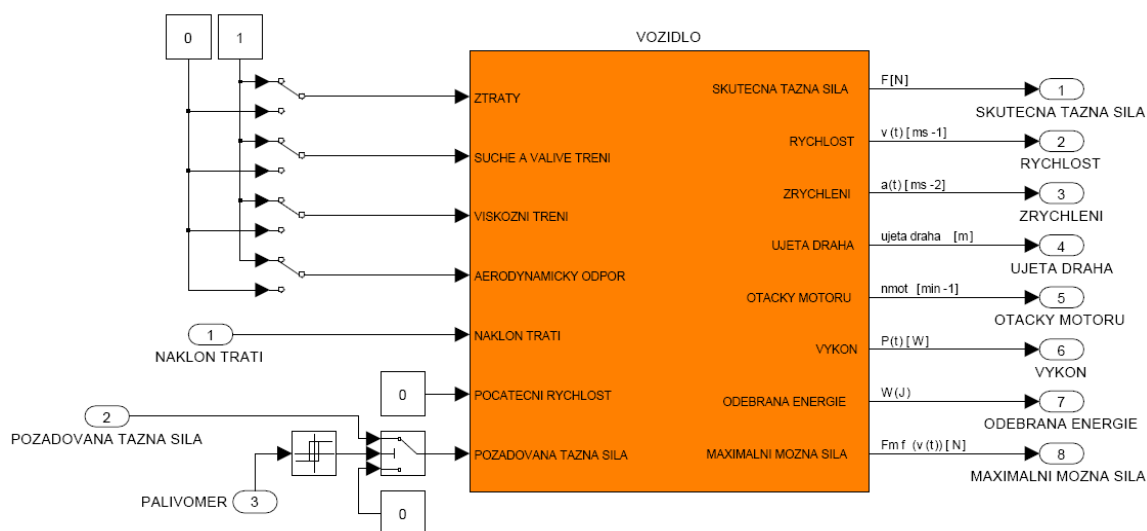


Obr. 6.1: Simulační model vozu

Na obrázku 6.1 je blokové schéma modelu JAWA CHIC užitého 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 SIMULAČNÍ 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.



Obr. 6.1.1: Matematický model SEM H₂

Simulační model dynamiky vozidla

Model vozidla a pohonu vychází z upravené pohybové rovnice (10) (viz. kapitola 5):

$$F = m \frac{dv}{dt} + mg \sin \alpha + \xi mg \cos \alpha + k_v v(t) + \frac{k_A S \rho v^2(t)}{2}. \quad (17)$$

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 a valivého 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.

Pro sestavení modelu bylo zapotřebí vyjádřit derivaci z pohybové rovnice:

$$\frac{dv}{dt} = \left(F - mg \sin \alpha - \xi mg \cos \alpha - k_v v(t) - \frac{k_A S \rho v^2(t)}{2} \right) \cdot \frac{1}{m}, \quad (18)$$

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 akcelerace, 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 viskozitní 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 [min ⁻¹]	0	800	1600	2400	3200	4000	4800	5600
M[Nm]	26	26	26	26	24	20	14	11
v[ms ⁻¹]	0	1,9268	3,8537	5,7805	7,7074	9,6342	11,5611	13,4879

Tab. 6.1.1: Momentová charakteristika stroje – naměřené hodnoty

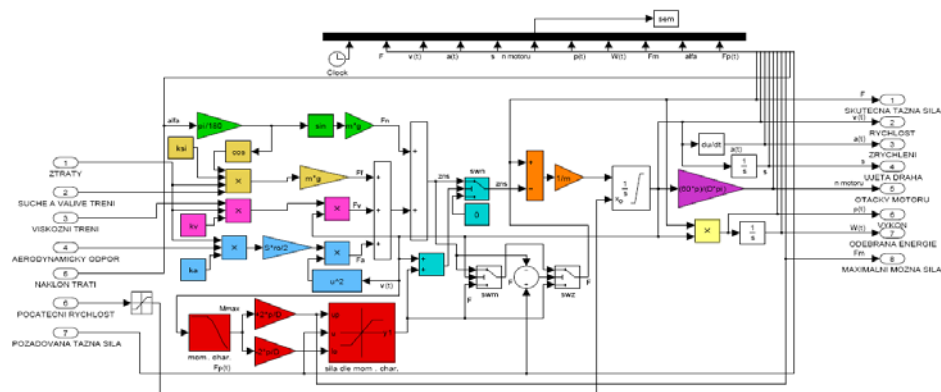
V tabulce 6.1.1 jsou naměřené hodnoty momentové charakteristiky námi užitého asynchronního motoru. První řádek tabulky odpovídá bodům, ve kterých byl měřen moment motoru (druhý řádek) a v posledním řádku je otáčkám odpovídající rychlost automobilu. Otáčky motoru proporcionálně odpovídají rychlosti vozidla.

V červené LOOK-UP table s názvem „mom. char“ jsou zapsány hodnoty z tabulky 6.1.1 (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 omezuje 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 omežována na $+F_m$ a $-F_m$ (F_m – maximální možná síla, kterou je v danou rychlost motor schopen vyvinout).

Přepínač SWM na výstupu dyn. limitace reaguje na dosažení maximální rychlosti (12,5ms⁻¹), protože při dosažení maximální rychlosti se přestane 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 brzdit, zastavovat a dále i akcelarovat, je v 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 zbrzdit, 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 (brzdit) silou v intervalu $<\text{odporová síla suchého a valivého tření} + \text{síla pokrývajících náklon vozovky}; \text{ztrátové síly} + \text{síla pokrývajících náklon vozovky}>$, vozidlo zpomalí a jeho rychlost se ustálí v intervalu $<0; v_{\max}>$. Pokud budeme za vozidlo táhnout silou menší, a to v intervalu $<-F_m; \text{odporová síla suchého a valivého tření} + \text{síla pokrývajících náklon vozovky}>$, vozidlo zastaví. Čím bude tažná síla menší, tím vozidlo zastaví rychleji.

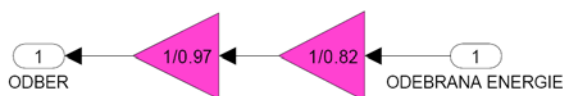
V modelu je navíc zařazen přepínač SWN, který v podstatě představuje mechanickou brzdou, držící vozidlo v zabrzděném stavu dokud nezačne působit tažná síla. Například ve vozech Citroen je tato funkce nazývána HILL ASISTENT (rozjezdový asistent) [15]. Jinými slovy, je-li vozidlo v klidu, na vozovce s 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.



Obr. 6.1.1: Simulační model SEM H₂

6.2 SIMULAČNÍ MODEL ÚČINNOSTI POHONU

Signál “odebraná energie” na bloku SEM H₂, obr. 6.1, kapitola 6. **Simulační 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 pak má charakter elektrické energie odebrané z trakčního akumulátoru.



Obr. 6.2.1: Vnitřní schéma bloku ÚČINNOST POHONU

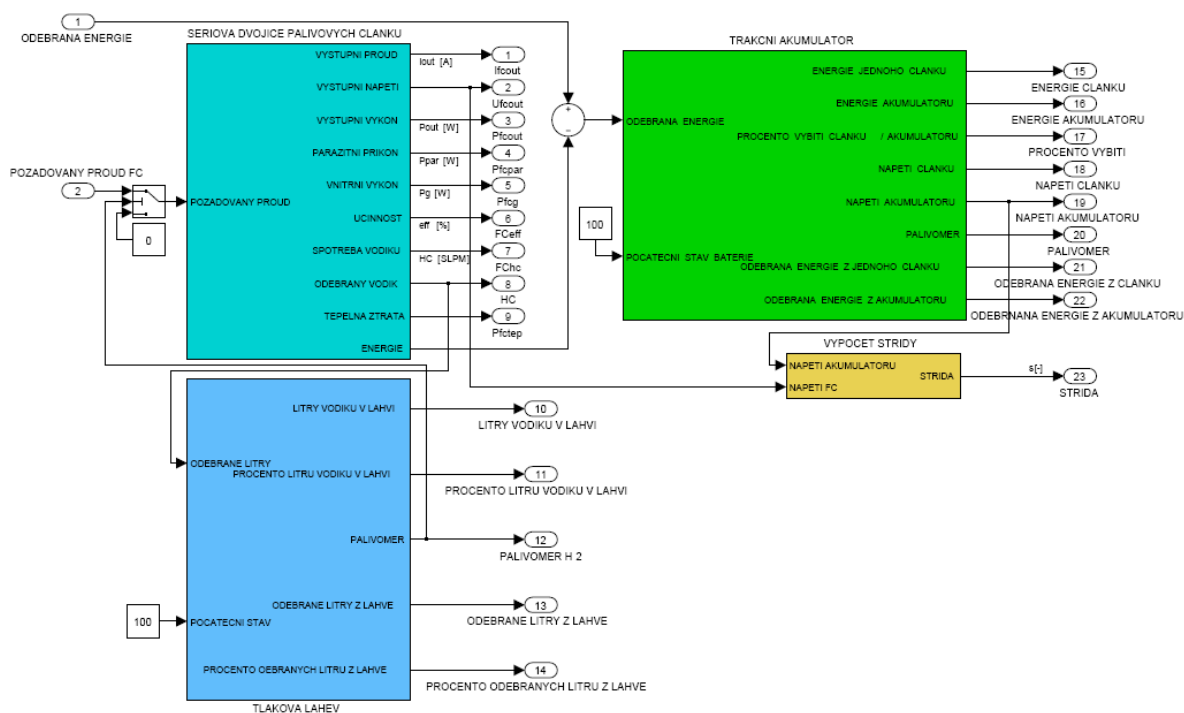
6.3 SIMULAČNÍ MODEL ZDROJE ENERGIE

Model zdroje energie využívá čtyři subsystémy: model sériové dvojice palivových článků, model tlakové láhve, model trakčního akumulátoru a model pro výpočet střidy 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 odebírá (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.

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

Model má charakter kombinované nádrže elektrické energie.



Obr. 6.3.1: Vnitřní schéma bloku ZDROJ ENERGIE

Simulační model palivového článku

Model je postaven na čtyřech základních charakteristikách palivového článku, které jsou uvedeny v uživatelském manuálu [8]. 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 ztrátový 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.

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:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\text{"výstupní výkon"}}{\text{"tep. ztráta"} + \text{"parazitní výkon"} + \text{"výstupní výkon"}} = \\ &= \frac{\text{"výstupní výkon"}}{\text{"tep. ztráta"} + \text{"vnitřní výkon"}} = \\ &= \frac{\text{"výstupní výkon"}}{\text{"celkový výkon"}}\end{aligned}\tag{19}$$

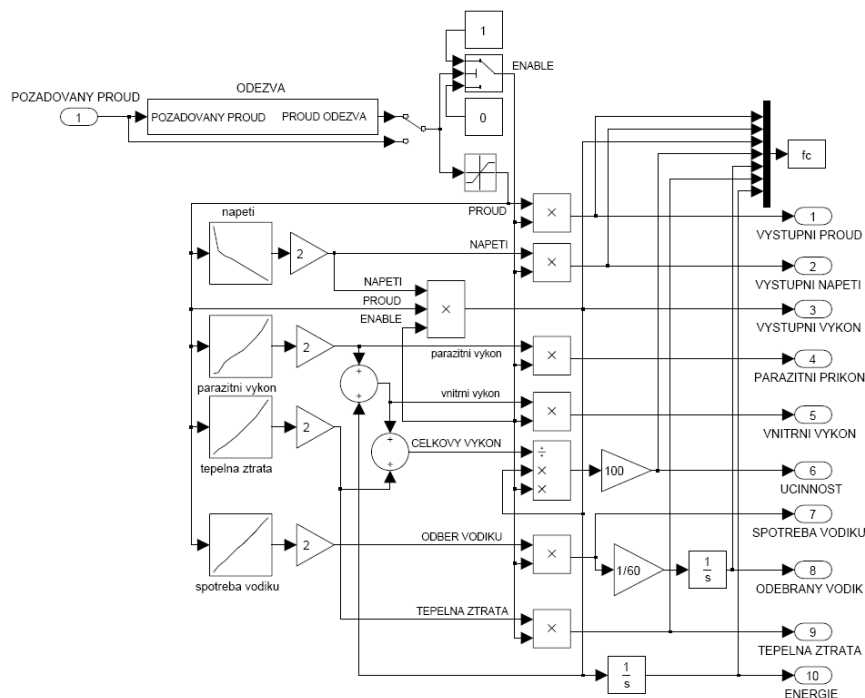
V modelu je rovnice realizována blokem násobičky/děličky, kde se „výstupní výkon“ dělí signálem „celkový výkon“ a celý zlomek je násoben signálem „ENABLE“. Výstup násobičky/děličky je násoben konstantou 100 a veden na výstup 6 – „účinnost“[%].

Charakteristika odběru vodíku v závislosti na požadovaném proudu je realizována pomocí LOOK-UP table „spotřeba vodíku“. Schéma modelu je uvedeno na obr. 6.3.2.

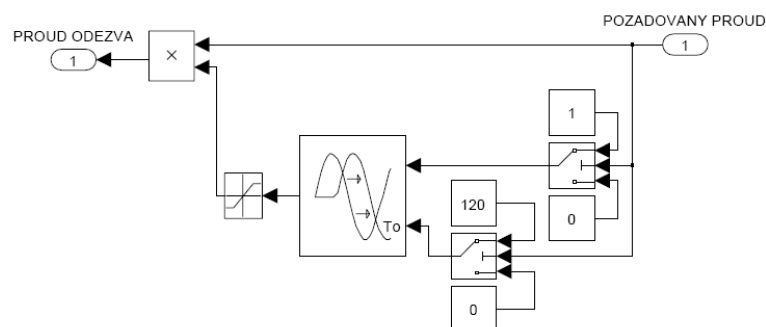
Odezva palivového článku

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. 6.3.3. 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.



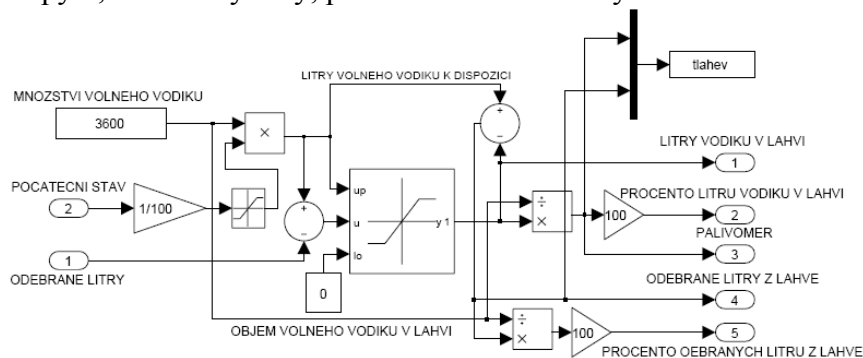
Obr. 6.3.2: Simulační model bloku SÉRIOVÁ DVOJICE PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ



Obr. 6.3.3: Simulační model bloku ODEZVA

Simulační 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) [19]. Dle katalogového listu vypouštěním z láhve získáme 3600l volného vodíku. Model tlakové láhve je 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 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 $[0;1]$. 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 $[-0; \text{litry volného vodíku k dispozici}]$ 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.

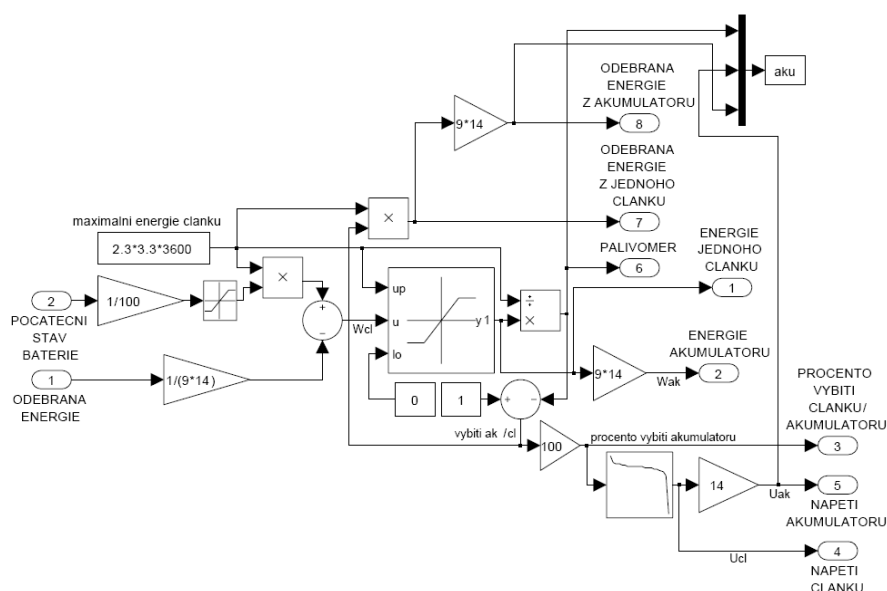


Obr. 6.3.4: Simulační model bloku TLAKOVÁ LÁHEV

Simulační model trakčního akumulátoru

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 $2,3\text{Ah} \cdot 3,3\text{V} = 3600$, 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_{cl} 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 střídavý 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“.

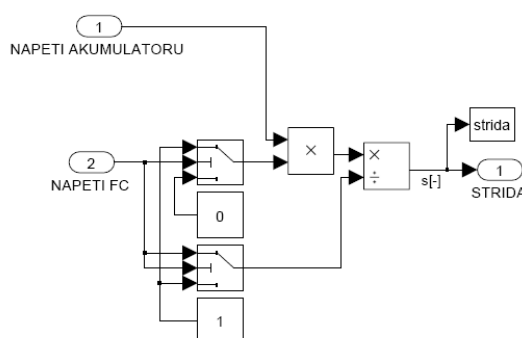


Obr. 6.3.5: Simulační model bloku TRAKČNÍ AKUMULÁTOR

Simulační 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. 6.3.6: Simulační model bloku VÝPOČET STŘÍDY

6.4 SIMULAČNÍ MODEL KALKULÁTORU CENY PROVOZU PALIVOVÉHO ČLÁNKU

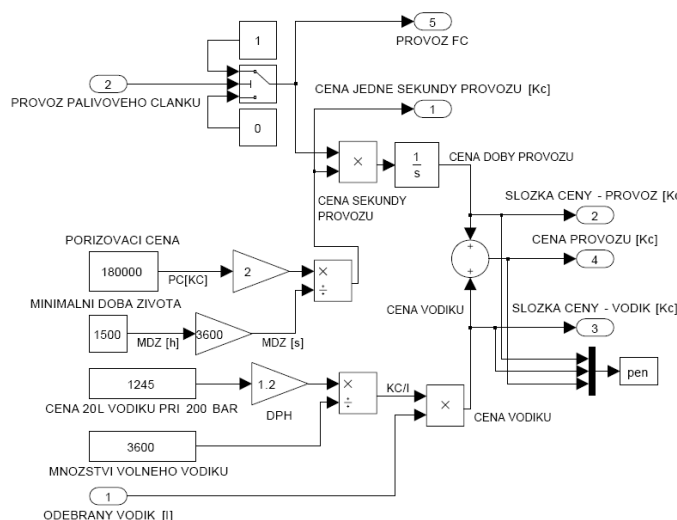
Cílem projektu je návrh, konstrukce a realizace nízkonapěťového trakčního pohonu. Mimo položky uvedené v zadání je určitě vhodné zabývat se alespoň okrajově ekonomikou provozu. V dnešní době, kdy je kladen veliký důraz na ekonomii ekologie provozu, jsou parametry vozidel srovnatelné. Ne každý systém 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

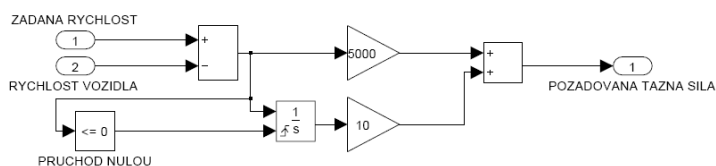
vypočítávána z konstanty „cena 20l vodíku při 200bar“ násobená výší DPH a dělená konstantou „množství volného vodíku“. Na vstup 2 je přiváděna informace o provozu palivových článků v podobě žádaného proudu v intervalu $\langle 0,5;45 \rangle$ A. Informace je upravena na podobu logické 0 a 1. Je-li žádaný 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 SIMULAČNÍ 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 nulový nebo záporný, resetuje se integrační člen. Touto úpravou jsme dosáhli lepších regulačních vlastností modelu. Součtem P a I složky je výstup „požadovaná tažná síla“.



Obr. 6.4.1: Model bloku KALKULÁTOR CENY PROVOZU PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ



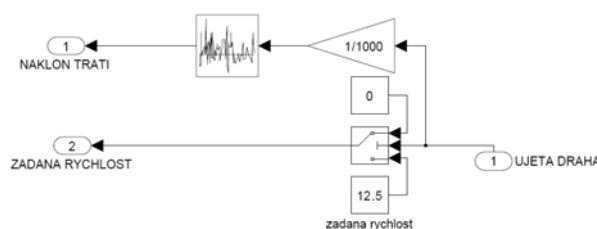
Obr. 6.5.1: Simulační model bloku ŘIDIČ

7 SIMULACE PROVOZU VOZIDLA

7.1 SIMULAČNÍ MODEL TRASY

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: Model bloku TRASA

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 popsaná 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 $<15\text{MJ}; 19\text{MJ}>$ se snahou co nejvíce se přiblížit hranici 19MJ. Při pohledu z druhé strany, je třeba z hlediska bezpečnosti provozu zbytečně nesnižovat akceleraceschopnost 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 simulačním modelu trasy viz. kapitola 7. *Simulační model trasy*.

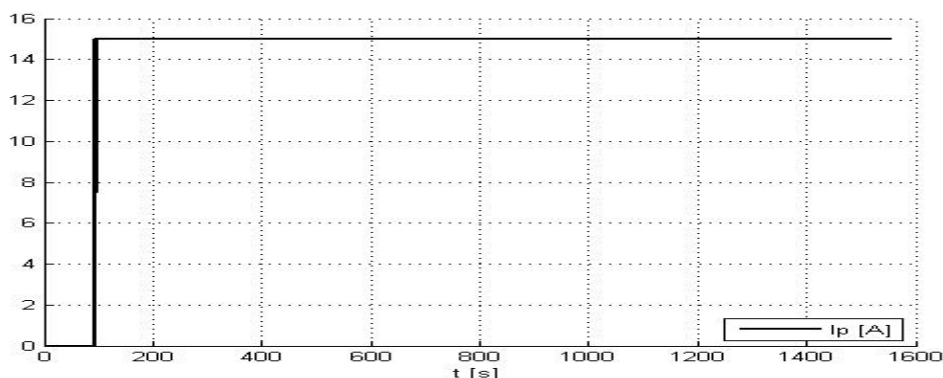
7.2 PROVOZ VOZIDLA NA TRAKČNÍ AKUMULÁTOR

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, výstupem simulace pak dojezd pouze 15,2km.

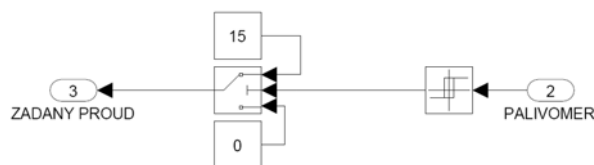
7.3 PROVOZ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ V OBLASTI MAXIMÁLNÍ ÚČINNOSTI

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 19,8km trasy za cenu 202Kč.



Obr. 7.3.1: Žádaný dobíjecí proud

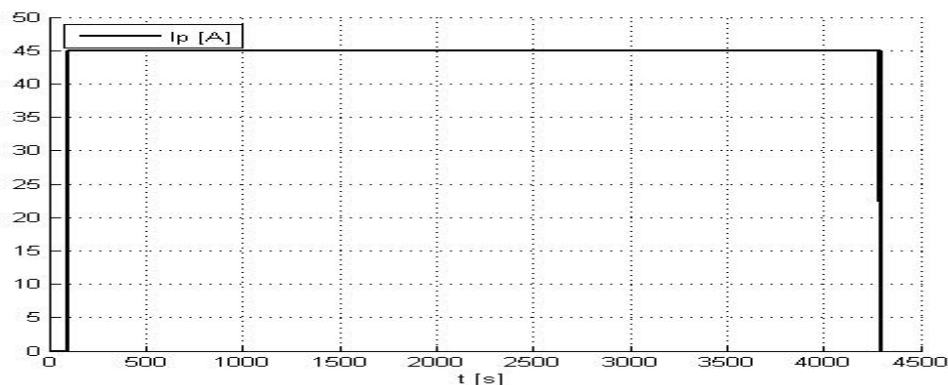


Obr. 7.3.2: Schéma řízení na maximální účinnost palivových článků

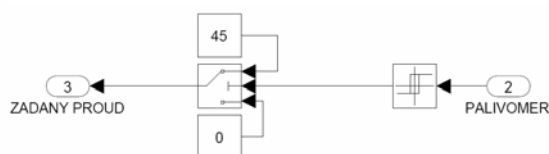
7.4 PROVOZ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ V OBLASTI MAXIMÁLNÍHO VÝKONU

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: Žádaný dobíjecí proud



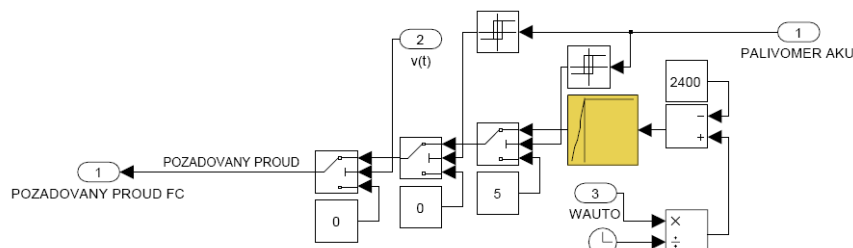
Obr. 7.4.2: Schéma řízení na maximální proud palivových článků

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. 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

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. Střední příkon motoru činil 2720W.

Průjezd trasy rychlostí 10m/s

V předchozím případě nebyl regulační účinek patrný (střední příkon motoru je o 320W vyšší než jsou palivové články schopny vyprodukovat). 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.

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.

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 zbývajícím úsekem opět 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 zbývajícím úsekem opět rychlostí 45km/h. Vstupními podmínkami jsou plně nabitý trakční akumulátor, plná tlaková láhev a trasa dle kapitoly 7.1. Výsledkem simulace je nižší střední příkon motoru (než v kap. 7.5.1), díky čemuž došlo k lepší regulaci výkonu palivových článků.

8 ZÁVĚR

Cílem dizertační práce bylo vyvinutí nízkonapětového trakčního pohonu s palivovými články $2 \times 1200\text{W}$, které slouží jako primární zdroj energie. Jako špičkový zdroj je užita 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. 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 $15,2\text{km}$ (při rychlosti $15,2\text{km/h}$, tedy 45km/h). Zavedením dobíjení palivových článků proudem (15A) odpovídajícím provozu v oblasti maximální účinnosti bylo dosaženo prodloužení dojezdu na $19,8\text{km}$ (délka celé trati $53,2\text{km}$). Výsledky jsou uvedeny v kapitole 7.3. Zvýšením dobíjecího proudu na hodnotu (45A) odpovídající provozu v oblasti maximálního výkonu bylo docíleno projetí celé trasy, 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 projížďena. 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 a po skončení simulace byl trakční akumulátor nabit na $50,2\%$ své celkové kapacity. Oproti výsledkům z kapitoly 7.4 došlo ke snížení nákladů. 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 výhodnější. Budeme-li srovnávat výsledky kapitoly 7.5, zjistíme jakým způsobem se projevilo odlehčení motoru v časovém intervalu $2000\text{--}3250\text{s}$ (snížení požadované rychlosti vozidla z $12,5\text{m/s}$ (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.

Pokud uvážíme všechny výsledky uvedené v předchozích odstavcích, dojdeme k závěru, že pro zlepšení regulace (přeměna vodíku v elektrinu) je třeba užít palivový článek s vyšším výkonem, nebo použít tři kusy namísto dvou kusů stávajících palivových článků (námi užitě palivové články jsou pro rychlost $12,5\text{m/s}$ (45km/h) slabé). Ve stávající koncepci se jako nejlepší způsob řízení výkonu palivových článků jeví regulace výstupního proudu palivových článků podle středního příkonu motoru.

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

Prostor pro pokračování výzkumu 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.

LITERATURA

- [1] VLK, František. *Úlohy z dynamiky motorových vozidel*. 1. vydání. Brno : Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2001. 221 s. ISBN 80-238-6574-9.
- [2] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [3] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek I*. Brno : Zdeněk Novotný, 2000. 61 s. ISBN 80-214-1736-6.
- [4] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek II*. Brno : Zdeněk Novotný, 2004. 175 s. ISBN 80-214-2743-4.
- [5] HEJKRLÍK, Jan. *Vysokonapěťový spínaný zdroj*. Brno, 2006. 45 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické, FEEC, UVEE.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] *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>>.
- [9] *Al23Systems* [online]. 2007-2011 [cit. 2011-05-04]. Products. Dostupné z WWW: <http://www.al23systems.com/cms/product/pdf/1/_ANR26650M1A.pdf>.
- [10] 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>.
- [11] *Maxwell Technologies* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Ultracapacitors. Dostupné z WWW: <<http://www.maxwell.com/ultracapacitors/products/modules/bmod0083-48-6v.asp>>.
- [12] *Centrum dopravního výzkumu* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdv.cz/>>.
- [13] 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.
- [14] *Tesla motors* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.teslamotors.com.cz/>>.
- [15] *Citroen* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.citroen.cz/>>.
- [16] *Toyota* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.toyota.cz/>>.
- [17] *Bmw* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.bmw.cz/>>.
- [18] *Peugeot* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.peugeot.cz/>>.
- [19] *Linde Gas a.s.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.linde-gas.cz/>>.
- [20] *International Rectifier* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.irf.com/>>.
- [21] *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.hytep.cz/>>.

CURRICULUM VITAE

Jméno: Jan Hejkrlik
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“.

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.