

# 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

## **TRAKČNÍ POHON ELEKTROMOBILU NAPÁJENÝ VODÍKOVÝM PALIVOVÝM ČLÁNKEM**

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

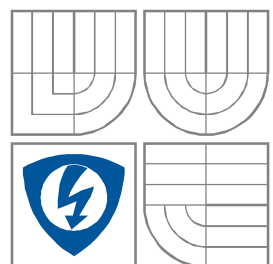
Bc. JAN POKÁLENÝ

BRNO 2008



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

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

# **TRAKČNÍ POHON ELEKTROMOBILU NAPÁJENÝ VODÍKOVÝM PALIVOVÝM ČLÁNKEM**

**ELECTROCAR TRACTION DRIVE SUPPLIED WITH THE HYDROGEN FUEL CELL**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jan Pokálený**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka**

BRNO 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jan Pokálený

Bytem: Kunvald 68, 56181

Narozen/a (datum a místo): 12.2.1982, Ústí nad Orlicí

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

disertační práce

diplomová práce

bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Trakční pohon elektromobilu napájený vodíkovým palivovým článkem
Vedoucí/ školitel VŠKP:	doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka
Ústav:	Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky
Datum obhajoby VŠKP:	10.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

tištěné formě – počet exemplářů 1

elektronické formě – počet exemplářů 1

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **Anotace**

Tématem diplomové práce je trakční pohon elektromobilu s palivovým článkem. Zdrojem energie je vodíkový palivový článek o výkonu 2 kW. Trakční pohon je tvořen trojfázovým střídačem a trojfázovým asynchronním motorem. Hlavní částí této práce je vytvoření matematického modelu trakčního pohonu v programu Matlab-Simulink.

## **Abstract**

The topic of this diploma thesis is a traction drive of electrocar with fuel cell. The drive is supplied with hydrogen fuel cell with power of 2 kW. The traction drive consists of the three-phase DC/AC converter and the asynchronous machine. The main part of this work is a creation of the mathematical model of the traction drive in program Matlab-Simulink.

## **Klíčová slova**

Elektrický trakční pohon; elektromobil; akumulátor; ultrakapacitor; vodíkový palivový článek; asynchronní motor; střídač.

## **Keywords**

Electrical traction drive; electromobile; accumulator; ultracapacitor; hydrogen fuel cell; asynchronous machine; DC/AC converter.

## **Bibliografická citace**

Pokálený, J. *Trakční pohon elektromobilu napájený vodíkovým palivovým článkem*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 56 s.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Trakční pohon elektromobilu napájený vodíkovým palivovým článkem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

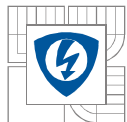
Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslavu Patočkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

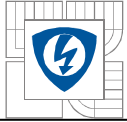
V Brně dne .....

Podpis autora .....

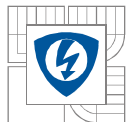


## OBSAH

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>17</b>
<b>2 PALIVOVÉ ČLÁNKY</b> .....	<b>18</b>
2.1 STAVBA A FUNKČNÍ PRINCIP PALIVOVÉHO ČLÁNKU .....	18
2.2 ZÁKLADNÍ KOMPONENTY PALIVOVÉHO ČLÁNKU.....	19
2.2.1 Elektrody.....	21
2.2.2 Katalyzátory.....	21
2.2.3 Polymerová membrána.....	21
2.2.4 Bipolární desky.....	21
2.3 TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ.....	21
2.3.1 MCFC - Palivový článek s roztavenými uhličitany.....	22
2.3.2 SOFC - Palivový článek s tuhými oxidy.....	23
2.3.3 AFC - Alkalický článek.....	24
2.3.4 PAFC - Palivový článek s kyselinou fosforečnou.....	25
2.3.5 PEMFC - Palivový článek polymer-elektrolyt.....	26
2.4 POROVNÁNÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ PRACUJÍCÍCH NA RŮZNÝCH PRINCÍPECH.....	26
<b>3 PALIVOVÝ ČLÁNEK NA ÚVEE</b> .....	<b>27</b>
3.1 TECHNICKÉ PARAMETRY ČLÁNKU.....	30
3.2 MĚŘENÍ NA PALIVOVÉM ČLÁNKU.....	32
3.2.1 Zatěžovací charakteristika.....	33
3.2.2 Dynamická charakteristika.....	34
<b>4 TRAKČNÍ POHON S PALIVOVÝM ČLÁNKEM</b> .....	<b>35</b>
4.1 MOŽNOSTI AKUMULACE ENERGIE V MEZIIOBVODU.....	35
4.1.1 Meziobvod s ultrakapacitorem.....	36
4.1.2 Meziobvod s ultrakapacitorem a akumulátorem.....	37
4.1.3 Meziobvod s akumulátorem.....	37
4.2 AKUMULÁTOR .....	37
4.3 ELEKTROMOTOR.....	38
4.4 STRÍDAČ .....	39
4.5 DIMENZOVÁNÍ POHONU.....	39
<b>5 MODEL POHONU V MATLAB – SIMULINKU</b> .....	<b>41</b>
5.1 CELKOVÝ MODEL .....	41
5.2 MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....	42
5.3 MODEL STRÍDAČE.....	45
5.4 ÚPRAVA NÍZKOFREKVENČNÍHO MODULAČNÍHO SIGNÁLU .....	47
5.5 MODEL ZÁTĚŽE .....	48

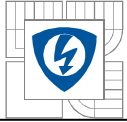


5.6 VEKTOROVÉ ORIENTOVANÉ ŘÍZENÍ.....	48
5.7 SIMULACE ROZJEZDU VOZIDLA .....	52
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>54</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>55</b>

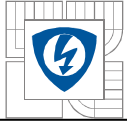


## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.2.1: Princip funkce palivového článku .....	19
Obr.2.2: Funkční princip palivového článku s palivem a)vodík b)methanol .....	20
Obr.2.3: Článek s roztavenými uhlíčitany .....	23
Obr.2.4: Alkalický článek .....	24
Obr.2.5: Článek s kyselinou fosforečnou .....	25
Obr.2.6: Článek polymer-elektrolyt .....	26
Obr.2.7: Výkonová hustota .....	28
Obr.3.1: Palivový článek Nexa .....	29
Obr.3.2: Struktura palivového článku.....	30
Obr.3.3: Systém Nexa s článkem Ballard .....	32
Obr.3.4: Zatěžovací charakteristika .....	33
Obr.3.5: Odezva na skok zátěže- 0-20A .....	34
Obr.3.6: Odezva na skok zátěže- 20-0A .....	35
Obr.4.1: Trakční pohon s palivovým článkem .....	36
Obr.4.2: Meziobvod s ultrakapacitorem.....	37
Obr.4.3: Meziobvod s ultrakapacitorem a akumulátorem .....	37
Obr.4.4: Meziobvod s akumulátorem .....	37
Obr.4.5: Meziobvod akumulátorem připojeným přes snižující měnič .....	38
Obr.4.6: Článek Li-Fe-Po.....	39
Obr.4.7: Trakční měnič.....	40
Obr.5.1: Celkový model pohonu .....	42
Obr.5.2: Model asynchronního motoru .....	43
Obr.5.3: Celkový třífázový model asynchronního stroje.....	44
Obr.5.4: Model střídače.....	46
Obr.5.5: Průběh fázového napětí $U_a$ .....	47
Obr.5.6: Úprava nf signálu .....	48
Obr.5.7: Graf-upravený nf signál.....	49
Obr.5.8: Model zátěže .....	49
Obr.5.9: Vektorové řízení.....	51
Obr.5.10: Výpočetní blok $\psi_d$ a $\vartheta_k$ .....	52

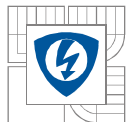


Obr.5.11: Rychlost vozidla $v$ .....	53
Obr.5.12: Zátěžný moment $M_z$ .....	54
Obr.5.13: Moment motoru $M_i$ .....	54



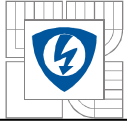
## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Srovnávací tabulka palivových článků.....	28
Tabulka 3.1: Parametry článku.....	31
Tabulka 4.1: Parametry střídače.....	40
Tabulka 5.1: Parametry motoru.....	46

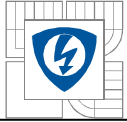


## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

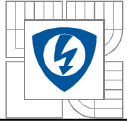
$C_v$	Koeficient aerodynamického odporu	
$d$	Délka palivového článku	cm
$F_A$	Aerodynamická síla	N
$F_f$	Třecí síla	N
$F_g$	Gravitační síla	N
$F_v$	Viskózní síla	N
$i$	Převod převodovky ve vozidle	
$I_A$	Proud statoru ve fázi A	A
$I_B$	Proud statoru ve fázi B	A
$I_C$	Proud statoru ve fázi C	A
$I_{D, ef}$	Efektivní hodnota proudu tekoucího diodou	A
$I_{f, max}$	Max. hodnota fázového proudu	A
$I_R$	Proud rotoru	A
$I_S$	Proud statoru	A
$I_{T, ef}$	Efektivní hodnota proudu tekoucího tranzistorem	A
$J_{W/kg}$	Výkonová hustota	W/kg
$J_{Wl}$	Výkonová hustota	W/l
$J_{W/cm^2}$	Výkonová hustota	W/cm <sup>2</sup>
$J_I$	Proudová hustota	A/cm <sup>2</sup>
$K_1$	Převodová konstanta z hřídele motoru na kolo vozidla	
$K_2$	Převodová konstanta z kola vozidla na hřídel motoru	
$K_m$	Konstanta pro přepočítání parametrů motoru	
$k_v$	Koeficient viskosního tření	
$L_R$	Indukčnost rotoru	H
$L_S$	Indukčnost statorového vinutí	H
$L_h$	Hlavní indukčnost	H
$m$	Hmotnost palivového článku	kg
$m$	Hmotnost vozidla	kg
$M_i$	Vnitřní moment motoru	Nm
$M_z$	Zátěžný moment	Nm
$p_p$	Počet pólových dvojic	



$p_{\check{c}}$	Počet článků svazku palivových článků	
$P$	Výkon palivového článku	W
$P$	Pracovní tlak palivového článku	kPa
$P_{D, ztr}$	Ztrátový výkon na diodě	W
$P_{př}$	Přepínací ztráty	W
$P_{T, ztr}$	Ztrátový výkon na tranzistoru	W
$P_z$	Celkové ztráty	W
$Q$	Plocha kolmého průmětu čelní plochy vozidla	m <sup>2</sup>
$r$	Poloměr kola vozidla	m
$R_d$	Vnitřní dynamický odpor	Ω
$R_i$	Vnitřní odpor palivového článku	Ω
$R_R$	Odpor rotoru	Ω
$R_S$	Odpor statoru	Ω
$S$	Plocha membrány palivového článku (u článků PEMFC)	cm <sup>2</sup>
$\check{s}$	Šířka palivového článku	cm
$T$	Rozsah pracovní teploty palivového článku	°C
$U$	Napětí svazku palivových článků	V
$U_A$	Fázové napětí na fázi A	V
$U_{A1max}$	Maximální amplituda 1. harmonické fázového napětí	V
$U_{AB1max}$	Maximální amplituda 1. harmonické sdruženého napětí	V
$U_B$	Fázové napětí na fázi B	V
$U_C$	Fázové napětí na fázi C	V
$U_{\check{c}}$	Napětí jednoho článku	V
$U_d$	Napětí meziobvodu	V
$U_{n1ef}$	Efektivní napětí motoru	V
$U_{n2ef}$	Efektivní napětí motoru	V
$U_R$	Napětí rotoru	V
$U_S$	Napětí statoru	V
$U_{va}$	Větвовé napětí střídače	V
$U_{VA1max}$	Maximální amplituda 1. harmonické větвовého napětí	V
$U_{vb}$	Větвовé napětí střídače	V



$U_{vc}$	Větвовé napětí střídače	V
$v$	Výška palivového článku	cm
$v_{max}$	Maximální předpokládaná rychlost vozidla	km/h
$\omega_k$	Rychlost točivého magnetického pole	rad/s
$\omega_{mech}$	Mechanické otáčky motoru	rad/s
$\omega_s$	Rychlost točivého magnetického pole statoru	rad/s
$\omega_r$	Kmitočet rotoru	rad/s
$\eta$	Účinnost střídače	%
$\xi$	Koeficient valivého odporu pneumatik	
$\rho$	Hustota vzduchu	kg/m <sup>3</sup>



# 1 ÚVOD

Dnešní doba se vyznačuje hledáním alternativ vůči ropě a palivům vyrobených z této suroviny. Hlavním důvodem je rostoucí cena ropy, růst celosvětové spotřeby a omezené zásoby do budoucna. Oblast, kterou to nejvíce postihuje je doprava. Rýsuje se mnoho alternativ jak se ze závislosti na ropě vymanit a jednou z nich je palivový článek. Tato práce se zaměřuje na využití palivového článku jako zdroje pro trakční pohon.

Princip palivového článku je znám již od roku 1893. Ale až v padesátých letech minulého století byl zkonstruován plně funkční alkalický palivový článek. Ten byl v 60. letech poprvé využit NASA v programu Gemini a později v programu Apollo pro napájení palubních přístrojů. Jejich úspěšný provoz naznačil možnosti komerčního využití, ale mnoho technických překážek a vysoké investiční náklady nedávaly naději, že by mohly konkurovat existujícím energetickým technologiím. K zásadnímu obratu došlo až po naftové krizi 70-tých let, kdy vládní organizace v USA vyhlásily velkou podporu výzkumu a vývoji palivových článků. Od té doby začala výzkumná činnost, do které se zapojily stovky společností a institucí po celém světě za významné finanční podpory jednotlivých vlád. Tento vývoj se speciálně v posledních letech neustále urychluje a výsledkem je řada prototypů palivových článků v různých aplikacích a konkrétní příprava průmyslové výroby. Jejich dokonalé využití se naskytá v použití ve vozidlech.

Vozidla provozovaná s palivovými články mají tři základní obrovské výhody oproti vozidlům se spalovacími motory. Hlavní je, že účinnost systému s palivovým článkem je výrazně vyšší proti klasickým systémům s vnitřním spalováním. Další dnes velice užitečnou vlastností je vydávání nulových emisí do ovzduší během provozu, tudíž nezatěžuje životní prostředí. Důležitou roli hraje také fakt, že palivem je přímo vodík nebo uhlovodík, ze kterého se vodík získává. Vodík je obnovitelným zdrojem energie a do budoucna se s ním počítá jako se základním prvkem světového hospodářství místo nynějších fosilních paliv, zejména ropy. Tuto skutečnost si nyní uvědomují téměř všichni výrobci automobilů a v různé míře pracují na vozidlech, která využívají pohon se systémem s palivovými články.

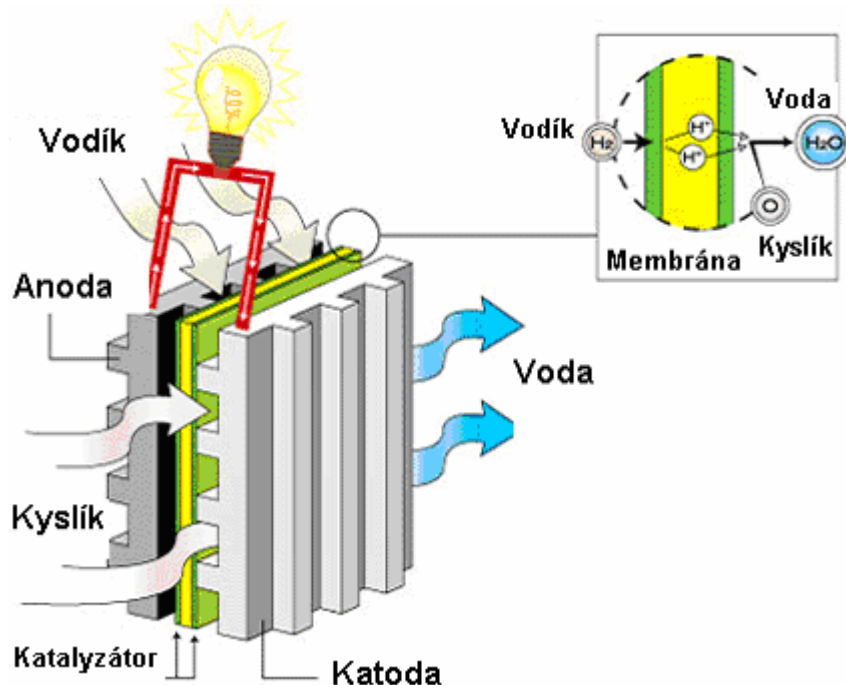
Úskalím této technologie je získávání vodíku jakožto paliva pro palivový článek. Pokud se podaří ekologicky vyrábět vodík ve velkém množství (doposud se získává hlavně z ropy) má tato alternativa velkou budoucnost. Nevýhodou je i vysoká cena jednotlivých komponent, která však, stejně jako v jiných oblastech průmyslu, bude se sériovou výrobou klesat.

Pro účely výzkumu trakčních pohonů byly naším ústavem zakoupeny dva palivové články od firmy Ballard. Tato práce se zabývá trakčním pohonem elektromobilu malého výkonu s těmito palivovými články.

## 2 PALIVOVÉ ČLÁNKY

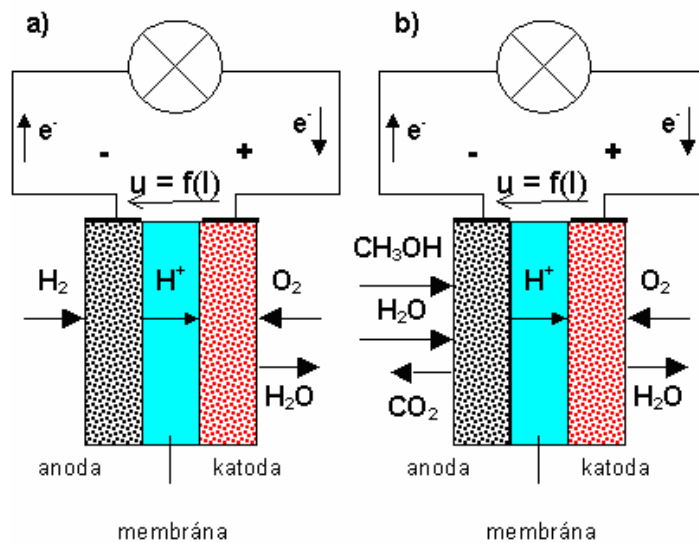
Palivové články patří mezi zařízení, v nichž na základě elektrochemických procesů dochází k přímé přeměně vnitřní energie paliva na energii elektrickou. V tomto ohledu jsou tedy podobné článkům primárním či sekundárním (bateriím). Existují zde ovšem značné rozdíly. Ten zásadní spočívá ve skutečnosti, že aktivní chemické látky nejsou v případě palivových článků součástí anody a katody, ale jsou k nim průběžně přiváděny zvenjšku. Obě elektrody působí výlučně jako katalyzátor chemických přeměn, během činnosti článku se téměř neopotřebovávají a jejich chemické složení se nemění. Palivový článek se tedy nevybývá. Pokud jsou do něho aktivní látky přiváděny trvale, může pracovat prakticky bez časového omezení.

### 2.1 Stavba a funkční princip palivového článku



Obr. 2.1: Princip funkce palivového článku

Princip činnosti palivového článku je velmi jednoduchý. Na elektrodu, které říkáme palivová (jedná se o anodu), se přivádí aktivní látka (palivo). Ta zde oxiduje (její atomy se zbavují, často za přispění katalyzátoru, jednoho nebo několika elektronů z valenční sféry) a uvolněné elektrony představující elektrický proud se vnějším obvodem pohybují k druhé oxidační elektrodě (katodě). Na kladné elektrodě, kam se přivádí okysličovadlo, naopak probíhá redukce (atomy okysličovadla volné elektrony přijímají) za současné reakce s kladnými ionty, které k ní pronikají elektrolytem. Pokud se vnější obvod se zátěží přeruší, probíhající chemické reakce se z důvodu deficitu elektronů okamžitě zastaví.



Obr. 2.2: Funkční princip palivového článku s palivem a) vodík b) methanol

V palivovém článku je chemická energie měněna přímo v elektrickou energii (tzv. studené spalování). Plynné palivo, např. vodík a rovněž plynný oxidační prostředek např. kyslík jsou přiváděny elektrodám opatřeným katalyzátorem. Mezi oběma elektrodami se nachází elektrolyt, např. ze speciální polymerové fólie v kyselém nebo alkalickém roztoku. Jeho úkolem je mimo jiné zabránit přímému kontaktu obou plynů. Elektrolyt je elektrický izolátor, který zajišťuje aby elektrony byly vyměňovány jen přes vnější proudový okruh. Tak vzniká rozdíl elektrického napětí mezi elektrodami.

Pro dosažení požadovaného výkonu se palivové články zařazují do takzvaných palivových svazků. Požadovaný výkon je jednoduše dosažen, počet článků dává celkové napětí svazku, plocha jednotlivých sílu proudu v Ah. Mezi jednotlivými články jsou bipolární desky, které vedou el. proud svazkem a těsní jednotlivé články mezi sebou.

Dále existuje monopolární uspořádání, kde není proud veden od jednoho článku ke druhému, ale je sbírán na okraji desek a odváděn vedením. Má to tu výhodu, že v případě defektu se článek překlene a svazek je dále funkční.

## 2.2 Základní komponenty palivového článku

Základními prvky každého palivového článku jsou dvě elektrody (anoda a katoda) a elektrolyt. Jejich struktura zpravidla závisí na použitém palivu, případně na vlastnostech oxysličovadla. Palivem mohou být plynné, kapalné i tuhé látky. Z plynů lze jmenovat vodík  $H_2$ , oxid uhličitý  $CO$  nebo hydrazin  $N_2H_4$ , z kapalin metanol  $CH_3OH$  a další složitější alkoholy a z tuhých látek některé kovy (sodík  $Na$ , hořčík  $Mg$ , zinek  $Zn$ , kadmium  $Cd$ ). Oxysličovadlem mohou rovněž být plynné (kyslík  $O_2$ , chlor  $Cl_2$ ), kapalné či tuhé látky (oxid rtuťnatý  $HgO$ , oxid mangančitý  $MnO_2$ ), ale z praktických důvodů se nejčastěji využívá kyslík z okolního vzduchu. Je-li provozní teplota článku nízká, musí být povrch elektrod navíc opatřen vhodným katalyzátorem příslušných reakcí. Známa je především platina nebo palladium.



### 2.2.1 Elektrody

Záporná elektroda musí být uzpůsobena skupenství přiváděného paliva. Je-li palivem plyn, musí na ní být co nejvíce míst kde se může setkávat fáze pevná (elektroda a případný katalyzátor), kapalná (některé elektrolyty) a plynná (palivo). Tato místa jsou tvořena soustavou pórů a kapilár, které vznikají během výroby například tak, že se jednotlivé vrstvy elektrody lisují z materiálů o určité velikosti zrn, nebo obsahují snadno rozpustné materiály, po jejichž odplavení vznikají ve strukturách elektrody další dutinky. Během činnosti článku jsou póry vyplněny plynem a kapiláry elektrolytem. Takové elektrody jsou většinou kovové a říká se jim difúzní. Jinou možností je hydrofobizace pórovité elektrody, kdy se vnitřní struktura pórů upravuje smáčením v organickém polymeru. Stěny pórů pak mají různou smáčivost vůči přítomnému elektrolytu, takže některé póry elektrolyt přijmou, jiné nikoli (drží se v nich plynné palivo). Těto úpravy se užívá zejména u elektrod uhlíkových. Je-li palivem kapalina, pracuje palivová elektroda pouze s pevnou a kapalnou fází, takže jemná porézní struktura ztrácí na důležitosti.

Rozhodujícím faktorem se nyní stává velikost aktivního povrchu elektrody, poněvadž palivo se k ní přivádí rozpuštěné v elektrolytu. Záporná elektroda je pak od kladné oddělena separátorem, který propouští pouze vybrané ionty.

### 2.2.2 Katalyzátory

Katalyzátory jsou látky které napomáhají nebo teprve umožňují reakce, aniž by byly reakcí spotřebovány. Materiál elektrod uhlík působí sám jako katalyzátor. Aktivní je u PEMFC článků, jejichž pracovní teplota není příliš vysoká. Nejvyšší aktivitu pro vodík v kyselém prostředí má platina, palladium a nikl. U PEMFC článků se používá platina jako materiál katalyzátoru u anody i katody, protože je při teplotách do 100°C nejlepším katalyzátorem.

Tyto kovy jsou ovšem velmi drahé a proto se v současné době hledají látky, které by je byly schopny nahradit.

### 2.2.3 Polymerová membrána

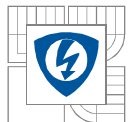
Je hlavním členem PEMFC článku a je vyrobena z modifikovaného teflonu. Je nepropustná pro použité plyny, působí jako elektrický izolátor, ale je vynikajícím vodičem pro  $H^+$  ionty.

Materiál snese vysokou proudovou hustotu, což je pro zavedení ve vozidlech velice důležité. Cestou ke zvýšení iontové vodivosti membrány a současně k poklesu její ceny je výroba co nejtenčí membrány, např. 175 $\mu$ m (Nafion 11) nebo 50 $\mu$ m (Nafion 112). Membrány nemohou být ovšem libovolně tenké, jinak v přibývajícím míře difundují vodíkové molekuly z anodové strany ke straně katody a tím mohou reagovat s kyslíkem.

### 2.2.4 Bipolární desky

Bipolární desky se nachází mezi jednotlivými složenými svazky palivových článků. Umožňují elektrický kontakt mezi články a vedou proud. Také zabezpečují články reakčními plyny a odvádí produkovanou vodu strukturou kanálků.

V jejich vnitřku se nacházejí chladicí kanálky vyplněné kapalinou, která odvádí vzniklé teplo. U palivových článků PEMFC jsou obvykle vyrobeny z grafitu.



## 2.3 Typy palivových článků

Jednotlivé typy palivových článků se liší především typem použitého elektrolytu. Typ elektrolytu určuje provozní teplotu, jež se pro různé typy článků výrazně liší. Jedním z dalších dělení je podle velikosti pracovní teploty palivového článku na vysokoteplotní a nízkoteplotní.

**Vysokoteplotní palivové články** pracují při teplotách vyšších než 600 °C. Tyto vysoké teploty umožňují samovolný vnitřní reforming lehkých uhlovodíkových paliv, který odstraňuje potřebu samostatného zařízení na zpracování paliva a umožňuje palivovému článku zpracovávat i jiná paliva než je čistý vodík. Tyto významné výhody vedou k nárůstu celkové účinnosti téměř o 15 %.

Nejvýznamnějšími vysokoteplotními palivovými články jsou:

- Palivové články s roztavenými uhličitany (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cells)
- Palivové články s elektrolytem s tuhými oxidy (SOFC – Solid Oxide Fuel Cells)

**Nízkoteplotní palivové články** pracují obvykle s teplotami nižšími než 250 °C. Tyto nízké teploty neumožňují vnitřní reforming paliva v důsledku čehož vyžadují nízkoteplotní palivové články vnější zdroj vodíku. Na druhou stranu, vykazují rychlý rozběh zařízení a trpí menší poruchovostí konstrukčních materiálů. Jsou také mnohem vhodnější pro aplikace v dopravě.

Nejvýznamnějšími nízkoteplotními palivovými články jsou:

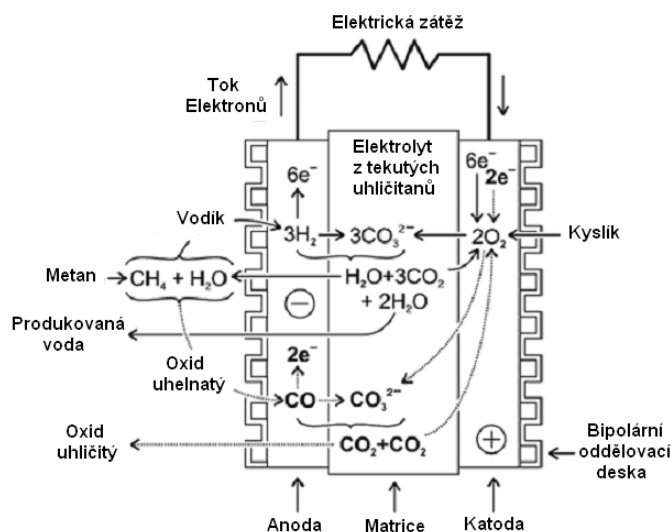
- Alkalické palivové články (AFC – Alkaline Fuel Cells)
- Palivové články s elektrolytem na bázi kyseliny fosforečné (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cells)
- Palivové články s protonovou membránou (PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cells)
- Palivové články s přímým zpracováním methanolu (DMFC – Direct Methanol Fuel Cells)

### 2.3.1 MCFC – palivový článek s roztavenými uhličitany

Palivové články s elektrolytem s roztavenými uhličitany využívají elektrolytu, jež je schopný vést uhličitánové ionty ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) od katody k anodě. To je opačný směr pohybu oproti většině nízkoteplotních palivovým článkům, jež vedou vodíkové ionty od anody ke katodě.

Elektrolyt se skládá z roztavené směsi uhličitanu lithia a draselného. Tato směs je udržována pomocí kapilárních sil v keramické podpůrné krystalické mřížce (matrici) z hlinitanu lithia (lithného). Při provozní teplotě palivového článku dochází k tomu, že struktura elektrolytu se změní v jakousi pastu, jež umožňuje úniky plynů na okrajích článku.

Palivové články na bázi tekutých uhličitánů pracují s teplotami okolo 650 °C a s tlaky v rozmezí 10 až 100 kPa. Každý článek je schopný produkovat stejnosměrné napětí mezi 0,7 a 1 V.



Obr. 2.3: Článek s roztavenými uhličitany

#### Výhody MCFC článků

- Podpora samovolného vnitřního reformingu lehkých uhlovodíkových paliv.
- Vysoká kinetika reakce (reakce probíhají rychle).
- Vysoká účinnost reakce.
- Nepotřebují katalyzátory z ušlechtilých kovů.

#### Nevýhody MCFC článků

- Koroze je nejdůležitější problém MCFC článků.
- Rozměrová nestálost může způsobit zničení elektrod jež změní povrch aktivní oblasti, což může způsobit ztrátu kontaktu a vysoký odpor mezi jednotlivými částmi článku.
- Jsou vysoce citlivé na síru.
- Mají tekutý elektrolyt, což přináší problémy s manipulací článku.
- Požadují značně dlouhou dobu na rozeřtání (rozběh).

### 2.3.2 SOFC – palivový článek s tuhými oxidy

Tyto palivové články používají elektrolyt, jež je schopný vést kyslíkové ionty  $O^{2-}$  od katody k anodě.

Elektrolyt se skládá z pevných oxidů, obvykle zirkonia (stabilizovaného dalšími oxidy kovů vzácných zemin jako je ytrium), jež mají podobu keramiky.

Tyto palivové články jsou sestaveny na stejném principu jako čipy počítačů postupným ukládáním různých vrstev materiálu. Běžná uspořádání používají trubkové či ploché (deskové) tvary jednotlivých článků. Tvary ovlivňují plochu (povrch) článku, což výrazně ovlivňuje velikost těsnění článku, a to jak v důsledku průsaku mezi kanálky paliva a oxidantu, ale taky vlivem elektrického zapojení jednotlivých článků do bloku. Pro materiál elektrod mohou být použity kovy typu nikl a kobalt. Palivové články SOFC pracují s teplotami okolo 1 000 °C a tlaky okolo 10 kPa. Každý palivový článek je schopen vyrobit stejnosměrné napětí o velikosti 0,8 až 1,0 V.

### Výhody SOFC palivových článků

- Pracují stejně dobře jak s vlhkými tak i suchými palivy.
- Mají velkou kinetiku reakce (rychlý průběh reakce).
- Mohou pracovat s vyšší proudovou hustotou než MCFC články.
- Mají pevný elektrolyt, díky čemuž se vyhýbají problému s manipulací tekutin.
- Nepotřebují katalyzátor z ušlechtilých kovů.

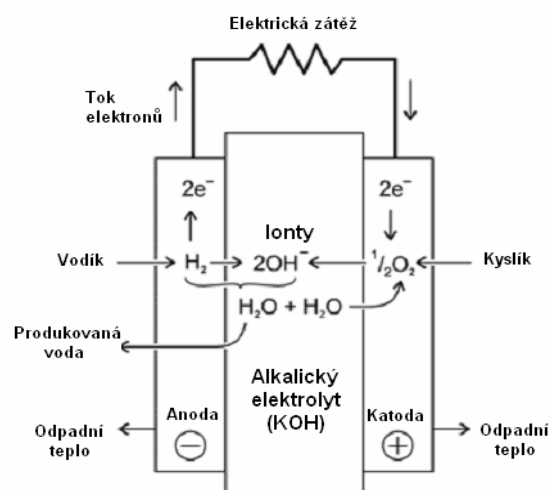
### Nevýhody SOFC palivových článků

- Požadavek vývoje vhodných materiálů, které mají požadovanou vodivost, a to jak elektrickou tak tepelnou.
- Citlivost na přítomnost síry v palivu. Palivové články SOFC jsou tolerantnější vůči síře než palivové články s roztavenými uhlíčitany. Nadbytek síry v palivu snižuje výkon palivového článku.
- Technologie SOFC článků ještě není dostatečně vyspělá.

## 2.3.3 AFC – alkalický článek

Alkalické palivové články pracují s elektrolytem, jež je schopný vést hydroxidové ionty ( $\text{OH}^-$ ) od katody k anodě. Elektrolyt je obvykle složen z roztavené alkalické směsi hydroxidu draselného ( $\text{KOH}$ ). Elektrolyt může být jak pohyblivý tak i pevný (statický, nepohyblivý). Palivový článek s pohyblivým alkalickým elektrolytem využívá tekutého elektrolytu, jež plynule obíhá mezi elektrodami. Produkovaná voda a odpadní teplo ohřívají tekutý elektrolyt a postupně jsou s jeho obíháním odváděny z článku.

Palivové články s nepohyblivým elektrolytem používají elektrolyt, který se skládá z tuhé hmoty, jež je udržována pohromadě pomocí kapilárních sil uvnitř porézní podpurné krystalické mřížky, která je tvořena například azbestem. Hmota samotná zajišťuje těsnění proti úniku plynů na okraji článku. Produkovaná voda se odpařuje do proudu zdrojového vodíkového plynu na straně anody, kde současně dochází k její kondenzaci. Odpadní teplo je odváděno přes obíhající chladivo. Alkalické palivové články pracují s teplotami od 65 do 220 °C a s tlakou okolo 100 kPa. Každý článek je schopný vytvářet stejnosměrné napětí mezi 1,1 až 1,2 V.



Obr. 2.4: Alkalický článek

### Výhody AFC článků

- Nízká provozní teplota.
- Rychlé startovací časy
- Mají vysokou účinnost.
- Potřebují minimální množství platinového katalyzátoru či jej nepotřebují vůbec.
- Mají malou hmotnost a objem (rozměry).

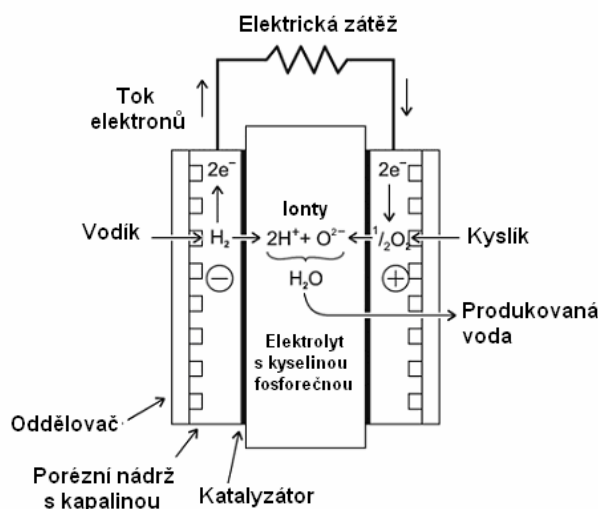
### Nevýhody AFC článků

- Jsou náročné na obsah oxidu uhličitého  $\text{CO}_2$ . Obdobné je to taky s požadavkem na obsah oxidu uhelnatého  $\text{CO}$ . Oxidantem musí být pouze čistý kyslík či vzduch očištěný od obsahu oxidu uhličitého. Jako palivo může být použit pouze čistý vodík.
- Mají tekutý elektrolyt s čímž souvisejí problémy s manipulací článků.
- Požadují složitý systém vodního hospodářství.

## 2.3.4 PAFC – palivový článek s kyselinou fosforečnou

Palivové články s elektrolytem na bázi kyseliny fosforečné (PAFC) mají elektrolyt, jež je schopný vést vodíkové ionty (protony)  $\text{H}^+$  od anody směrem ke katodě. Elektrolyt je složen z tekuté kyseliny fosforečné nacházející se uvnitř krystalické mřížky.

PAFC články pracují při teplotách od 150 do 205 °C s tlakem okolo 10 kPa. Každý článek je schopný vyprodukovat stejnosměrné napětí o velikosti 1,1 V.



Obrázek 2.5: Článek s kyselinou fosforečnou

### Výhody PAFC článků

- Jsou schopny snést vysoký obsah oxidu uhličitého v palivu (až 30 %). Výsledkem je, že PAFC články nevyžadují čištění vzduchu jako oksyličovadla a reformátu jako paliva.
- Pracují při nízkých provozních teplotách. Tyto teploty jsou však vyšší než u ostatních nízkoteplotních palivových článků. Díky tomu produkují odpadní teplo o vyšším potenciálu, které může být využito v kogeneračních aplikacích.
- Mají stále charakteristiky elektrolytu.

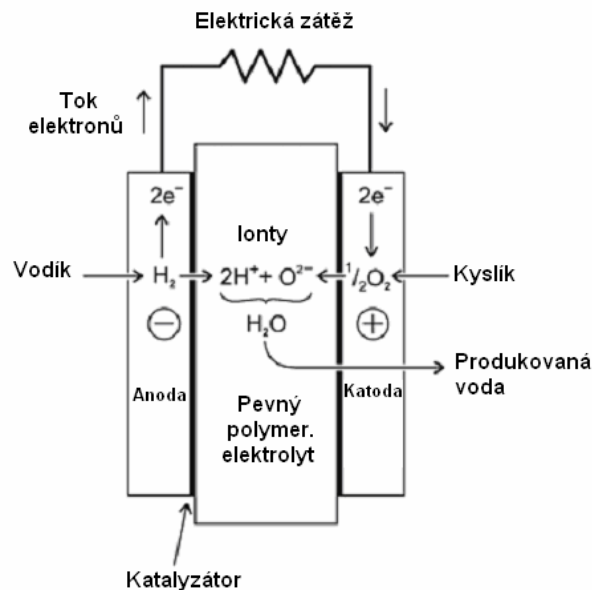
### Nevýhody PAFC článků

- Jsou citlivé na obsah sloučenin síry v palivu.
- Využívají korozivní tekutý elektrolyt při mírných teplotách, což vede k problémům spojených s korozí konstrukčních materiálů.
- Mají tekutý elektrolyt, s čímž jsou spjaty problémy s manipulací článku a s postupným odpařováním elektrolytu v průběhu života článku.
- Umožňují produktové vodě vstupovat do elektrolytu a zředovat jej.
- Jsou velké a těžké.
- Nejsou schopny samostatného reformingu uhlovodíkových paliv.
- Musí být zahřány předtím, než budou uvedeny do provozu, či musí být trvale udržovány na provozní teplotě.

### 2.3.5 PEMFC – palivový článek polymer-elektrolyt

PEM palivové články používají elektrolyt, jež je schopný vést protony  $H^+$  od anody ke katodě. Elektrolyt je složen z pevného polymerického filmu, který se skládá z okyseleného teflonu.

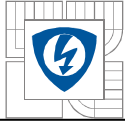
PEM palivové články pracují obvykle s teplotami mezi 70 až 90 °C a tlaky mezi 10 a 20 kPa. Každý článek je schopný vygenerovat napětí okolo 1,1 V .



Obr. 2.6: Článek polymer-elektrolyt

### Výhody PEMFC článků

- Relativně dobře snášejí vysoký obsah oxidu uhličitého jak v palivu tak i v okysličovadlu. Výsledkem je, že PEMFC články mohou pracovat s nečistěným vzduchem jako okysličovadlem.
- Pracují s nízkými teplotami, což značně zjednodušuje požadavky na použité materiály, poskytuje rychlý start a výrazně zvyšuje bezpečnost palivového článku.
- Používají pevný suchý elektrolyt, což eliminuje nároky na manipulaci s tekutinami, snižuje pohyb elektrolytu a problémy spojené s jeho doplňováním.
- Elektrolyt je navíc nekorozivní, čímž jsou sníženy problémy související s korozí materiálů a narůstá bezpečnost provozu palivového článku.



- Mají vysoké článkové napětí, vysokou proudovou a energetickou hustotu.
- Pracují při menších tlacích, což zvyšuje jejich bezpečnost.
- Mají vysokou snášenlivost na proměnnost tlaku reagujících plynů.
- Jsou kompaktní a mechanicky odolné.
- Mají relativně jednoduché tvary.
- Využívají stabilní konstrukční materiály.

Nevýhody PEMFC článků

- Jsou citlivé na obsah oxidu uhelnatého v palivu.
- Jsou schopné snést pouze několik sloučenin síry.
- Vyžadují zvlhčování reakčního plynu. Zvlhčování je energeticky náročné a způsobuje nárůst rozměrů celého systému.
- Používají drahé platinové katalyzátory.
- Používají drahé membrány, se kterými obtížně pracuje.

## 2.4 Porovnání palivových článků pracujících na různých principech

Mezi základní parametry palivových článků, které udávají jednotlivý výrobci patří:

- $P$  - výkon palivového článku
- $U$  - napětí svazku palivových článků
- $m$  - hmotnost palivového článku
- $T$  - rozsah pracovní teploty palivového článku
- délka x šířka x výška - rozměry palivového článku
- $p$  - pracovní tlak palivového článku
- $p_{\varepsilon}$  – počet článků svazku palivových článků
- $s$  - plocha membrány palivového článku (u článků PEMFC)
- cena

Dalšími parametry jsou vlastnosti jednotlivých palivových článků, díky nimž si můžeme články mezi sebou porovnat. A to jak jednotlivé články mezi sebou, tak i různé typy. Mezi tyto důležité parametry patří:

- $J$  - výkonová hustota, která je podíl jmenovitého výkonu článku a hmotnosti nebo objemu článku, popř. jednotce plochy membrány (tzv. plošný výkon):

$$J_{W/kg} = \frac{P}{m} \quad [\text{W/kg}] \quad (2.1)$$

$$J_{W/l} = \frac{P}{V} = \frac{P}{\text{š.v.d}} \quad [\text{W/l}] \quad (2.2)$$

$$J_{W/cm^2} = \frac{P}{p_{\varepsilon} \cdot s} \quad [\text{W/cm}^2] \quad (2.3)$$

- $J_I$  – proudová hustota palivového článku, která udává sílu proudu na jednotku plochy membrány:

$$J_I = \frac{I}{s} = \frac{P}{s \cdot U} \quad [\text{A/cm}^2] \quad (2.4)$$

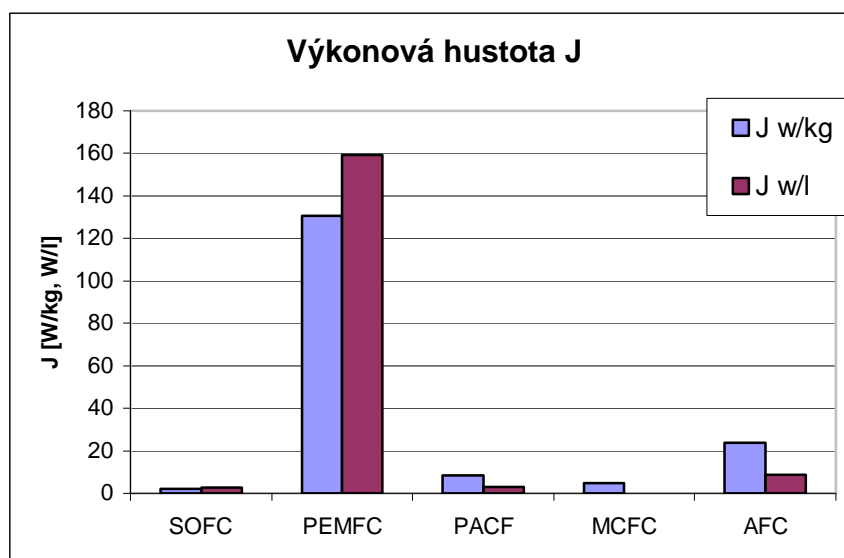
Pro snadnější orientaci mezi články pracující na odlišných principech je dobré si porovnat jednotlivé parametry navzájem. Samozřejmě se to týká jen vlastností, které lze srovnat.

Pro použití článku v mobilní aplikaci je nejdůležitějším parametrem výkonová hustota, kde hmotnost a rozměry hrají velkou roli. V tabulce 2.1 jsou uvedeny jednotlivé parametry různých druhů palivových článků. Hodnoty jsou výsledkem zprůměrnování jednotlivých parametrů u komerčně vyráběných článků. Z této tabulky je zřejmé že nejlepšími výsledky dosahují články PEMFC, které jsou ostatně nejvíce vyráběny, a získání parametrů kterých dosahují, jde nejnázne.

Parametr	Veličina	Jednotka	SOFC	PEMFC	PACF	MCFC	AFC
Napětí 1 článku	$U_{\xi}$	V	-	0,75	0,88	-	0,60
Výkonová hustota	$J_{W/kg}$	W/kg	2,36	130,74	14,45	-	23,91
	$J_{W/l}$	W/l	2,68	159,13	4,78	4,79	8,85
	$J_{W/cm^2}$	W/cm <sup>2</sup>	-	0,32	-	-	0,12
Vnitřní odpor	$R_i$	$\Omega$	0,83	0,44	0,8	0,595	0,64
Proudová hustota	$J_I$	mA/cm <sup>2</sup>	-	327,14	-	130	200

Tabulka 2.1: Srovnávací tabulka palivových článků

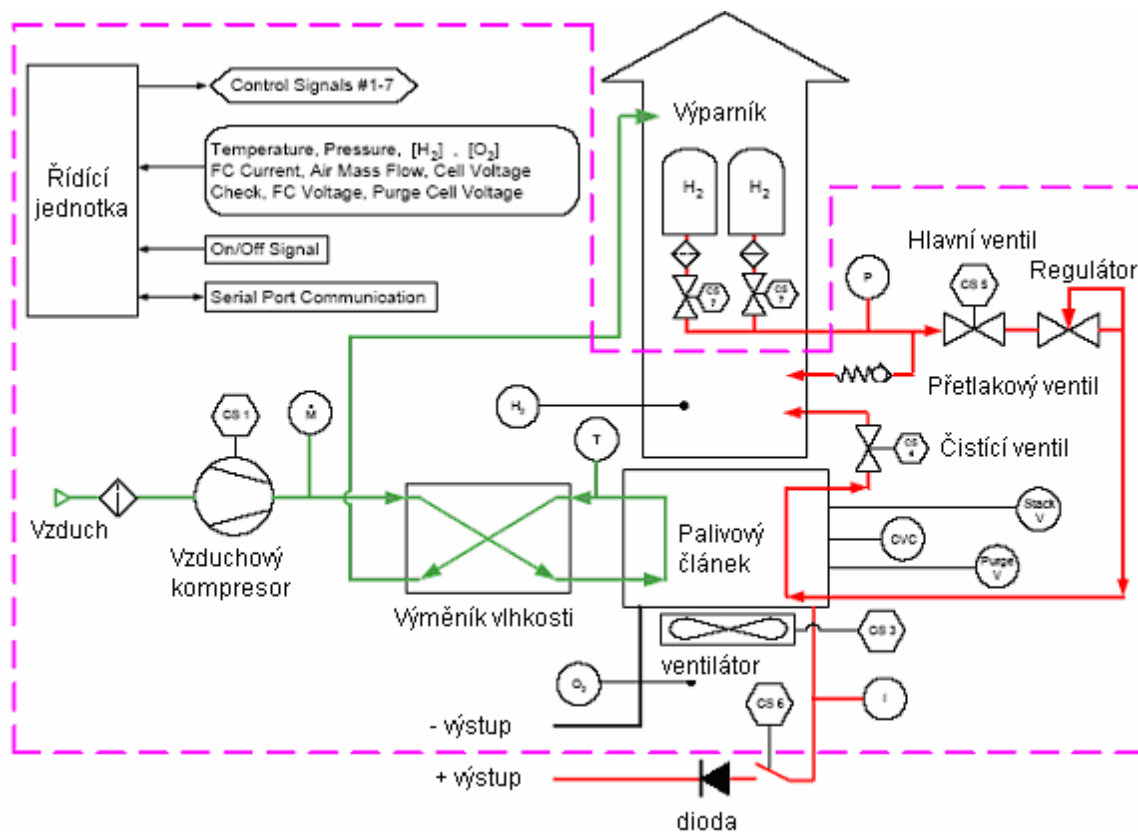
Z jednotlivých parametrů je zřejmé proč se nejvíce vyrábějí články polymer-elektrolyt (PEMFC). Mají nejvyšší proudovou hustotu a tím dosáhnou nejvyššího plošného výkonu. Zároveň jsou lehké a mají malé rozměry, tím je jejich výkonová hustota znatelně větší v porovnání s ostatními typy. Dobré hodnoty vykazují i alkalické články (AFC) ovšem jejich nároky na co nejčistší vodík a kyslík jsou problémem. Články s kyselinou fosforečnou dosahují velkého napětí jednoho článku a vysoké účinnosti. Vysokoteplotní články s roztavenými uhlíčitany (MCFC) a tuhými oxidy (SOFC) jsou pro použití v elektromobilu nejméně vhodné. Mají vysokou pracovní teplotu a dlouho trvá než se „nastartují“.



Obr. 2.7: Výkonová hustota

### 3 PALIVOVÝ ČLÁNEK NA ÚVEE

Za účelem výzkumu a vývoje trakčních pohonů a zdrojů elektrické energie byly naším ústavem zakoupeny dva vodíkové palivové články firmy Ballard. Každý článek typu Nexa® power module má jmenovitý výkon 1,2 kW a jmenovité napětí 26 V. Palivový článek Nexa je malým zdrojem elektrické energie. Mezi přednosti patří plně automatizovaný přívod paliva i odvod odpadních produktů ze svazku jednotlivých článků a dále nízká údržba. Článek pracuje při nízkých tlacích plynů, což snižuje pravděpodobnost možného úniku paliva. Článek je typu PEMFC a proto není potřeba externího zvlhčovače membrán. V případě použití externího přívodu paliva je čas činnosti článku nepřetržitý. Doba provozu je omezena jen velikostí zásobníku paliva. Díky použití vodíkového paliva v článku je jednotka tichá, produkuje nulové škodlivé emise, a tedy ji lze použít ve vnitřních prostorech.



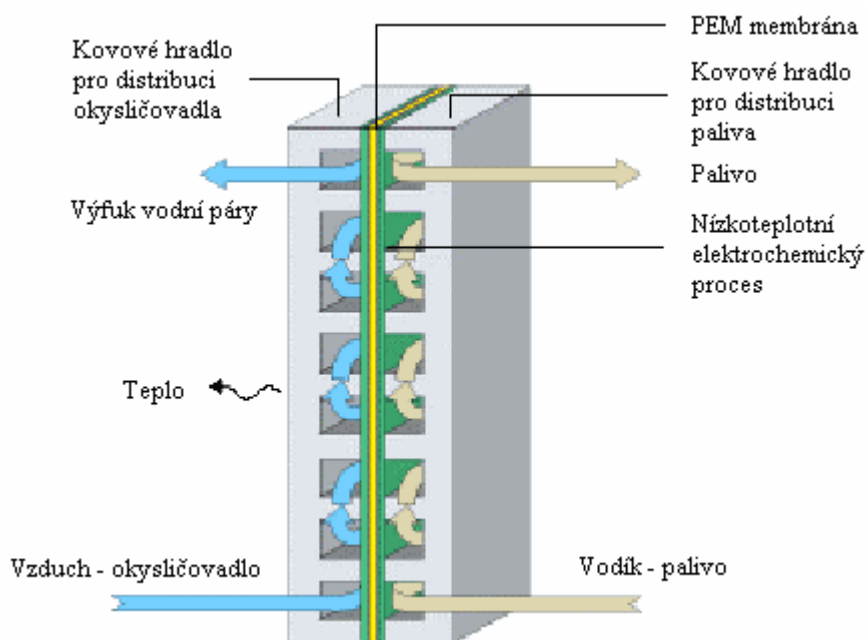
Obr. 3.1: Palivový článek Nexa

Článek obsahuje veškerá periferní zařízení nutná pro činnost včetně pomocných podsystémů. Periferie zabezpečují přívod vodíku jako paliva, přívod vzduchu jako oksyločovač a přívod chladicího vzduchu. Dále jsou na zařízení monitorující senzory a řídicí jednotka s mikroprocesorem. Článek také obsahuje zařízení, které zajišťuje bezpečný chod pro obsluhu v uzavřených prostorech pomocí čidla množství kyslíku v okolí zařízení. Součástí zařízení jsou i signální porty pro start/stop a sériový komunikační port pro PC. K článku musí být připojeno externí napájení 24 V pro start a zastavení zařízení. Při provozu je toto napájení nevyužívané a pouze se monitoruje jeho přítomnost.

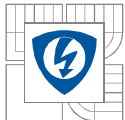
Vodík je během činnosti článku neustále doplňován o množství, které se článkem spotřebovává na vodu a dusík. Vzniklá voda a dusík se hromadí v rozváděném palivu a na anodě článku. To má za následek, že se sníží výkon v čistících člancích. Při tomto snížení napětí se otevře čistící vodíkový ventil a tyto odpadní produkty se vyfouknou z anody článku a obnoví se původní výkon. Při tomto vyfouknutí se zbavíme méně než jednoho procenta spotřebovaného vodíku. Vodík se rozptýlí v chladícím proudu vzduchu na koncentraci menší, než je mez zápalnosti. Aby za žádných okolností nebylo dosaženo koncentrace, která by umožnila samovznícení, obsahuje článek detektor vodíku.

Malý kompresor poskytuje nadměrný přísun vzduchu jako oksyličovadla ke svazku palivových článků. Vzduch je před vstupem do svazku zvlhčován tak, aby udržoval navlhčenou membránu jednotlivých článků a prodloužil tak životnost celého zařízení. Výměník vlhkosti přenesse oba produkty palivového článku, vodu a teplo, z mokrého výstupu z anody na suchý přicházející vzduch do vstupu do anody.

Základem jednotlivého palivového článku jsou dvě elektrody, anoda a katoda, které jsou odděleny polymerovou membránou. Elektrody jsou pokryty tenkou katalyzátorovou vrstvou z platiny. Elektrody, katalyzátor a membrána společně tvoří svazek. Každý jednotlivý palivový článek se skládá z tohoto svazku a dvou kovových hradel s rozvodnými kanálky. Vodík a kyslík jsou dodávány k elektrodám po obou stranách pomocí rozvodných kanálů. Vodík je přiváděn kanálky k anodě, kde reaguje a oddělují se protony od elektronů. Volné elektrony jsou vedené ve formě elektrického proudu přes vnější obvod, zatímco protony procházejí skrz membránu ke katodě. Na katodě se kyslík ze vzduchu, elektrony z vnějšího obvodu a protony spojí a vytvoří odpadní vodu a teplo. Pracovní teplota článků je 65°C a udržuje se automaticky regulovaným ventilátorem.



Obr. 3.2: Struktura palivového článku

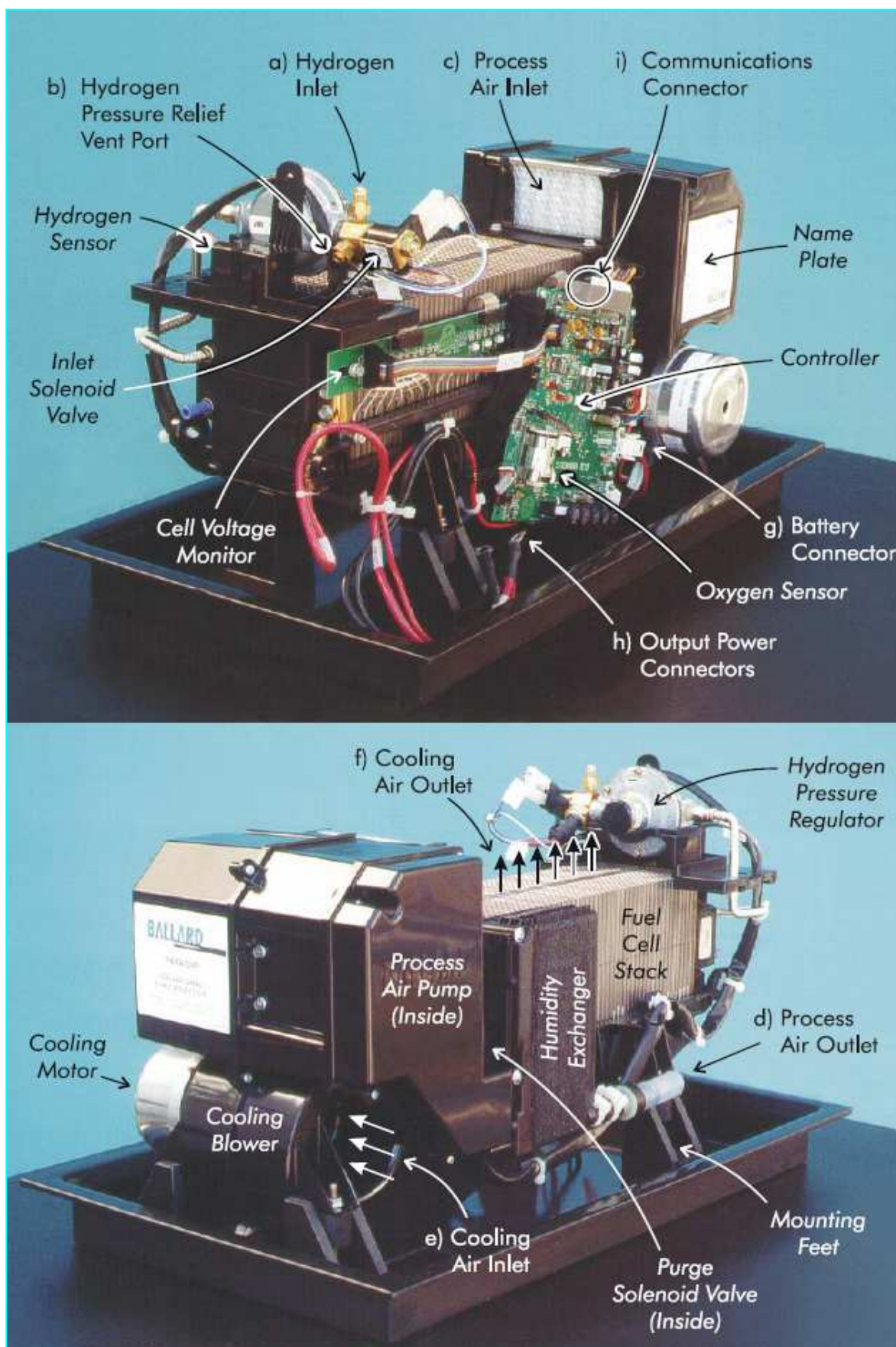


### 3.1 Technické parametry článku

Výstupní parametry článku zahrnují výkon článku, jeho emise, rozměry, hmotnost a životnost. U životnosti se rozlišuje začátek – Beginning Of Life (BOL), což zahrnuje prvních 40 hodin provozu, a konec životnosti – End Of Life (EOL), který je charakterizován jmenovitým výstupním napětím pod 22V. Vstupními parametry zahrnují vlastnosti dodávaného paliva a oksyličovadla, parametry napájecí baterie a požadavky na pracovní prostředí.

Výstupy	Název	Definice	Velikost
Výkon	Jmenovitý výkon		1200 W
	Napětí	Rozsah napětí jmenovité	22V – 50 V 26 V
	Doba startu	Do jmenovitého výkonu – ze studena	2 minuty
Emise	Hluk	Max. hluk ve vzdálenosti 1 m	72 dB
	Voda	Max. produkovávané vody při jmenovitém výkonu	870 ml/hod
Technické parametry	Rozměry	d x š x v	56 x 25 x 33 cm
	Hmotnost	m	13 kg
Životnost	Provozní	Minimum hodin provozu před EOL	1500 hodin
	Cyklická	Minimum start-stop cyklů před EOL	500
<b>Vstupy</b>			
Palivo	Čistota		99,99 %
	Tlak		70-1720 kPa
Parametry ss zdroje (baterie)	Napětí		18 – 30 V
	Výkon	Max. výkon během startu	60 W
Požadavky na pracovní prostředí	Umístění		venkovní & vnitřní
	Okolní teplota		3 °C – 40 °C
	Vlhkost		0 % - 95 %

Tab.3.1: Parametry článku



Obr. 3.3: Systém Nexa s článkem Ballard

## 3.2 Měření na palivovém článku

Pro lepší informaci o chování palivového článku a ověření hodnot udávaných výrobcem jsme na tomto zařízení provedli několik měření. Na modulu palivového článku Nexa se článkem Ballard jsme proměřili zatěžovací charakteristiku a dynamickou charakteristiku článku.

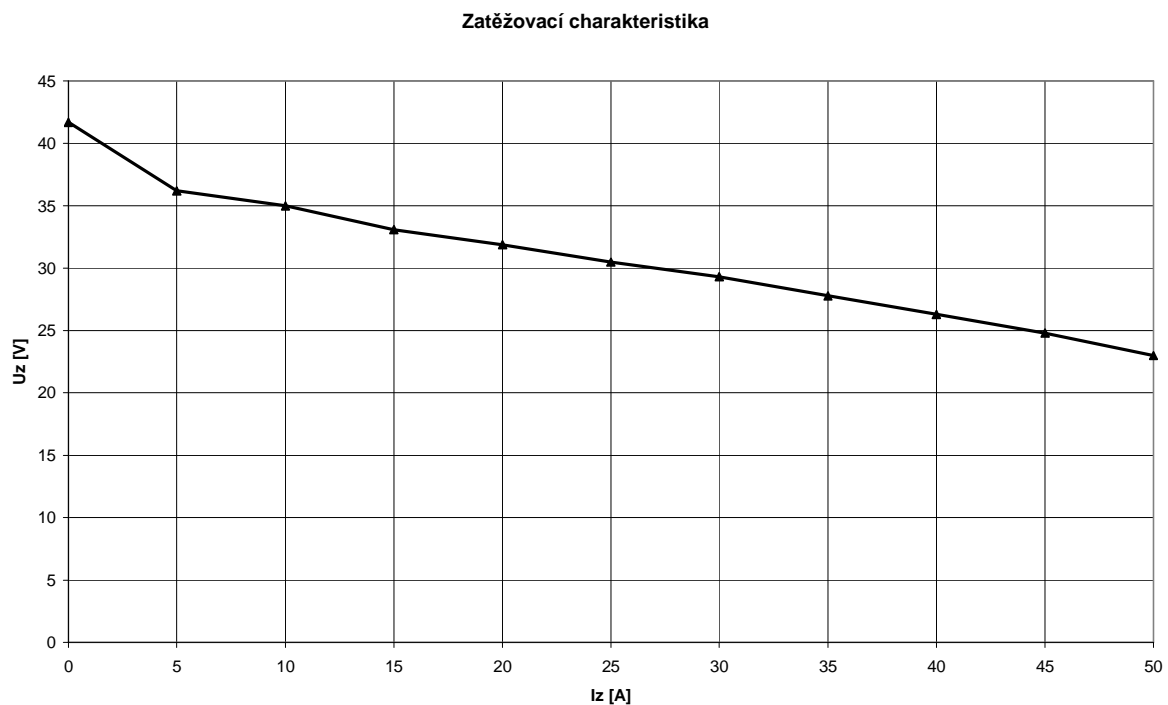
### 3.2.1 Zatěžovací charakteristika

Tato charakteristika vyjadřuje ustálený stav palivového článku při různé zátěži. Měření probíhalo po ustálení pracovní teploty a při zapojené řídicí jednotce. Článek tak při zátěži 0 A nepracoval naprázdno, ale byl zatížen vlastní spotřebou. Skutečné napětí naprázdno by bylo tedy vyšší. Naměřená charakteristika zobrazuje reálný stav, protože při běžném provozu bude zařízení vnitřní spotřeby vchodu.

Při zatížení 50 A bylo napětí článku 23 V. Tato hodnota není teplotně stálá, neboť s rostoucí teplotou napětí mírně vzrůstá. Při malých proudech do 5 A napětí klesá strmě a při vyšších proudech napětí klesá pozvolna a téměř konstantně. Tuto část charakteristiky lze proložit přímkou a z jejího sklonu určit vnitřní dynamický odpor bez větší chyby podle vztahu:

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (3.1)$$

Vypočítaný vnitřní dynamický odpor činí  $0,31\Omega$ . Zatěžovací charakteristika, kterou udává výrobce je téměř shodná, pouze napětí při jednotlivých zátěžných proudech jsou vyšší, což může být způsobeno vlivem odlišné pracovní teploty článku při měření.



Obr.3.4: Zatěžovací charakteristika

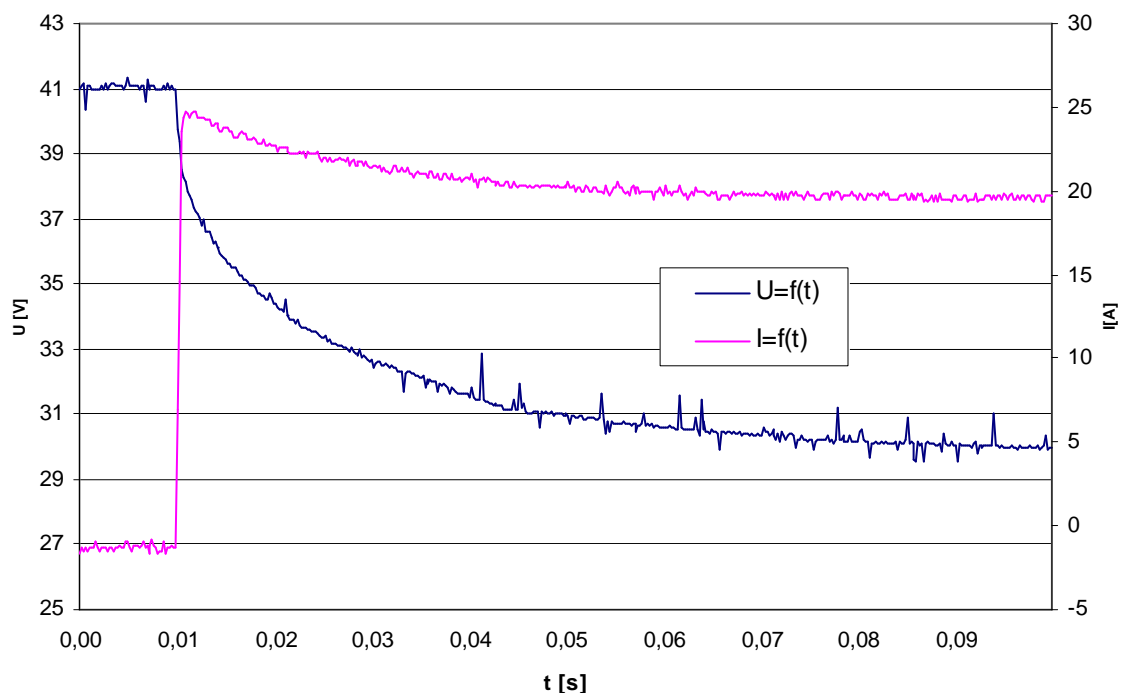
### 3.2.2 Dynamická charakteristika

Tato charakteristika je velmi důležitá pro získání představy o chování článku. Pomocí ní můžeme přibližně zjistit jak článek pracuje s odlišnými zátěžemi. To nám může velmi pomoci při zjišťování jak se článek bude chovat, pokud bude připojen na měnič, který odebírá pulsní proud.

Změny při skokové změně zátěže jsme měřili pomocí záznamového osciloskopu AGILENT 54622A. Na jeden kanál osciloskopu jsme přivedli napětí přes sondu 1:10 a na druhém kanále jsme pomocí proudové sondy snímali proud. Protože jsme měli k dispozici pouze sondu s maximálním proudem 20A, měřili jsme proud jen do této hodnoty. Odporovou zátěž jsme poté nastavili na příslušný proud a po té ji skokově připojili nebo odpojili k palivovému článku.

Jednotlivé závislosti při připojení a odpojení zátěže 20A jsou uvedeny v grafech 3.5 a 3.6. Při připojení zátěže proud vzrostl okamžitě zatímco napětí klesalo pozvolna. Pomalý pokles napětí článku je způsoben vnitřní kapacitou článku a počáteční vyšší proud je důsledkem vyššího napětí na článku v tomto okamžiku. Z průběhu napětí lze přibližně určit časovou konstantu nabíjení, která je zhruba 13ms.

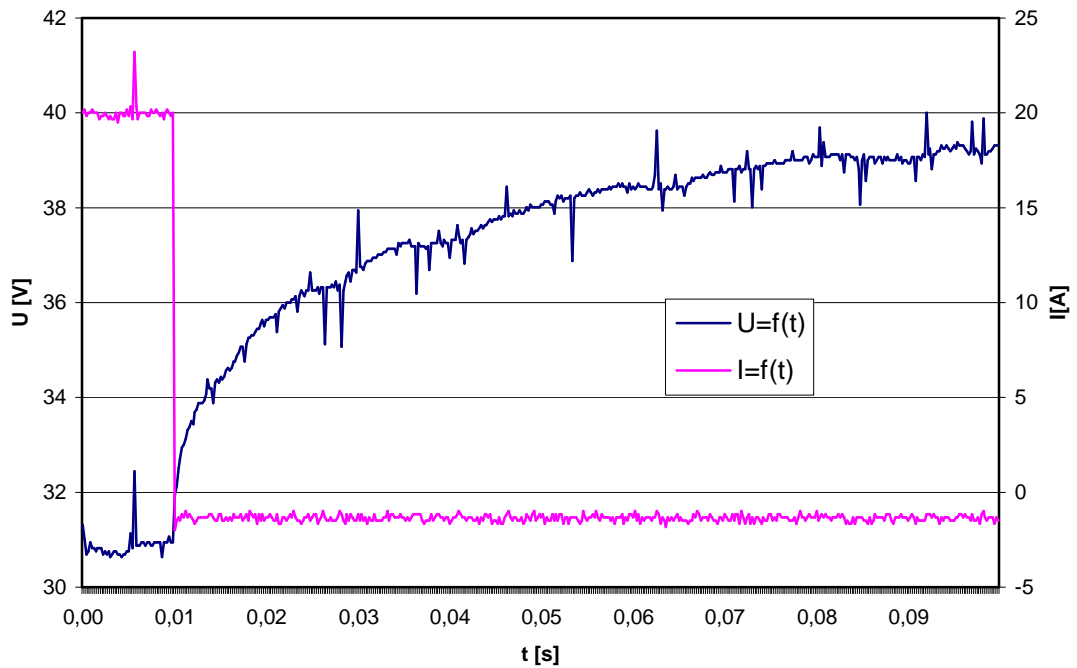
Zapnutí zátěže 20A



Obr.3.5: Odezva na skok zátěže - 0 -20A

Při odpojení zátěže proud opět klesne skokově. Napětí však roste pozvolněji než při připojení zátěže, což je způsobeno nabíjením vnitřní kapacity článku . Časová konstanta při nárůstu napětí zde činí přibližně 18 ms. Z toho plyne, že nabíjení je delší než doba při vybíjení. To je způsobeno vnitřní spotřebou článku.

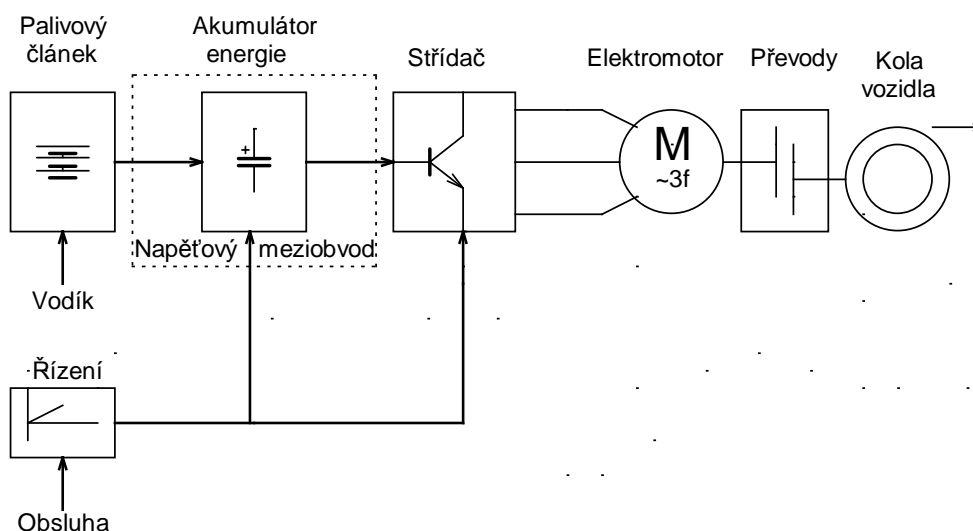
Vypnutí zátěže 20A



Obr.3.6: Odezva na skok zátěže - 20-0A

## 4 TRAKČNÍ POHON S PALIVOVÝM ČLÁNEM

Trakční pohon je soustava, která se skládá z vhodné kombinace jednotlivých zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie. Výstupem této soustavy je mechanický pohyb, přičemž vstupem jsou pokyny pro řízení pohonu od obsluhy. Pro pohon s palivovým článkem je tento článek zdrojem energie pohonu. Palivový článek je napájen vodíkem ze zásobníku a je tedy zcela nezávislý na vnějších sítích. Pohon se skládá z jednotlivých částí podle blokového schématu na obrázku 4.1.



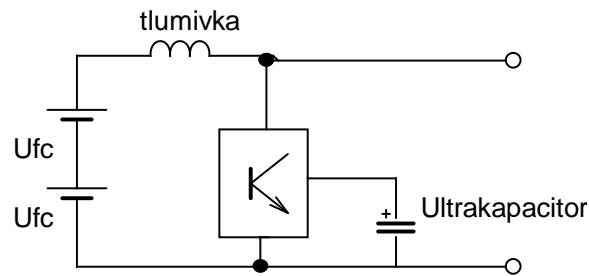
Obr.4.1: Trakční pohon s palivovým článkem

Zdrojem elektrické energie je palivový článek, který vozidlu poskytuje střední výkon. V napěťovém meziobvodu se akumuluje energie pro pokrytí špičkového výkonu při dynamických změnách rychlosti vozidla. Střídač dále přeměňuje stejnosměrný proud meziobvodu na střídavý trojfázový proud. Ke střídači je připojen elektromotor a hřídel elektromotoru je připojena k převodovce ve vozidle. Přes převodovku je motor připojen k hnacím kolům vozidla. Obsluha vozidla pouze zadává plynovým popřípadě brzdovým pedálem požadovanou rychlost, jinak celý pohon pracuje automaticky. Vlastní řízení pohonu ovládá řízení střídače a udržuje konstantní napětí meziobvodu.

### 4.1 Možnosti akumulace energie v meziobvodu

Pro elektrický pohon s palivovým článkem, který by byl použit ve elektromobilu, je vhodné použití společně s akumulátorem energie, který by ji v sobě akumuloval během rekuperace. Palivový článek přijímat energii neumí a při použití v elektromobilu je výkon palivových článků 2 x 1,2 kW malý. Současně akumulátor může zvýšit energii při rychlé akceleraci vozidla nebo při vyšších rychlostech. Napěťový meziobvod lze řešit několika možnostmi použitím akumulátoru, ultrakapacitoru nebo jejich kombinací.

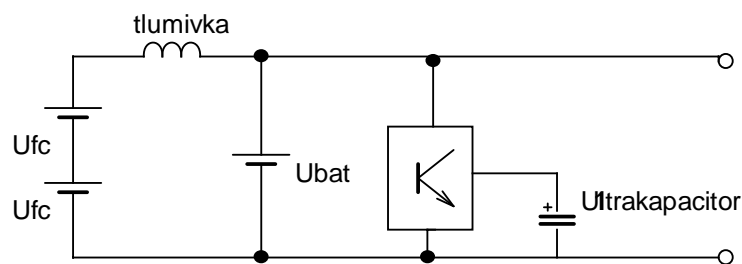
### 4.1.1 Meziobvod s ultrakapacitorem



Obr.4.2: Meziobvod s ultrakapacitorem

Použití samotného ultrakapacitoru bez akumulátoru má výhodu ve snížení hmotnosti, protože akumulátory jsou poměrně těžké. Ultrakapacitor musí být připojen přes dvoukvadrantový měnič, protože by na něm jinak vznikaly malé změny napětí a tím nemožnost vydávat nebo pohlcovat větší množství energie. Nevýhodou tohoto zapojení je snížení výkonu během vybití ultrakapacitoru, proto by toto řešení bylo vhodnější při vyšším jmenovitém výkonu palivového článku.

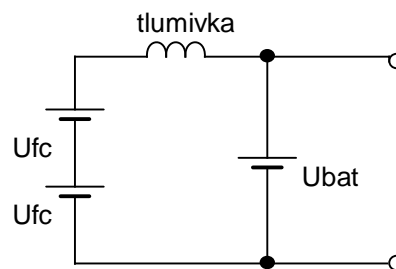
### 4.1.2 Meziobvod s ultrakapacitorem a akumulátorem



Obr.4.3: Meziobvod s ultrakapacitorem a akumulátorem

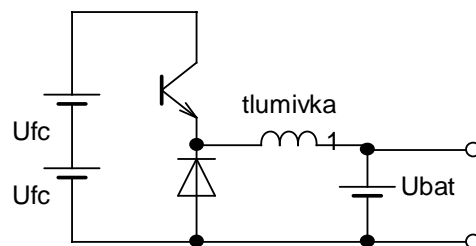
U tohoto způsobu řešení je ultrakapacitor připojený k meziobvodu přes měnič a akumulátor přímo do meziobvodu. Napětí akumulátorové baterie (při použití olověných akumulátorů) a palivových článků jsou téměř shodné proto není problém je připojit přímo. Výhodou tohoto zapojení je, že ultrakapacitor je schopen reagovat na rychlé změny (akcelerace/brždění) a pojmát nebo vydávat rychle energii oproti akumulátoru. Akumulátor tuto energii není schopen absorbovat a velká část energie se přemění na teplo na vnitřním odporu akumulátoru. Nevýhodou je zvýšení hmotnosti a složitější řízení.

### 4.1.3 Meziobvod s akumulátorem



Obr.4.4: Meziobvod s akumulátorem

U tohoto případu je palivový článek připojen k akumulátoru (obrázek 4.4). Nevýhodou jsou ztráty na akumulátoru a jejich životnost při vydávání nárazových energií. Použitím nových typů akumulátorů (Li-Ion, Li-Fe-Po), které jsou schopny dodat i velké proudy a mají malý vnitřní odpor, je tato možnost dostatečně vyhovující. Navíc tyto akumulátory mají velice dobrou měrnou energii (W/kg), což je pro použití v elektromobilu zvláště důležité. Toto řešení bylo nakonec zvoleno pro použití v elektromobilu. Byly použity moderní akumulátory typu Li-Fe-Po. Protože však baterie nemá stejnou napěťovou hladinu jako palivové články je palivový článek připojen přes snižující měnič podle obrázku 4.5. Palivový článek tak dodává střední výkon pro jízdu a akumulátor je schopen reagovat na dynamické změny vozidla dodáním velkého proudu.



Obr.4.5: Meziobvod s akumulátorem připojeným přes snižující měnič

## 4.2 Akumulátor

Akumulátor v elektromobilu je používán jako kondenzátor, který je v krátkých časových intervalech nabíjen a vybíjen při režimu častých rozjezdů a brždění. Nevýhodou některých typů akumulátorů je efektivní akumulace energie při náhlém přechodu pohonu z motorického do generátorického režimu (např. u olověných baterií). Vlivem špatné dynamiky vnitřních elektrochemických procesů se při náhlé změně směru proudu, přestože je baterie nabíjena, její energie po krátkou dobu klesá.

Dalším hlediskem pro použití akumulátoru v pohonu je nízký vnitřní odpor, který vypovídá o schopnosti akumulátoru dodávat vysoké proudy. Dnes jsou již dostupné baterie s měrným výkonem (W/kg), který je srovnatelný s ultrakapacitami, ale pořád platí u všech akumulátorů, že maximální nabíjecí proud je nižší než dovolený proud vybíjecí.

Důležitým faktorem u akumulátorů je také požadavek na velkou životnost v počtu cyklů.

### Typy baterií a jejich základní vlastnosti pro použití v pohonu elektromobilu:

**Olověné baterie** – jsou cenově nejvýhodnější, nevýhodou je vysoká hmotnost a nízká životnost okolo 500 cyklů. Při vybití vzniká problém sulfatace, který snižuje kapacitu baterie.

**Akumulátory Ni-Cd** – mají velký počet cyklů a trvanlivost. U akumulátorů s kapalným elektrolytem KOH tento elektrolyt reaguje s oxidem uhličitým ve vzduchu a to způsobuje samovybíjení. Elektrolyt se dá vyměnit a tím prodloužit životnost (až 3000 cyklů), ale nevýhodou zůstává toxický obsah a nízká proudová zatížitelnost. U uzavřených akumulátorů Ni-Cd je proudová zatížitelnost vyšší a výhodou je libovolná pracovní poloha. Obecně je u těchto akumulátorů překážkou velká hmotnost.

**Akumulátory Ni-Mh** – jsou značně lehčí než Ni-Cd, ale jejich proudová zatížitelnost a životnost je horší. V současné době jsou upřednostňovány i v případě vozidel s hybridním pohonem, protože nejsou toxické.

**Akumulátory Li-Ion** – oproti předchozím typům mají několikrát vyšší měrnou energii. Mají však nízkou životnost a vysoký vnitřní odpor a tím i malé vybíjecí proudy.

**Akumulátory Li-Pol** – ve srovnání s Li-Ion mají řádově vyšší proudová zatížitelnost a životnost. V současnosti se začínají používat jako přídavné zásobníky energie pro zvýšení dojezdu vozidel s hybridním pohonem. Jejich velkou nevýhodou je vysoká cena a nebezpečí požáru při nesprávném zacházení.

**Akumulátory Li-Fe-Po** – akumulátor na bázi Li-Ion, který má desetkrát nižší vnitřní odpor. Díky tomu má vyšší maximální vybíjecí i nabíjecí proud. To je dosaženo použitím speciálního nanofosfátu. Oproti Li-Ion akumulátorům mají několikanásobně větší životnost a vyšší hmotnost.

Pro elektromobil s palivovým článkem byl vybrán typ s nanofosfátovou technologií Li-Fe-Po akumulátor. Výrobce použitých akumulátorů je firma A123 Systems, který vyrábí tyto akumulátory ve formě samostatných článků typu 26650 o průměru 26 mm a délce 65 mm.

Trakční baterie je realizována sérioparalelním řazením jednotlivých článků. Vždy je 9 článků paralelně a ty jsou potom 13krát v sérii. Celkem je použito 117 článků. Celá baterie má kapacitu 20,7 Ah o jmenovitém napětí 42,9 V. Při vybíjecím proudu 360A baterie dává napětí 35V.



Obr.:4.6 Článek Li-Fe-Po

### 4.3 Elektromotor

Motor pro elektromobil musí být navrhnout na jmenovité napětí a na jmenovitý výkon. Nejvhodnějším se jeví synchronní motor s permanentními magnety, který má nejlepší účinnost. Vzhledem k jednoduchosti a ceně byl zvolen asynchronní motor. Tento motor bude převeden ze síťového napětí na novou nižší napěťovou hladinu, která odpovídá střídači elektromobilu. Pro potřeby modelování pohonu v Matlab-Simulinku jsem přepočítal parametry známého motoru na nové. Přepočet je uveden u modelu asynchronního stroje.

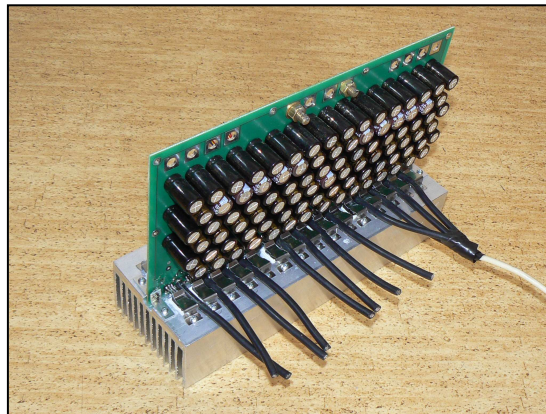
## 4.4 Střídač

Z důvodu malého středního výkonu palivových článků je zapotřebí snížit ztráty v celém pohonu na nezbytné minimum, proto je i silová část měniče konstruována tak, aby co nejlépe splňovala tyto zásadní požadavky.

Základním prvkem trakčního měniče jsou MOS-FET tranzistory IRFB4110, které vynikají malým  $R_{DS(on)}$  při velkém spínacím proudu. Jednotlivé parametry střídače jsou uvedeny v následující tabulce.

Max. hodnota fázového proudu	$I_{f, max}$	340A
Efektivní hodnota proudu tekoucího tranzistorem	$I_{T, ef}$	162A
Efektivní hodnota proudu tekoucího diodou	$I_{D, ef}$	49A
Ztrátový výkon na tranzistoru	$P_{T, ztr}$	24W
Ztrátový výkon na diodě	$P_{D, ztr}$	2W
Přepínací ztráty	$P_{př}$	53W
Celkové ztráty	$P_z$	209W
Účinnost střídače	$\eta$	97,82

Tabulka 4.1: Parametry střídače

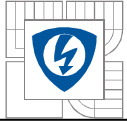


Obr.:4.7 Trakční měnič

## 4.5 Dimenzování pohonu

Pro účely modelování a určení zátěže, která působí na vozidlo během jízdy, musíme znát jednotlivé koeficienty karoserie vozidla. Pro určení převodových konstant z působíště sil (kola vozidla) na hřídel motoru potřebujeme znát:

$i$	0,1	převod převodovky ve vozidle
$r$	0,25 m	poloměr kola vozidla



Výsledná síla potřebná pro udržení konstantní rychlosti se u každého vozidla skládá z několika částí. První dílčí silou je síla pro překonání suchého tření a valivého tření pneumatik  $F_f$ . Tato síla je nezávislá na rychlosti a určí se jako

$$F_F = \xi m g . \quad (4.1)$$

Další síla  $F_v$  překonává viskosní tření, vyskytující se v kapalinách (olej v převodovce). U viskosního tření je třecí síla úměrná první mocnině rychlosti a vyjádříme ji jako

$$F_V = k_v v(t) \quad (4.2)$$

Poslední významná část pochází od překonávání aerodynamického odporu vzduchu. Ten je úměrný druhé mocnině rychlosti a lze tak příslušnou sílu vyjádřit jako

$$F_A = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2(t) \quad (4.3)$$

kde  $S$  je plocha kolmého průmětu čelní plochy vozidla,  $C_x$  je bezrozměrný koeficient aerodynamického odporu, který závisí na celkovém tvaru vozidla,  $\rho$  je hustota vzduchu.

Jednotlivé koeficienty pro zjištění působících sil jsou:

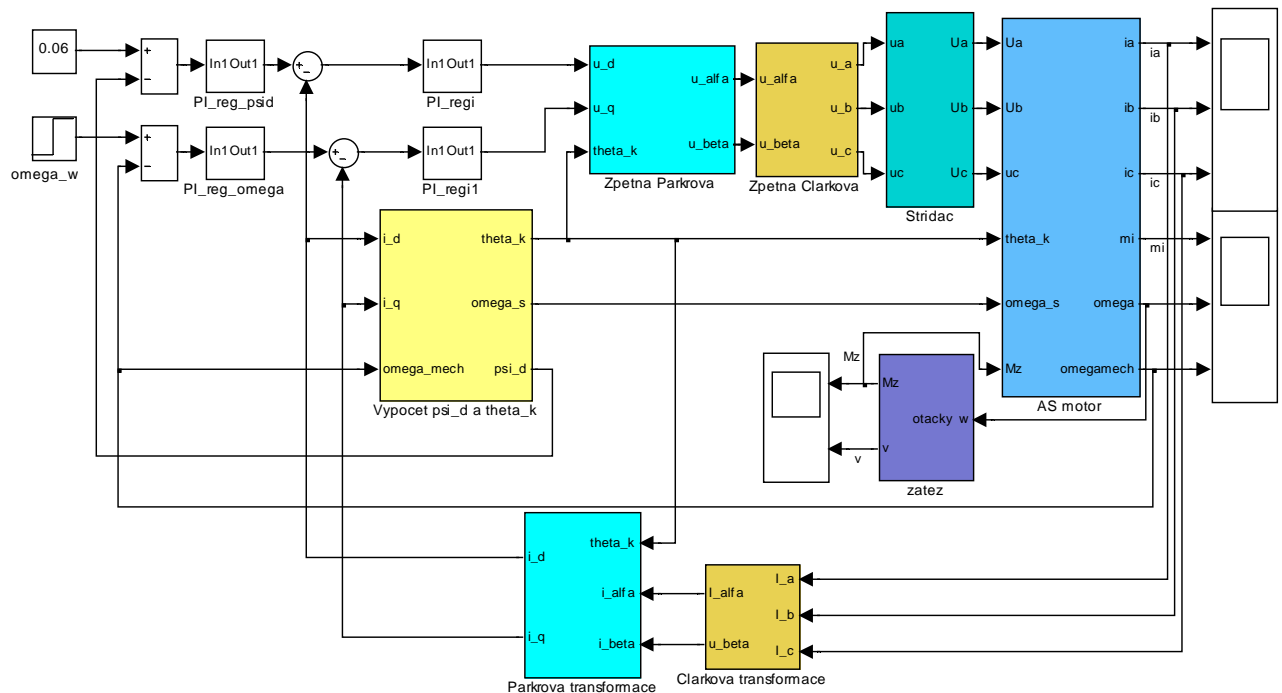
$m$	500 kg	maximální hmotnost vozidla i s obsluhou
$Q$	1,9 m <sup>2</sup>	plocha kolmého průmětu čelní plochy vozidla
$C_v$	0,4	koeficient aerodynamického odporu
$\xi$	0,02	koeficient valivého odporu pneumatik
$k_v$	0,1	koeficient viskosního tření
$\rho$	1,2 kg/m <sup>3</sup>	hustota vzduchu
$v_{max}$	19,5 m/s	maximální předpokládaná rychlost vozidla (70 km/h)

Výpočet převodových konstant a sil působících na vozidlo jsou uvedeny u modelu zátěže v kap. 5.5.

## 5 MODEL POHONU V MATLAB – SIMULINKU

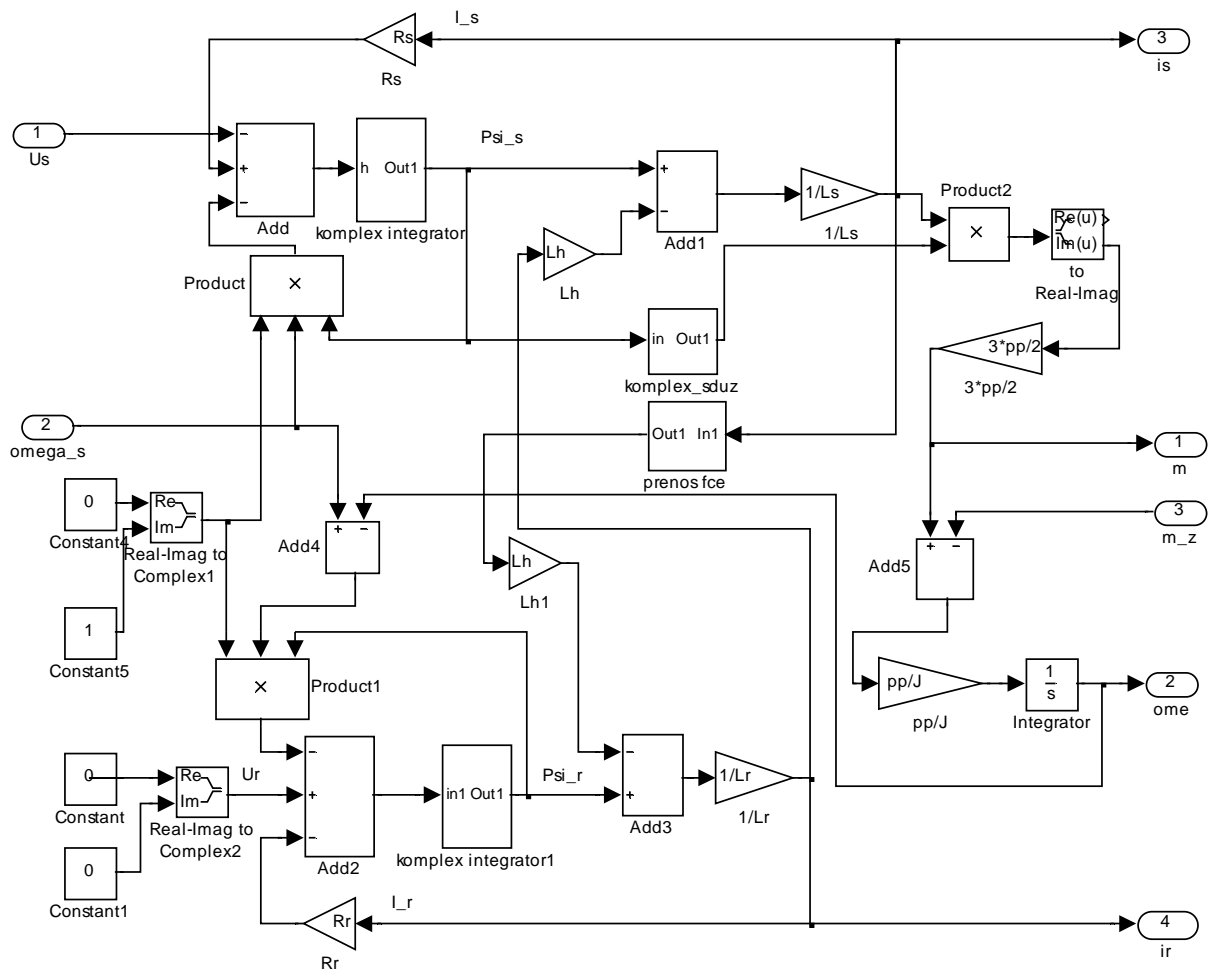
### 5.1 Celkový model

V prostředí Matlab – Simulink bylo mým cílem vytvořit model elektrického pohonu vozidla a nasimulovat rozjezd elektromobilu. Pohon obsahuje asynchronní motor s kotvou nakrátko a je napájen z trojfázového střídače. Střídač je řízen sinusovou pulsně šířkovou modulací. Zátěží jsou všechny síly působící na vozidlo během jízdy. Vstupem do bloku zátěže jsou otáčky motoru. Model obsahuje blok, který upravuje nízkofrekvenční modulační signál pro zvětšení velikosti první harmonické výstupního napětí střídače. Řízení pohonu je vektorově orientované s konstantním tokem rotoru a obsahuje podřízenou proudovou smyčku. Pro potřeby řízení jsou na výstupu motoru snímány skutečné otáčky motoru a do proudové regulační smyčky skutečné proudy statoru. Řízení obsahuje výpočetní blok, pomocí něhož získáme skutečnou hodnotu rotorového toku  $\psi_r$  a úhel natočení  $\vartheta_K$ .



Obr.5.1 Celkový model pohonu

## 5.2 Model asynchronního motoru



Obr.5.2 Model asynchronního motoru

Při popisu vlastností asynchronního stroje se vychází z matematického modelu střídavého stroje v d-q souřadnicích. U tohoto motoru je vhodné definovat prostorové vektory v systému rotujícím rychlostí točivého magnetického pole  $\omega_s = \omega_K$ . Elektromagnetické a elektromechanické děje popisují rovnice pomocí kterých je model realizován.

Napěťové rovnice :

$$U_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j \cdot \omega_s \bar{\psi}_s, \quad (5.1)$$

$$U_R = R_R \bar{I}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j \cdot (\omega_s - \omega_{mech}) \bar{\psi}_R. \quad (5.2)$$

Spřažené magnetické toky:

$$\bar{\psi}_s = L_s \bar{I}_s + L_h \bar{I}_r, \quad (5.3)$$

$$\bar{\psi}_R = L_R \bar{I}_R + L_h \bar{I}_s. \quad (5.4)$$

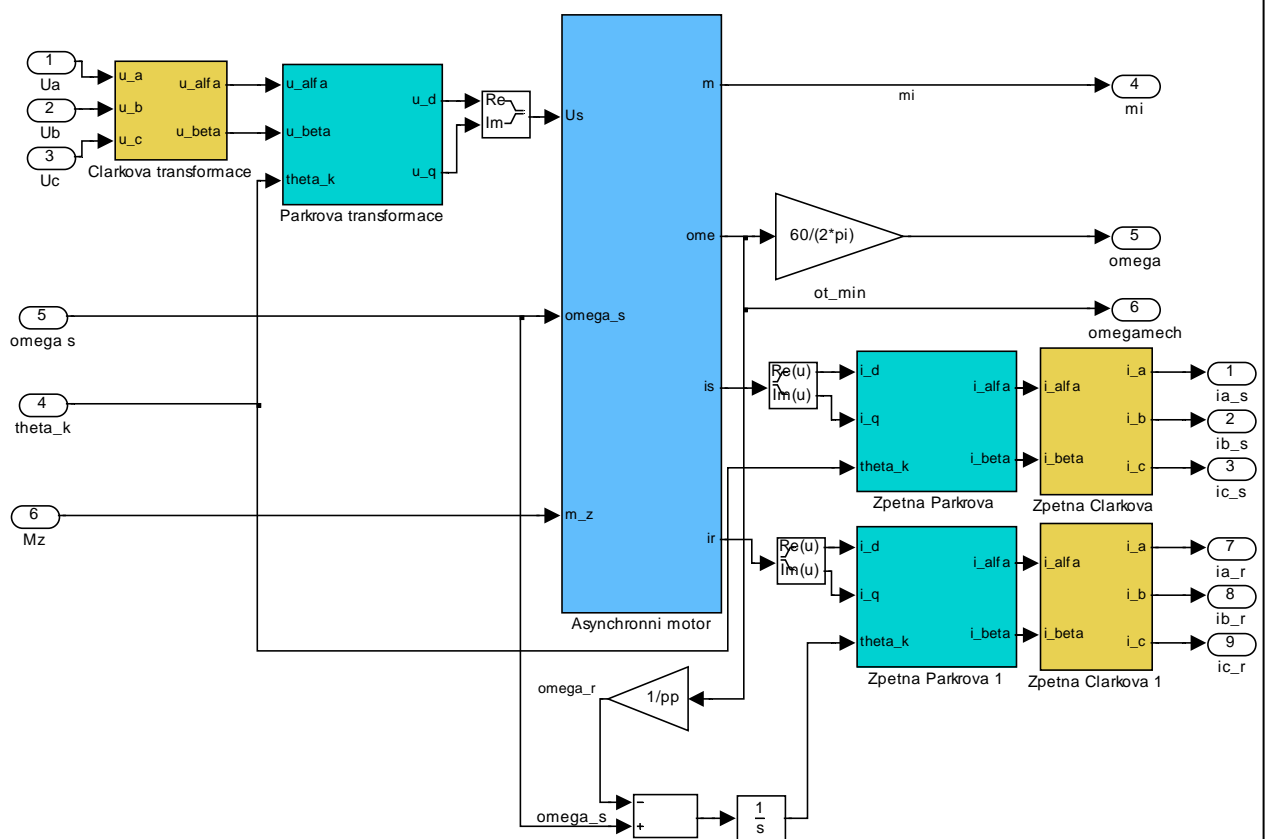
Moment motoru:

$$M_i = \frac{3}{2} p_p \cdot \text{Im}[\bar{\psi}_s \cdot \bar{I}_s], \quad (5.5)$$

Dynamický moment motoru:

$$M_i - M_z = \frac{J}{p_p} \cdot \frac{d\omega_{mech}}{dt}. \quad (5.6)$$

Pro asynchronní motor s kotvou nakrátko, který napájíme z napěťového zdroje o proměnné frekvenci, platí  $U_R = 0$

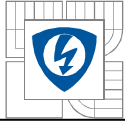


Obr.5.3 Celkový třífázový model asynchronního stroje

Pro použití modelu ve třífázové soustavě je potřeba model asynchronního stroje, který je v d-q osách upravit tak, aby se mohl připojit na výstup frekvenčního měniče. Jednotlivé vstupní napětí  $U_A$ ,  $U_B$  a  $U_C$  se vhodně přetransformují nejdříve na dvojfázovou soustavu  $\alpha$ ,  $\beta$  a poté do d-q souřadnic. Nejdříve se provede Clarkova transformace, která třífázovou soustavu napětí přetransformuje do dvojfázové soustavy  $\alpha$ ,  $\beta$ . Jednotlivé složky potom jsou:

$$U_\alpha = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot U_A - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_B - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_C, \quad (5.7)$$

$$U_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_B - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_C. \quad (5.8)$$



Tímto krokem jsme získali náhradu za trojfázovou síť ekvivalentní dvojfázový systém, jehož složky jsou na sebe kolmé. Pro složky při transformaci ze stojícího do rotujícího souřadnicového systému při znalosti úhlové rychlosti  $\omega_K$  použijeme tzv. Parkovu transformaci a dostaneme:

$$U_d = U_\alpha \cdot \cos \vartheta_K + U_\beta \cdot \sin \vartheta_K, \quad (5.9)$$

$$U_q = U_\alpha \cdot \sin \vartheta_K + U_\beta \cdot \cos \vartheta_K. \quad (5.10)$$

Pro zjištění okamžitých proudů při znalosti prostorového vektoru proudu nebo jeho složek provedeme zpětné transformace. Pro transformaci z rotujících do stojících statorových souřadnic použijeme zpětnou Parkovu transformaci:

$$I_\alpha = I_d \cdot \cos \vartheta_K - I_q \cdot \sin \vartheta_K, \quad (5.11)$$

$$I_\beta = I_d \cdot \sin \vartheta_K + I_q \cdot \cos \vartheta_K. \quad (5.12)$$

Při transformaci z dvojfázové do třífázové soustavy uplatníme zpětnou Clarkovu transformaci, která se vypočítá:

$$I_A = I_\alpha, \quad (5.13)$$

$$I_B = -\frac{1}{2} I_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta, \quad (5.14)$$

$$I_C = -\frac{1}{2} I_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta. \quad (5.15)$$

Protože neznáme parametry motoru, který bude ve vozidle použit, jsme nuceni z již známých parametrů motoru přepočítat parametry. Pomocí konstanty přepočteme odpory a indukčnosti motoru. Máme k dispozici motor o výkonu 2,7 kW, který je napájen efektivním napětím  $U_{n1ef} = 220$  V. Konstantu určíme, tak že známe napětí meziobvodu, které je 40V. Potom efektivní fázové napětí ze střídače bude

$$U_{n2ef} = \frac{U_d}{\sqrt{3}\sqrt{2}} = \frac{U_d}{\sqrt{6}} = 16,34V \quad (5.16)$$

a konstanta pak

$$K_M = \frac{U_{n2ef}}{U_{n1ef}} = \frac{16,34}{220} = 0,074. \quad (5.17)$$

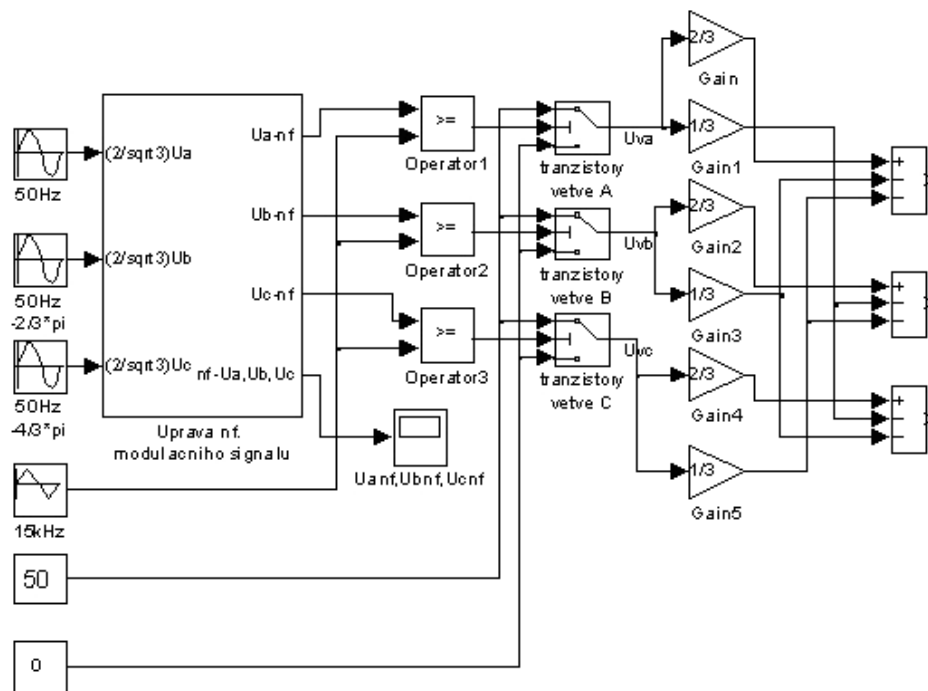
Všechny indukčnosti a odpory jsme následně vynásobili touto konstantou na druhou a tím dostali nové parametry již přepočítaného motoru. Konstanta je potom

$$K_M^2 = 0,088^2 = 0,0055. \quad (5.18)$$

Veličina	Parametry motoru	Nové parametry motoru
$R_r$ [ $\Omega$ ]	2,51	0,013805
$R_s$ [ $\Omega$ ]	2,1	0,01155
$L_h$ [H]	0,129	0,0007095
$L_s$ [H]	0,008	0,000044
$L_r$ [H]	0,008	0,000044
$J$	0,013	0,013
$p_p$	2	2

Tab.5.1: Parametry motoru

### 5.3 Model střídače



Obr.5.4: Model střídače

Na tomto obrázku je blokové schéma třífázového střídače. Jednotlivé větve střídače zde představují tři přepínače. Jejich vstupy jsou napětí meziobvodu  $U_a$  a nula. Přepínání je řízeno výstupem z komparátoru, který vytváří sinusovou PWM modulaci. Komparátory porovnávají mezi sebou vysokofrekvenční nosnou složku, která má velikost 15 kHz a nízkofrekvenční sinusový signál. Tyto tři nízkofrekvenční signály jsou vzájemně posunuty o 120 stupňů.

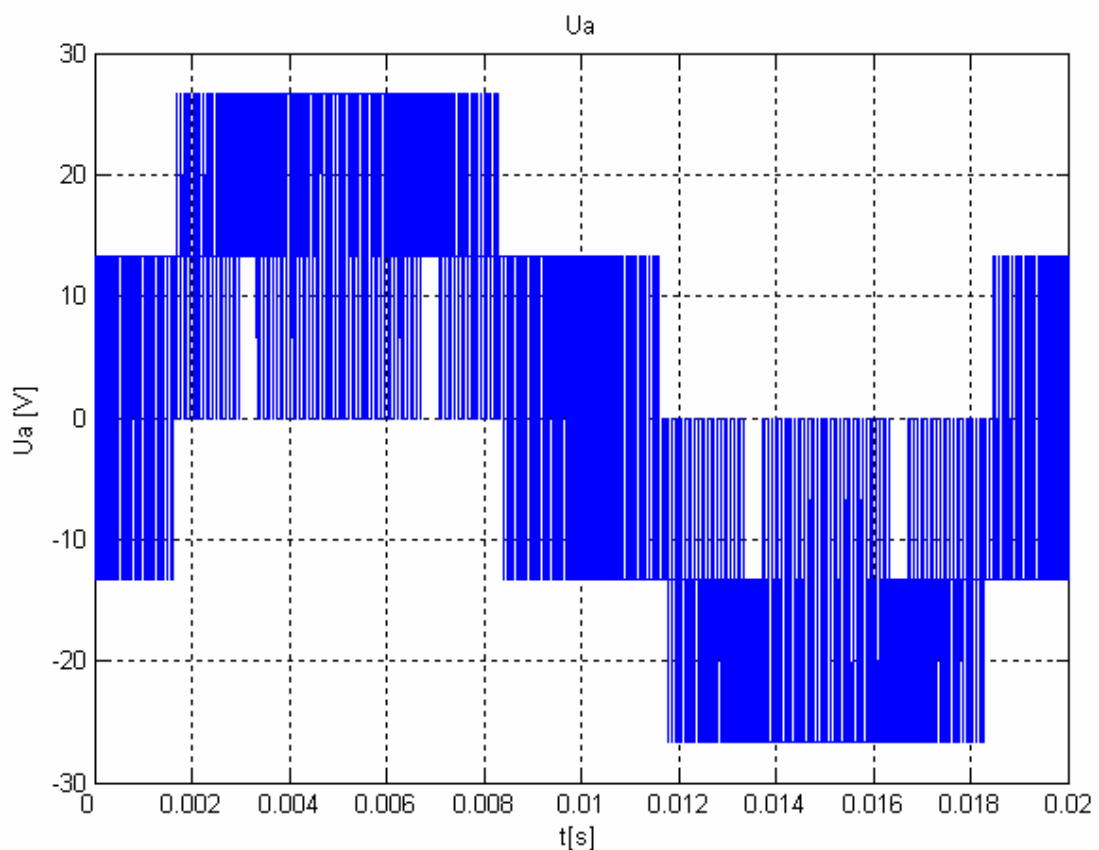
Výstupem jednotlivých přepínačů jsou větвовá napětí  $U_{va}(t)$ ,  $U_{vb}(t)$  a  $U_{vc}(t)$ . Z těchto větवových napětí jsou následně získána fázová napětí pro napájení motoru. Tyto fázová napětí z napětí větवových  $U_{va}(t)$ ,  $U_{vb}(t)$ ,  $U_{vc}(t)$  jsou realizována pomocí následujících rovnic:

$$U_A(t) = \frac{2}{3} \cdot U_{va}(t) - \frac{1}{3} \cdot U_{vb}(t) - \frac{1}{3} \cdot U_{vc}(t) \quad (5.19)$$

$$U_B(t) = \frac{2}{3} \cdot U_{vb}(t) - \frac{1}{3} \cdot U_{va}(t) - \frac{1}{3} \cdot U_{vc}(t) \quad (5.20)$$

$$U_C(t) = \frac{2}{3} \cdot U_{vc}(t) - \frac{1}{3} \cdot U_{va}(t) - \frac{1}{3} \cdot U_{vb}(t) \quad (5.21)$$

Na obrázku 5.5 je znázorněno výstupní fázové napětí  $U_A$  při frekvenci nízkofrekvenčního signálu 50 Hz a napětí meziobvodu 40V.



Obr.5.5: Průběh fázového napětí  $U_A$

## 5.4 Úprava nízkofrekvenčního modulačního signálu

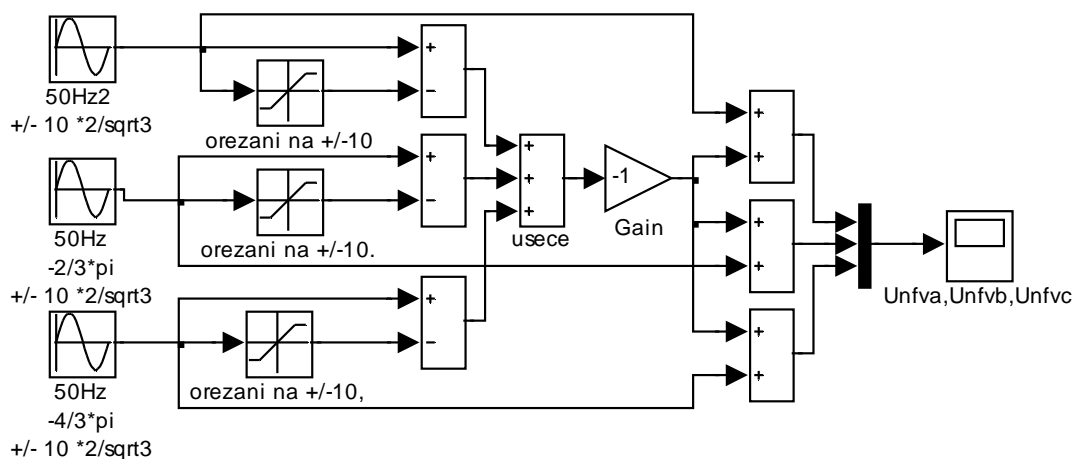
Pro dosažení maximální první harmonické výstupního napětí je nízkofrekvenční signál upraven. Trojfázový střídač má maximální velikost amplitudy 1. harmonické fázového napětí (když se dotýká vrchol sinusoidy špiček vysokofrekvenčního trojúhelníku) stejně velkou jako je maximální amplituda větrového napětí

$$U_{A1\max} = U_{VA1\max} = \frac{U_d}{2}. \quad (5.22)$$

Protože ve trojfázovém systému je sdružené napětí  $\sqrt{3}$ -krát větší než fázové, tedy maximální možná amplituda 1. harmonické sdruženého napětí musí mít velikost

$$U_{AB1\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_d = 0,866 U_d. \quad (5.23)$$

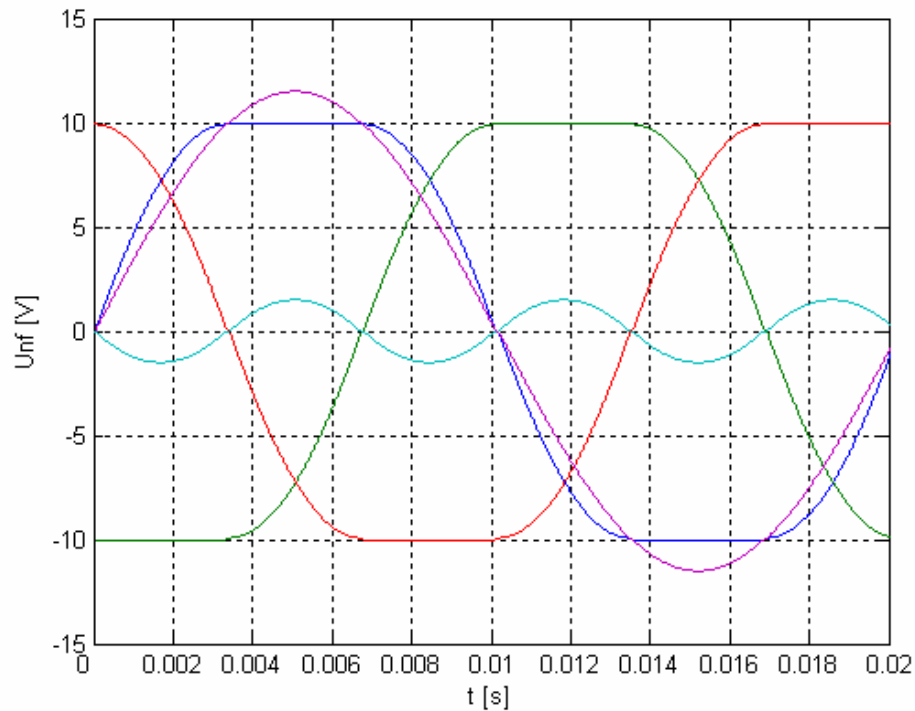
Amplituda je asi o 14% menší a to je nevýhodné. Následujícím způsobem je tato nevýhoda odstraněna.



Obr.5.6: Úprava nf signálu

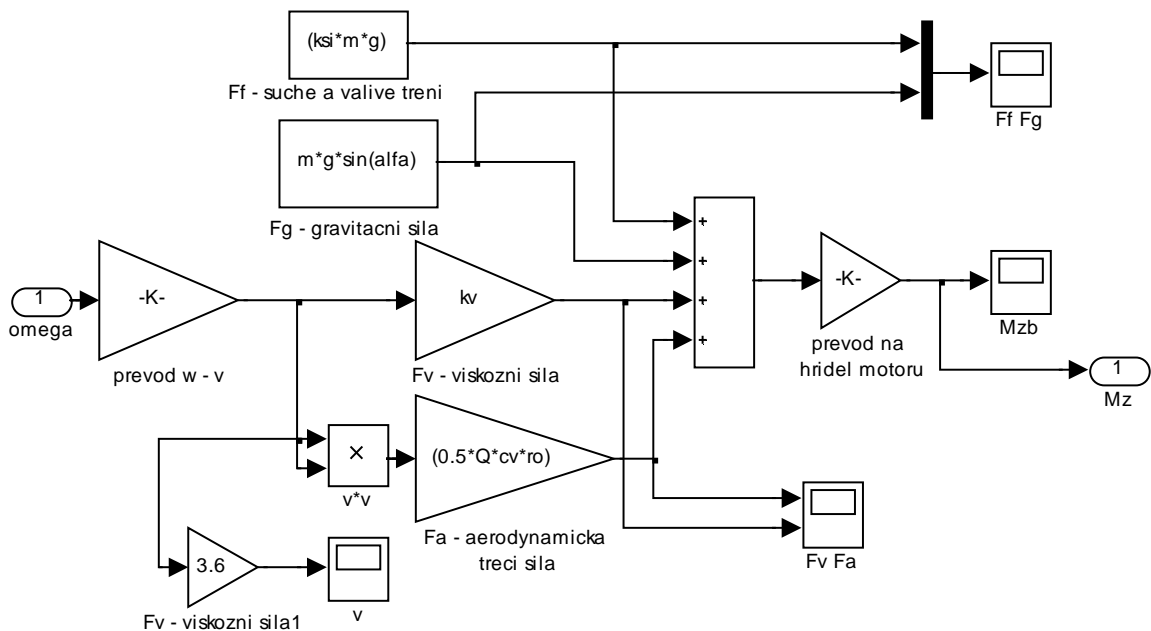
Původní sinusový signál je zvětšen v poměru  $2/\sqrt{3}$ . Přechývajíc částí sinusoidy (nad vrcholy trojúhelníku  $\pm 10V$ ) mají šířku 60 stupňů. Tuto vzniklou sinusovou úseč doplníme k dalším úsečím z následujících dvou signálů. Tento periodický signál, který má význam vychylovacího napětí, přičteme k původní zvětšené sinusoidě. Výsledný signál obsahuje ploché 60-ti stupňové úseky na svých vrcholech. Tyto křivky potom přivedeme na vstupy tří komparátorů. Po této úpravě bude amplituda první harmonické fázového napětí při napětí meziobvodu  $U_d = 40 V$  velikost

$$U_{A1\max} = U_{VA1\max} = \frac{U_d}{\sqrt{3}} = \frac{50}{\sqrt{3}} = 23,09V. \quad (5.24)$$



Obr.5.7: Graf-upravený nf signál

## 5.5 Model zátěže



Obr.5.8: Model zátěže

Zátěžný moment u vozidla se skládá ze čtyř sil působících na vozidlo během jízdy. První silou je suché tření a valivé tření pneumatik  $F_f$ . Souhrnná třecí síla  $F_f$  je konstantní a nezávislá na rychlosti. Dále je nutno uvažovat viskosní tření  $F_v$ , vyskytující se v kapalinách. U viskosního tření je třecí síla úměrná první mocnině rychlosti. Rovněž je nutno uvažovat aerodynamický odpor vzduchu  $F_a$ , úměrný druhé mocnině rychlosti.



Gravitační síla  $F_g$  nám vyjadřuje sílu která působí na vozidlo během jízdy a je závislá na sklonu povrchu  $\alpha$ .

$F_f$  – suché a valivé tření při hmotnosti vozidla  $m = 500\text{kg}$ :

$$F_f = \xi m g = 0,02 \cdot 500 \cdot 9,81 = 98,1\text{N} . \quad (5.25)$$

$F_g$  – gravitační síla:

$$F_g = mg \sin \alpha = 500 \cdot \sin \alpha . \quad (5.26)$$

$F_v$  – viskózní síla:

$$F_v = k_v v(t) = 0,1v(t) . \quad (5.27)$$

$F_a$  – aerodynamická síla:

$$F_A = \frac{1}{2} c_v \rho Q v^2(t) . \quad (5.28)$$

Tyto síly jsou realizovány pomocí jednotlivých bloků. U aerodynamické a viskózní síly je na vstup přivedena přes převodovou konstantu  $K_1$ , která určuje poměr mezi otáčkami na hřídeli motoru a rychlostí vozidla, rychlost vozidla. Vozidlo obsahuje pevnou převodovku s převodem  $i = 0,1$  a poloměr kola  $r = 0,25$  m.

Převodová konstanta  $K_1$  je

$$K_1 = i \cdot o_{kola} = i \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = 0,157 . \quad (5.29)$$

Jednotlivé síly jsou potom sečteny a přivedeny přes konstantu  $K_2$ , která znázorňuje převod z působíště sil (obvod kola) na hřídel motoru. Převodová konstanta  $K_2$  je

$$K_2 = i \cdot r = 0,1 \cdot 0,25 = 0,025 . \quad (5.30)$$

To nám dá výsledný zátěžný moment , který působí na vozidlo během jízdy. Výsledný moment, který vytváří motor je

$$M_{im} = Jm \frac{d\omega(t)}{dt} + M_z , \quad (5.31)$$

kde  $M_z$  je

$$M_z = F_f \cdot r + F_A \cdot r + F_v \cdot r + F_g \cdot r , \quad (5.32)$$

přičemž  $r$  nám v tomto případě vyjadřuje poloměr kola vozidla. Protože vozidlo obsahuje ještě navíc pevnou převodovku, musíme  $M_z$  ještě vynásobit tímto převodem. Dále je nutno ještě k momentu setrvačnosti motoru připočítat redukováný moment setrvačnosti vozidla  $J_i$ , který činí

$$J_i = m \cdot K_2^2 = 500 \cdot (0,1 \cdot 0,25)^2 = 0,3125 . \quad (5.33)$$

Následně moment motoru bude

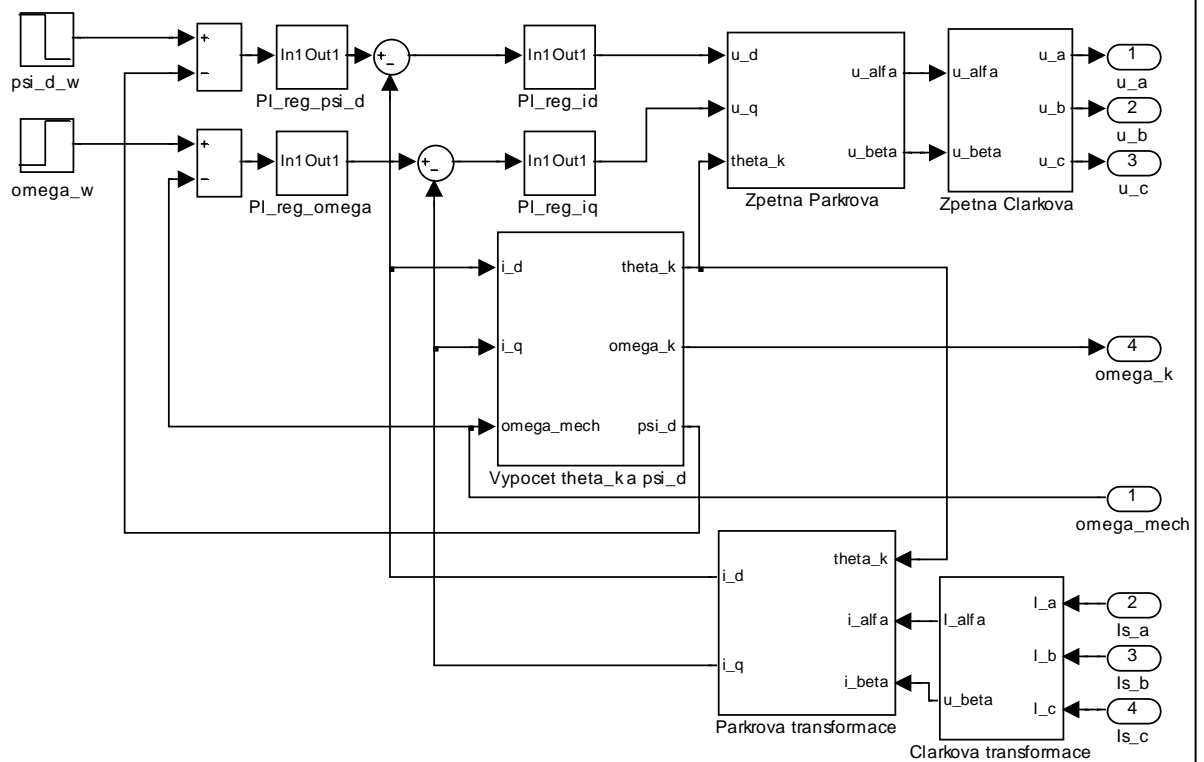
$$M_i = (J + J_i) \frac{d\omega(t)}{dt} + (F_f \cdot r + F_A \cdot r + F_v \cdot r) i , \quad (5.34)$$

když  $K_2 = r \cdot i$  tak po úpravě

$$M_i = (J + J_i) \frac{d\omega(t)}{dt} + (F_f + F_A + F_v) K_2 . \quad (5.35)$$

## 5.6 Vektorově orientované řízení

Vektorové řízení asynchronních motorů vychází z modelu popisujícího jak elektromagnetické, tak elektromechanické jevy ve stroji. Díky tomuto modelu lze efektivně řídit okamžité hodnoty toků a proudů ve stroji. Prostorové vektory veličin v modelu stroje jsou dále transformovány pomocí Clarkovy a Parkovy transformace do/z souřadného systému svázaného s prostorovým vektorem spřaženého rotorového nebo statorového magnetického toku. V řídicí struktuře se v ustáleném stavu jeví zadávané hodnoty jako stejnosměrné. Na asynchronní pohon s vektorovým řízením pak lze pohlížet jako na stejnosměrný pohon s cizím buzením, kde lze řídit nezávisle tok motorem a jeho moment. Pro model pohonu elektromobilu je použito vektorově orientované řízení na konstantní rotorový tok. Obsahuje podřízenou proudovou smyčku a řídí se zadáváním požadovaných otáček na vstup regulátoru otáček. Všechny regulátory jsou typu PI.



Obr.5.9: Vektorové řízení

Na obrázku 5.9 je struktura vektorového řízení. Pomocí transformací převedeme statorové proudy z asynchronního motoru do  $d, q$  systému jako  $I_d, I_q$  v souřadnicovém systému vázaném na stator a ty jsou dále přivedeny na vstup podřízené proudové smyčky jako skutečné veličiny. Žádaná hodnota proudu  $I_{dw}$  je výstupem regulátoru rotorového toku a žádaná hodnota proudu  $I_{qw}$  je výstupem regulátoru rychlosti. Výstupem proudových regulátorů jsou napětí  $u_d$  a  $u_q$ , které následně převedeme nejdříve do stojícího souřadnicového systému a následně vypočteme okamžité hodnoty  $u_a, u_b$  a  $u_c$ . Tyto hodnoty potom přivedeme na vstup modulátoru střídače, který je těmito signály řízen.

Pro regulátor otáček na vstup zadáváme žádané otáčky. Skutečná hodnota otáček je přivedena z výstupu motoru jako  $\omega_{mech}$ . Spolu s regulací otáček je zde regulátor pro tok rotoru. Položením prostorového vektoru rotorového toku  $\psi_R$  do reálné osy souřadnicového systému rotujícího rychlostí  $\omega_k$  platí, že  $\psi_r = \psi_d$ . Protože neznáme skutečnou hodnotu tohoto toku, použijeme výpočetní blok, kterým tuto hodnotu za určitých předpokladů získáme. V tomto bloku kromě výpočtu amplitudy  $\psi_d$  rovněž získáme hodnotu úhlu natočení  $\vartheta_k$  ve statorových souřadnicích, kterou potřebujeme pro vstup do Parkových transformací.

Pro tok rotoru platí

$$\frac{d\bar{\psi}_r}{dt} = R_r + \frac{L_h}{L_r} \bar{i}_s - R_r \cdot \frac{1}{L_r} \bar{\psi}_r - j\omega_r \bar{\psi}_r, \quad (5.36)$$

přičemž složka  $\psi_d$  je

$$\frac{d\psi_{r-d}}{dt} = R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} i_{s-d} - R_r \cdot \frac{1}{L_r} \psi_{r-d} + \omega_r \psi_{r-q} \quad (5.37)$$

a složka  $\psi_q$

$$\frac{d\psi_{r-q}}{dt} = R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} i_{s-q} - R_r \cdot \frac{1}{L_r} \psi_{r-q} - \omega_r \psi_{r-d}. \quad (5.38)$$

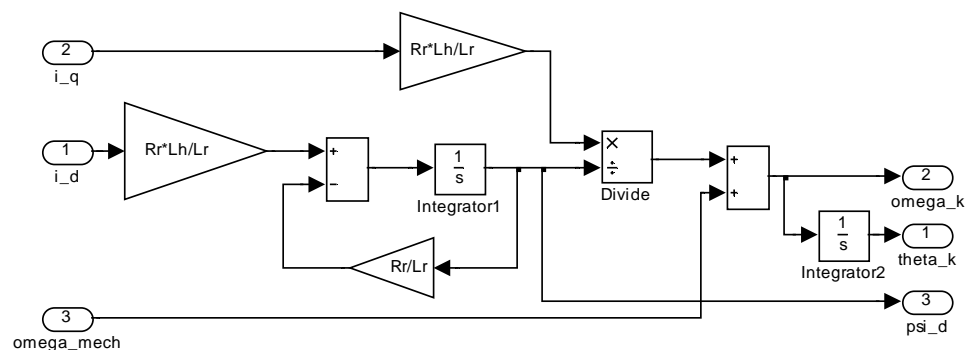
Pro výpočet  $\psi_d$  předpokládáme, že složka  $\psi_q = 0$ . Potom úpravou rovnice 5.37 pro složku rotorového toku  $\psi_d$  dostaneme

$$\frac{d\psi_{r-d}}{dt} = R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} i_{s-d} - R_r \cdot \frac{1}{L_r} \psi_{r-d} \quad (5.39)$$

a úpravou rovnice 5.38 pro složku  $\psi_q$  získáme kmitočet  $\omega_r$

$$\omega_r = R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot \frac{i_{s-q}}{\psi_{r-d}}. \quad (5.40)$$

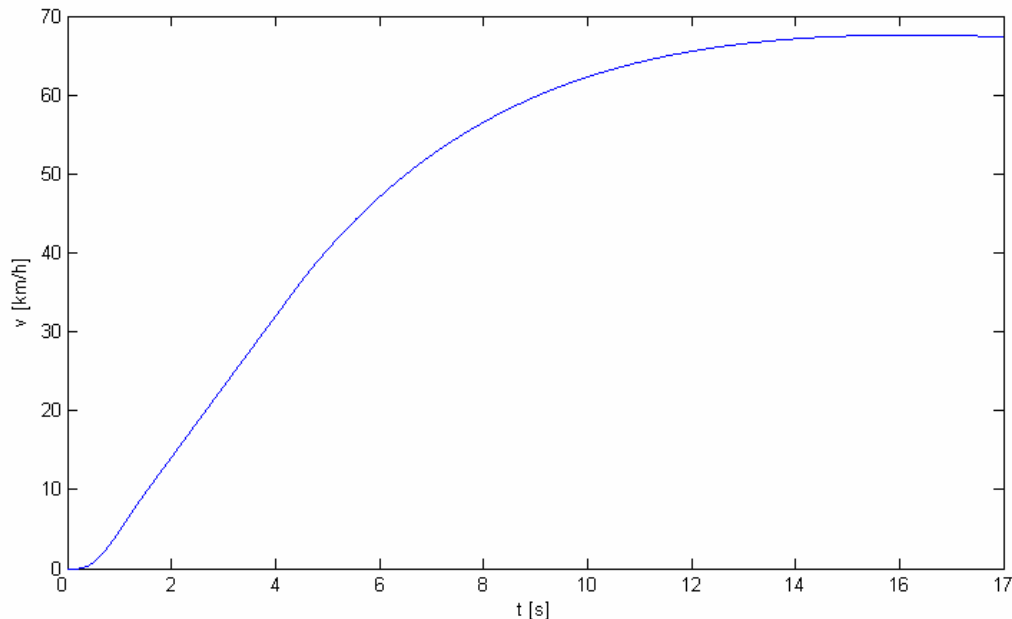
Kruhový kmitočet  $\omega_k$  získáme jako  $\omega_k = \omega_{mech} + \omega_r$  a jeho integrací úhel natočení  $\vartheta_k$ .



Obr.5.10: Výpočetní blok  $\psi_d$  a  $\vartheta_k$

## 5.7 Simulace rozjezdu vozidla

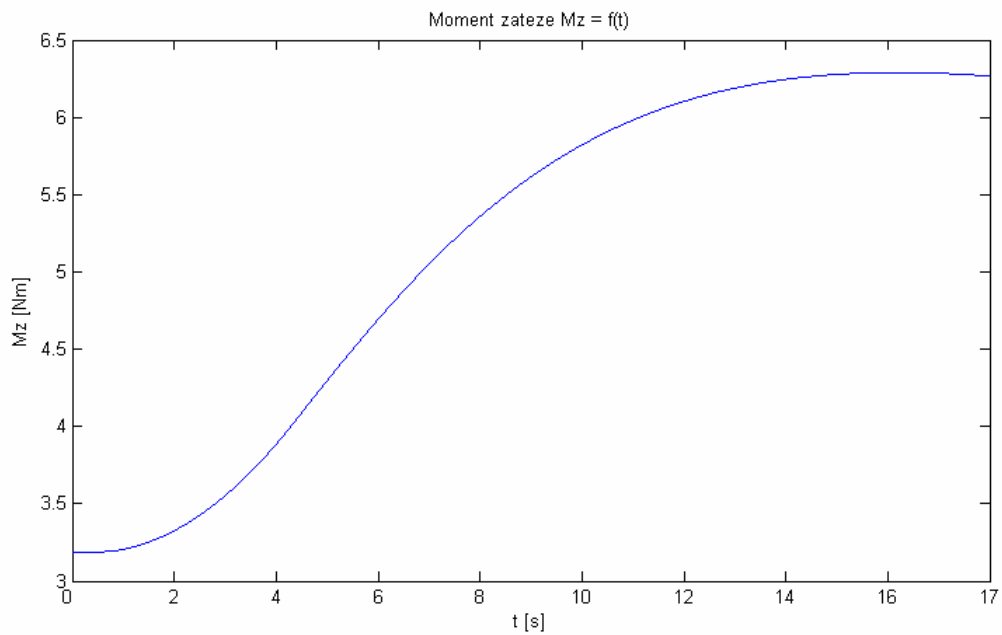
Simulace rozjezdu vozidla z nulové rychlosti do maximální proběhlo za určitých vstupních podmínek. Předpokládáme, že vozidlo se rozjíždí po rovině, tzn. že úhel naklonění roviny  $\alpha$  je nulový. Dále se předpokládá, že na vozidlo nepůsobí žádná dodatečná síla (např. vítr) a uvažujeme jen síly, které obsahuje blok zátěže.



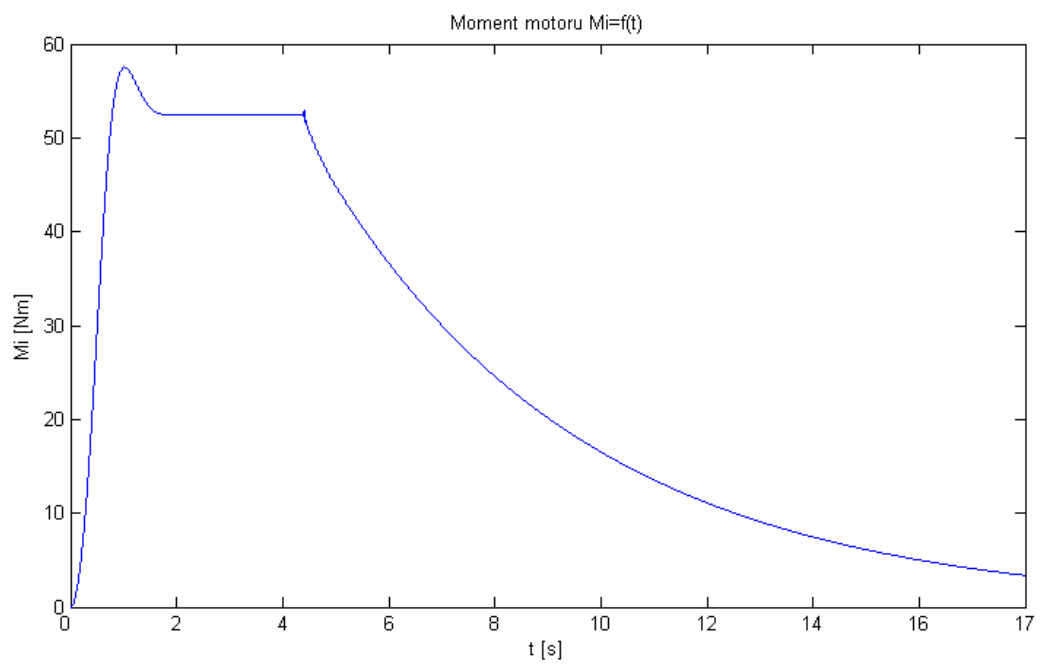
Obr.5.11: Rychlost vozidla  $v$

Vozidlo se rozjede na plnou rychlost, která činí 66 km/h, za 16 s (obrázek 5.11). Největší zrychlení má do 5 s od počátku rozjíždění. Do této doby se napětí na střídači s frekvencí mění konstantně po přímce. V této části má motor konstantní moment 55 Nm jak jde vidět na obrázku 5.13. Po uplynutí této doby se zvyšuje již jen frekvence a napětí zůstává konstantní. Motor již nevytváří konstantní moment, který s rostoucími otáčkami klesá. Motor se „odbuzuje“ a při momentu, který se vyrovná zátěžnému již vozidlo dále nezrychluje. V této části zrychlení probíhá pozvolněji.

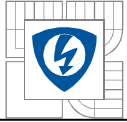
Vlivem třecích sil na vozidlo již od počátku rozjíždění působí zátěžný moment, proto není zrychlení od počátku maximální. Při maximální rychlosti na hřídel motoru působí zátěžný moment 6,45 Nm (obrázek 5.12). Během rozjezdu při konstantním momentu motoru je maximální amplituda statorových proudů 300 A, která je omezena na tuto hodnotu v proudové smyčce.



Obr.5.12: Zátěžný moment  $M_z$



Obr.5.13: Moment motoru  $M_i$

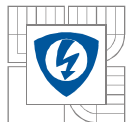


## 6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá trakčním pohonem elektromobilu, který má jako zdroj energie palivový článek. Pohon vozidla s palivovým článkem je netradičním řešením, které je velice zajímavé a jeho využití může být do budoucna perspektivní. Palivový článek jako zdroj má několik zásadních předností oproti klasickým zdrojům. Jedná se o ekologické zařízení, které nevydává žádné škodlivé emise do prostředí.

V první části diplomové práce jsem se detailně seznámil s palivovými články a popsal jednotlivé principy a jejich vlastnosti. Provedl jsem srovnání z pohledu použití článku jako zdroje pro trakční pohon malého elektromobilu. Dále jsem se podrobně seznámil s modulem palivového článku Nexa od firmy Ballard, který byl za účelem stavby elektromobilu zakoupen na ústav ÚVEE. Jedná se o plně automatické zařízení, které obsahuje veškeré periferie pro svůj provoz. Na tomto palivovém článku jsme provedli měření statické a dynamické charakteristiky. Ze statické charakteristiky je zřejmé, že na článku s rostoucím zátěžným proudem poměrně rychle klesá napětí, a článek se chová jako měkký zdroj elektrické energie. Charakteristiku jsme proložili přímkou a stanovili vnitřní odpor článku, který činí  $0,31\Omega$ . Z pomalých změn napětí při skokové změně zatěžovacího proudu u dynamických charakteristik je zřejmé, že článek má velkou vnitřní kapacitu. Časová konstanta při vybíjení činila 18 ms a při nabíjení 13 ms, přičemž rozdíl mezi nimi je způsoben připojenými spotřebiči uvnitř modulu palivového článku.

V další části jsem rozebral strukturu pohonu s palivovým článkem a jeho jednotlivé části. Zaměřil jsem se na možnosti řešení akumulace energie v napěťovém meziobvodu. Následně jsem pomocí programu Matlab-Simulink vytvořil matematický model pohonu. Pohon obsahuje asynchronní motor s kotvou nakrátko a trojfázový střídač se sinusovým PWM modulátorem. Dále obsahuje blok zátěže, který zahrnuje síly působící na vozidlo během jízdy. Pohon je řízen vektorově orientovaným řízením na konstantní rotorový tok. Nakonec jsem provedl simulaci rozjezdu vozidla po rovině do maximální rychlosti.



## LITERATURA

- [1] internetové stránky poradenské společnosti ENVIROS, s. r. o.  
<<http://www.enviros.cz/index.html>>
- [2] internetové stránky projektu HydrogenIX ( VŠB-TU v Ostravě )  
<<http://hydrogenix.vsb.cz/>>
- [3] internetové stránky Fuel Cell Store  
<<http://www.fuelcellstore.org>>
- [4] internetové stránky firmy Ballard Power Systems Inc.  
<<http://www.ballard.com/>>
- [5] internetové stránky firmy Palcan Fuel Cells Ltd.  
< <http://www.palcan.com/s/Home.asp>>
- [6] internetové stránky firmy Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd.  
<<http://www.apfct.com/>>
- [7] internetové stránky firmy Astris energi Co.  
<<http://www.astris.co/>>
- [8] internetové stránky Fuel Cell Control  
<<http://www.fuelcellcontrol.com>>
- [9] Patočka, M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, svazek II. Brno, 2004. Skripta na Vysokém učení technickém v Brně.
- [10] Ballard, User's Manual, 2003. Uživatelský manuál k palivovému článku Nexa® Power Module od firmy Ballard.
- [11] Šubrt, J.: Elektrické regulační pohony II. Brno, 1986. Skripta na Vysokém učení technickém v Brně.