

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

System pro efektivní elektrolýzu vody

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lucie BUREŠOVÁ**
Osobní číslo: **E12N0060P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **System pro efektivní elektrolýzu vody**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem bude optimalizace účinnosti laboratorního modelu elektrolýzérů včetně výkonového napájecího zdroje. Experimentální vzorek bude vyvíjet směs plynů vodíku a kyslíku, který může být použit např. k okamžité spotřebě při svařování, příměs paliva spalovacích motorů, apod.

1. Proveďte rešerši běžných řešení.
2. Proveďte optimalizaci konstrukce modelu elektrolýzérů.
3. Navrhněte obvodové řešení výkonové části měniče pro napájení elektrolýzérů včetně budičů a proveďte jeho dimenzování.
4. Zvolte vhodný mikrokontrolér a navrhněte obvodové řešení řídicí jednotky měniče. Proveďte implementaci řídicích algoritmů.
5. Správnou funkci ověřte měřením.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Molnár, Ph.D.

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vysvětlení základních pojmů a definic z oblasti elektrolýzy vody. Podává přehled o možných metodách výroby vodíku a HHO plynu a vysvětluje pojem suchý a mokřý článek. Dále se zabývá návrhem řídicí jednotky elektrolyzéro, která se skládá z číslicového regulátoru a měniče. Celý systém byl nejprve komplexně nasimulován v programu MATLAB. Následně bylo provedeno dimenzování měniče a navržen vyhovující způsob chlazení. Jako poslední byl navržen a implementován algoritmus řízení. Správná funkce systému pro elektrolýzu vody je v závěru doložena měřením na reálném modelu.

Klíčová slova

Elektrolýza vody, HHO plyn, suchý článek, pulzní měnič napětí, H-můstek, návržení a implementace algoritmu řízení

Abstract

System for efficient electrolysis of waters

This diploma thesis is focused on explanations and definitions of terms in the field of water electrolysis. It takes a review of available production methods of hydrogen and HHO gas and explains meaning of Dry and Wet cells. The next part is dedicated to design of unit. The control unit contains digital regulator and convertor. Whole system was simulated complexly in MATLAB program. The converter was dimensioned and the suitable heat sink was chosen. Control algorithm for converter was also designed and implemented. In the last chapter there is correct function for system of water electrolyzer confirmed by results of measurement.

Key words

Water electrolysis, HHO gas, Dry cell, Convertor of voltage, H-bridge, design and implement of control algorithm

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.5.2014

Lucie Burešová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Molnárovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k vedení práce, také svému příteli a rodině za podporu po celou dobu studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD.....	12
1 ELEKTROLÝZA.....	14
1.1 DEFINICE ELEKTROLÝZY	14
1.2 FARADAYOVY ZÁKONY, NERNSTOVA ROVNICE	14
1.3 DRUHY ELEKTROD.....	15
1.4 NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ MATERIÁLY ELEKTROD	17
1.5 ELEKTROLYTY.....	17
1.6 ELEKTROLÝZA VODY	18
1.6.1 Princip	18
1.6.2 Typy elektrolyzérů vody	19
1.6.3 Používané elektrolyty.....	22
1.6.4 Konstrukční uspořádání.....	24
1.6.5 Výrobci a dodavatelé suchých článků.....	26
2 NÁVRH KLÍČOVÝCH KOMPONENT ELEKTROLYZÉRU	28
2.1 TECHNICKÁ SPECIFIKACE JEDNOTKY ELEKTROLYZÉRU (HHO GENERÁTORU).....	28
2.1.1 Výpočet hmotnosti látky vyloučené při elektrolyze vody.....	28
2.1.2 Výpočet objemu látky vyloučené při elektrolyze vody	29
2.1.3 Výkon elektrolyzéro.....	30
2.1.4 Návrh rozměrů elektrolyzéro	30
2.1.5 Výpočet parametrů elektrolyzéro.....	31
2.2 ŘÍDICÍ JEDNOTKA ELEKTROLYZÉRU	34
2.2.1 Popis číslicového regulátoru (volba mikrokontroléro).....	34
2.2.2 Popis měniče.....	35
2.2.3 Postup realizace.....	36
2.2.4 Simulace celého systému.....	36
2.3 DIMENZOVÁNÍ VÝKONOVÝCH PRVKŮ MĚNIČE	41
2.3.1 Dimenzování IGBT měniče (analytický výpočet).....	42
2.3.2 Volba chladiče, určení tepelných poměrů měniče s IGBT (analytický výpočet)...	44
2.3.3 Simulace tepelných poměrů měniče s IGBT tranzistory	45
2.3.4 Dimenzování měniče s MOSFET tranzistory (analytický výpočet)	48
2.3.5 Volba chladiče, určení tepelných poměrů měniče s MOSFET tranzistory (analytický výpočet)	49
2.3.6 Dimenzování MOSFET měniče s chladičem (simulace).....	50
2.3.7 Porovnání získaných výsledků dimenzování součástek a volby chladiče	51

2.4	BUDÍCÍ OBVODY MĚNIČE S IGBT TRANZISTORY	52
2.5	IMPLEMENTACE ALGORITMU ŘÍZENÍ	55
2.5.1	<i>Struktura algoritmu řízení pro implementaci</i>	55
2.5.2	<i>Implementace algoritmu v programovacím jazyce C do DSP</i>	56
2.5.3	<i>Implementace algoritmu z programu MATLAB - SIMULINK do DSP</i>	59
3	MĚŘENÍ NA ELEKTROLYZÉRU	62
3.1.1	<i>Ověření funkčnosti algoritmu řízení na laboratorním modelu</i>	62
3.1.2	<i>V-A charakteristika elektrolyzérou</i>	64
3.1.3	<i>Měření množství vyrobeného plynu</i>	65
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	70
	PŘÍLOHA 1 – PROGRAMOVÝ KÓD ISR.C	I

Seznam symbolů a zkratk

- A – elektrochemický ekvivalent
- a – tloušťka elektrody
- a(OX), a(RED) – chemická aktivita iontů
- A/D – analogově-digitální převodník
- b – tloušťka elektrolytu mezi dvěma elektrodami (těsnění)
- C - kapacita
- d – plocha elektrod
- DPH – daň z přidané hodnoty
- DSP – digitální signálový procesor
- E – elektrický potenciál elektrody
- e^- - elektron
- E^0 - standardní elektroodový potenciál (udáván při 25°C)
- $E_{on/off}$ – zapínací / vypínací energie tranzistoru
- F – Faradayova konstanta
- GMW – výkon elektrolyzéry počítaný z hmotnosti
- GPIO - General Purpose Input/Output (univerzální vstupy/výstupy)
- I – elektrický proud
- I_{ef} – efektivní hodnota proudu
- IGBT – Integrated Gate Bipolar Transistor (bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
- I_{peak} – špičková hodnota proudu
- $I_{stř}$ – střední hodnota proudu
- I_{zm} – maximální hodnota proudu na zátěži
- K_I – integrační zesílení regulátoru
- K_r – proporcionální zesílení regulátoru
- L - indukčnost
- m – hmotnost
- MFCHT – Matematicko-fyzikálně-chemické tabulky
- M_m – molární hmotnost
- MMW – výkon elektrolyzéry počítaný z objemu
- MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (polem řízený tranzistor)
- n – látkové množství
- PEM – membránový elektrolyzér

P_{fw} – ztrátový výkon propustným proudem

P_{sw} – ztrátový výkon spínacích ztrát

P_{TOT} – celkový ztrátový výkon

PWM – Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)

Q – elektrický náboj

R – elektrický odpor

R_T – univerzální plynová konstanta

$R_{TH(js) / (sa)}$ – tepelný odpor přechodu čip a chladič / chladič a okolí

s – plocha elektrod

SOE – vysokoteplotní elektrolyzér s pevnými oxidy

t – čas

T – termodynamická teplota

T_a – teplota okolí

T_J – teplota čipu

T_r – konstanta rychlosti regulace

T_S – teplota chladiče

U – elektrické napětí

U_c – napětí z baterie

U_d – napětí na zátěži

USB - Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)

V – objem

V_m – molární objem

z – počet elementárních nábojů, poměrné sepnutí

γ – konduktivita (měrná elektrická vodivost)

ρ – rezistivita (měrný elektrický odpor)

ρ_H, ρ_O – hustota vodíku a kyslíku

Úvod

Jedním z hlavních požadavků dnešního světa je šetření nerostných surovin, kterých stále ubývá. Nikdo dnes nedokáže odhadnout, na jak dlouhou dobu je bude moci člověk využívat, než budou některé z nich nenávratně vyčerpány. Vodík nebo směs vodíkového plynu je jedním z řešení, jak část nerostných surovin nahradit. Sloučenin obsahujících vodík je dostatek všude kolem nás. Hlavním zdrojem je na první pohled voda. Jenže výroba vodíku z vody není tak jednoduchá ani levná, jak by se na první pohled mohlo zdát. Nejběžnější metoda umožňující získat z vody vodík se nazývá elektrolyza.

Cílem práce bylo provést návrh zařízení k elektrolyzátoru vody, které slouží pro regulaci množství vyrobeného plynu a také plní funkci periodické změny polaroty proudu. Chceme kontrolovat množství vyrobeného plynu a stabilizovat proces elektrolyzy. Proces ovlivňuje několik faktorů. Je závislý na teplotě, koncentraci roztoku nebo měnící se hladině elektrolytu. Zařízení je možné připojit ke zdroji napětí. Velikost protékajícího proudu z napájecího zdroje je možno navrženým zařízením omezit a zajistit tak jeho ochranu proti přetížení. Proud lze též regulovat na požadovanou hodnotu. Velikost proudu následně přímo ovlivní množství vyrobeného plynu.

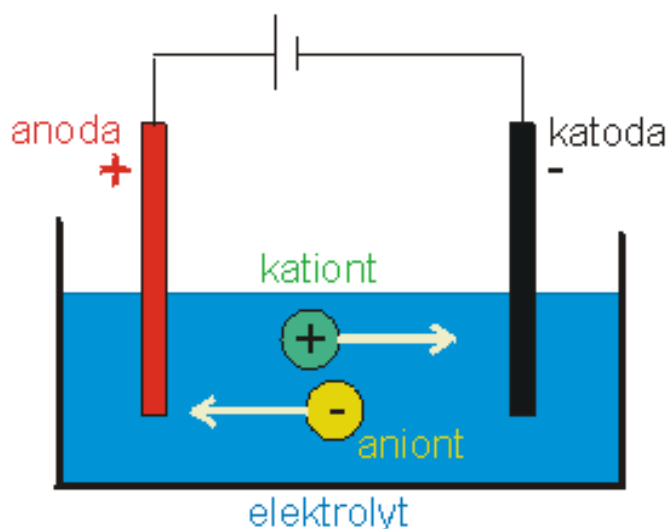
Práce je zaměřena na dva hlavní body. Prvním bodem je definice a popis elektrolyzy, nejpoužívanějších elektrod a elektrolytů obecně. Dále je pozornost zaměřena na elektrolyzu vody, možnosti výroby vodíku nebo Brownova plynu (HHO). Jsou zde uvedeny nejběžnější konstrukce elektrolytických článků. Hlavní část práce je věnována konkrétní sestavě systému pro elektrolyzu vody, která ke své činnosti pro výrobu HHO plynu využívá suchý článek. Pro použitý elektrolyzátor byly provedeny výpočty předpokládaného výkonu a množství vyrobeného plynu v závislosti na jeho rozměrech. Klíčovou komponentou systému pro elektrolyzu vody je řídicí jednotka, která plní dvě funkce. Funkce regulace proudu na požadovanou hodnotu a také funkci změny polaroty proudu v souvislosti se zanášením jedné z elektrod nečistotami více než druhé. Byla zvolena topologie zapojení měniče H-můstek. V práci je proveden návrh dvou variant měniče dle použitých polovodičových prvků IGBT nebo MOSFET. Celý systém skládající se z číslicového regulátoru, měniče s budičem a elektrolyzátoru byl komplexně simulován a navržen v programu MATLAB s využitím bloků SIMULINK a PLECS. Dále bylo provedeno dimenzování polovodičových součástek měniče a proběhl výběr vyhovujícího způsobu chlazení. Tepelné výpočty byly provedeny analyticky

i simulací a výsledky byly porovnány. Byl zvolen číslicový regulátor na bázi DSP od firmy Texas Instruments s označením TMS320F2812. Měníči byl vybrán vhodný budič. Implementace řídicího algoritmu pro DSP byla provedena dvěma způsoby, jak v programu MATLAB, tak i programovacím jazyce C. Dle prvních praktických zkušeností byla drobně upravena konstrukce elektrolyzéro. Poslední kapitola se zabývá měřením na elektrolyzéro. Byla změřena V-A charakteristika elektrolyzéro a množství vyrobeného plynu. Bylo provedeno ověření funkčnosti celého systému.

1 Elektrolýza

1.1 Definice elektrolýzy

„Elektrolýza je děj, který probíhá na elektrodách při průchodu proudem roztokem nebo taveninou (elektrolytem) a dochází zde k látkovým změnám.“ Přitom roztok nebo tavenina musí obsahovat volně pohyblivé ionty, které se při připojení vnějšího zdroje napětí začnou usměrněně pohybovat tak, že kladné ionty (kationty) směřují ke katodě (záporná svorka zdroje) a záporné ionty (anionty) putují k anodě (kladná svorka zdroje). Na záporné elektrodě kationty přijímají elektrony a tím se redukuje. Na kladné elektrodě se odevzdáváním elektronů oxidují. Výsledky elektrolýzy roztoku závisí na materiálu elektrod. Při elektrolýze se na katodě vždy vylučuje vodík nebo kov. Směr proudu je podle dohody dán pohybem kladných iontů. [1],[2]



Obr. 1.1 Schéma elektrolýzy (převzato z [3])

1.2 Faradayovy zákony, Nernstova rovnice

Vztahy mezi množstvím látky vyloučené na elektrodách a velikostí náboje, který elektrolytem prošel, vyjadřují Faradayovy zákony. Matematické vyjádření je pomocí rovnice:

$$m = \frac{M_m}{z \cdot F} Q = A \cdot I \cdot t \quad (1.1)$$

kde m je hmotnost chemicky přeměněné látky v gramech, tj. prvku vyloučeného nebo rozpuštěného na elektrodě proudem I , který jí protékal po dobu t , M_m je molární hmotnost atomů vyloučeného prvku, z je počet elementárních nábojů nesených jako ionty v roztoku

a F je Faradayova konstanta (96485,309 C/mol). Písmenem A označujeme zlomek $\frac{M_m}{z \cdot F}$ a znamená elektrochemický ekvivalent látky. [4],[5]

Tato rovnice se dá rozdělit do dvou samostatných Faradayových zákonů:

1. Faradayův zákon určuje hmotnost vyloučené látky na elektrodě nebo v roztoku:

$$m = A \cdot I \cdot t$$

2. Faradayův zákon zpřesňuje výpočet konstanty A , která vystupuje v prvním zákoně:

$$m = \frac{M_m}{z \cdot F} Q = A \cdot I \cdot t$$

Nernstova rovnice vyjadřuje závislost potenciálu elektrody, která je v kontaktu s roztokem iontů, na koncentraci těchto iontů. Je definována jako celková změna napětí E . Odpovídá standardnímu elektrodovému potenciálu (E^0) a příspěvku nestandardního stavu na anodě a katodě (druhý člen rovnice):

$$E = E^0 - \frac{R_T \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{a(\text{RED})}{a(\text{OX})} \quad (1.2)$$

kde R_T je univerzální plynová konstanta (8.31451 J* mol^{-1} * K^{-1}), T je termodynamická teplota v Kelvinech, z je počet elementárních nábojů účastnících se reakce na elektrodě a F je Faradayova konstanta. Veličina $a(\text{RED})$ označuje chemickou aktivitu všech redukujících látek a analogicky $a(\text{OX})$ je aktivita všech oxidujících látek. Tyto aktivity jsou u tuhých a kapalných látek rovny přibližně jedné a u plyných látek jsou rovny jejich parciálním tlakům¹. [5]

1.3 Druhy elektrod

Elektrody jsou soustavy skládající se alespoň ze dvou fází s vodivým rozhraním, přičemž alespoň jedna je vodič elektronů a druhá vodič iontů. Vedení proudu pak probíhá jako elektrodová reakce, které se vždy účastní elektrony. Elektrody můžeme dělit z několika

¹ Parciální tlak je podíl na celkovém tlaku směsi plynů, který vyvozuje jeho jedna složka. [5]

různých hledisek. Nejčastější dělení je podle materiálu elektrody a druhu roztoku, do kterého je ponořena dle [6], jako:

- Elektrody I. druhu
- Elektrody II. druhu
- Elektrody oxidačně – redukční
- Elektrody oxidové
- Elektrody polymerní (membránové)

S **elektrodami I. druhu** je spojena reakce, kde je přenášen elektron mezi kovem a kationem, anionem nebo elektricky neutrální částicí v roztoku. Kov je ponořen do roztoku iontů svého druhu nebo do elektrolytu. Nejčastější jsou kationtové elektrody různých kovů (např. ziková nebo měděná), patří sem i vodíková elektroda nebo plynová chlorová elektroda.

Elektrody II. druhu se skládají ze tří fází. Jsou tvořeny kovem pokrytým jeho málo rozpustnou solí ponořeným v roztoku obsahujícím anion této soli. Elektrodová reakce je pak kombinací jednotlivých reakcí na obou rozhraních. Tento typ elektrod je často využíván jako elektrody srovnávací. Nejčastějšími zástupci jsou kalomelová a argentchloridová elektroda.

Elektrody oxidačně-redukční se skládají z inertního vodiče elektronů, kterými jsou ušlechtilé kovy, rtuť nebo grafit, jež jsou ponořeny do roztoku obsahující oxidovanou i redukovanou formu dané látky. Elektroda zde pouze zprostředkovává přenos elektronů a kontakt. Oxidovaná forma má snahu přijímat na elektrodě elektrony a redukovat se. Redukovaná forma odevzdávat elektrony a oxidovat se. Od elektrod I. druhu se liší tím, že oxidační stavy látky se mohou vyskytovat v různých koncentracích. Zástupcem je ninhydrinová elektroda.

Oxidové elektrody jsou tvořeny kovem pokrytým vrstvou oxidu, ponořeným do vodného roztoku elektrolytu. Jsou podobné elektrodám II. druhu. Anionem v roztoku, který se účastní reakce, je hydroxidový anion OH vázaný v kyselém prostředí ve vodě. Nevýhodou je malá rychlost reakce. Tímto typem elektrody je např. elektroda merkurooxidová nebo zinkooxidová.

Polymerní elektrody jsou složeny ze tří fází tvořených vodičem elektronů pokrytým tenkou vrstvou (filmem) elektronově nebo iontově vodivého polymeru a ponořených do roztoku elektrolytu. Vedení proudu je umožněno reakcemi přenosu náboje na membránových

rozhraních. Tyto typy elektrod se dělí ještě na další podskupiny dle tloušťky membrány, struktury nebo a propustnosti jednotlivých složek (permeability).

Některé elektrolyty obsahují větší počet kationtů a aniontů. O tom, který kation a anion se bude aktivně účastnit elektrolyzy, rozhoduje tzv. standardní redukční potenciál. Na katodě se redukují částice s nejvyšší hodnotou standardního redukčního potenciálu, na anodě se oxidují částice, které mají hodnotu potenciálu nejnižší. Pro praktické využití se elektrody seskupují do galvanického článku. Článek pak obsahuje minimálně dvě elektrody nazývané se poločlánek.

1.4 Nejpoužívanější materiály elektrod

Nejčastějšími materiály pro elektrody jsou měď, platina, uhlík nebo nerezová ocel. Měď je značně chemicky odolná, má výborné fyzikální a mechanické vlastnosti a vysokou tepelnou a elektrickou vodivost. Měď je také na vzduchu stálá. Platina je ušlechtilý inertní kov, je elektricky i tepelně středně dobře vodivá a má výrazné elektrokatalytické vlastnosti. Platina je také dobře kujná a tažná. Zároveň je ale platina velice drahá. Uhlík je základním prvkem biosféry a nepostradatelnou součástí všech organických sloučenin. Jako prvek je málo náchylný k oxidaci. V přírodě se vyskytuje ve formách grafitu a diamantu. Pro elektrody se využívá grafit. Nerezová ocel je nejdostupnějším materiálem elektrod pro elektrolyzu vody, protože je levná, značně odolná vůči korozi a je také dobrým elektrickým vodičem. Pro elektrody se často používá chemicky odolná ocel s označením 316L. [4]

1.5 Elektrolyty

Elektrolyt je látka, která ve vodném roztoku disociuje (rozpadá nebo štěpí se) za vzniku iontů. Tento objev učinil v roce 1882 švédský fyzik Svante Augustus Arrhenius a nazval jej elektrolytická disociace. V roce 1903 mu za tento objev a mimořádné zásluhy za rozvoj chemie byla udělena Nobelova cena. [7]

Elektrolyty dělíme do dvou základních skupin podle stupně disociace na elektrolyty silné a slabé. Stupeň disociace nabývá hodnot $<0;1>$. Při nízkém disociačním stupni (jdoucím k nule) látka jen nepatrně zvyšuje výchozí vodivost, a proto se nazývá slabým elektrolytem. To znamená, že slabé elektrolyty disociují jen částečně. Stupeň disociace pak roste s ředěním vodou. Koncentrace slabého elektrolytu v roztoku je v rovnováze s nedisociovanými molekulami. Mezi zástupce slabých elektrolytů řadíme vodné roztoky slabých organických

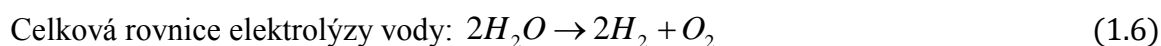
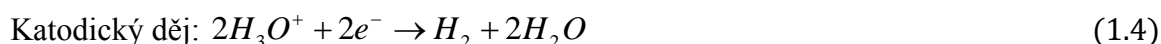
kyselin, většiny organických látek, kyselinu fosforečnou nebo čpavek. Pokud je disociační stupeň velký (jdoucí k jedné), vzniklé ionty zvyšují vodivost roztoku a rozpuštěná látka je pak nazývána silným elektrolytem. Jinými slovy můžeme říci, že elektrolyty jsou značnou mírou disociovány, a to i za vyšších koncentrací. Zástupcem jsou vodné roztoky silných anorganických kyselin a zásad jako kyselina chlorovodíková nebo hydroxid draselný a většina solí (např. chlorid draselný nebo dusičnan stříbrný). Koncentrace disociovaných iontů v roztoku má zásadní vliv na jeho vodivost a dá se měřit konduktometrií. [8]

1.6 Elektrolyza vody

1.6.1 Princip

Princip elektrolyzy vody můžeme popsat jako proces, při kterém dochází ke štěpení vody za přítomnosti stejnosměrného proudu (externího zdroje napětí). Většinou jsou ve vodě obsaženy další látky zvětšující její vodivost např. hydroxidy. Voda je v kapalném skupenství rozložena na plynný vodík na katodě a plynný kyslík na anodě. Dále je vhodné umístit do elektrolyzátoru membránu nebo separátor, který brání zkratování elektrod díky svému velkému elektrickému odporu. Slouží také k zabránění chemické reakce produktů (kyslík a vodík) vzniklých na elektrodách. [9]

Schéma je znázorněno na obrázku Obr. 1.2 a popsáno následujícími rovnicemi:

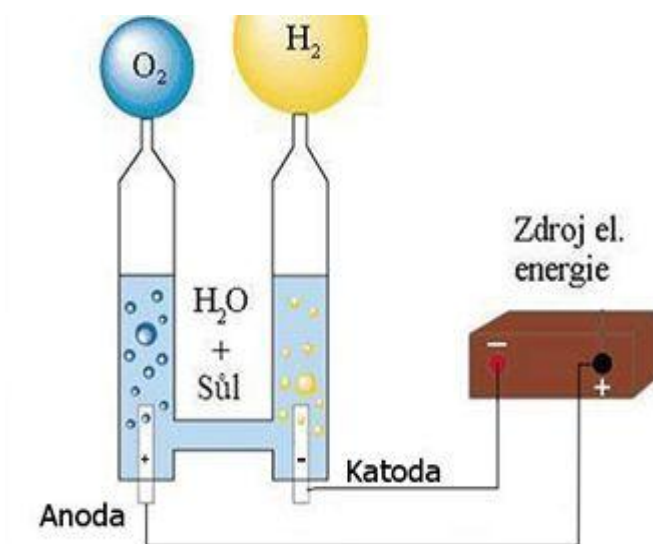


Disociace vody je děj, při kterém dochází k rozštěpení kovalentní vazby mezi vodíkem a kyslíkem. Voda je štěpena na anionty OH^- , protože obsahuje dva elektrony z původní vazby. Z vodíku se stává kation H^+ , protože mu chybí jeden elektron. Ten se následně naváže na další molekulu vody, přičemž vznikne hydroxoniový kation H_3O^+ . [10]

Na katodě probíhá při elektrolyze vody katodický děj popsaný rovnicí (1.4). Záporný náboj z externího zdroje se shromažďuje na katodě. Elektrony se snaží projít přes vodu na druhou stranu k anodě, kde je převaha kladného náboje. Molekuly v blízkosti katody disociují

dle rovnice (1.3). Elektrony na katodě jsou přitahovány ke kladným kationtům H_3O^+ . Pak dochází k rozštěpení vazby mezi vodíkem a zbytkem molekuly vody. Kation vodíku následně přijme elektron z katody a stane se z něj neutrální atom vodíku, který se slučuje s dalším atomem vodíku, protože v přírodě se vodík nachází pouze ve dvouatomových molekulách. Vznikne tedy molekula vodíku H_2 . [10]

Na anodě dochází ve stejný okamžik k anodickému ději popsanému rovnicí (1.5). Kladný náboj je shromážděn u anody. Anionty OH^- jsou přitahovány ke kladné anodě, kde dochází k předání elektronu anionu na anodu. Dále dochází k rekombinaci (zániku) hydroxoniového kationu s ještě třemi stejnými kationty. Vznikne tak jedna molekula kyslíku O_2 a dvě molekuly vody H_2O . [10]



Obr. 1.2 Schéma elektrolýza vody (převzato z [9])

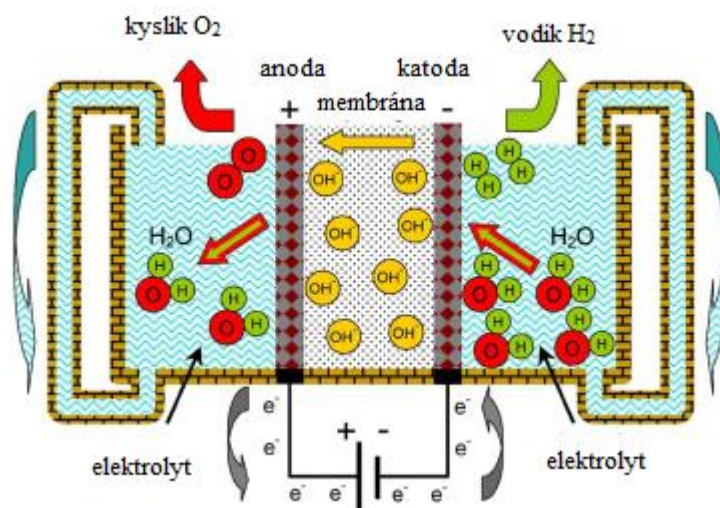
Účinnost procesu se pohybuje kolem 80-92%. Na celkové účinnosti elektrolytické výroby vodíku se podílí účinnost výroby elektrické energie (30 - 40 % pro konvenční zdroje). Celková účinnost elektrolýzy se tedy pohybuje přibližně v rozmezí 25 - 35 %. Elektrolýzou vody je ve světě vyrobeno asi jen 4% produkce vodíku. [9]

1.6.2 Typy elektrolyzérů vody

Mezi nejčastější typy elektrolyzérů patří dle [12]:

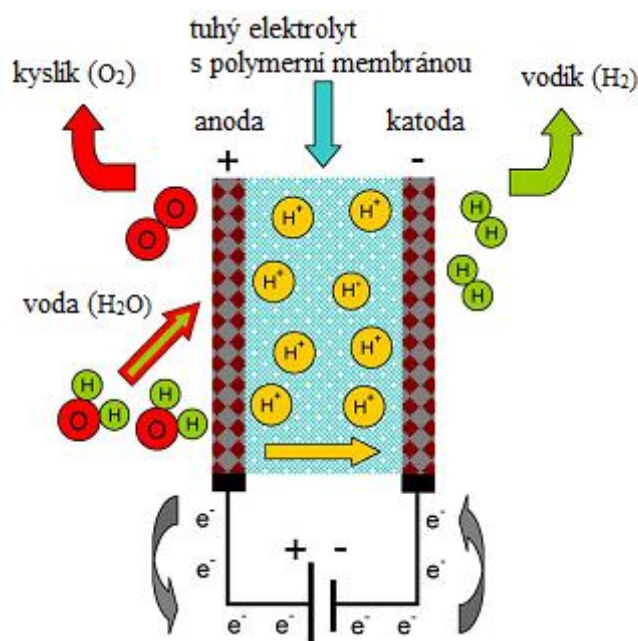
- alkalický elektrolyzér vody
- membránový elektrolyzér (PEM)
- vysokoteplotní elektrolyzér s pevnými oxidy (SOE)

Alkalická elektrolýza vody je spolehlivá, bezpečná a vyspělá technologie. Životnost může dosahovat až 15 let a je to nejrozšířenější metoda na celosvětové komerční úrovni. Účinnost těchto elektrolyzérů se pohybuje v rozsahu 47%-82%. Celková účinnost alkalické elektrolýzy se započtením účinnosti výroby potřebné elektrické energie je v rozsahu 25%-35%. V posledních letech bylo dosaženo zlepšení účinnosti a snížením ceny zejména díky zvětšení proudové hustoty, čímž se snížily investiční náklady. Také snaha snížit spotřebu elektrické energie má vliv na snížení provozních nákladů. Čistota vodíku se může pohybovat až k 99,9%. Elektrolytický článek se skládá z dvou elektrod oddělených plynotěsnou membránou, elektrolytu a externího zdroje elektrické energie. Článek je ponořen v tekutém elektrolytu, kde se obvykle nachází vysoce koncentrovaný KOH zvyšující iontovou vodivost. Jako další možnost zvyšující vodivost může být použit NaOH nebo NaCl. Rozsah operačních teplot je 5°C-100°C. Hodnoty tlaku záleží na konkrétním modelu. Některé modely mohou pracovat při atmosférickém tlaku, ale typický rozsah je 25-30 bar. Voda kolující v elektrolyzáru musí být velice čistá s vodivostí nižší než 5 μS/cm za účelem ochrany elektrod a bezpečného provozu. Největší nevýhodou tohoto způsobu elektrolýzy je korozivní charakter elektrolytu. Princip je zřejmý z obrázku Obr. 1.3. Vodíkový plyn se vytváří na katodě, kde je redukována voda a vznikající hydroxidové anionty procházejí přes membránu k anodě díky elektrickému poli tvořenému zdrojem elektrické energie. Hydroxidové anionty zanikají na povrchu anody a vytváří se tak plynný kyslík a volné elektrony, které uzavírají elektrický obvod.



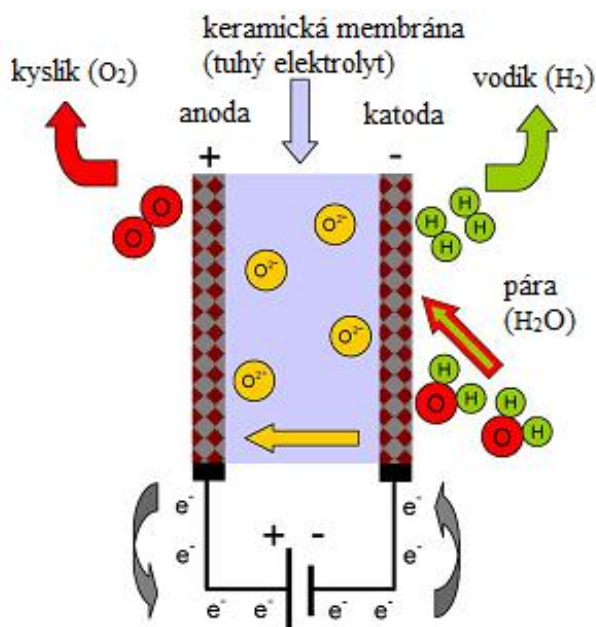
Obr. 1.3 Princip alkalické elektrolýzy vody [12]

Dalším typem je **membránový elektrolyzer**. Tato technologie bývá označována jako elektrolyt s polymerní membránou (PEM), membrána vyměňující protony nebo méně často také jako tuhý polymerní elektrolyt. Je jen velmi málo firem vyrábějící tento druh elektrolyzerů hlavně z důvodu limitované výrobní kapacity, krátké životnosti a vysokých investičních nákladů v porovnání s ostatními technologiemi. Elektrody obvykle obsahují ušlechtilé kovy jako platina nebo iridium. Elektrolyt je tvořen plynatěsnou tenkou polymerní membránou se síťovanou strukturou a silně kyselým charakterem. Princip je zobrazen na obrázku Obr. 1.4. Voda je oxidována na anodě za produkce kyslíku, a dále elektronů a protonů, které pak putují přes membránu ke katodě, kde jsou redukovány a uzavírají elektrický obvod. Na katodě je pak vylučován vodík. Účinnost se pohybuje v rozsahu 48%-65%. Limitujícím faktorem je teplota, která musí být nižší než 80°C. Čistota vodíku je opět velmi vysoká až 99,999%. Nízká plynná propustnost polymerní membrány snižuje riziko vzniku hořlavé směsi. Vodivost vody vstupující do elektrolyzeru musí být pod 1 μS/cm. Hlavní nevýhodou jsou pořizovací náklady korespondující zejména s cenou membrán a elektrod z ušlechtilých kovů a také kratší životnost oproti alkalickým elektrolyzerům.



Obr. 1.4 Princip membránového elektrolyzeru [12]

Posledním typem je **vysokoteplotní elektrolýza**, která je nejmodernější technologií. Umožňuje elektrolýzu vody nebo páry za vysokých teplot v rozmezí 600°C až 900°C. Účinnost je ve srovnání s ostatními typy vyšší. Celková účinnost vysokoteplotní elektrolýzy se započtením účinnosti výroby potřebné elektrické energie se pohybuje v rozsahu 45%-50%. Vodní pára se dostává ke katodě, kde je voda redukována za vzniku vodíku. Oxidové anionty vytvářené na katodě jdou skrz elektrolyt k anodě, kde rekombinují a vytváří se kyslík a elektrony uzavírají elektrický obvod. V porovnání s předchozími způsoby elektrolýzy jsou elektrody v kontaktu s plynnou fází kyslíku. Proto jsou také elektrody z porézních materiálů. Část potřebného tepla může být dodávána z vysokoteplotního zdroje energie, čímž se ušetří část elektrické energie. Uvažuje se např. o geotermální energii nebo vysokoteplotním plynem chlazeném jaderném reaktoru. Hlavní překážkou pro průmyslové použití je zejména omezená dlouhodobá stabilita článků související s degradací pevného elektrolytu a stárnutím elektrod. Princip je zobrazen na obrázku Obr. 1.5.

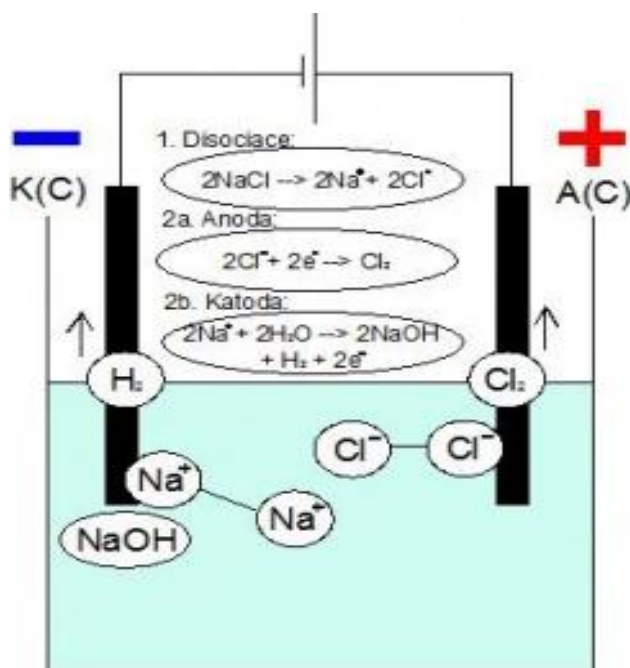


Obr. 1.5 Princip vysokoteplotního elektrolýzéro

1.6.3 Používané elektrolyty

Mezi často používané elektrolyty můžeme zařadit chlorid sodný ($NaCl$), hydrogenuhličitan sodný neboli jedlou sodu ($NaHCO_3$), hydroxid sodný ($NaOH$) nebo hydroxid draselný (KOH).

Chlorid sodný (lidově jedlá sůl) je jedním z nejběžnějších elektrolytů, protože je laciný a snadno přístupný. Na druhou stranu způsobuje sůl korozi elektrod. Při reakci tvoří oranžovohnědé lupínky, které způsobují znečišťování částí zařízení, a tím se snižuje jeho účinnost. Při reakci na katodě dochází k redukci hydroxoniových kationtů a uvolnění vodíku. Vzniklá voda reaguje s kationty sodíku za vzniku roztoku hydroxidu sodného. Na anodě vzniká plynný chlór, což je jedovatý plyn, který může způsobit poleptání. Z tohoto důvodu je použití soli jako elektrolytu značně nevhodné. Jako materiál elektrod se využívají uhlíkové elektrody. Schematicky jsou elektrolýza chloridu sodného a rovnice vznikajících produktů znázorněny na následujícím obrázku. [10], [11]



Obr. 1.6 Elektrolýza NaCl (převzato z [11])

Dalším elektrolytem je **jedlá soda**. Ta je stejně jako kuchyňská sůl levná a snadno dostupná. Nevýhodou je možné zbarvení do hněda na elektrodách nebo samotného elektrolytu. Na katodě je opět vytvářen z hydroxoniových kationtů plynný vodík a voda. Na anodě vzniká oxid uhličitý CO_2 a také částečně oxid uhelnatý CO , který je jedovatý. Proto je použití jedlé sody opět nevhodným řešením. [10]

Hydroxid sodný je poměrně laciná a dostupná látka. V čisté formě se vyskytuje jako pevná látka bílé barvy tvořící malé útvary vypadající jako kamínky. Pro elektrolýzu vody je vhodný, protože v něm nevznikají usazeniny, nežádoucí zbarvení nebo příměsi. Při reakci nevytváří žádné vedlejší produkty. Při práci je s ním nutné zacházet opatrně, protože je to

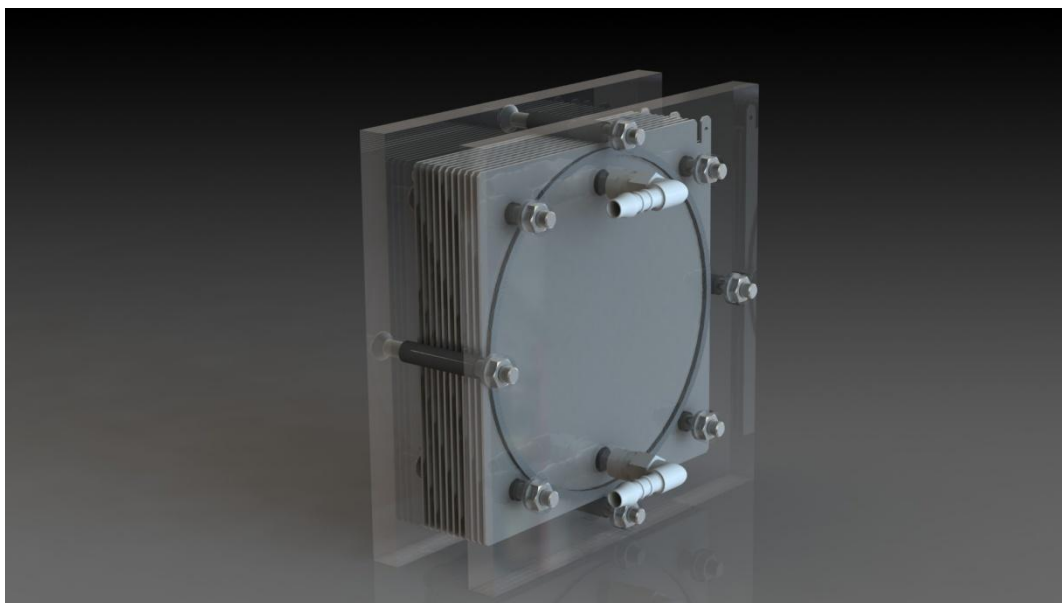
silná žiravina a zdraví škodlivá látka. Čistota plynu HHO při elektrolyze vody s NaOH se pohybuje mezi 95-99%.

Posledním typem používaného elektrolytu je **hydroxid draselný**. Ten je velmi dobře rozpustný ve vodě. Vyskytuje se v podobné formě jako NaOH v podobě malých šupinek. Při procesu elektrolyzy nevytváří žádné usazeniny, nežádoucí zbarvení ani žádné další vedlejší produkty. Je ale také velmi silnou žiravinou a je nutné dbát bezpečnostních opatření, aby nedošlo k poleptání. Často se používá do nemrznoucích směsí, protože snižuje teplotu tuhnutí vody. Tím pádem se zvyšuje rozsah teplot (i pod bodem mrazu), při kterých lze elektrolyzu uskutečnit. Je tedy druhým vhodným řešením elektrolytu.

1.6.4 Konstrukční uspořádání

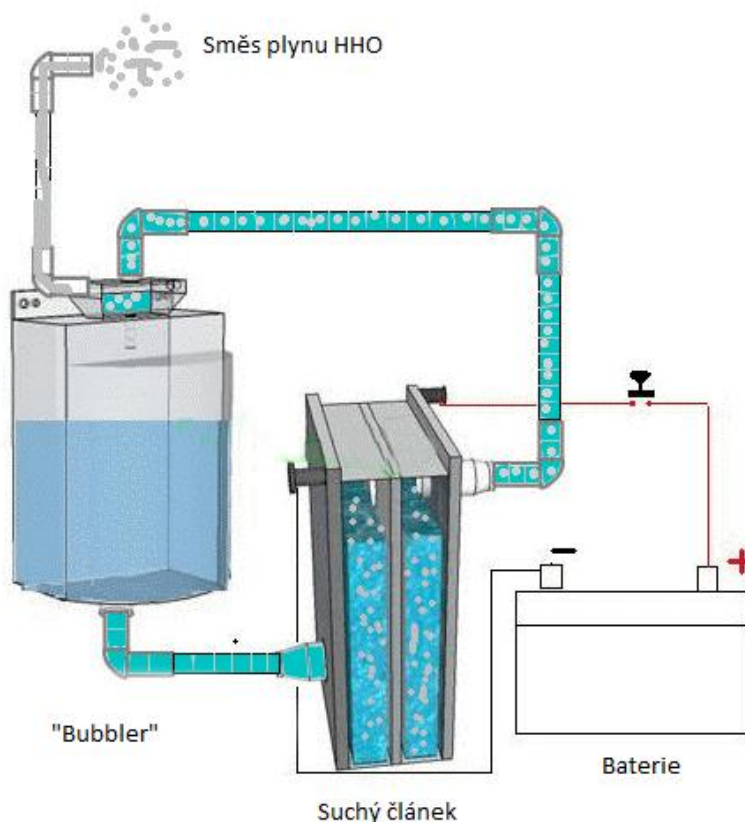
1.6.4.1 Suchý článek

Suchý článek je jedním ze dvou hlavních typů konstrukčních řešení pro elektrolyzu vody, respektive výrobu plynu HHO (nazýván také Brownův plyn). Produkty elektrolyzy zde nejsou odděleny. Kyslík a vodík nejsou jímány separátně, ale pracuje se rovnou s jejich směsí. Suchý článek může být lehce zavádějící název. Je zde využít stále stejný elektrolyt jako u obyčejné elektrolyzy. Rozdíl je v tom, že do elektrolytu není ponořen celý článek. Jednotlivé desky (elektrody) jsou galvanicky odděleny např. gumovým těsněním a elektrolyt je omezen prostorem uvnitř článku. Okraje desek a všechny elektrické připojení jsou vně elektrolytické lázně. Připojení externího zdroje je provedeno pomocí konektoru typu faston na okrajích elektrod. To jsou jediné části, které jsou opravdu suché a daly základ názvu konstrukce jako suchý článek. Příklad této konstrukce vidíme na obrázku Obr. 1.7. Pro průtok elektrolytu a vzniklého plynu jsou v deskách vytvořeny otvory. Podobně se nacházejí otvory i v každé elektrodě uvnitř článku, kterými může elektrolyt protékat. Elektrolyt je skladován v externí nádrži nazývané „bubbler“. Konstrukce suchých článků zajišťuje průchod proudu pouze aktivní plochou elektrod, která je vymezena většinou gumovým těsněním. Celý proud je tak efektivně využit pro vznik HHO plynu. Sendvičová konstrukce příslušného počtu elektrod a těsnění je stažena mezi čely elektrolyzéry a vzniká tak uzavřený prostor pro elektrolyt. [13], [14]



Obr. 1.7 Konstrukce suchého článek (3D model Solidworks)

Výhodami tohoto uspořádání oproti mokrému článek (popsán v kapitole 1.6.4.2) jsou jednoduchá konstrukce, menší oxidace elektrod - anody, vyšší účinnost, vyšší produkce HHO plynu a snadnější údržba.



Obr. 1.8 Princip výroby HHO v suchém článek (zdroj: [15])

1.6.4.2 Mokrý článek

Zásadní rozdíl mezi mokrým a suchým článkem je v jeho konstrukci. V případě mokrého článku jsou elektrody celé ponořené v elektrolytu. Konektivita je zajištěna šroubovými spoji, které jsou vytaženy gumovými průchodkami ven z nádoby. Možné konstrukční řešení je patrné z obrázku Obr. 1.9. Nevýhodou této konstrukce je větší produkce tepla, které způsobuje ohřívání elektrolytu po dobu průběhu procesu a také zvýšenou produkci páry, která se může mísit s vodíkovým plynem. Mokrý článek má menší účinnost než suchý článek, protože na okrajích desek dochází z poklesu výkonu. Mokrý článek je historicky starší, než suchý článek. Dnes se pro své vlastnosti výhradně používá jen konstrukce suchého článku. [14]



Obr. 1.9 Konstrukce mokrého článku (převzato z [16])

1.6.5 Výrobci a dodavatelé suchých článků

Suchý článek je velmi rozšířenou konstrukcí, která je hojně využívána jak v amatérské praxi, tak u profesionálních produktů (např. svářečky) a v poslední době i jako doplňkové zařízení pro zvyšování účinnosti spalovacích motorů. Existují studie, kdy HHO plyn přiváděný do sacího potrubí motoru zvyšuje účinnost procesu spalování, což se projeví

v úspore paliva 20%-30%, sníží se množství škodlivých emisí o 30%-60%, lehce se zvýší výkon motoru a eliminují se usazeniny v motoru. Sníží se také teplota spalin motoru, tím se zvýší jeho životnost, odstraní se karbon a jiné usazeniny v motoru. Návratnost investice je již kolem 8000km dle pořizovací ceny, která se liší u jednotlivých výrobců. Spotřeba vody se pohybuje kolem 0,5l na 1000km. Poměr vyrobených plynů je 66% vodík a 34% kyslík. Velkou výhodou je, že se HHO plyn nikde neskládá a je rovnou využit v procesu spalování. Tím odpadá riziko spojené s jeho skladováním, používání je tedy bezpečné a nehrozí výbuch plynu. [17]

Existuje již celá řada výrobců po celém světě, kteří nabízejí kompletní sestavy těchto zařízení, které se dají přímo nainstalovat do vozidla. Tyto sestavy standardně obsahují HHO generátor (suchý článek), zásobník vody (nádržka), pojistku, spínací relé, elektrické vodiče, hadice pro vedení plynu a média, faston konektory, propojovací kolínka, bezpečnostní jednocestný ventil sání motoru a samozřejmě instalační manuál. Českým výrobcem a prodejcem sestav do aut je např. firma Green Way HHO. Na internetu je k nalezení na stránce www.jednavodu.cz. Kompletní sestavu nabízejí na e-shopu za 5900,- Kč s DPH. Dalším českým prodejcem je <http://www.h2shop.cz>, který nabízí sestavy podle obsahu motoru v rozmezí 4500,- Kč s DPH (obsah motoru do 1800ccm), 5300,- Kč s DPH (obsah motoru do 3000ccm) a 6900,- Kč s DPH (obsah motoru do 4700ccm). K dalším českým internetovým prodejcům patří <http://www.jezdim-na-vodik.cz> nabízející dvě kompletní sady opět rozdělené podle objemu motoru. 6000,- Kč s DPH stojí sestava s objemem motoru do 1,5ccm a 6500,-Kč stojí sestava s objemem motoru do 2,8ccm.

Slovenskými prodejci sestav na internetu jsou <http://www.vodikovypohon.sk>, který nabízí sestavu v přepočtu za 14500,- Kč s DPH a <http://www.hho4cars.eu>, který nabízí sestavy v rozmezí 7500,- Kč až 11500,- Kč s DPH. Cena závisí na typu a výkonu auta. Dalších 2500,- Kč může být cena za montáž do vozu.

2 Návrh klíčových komponent elektrolýzéro

2.1 Technická specifikace jednotky elektrolýzéro (HHO generátoru)

2.1.1 Výpočet hmotnosti látky vyloučené při elektrolýze vody

Pomocí Faradayových zákonů popsaných v kapitole 1.2 lze vypočítat hmotnost vyloučené látky, tedy kyslíku a vodíku. Musíme brát v potaz, že kyslík i vodík jsou plyny, tudíž vznikají jen ve dvouatomových molekulách. Hmotnost vyloučené směsi spočítáme jako součet hmotnosti kyslíku a vodíku takto:

$$m = m_H + m_O \quad (2.1)$$

$$m = \frac{M_{mH} \cdot Q}{F \cdot z_H} + \frac{M_{mO} \cdot Q}{F \cdot z_O} \quad (2.2)$$

V MFCHT nalezneme hodnoty molární hmotnosti M_m , počet elementárních nábojů z a Faradayovu konstantu F :

$$M_{mH} = 1,0080 \text{ g/mol}$$

$$M_{mO} = 15,9994 \text{ g/mol}$$

$$z_H = 2$$

$$z_O = 4$$

$$F = 96485,309 \text{ C/mol}$$

Rovnice po dosazení a upravení bude vypadat takto:

$$\begin{aligned} m &= Q \left(\frac{2 \cdot 1,008}{96485,309 \cdot 2} + \frac{2 \cdot 15,9994}{96485,309 \cdot 4} \right) = Q(104 \cdot 10^{-7} + 829 \cdot 10^{-7}) = \\ &= Q \cdot 933 \cdot 10^{-7} [\text{g}] \end{aligned} \quad (2.3)$$

Rovnici též můžeme přepsat jako:

$$m = I \cdot \Delta t \cdot 933 \cdot 10^{-7} [\text{g}] \quad (2.4)$$

Celková hmotnost vyloučeného plynu je uvedena v rovnici (2.4) a závisí na proudu, který elektrolytem protéká, a na čase. Když dáme jednotlivé hmotnosti prvků do zlomku, je poměr hmotnosti kyslíku a vodíku vyloučeného při reakci jako 1:8. V praxi je velmi těžké pracovat

s hmotností plynu. Mnohem jednodušší je to s objemem plynu. Hmotnost plynu se nám bude hodit právě pro výpočet objemu.

2.1.2 Výpočet objemu látky vyloučené při elektrolyze vody

Plyny mají za normálních podmínek stejný molární objem V_m . Obecně známé pravidlo říká, že jeden mol plynu zaujímá objem $V_m=22,4$ l/mol. Pro objem vyloučeného množství plynu pak platí vztah:

$$V = n \cdot V_m \quad (2.5)$$

kde n je látkové množství (počet molů) a vypočítá se ze vztahu:

$$n = \frac{m}{M_m} \quad (2.6)$$

Celkový objem vyloučené látky je opět součtem objemu kyslíku a vodíku:

$$V = V_H + V_O \quad (2.7)$$

Po dosazení za látkové množství a za hmotnost látek můžeme psát:

$$V = \frac{m_H}{M_{mH}} \cdot V_m + \frac{m_O}{M_{mO}} \cdot V_m = \frac{M_{mH} \cdot Q}{F \cdot z_H} \cdot V_m + \frac{M_{mO} \cdot Q}{F \cdot z_O} \cdot V_m = \frac{Q}{F \cdot z_H} \cdot V_m + \frac{Q}{F \cdot z_O} \cdot V_m \quad (2.8)$$

Po číselném dosazení bude rovnice vypadat takto:

$$V = Q \left(\frac{22,4}{96485,309 \cdot 2} + \frac{22,4}{96485,309 \cdot 4} \right) = Q(116 \cdot 10^{-6} + 58 \cdot 10^{-6}) = Q \cdot 174 \cdot 10^{-6} [l] \quad (2.9)$$

Rovnici opět můžeme přepsat jako:

$$V = I \cdot \Delta t \cdot 174 \cdot 10^{-6} [l] \quad (2.10)$$

Objem plynu vyloučené látky lze též celkem jednoduše vypočítat pomocí hustoty jako:

$$V = \frac{m_H}{\rho_H} + \frac{m_O}{\rho_O} [l] \quad (2.11)$$

kde $\rho_H = 1,409 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a $\rho_O = 0,0889 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ při teplotě 0°C a tlaku 100 KPa.

Celkový objem plynu vyloučené látky tedy opět závisí na protékaném proudu a čase. Při výpočtu poměrů objemů vyloučených látek vychází kyslík/vodík jako 1:2.

2.1.3 Výkon elektrolyzéro

Výkon elektrolyzéro se neměří klasicky ve wattech, ale v mililitrech objemu plynu vyprodukovaného za jednu minutu při určitém příkonu ve wattech. Tato veličina je nazývána *MMW* a vypočítáme ji takto:

$$MMW = \frac{V}{U \cdot I} [ml \cdot min^{-1} \cdot W] \quad (2.12)$$

kde *V* je objem směsi HHO v mililitrech vyprodukované za 1 min.

Výkon můžeme vypočítat i z celkové hmotnosti vyprodukovaného plynu jako *GMW* takto:

$$GMW = \frac{m}{U \cdot I} [g \cdot min^{-1} \cdot W] \quad (2.13)$$

kde *m* představuje hmotnost směsi HHO v gramech vyprodukované za 1 min.

2.1.4 Návrh rozměrů elektrolyzéro

Pro stanovený objem plynu musí elektrolytem procházet určitý proud *I*. Střední hodnota proudu bude udržována na konstantní na požadované hodnotě pulzním měničem. Množství elektrolytu a rozměry elektrod lze vypočítat pomocí Ohmova zákona, kdy ze známé hodnoty proudu a napětí vypočítáme celkový odpor elektrolyzéro.

Ohmův zákon:

$$R = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (2.14)$$

kde

- *R* je elektrický odpor
- *U* je elektrické napětí
- *I* je elektrický proud

Celkový odpor jedné elektrody vypočítáme ze vztahu:

$$R_{elda} = \rho_{316L} \cdot \frac{a}{S_{elda}} [\Omega] \quad (2.15)$$

kde:

- ρ_{316L} je rezistivita nerezové oceli

- S_{elda} je aktivní plocha elektrody
- a je tloušťka elektrody

Celkový odpor jedné vrstvy elektrolytu vypočítáme ze vztahu:

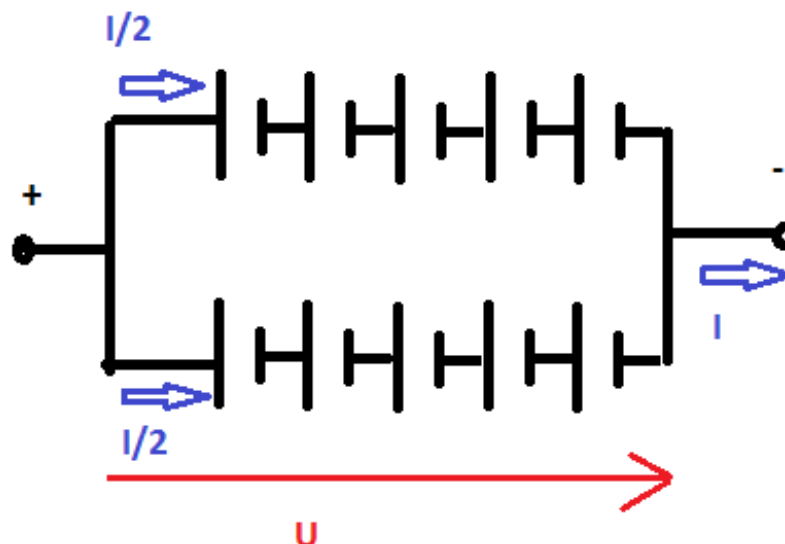
$$R_{elyt} = \rho_{elyt} \cdot \frac{b}{S_{elyt}} [\Omega] \tag{2.16}$$

kde:

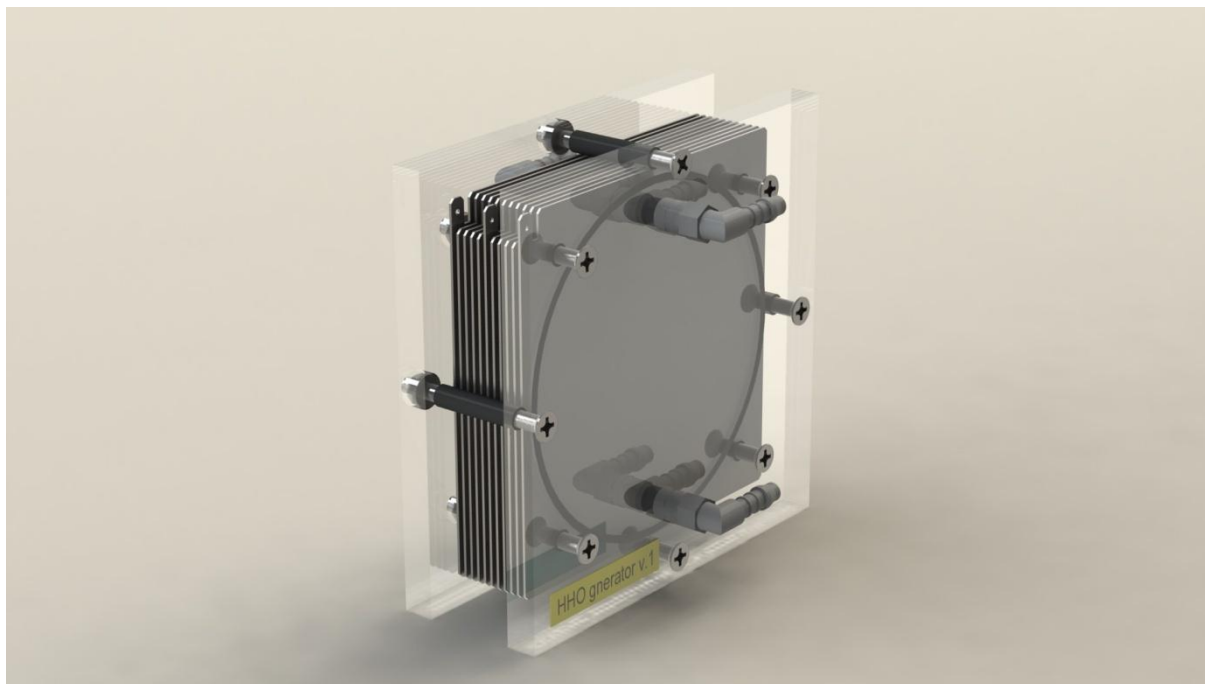
- ρ_{elyt} je rezistivita (měrný elektrický odpor elektrolytu)
- S_{elyt} je plocha elektrolytu
- b je tloušťka elektrolytu mezi dvěma elektrodami

2.1.5 Výpočet parametrů elektrolyzéro

Elektrolyzér použitý pro diplomovou práci obsahuje 11 elektrod z nerezové oceli 316L. Elektrody jsou čtvercového tvaru se stranou 138mm a jejich tloušťka je $a=1\text{mm}$. Mezi elektrodami je gumové těsnění kruhového tvaru s vnitřním průměrem $d=128\text{mm}$ a tloušťkou 2mm. Elektrody mají kruhové otvory pro cirkulaci elektrolytu mezi jednotlivými komorami. Prostor mezi elektrodami je vyplněn elektrolytem. Požadovaná minimální hodnota napětí z měniče je 11V, aby při napájení z autobaterie byla potřebná rezerva pro regulaci proudu. Elektrolyzér je vyroben jako dva paralelně spojené suché články se společně vyvedenou elektrodou uprostřed. Celkový proud je součtem proudů z obou článků. Jelikož oba články jsou identické, předpokládáme polovinu celkového proudu každou větví článku. Zapojení elektrolyzéro je vidět z obrázku Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Schéma zapojení elektrolyzéro



Obr. 2.2 Konstrukční uspořádání (reálný model)

Odpor elektrolyzéro musíme brát jako dva paralelně řazené odpory, spočítáme jej jako:

$$R = \frac{1}{2} (6 \cdot R_{elda} + 5 \cdot R_{elyt}) [\Omega] \quad (2.17)$$

Pro zjednodušení můžeme předpokládat stejnou aktivní plochu elektrod jako elektrolytu. Po úpravě tedy dostaneme vztah:

$$R = \frac{1}{2 \cdot s} (6 \cdot \rho_{316L} \cdot a + 5 \cdot \rho_{elyt} \cdot b) [\Omega] \quad (2.18)$$

Rezistivita (měrný elektrický odpor) oceli 316L dle tabulek je:

$$\rho_{ocel} = 7,4 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{cm} = 0,74 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{mm}$$

Konduktivita (měrná elektrická vodivost) roztoku KOH s 25% koncentrací je dle tabulek:

$$\gamma_{KOH} = 0,890 \text{ S/cm} = 0,0890 \text{ S/mm}$$

Měrný odpor roztoku KOH spočteme jako převrácenou hodnotu měrné vodivosti:

$$\rho_{KOH} = \frac{1}{\gamma_{KOH}} = 11,236 \Omega/\text{mm} \quad (2.19)$$

Plochu elektrod vypočteme dle vzorce:

$$s = \pi \cdot d = \pi \cdot 128 = 402,124 \text{ mm}^2 \quad (2.20)$$

kde d je průměr elektrod

Dále vypočteme celkový odpor elektrolyzéry jako součet odporu oceli a mědi. V úvahu bereme zapojení elektrolyzéry nastíněné na obrázku Obr. 2.1.

$$R = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{s} (6 \cdot \rho_{316L} \cdot a + 5 \cdot \rho_{elyt} \cdot b) = \frac{1}{2 \cdot 402,124} (6 \cdot 1,84 \cdot 10^{-8} + 5 \cdot 2 \cdot 11,236) =$$

$$\frac{1}{804,248} (11 \cdot 10^{-8} + 112,36) = 0,2794 \ \Omega \quad (2.21)$$

Z předcházejícího výpočtu je vidět, že odpor oceli je zanedbatelný a hlavní roli hraje odpor elektrolytu, který je závislý na koncentraci roztoku KOH. Ze známého odporu již můžeme dopočítat potřebný proud elektrolyzérem z Ohmova zákona (2.14).

$$I = \frac{U}{R} = \frac{11}{0,2794} = 39,4 \text{ A} \quad (2.22)$$

Dále je nutné spočítat objem vyloučeného plynu. Objem spočítáme pomocí hmotností ze vzorců (2.2), (2.3) a (2.11). Jako hodnotu proudu budeme dosazovat vypočtenou hodnotu I ze vzorce (2.22). Předpokládaný průtok je za časový interval $\Delta t = 1 \text{ min}$. To nám následně pomůže dopočítat výkon elektrolyzéry.

Hmotnost vyloučeného plynu:

$$m = m_H + m_O = \frac{M_{mH} \cdot Q}{F \cdot z_H} + \frac{M_{mO} \cdot Q}{F \cdot z_O} = I \cdot \Delta t (104 \cdot 10^{-7} + 829 \cdot 10^{-7}) = 39,4 \cdot 60 \cdot$$

$$(104 \cdot 10^{-7} + 829 \cdot 10^{-7}) = 24,59 \cdot 10^{-3} + 195 \cdot 10^{-3} = 0,22 \text{ g} \quad (2.23)$$

Objem vyloučeného plynu počítaný z hustoty:

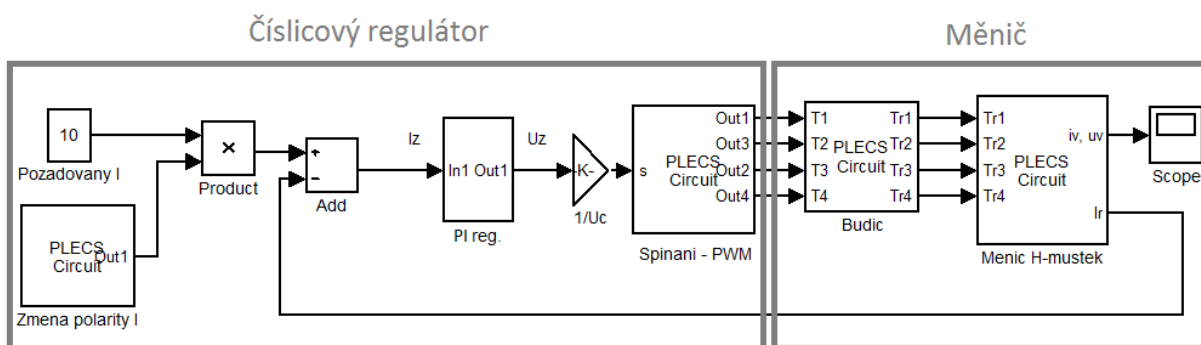
$$V = \frac{m_H}{\rho_H} + \frac{m_O}{\rho_O} = \frac{24,59 \cdot 10^{-6}}{1,409} + \frac{195 \cdot 10^{-6}}{0,0889} = 0,01 + 2,22 = 2,23 \text{ l} \quad (2.24)$$

Výkon elektrolyzéry pak vychází:

$$MMW = \frac{V}{U \cdot I} = \frac{2,2 \cdot 10^3}{11 \cdot 39,4} = 5,07 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot W \quad (2.25)$$

2.2 Řídicí jednotka elektrolyzáru

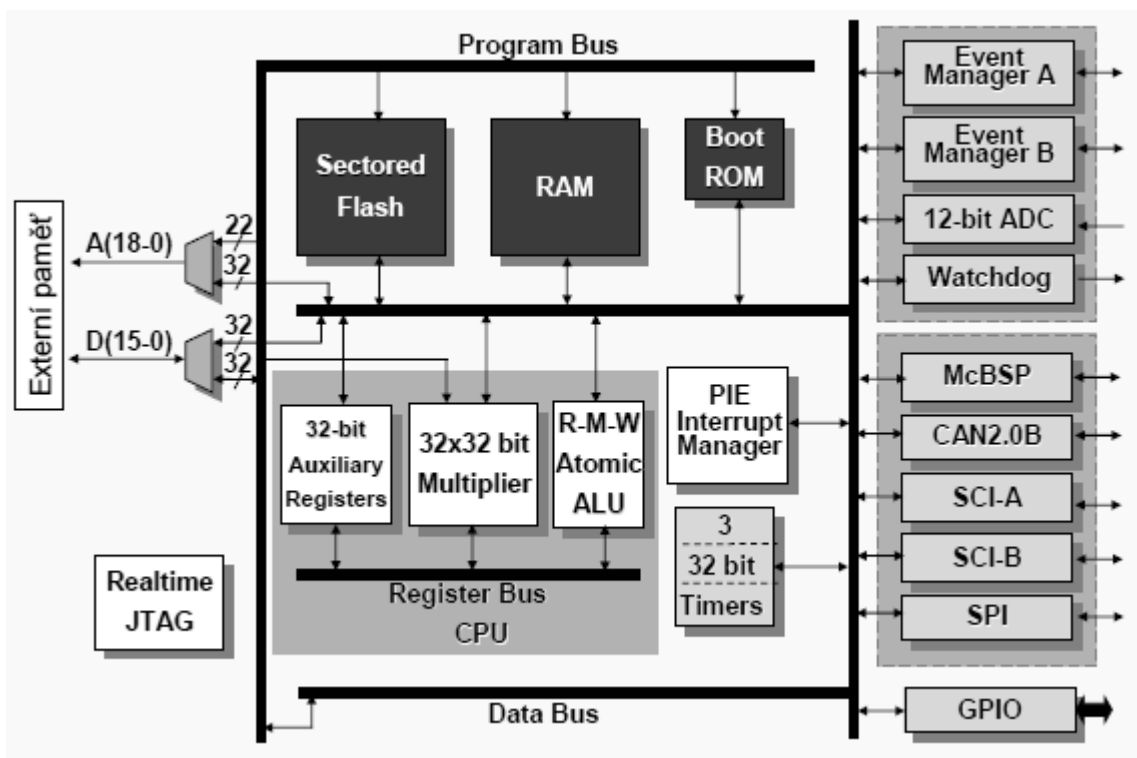
Řídicí jednotka je zařízení, které umožňuje regulaci proudu a tím pádem i regulaci množství vyrobeného plynu. Dále je zde prováděna periodická změna polarity proudu. Funkčně je tvořena ze dvou bloků. Prvním blokem je číslicový regulátor, který obsahuje PI regulátor a PWM modulátor. Druhý blok se skládá z měniče, ke kterému náleží i budič. Do regulátoru vstupuje zaprvé požadovaná hodnota proudu upravená o blok změny polarity a zadruhé zpětná vazba, kde je měřen skutečný proud měničem. Schéma je patrné z obrázku:



Obr. 2.3 Řídicí jednotka elektrolyzáru

2.2.1 Popis číslicového regulátoru (volba mikrokontroléru)

V číslicovém regulátoru probíhá zmíněná regulace proudu. Byl vybrán tzv. číslicový regulátor s DSP od firmy Texas Instruments typ TMS320F2812. Číslicový regulátor je univerzálně použitelný pro celou řadu pohonářských i jiných aplikací. Tomu odpovídá výkon DSP a také jeho vybavenost s přizpůsobením napěťových a proudových úrovní analogových a binárních signálů. Je zde možnost připojení nejrůznějších snímačů. Procesor je určen pro programování v pevné řádové čárce. Na obrázku Obr. 2.4 vidět funkční schéma mikrokontroléru. Tento mikrokontrolér byl zvolen s důvodu dostatečného množství GPIO, možnosti komunikace SCI nebo zabudovanému A/D převodníku. Také je tento typ podporován při programování v programu MATLAB-SIMULINK, kde byla simulována a navržena struktura algoritmu řízení.



Obr. 2.4 Funkční schéma TMS320F2812 (převzato z [27])

V další tabulce jsou vyznačeny důležité parametry DSP TMS320F2812.

Tab. 1 Vybrané parametry TMS320F2812 [27]

High-Performance Static CMOS Technology – 150 MHz (6.67-ns Cycle Time)	Motor Control Peripherals – Two Event Managers (EVA, EVB)
Up to 56 Individually Programmable, Multiplexed General-Purpose Input/Output	Three 32-Bit CPU-Timers
Harvard Bus Architecture	Serial Port Peripherals – Serial Peripheral Interface (SPI)
On-Chip Memory – Up to 128K x 16 Flash	– Two Serial Communications Interfaces
Three External Interrupts	- (SCIs), Standard UART
Peripheral Interrupt Expansion (PIE) Block That Supports 45 Peripheral Interrupts	12-Bit ADC, 16 Channels – 2 x 8 Channel Input Multiplexer

2.2.2 Popis měniče

Jako vhodná varianta snižovacího pulzního měniče bylo zvoleno zapojení do tzv. H-můstku z důvodu přepínání polaritý proudu. Jako spínací prvky je možné použít IGBT nebo MOSFET tranzistory. Konstrukčně optimální řešení je použití modulů, ve kterých je integrován celý H-můstek. Součástky IGBT jsou vhodné zejména na vyšší napětí než MOSFET. Pro náš měnič se dají použít obě varianty. Měnič byl dimenzován na požadované

parametry a byl zvolen způsob přirozeného vzduchového chlazení. Měnič s IGBT tranzistory je napětově předdimenzovaný, protože se do budoucna uvažuje s možností napájení elektrolyzérů z vyššího napětí, než je autobaterie. Dále byl vybrán pro měnič vhodný budicí obvod viz kapitola 2.4. Způsob řízení PWM modulací je vysvětlen v kapitole 2.2.4.

2.2.3 Postup realizace

Celý návrh řídicí jednotky je proveden v programu MATLAB od firmy MathWorks. Jsou využívány nadstavbové bloky SIMULINK a PLECS. MATLAB je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk. MATLAB umožňuje počítání s maticemi, vykreslování 2D i 3D grafů funkcí, implementaci algoritmů, počítačovou simulaci, analýzu a prezentaci dat i vytváření aplikací včetně uživatelského rozhraní. MATLAB obsahuje několik nadstavbových bloků rozšiřujících jeho funkci. Jedním z těchto bloků je SIMULINK, který umožňuje simulaci dynamických systémů pomocí programování blokových schémat. Podblokem SIMULINKu je PLECS, který je orientovaný na výkonovou elektroniku a také umožňuje provádět tepelné výpočty.

Nejdříve byl navržen algoritmus řízení podle požadovaného zadání. Dále bylo nutné provést simulaci řídicí jednotky, kde byly navrženy hodnoty PI regulátoru a byla provedena simulace funkčnosti celého systému s modelem elektrolyzérů jako RLC člunek. Poté byla provedena simulace tepelných poměrů a návrh chlazení pro měnič. Dimenzování měniče a chlazení bylo následně ověřeno analytickým výpočtem. Dále byl dvěma způsoby implementován algoritmus řízení, a to v programovacím jazyce C a v SIMULINKu včetně komunikace po USB. Správnost algoritmu řízení měniče v součinnosti s elektrolyzérů byla na závěr ověřena měřením.

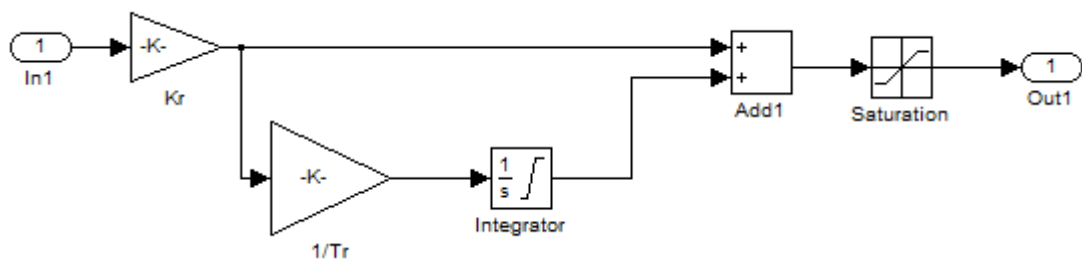
2.2.4 Simulace celého systému

Algoritmus řízení byl navržen pro změnu polaritu proudu a také regulaci proudu. Regulace proudu zajišťuje regulaci množství vyrobeného plynu. Simulační schéma je patrné z obrázku Obr. 2.3. Provést simulaci bylo nutné pro správné nastavení PI regulátoru, to znamená určení konstant regulátoru K_P a T_R . Na vstup regulátoru je vedena požadovaná hodnota proudu násobená změnou polaritu proudu. Druhou veličinou vstupující do regulátoru je zpětná vazba měření proudu. Regulační odchylka je zpracována PI regulátorem. Z PI regulátoru vystupuje hodnota poměrného sepnutí, která je vedena do porovnávacího bloku tvorby PWM. V bloku PLECS je vytvořena simulace H-můstkového měniče složeného

z IGBT tranzistorů, kam jsou přivedeny výsledné spínací pulzy z PWM modulátoru. Měřením byly zjištěny RLC hodnoty elektrolyzéry, které se následně použily do simulace. Dle měření jsou tyto hodnoty 8Ω a $360\mu\text{F}$ a součástky jsou zapojeny paralelně. Změřená indukčnost elektrolyzéry byla velice malá. Byla přidána vyhlazovací indukčnost $0,5\text{mH}$. Velikost indukčnosti byla stanovena empiricky na základě simulace. V simulaci je přidán ještě tlumicí odpor s hodnotou $0,1\Omega$. Struktura simulačního modelu je vytvořena podle algoritmu řízení. Simulace je provedena se spojitými hodnotami oproti návrhu algoritmu řízení, který pracuje s hodnotami v pevné řádové čárce. Dále bude popsána funkce jednotlivých komponent z obrázku Obr. 2.3.

V bloku *Změna polarity I* je provedena změna polarity požadované hodnoty proudu pomocí vynásobení s periodicky se měnícím kladným a záporným jednotkovým signálem.

Na obrázku Obr. 2.5 je vidět detail regulátoru proudu. V tomto případě se jedná o spojitý PI regulátor.



Obr. 2.5 Struktura spojitého PI regulátoru

Do vstupu *In1* je přivedena regulační odchylka mezi požadovanou a změřenou hodnotou proudu. Signál je vynásoben proporcionálním zesílením K_r , integračním zesílením K_i a pak jsou sečteny obě složky. Konstanta K_i je tvořena z převrácené hodnoty rychlosti regulace T_r a vynásobena K_r . Před výstupem je hodnota omezena saturací, protože následující blok PWM je omezen na vstupu hodnotami v rozsahu $\langle -1; 1 \rangle$.

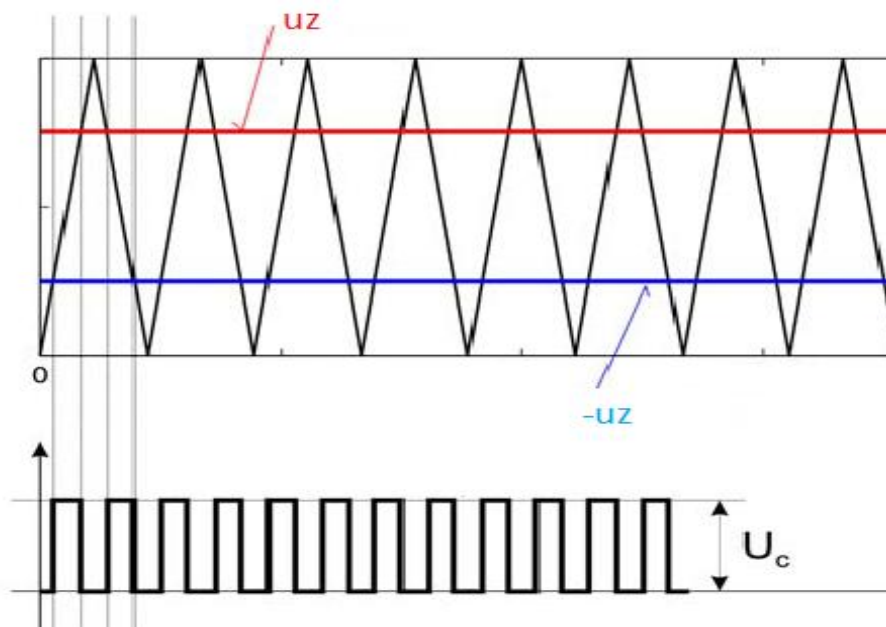
Blok PWM modulátoru je obecně tvořen nosným pilovitým signálem, který je porovnáván se signálem řídicím (modulačním). Výstupem jsou pak spínací pulzy pro jednotlivé tranzistory s příslušnou střídou. Pro řízení H-můstku je použita speciální modulace PWM, která zajišťuje rovnoměrné rozdělení ztrát, kdy jsou vždy spínány dva tranzistory křížem. Modulační signály jsou dva a mají stejnou hodnotu s opačnou polaritou. Hodnota pily je porovnána s kladnou hodnotou modulačního signálu. Je vytvořen spínací pulz o určité šířce

pro tranzistor v jedné větvi obvodu. To samé je provedeno i pro druhou fázi. Pulz na hradlo tranzistoru je vytvořen tak, že jeho hodnota je buď rovna jedné, když je pila výše než modulační signál, nebo nula, když je pila níže než modulační signál. Signály ze všech čtyř tranzistorů spínají dle spínacího diagramu na obrázku Obr. 2.9. Tím vzniká výsledné napětí na měniči, které má hodnotu nula nebo napětí U_c , podle aktuálně sepnuté spínací kombinace tranzistorů. Pro spínací diagram znázorněný na obrázku Obr. 2.9 jsou možné 4 kombinace sepnutí, které jsou znázorněny v tabulce Tab. 2.

Tab. 2 Výstupní napětí na měniči

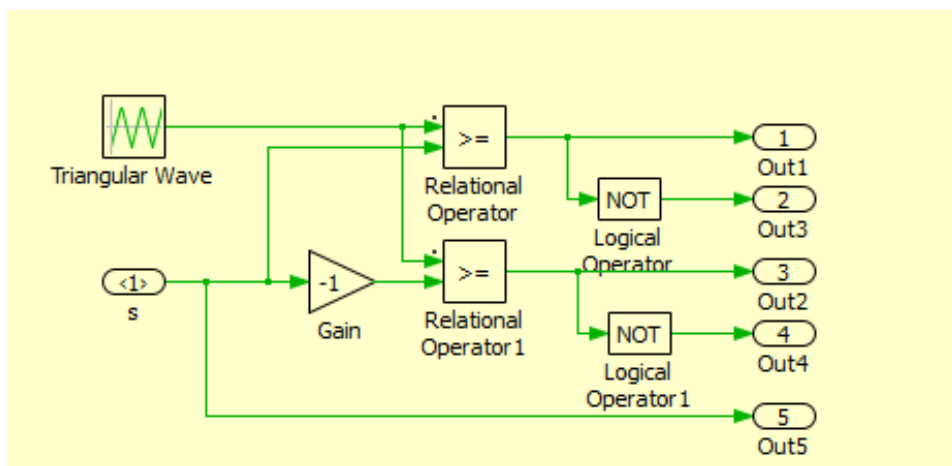
Sepnuté tranzistory		Výstupní napětí [V]
Tr1	Tr4	U_c
Tr1	Tr3	0
Tr2	Tr4	U_c
Tr2	Tr3	0

Tvorba PWM je vysvětlena na obrázku Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Tvorba PWM

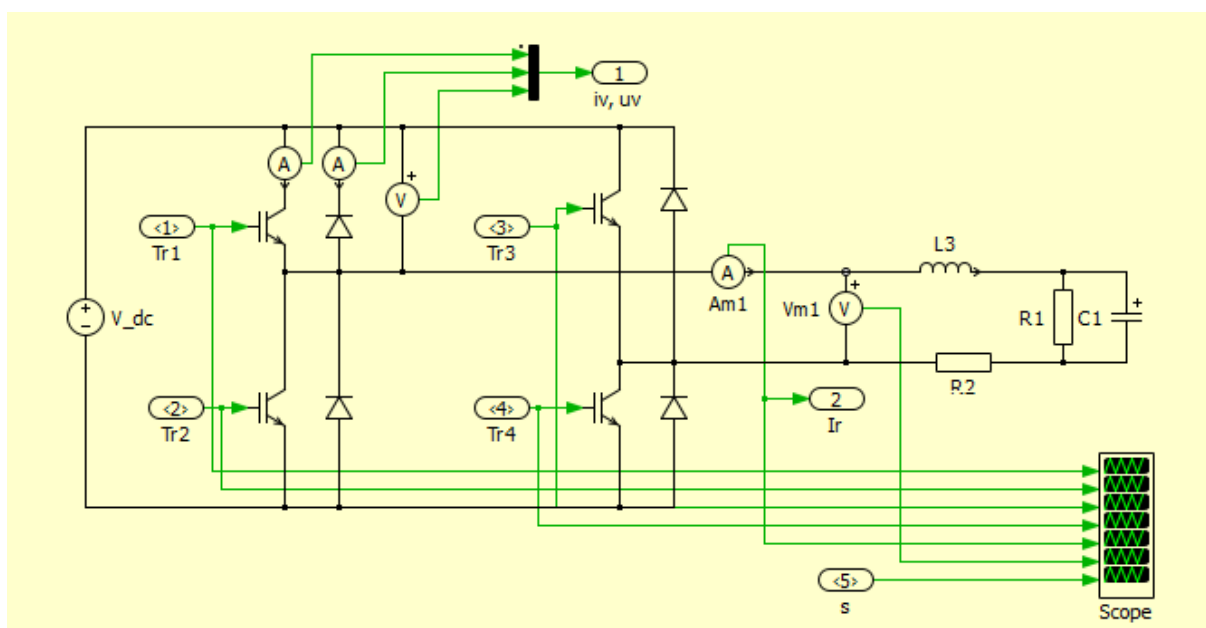
Na obrázku Obr. 2.7 je znázorněna struktura bloku tvorby PWM označená jako *Spínání – PWM* z obrázku Obr. 2.3.



Obr. 2.7 Spínání - PWM

Vstupem s je blok připojen na výstup z PI regulátoru proudu. Signál je veden na porovnávací blok. Pro první fázi měniče má signál kladnou polaritu a pro druhou fázi měniče zápornou polaritu. Signál je dále porovnán s nosným pilovitým signálem v bloku *Relation Operator* a zaveden na jednotlivé tranzistory pomocí výstupů *Out1* a *Out2* tak, že na horní tranzistor v první větvi je signál veden přímo a na spodní tranzistor je signál negován, čímž je ošetřeno zkratování zdroje. Stejně tak je signál vyveden na druhou fázi měniče pomocí výstupů *Out3* a *Out4*.

Na obrázku Obr. 2.8 je znázorněn blok výkonového obvodu z obrázku Obr. 2.3, kde je použita H-můstková topologie, která umožňuje čtyřkvadrantový provoz měniče. Zátěž symbolizuje elektrický model elektrolyzéry vody.



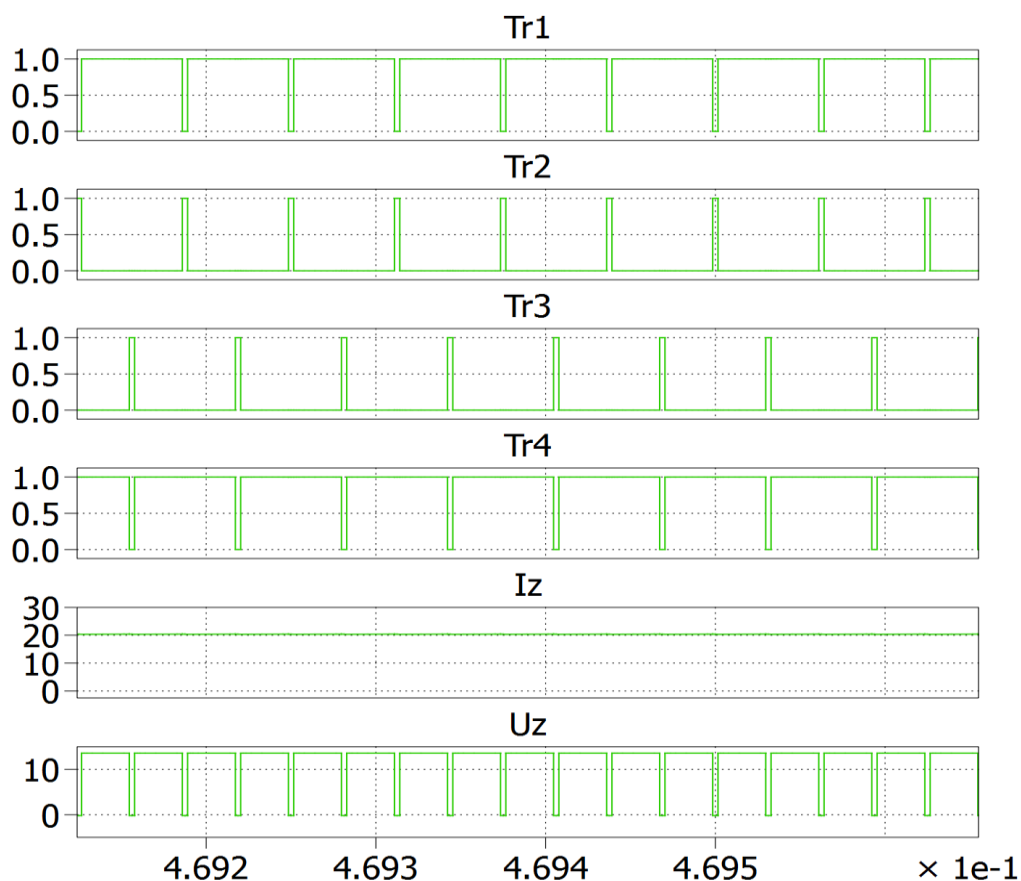
Obr. 2.8 Pulzní měnič (H-můstek)

Parametry simulace jsou v tabulce Tab. 3 vztahující se k obrázku Obr. 2.5 (hodnoty PI regulátoru a Obr. 2.8 (hodnoty výkonového obvodu).

Tab. 3 Parametry simulace

Kr	1,5	-
Tr	0,05	-
L3	0,5	mH
R1	8	Ω
C1	360	μ F
R2	0,1	Ω
fs	16	kHz
z	0,9	-
Iz	20	A
Uz	14	A

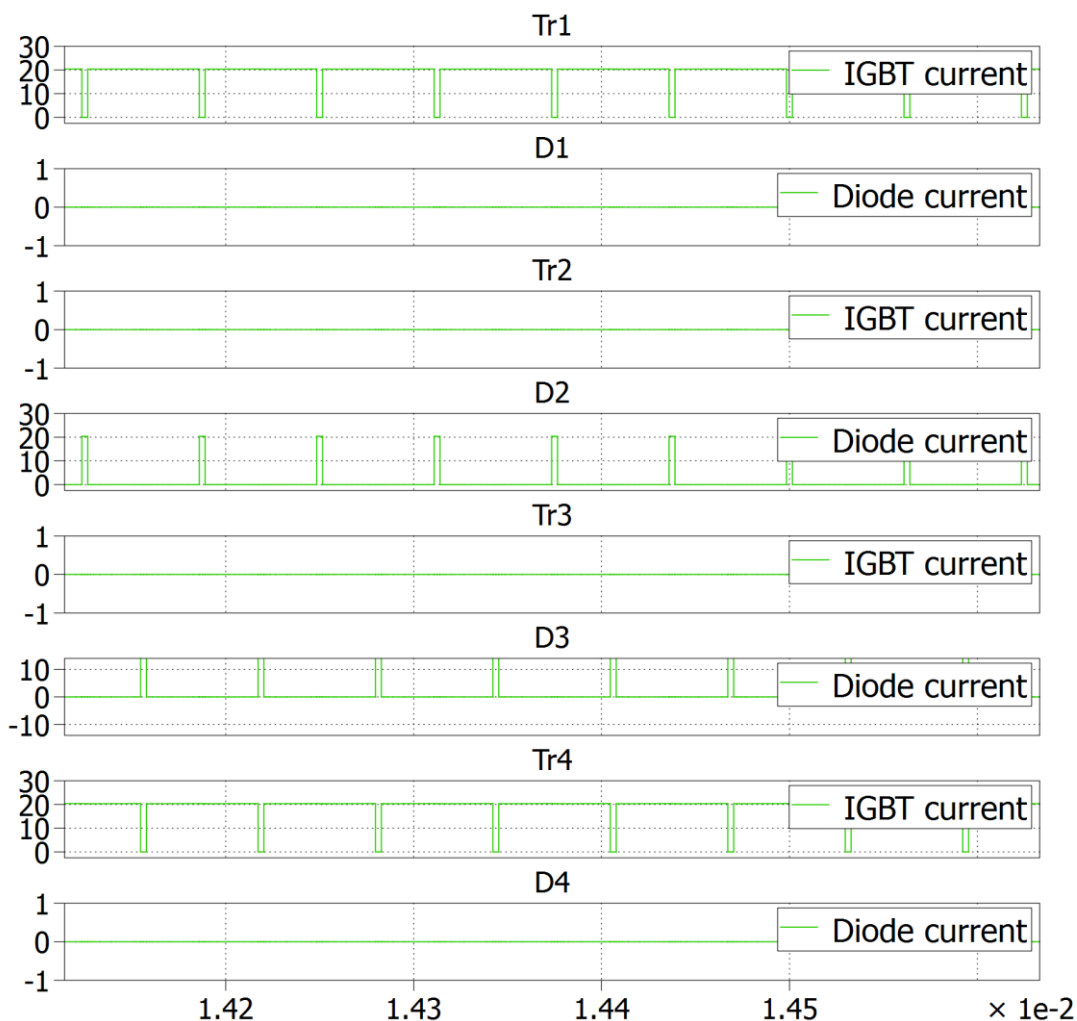
Na posledním obrázku ze simulace je vidět detail výsledných průběhů spínání všech tranzistorů a také proud a napětí na zátěži. Požadovaná hodnota proudu je v simulaci nastavena na 20A. Simulace je zachycena v okamžiku kladné polarity napětí i proudu.



Obr. 2.9 Spínání tranzistorů, proud a napětí na zátěži

2.3 Dimenzování výkonových prvků měniče

Dalším krokem je provést dimenzování pulzního měniče, který je součástí řídicí jednotky elektrolýzérů. Měnič je složený ze čtyř tranzistorů se zpětnými diodami. Při výběru polovodičových prvků vycházíme vždy z nejnepříznivějšího stavu, který může na součástce nastat. V našem případě jsou tranzistory spínány pomocí PWM algoritmem řízení popsáným v kapitole 2.2.4. Tento typ modulace byl zvolen, protože nejvíce vyhovuje požadavku na rovnoměrné rozložení ztrát na měniči. Nejhorší stav, který může nastat, je při poměrném sepnutí blízkému se k jedné, protože se uplatní propustné i spínací ztráty. Spínací ztráty budou převážně záviset na spínací frekvenci 16kHz. Struktura měniče je patrná z obrázku Obr. 2.8 v kapitole 2.2.4. Proudové poměry pro všechny součástky s nastaveným poměrným sepnutím $z=0,9$ jsou vidět na následujícím obrázku. V jedné větvi vede vždy pouze jeden (horní) tranzistor a jedna (spodní) dioda.



Obr. 2.10 Proudové poměry všemi součástkami pro poměrné sepnutí $z=0,9$

Pro výpočet ztrát je potřeba pracovat se střední a efektivní hodnotou proudu, která závisí na poměrném sepnutí.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{z \cdot T} i(t)^2 dt} = \sqrt{f \cdot \int_0^{z/f} I_{zm}^2 dt} = \sqrt{f \cdot [I_{zm}^2 \cdot t]_0^{z/f}} = \sqrt{f \cdot I_{zm}^2 \cdot \frac{z}{f}} = \sqrt{z} \cdot I_{zm} \quad (2.26)$$

$$I_{stř} = \frac{1}{T} \int_0^{z \cdot T} i(t) dt = 16000 \cdot \int_0^{z/f} I_{zm} dt = f \cdot [I_{zm} \cdot t]_0^{z/f} = f \cdot I_{zm} \frac{z}{f} = z \cdot I_{zm} \quad (2.27)$$

Při dimenzování budeme vycházet z těchto hodnot:

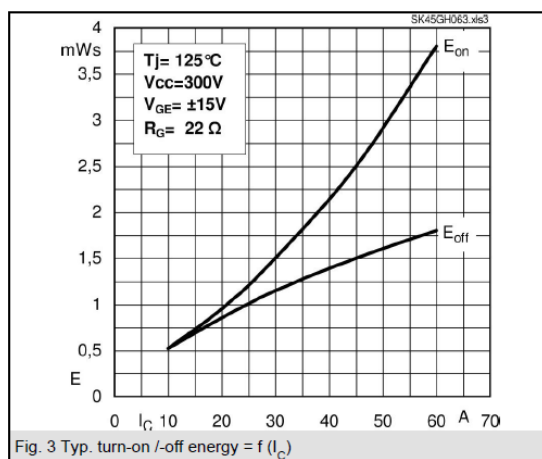
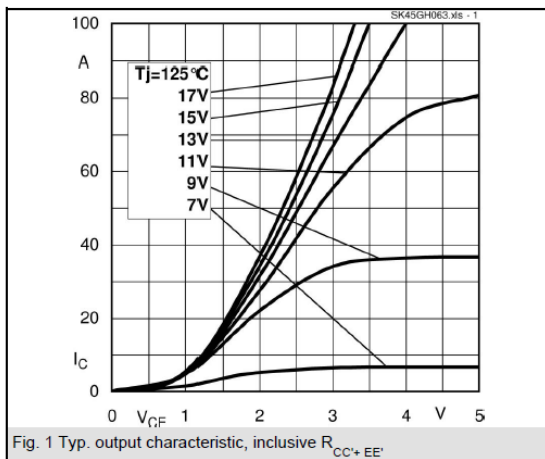
- Napájecí napětí měniče: $U_{max}=14V$
- Maximální proud zátěži: $I_{dmax}=20A$
- Teplota okolí: $T_a=50^\circ C$
- Spínací frekvence: $f=16\text{ kHz}$
- Způsob modulace: PWM s rovnoměrným rozložením ztrát (viz. kapitola 2.2.4)
- Poměrné sepnutí: $z=0,9$

2.3.1 Dimenzování IGBT měniče (analytický výpočet)

Při dimenzování IGBT tranzistorů byla použita literatura [21]. Jako vhodný IGBT modul byl vybrán SK 45 GH 063 od firmy Semikron. Modul se skládá ze čtyř tranzistorů a jejich zpětných diod tak, že tvoří H-můstek. Datový list lze nalézt na [22]. Parametry potřebné pro výpočet jsou shrnuty v následující tabulce Tab. 4 a charakteristiky na obrázku Obr. 2.11.

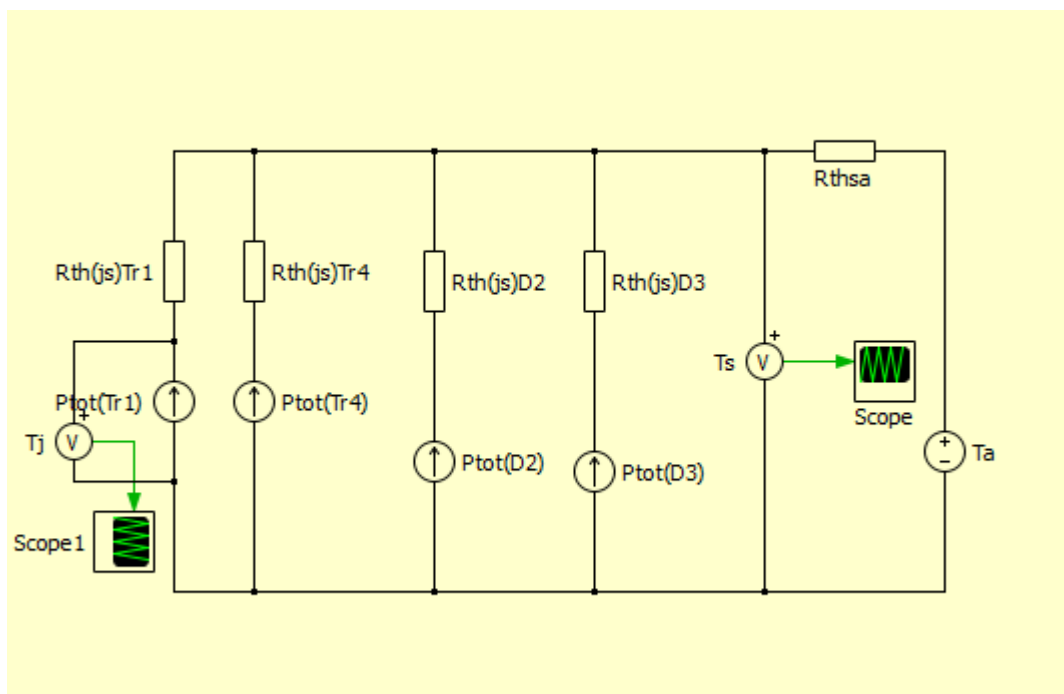
Tab. 4 Důležité parametry pro dimenzování IGBT měniče

Vstupní hodnoty Tr		Vstupní hodnoty D	
Uto	1 V	Uto	0,85 V
It	20 A	It	2 A
Ief	20 A	Ief	6,3 A
Rv	20 mΩ	Rvr	8 mΩ
Ud	14 V	Ud	14 V
Uvn	300 V	Uvn	300 V
Izm	20 A	Izm	20 A
Eon	1 mWs	Err	0,9 mWs
Eoff	0,8 mWs	Krr	0,000045 Krr=Err/It
Kon	0,00005 Kon=Eon/It	Rth(j-s)	1,2 kW
Koff	0,00004 Koff=Eoff/It	Tj(max)	125 °C
Rth(js)	1 k/W	Ta	50 °C
Tj(max)	125 °C		
Ta	50 °C		



Obr. 2.11 V-A charakteristika a spínací energie IGBT měniče

Výrobce tohoto IGBT modulu v katalogovém listu udává hodnotu tepelného odporu mezi čipem a chladičem $R_{TH(jc)}$. Pak následuje tepelný přechod mezi chladičem a okolím $R_{TH(sa)}$. Použitím výše uvedeného modulu je dána koncepce chlazení měniče. Náhradní tepelné schéma je na obrázku Obr. 2.12.



Obr. 2.12 Tepelné náhradní schéma měniče (tepelné ztráty od aktivních prvků v režimu kladného výstupního napětí)

Ztrátový výkon pro jeden IGBT tranzistor se spočítá jako součet propustných ztrát P_{fw} a spínacích ztrát P_{sw} při $z > 1$.

$$P_{fw(Tr)} = U_{TO} \cdot I_T + R_V \cdot I_{Tef}^2 = 1 \cdot 20 + 20 \cdot 10^{-3} \cdot 20^2 = 27W \tag{2.28}$$

$$P_{sw(Tr)} = \frac{U_d}{U_{VN}} \cdot I_Z \cdot (k_{on} + k_{off}) \cdot f = \frac{14}{300} \cdot 20 \cdot (5 \cdot 10^{-5} + 4 \cdot 10^{-5}) \cdot 16000 = 1,4W \quad (2.29)$$

$$P_{TOT(V)} = P_{fw(Tr)} + P_{sw(Tr)} = 27 + 1,2 = 28,4W \quad (2.30)$$

Ztrátový výkon pro diodu spočteme obdobně jako pro tranzistor při $z=0,1$.

$$P_{fw(D)} = U_{TO} \cdot I_T + R_{VR} \cdot I_{Tef}^2 = 0,85 \cdot 2 + 16 \cdot 10^{-3} \cdot 6,3^2 = 2W \quad (2.31)$$

$$P_{sw(D)} = \frac{U_d}{U_{VN}} \cdot I_Z \cdot k_{rr} \cdot f = \frac{14}{300} \cdot 7 \cdot (4,5 \cdot 10^{-5}) \cdot 16000 = 0,2W \quad (2.32)$$

$$P_{TOT(D)} = P_{fw(D)} + P_{sw(D)} = 2 + 0,2 = 2,2W \quad (2.33)$$

Celkový ztrátový výkon P_{TOT} pak bude podle vedení součástek (viz. obrázek Obr. 2.12) součet dvojnásobných ztrát na tranzistoru a diodě:

$$P_{TOT} = 2 \cdot P_{TOT(Tr)} + 2 \cdot P_{TOT(D)} = 2 \cdot 28,4 + 2 \cdot 2,2 = 61,1W \quad (2.34)$$

2.3.2 Volba chladiče, určení tepelných poměrů měniče s IGBT (analytický výpočet)

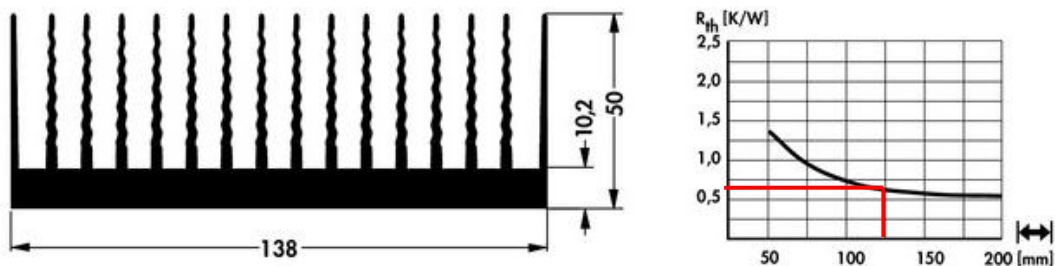
Dále spočítáme maximální teplotu chladiče a tepelný odpor přechodu chladiče a okolí $R_{TH(sa)}$, který vychází z obrázku Obr. 2.12. Při výpočtu použijeme Kirchhoffovy zákony a Ohmův zákon, kdy teploty jsou ekvivalenty napětí a výkony ekvivalenty proudu.

$$T_{S(max)} = T_{J(max)} - P_{TOT(Tr)} \cdot R_{TH(js)} = 125 - 28,4 \cdot 1 = 96,6^\circ C \quad (2.35)$$

Dále se z tepelného schématu maximální hodnota tepelného odporu vypočítá:

$$R_{TH(sa)max} = \frac{T_S - T_a}{P_{TOT}} = \frac{96,8 - 50}{66,2} = 0,76K/W \quad (2.36)$$

Tepelný odpor chladiče $R_{TH(sa)}$ by měl být vybírán vždy s rezervou. Hodnota $R_{TH(sa)}$ proto musí být menší než 0,76K/W. Vybrán byl chladič od firmy Fischer elektronik typ SK 466. Hodnota byla zvolena $R_{TH(sa)}=0,6K/W$, které odpovídá délka profilu chladiče 128mm. Rozměry chladiče pak jsou 138x50x125mm (ŠxVxD).



Obr. 2.13 Profil chladiče a graf tepelného odporu

Poté je potřeba provést kontrolní výpočet tepelných poměrů, což znamená teplotu čipu T_j a teplotu chladiče T_s .

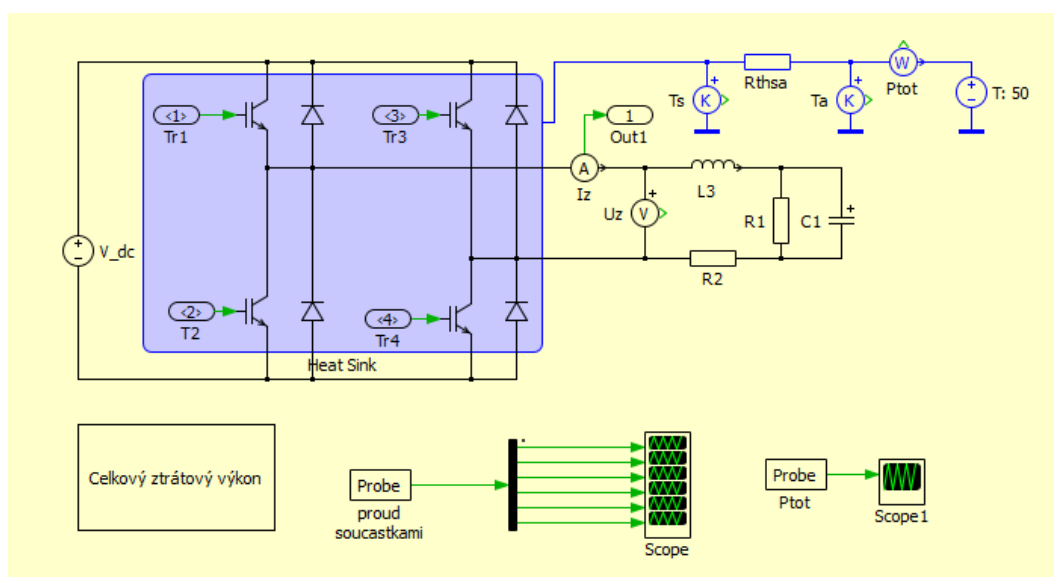
$$T_j = P_{TOT(Tr)} \cdot R_{TH(js)} + P_{TOT} \cdot R_{TH(sa)} + T_a = 28,2 + 36,8 + 50 = 115^\circ\text{C} < 125^\circ\text{C} \tag{2.37}$$

$$T_s = P_{TOT} \cdot R_{TH(sa)} + T_a = 36,9 + 50 = 86,6^\circ\text{C} \tag{2.38}$$

Z výsledků výpočtů (2.37) a (2.38) je zřejmé, že pro daný modul vyhovuje námi navržené chlazení.

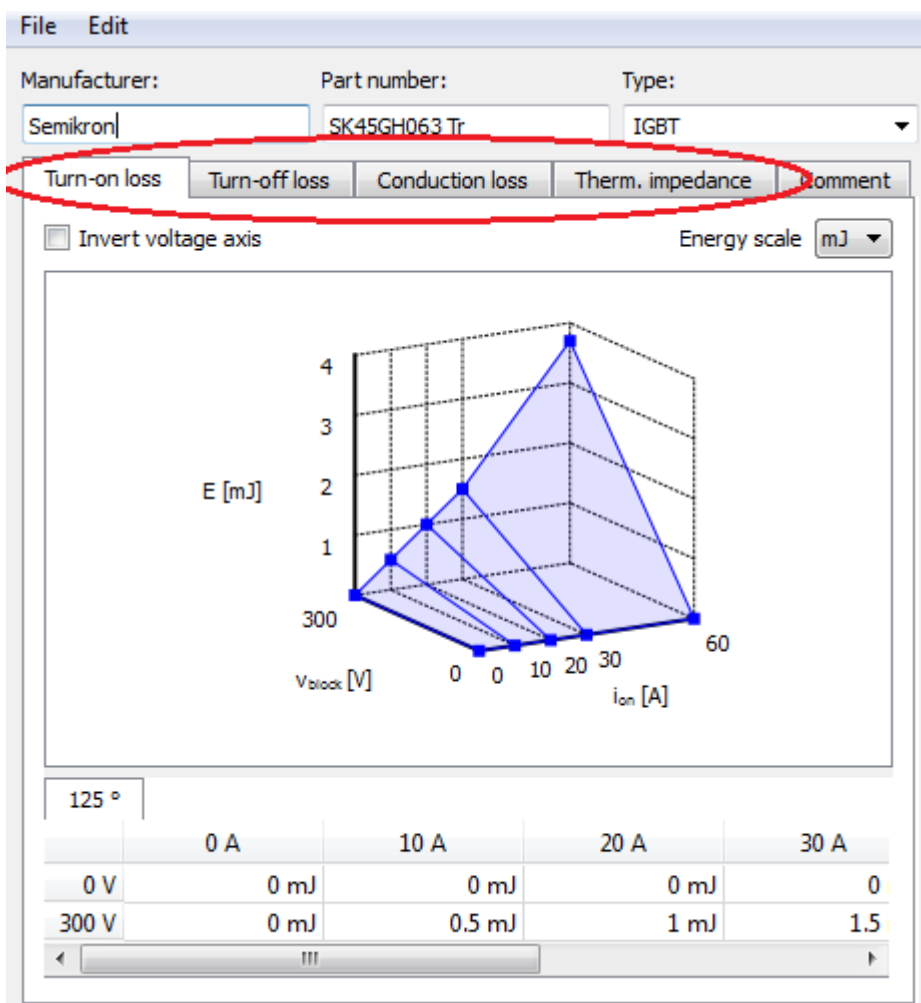
2.3.3 Simulace tepelných poměrů měniče s IGBT tranzistory

Pro ověření analytických výpočtů byla provedena simulace tepelných poměrů v programu MATLAB – SIMULINK - PLECS. Níže je vidět schéma výkonové části měniče v prostředí PLECS obrázek Obr. 2.14 pro výpočet celkových ztrát.



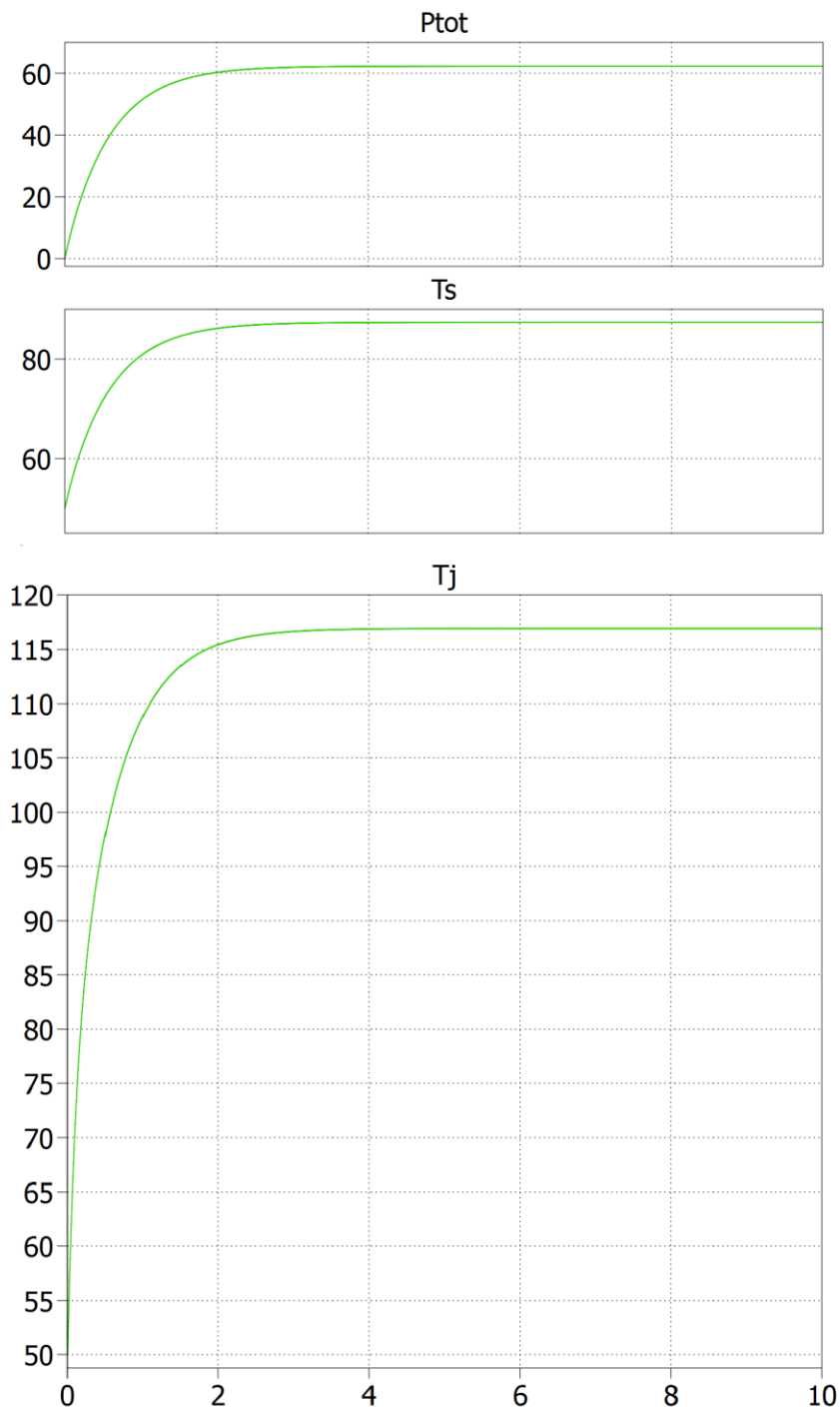
Obr. 2.14 Tepelné schéma pro výpočet celkových ztrát a chlazení

Schéma pro výpočet celkových ztrát a chlazení se tvoří následovně. Nejprve vybereme z knihovny chladič (heat sink) a umístíme jej přes požadované součástky, které chceme chladit. V PLECSu je možné vytvářet vlastní knihovny polovodičových součástek s konkrétními elektrickými i tepelnými vlastnostmi formou V-A charakteristik a pro určení spínacích ztrát jako hodnoty zapínací a vypínací energie. Dále může být zadán tepelný odpor a kapacita součástky nebo hodnota transientní tepelné impedance. Příklad nastavení je na obrázku Obr. 2.15. Za chladič vložíme tepelný odpor přechodu chladič-okolí a teplotu okolí. Wattmetrem měříme celkový výkon. Pomocí teploměrů měříme teplotu na čipu a chladiči. Hodnota tepelné kapacity neovlivňuje celkovou teplotu, ale jen rychlost jejího ustálení. Pro naše výpočty nebyl důležitý čas ustálení, ale pouze teplota a celkový výkon. Proto byla hodnota tepelné kapacity volena malá (0,1 J/K). Snížení kapacity bylo možné i z hlediska vysoké spínací frekvence 16 kHz.



Obr. 2.15 Ukázka nastavení zapínacích ztrát

Na následujícím obrázku jsou vidět průběhy teplot podle simulačního schématu z obrázku Obr. 2.14.



Obr. 2.16 Celkový výkon, teplota na chladiči a teplota součástky

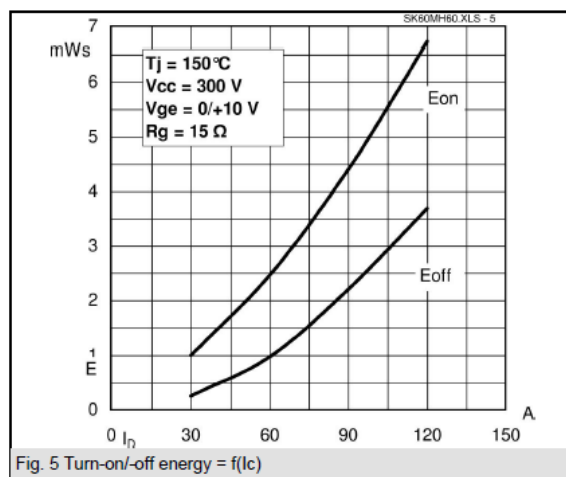
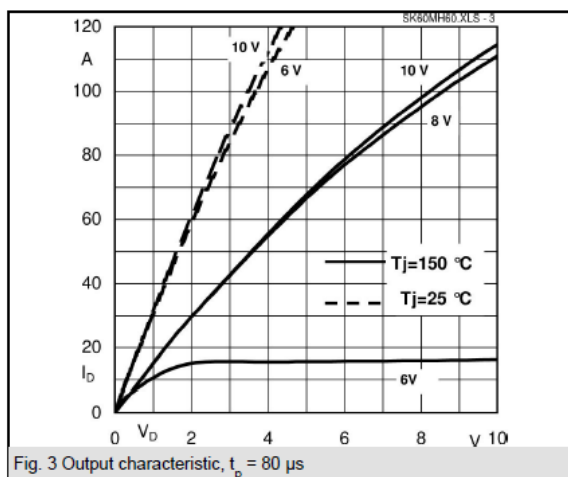
Zhodnocení výsledků analytického výpočtu a simulace je provedeno v kapitole 2.3.7.

2.3.4 Dimenzování měniče s MOSFET tranzistorem (analytický výpočet)

Jak již bylo zmíněno, pro účely připojení měniče pouze k autobaterii by byl vhodnější měnič s MOSFET tranzistorem. Byl vybrán modul SK 60 MH 60, který je také v topologii H-můstek, tedy 4 tranzistory se zpětnými diodami. Potřebné parametry součástek pro výpočty jsou shrnuty v tabulce Tab. 5 a obrázku Obr. 2.17.

Tab. 5 Důležité hodnoty pro dimenzování MOSFET měniče

It	20	A
Rds(on)	33	mΩ
Ud	14	V
Uvn	300	V
Izm	20	A
Eon	1	mWs
Eoff	0,3	mWs
kon	3,30E-05	
koff	1,00E-05	
Rth(js)	0,45	k/W
Tj(max)	150	°C
Ta	50	°C



Obr. 2.17 V-A charakteristika a spínací energie MOSFET měniče

V katalogovém listu je udávána hodnota tepelného odporu přechodu mezi čipem a chladičem $R_{TH(js)}$. Tepelné náhradní schéma měniče je shodné, jako v případě IGBT měniče (viz. obrázek Obr. 2.12). Potřebné hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v katalogovém listu měniče, který lze nalézt na [23]. Pro zpětnou diodu budou použity stejné parametry jako u měniče s IGBT tranzistorem. Výpočet ztrát byl proveden podle literatury [24].

Ztrátový výkon pro jeden MOSFET tranzistor se spočítá jako součet propustných a spínacích ztrát. Spínací ztráty jsou pro frekvenci 16kHz. Výpočet pro $z > 1$.

$$P_{fw(Tr)} = R_{DS(on)} \cdot I_T^2 = 33 \cdot 10^{-3} \cdot 20^2 = 13,2W \quad (2.39)$$

$$P_{sw(Tr)} = \frac{U_d}{U_{VN}} \cdot I_T \cdot (k_{on} + k_{off}) \cdot f = \frac{14}{300} \cdot 20 \cdot (3,3 \cdot 10^{-5} + 10^{-5}) \cdot 16000 = 0,7W \quad (2.40)$$

$$P_{TOT(Tr)} = P_{fw(Tr)} + P_{sw(Tr)} = 13,2 + 0,7 = 13,9W \quad (2.41)$$

Ztráty na zpětných diodách budeme uvažovat stejné, jako v případě měniče s IGBT tranzistory. Celkový ztrátový výkon pro celý měnič pak bude:

$$P_{TOT} = 2 \cdot P_{TOT(Tr)} + 2 \cdot P_{TOT(D)} = 2 \cdot 13,9 + 2 \cdot 2,2 = 32W \quad (2.42)$$

2.3.5 Volba chladiče, určení tepelných poměrů měniče s MOSFET tranzistory (analytický výpočet)

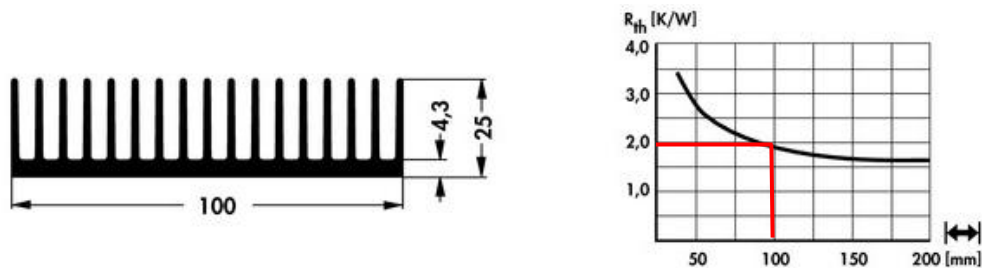
Náhradní tepelné schéma bude stejné, jako v případě IGBT viz. Obrázek Obr 2.18.

$$T_{S(max)} = T_{J(max)} - P_{TOT(Tr)} \cdot R_{TH(js)} = 150 - 13,9 \cdot 0,45 = 143,8^{\circ}C \quad (2.43)$$

Při výpočtu $R_{TH(sa)}$ je nutné zohlednit celkový výkon, který je potřeba chladičem odvézt, vypočteme jej takto:

$$R_{TH(sa)max} = \frac{T_S - T_a}{P_{TOT}} = \frac{143,8 - 50}{32} = 2,9K/W \quad (2.44)$$

Tepelný odpor chladiče $R_{TH(sa)}$ by měl být vybírán vždy s rezervou. Hodnota $R_{TH(sa)}$ proto musí být menší než 2,9K/W. Vybrán byl chladič od firmy Fischer elektronik typ SK 508. Hodnota byla zvolena $R_{TH(sa)}=2K/W$, které odpovídá délka profilu chladiče 100mm. Rozměry chladiče tedy jsou 100x25x100mm (ŠxVxD). Hodnota chladiče byla zvolena s větší rezervou než v případě měniče s IGBT tranzistory. Vybraný chladič je kompromis mezi zástavbovými rozměry měniče a přijatelnou teplotou na chladiči.



Obr. 2.18 Profil chladiče a graf tepelného odporu

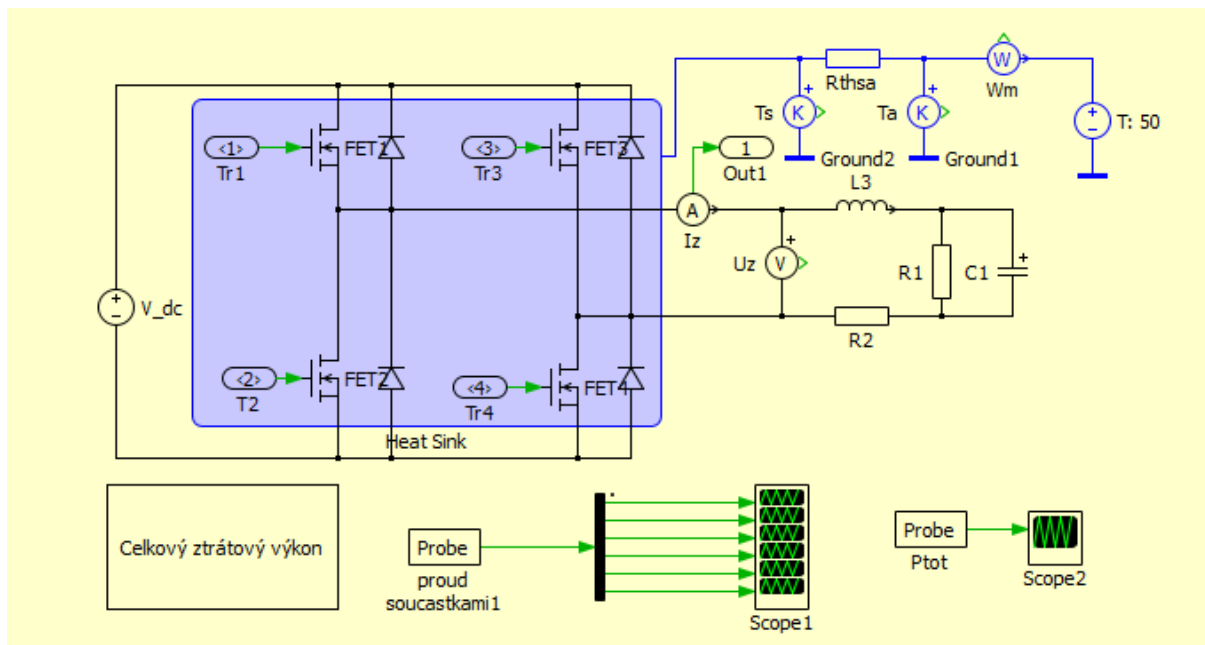
Poté je potřeba provést kontrolní výpočet tepelných poměrů, což bude teplota na čipu T_j a teplota chladiče T_s .

$$T_j = P_{TOT(Tr)} \cdot R_{TH(js)} + P_{TOT} \cdot R_{TH(sa)} + T_a = 13,2 \cdot 0,45 + 32 \cdot 2 + 50 = 120,2^\circ\text{C} < 150^\circ \tag{2.45}$$

$$T_s = P_{TOT} \cdot R_{TH(sa)} + T_a = 63,9 + 50 = 113,9^\circ\text{C} \tag{2.46}$$

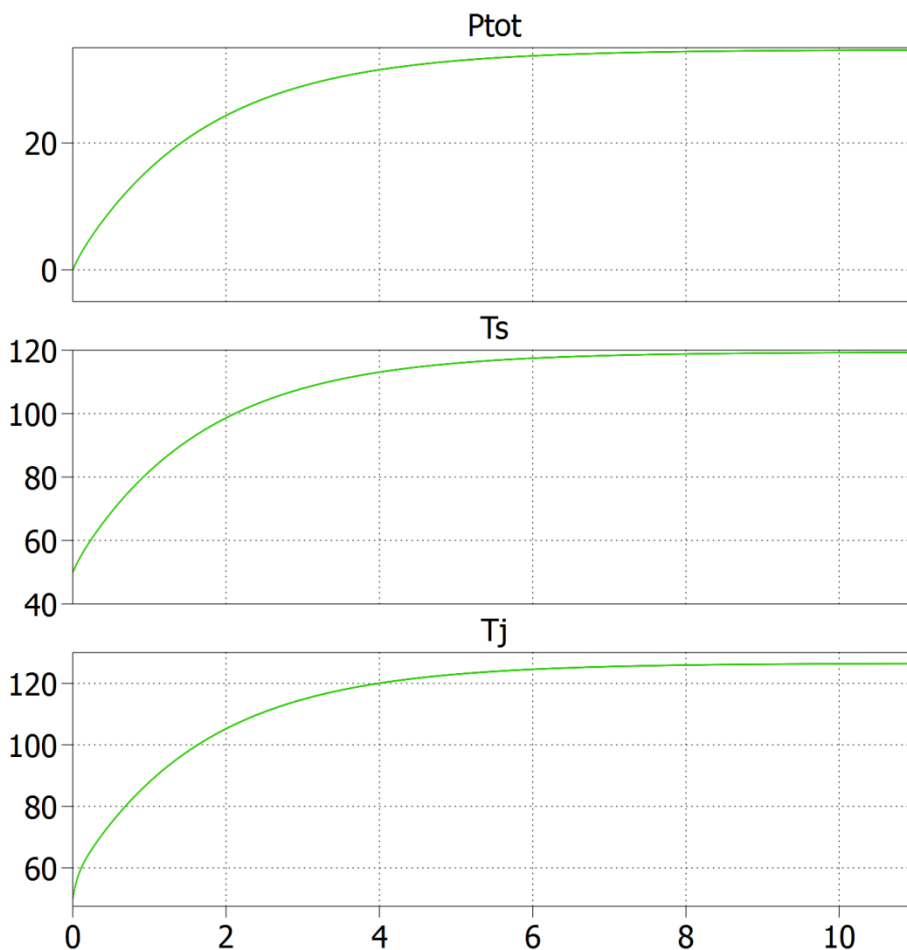
2.3.6 Dimenzování MOSFET měniče s chladičem (simulace)

Pro ověření analytických výpočtů byla také provedena i simulace tepelných poměrů v programu MATLAB – SIMULINK. Níže je vidět schéma pro výpočet celkových ztrát dále ztráty na tranzistoru a také celkové ztráty (obrázek Obr. 2.19).



Obr. 2.19 Tepelné schéma pro výpočet celkových ztrát a chlazení

Na následujícím obrázku jsou vidět průběhy teplot podle simulačního schématu z obrázku Obr. 2.19. Tvorba tepelné simulace je tvořena stejně, jako v případě měniče s IGBT součástkami.



Obr. 2.20 Celkový výkon, teplota na chladiči a teplota součástky

Zhodnocení výsledků analytického výpočtu a simulace je provedeno v kapitole 2.3.7.

2.3.7 Porovnání získaných výsledků dimenzování součástek a volby chladiče

V tabulce Tab. 6 je vidět srovnání analytického výpočtu a simulace u měniče s IGBT tranzistory a MOSFET tranzistory.

Tab. 6 Srovnání výsledných hodnot měniče s IGBT a MOSFET tranzistory

	IGBT		MOSFET		Jednotka
	Výpočet	Simulace	Výpočet	Simulace	
P_{fw}(Tr)	27	28	13,2	14,5	W
P_{sw}(Tr)	1,4	1,4	0,7	0,75	W
P_{fw}(D)	2	1,2	2	1,2	W
P_{sw}(D)	0,2	0,4	0,2	0,4	W
P_{tot}	61,1	62	32	30	W
T_j	115	116,5	120	125	°C
T_s	86,6	88	113	119	°C

V tabulce Tab. 6 je vidět, že výsledky se shodují u obou přístupů, jak pomocí analytického výpočtu, tak při simulaci. Odchyłka hodnot je v řádu jednotek procent. Největší chyby (10%) jsme se dopustili u ztrát propustným proudem pro měnič s MOSFET tranzistory. Chyba může být způsobena rozdílností přístupu analytického výpočtu simulace. Ve výpočtu vycházíme z hodnot odporu $R_{ds(on)}$ a proudu tranzistorem I_t pro poměrné sepnutí $z > 1$. V simulaci jsou propustné ztráty počítány z V-A charakteristiky a pro poměrné sepnutí $z = 0,9$.

Z tabulky je také vidět, že výsledné ztráty P_{TOT} vycházejí o polovinu menší u měniče s MOSFET tranzistory. Mohl proto být zvolen menší chladič. Navíc mají MOSFET tranzistory vyšší maximální hodnotu teploty čipu ($T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$), ke které je zvolena větší rezerva teploty čipu T_j , než v případě IGBT, kde se s touto teplotou mnohem více blížíme maximální teplotě čipu ($T_{jmax} = 125^\circ\text{C}$).

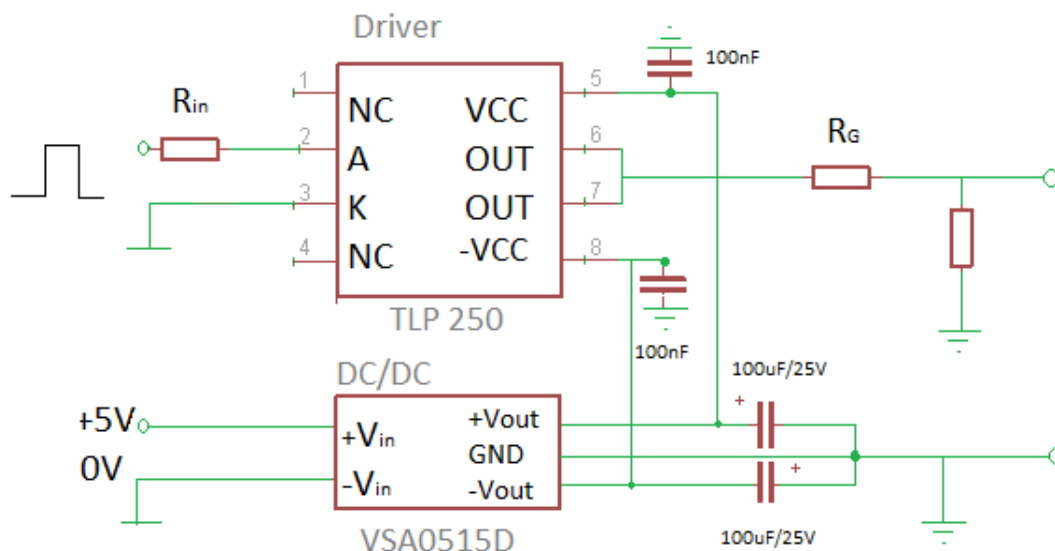
2.4 Budící obvody měniče s IGBT tranzistory

Hlavním úkolem budiče je galvanické oddělení výkonové části od řídicí části. Budič také zajišťuje potřebné napěťové úrovně pro spínání tranzistorů. Jako vhodný budič pro jeden tranzistor byl zvolen driver TLP 250 od firmy TOSHIBA. Driver byl doplněn o DC/DC měnič typ VSA0515D od firmy Vitec s výkonem 1W pro napájení. Pro topologii měniče H-můstek budou potřeba čtyři budící obvody, pro každý tranzistor jeden. Bylo nutné spočítat vstupní odpor R_{in} a odpor hradla (gatu) tranzistoru R_G . Důležité hodnoty z datového listu jsou uvedeny v tabulce Tab. 7. Datový list lze nalézt na [25].

Tab. 7 Důležité parametry budiče

I_{in}	8	mA
I_G	0,5	A
I_{supply}	11	mA
U_{supply}	30	V

Na následujícím obrázku je patrná struktura driveru s přídatným DC/DC měničem.



Obr. 2.21 Schéma budiče pro jeden tranzistor

Vstupní odpor spočteme z Ohmova zákona ze známé hodnoty napájení pulzů do budiče 0V a 5V a vstupního proudu I_{in} . Musíme také zohlednit úbytek napětí na diodě uvnitř driveru.

$$R_{in} = \frac{U_{in} + U_D}{I_{in}} = \frac{5 - 1,6}{0,008} = 425 \Omega \quad (2.47)$$

Gatový odpor vypočteme z požadované hodnoty proudu I_G a napětí $\pm 15V$. Při přepínání polarity může být vlivem parazitní kapacity gate na odporu 30V.

$$R_G = \frac{U}{I_{in}} = \frac{30}{0,5} = 60 \Omega \quad (2.48)$$

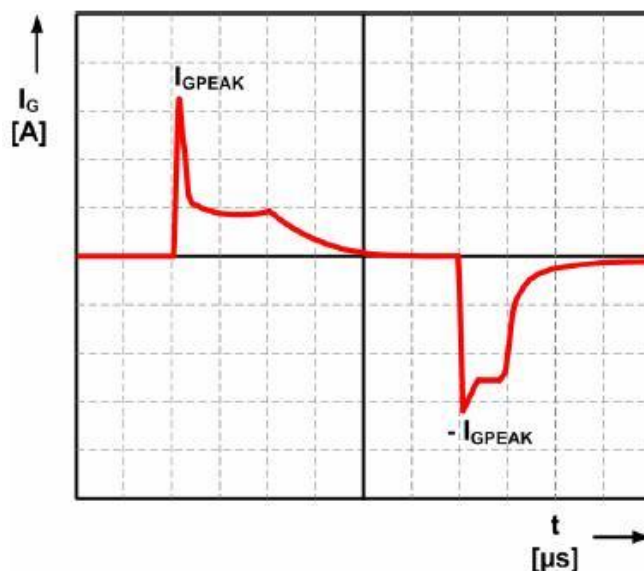
Dále je potřeba určit potřebný výkon napájecího DC/DC měniče podle ztrát na driveru. Ztráty jsou způsobeny vlastní spotřebou driveru. Také je nutné brát v úvahu ztráty na gatovém odporu při zapínání a vypínání tranzistoru a ztráty na samotném tranzistoru.

Ztráty vlastní spotřebou:

$$P_{VL} = U_{supply} \cdot I_{supply} = 30 \cdot 0,011 = 0,33 W \quad (2.49)$$

Výpočet ztrát na gatovém odporu byl proveden podle literatury [26]. Ztráty závisí na zapínací a vypínací době tranzistoru a spínací frekvenci.

Na dalším obrázku je vidět průběh gatového proudu, pro který byla spočtena střední a efektivní hodnota proudu pro výpočet ztrát na gatovém odporu a tranzistoru.



Obr. 2.22 Průběh proudu gatem tranzistoru [28]

$$P_{R(on)} = I_{G(ef)}^2 \cdot R_G = \left(I_{G(peak)} \cdot \sqrt{\frac{t_{on} \cdot f}{3}} \right)^2 \cdot R_G = \left(0,5 \cdot \sqrt{\frac{45 \cdot 10^{-9} \cdot 16000}{3}} \right)^2 \cdot 60 = 0,26 \text{ mW} \tag{2.50}$$

$$P_{R(off)} = I_{G(ef)}^2 \cdot R_G = \left(I_{G(peak)} \cdot \sqrt{\frac{t_{off} \cdot f}{3}} \right)^2 \cdot R_G = \left(0,5 \cdot \sqrt{\frac{250 \cdot 10^{-9} \cdot 16000}{3}} \right)^2 \cdot 60 = 20 \text{ mW} \tag{2.51}$$

Ztráty na tranzistoru spočteme výkon jako násobek střední hodnoty proudu a napětí na tranzistoru.

$$P_{Tr(on)} = U \cdot I_{stř} = U \cdot \frac{I_{G(peak)} \cdot t_{on} \cdot f}{2} = 30 \cdot \frac{0,5 \cdot 45 \cdot 10^{-9} \cdot 16000}{2} = 30 \cdot 0,18 \cdot 10^{-3} = 5,4 \text{ mW} \tag{2.52}$$

$$P_{Tr(off)} = U \cdot I_{stř} = U \cdot \frac{I_{G(peak)} \cdot t_{off} \cdot f}{2} = 30 \cdot \frac{0,5 \cdot 250 \cdot 10^{-9} \cdot 16000}{2} = 30 \cdot 0,18 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ mW} \tag{2.53}$$

Celkové ztráty na driveru budou:

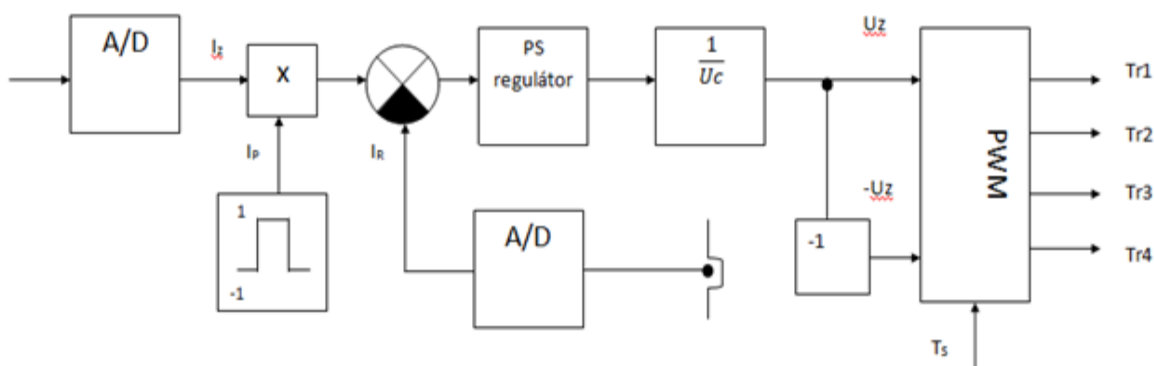
$$P_{celk} = P_{VL} + P_{R(on)} + P_{R(off)} + P_{Tr(on)} + P_{Tr(off)} = 0,33 + 0,26 \cdot 10^{-3} + 20 \cdot 10^{-3} + 5,4 \cdot 10^{-3} + 30 \cdot 10^{-3} = 0,33 + 0,05 = 0,38W \quad (2.54)$$

Z výpočtu celkových ztrát je patrné, že ztráty na odporu i tranzistoru jsou velice malé a můžeme je při návrhu zanedbat. Hlavní složku ztrát tvoří vlastní spotřeba budiče, která je 0,33W. Navržený přídatný DC/DC měnič s výkonem 1W od firmy Vitec byl zvolen jako vyhovující řešení.

2.5 Implementace algoritmu řízení

2.5.1 Struktura algoritmu řízení pro implementaci

Struktura řízení je naznačena v obrázku Obr. 2.23.



Obr. 2.23 Algoritmus řízení DSP

Do proporcionálně-sumačního regulátoru vstupuje proud I_z , který je upraven A/D převodníkem. Proud má buď kladnou, nebo zápornou polaritu, které je dosaženo vynásobením s proudem I_p . Do regulátoru vstupuje též zpětná vazba jako změřený proud z elektrolyzéry I_r , který je upraven A/D převodníkem. Výstupní signál z regulátoru odpovídá požadované hodnotě vstupního napětím z měniče. Tento signál je pro účely PWM modulátoru přepočten na poměrné sepnutí. Výstup z PWM je zaveden do H-můstku jednotlivých tranzistorů Tr1 – Tr4.

2.5.2 Implementace algoritmu v programovacím jazyce C do DSP

2.5.2.1 Nastavení GPIO

Nejprve je nutné nastavit GPIO, PWM a A/D převodník. Piny GPIO se dají nastavit jako vstupy/výstupy nebo periférie. Inicializace GPIO pro nastavení primární funkce pinů jako periférie je ve zdrojovém souboru Gpio.c: GpioMuxRegs.GPB.MUX.all=0x003F. Tímto zápisem zastavíme všechny bity do stavu „1“, což podle datového listu znamená jejich nastavení jako periférie. PWM se nastavuje ve zdrojovém souboru Ev.c, kam se zapisují hodnoty do inicializačního registru Event Manageru brány B. Pro správné nastavení je nutné využít [18] a [19].

Nastavení PWM pro spínání tranzistorů bude vypadat takto:

Frekvence symetrické pily 16 kHz: EvbRegs.T3PR=4685

Řídící registr čítače je nastaven na mód čítání Continuous up/down s předděličkou 4:
EvbRegs.T3CON.all=0xEA42

Vynulování counter registru čítače: EvbRegs.T3CNT=0

Nastavení výstupní logiky PWM výstupů (používáme active high):
EvbRegs.ACTRB.all=0x0666

Nastavení mrtvých časů na 2 μ s: EvbRegs.DBTCNB.all=0x09F4

Nastavení řídicího registru compare jednotek: EvbRegs.COMCONB.all=0x82E0

Nastavení spuštění A/D převodníku od timeru 3: EvbRegs.GPTCONB.bit.T3TOADC=1

Vynulování compare registrů (sepnutí dolních prvků): EvbRegs.CMPR4=0,
EvbRegs.CMPR5=0

Nastavení vybraného přerušování a vymazání flag registru: EvbRegs.EVBIFRA.all=BIT9,
EvbRegs.EVBIMRA.all=BIT9

Nastavení druhého čítače, který je potřeba pro otáčení polarity požadovaného proudu a od kterého je spouštěno druhé přerušování:

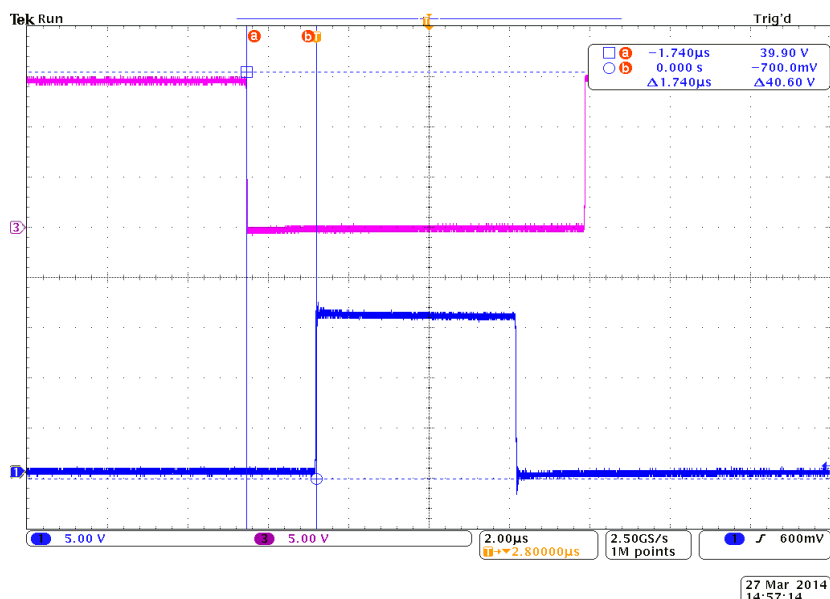
Frekvence symetrické pily 1 kHz: `EvbRegs.T4PR=233`

Vynulování counter registru čítače: `EvbRegs.T4CNT = 0`

Řídící registr čítače je nastaven na mód čítání Continuous up/down s předděličkou 128:
`EvbRegs.T4CON.all = 0xEF42`

Nastavení vybraného přerušení a vymazání flag registru: `EvbRegs.EVBIFRB.all=BIT2`,
`EvbRegs.EVBIMRB.all = BIT2`;

Nastavení mrtvých časů na $2\mu\text{s}$ je patrné z následujícího obrázku pořízeného z osciloskopu. Jsou zde vidět pulzy na jednu větev tranzistoru. Pulz z horního tranzistoru je znázorněn růžově a pulz ze spodního tranzistoru modře. Z měření na osciloskopu vychází mrtvé časy na $1,74\mu\text{s}$.



Obr. 2.24 Nastavení mrtvých časů

2.5.2.2 Tvorba PWM

Tvorba PWM je popsána v kapitole 2.2.4. V případě procesoru TMS320F2812 je pilovitý signál s periodou 16kHz tvořen pomocí čítače T3CON, jehož nastavení je detailně popsáno v předcházejícím odstavci. Pila je porovnávána s hodnotami *compare registrů*, které jsou naplněny při obsluze rutiny přerušení. Podle nastavené logiky (active high), je pulz vytvořen tak, že jeho hodnota je rovna jedné vždy, když je pila výše než modulační signál, nebo nula, když je pila níže než modulační signál. Ukázka tvorby PWM je graficky zobrazena na obrázku Obr. 2.6.

2.5.2.3 Nastavení main.c

V programu main.c jsou inicializovány řídicí systém, GPIO, obsluha rutiny přerušení, jednotlivé periférie a A/D převodník. Dále jsou definovány globální proměnné k_p , k_i , q_p , q_i . Zde probíhá přepočítání konstant do vhodného formátu s největší přesností, což je zajištěno pomocí while cyklu, který porovnává zadanou hodnotu s maximální mezí. Když se hodnota do meze vejde, nechá formát příslušný této hodnotě. Když se hodnota do meze nevejde, je proveden bitový posuv o 1 místo doprava, což násobí o jednotku sníží, dokud není hodnota v požadovaném rozsahu formátu. Konstanty regulátoru K_P a T_R je možné ručně měnit podle požadované rychlosti a kvality regulace.

2.5.2.4 Nastavení obsluhy přerušení isr.c

Dále je nutné naprogramovat obsluhu rutin přerušení isr.c, kde se v prvním přerušení přepíše nově vypočtené hodnoty compare registrů a v druhém přerušení je vypočtena velikost času pro změnu polarity proudu. Výpis programového kódu isr.c je k dispozici v příloze 1. Přerušení pro výpočet hodnoty compare registrů je spouštěno právě od A/D převodníku. Nejprve jsou deklarovány jednotlivé proměnné, pak už probíhá zápis do první funkce přerušení s názvem *evb_timer_isr*. Z registrů A/D převodníku je nejprve přečtena hodnota proudu I_r , která je upravena pro čidlo s rozsahem (-25A, 25A) a jeho offset. PS regulátor pak pracuje s hodnotou epsilon (regulační odchylka). V regulátoru je počítáno s jeho saturací do kladné a záporné hodnoty. Výsledná hodnota napětí U_z je pak použita pro výpočet hodnoty compare registrů. Pilovitý signál tvořený čítačem je porovnáván s hodnotami compare registrů. Naplnění compare registrů se provádí výpočtem podle vzorce (2.55) – (2.57) a závisí na poměrném sepnutí z a konstantě k , která se spočte jako U_{ref}/U_c . Hodnota referenčního napětí pro programování v pevné řádové čárce byla zvolena 20V. Dále závisí na polovině frekvence symetrické pily t_{prp} . Frekvence pily je 16 kHz. Nová hodnota compare registrů je pak zapsána jako *prep1* na tranzistor v jedné fázi a *prep2* na tranzistor fáze druhé.

$$z = uz * k \quad (2.55)$$

$$prep1 = t_{prp} + t_{prp} * z \quad (2.56)$$

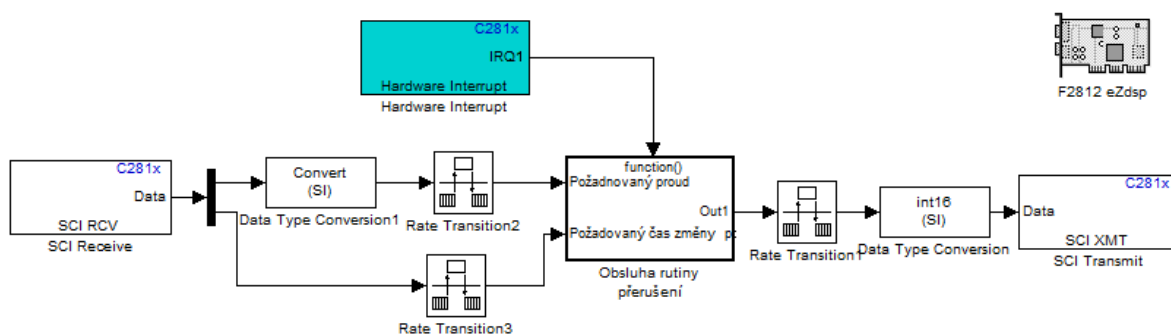
$$prep2 = t_{prp} - t_{prp} * z \quad (2.57)$$

Druhé přerušení slouží ke změně polarity proudu. Ve druhé funkci přerušení s názvem *evb_timerT4_isr* je využíván čítač T4CON s frekvencí 1 kHz. Je nastaven na mód čítání

continuous up down. Jelikož nelze hardwarově vytvořit požadovanou periodu, je čítač prodloužen na požadovanou hodnotu 2 min pro změnu polarity proudu ještě pomocí programového kódu. Inkrementováním hodnoty od nuly k 25000 dosáhneme požadovaného času, který si můžeme ověřit blikáním LED přímo na DSP. Dále je tomto přerušení provedeno převrácení polarity proudu I_z pomocí prostého vynásobení číslem -1, tedy proudem I_P s mezemi v rozsahu $\langle -1;1 \rangle$.

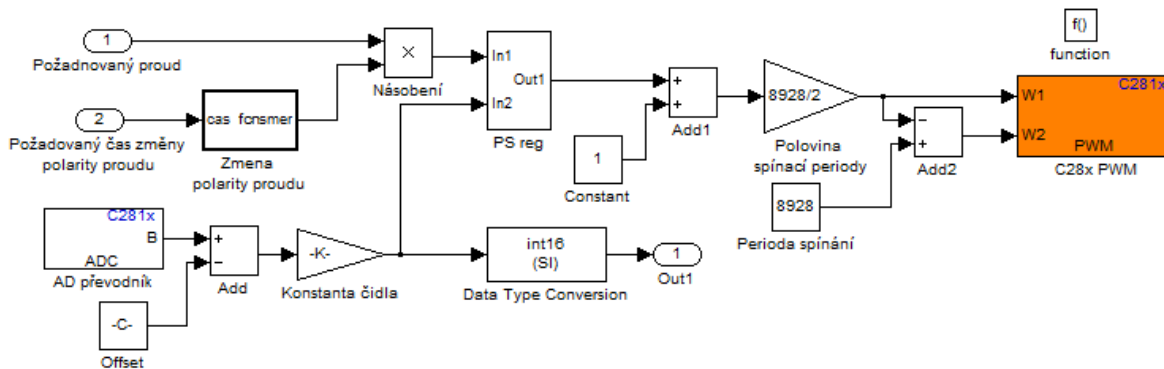
2.5.3 Implementace algoritmu z programu MATLAB - SIMULINK do DSP

Pro ověření funkčnosti byl algoritmus řízení navržen jak v programovacím jazyce C, tak i v programu MATLAB – SIMULINK. Nadstavbový blok SIMULINK poskytuje podporu procesoru Texas Instrument TMS320F2812. V SIMULINKu se blokově poskládá a nastaví struktura algoritmu, která je pak přeložena do jazyka C pomocí programu Code Composer a následně nahrána do DSP. Struktura algoritmu je shodná jako v případě simulace z kapitoly 2.2.4, jen zde pracujeme s hodnotami v pevné řádové čárce oproti spojitě simulaci. Na následujících obrázcích je zobrazena kompletní struktura programu a dále blok subsystému funkce volané v přerušení a také diskretní PS regulátor. Všechny bloky jsou nastaveny na programování v pevné řádové čárce, proto je vždy nutné zvolit vhodné nastavení datového formátu v závislosti na tom, jaké hodnoty nabývá daná proměnná. Musíme se vyhnout náhodnému přetečení.



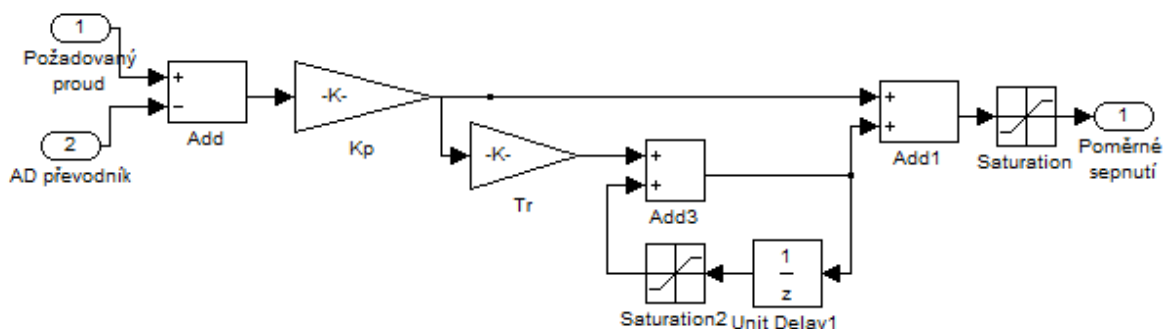
Obr. 2.25 Hlavní struktura programu

Hlavní struktura programu je tvořena stejně jako v jazyce C hardwarovým přerušením vyvolaným od A/D převodníku. Dále je do přerušení zavedeno přijímání dat ze sériové komunikace SCI, konkrétně posílání požadované hodnoty proudu a požadovaného času změny polarity proudu z MATLABu (SIMULINKu) do DSP. Z obsluhy přerušení si můžeme pomocí sériové komunikace posílat hodnotu výstupního proudu z A/D převodníku do MATLABu (SIMULINKu).



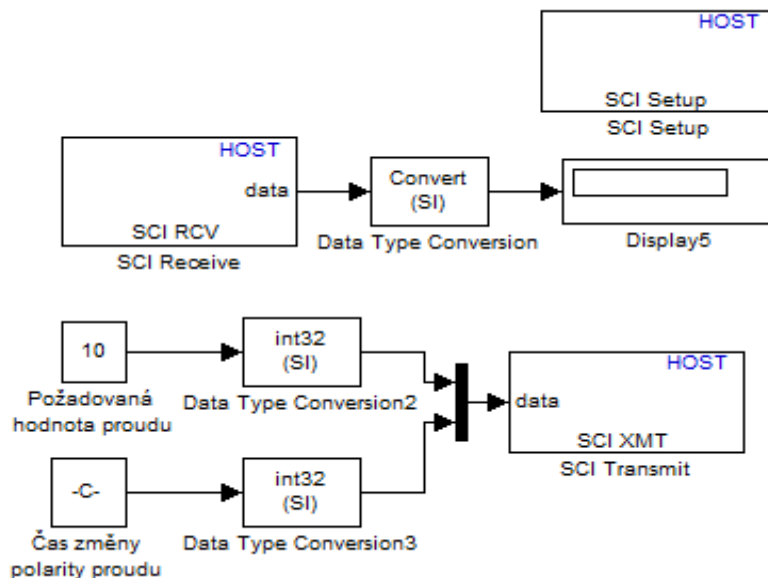
Obr. 2.26 Subsystem – obsluha rutiny přerušení

Vnitřní struktura hardwarového přerušení (obrázek Obr. 2.26 Subsystem – obsluha rutiny přerušení) je tvořena blokem požadované hodnoty proudu, který je vynásoben funkcí, která po daném čase otočí znaménko požadované polarity proudu. Obě hodnoty jsou posílány přes sériovou komunikaci SCI (struktura zobrazena na obrázku Obr. 2.28). Hodnota požadovaného proudu $In1$ tvoří jeden vstup do PS regulátoru. Druhým vstupem regulátoru $In2$ je hodnota přečtená z A/D převodníku upravená o offset a konstantu čidla, která souvisí s kalibrací čidla. Z regulátoru dostaneme hodnotu omezenou saturací v intervalu $\langle -1;1 \rangle$, což tvoří poměrné sepnutí tranzistoru. K hodnotě je připočtena jednotková konstanta. Výsledná hodnota je vynásobena polovinou periody přepočtené na hodinové tiky procesoru. Tím je zajištěno spínání tranzistorů v jedné větvi měniče. Tvorba periody PWM je odlišná oproti spojitě simulaci, což je způsobeno programováním DSP v pevné řádové čárce. Požadovaná frekvence spínání je 16kHz. Tranzistory v druhé větvi jsou sepnuty obdobně. Od hodnoty periody sepnutí je odečtena hodnota posílaná na první fázi měniče, tím je zajištěno křížové spínání tranzistorů. PWM je nastavena opět na logiku spínání *active high*, která byla vysvětlena v kapitole 2.5.2



Obr. 2.27 Subsystem - PS regulátor

Diskrétní PS regulátor je tvořen proporcionálním zesílením K_p a integračním zesílením K_i . K_i získáme vynásobením K_p a T_r . Diskrétní integrace se získá zařazením bloku zpoždění $Delay1$. Blok $Saturation2$ Saturace omezí hodnotu integrace v mezích $\langle -1;1 \rangle$. Konečná saturace regulátoru (blok $Saturation$) omezí výstupní hodnotu poměrného sepnutí tranzistorů také na interval $\langle -1;1 \rangle$.



Obr. 2.28 Sériová komunikace SCI

Přes sériovou komunikaci SCI je ovládáním přes počítač posílána požadovaná hodnota proudu a času změny polarity proudu. Hodnota je ve formátu int32 z důvodu požadavku delšího časového intervalu změny polarity proudu. V počítači je vytvořen virtuální COM port, přes který je DSP připojeno. Komunikace a posílání dat probíhá přes USB.

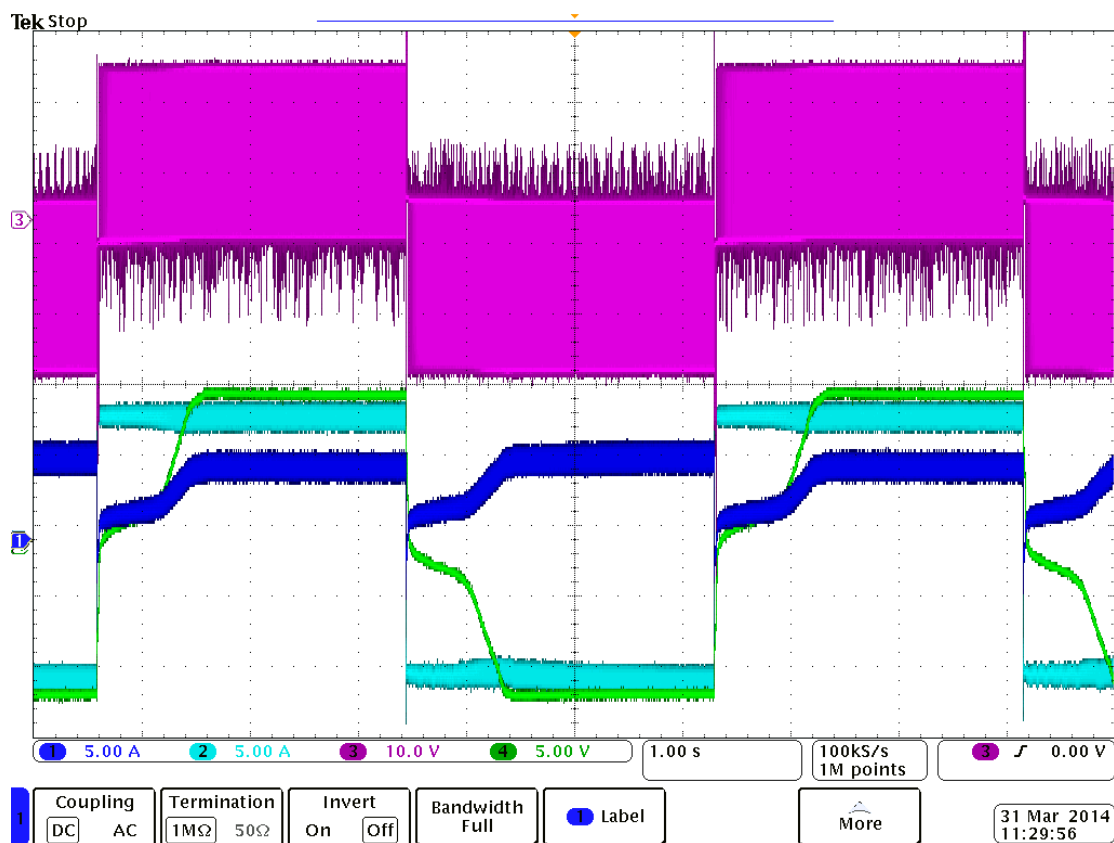
3 Měření na elektrolyzáru

3.1.1 Ověření funkčnosti algoritmu řízení na laboratorním modelu

Měření napětí a proudů bylo provedeno při připojení měniče k 14V baterii. Výsledné charakteristiky jsou při požadavku na proud 5A a 10A. Do osciloskopu byly přivedeny 4 signály:

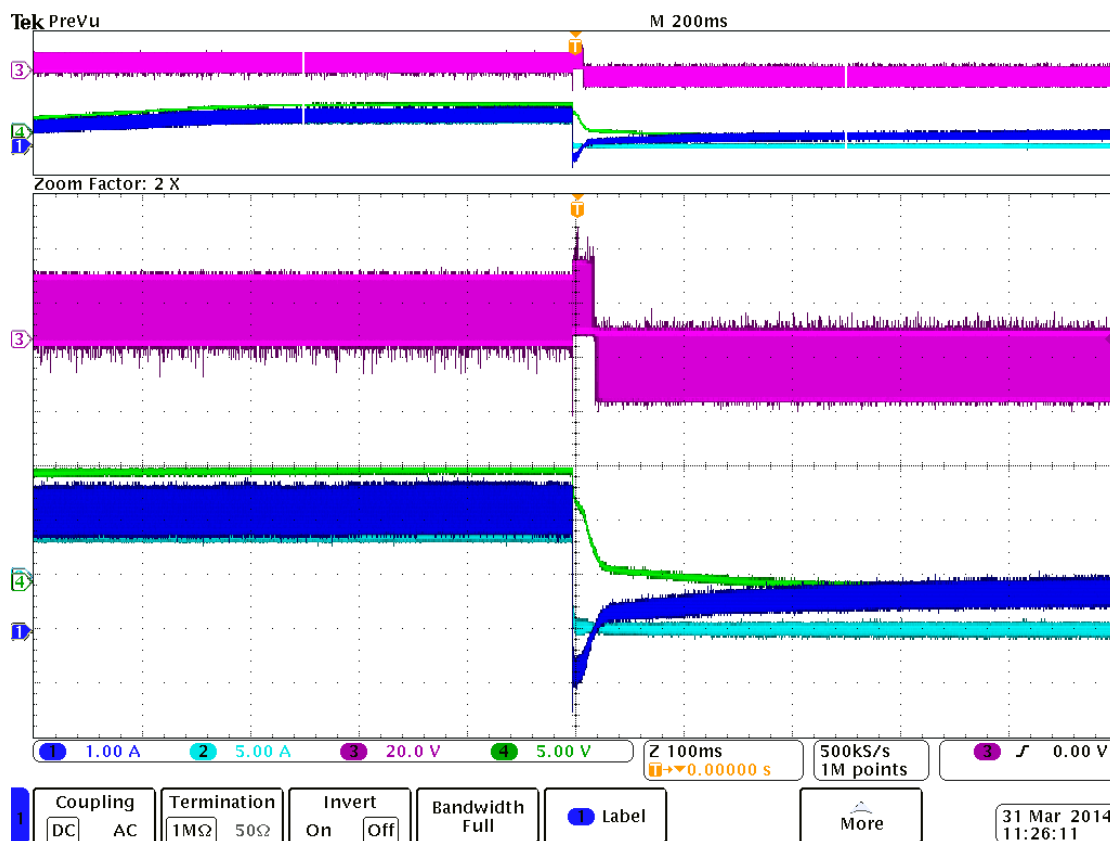
- tmavě modrá (kanál 1) – proud odebíraný z baterie
- světle modrá (kanál 2) – proud HHO článkem
- růžová barva (kanál 3) – napěťové pulzy z měniče přiváděné na HHO článek
- zelená barva (kanál 4) – napětí na HHO článku

Na obrázku Obr. 3.1 je vidět periodická změna polarity proudu a pulzů napětí za určený čas.



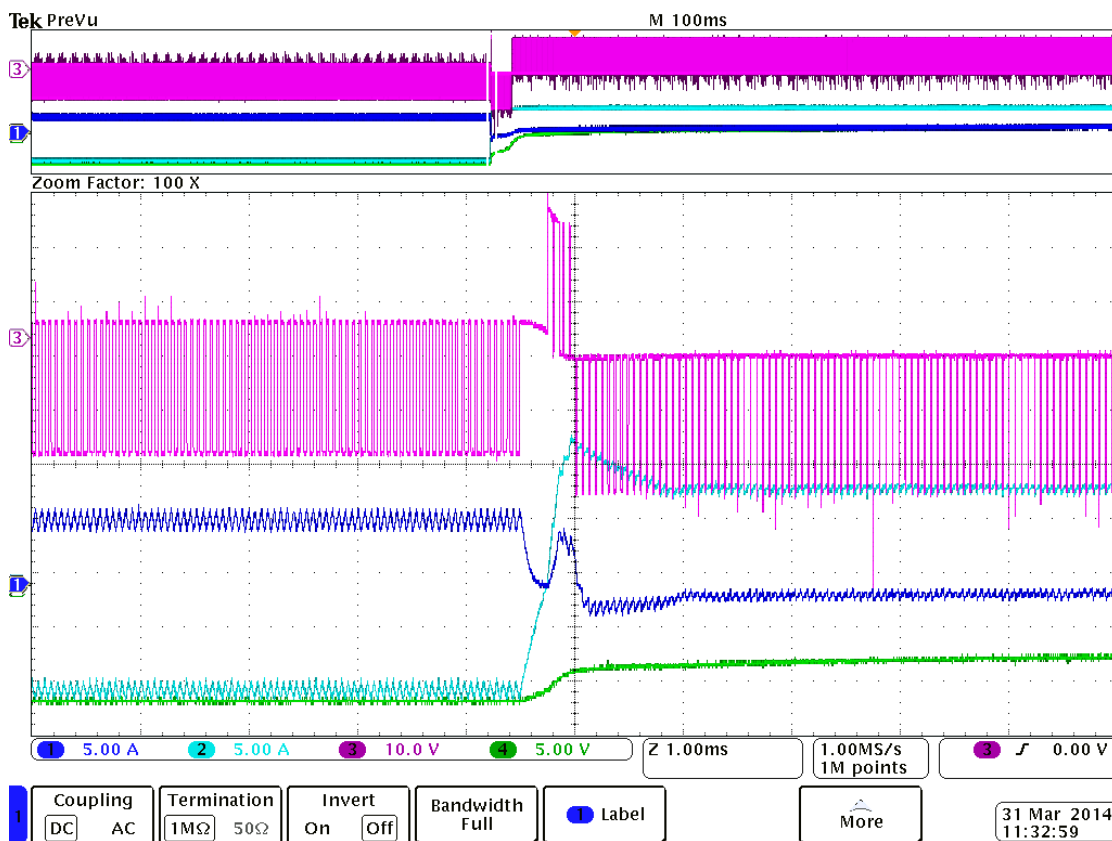
Obr. 3.1 Charakteristiky při 10A

Na obrázku Obr. 3.2 je vidět rekuperace měniče. Energie je po krátký časový interval při změně polarity proudu vnucována zpět baterii.



Obr. 3.2 Rekuperace

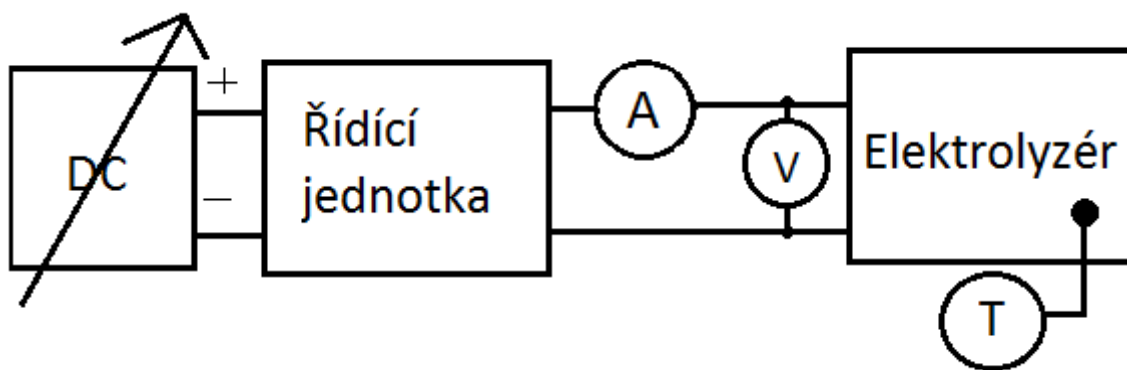
Na obrázku Obr. 3.3 je dobře vidět přechodový děj při změně polarity proudu. Je patrné, že regulátor proudu je nastaven dle požadavku na rychlou odezvu a má jen 1 zákmit, než se za několik period spínací frekvence ustálí na požadované hodnotě. Na tranzistoru je po dobu rekuperace zvýšené napětí v důsledku toho, že po tento krátký okamžik měnič funguje jako zvyšovací.



Obr. 3.3 Nastavení PS regulátoru

3.1.2 V-A charakteristika elektrolyzáru

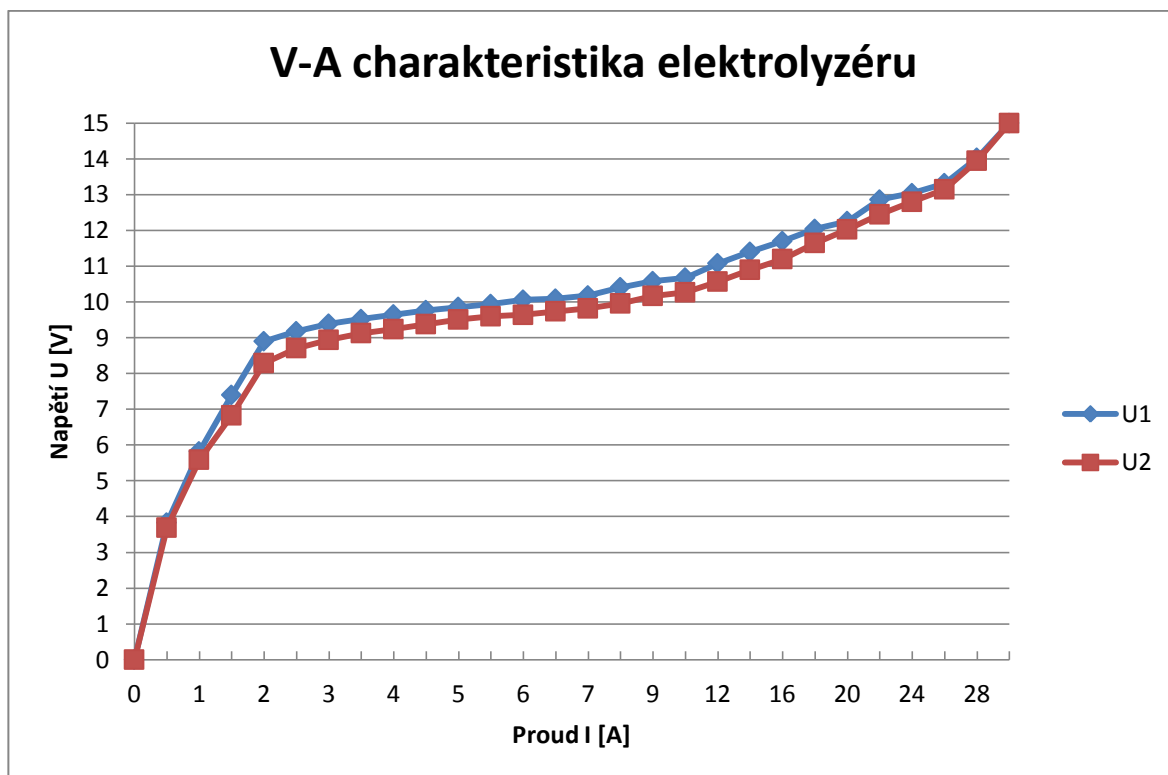
Jednou z důležitých elektrických charakteristik systémů je V-A charakteristika. Pro elektrolyzáru bylo uspořádání měření následující:



Obr. 3.4 Sestava měření V-A charakteristiky

Sestava se skládá ze stejnosměrného zdroje napětí, který napájí řídicí jednotku elektrolyzáru. Měřena byla i teplota na článku a teplota okolí. Byly provedeny dvě série měření. První měření bylo pro teplotu okolí 24,8°C a teplotu článku 39°C. První měření bylo provedeno vzestupně od 0A do 30A. Druhé měření bylo provedeno pro teplotu okolí 25°C

a teplotu článku 44°C. Druhé měření bylo provedeno sestupně od 30A do 0A. Výsledná charakteristika je na obrázku Obr. 3.5. Rozdíl obou měření je maximálně 7%.



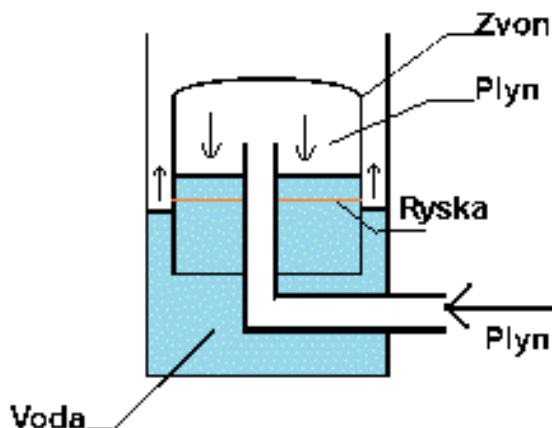
Obr. 3.5 V-A charakteristika elektrolyzéro

V-A charakteristika má dva zlomy. V okolí malých proudů do 3A je závislost lineární s nárůstem 3V/1A. Od 3A do 9A narůstá napětí na článku velice pomalu a jeho hodnota se zvýší jen o 1V. Od 10A pak charakteristika opět začíná stoupat se sklonem 0,25V/1A.

3.1.3 Měření množství vyrobeného plynu

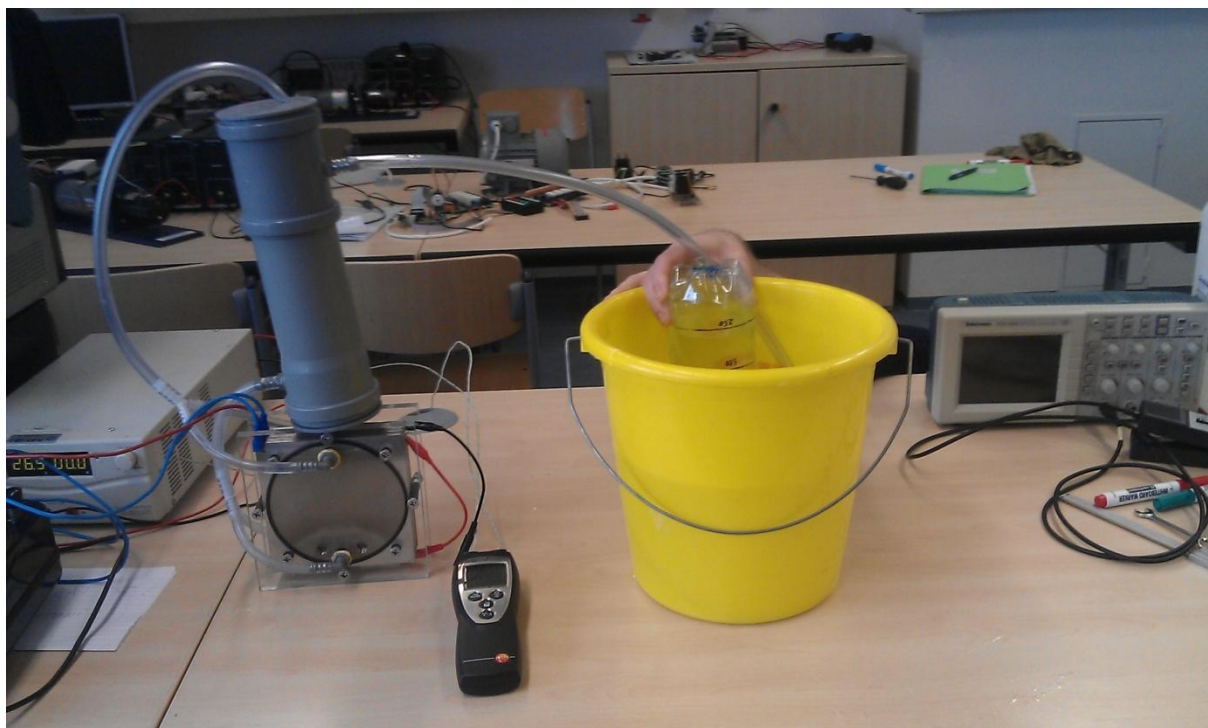
Závěrem je třeba měřením ověřit správnost výpočtu. Ověří se tak funkčnost celého systému. Což znamená funkce řídicí jednotky v sestavě s elektrolyzéro.

Měření množství vyrobeného plynu budeme měřit podle schématu z obrázku Obr. 3.6.



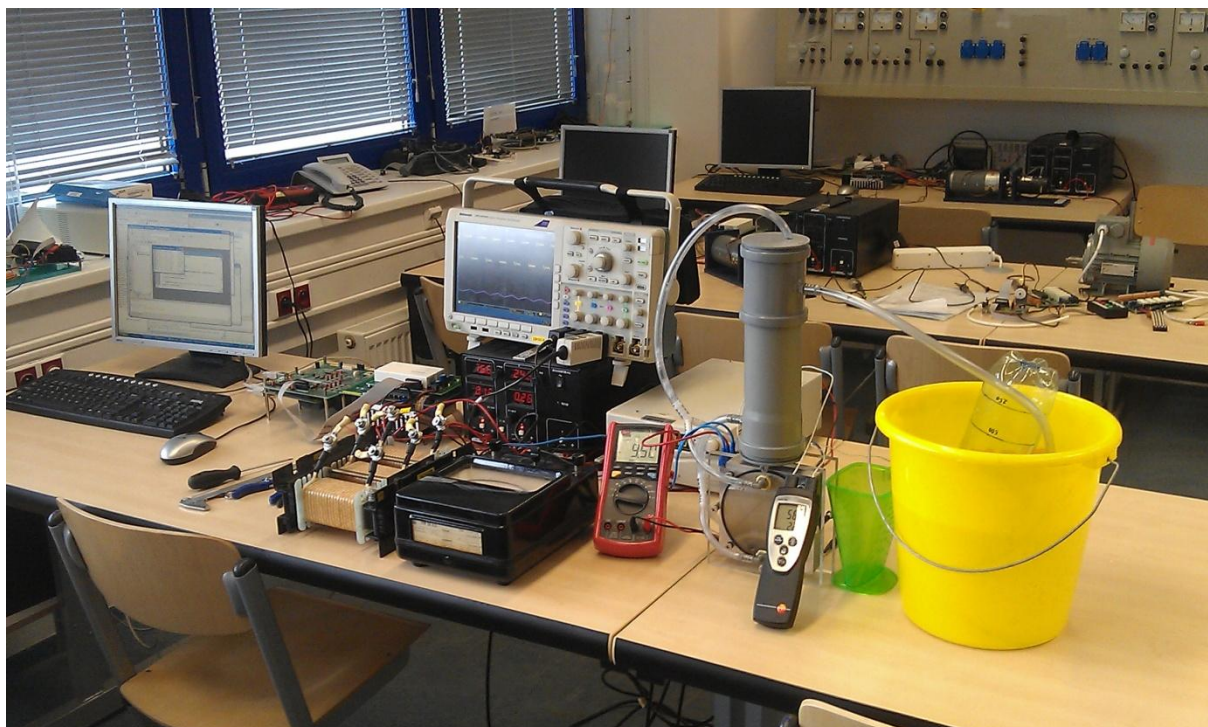
Obr. 3.6 Princip měření objemu plynu

Skutečné měření je zobrazeno na obrázku Obr. 3.7.

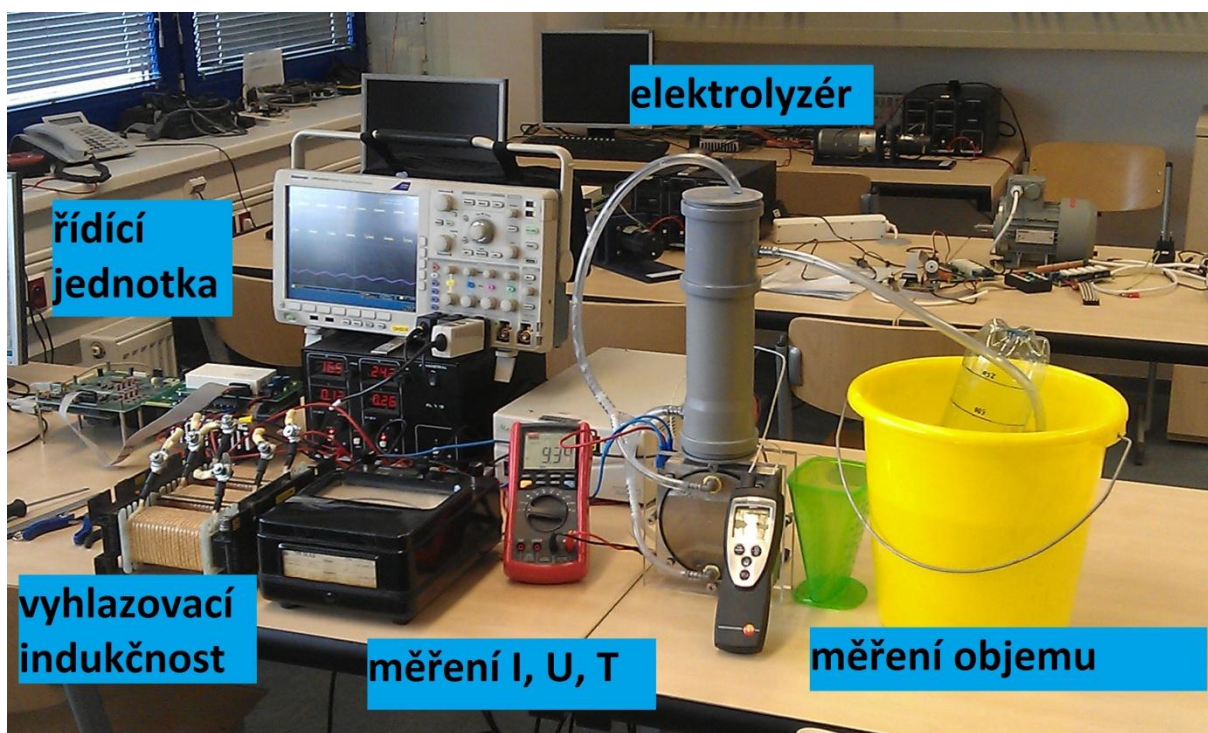


Obr. 3.7 Měření objemu plynu

Do nádoby s vodou ponoříme zvon, který celý naplníme vodou. Ve zvonu budeme jímat vyrobený plyn, který bude vytlačovat vodu do nádoby. Podle rysek na nádobě určíme objem vyrobeného plynu. Měříme čas, za který vyrobený plyn vytlačí vodu k požadované rysce na zvonu. Nejdříve byly změřeny časové intervaly pro hodnoty proudu 0-20A. Na dalších obrázcích (Obr. 3.8, Obr. 3.9) je vidět celé pracoviště pro měření.



Obr. 3.8 Sestava řídicí jednotky s elektrolyzérem vody



řídicí
jednotka

elektrolyzér

vyhlazovací
indukčnost

měření I, U, T

měření objemu

Obr. 3.9 Detail sestavy s popisky

Na následujícím obrázku je znázorněna závislost objemu vyrobeného plynu na proudu protékajícím elektrolyzérem.



Obr. 3.10 Množství vyrobeného plynu v závislosti na proudu

Pro každý proud bylo provedeno 5 kontrolních měření a hodnoty zprůměrovány. Podle předchozích výpočtů by se mělo požadované množství plynu 2,23 l/min vytvořit při proudu 39,4A. Provedeme výpočet množství vyrobeného plynu pro požadovaný proud 20A dle vzorce (2.23), (2.24), abychom mohli provést srovnání s naměřenými hodnotami.

Hmotnost vyloučeného plynu při proudu 20A za 1 min:

$$m = m_H + m_O = \frac{M_{mH} \cdot Q}{F \cdot z_H} + \frac{M_{mO} \cdot Q}{F \cdot z_O} = I \cdot \Delta t (104 \cdot 10^{-7} + 829 \cdot 10^{-7}) = 20 \cdot 60 \cdot (104 \cdot 10^{-7} + 829 \cdot 10^{-7}) = 12,48 \cdot 10^{-3} + 99,48 \cdot 10^{-3} = 0,11 \text{ g}$$

Množství vyloučeného plynu při proudu 20A za 1min:

$$V = \frac{m_H}{\rho_H} + \frac{m_O}{\rho_O} = \frac{12,48 \cdot 10^{-3}}{1,409} + \frac{99,48 \cdot 10^{-3}}{0,0889} = 0,01 + 1,1 = 1,11 \text{ l}$$

Při proudu 20A bylo změřeno množství vyrobeného plynu 1,05 l/min. Pro hodnoty od 5A můžeme brát charakteristiku vyrobeného plynu jako lineární. Hodnota se shoduje s teoretickými předpoklady. Rozdíl vypočtené a změřené hodnoty je 5%. Odchylna měření mohla být způsobena metodou měření související s nepřesným měřením času při odečítání množství vyrobeného plynu. Tato chyba byla minimalizována sérií pěti opakování měření a provedením aritmetického průměru pro každou měřenou hodnotu proudu.

Závěr

Problematika víceméně chemického tématu elektrolyzy vody, je v kombinaci s elektrotechnikou celkem neobvyklým spojením. Práce podává podrobný vhled do problematiky samotné elektrolyzy jako chemického procesu, ale také do elektrotechnické části v podobě návrhu řídicí jednotky ke konkrétnímu elektrolyzáru vody.

Nejdříve byla srovnána variabilita elektrolyzy vody z hlediska použití elektrolytů, elektrod či konstrukčního uspořádání. Poté byla pozornost přenesena na konkrétní výrobu HHO plynu pomocí elektrolyzáru vody. Elektrolyzátor funguje na principu suchého článku. Pro daný elektrolyzátor byla navržena optimalizace zejména v možnosti regulace proudu. Většinou byl elektrolyzátor napájen přímo z baterie a nebyla možná regulace vznikajícího plynu. Navržené řešení dále zajišťuje ochranu napájecího zdroje proti přetížení. Návrh celého zapojení byl nejdříve komplexně odzkoušen simulací v programu MATLAB – SIMULINK - PLECS. Návrh výkonové jednotky je v konfiguraci pulzní měnič s topologií H-můstek. Dimenzování bylo provedeno pro tranzistory typu IGBT i MOSFET a obě varianty byly srovnány z hlediska použitelnosti. Dále byl vybrán vyhovující způsob chlazení a dimenzován chladič. V práci je navržen a implementován algoritmus řízení pro DSP Texas Instruments TMS320F2812. Implementace byla provedena v jazyce C a v programu MATLAB. Byla implementována funkce změny polarity proudu, aby se uchovala stejná životnost obou elektrod. Po provedení simulace byla funkce celého systému ověřena měřeními. Byla vyzkoušena funkčnost číslicového regulátoru a změřeny průběhy výstupního proudu a napětí na článku při proudu 5A a 10A. Dále byla změřena V-A elektrolyzáru. Dle prvních praktických pokusů byla upravena konstrukce elektrolyzáru zvětšením stávajících otvorů a přidáním dvou nových otvorů do elektrod pro lepší cirkulaci elektrolytu přes elektrolyzátor. V závěru bylo objemovým měřením určeno množství vyrobeného plynu pro proud v rozsahu 0-20A. Odchylka teoretického výpočtu objemu plynu v porovnání s naměřenými výsledky činila 5%.

Dalším krokem do budoucna by mohlo být vyzkoušení elektrolyzáru jako doplňkového zařízení pro zvyšování účinnosti spalovacích motorů. V oblasti automobilového průmyslu se nabízí možnost vyvinout řídicí jednotku s MOSFET tranzistory, která by měla mít vyšší proudové zatížení, větší účinnost, menší rozměry a hmotnost.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ELEKTRINA: Elektrolyza. ČEZ [online]. 2009 [cit. 2013-09-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz4.htm>
- [2] Elektrolyza. Chemicke prezentace [online]. 2010 [cit. 2013-09-02]. Dostupné z: <http://chemickeprezentace.ic.cz/Elektrolyza.pdf>
- [3] Elektrolyza. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-09-02]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrol%C3%BDza>
- [4] GAŽO, Jan, Eduard HORVÁTH, Jiří KOHOUT, Miroslav SERÁTOR, Tibor ŠRAMKO, Anežka TOUŠKOVÁ a Zdeněk VALTR. *Anorganická chemia: laboratorné cvičenia a výpočty*. Bratislava: ALFA, 1977. ISBN 1104461.
- [5] DOLEŽEL, Ivo. *Elektrochemie*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998, 161 s. ISBN 80-708-2410-7.
- [6] SAMEC, Zdeněk. *Elektrochemie*. 1. vyd. Praha: Karolinum, 1999, 99 s. ISBN 80-718-4948-0. Dostupné z: <http://uloz.to/xmFE6hJ/elektrochemie-samec-pdf>
- [7] E-ChemBook. *Svante Augustus Arrhenius* [online]. © 2013 [cit. 2013-10-18]. Dostupné z: <http://www.e-chembook.eu/cz/dopluky/zivotopisy-chemiku/svante-augustus-arrhenius>
- [8] Stanovení vodivosti silného a slabého elektrolytu. In: *Fyzikální chemie - praktikum* [online]. 2010 [cit. 2013-10-18]. Dostupné z: http://is.muni.cz/el/1431/podzim2010/C5160/um/2407143/Silny_a_slaby_elektrolyt.pdf
- [9] JANÍK, Luděk a Petr DLOUHÝ. Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku. *Technet.cz* [online]. 28.1.2008 [cit. 2013-10-18]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-auta-i-elektroniku-p6d-tec-technika.aspx?c=A080127_234744_tec-technika_vse
- [10] GAŠPEREC, MICHAL. *KONSTRUKCE HHO GENERÁTORU*. Brno, 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54196. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. JIŘÍ KREJSA, PH.D.
- [11] Enviroexperiment. *Různé postupy vedou k chloru* [online]. © 2012 [cit. 2013-10-21]. Dostupné z: <http://www.enviroexperiment.cz/chemie-stredni-skola/ruzne-postupy-vedou-k-chloru>
- [12] URSÚA, Alfredo, Luis M. GANDÍA a Pablo SANCHIS. Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. *Proceedings of the IEEE*. 2012, roč. 100, č. 2.
- [13] What Is A Dry Cell?. *Dry-Cells* [online]. © 2013 [cit. 2013-10-24]. Dostupné z: <http://www.dry-cells.com/>
- [14] Wet Cell V Dry Cell. *Hydrotechnix* [online]. 2012 [cit. 2013-10-24]. Dostupné z: <http://www.hydrotechnix-solent.co.uk>
- [15] Tentang Hydrogen cell / HHO. *ARTECHBDG* [online]. 31.1.2010 [cit. 2013-10-25]. Dostupné z: <http://artechbdg.wordpress.com/2010/01/31/tentang-hydrogen-cell-hho/>
- [16] Products. *MyHHOHybrid* [online]. © 2011 [cit. 2013-10-25]. Dostupné z: <http://www.myhhohybrid.com/products.html>

- [17] *Green Way HHO* [online]. © 2010 [cit. 2013-10-27]. Dostupné z: <http://jednavodu.cz>
- [18] TEXAS INSTRUMENTS. *TMS320x281x DSP Event Manager (EV) reference guide*. 2004.
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. *TMS321x281x DSP System Control and Interrupts Reference Guide*. 2002.
- [20] PEROUTKA, Zdeněk. Výběr z přednášek - Mikroprocesorové řízení pohonů: KEV/MRP.2008.
- [21] VONDRÁŠEK, František, J. LANGHAMMER, A. PEROUTKA, J. MĚSÍČEK a J. MOLNÁR. *Výkonová elektronika: Projektování výkonových polovodičových měničů - vybrané stati*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008, 216 s. ISBN 978-80-7043-653-0.
- [22] SK 45 GH 063. In: *SEMIKRON* [online]. 16-01-2009 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SK_45_GH_063_24505701.pdf
- [23] SK 60 MH 60. In: *SEMIKRON* [online]. 16-01-2009 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SK_60_MH_60_24915270.pdf
- [24] ŠTĚPÁNEK, Jan. *Stavba pulzního měniče s MOSFET tranzistory*. Plzeň, 2012. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/5054/Stepanek_Jan_DP.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky.
- [25] TLP 250. *TOSHIBA* [online]. 1.10.2007 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.semicon.toshiba.co.jp/info/lookup.jsp?pid=TLP250&lang=en>
- [26] Application Note AN-7003. *SEMIKRON* [online]. 12.11.2007 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://www.semikron.com/skcompub/en/AN-7003_Gate_Resistor-Principles_and_Applications_rev00.pdf
- [27] *TMS320F2812: Datasheet*. 2001. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/82578/TI/TMS320F2812.html>
- [28] IGBT Driver Calculation. In: *PowerGuru - Power Electronics Information Portal* [online]. 25.7.2010 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.powerguru.org/igbt-driver-calculation/>

Příloha 1 – Programový kód isr.c

```
/******
```

```
Obsluzne rutiny preruseni
Lucie Buresova DP
```

```
LS 2013/14
```

```
*****/
```

```
#include "DSP281x_Device.h"
#include "DSP281x_Examples.h"
#include "ISR.h"
Uint16 i=0;
//int uz=18022; //napeti zdroje 14V, ktere se ale prepocitava z regulatoru
int k=23406; //konstanta uref/uc uref=20V / uc=14V, (format Q1.14)
int prep1, prep2; //hodnota compare registru
int tprp=2343; //polovicni perioda t3pr
int z; //pomerne sepnuti
int epsilon; //regulacni odchylka
int ir; //proud ze zpetne vazby
long uz;
int iz=3*819; //pozadovana hodnota proudu 1A=819
int ir,ir2; //zmerena hodnota proudu z prevodniku
int umax=12000; //maximalni hodnota napeti pro saturaci regulatoru - 14V
//int umax=12000; //maximalni hodnota napeti pro saturaci regulatoru - 36V
long suma=0;
extern int kp,ki,qp,qi,iz; //globalni promenne (deklarace v main.c)
long n=0;
long time=25000; //cas pro zmenu polarity proudu cca 2min
interrupt void evb_timer_isr(void)
{
//AdcRegs.ADCRESULT0 proud 1
//AdcRegs.ADCRESULT1 proud 2

//hodnota proudu prectena z prevodniku upravena o konstantu cidla +-10A, Iref=40A
ir=((AdcRegs.ADCRESULT0>>4)-2063)*4;
ir=-ir;
ir2=((AdcRegs.ADCRESULT1>>4)-2063)*4;

//ps reg:

epsilon=iz-ir;

uz=((long)kp*epsilon +(suma>>(qi-qp)))>>qp;
if (uz>umax)
uz=umax;
else if (uz<-1*umax)
uz=-umax;
else
suma+=(long)ki*epsilon;

//urceni velikosti compare registru:
```



```

z=((long)uz*k)>>14;
prep1=trp+(((long)trp*z)>>15);
prep2=trp-(((long)trp*z)>>15);

    EvbRegs.CMP4 = prep1;
    EvbRegs.CMP5 = prep2;

// Priprava na dalsi preruseni:

    AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1=1;
    AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR=1;
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
// EvbRegs.EVBIFRA.all = BIT9;
}

interrupt void evb_timerT4_isr(void)
{
n=n+1;
if (n>=time)
    {
    n=0;
    GpioDataRegs.GPATOGGLE.all=0x003F;    //blikani LED na brane A
    iz=iz*(-1);                            //otoceni polarity proudu
    }
// Priprava na dalsi preruseni:
    EvbRegs.EVBIFRB.all=BIT2;
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP5;
}

```