

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Řízení elektrického pohonu elektrokoloběžky**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan DVORSKÝ**  
Osobní číslo: **E11B0016P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Řízení elektrického pohonu elektrokoloběžky**  
Zadávající 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 :

1. Proveďte analýzu elektrického pohonu koloběžky a zvolte topologii.
2. Analyzujte regulační algoritmy zvoleného pohonu.
3. Proveďte simulaci vybraných řídicích algoritmů.
4. Vytvořte podklady algoritmů pro programátora.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

**1. Určí vedoucí práce.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, GSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Práce se zabývá návrhem pohonu elektrokoloběžky s BLDC motorem a jeho řízením. V práci jsou shrnuty základní teoretické poznatky, skalární a vektorové řízení BLDC a simulace pohonu. V závěru je návrh regulačního algoritmu pro programátora.

## **Klíčová slova**

BLDC, Skalární řízení, Vektorové řízení, PMSM

## **Abstract**

The thesis proposes a drive of electric scooter with BLDC motor and its management. The thesis summarizes the basic theoretical knowledge, scalar and vector control BLDC drive and its simulation. In conclusion, it contains draft control algorithms for the programmer.

## **Keywords**

BLDC, scalar control, vector control, PMSM

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Jan Dvorský

## Poděkování

*Děkuji vedoucímu práce Doc. Ing. Pavlu Drábkovi Ph.D. za jeho trpělivost a ochotu.*

*Děkuji rodině za její psychickou podporu.*

*Děkuji přátelům za to, že to se mnou vydrželi.*

## Obsah

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>ÚVOD</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>2</b> | <b>NÁVRH TOPOLOGIE POHONU ELEKTROKOLOBĚŽKY</b> .....      | <b>10</b> |
| <b>3</b> | <b>POPIS POUŽITÝCH KOMPONENT</b> .....                    | <b>12</b> |
| 3.1      | LiFePO4 BATERIE .....                                     | 12        |
| 3.2      | BALANCER.....   | 13        |
| 3.3      | JEDNOTKA MĚNIČE .....                                     | 14        |
| 3.4      | STŘÍDAČ .....   | 14        |
| 3.5      | ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA.....                                      | 17        |
| 3.5.1    | <i>Zapojení modulu</i> .....                              | 18        |
| 3.6      | BLDC MOTOR .....  | 19        |
| 3.6.1    | <i>Konstrukční principy</i> .....                         | 19        |
| 3.6.2    | <i>Stator</i> .....                                       | 19        |
| 3.6.3    | <i>Rotor</i> .....  | 21        |
| 3.6.4    | <i>Provoz BLDC motoru</i> .....                           | 22        |
| 3.6.5    | <i>Základní charakteristiky synchronního stroje</i> ..... | 23        |
| <b>4</b> | <b>PRINCIP REGULACE BLDC</b> .....                        | <b>26</b> |
| 4.1      | SKALÁRNÍ ŘÍZENÍ.....                                      | 26        |
| 4.1.1    | <i>Oblast konstantního momentu</i> .....                  | 26        |
| 4.1.2    | <i>Oblast konstantního výkonu</i> .....                   | 28        |
| 4.2      | VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ.....                                     | 29        |
| 4.2.1    | <i>Matematický aparát</i> .....                           | 30        |
| 4.2.2    | <i>Aplikace vektorového řízení</i> .....                  | 32        |
| <b>5</b> | <b>SIMULACE ŘÍDÍCÍCH ALGORITMŮ</b> .....                  | <b>33</b> |
| 5.1      | ZPŮSOB SIMULACE.....                                      | 33        |
| 5.2      | REŽIM POHON .....   | 35        |
| 5.3      | REŽIM GENERÁTOR .....                                     | 43        |
| 5.4      | PŘECHODOVÝ JEV .....                                      | 45        |
| <b>6</b> | <b>NÁVRH ŘÍDÍCÍHO ALGORITMU PRO PROGRAMÁTORA</b> .....    | <b>48</b> |
|          | <b>ZÁVĚR</b> .....  | <b>51</b> |
|          | <b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....      | <b>52</b> |
|          | <b>PŘÍLOHA 1</b> .....                                    | <b>1</b>  |
|          | <b>PŘÍLOHA 2</b> .....                                    | <b>2</b>  |
|          | <b>PŘÍLOHA 3</b> .....                                    | <b>3</b>  |



# 1 Úvod

Lidská potřeba „dopřít se“ je známá od pradávna. Od pradávna, kdy pračlověk začal s domestikací zvířat. Postupně se naučil jezdit na koni, případně ho používat jako tažné zvíře. U koní, případně volů, lidstvo zůstalo velice dlouhou dobu. A to až do 18 století kdy James Watt vynalezl parní stroj. Tímto vynálezem byla odstartovaná průmyslová revoluce. Klíčový byl vynález spalovacího motoru, který se udržel dodnes. Nejnovější trendy se začínají zabývat praktickým použitím elektromotorů v dopravních prostředcích. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl věnovat se ve svojí bakalářské práci právě návrhu a simulaci pohonu „voztka“ koloběžky.

Tato práce se zabývá návrhem pohonu pro elektronickou koloběžku a jeho řízením. Základní požadavek na koloběžku je demonstrační. Z tohoto důvodu je požadavek na velký výkon motoru. Dalším požadavkem byla možnost brzdy rekuperací. Z těchto důvodů byly zvoleny následující základní komponenty:

- ***BLDC motor***
- ***LiFePO4 baterie***
- ***Výkonný 16bit procesor***

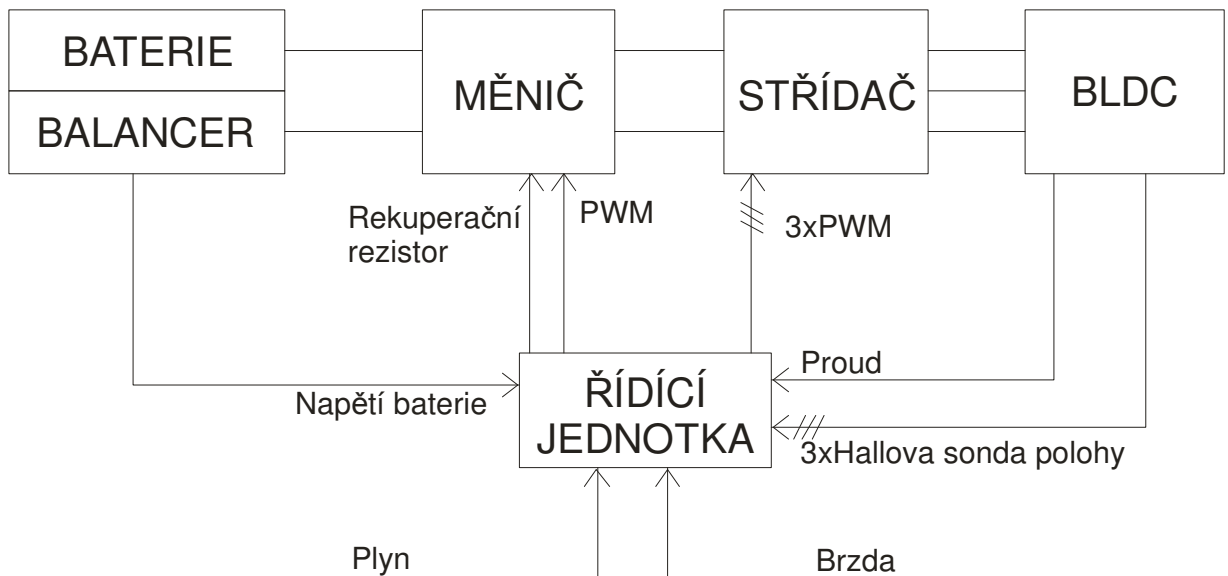
BLDC motor má vysokou účinnost, ale potřebuje k sobě střídač. Aby bylo umožněno efektivní rekuperování a řízení pohonu, je nutné použít DC-DC měnič.

V této práci je dále řešena simulace navrženého typu pohonu, způsoby jeho regulace a návrh řídicích algoritmů pro programátora.

Práce na elektrokoloběžce je v podstatě rozdělena na dvě části. Kolega Lukáš Sedláček se zabývá elektronickou realizací střídače a DC-DC měniče. Moje část se zabývá simulováním pohonu a jeho řízením s použitím kolegy realizovaných komponent.

V příloze je jednoduchý testovací kód a změřené průběhy z běhu testovací verze pohonu.

## 2 Návrh topologie pohonu elektrokoloběžky



Obrázek 2.1 Topologie pohonu

Topologie pohonu elektrokoloběžky zohledňuje požadavky zmíněné v úvodu. Vzhledem k tomu, že účel koloběžky je především demonstrační, je celý pohon naddimenzovaný. Pohonnou jednotkou je vysoce účinný BLDC motor o výkonu 1kW s maximálním krouticím momentem 45Nm (viz 3.6 *BLDC motor*). Motor je zabudovaný v ráfku zadního kola.

Přestože jde v principu o třífázový synchronní stroj s permanentními magnety, je nutné použít střídač. Střídač mimo to, že zajišťuje elektronickou komutaci motoru, má za úkol fungovat jako řízený usměrňovač. Střídač v usměrňovačovém chodu zajišťuje brzdu motorem a umožňuje tak rekuperaci energie. Jednotku střídače navrhoval kolega Sedláček a je detailně popsána v kapitole 3.4 *Střídač*.

Aby bylo zajištěno konstantní napětí pro motor, respektive pro střídač, je mezi baterií a střídačem jednotka měniče. Měnič musí být dvojkvadrantový, aby umožňoval rekuperaci. Jednotka měniče má také za úkol zajišťovat napájení dílčích komponent, a to především řídicí jednotky. Součástí jednotky měniče je rekuperační odpor, který chrání baterii před přebitím. Jednotka měniče nebyla z časových důvodů realizována, nicméně v kapitole 3.3 *Jednotka měniče* je popsána teorie.

Baterie k celému zařízení je typu Lithium železo fosfátový akumulátor, jinak známý jako LiFePO<sub>4</sub>. Tento typ byl zvolen především díky schopnosti rychle změnit smysl proudu,

respektive chemické reakce uvnitř. Baterie má nominální napětí 48V a je složena z 15 článků. Díky této baterii není nutné používat superkapacitory, jako tomu bylo u předchozí verze koloběžky. Vlastnosti LiFePO<sub>4</sub> baterie jsou detailně vystiženy v kapitole *3.1 baterie*. Nedílnou součástí baterie musí být balancer. Ten chrání články baterie před přebitím nebo podbitím(viz *3.2 balancer*).

Mozkem celé koloběžky je CPU. Tu měl tvořit 16bitový DSPic s výpočetním výkonem 70MIPS. Bohužel se tento procesor nepodařilo oživit. Z toho důvodubyl zvolen 8bitový pic,s výpočetním výkonem pouze 5MIPS. To má za následek značně zhoršené regulační vlastnosti pohonu. Procesor je podrobně charakterizován v kapitole *3.5 Řídící jednotka*.

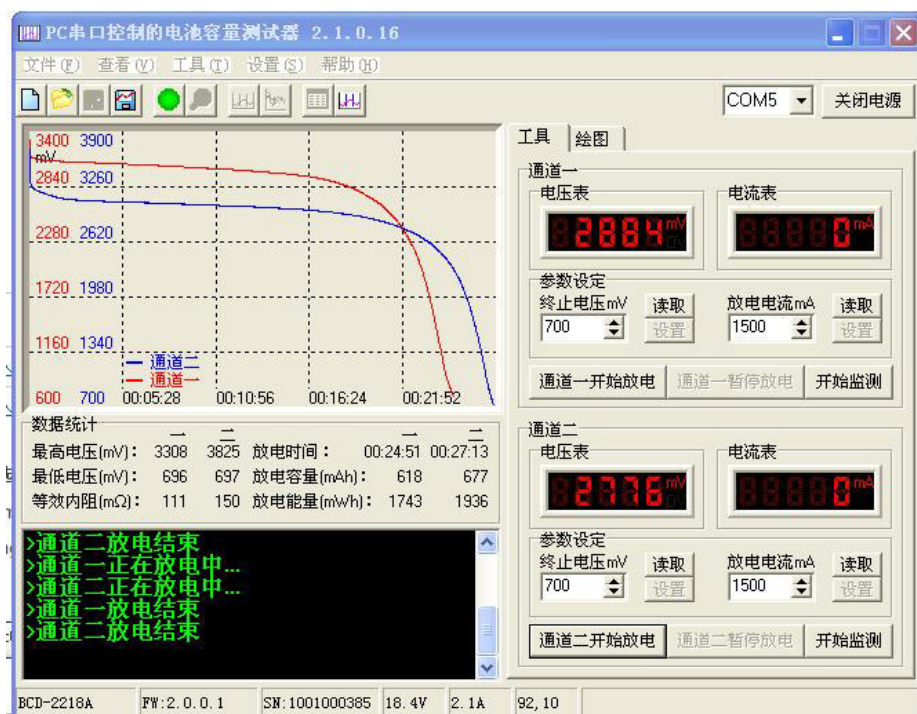
## 3 Popis použitých komponent

### 3.1 LiFePo4 Baterie

LiFePo<sub>4</sub>, celým názvem lithium-železo-fosfátový akumulátor, je nabíjecí baterie Li-Ion typu, která používá odlišnou katodu. Technologie LiFePO<sub>4</sub> katody byla vyvinuta v roce 1996. Jistý šéf nejmenované jablečné společnosti by na adresu LiFePO<sub>4</sub> nepochybně prohlásil "itworkslikemagic", a nebyl by daleko od pravdy. LiFePO<sub>4</sub> má prakticky pouze klady; využívá železa a fosforu místo vzácných kovů, má nízké výrobní náklady, skvělou tepelnou stabilitu, vynikající bezpečnost a dobrý výkon daný vysokou kapacitou 170 mAh/g.[1]

LiFePO<sub>4</sub> lze (dle konkrétního typu) používat v rozmezí pracovních teplot -20 až 70 C. Prakticky netrpí samovybíjením, nemají paměťový efekt. Nárazově jsou schopny dodat proud odpovídající až 10násobku své kapacity.[1]

Nominální napětí článku je ~3,2 V, maximální nabíjecí napětí je 4,25V. Minimální napětí, na něhož je možné článek vybit, je obvykle 2,5V. Baterie mají téměř lineární vybíjecí charakteristiku. (Obrázek 3.1.1)



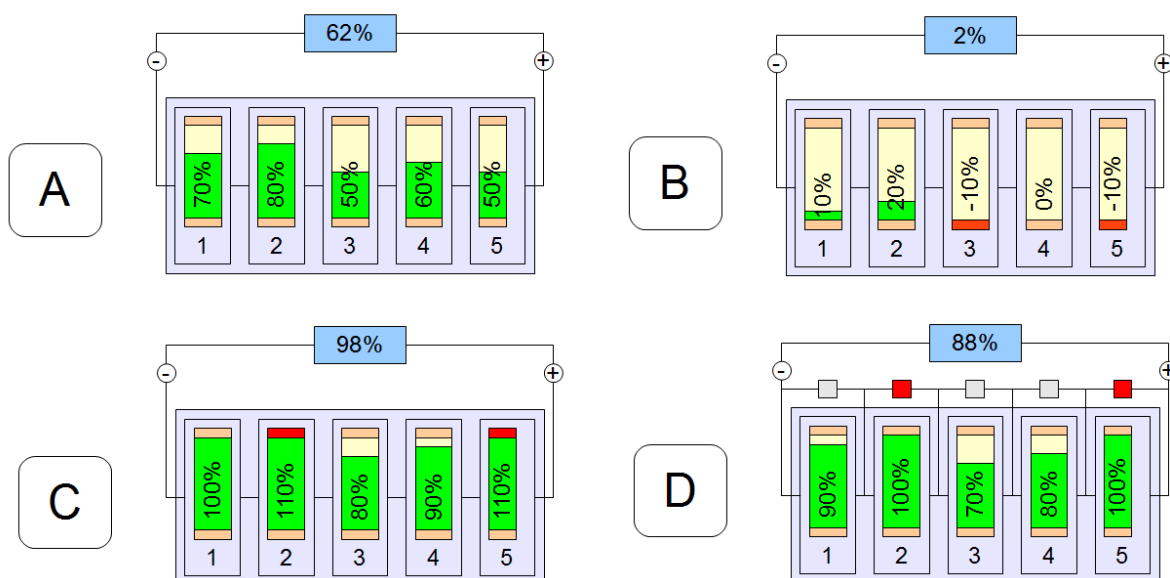
Obrázek 3.1 Vybíjecí křivka dvou vzorků LiFePo4 Coolook[2]

LiFePO<sub>4</sub> články jsou totiž citlivé na přebíjení. Každá baterie proto musí obsahovat balancovací moduly, které hlídají stejnoměrné nabití všech článků. [viz Kapitola 3.2 Balancer]

Životnost těchto akumulátorů se pohybuje v rozmezí 4000 - 8000 nabíjecích cyklů, v ideálním případě tedy vydrží pracovat i více než 20 let. Takto dlouhá životnost samozřejmě předpokládá ideální podmínky k provozu (vybití na 50 % kapacity, bezchybná činnost podpůrné elektroniky při nabíjení). Většinou se proto kalkuluje s životností 10 - 15 let.[1]

### 3.2 Balancer

Typicky jednotlivé články baterie mají rozdílnou kapacitu a mohou být různě vybité. Rozdíl kapacity se zvyšuje se stářím baterie. Bez balancování je článek s nejmenší kapacitou „nejslabší článek“. Může být snadno přebitý nebo podbitý, zatímco články s větší kapacitou ještě nedokončily cyklus. V nejextrémnějším případě může dojít k destrukci článku, a tedy i baterie. Například přebití článku Li-Ion baterie je doprovázeno explozí. Použité LiFePo4 jsou zcela bezpečné, a v případě přebití se článek pouze ohřeje a nafoukne. Samozřejmě je



Obrázek 3.2 Různě nabité články v baterii. Článek 5 má nejmenší kapacitu

pak nelze používat.[3]

Balancer je tedy zařízení chránící nejslabší článek baterie tak, že článek s největší kapacitou může být plně nabitý/vybitý, zatímco u slabých článků nedochází k přebíjení/podbíjení. Výsledkem je zvýšená životnost baterií a maximalizace uložené energie.[3]

Balancování může být buď pasivní, kdy se elektronicky hlídá napětí článku, a jakmile by nastalo přebíjení, nabíjecí proud by se mařil v odporech, nebo aktivní. Energeticky efektivnější aktivní balancování porovnává nabití jednotlivých článků v baterii a energii těch více nabitých předává článkům méně nabitým. Sofistikované balancery sledují i další

parametry článků jako je například teplota nebo proud aby dosáhly maximální životnosti baterie.[3]

### 3.3 Jednotkaměniče

*„Výhody měničů oproti klasickým zdrojům se síťovými transformátory jsou nesporné. Nízká hmotnost, menší cena, nízké tepelné ztráty, velký rozsah vstupního napětí a jednoduchá změna výstupního napětí. Nevýhodou může být generování EMI rušení, které lze ale odstranit vhodným stíněním montážního boxu a vstupními a výstupními filtry.*

*Měniče se rozdělují na dva základní typy, s galvanickým oddělením a bez galvanického oddělení. Měniče bez galvanického oddělení se využívají hlavně tam, kde není požadavek na galvanické oddělení primární a sekundární strany. Celý obvod měniče je značně jednodušší oproti měniči s transformátorem. Místo pulzního transformátoru se využívají jen tlumivky buď feritové nebo železoprachové. Díky neoddělení primární a sekundární strany se nemusí oddělovat snímač výstupního napětí. Velkou výhodou neoddělujících měničů je, že netransformují celý přenášený výkon, ale pouze rozdíl napětí na vstupu a výstupu. Tuto výhodu ale ztrácí, jestliže pracují s velkým převodem přibližně na 1:5.*

*Základními typy měničů s galvanickým oddělením jsou blokující, jednočinný propustný a dvojčinný měnič. Blokující je nejjednodušší, má velký rozsah vstupního napětí, lze ho jednoduše upravit na samokmitající zapojení, a není nutná velká výstupní filtrace. Nevýhodou je nemožnost využití na velké výkony a dále toho, že tranzistor musí být dimenzován minimálně na 150% vstupního napětí. Výhodou je možnost využití na velké výkony a potřeba jen jednoho buzení. Dalšími nevýhodami je, že tranzistor musí být minimálně na dvojnásobek vstupního napětí nebo musí být zajištěno plovoucí buzení, podle zapojení. Dvojčinný propustný zdroj má největší poměr výkon/rozměr transformátoru. Díky tomu se využívají pro největší výkony. Vinutí je střídavě připojováno v obou polaritách ke zdroji.“ [14]*

### 3.4 Střídač

*„Hlavním rozcestníkem u návrhu střídače je přenášený výkon a složení z diskrétních součástek nebo z bezpotenciálového modulu. Bezpotenciálový modul má výhodu v tom, že v sobě většinou integruje výkonovou část, budič tranzistorů a ochranné diody. Plošný spoj*

*měníče je pak přehlednější a menší, jedinou nevýhodou jsou vyšší ceny těchto bloků oproti diskrétním součástkám, a v případě poruchy jsou neopravitelné.*

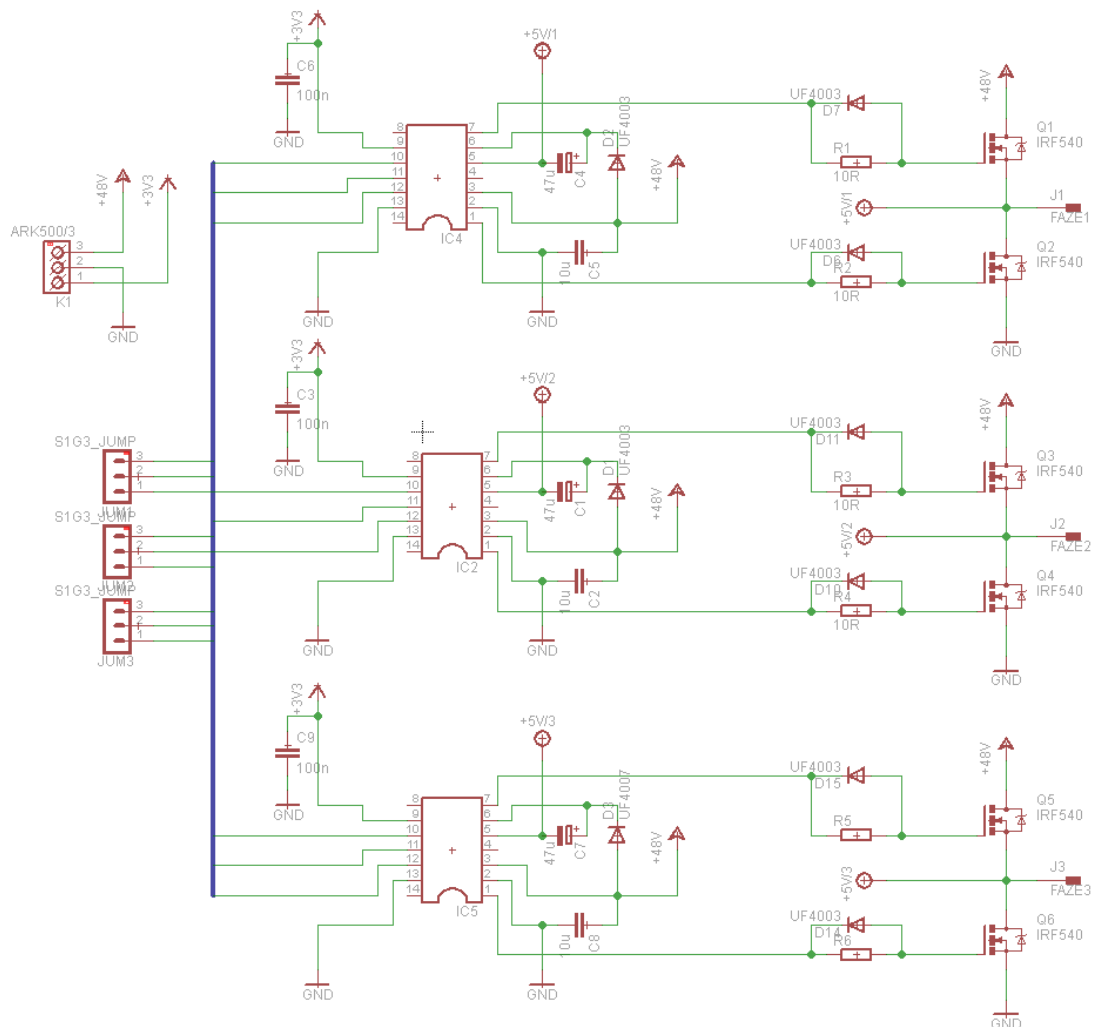
*Námi zvolená diskrétní cesta je při vývoji výhodná právě díky možnosti vyměnit jednotlivé součástky samostatně. Nejvyšší cenou střídače jsou právě výkonové polovodičové spínače, jež tvoří až třetinu ceny celého pohonu. Tranzistory MOS-FET lze spínat vysokou frekvencí, řádově až stovkami kHz, a tím dosáhnout hladké regulace. Bohužel MOS-FET tranzistory nejsou schopné spínat velké napětí a proudy. Velké proudy lze získat z tranzistorů na nízké napětí a naopak. S narůstající napěťovou zatížitelností totiž narůstá i tloušťka přechodu, a tím jeho přechodový odpor. U nízkonapěťových MOS-FETů speciálních technologií výroby je možno dosáhnout přechodového odporu v řádech jednotek až desítek milihmů. U vysokonapěťových tranzistorů odpor v sepnutém stavu dosahuje i jednotek ohmů.*

*V dnešní době se nejvíce využívají tranzistory IGBT (InsulatedGateBipolar Transistor), které spojují výhody jak MOS-FETů, tak bipolárních tranzistorů. Na vstupní straně se tranzistor chová jako tranzistor s izolovaným hradlem (snadné řízení, vysoká spínací frekvence). Na výstupní straně se chová jako bipolární tranzistor (nízké spínací ztráty, možnost přenášet velké proudy při vysokých napětích). Pro nejvyšší výkony se stále využívají vypínací tyristory GTO (GateTurn-Off) případně hybridní technologie jako IGCT (InsulateGateControlledThyristor) případně MCT (MOS-ControlledThyristor).*

*Ve střídači jsou dva tranzistory zapojeny sériově, a jejich střed je připojen na zátěž. Spínání spodního tranzistoru je bezproblémové, jelikož jeho source je na potenciálu země. U spínání horního tranzistoru nastává problém, neboť potřebujeme nabít Gate na napájecí napětí +12V, aby se tranzistor otevřel, protože jeho source je na potenciálu napájení. Je několik možností, jak zajistit tento napěťový posun. Jednoduchým a efektivním způsobem je použití GDT (Gate Driver Transformator). Má jedno primární vinutí a dvě sekundární vinutí, které se připojují na jednotlivé gaty. Tento způsob buzení je však možný pouze pro řízení polomostů nebo plných můstků, kde se spínají tranzistory v protifázy, a ne jednotlivě jako je nutností u 3f střídače. Nevýhodou GDT je nemožnost přenést nízké kmitočty, povely k dlouhému otevření tranzistorů (nezanedbatelná DC složka, která nelze přes transformátor přenést) a vysoké nároky na nízkou rozptylovou indukčnost vinutí.*

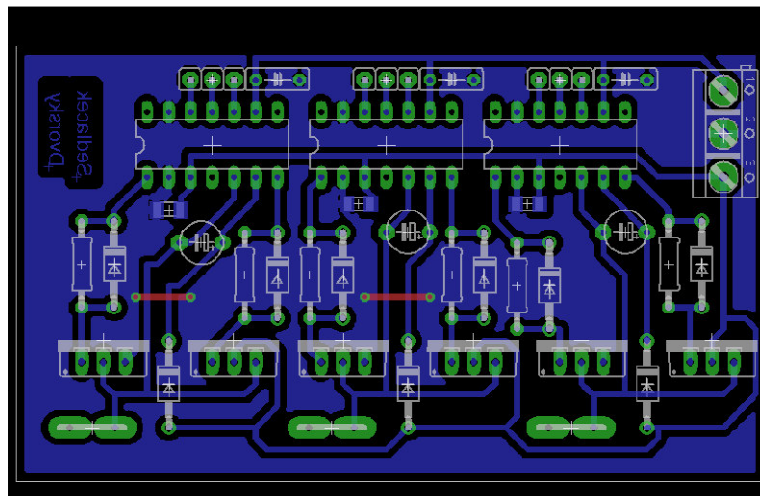
Další možností je využití speciálních obvodů, tzv. Highside driver. Tyto obvody většinou v sobě integrují nábojovou pumpu, která zajišťuje posunutí napěťových úrovní. Společně s budičem spodního tranzistoru a ovládací logikou zajišťují tak komplexní ovládací modul pro tranzistory. Námí zvolený integrovaný obvod IR2110 je vysokonapěťový a vysokorychlostní výkonový MOSFET a IGBT budič s implementovaným High a Lowside výstupem. Logické vstupy jsou kompatibilní se standarty CMOS nebo LSTTL až k 3,3V logice. Výstup driveru je konstruován na vysoké pulzní odběry a nízké transportní zpoždění. Velmi nízké zpoždění (maximálně 10ns) usnadňuje práci na velmi vysokých frekvencích. Plovoucí výstup může být využíván pro buzení MOSFETů s N-kanálem nebo IGBT až do napětí 500V. Napájecí napětí gatu je 10-20V a špičkový výstupní proud až 2A oběma směry., [14]

Na obrázku 3.2 lze vidět schéma navrženého střídače. Obrázek 3.3 Známořňuje návrh PCB Střídače.



Obrázek 3.3 Schéma střídače

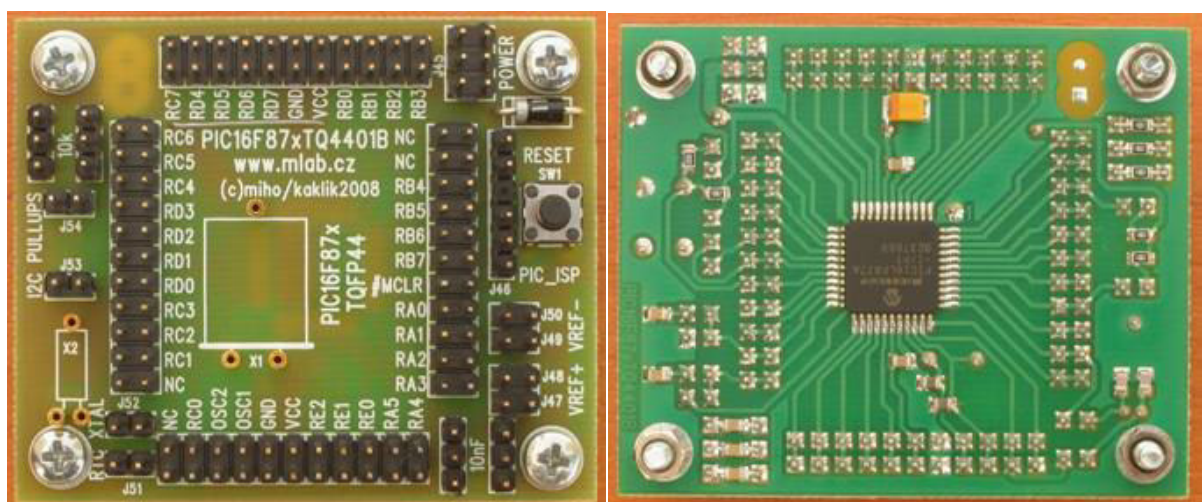




Obrázek 3.4 Návrh PCB Střídače

### 3.5 Řídící jednotka

Jako řídicí jednotka byl navržen 16bitový dsPIC s označením „dsPIC33EP512MU810“ a s výpočetním výkonem 70MIPS. Bohužel tento procesor se nepodařilo oživit. Z toho důvodu je pro řízení využit 8bitový PIC s označením „PIC16F877AT“. Pro procesor je použit modul z projektu MLAB (autor Horkel Milan).



Obrázek 3.5 Modul s procesorem PIC16F877AT [5]



## 3.6 BLDC motor

BLDC (Brushless direct current) motor je synchronní stroj napájený stejnosměrným napětím. To znamená, že otáčky elektrického pole statoru musí být stejné s mechanickými otáčkami rotoru. BLDC motory mohou být v jednofázové, dvojfázové nebo třífázové konfiguraci. Tato práce je zaměřena pouze na trojfázové motory. [7]

Hlavní výhodou BLDC motoru oproti běžným stejnosměrným motorům je absence komutátoru. Díky tomu BLDC motory dosahují větší spolehlivosti než komutátorové motory. Komutaci zajišťuje napájecí střídač. V našem případě třífázový (viz kapitola 3.4 Střídač). BLDC motor má mnoho výhod oproti komutátorovým motorům. Patří mezi ně:

- *Vysoká účinnost*
- *Dlouhá životnost*
- *Lepší momentová charakteristika*
- *Vyšší rozsah rychlosti*

Navíc poměry moment/velikost a moment/váha motoru jsou velmi vysoké, což činí BLDC motor velice užitečný v aplikacích kde jsou místo a váha kritickými faktory. [7]

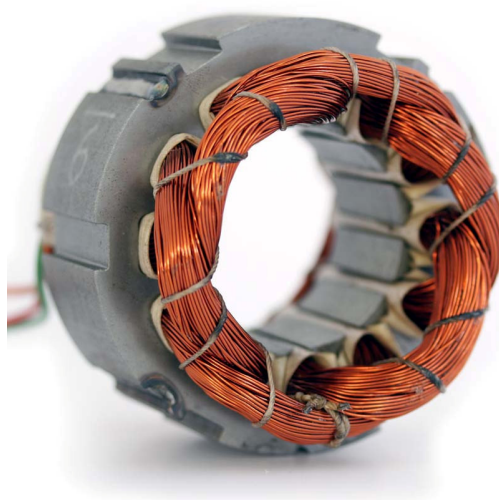
### 3.6.1 Konstrukční principy

#### 3.6.2 Stator

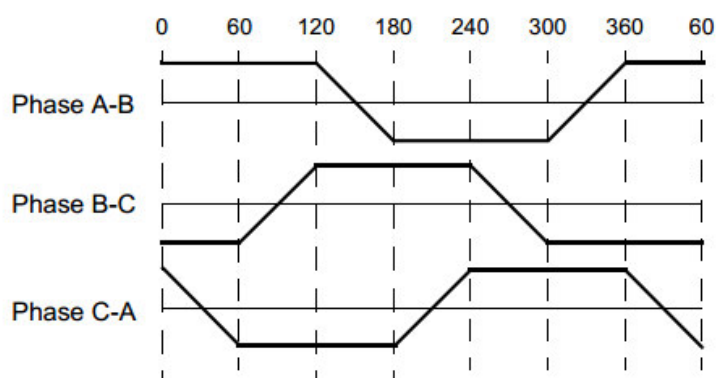
Stator BLDC motoru tvoří železné plechy, s vinutím umístěným do drážek které jsou vystřiženy axiálně podél vnitřního obvodu (*jak je vidět na obrázku 3.7*). Stator BLDC motoru se podobá statoru asynchronního motoru, avšak stator BLDC má jinak rozmístěné vinutí. Většina BLDC motorů má tři statorová vinutí spojené do hvězdy. Každé z těchto vinutí je rozmístěno do drážek tak, aby tvořilo sudý počet pólů. Existují dva typy vinutí: lichoběžníkové a sinusové motory. Tento rozdíl je vytvořen vhodným pospojováním cívek vinutí a vytváří rozdílné typy zpětné EMF. [7]

Jak již název naznačuje, obdélníkový motor má zpětnou EMF ve tvaru lichoběžníku a sinusový motor má EMF sinusovou (viz obrázky 3.8 a 3.9). Navíc fázový proud svým průběhem také respektuje typ motoru. Sinusový typ motoru má podstatně hladší průběh

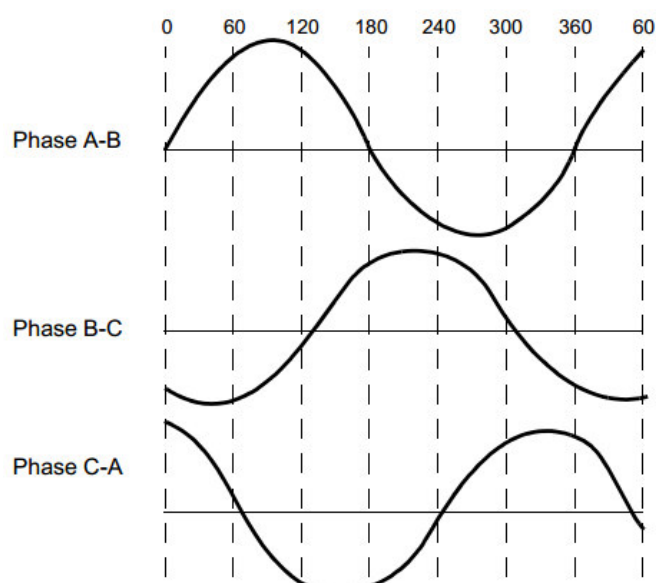
výstupního momentu oproti lichoběžníkovému. Oproti tomu sinusový motor je dražší, protože je nutné zapojit více cívek.[7]



Obrázek 3.7 Stator BLDC motoru [5]



Obrázek 3.8 Lichoběžníkový typ [7]



### 3.6.3 Rotor

Obrázek 3.9 Sinusový typ[7]

BLDC motoru je složený z permanentních magnetů. Tradičně se používají feritové magnety, ovšem nově se využívá i magnetů ze vzácných zemin, jež mají větší hustotu magnetického toku **B**. Nejčastěji je použitý Neodym (NdFeB) nebo Samarium-kobalt (SmCo). [7]

Rotor může být realizován ve dvou variantách: Vnější a vnitřní. Toto uspořádání mění pouze výsledné vlastnosti motoru. Principy a řízení zůstávají stejné.

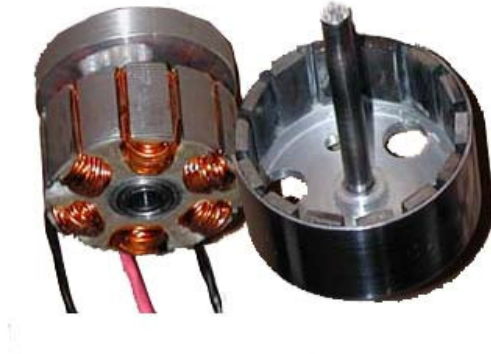
Vnější rotor má permanentní magnety připevněné zevnitř pohyblivého pláště, ten je spojen se hřídelí. Vinutí statoru se nachází uvnitř pohyblivého pláště. Během provozu je tedy rotor unášen okolo motoru [obrázek 3.10]. Charakteristické vlastnosti motoru s vnějším rotorem:

- **Nižší rychlost**
- **Vyšší moment**
- **Horší účinnost**
- **Tichý chod**

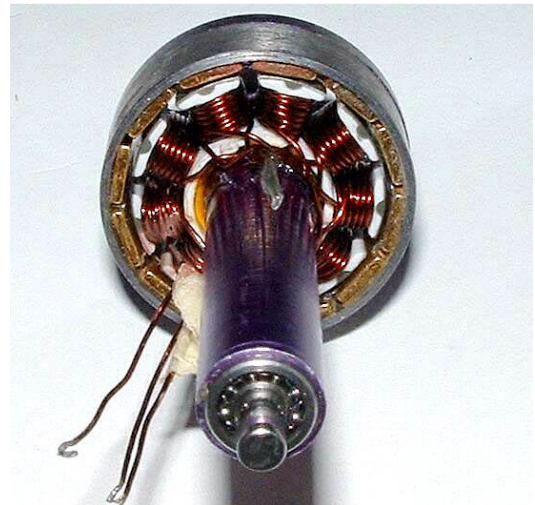
Vnitřní motor má uspořádání stator-rotor přesně naopak. Tedy statorové vinutí je umístěno v pevném plášti. Rotor je uložen uvnitř pláště, a má permanentní magnety umístěné na svém povrchu [obrázek 3.11]. Charakteristické vlastnosti motoru s vnitřním rotorem:

- **Vyšší rychlost**
- **Nižší moment**
- **Vyžaduje převodovku**

- *Lepší účinnost*
- *Hlučnější chod*



Obrázek 3.10 Vnější rotor [8]

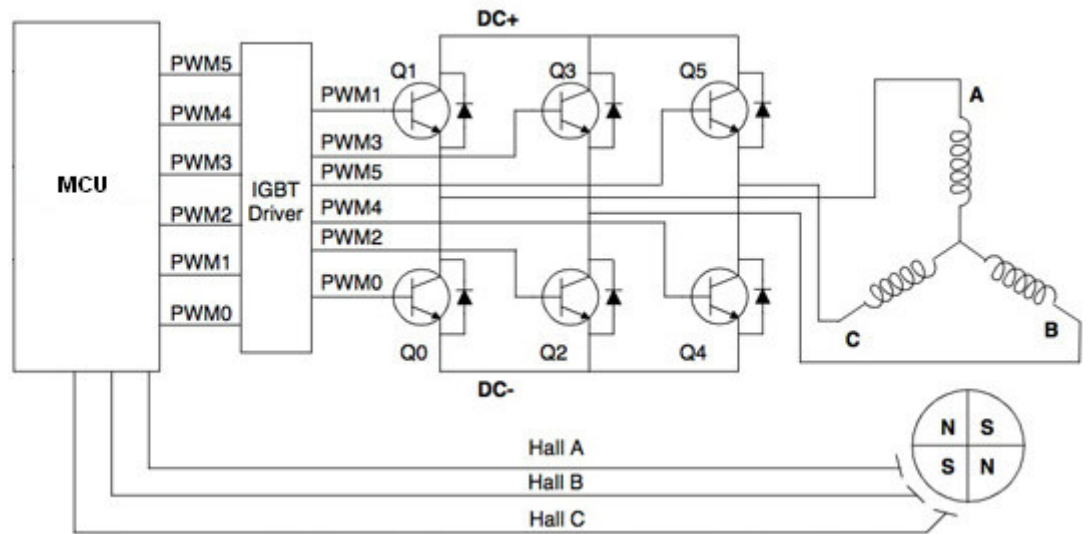


Obrázek 3.11 Vnitřní rotor [9]

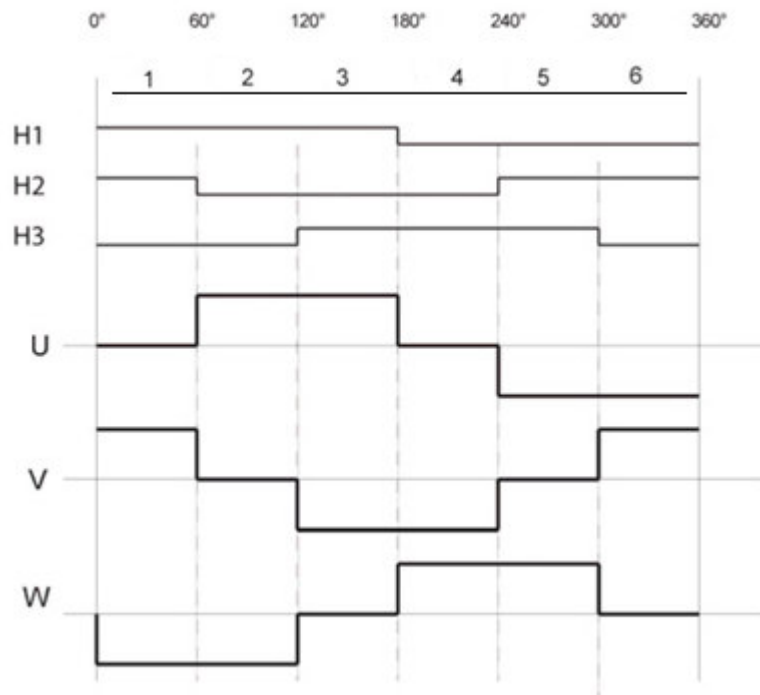
### 3.6.4 Provoz BLDC motoru

Největší nevýhodou BLDC motoru je složitost jeho řízení. BLDC nelze ovládat běžnou PWM, jako je tomu u běžných stejnosměrných motorů. To je způsobeno tím, že BLDC motor nemá komutátor. Z tohoto důvodu je nutné provádět komutaci elektronicky. Pro správnou funkci je nutné vytvořit otáčivé magnetické pole. Z tohoto důvodu se používá střídač.

Aby byl zajištěn konstantní moment a správná komutace, je nutné znát okamžitou polohu rotoru. Ta se nejčastěji zjišťuje dvěma způsoby: Halovými sondami a měřením zpětné EMF na volné fázi. Použití halových sond je jednoduché a levné. Vyšší přesnosti měření halových sond je dosaženo použitím samostatného magnetu. Nevýhodou je nutnost kalibrace polohy sond a jejich aktivní napájení. Měření zpětné EMF je složitější, na praktickou realizaci je ale přesnější. Tato práce se zabývá řízením motoru s Halovými sondami. [7]



Obrázek 3.12 Typický řídicí systém BLDC motoru [7]



Obrázek 3.13 Spínací diagram střídače [7]

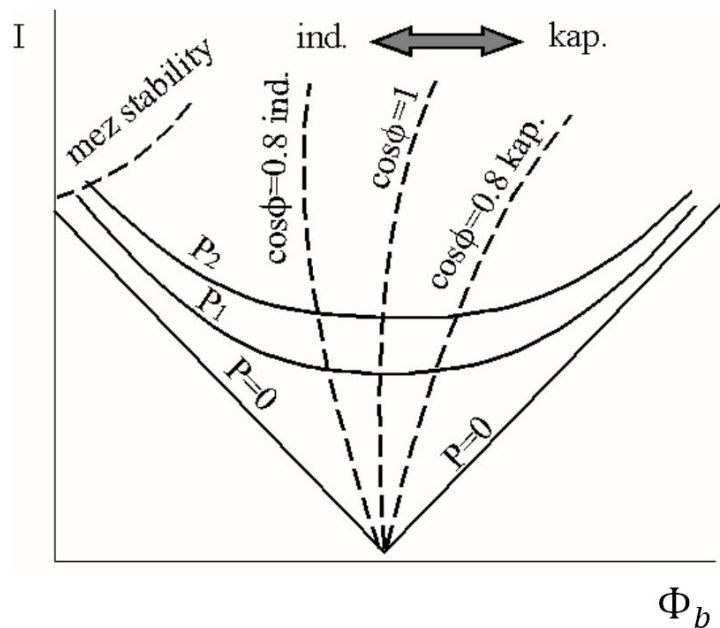
### 3.6.5 Základní charakteristiky synchronního stroje

#### 3.6.5.1 „V-křivky synchronního stroje

Obrázek 3.14 zobrazuje V-křivky (odvozeno od jejich tvaru). Charakteristika vyjadřuje závislost  $I = f(\phi_b)$ , kde  $\phi_b$  je magnetický tok vybuzený permanentky magnety a  $I$  je



statorový proud při konstantním výkonu. Znázornění přebuzeného a podbuzeného rotoru vymezuje křivka  $\cos \phi = 1$ . Vlevo od této křivky je motor podbuzen a má charakter indukčnosti. Vpravo od křivky je motor přebuzen a má charakter kapacity. Čárkovaná čára znázorňuje mez statické stability, kdy již další odbuzování rotoru vede k vypadnutí stroje ze synchronizmu.[10]

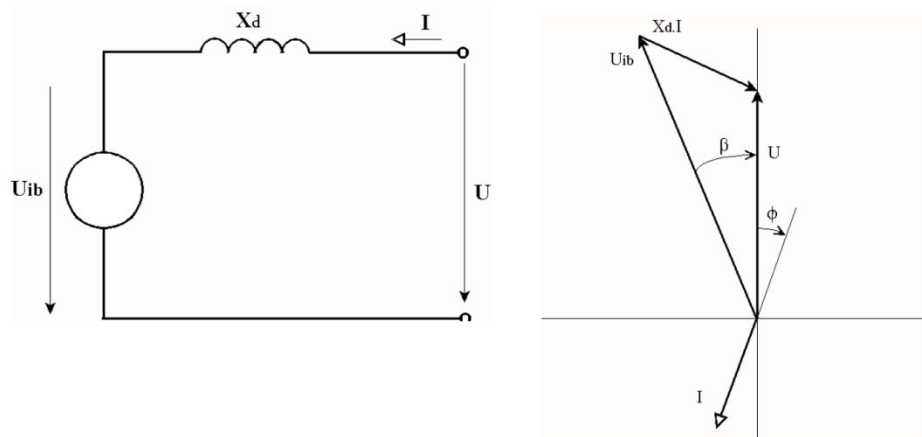


Obrázek 3.14 V-křivky synchronního stroje [10]

### 3.6.5.2 Závislost momentu stroje na zátěžném úhlu

Zátěžný úhel  $\beta$  je úhel mezi svorkovým napětím zdroje a fázorem indukovaného napětí naprázdno. Jeho velikost se odvíjí od velikosti zatížení synchronního stroje. Nezatížený synchronní stroj má  $\beta=0$ . Při  $\beta = 90^\circ(-90^\circ)$  je výkon generátoru (motoru) největší.



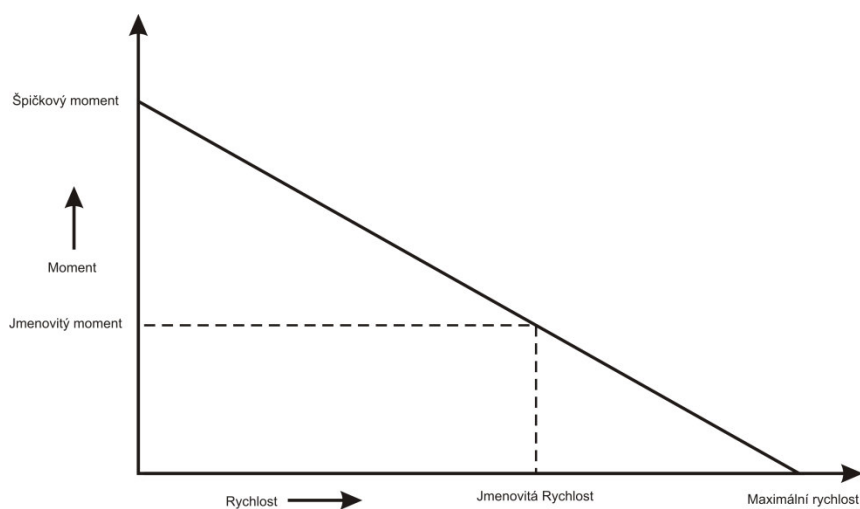


Obrázek 3.15 Zjednodušené náhradní schéma synchronního stroje a fázorový diagram[11]

### 3.6.5.3 Charakteristika točivého momentu/rychlosti

Momentovou charakteristiku BLDC motoru definují dva parametry: Špičkový a jmenovitý moment. Jmenovitý moment zůstává konstantní až do maximálních otáček. BLDC motor lze roztočit až na 150% maximálních otáček, ovšem za cenu snížení momentu. Během trvalého provozu motor může být zatížen pouze trvalým momentem. [7]

V případě potřeby vyššího krouticího momentu lze motor krátkodobě přetížít. Lze tak zkrátit dobu potřebnou ke změně rychlosti. Motor může po krátkou dobu dodat špičkový výkon(viz obrázek 3.17). [7]



3.16 Charakteristika točivého momentu na rychlosti[7]

## 4 Princip regulace BLDC

### 4.1 Skalární řízení

Základní myšlenka skalárního řízení vychází z rovnice pro synchronní rychlost.

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}$$

Kde  $f$  je úhlová frekvence napájecího napětí a  $p$  počet pólových párů motoru. Spolu se změnou úhlové frekvence je nutné měnit též velikost napájecího napětí. Tuto změnu je nutné provádět v určitém konstantním poměru tedy  $U/f = \text{konst.}$ . Tento poměr reprezentuje nominální hodnotu magnetického toku. Díky udržování konstantního magnetického toku nedochází k přebuzování nebo podbuzování motoru. [11]

Podbuzení nastane, pokud napětí bude konstantní, a zvýší se pouze jeho frekvence. Magnetický tok bude nižší než jeho nominální hodnota. Přebuzení nastane při zvýšení frekvence napájecího napětí, jehož velikost zůstává opět konstantní. Magnetický tok bude vyšší než jeho nominální hodnota.

Skalární řízení lze definovat těmito vlastnostmi:

- *umožňuje jednoduchým způsobem řídit otáčky střídavých strojů*
- *zajišťuje chod pohonu v optimálních podmínkách pouze v ustáleném stavu*
- *neumožňuje dosažení špičkových dynamických parametrů takto řízeného pohonu*

Rozlišujeme dva nejčastější způsoby řízení:

- *řízení při konstantním statorovém toku  $\psi_1$  (oblast konstantního momentu)*
- *řízení při konstantním statorovém napětí  $U_1$  (oblast konstantního výkonu)*

#### 4.1.1 Oblast konstantního momentu

V této oblasti platí:

$$0 < f < f_0$$

$$\Psi_1 = \text{konst}$$

$$I_1 = konst$$

Kde  $f_0$  je frekvence, pro kterou byl motor navržen,  $\Psi_1$  je statorový tok a  $I_1$  je statorový proud. Řízení synchronních otáček motoru je v této oblasti realizováno za výše uvedených podmínek. Musíme tedy určit závislost statorového napětí  $U_1$  na frekvenci a poté lze pro obvod statoru psát následující rovnice:

$$\overline{U}_1 = R_1 \cdot \overline{I}_1 + \frac{d\overline{\psi}_1}{dt}$$

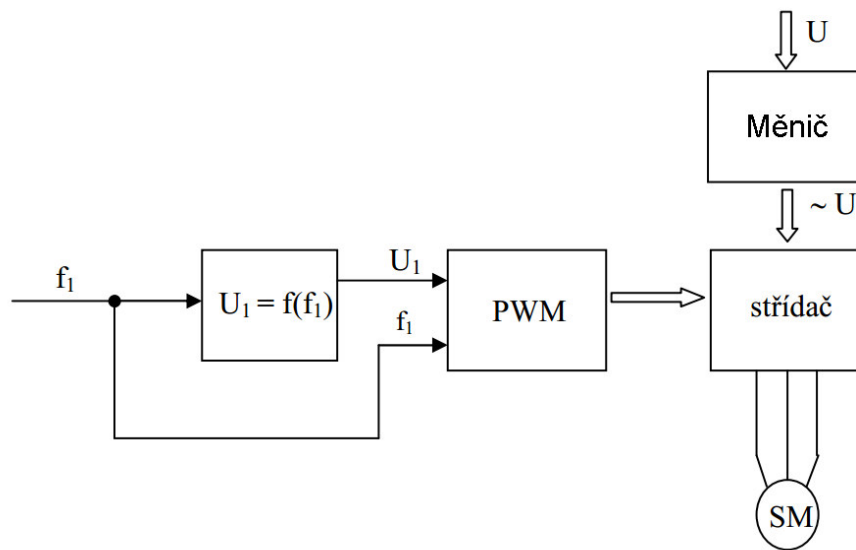
Po derivaci dostaneme:

$$\overline{U}_1 = R_1 \cdot \overline{I}_1 + k \cdot f_1 \cdot \psi_1$$

Zanedbáním odporu statoru ( $R_1=0$ ) dostaneme závislost  $U_1=f(f_1)$  při konstantním magnetickém toku ve tvaru:

$$U_1 = k \cdot f_1 \cdot \psi_1 \rightarrow \psi_1 \approx \frac{U_1}{f_1} = konst.$$

V této oblasti regulátor upravuje řídicí napětí  $U_1$  dle požadovaného kmitočtu  $f_1$  tak, aby buzení motoru bylo konstantní. Mluvíme o frekvenčně napěťovém řízení „U/f“ (obrázek 4.1). Při výpočtech uvažujeme pouze první harmonickou složku statorového napětí. Důvodem je, že pouze první harmonická složka magnetizačního proudu  $I_M$  vytváří užitečnou složku magnetizačního toku a také to, že vyšší harmonické složky napájecího napětí neovlivňují užitečný moment motoru, pouze negativně ovlivňují ztráty v motoru. Činnost v oblasti konstantního momentu odpovídá stejnosměrnému stroji s konstantním buzením, který je řízen napětím kotvy. [11]



4.1 Frekvenčně napětové řízení s otevřenou smyčkou [11]

#### 4.1.2 Oblast konstantního výkonu

V této oblasti platí:

$$f_1 > f_0$$

$$U_i = U_1 = \text{konst.}$$

$$I_1 = \text{konst.}$$

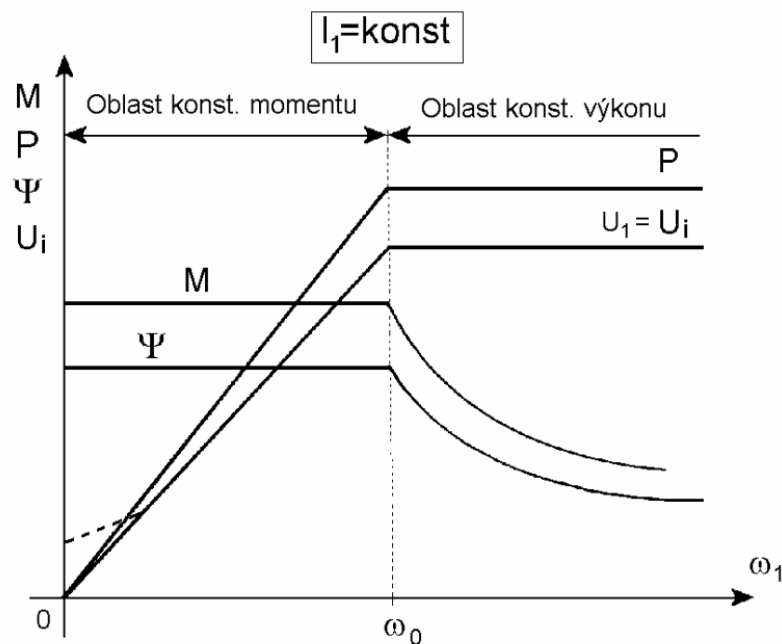
Kde  $f_0$  je frekvence, pro kterou byl motor navržen,  $f_1$  je frekvence napájecího napětí  $U_1$ .  $U_i$  je indukované napětí a  $I_1$  proud statoru. Závislosti uvedené pro oblast konstantního momentu platí až do frekvence  $f_0$ . Napětí motoru lze zvyšovat pouze do určité míry, potom již musí být konstantní ( $U_1 = \text{konst.}$ ). Se zvyšující frekvencí  $f_1$  vzniká požadavek, aby indukované napětí  $U_i$  bylo konstantní. Z toho plyne, že se musí snížit velikost magnetického toku  $\psi_1$ . V této oblasti řízení tedy není magnetický tok ani moment konstantní. Konstantní je pouze výkon. Platí rovnice:

$$U_i = U_1 = k \cdot f_1 \cdot \psi_1 \rightarrow \psi_1 \approx \frac{1}{f_1}$$

$$M \approx \psi_1 \cdot I_1 \rightarrow M \approx \frac{1}{f_1}$$

$$P = U_1 \cdot I_1 = \text{konst.}$$

Tato oblast řízení odpovídá stejnosměrnému motoru s konstantním napětím na kotvě, který je řízen budícím magnetickým polem (odbuzování motoru). Na obrázku lze vidět průběhy veličin.



4.2 Průběh veličin v různém typu regulace [12]

## 4.2 Vektorové řízení

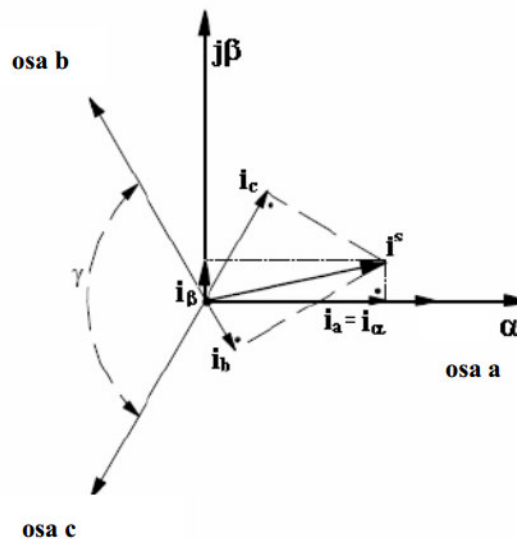
Princip vektorového řízení spočívá v rozložení vektoru proudu do dvou složek. Složka proudu  $i_1$  je ve fázi s vektorem výsledného magnetického toku  $\Psi_V$ . Druhá složka proudu  $i_2$  je k němu kolmá. Složka proudu  $i_1$  ovlivňuje magnetizaci a jalový výkon. Složka proudu  $i_2$  a absolutní hodnota magnetického toku  $\Psi_V$  vytvářejí činný výkon a moment motoru. Jednotlivé složky se navzájem neovlivňují. Díky tomu je možné nezávisle řídit moment a magnetický tok.[11]

Hodnoty složek proudu  $i_1$  a  $i_2$  je nutné vypočítat pro každý pracovní bod. Z tohoto se následně určí řídicí veličiny pro nastavení jednotlivých fázových napětí statoru. Složky proudů  $i_1$  a  $i_2$  se vypočítávají v souřadnicích rotoru d, q. Tyto složky je nutné převádět do tříosého systému a zpět.[11]

## 4.2.1 Matematický aparát

### 4.2.1.1 Clarkova transformace

Jde o transformaci umožňující převod tříosého systému (a,b,c) do systému dvou navzájem kolmých os ( $\alpha$ ,  $\beta$ ).



### 4.3 Princip Clarkovy transformace [12]

Většina BLDC motorů má statorové vinutí zapojené do hvězdy, proto vyhovuje předpokladům na základě kterých je odvozena Clarkova transformace.

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0$$

$$u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0$$

$$\Psi_a(t) + \Psi_b(t) + \Psi_c(t) = 0$$

Kde  $i(a,b,c)$  reprezentují statorové proudy v jednotlivých fázích,  $u(a, b, c)$  jednotlivá napětí a  $\psi(a,b,c)$  spřažený magnetický tok. Transformace je popsána maticovou rovnicí:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \cos \gamma & \cos(2\gamma) \\ 1 & \sin \gamma & \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}$$

Tuto rovnici lze převést dotvaru:

$$i_\alpha(t) = i_a(t)$$

$$i_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a(t) + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b(t)$$

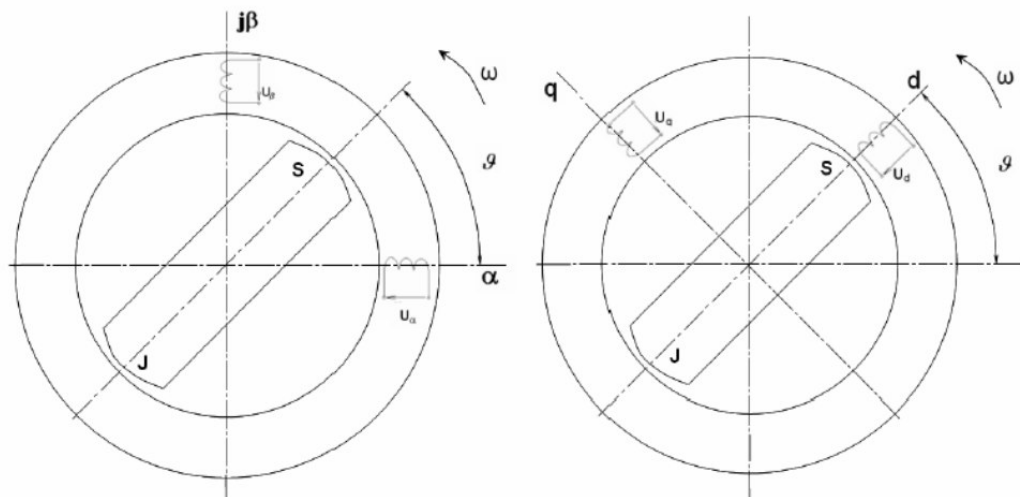
#### 4.2.1.2 Inverzní Clarkova transformace

Při zpětné transformaci z dvouosého systému  $\alpha, \beta$  do systému tří os  $a, b, c$  platí maticová rovnice:

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos \gamma & \sin \gamma \\ \cos(2\gamma) & \sin(2\gamma) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix}$$

#### 4.2.1.3 Parkova transformace

Parkova transformace je nástroj pro transformaci souřadnic statoru do souřadnic rotoru. Je nutné respektovat změnu magnetické vazby mezi statorovým a rotorovým vinutím. Tento problém řeší vytvoření fiktivních statorových vinutí  $d, q$ , jejichž souřadná soustava je shodná se soustavou rotoru. Fiktivní vinutí se tedy pohybuje shodně s rotorem. Takto je zajištěna vazba rotoru a statoru. V ustáleném stavu jsou napětí a proudy fiktivních vinutí konstantní a lze je považovat za stejnosměrné. Díky tomu lze vyjádřit časově proměnné střídavé veličiny stejnosměrnými veličinami.[11]



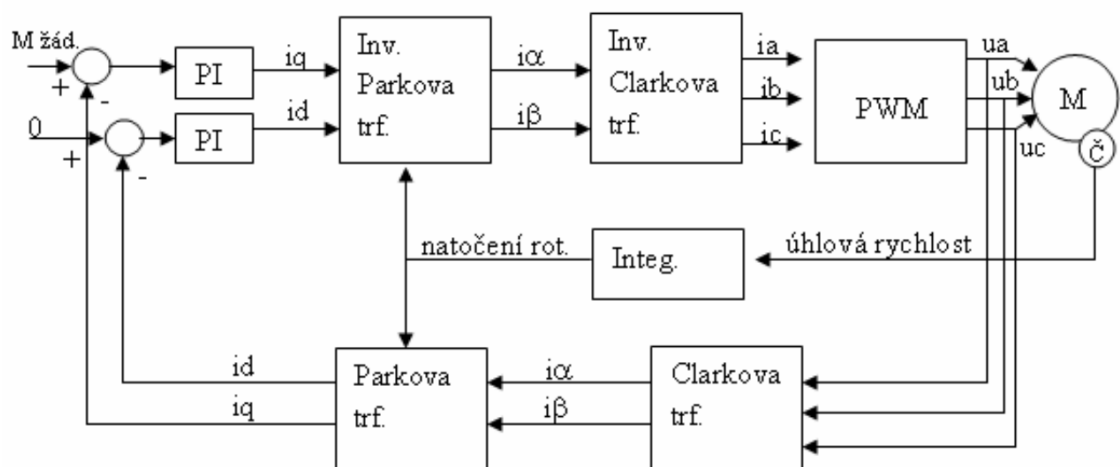
4.4 Schématicky znázorněná Parkova transformace [12]

Matematicky lze Parkovu transformaci zapsat maticovou rovnicí:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$$

### 4.2.2 Aplikace vektorového řízení

Na obrázku 4.5 lze vidět blokové schéma vektorového řízení BLDC. Hodnota složky proudu  $I_d$  je zde udržována na nulové hodnotě, tj. proud statoru  $I_S$  představuje maximální hodnotu  $I_q$  a při pohledu na rovnice je zřejmé, že moment dosáhne své maximální žádané hodnoty.





#### 4.5 Blokové schéma vektorového řízení BLDC[13]

Pro odvození základních rovnic se uvažují tyto zjednodušení:

- *Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře je harmonický.*
- *Parametry stroje jsou konstantní a stejné ve všech třech fázích.*
- *Ztráty v železe jsou zanedbány.*
- *Magnetizační charakteristika je lineární.*

Pak platí rovnice:

$$U_d = R_1 \cdot I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega \cdot L_q \cdot I_q$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \Psi_{PM} \cdot I_q$$

## 5 Simulace řídicích algoritmů

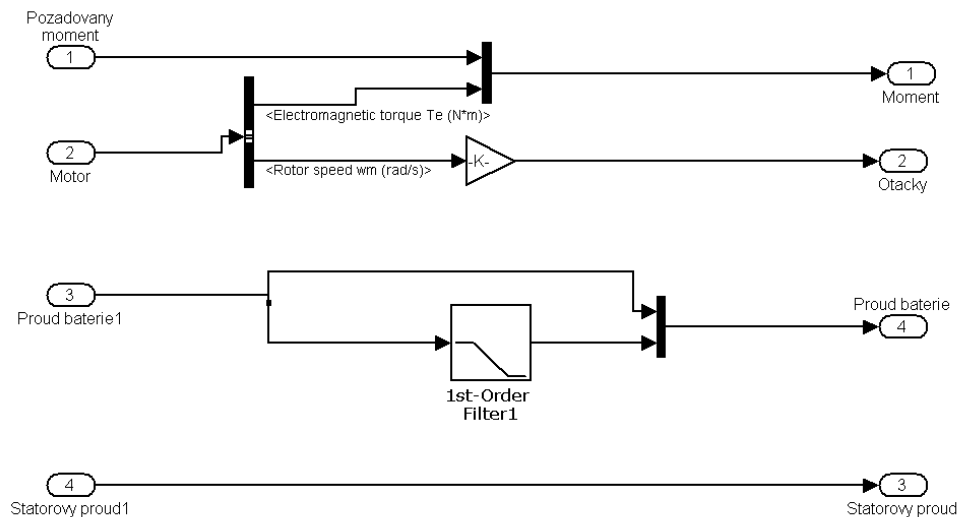
### 5.1 Způsob simulace

Simulace pohonu elektrokoloběžky byla realizovaná programem Simulink vytvořeným společností společnosti MathWorks. Simulováno bylo skalární řízení BLDC se zpětnou vazbou. Odsimulované výsledky byly úspěšně ověřeny na malém motoru, ovšem bez zpětné vazby a tedy s horšími regulačními schopnostmi (viz příloha). Na obrázcích 5.3, 5.10, 5.12 jsou vidět regulační schémata režimů pohonu, brzdy a jejich přechodu. Simulovány byly 3 režimy pohonu (viz 5.2 Režim Pohon), 1 generátorový (viz 5.3 Režim Generátor) a přechodový jev pohon-generátor (viz 5.4 Přechodový jev).

Baterie byla v simulaci nahrazena ideálním zdrojem s napětím 48V. Je k ní připojena proudová sonda, takže lze sledovat velikost odebíraného proudu.

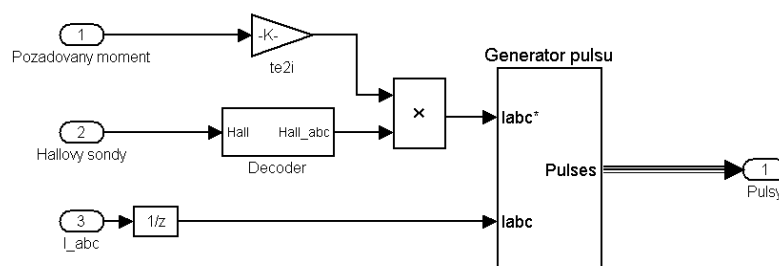
Střídač je simulován blokem Univerzalbrigdez knihovny „SimPowerSystems“. Jako spínací součástky byly zvoleny mosfety se zpětnými diodami. Střídač může fungovat též jako řízený usměrňovač v režimu brzda (viz 5.3 Režim Generátor), a umožňuje tím rekuperaci energie.

Blok demux (viz obrázek 5.1) řeší výběr a úpravu signálů výstupních signálů. Dále řeší porovnávání skutečného a požadovaného momentu. Přepočítává otáčky z rad/s na ot/min a vypočítává efektivní hodnotu proudu do baterie.



5.1 Blok demux

BLDC motor je simulován Synchronním strojem s permanentními magnety z knihovny „SimPowerSystems“. Může pracovat buďto jako motor nebo jako generátor. Model má „elektrický“ vstup pro každou fázi zvlášť a „mechanický“ vstup, kterým lze motoru vnútit moment nebo otáčky.



5.2 Regulátor

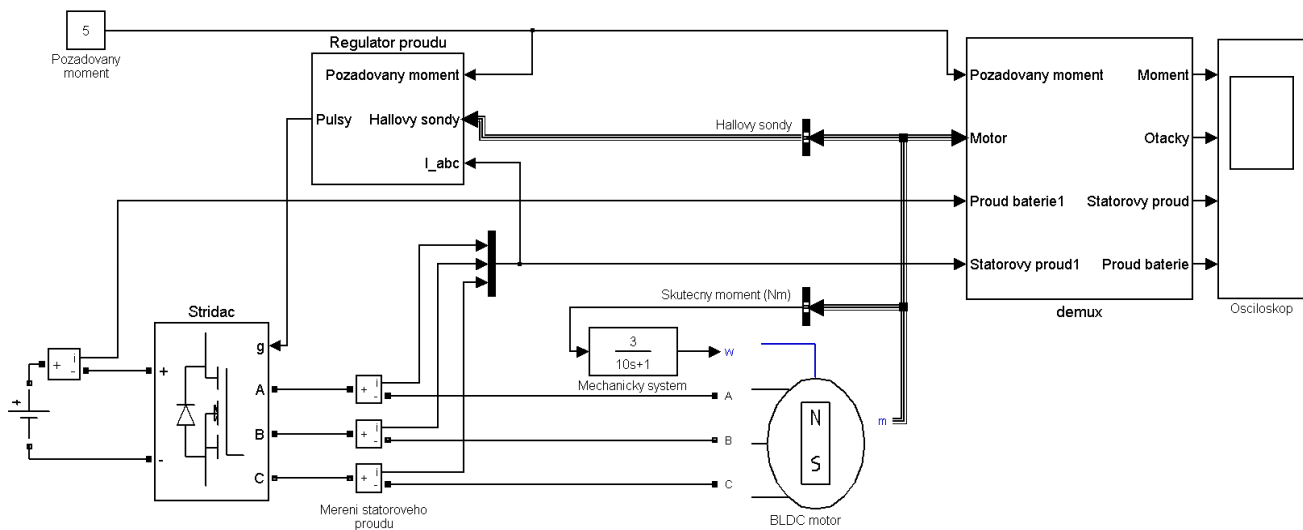
Regulátor proudu (obrázek 5.2) se skládá z několika bloků. Požadovaný moment se převádí blokem  $te_{2i}$  na proud. Výpočet proudu se děje pomocí vzorce  $1/(2 \cdot p \cdot f_i)$  kde  $p$  je počet pólů a  $f_i$  je magnetický tok vybuzený permanentními magnety. Tento vypočítaný proud se násobí s polohou získanou z dekodéru halových senzorů. Takto získaný signál jde do generátoru

pulzů, který zpracovává hodnotu okamžitého statorového a novou polohu. Výsledkem jsou pulzy pro střídač.

Mechanický systém koloběžky je simulován aperiodickým blokem. Tento aperiodický blok představuje mechanickou zátěž respektive hybnost koloběžky. Tato hybnost se může měnit, a to staticky vahou řidiče nebo dynamicky v závislosti na tom, zda jedeme z kopce nebo do kopce. Pro simulační účely je ponechána tato vlastnost konstantní.

## 5.2 Režim pohon

Obrázek znázorňuje simulační schéma režimu pohon. Jediným vstupním parametrem pohonu je konstanta požadovaný moment. Touto konstantou se nastavuje požadovaný moment motoru, který samozřejmě může a nemusí být dosažen v závislosti na otáčkách motoru, respektive hybnosti celého systému. Režim pohonu byl simulován pro 3 požadované momenty a to 5,20 a 45Nm.

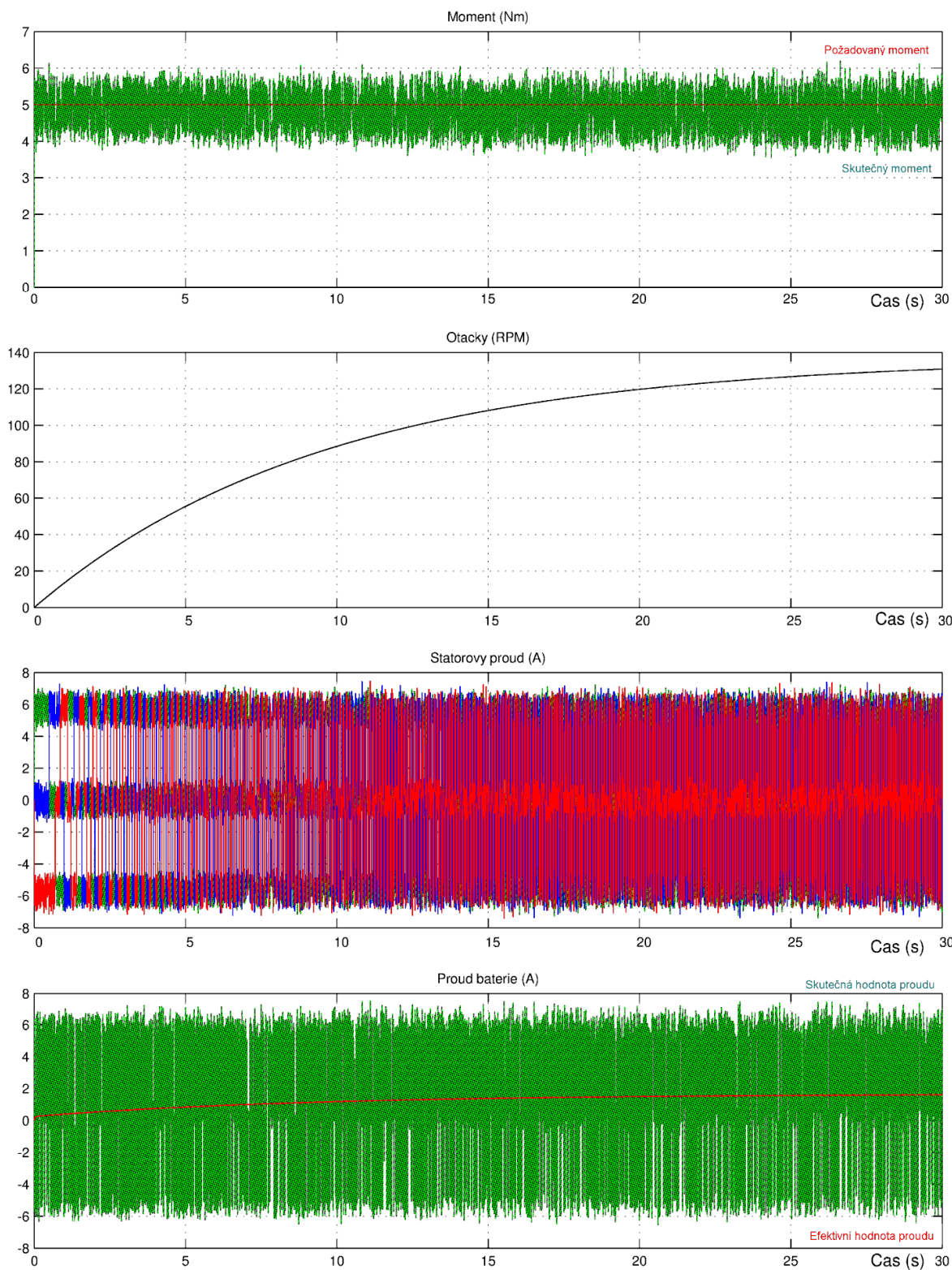


5.3 Schéma simulace v režimu pohon

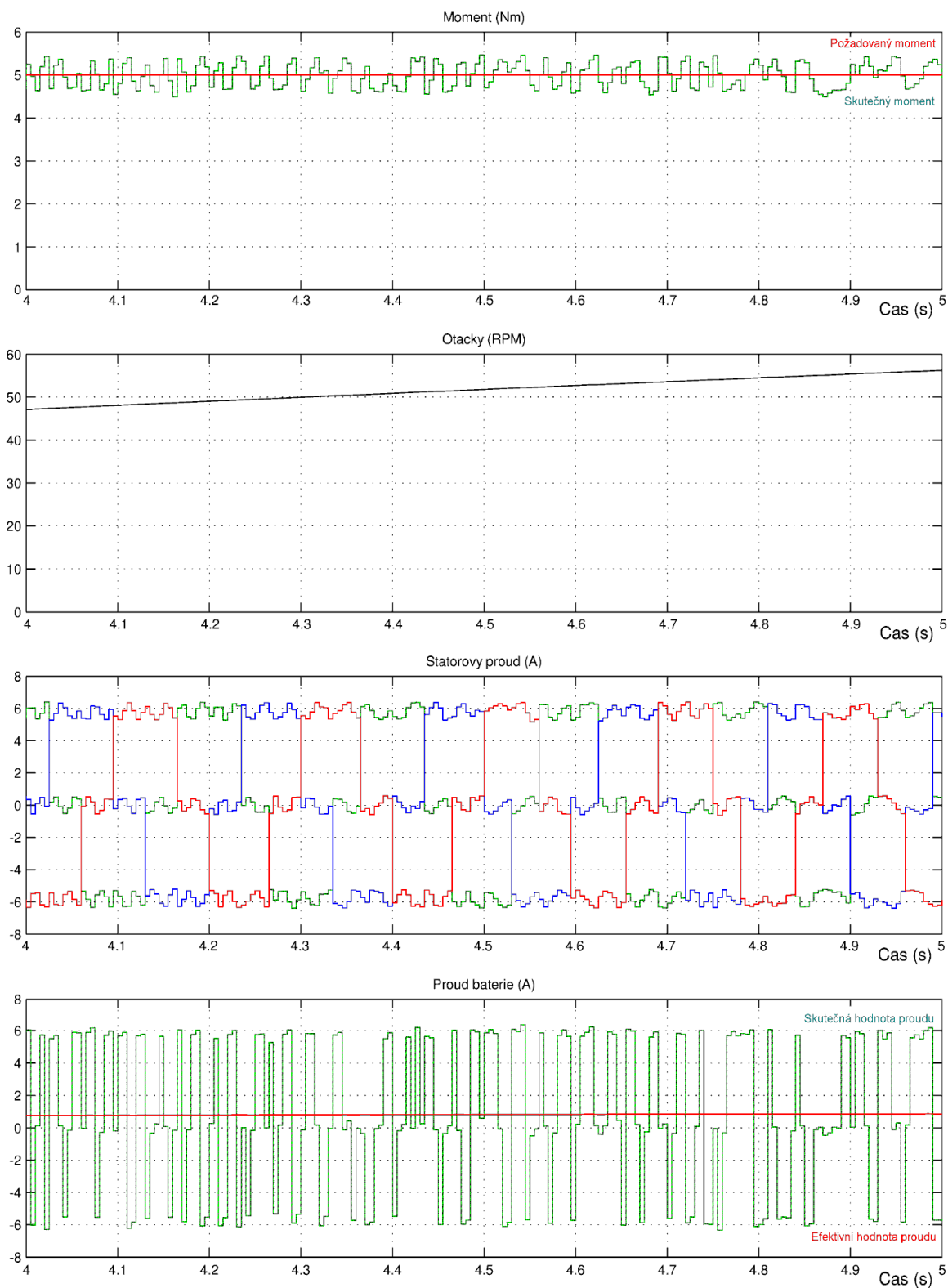
Na obrázku 5.4 lze vidět odezvu na požadovaný moment 5Nm. Z grafů lze vyčíst, že pohon dosahuje 130 otáček, což odpovídá rychlosti cca 14km/h. Detail (obrázek 5.5) ukáže, že regulátor velice rychle přepíná mód pohon/brzda, aby udržel zadaný moment. I přes značnou „rozlítanost“ proudu se efektivní hodnota ustálí na hodnotě přibližně 1A

20Nm odezvu lze vidět na obrázku 5.6. Motor zde dosahuje cca 405 otáček, což odpovídá rychlosti přibližně 45km/h. Než motor dosáhne přibližně 300 otáček tak zůstává moment konstantní, poté klesá. Efektivní hodnota proudu roste spolu s otáčkami. Od 300 otáček výše proud začíná klesat a ustaluje se na hodnotě 15A.

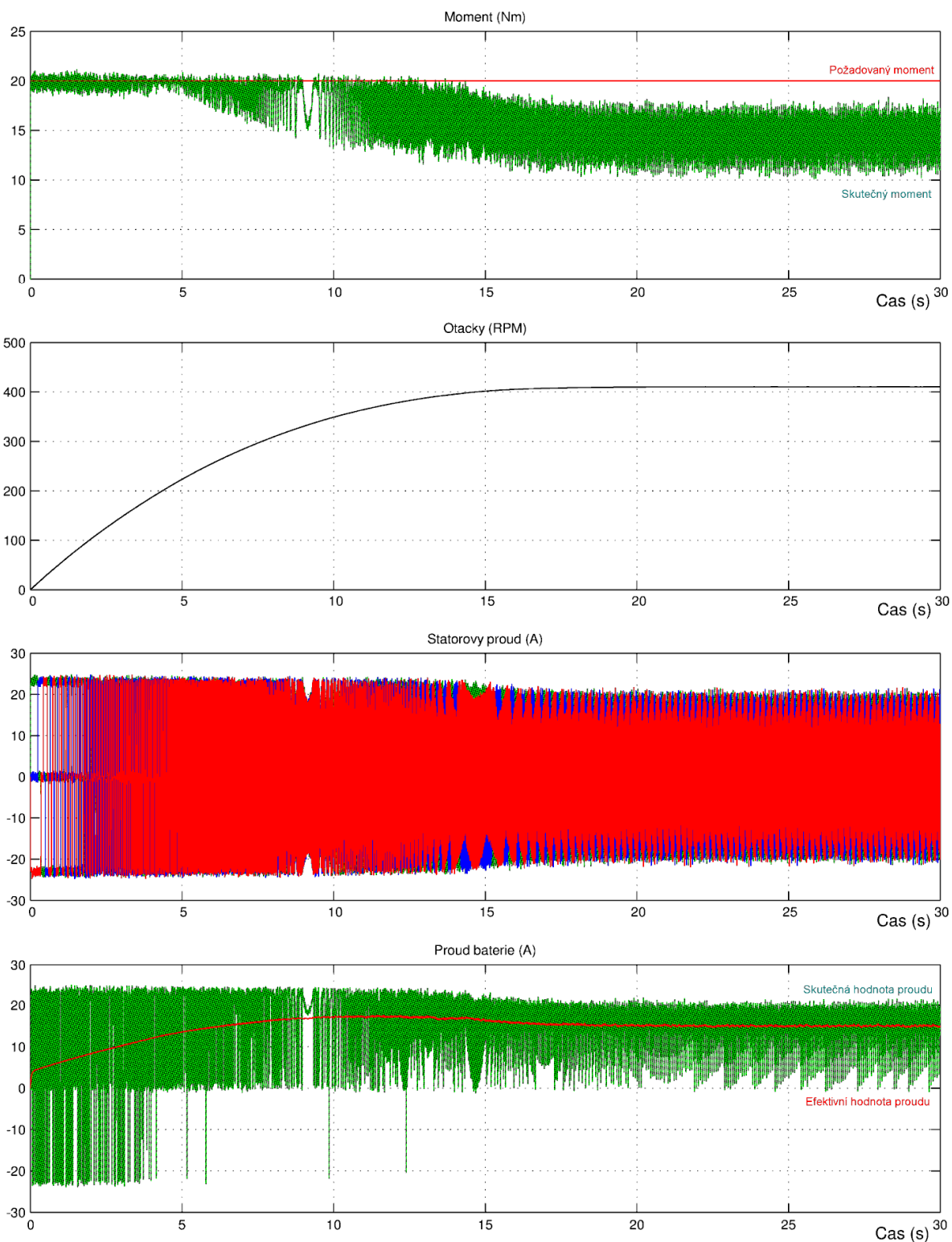
Obrázek 5.8 znázorňuje odezvu na požadovaný moment 45Nm. V detailu (obrázek 5.8) je dobře patrné, že při cca 300 otáčkách začne docházet k poklesu momentu. Moment dále klesá v závislosti s rostoucími otáčkami. Přibližně v čase 10s se pohon ustálí na cca 15Nm při 410 otáček což odpovídá rychlosti 50km/h. V souvislosti s tímto se mění i hodnota proudu. Proud nejprve roste spolu s otáčkami. Ovšem jakmile začne klesat moment, dojde i k poklesu statorového proudu.



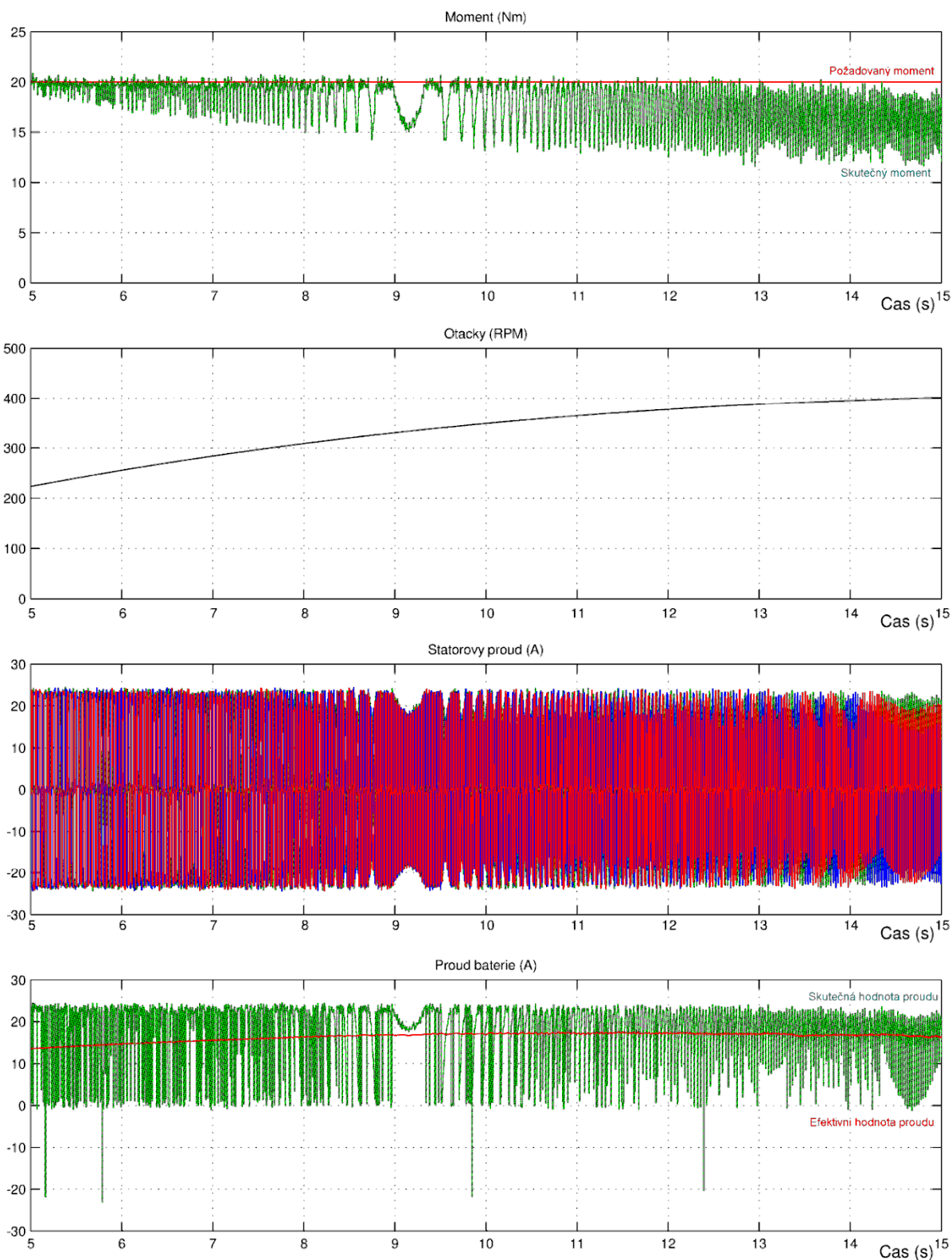
5.4 Oezva na požadovaný moment 5Nm



5.5 Oezva na požadovaný moment 5Nm - detail

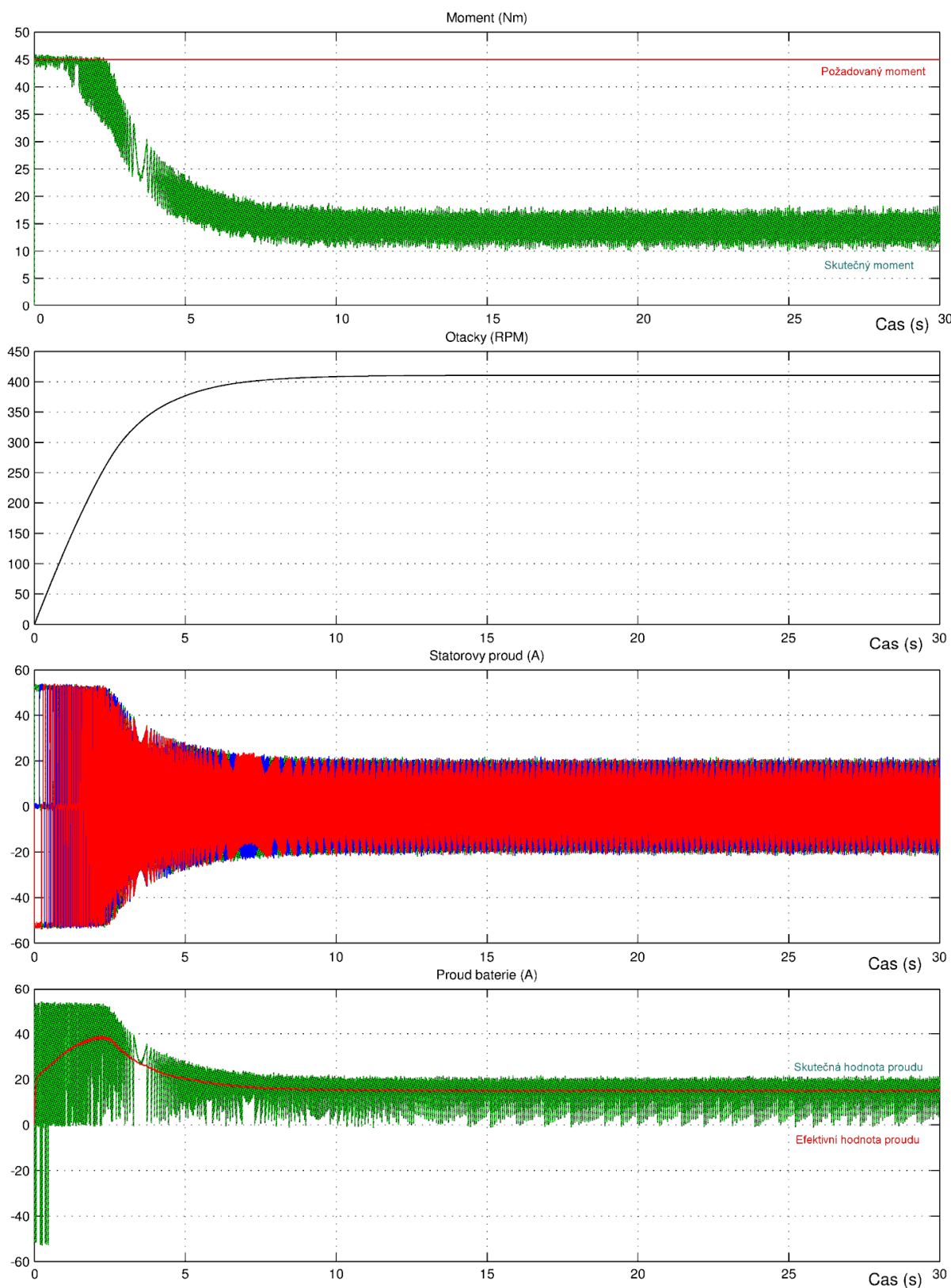


5.6 Oezva na požadovaný moment 20Nm

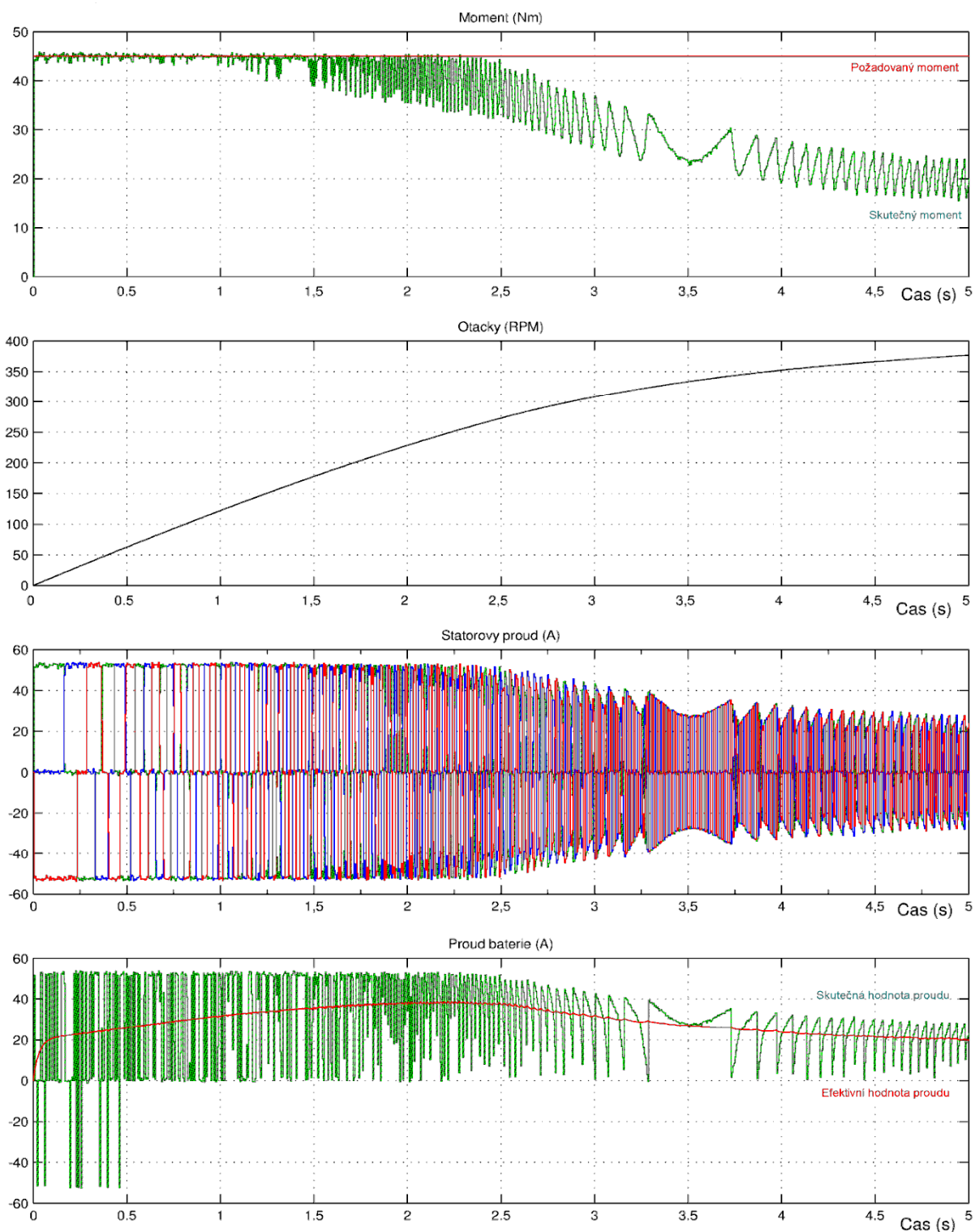


5.7 Oezva na požadovaný moment 20Nm - detail





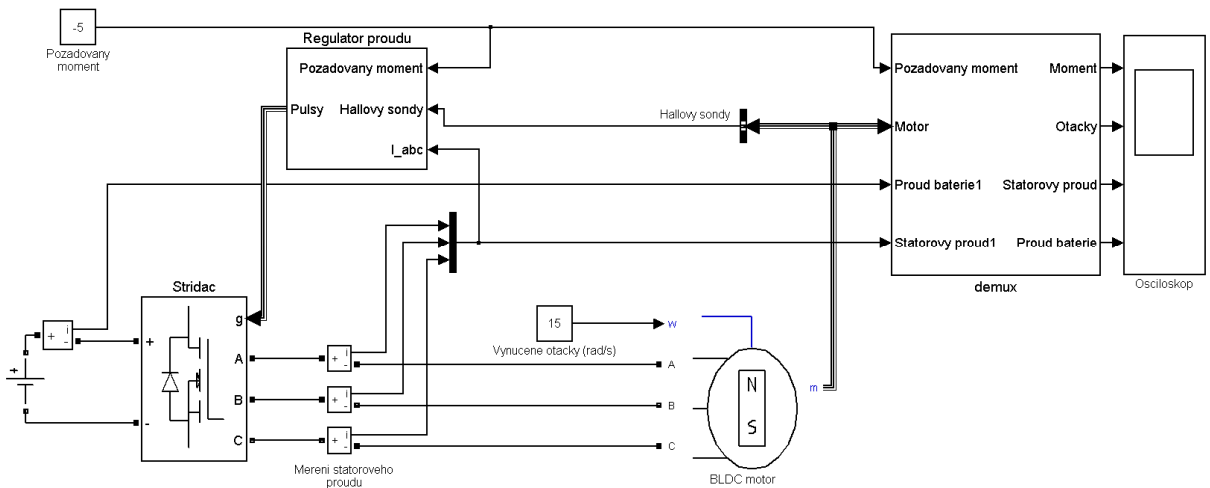
5.8 Oezva na požadovaný moment 45Nm



5.9 Oezva na požadovaný moment 45Nm - detail

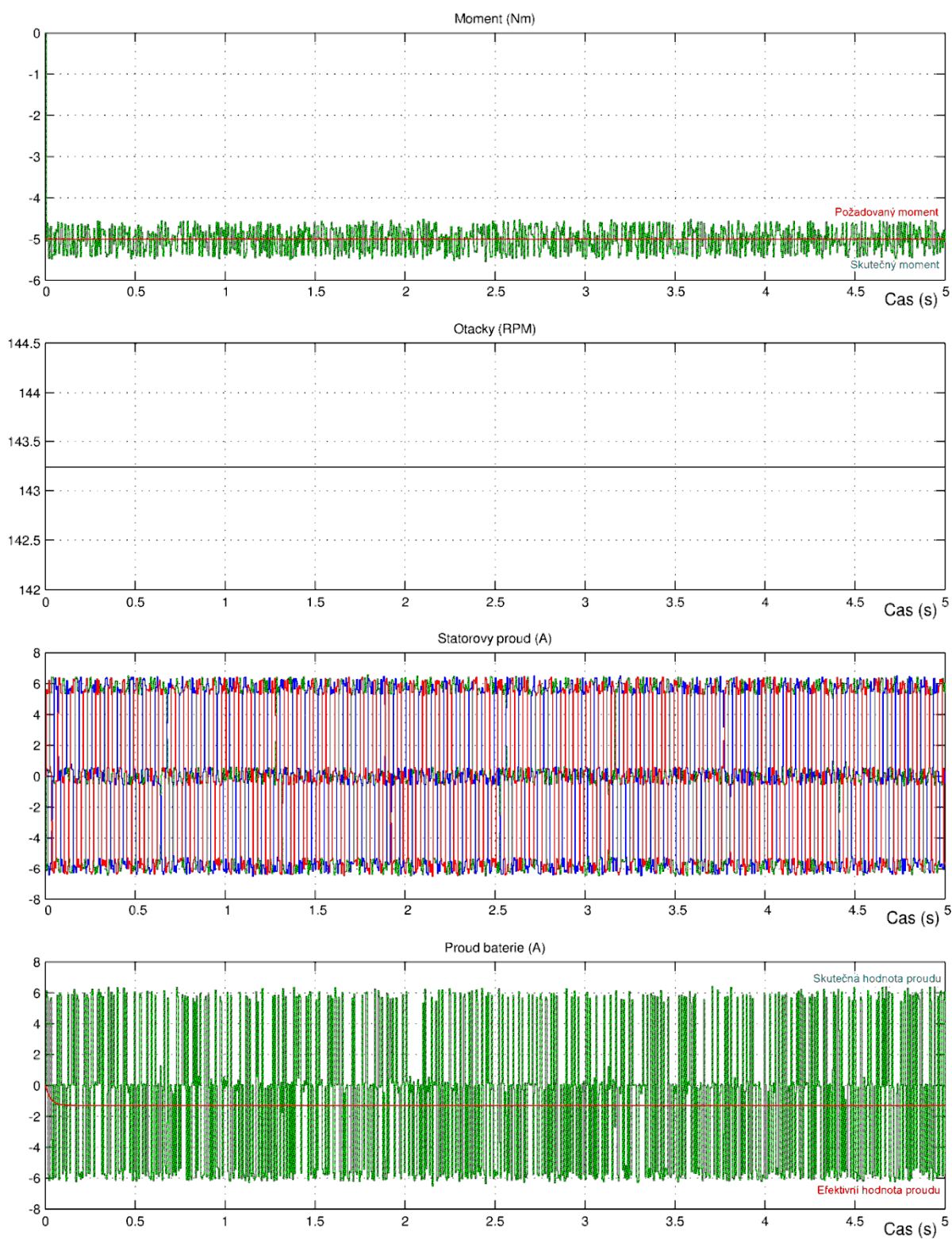
### 5.3 Režim generátor

V generátorickém režimu (obrázek 5.10) není zavedena simulace mechanického systému koloběžky. Místo tohoto je motor nastaven na konstantní otáčky 15rad/s respektive 143ot/min. Požadovaný moment je nastaven na zápornou hodnotu -5Nm. Tím je dosaženo použití střídače v usměrňovačovém chodu a umožněná rekuperace.



5.10 Schéma simulace v režimu pohon

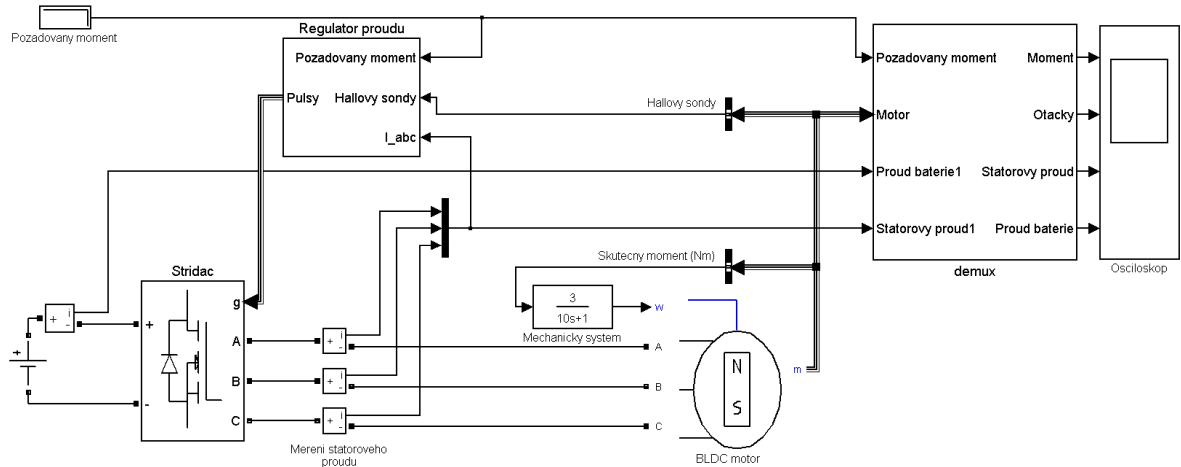
Na obrázku 5.11 jsou výsledky této simulace.



5.11 Simulace brzdy

## 5.4 Přechodový jev

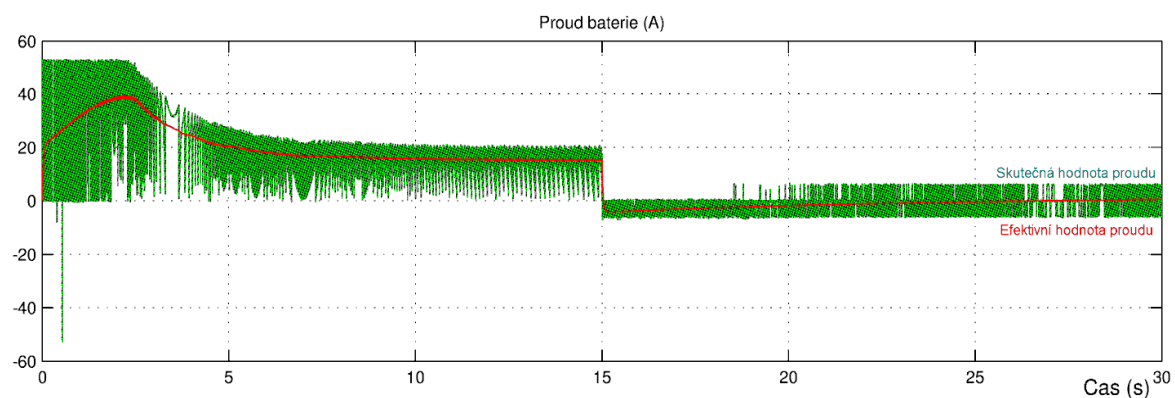
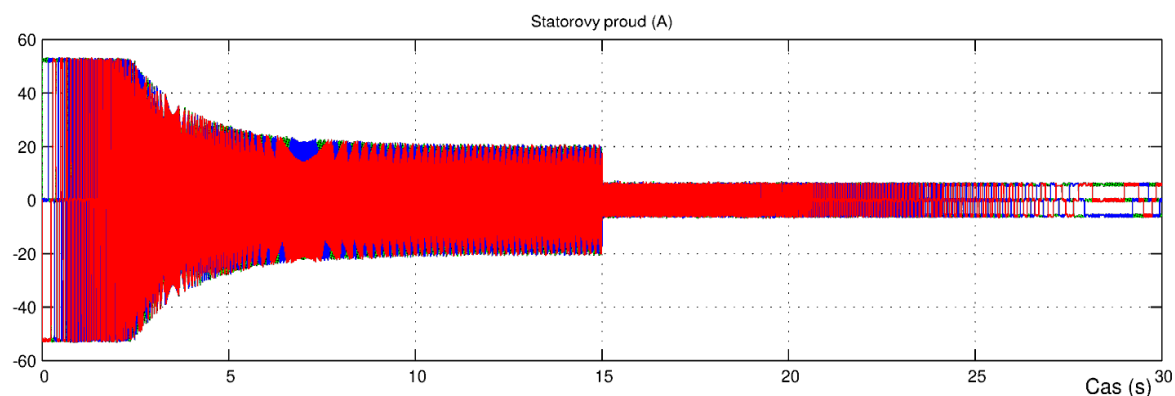
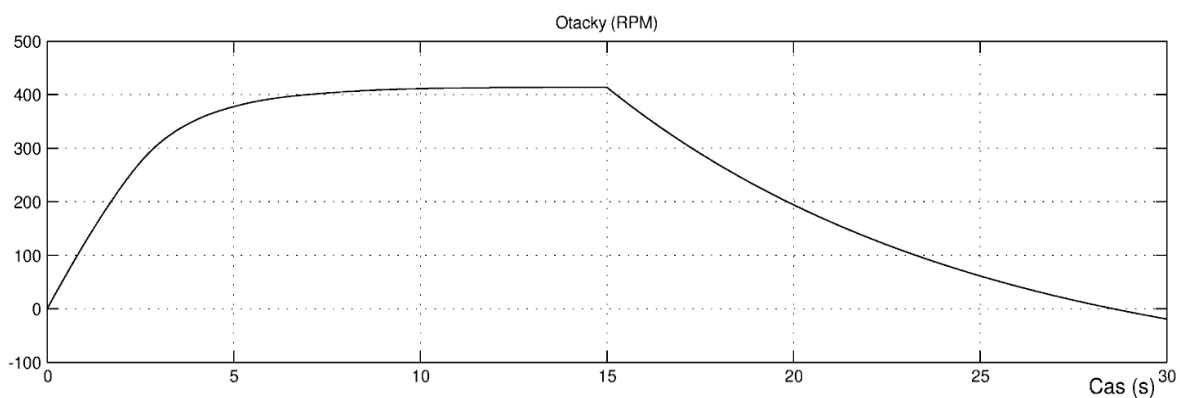
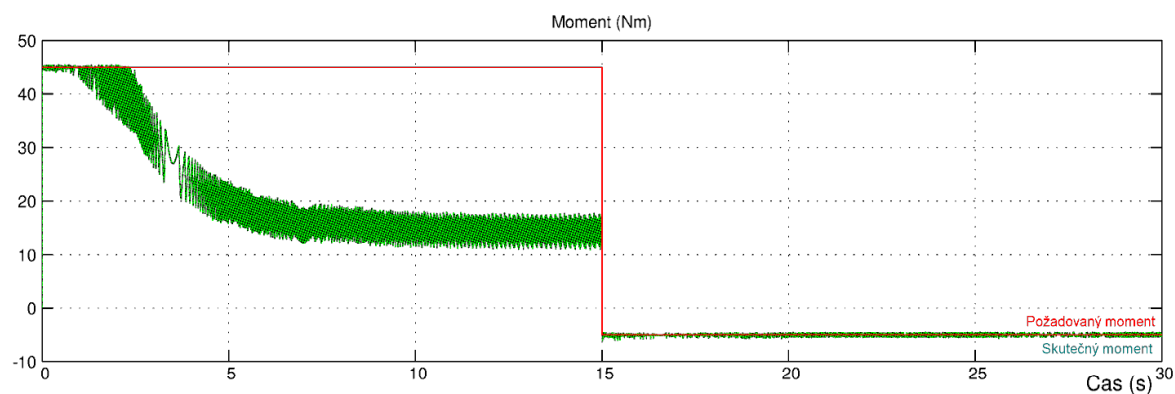
Jako poslední byl simulován přechodný jev pohon-brzda. Simulace probíhá obdobně jako u pohonu a brzdy (viz obrázek 5.12). Čas simulace je 30s s tím že prvních 15s je požadovaný moment nastavený na 45Nm. V čase 15-30s je nastaven brzdny moment -5Nm.

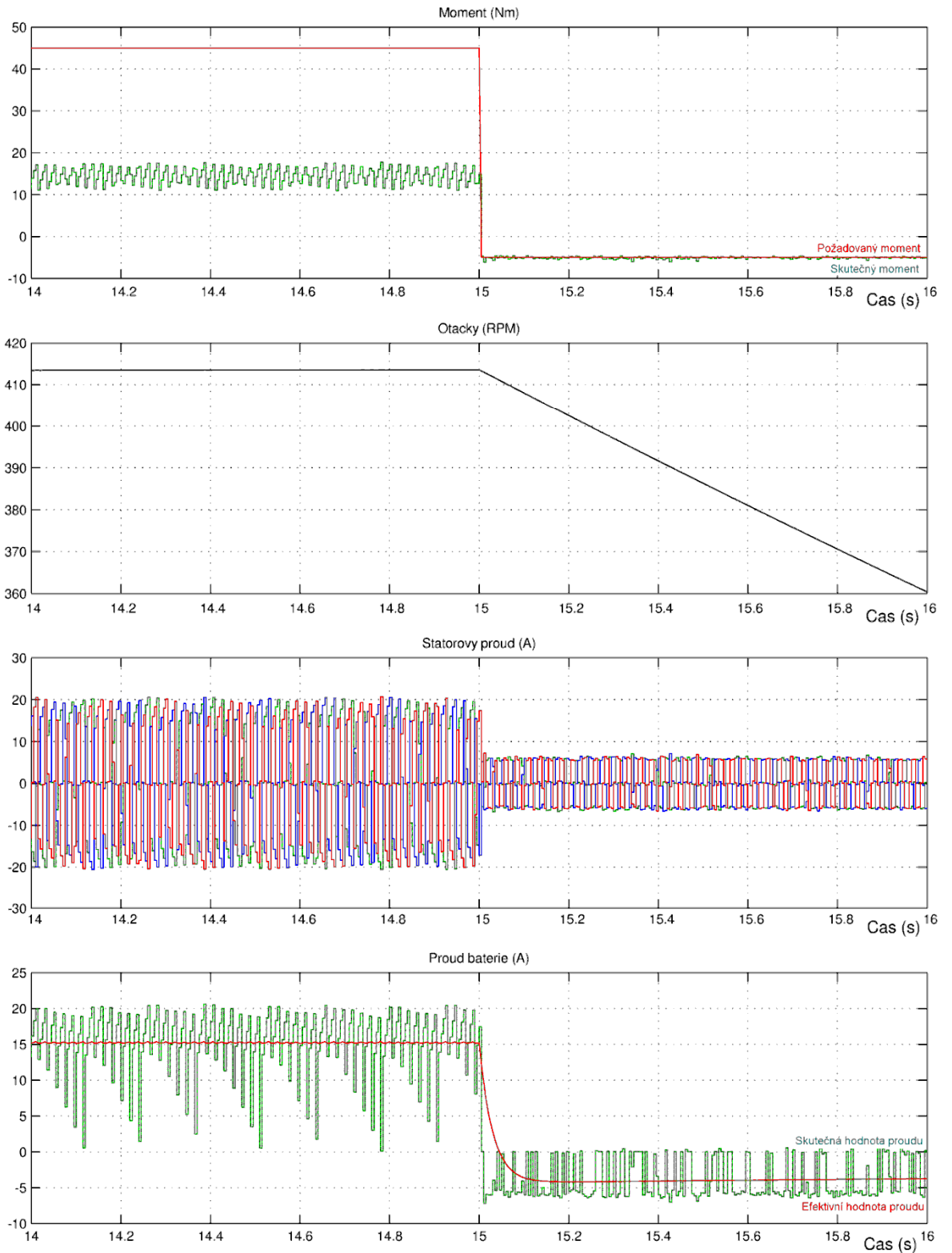


Na obrázcích 5.13 a 5.14 jsou výsledky simulace. Je z nich vidět nutnost použití měniče mezi

### 5.12 Schéma simulace v režimu pohon

baterií a střídačem. Bez něj jde o brždění protiproudem. Díky tomu stačí brzdny moment pouze -5Nm a koloběžka zabrzdí za stejný čas, jako se rozjížděla ale s momentem 45Nm. Měnič je nutný pro zvětšení indukovaného napětí aby bylo možná dobíjet baterii.





5.14 Přechodový jev - detail

## 6 Návrh řídicího algoritmu pro programátora

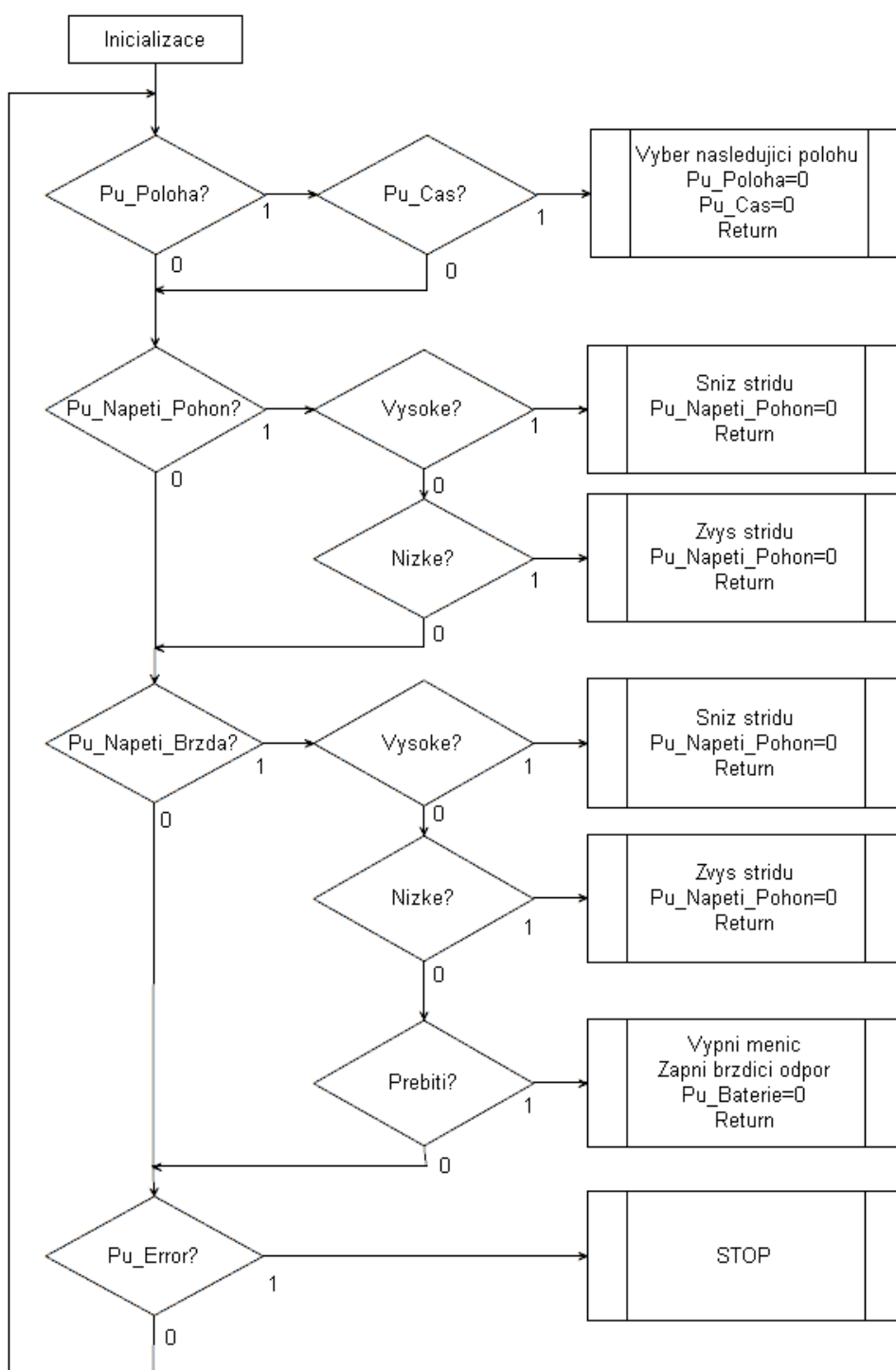
Regulační algoritmus je navržený pro skalární řízení pohonu. Tvoří ho dvě části. Nekonečná smyčka a obsluha přerušení. V přerušení se řeší pouze nejnnutnější věci. Vše co není nutné řešit v přerušení, se označuje příznakem (předpona pu) a dále se řeší v hlavní smyčce (viz obrázky 6.1 a 6.2). V hlavní smyčce se tedy řeší vše, co je náročné na procesorový čas.

Pohon koloběžky má dva mody. Pohon a brzda. V případě že dojde ke kolizi brzda/pohon má vždy brzda přednost. V případě že dojde k vypadnutí ze synchronizmu, podbití baterie nebo jiné nehodě dojde k automatickému vypnutí pohonu. Tuto ochranu doporučuji po důkladném odzkoušení vylepšit vhodně nastaveným watchdogem.

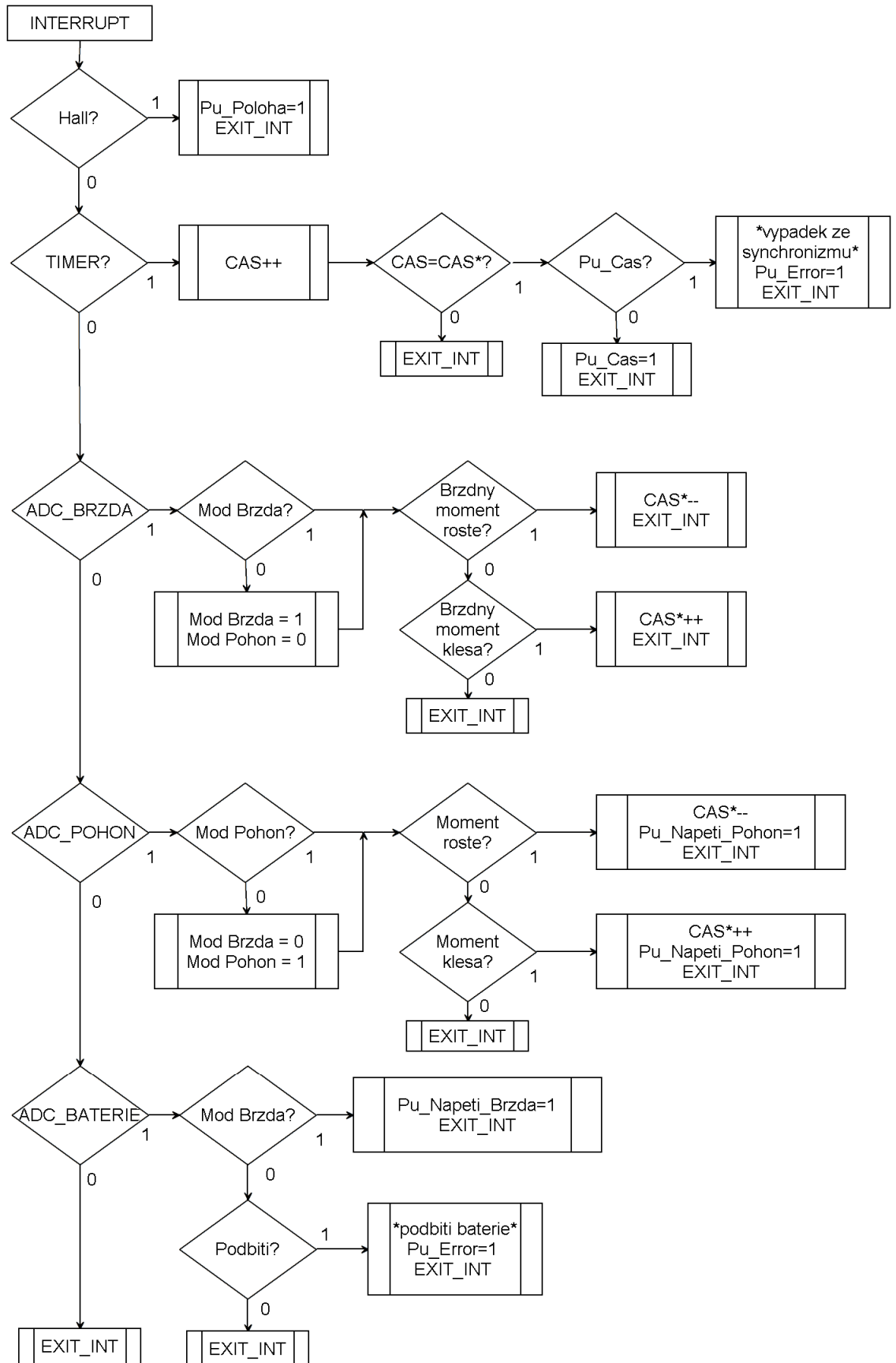
V režimu pohon se kontroluje napětí baterie, napětí střídače, poloha rotoru, úroveň stisknutí plynu a uvolnění páčky brzdy. Napětí baterie se hlídá, aby nedošlo k jejímu podbití. Napětí střídače je spolu s polohou rotoru důležité pro nastavení konstantního magnetického toku. Úroveň stisku plynu/brzdy jsou vstupní informace podle kterých je pohon řízen. Důležité je, aby byl měnič v chodu, kdy dodává energii pohonu.

V režimu brzdy se kontroluje v podstatě totéž akorát jinak. Měnič dodává energii do baterie. Takže je nutné hlídat baterii proti přebití a v případě jejího ohrožení použít brzdící rezistor.





6.1 Algoritmus hlavní smyčky



6.2 Algoritmus přerušení

## Závěr

Cílem práce bylo navrhnout pohon pro elektrokoloběžku a jeho řízení. Práce na elektrokoloběžce byla rozdělena do 2 částí. Jednu jsem zpracovával já a druhou kolega Sedláček Lukáš. Moje práce se zabývá řízením pohonu jako takového, zatímco kolega Sedláček navrhoval silovou část koloběžky. V úvodních kapitolách se zabývám principiálním popisem jednotlivých komponent s tím, že některý popis některých komponent je převzat ze Sedláčkovy práce. Další část práce se zabývá popisem možností regulace BLDC pohonu. Předposlední část se zabývá simulací řízení pohonu pomocí skalárního řízení. Skalární řízení bylo zvoleno především pro svoji jednoduchost a realizovatelnost v jednoduchém jednočipu. Poslední částí je návrh regulačního algoritmu pro programátora.

Praktická realizace koloběžky se bohužel nezdařila. Důvodem je značná časová náročnost projektu a neřešitelný problém s velkým procesorem. Co se ale podařilo, je realizace skalárního řízení v jednoduchém osmibitovém čipu. Výsledky tohoto „prototypu“ jsou v přílohách. Tyto výsledky potvrzují simulací položené předpoklady a to i přes to, že z důvodu jednoduchosti nebyla použita zpětná vazba.

Shrnu-li výsledky práce, mohu konstatovat, že jsme se vydali správným směrem a elektrokoloběžka je realizovatelným projektem, který vyžaduje pouze více času.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DEEP IN IT [online]. Poslední změna: . [Cit. 19.5.2014] Dostupné z: <http://diit.cz/clanek/lifepo4-akumulatorovy-zazrak-miri-i-do-tuzkovy-ch-baterek>
- [2] DEEP IN IT [online]. Poslední změna: 19.5.2014. [Cit. 19.5.2014] Dostupné z: [http://diit.cz/data/images/thumb/70128\\_2b9e5e4fbd.jpg?1320835938](http://diit.cz/data/images/thumb/70128_2b9e5e4fbd.jpg?1320835938)
- [3] Cell balancingbuys extra run timeandbatteryli[online]. Poslední změna: 19.5.2014. [Cit. 19.5.2014] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf>
- [4] Wikipedia EN[online]. Poslední změna: 19.5.2014. [Cit. 19.5.2014] Dostupné z: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skizze\\_Balancer.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skizze_Balancer.png)
- [5] MLAB.CZ [online]. Poslední změna: 31.3.2014. [Cit. 31.3.2014] Dostupné z: <http://www.mlab.cz/Modules/PIC/PIC16F87xTQ4401B/DOC/PIC16F87xTQ4401B.cs.pdf>
- [6] RC universe [online]. Poslední změna: 31.3.2014. [Cit. 31.3.2014] Dostupné z: <http://www.rcuniverse.com/magazine/reviews/1344/BrushlessMotors3.jpg>
- [7] AN885, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals [online]. Poslední změna: 31.3.2014. [Cit. 31.3.2014] Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [7] Instrukce pro montáž elektrokola [online]. Poslední změna: 2.4.2014. [Cit. 2.4.2014] Dostupné z: <http://www.ecotech.cz/wp-content/uploads/2010/10/universal.pdf>
- [8] hooked-on-rc-airplanes.com [online]. Poslední změna: 19.5.2014. [Cit. 19.5.2014] Dostupné z: <http://www.hooked-on-rc-airplanes.com/images/outrunner-brushless-rc-motor.jpg>
- [9] southernsoaringclub.org. [online]. Poslední změna: 19.5.2014. [Cit. 19.5.2014] Dostupné z: <http://www.southernsoaringclub.org.za/Photo10.jpg>
- [10] spse.dobruska.cz [online]. Poslední změna: 19.5.2014. [Cit. 19.5.2014] Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/SG.pdf>
- [11] HOŘAVA, Jan, Skalární versus vektorové řízení synchronních motorů, 2009, Brno, Fakulta strojního inženýrství, ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
- [12] PETRUŠKA, L'. Model synchronního motoru, 2008, VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
- [13] AnIntroduction to VectorControlof AC Motors Usingthe V850, November 2002, Vol.12, No. U16483EE1V0AN00[online]. Poslední změna: 19.5.2014. [Cit. 19.5.2014] Dostupné z: <http://pdf.datasheetarchive.com/indexerfiles/Datasheets-SW22/DSASW00429317.pdf>
- [14] SEDLÁČEK, Lukáš, Návrh výkonového obvodu elektrického pohonu koloběžky, 2014, ZCU Plzeň, Fakulta elektrotechnická

## Příloha 1

Kód testovacího programu main.c

```
#include<main.h>

int16 a=1000,deadtime=50,i=0;

voidmain()
{
    setup_timer_0(RTCC_INTERNALIRTCC_DIV_1IRTCC_8_bit); //51.2 usoverflow
    lcd_init(0);
    while(TRUE)
    {
        if(!input(TL1)) a+=10;
        if(!input(TL2)) a-=10;
        //0
        output_high(T1);//T1T5
        delay_us(a);
        output_low(T5);
        delay_us(deadtime);
        //60
        output_high(T6);//T1T6
        delay_us(a);
        output_low(T1);
        delay_us(deadtime);
        //120
        output_high(T2);//T2T6
        delay_us(a);
        output_low(T6);
        delay_us(deadtime);
        //180
        output_high(T4);//T2T4
        delay_us(a);
        output_low(T2);
        delay_us(deadtime);
        //240
        output_high(T3);//T3T4
        delay_us(a);
        output_low(T4);
        delay_us(deadtime);
        //300
        output_high(T5);//T3T5
        delay_us(a);
        output_low(T3);
        delay_us(deadtime);
    }
}
```

## Příloha 2

Kód testovacího programu main.h

```
#include<16F877A.h>
#deviceadc=16

#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES HS              //High speed Osc (> 4mhz for PCM/PCH) (>10mhz for PCD)
#FUSES NOBROWNOUT     //No brownout reset
#FUSES NOLVP          //No lowvoltageprgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) usedfor I/O

#use delay(clock=20000000)

#define TL1 PIN_B0
#define TL2 PIN_B1

#define T1 PIN_C0
#define T2 PIN_C2
#define T3 PIN_C3
#define T4 PIN_C4
#define T5 PIN_C5
#define T6 PIN_C7
```

## Příloha 3

Tento graf zobrazuje průběhy proudů tří fází motoru v závislosti na buzení. Kanály 1,2,3 vyjadřují průběhy fázových proudů. Všechny proudové sondy mají rozlišení 100mV/1A. Kanál 4 je budící signál z procesoru. Budící signál je pro horní tranzistor fáze na kanálu 3.

