

**KATEDRA ELEKTRICKÝCH
POHONŮ A TRAKCE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
MODULAČNÍ STRATEGIE PRO
ASYNCHRONNÍ MOTOR
S VEKTOROVÝM ŘÍZENÍM**

BAKALAŘSKÁ PRÁCE

KVĚTEN 2023

**NADEZHDA
DIUMINA**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Diumina** Jméno: **Nadezhda** Osobní číslo: **499291**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Modulační strategie pro asynchronní motor s vektorovým řízením

Název bakalářské práce anglicky:

Modulation Strategies for IM with FOC

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši modulačních strategií napětových střídačů
- 2) V prostředí Simulink vytvořte model vektorového řízení asynchronního motoru
- 3) V prostředí Simulink implementujte vybrané typy modulačních strategií střídače
- 4) Porovnejte jejich vliv na vektorové řízení asynchronního motoru

Seznam doporučené literatury:

- [1] PAVELKA, Jiří a Pavel KOBRLE. Elektrické pohony a jejich řízení. 3. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
[2] QUANG, Nguyen Phung a Jörg-Andreas DITTRICH. Vector control of three-phase AC machines: system development in the practice. [Berlin]: Springer, c2008. Power systems. ISBN 978-3-540-79028-0.
[3] BOLDEA, Ion a S. A. NASAR. Electric drives. Third Edition. New York: CRC Press, [2017]. ISBN 978-1-4987-4820-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Jan Bauer, Ph.D. katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **25.04.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **16.02.2025**

doc. Ing. Jan Bauer, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

PODĚKOVÁNÍ

V této části bych ráda poděkovala panu doc. Ing. Janu Bauerovi, za podporu a cenné rady při psaní mé bakalářské práce na téma Modulační strategie pro asynchronní motor s vektorovým řízením.

Vaše odborné znalosti, vstřícnost a ochota pomoci mi byly neocenitelné během celého procesu tvorby. Díky vašim přesným směrnicím a konstruktivním připomínkám jsem mohla neustále zdokonalovat svou práci a rozšiřovat své poznatky. Věřím, že vaše vedení mi pomohlo dosáhnout hlubšího porozumění dané problematice.

Rovněž bych chtěla vyjádřit svou vděčnost za čas, který jste mi věnoval při konzultacích a diskusích.

Je pro mě ctí, že jsem mohla mít vaši podporu při psaní mé bakalářské práce.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 29. května 2023

.....

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na modulační strategie pro asynchronní motor s vektorovým řízením. Simulace pomocí programu MATLAB Simulink byly využity k prozkoumání třech modulačních strategií – SPWM, SVPWM a DPWM. Práce zahrnuje literární rešerši, která představuje teoretický základ a přehled o asynchronních motorech s vektorovým řízením a jejich modulačních strategiích. Následně byly provedeny simulace v Simulinku, které umožnily detailní analýzu všech strategií.

Klíčová slova: asynchronní motor, vektorové řízení, PWM, Simulink, modulační strategie, DPWM, SVPWM.

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on modulation strategies for an asynchronous motor with vector control. MATLAB Simulink simulations were used to investigate three modulation strategies – SPWM, SVPWM and DPWM. The paper includes a literature search that presents the theoretical basis and overview of vector controlled asynchronous motors and their modulation strategies. Subsequently, simulations were performed in Simulink to allow a detailed analysis of all strategies.

Keywords: asynchronous motor, vector control, PWM, Simulink, modulation strategies, DPWM, SVPWM.

OBSAH

ÚVOD	1
KAPITOLA 1: POHONY S ASYNCHRONNÍMI MOTORY	2
1.1 PRINCIP FUNKCE A KONSTRUKCE	2
1.1.1 Asynchronní motor s klecí na rotoru.....	2
1.1.2 Pólové dvojice.....	3
1.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA	3
1.3 MOMENTOVÁ A PROUDOVÁ CHARAKTERISTIKA	4
1.4 ŘÍZENÍ OTÁČEK	5
1.4.1 Řízení otáček frekvenčním měničem.....	5
1.5 MATEMATICKÝ MODEL	6
KAPITOLA 2: VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	8
2.1 NAVRŽENÉ SCHÉMA VEKTOROVÉ REGULACE	8
2.1.1 Proudový I-n model	9
2.1.2 Ovládací část	10
2.1.3 Modulátor.....	11
KAPITOLA 3: PULZNĚ ŠÍŘKOVÁ MODULACE – PWM	14
3.1 TECHNIKA TROJÚHELNÍKOVÉHO PRŮNIKU SPWM (SUBOSCILAČNÍ MODULACE)	14
3.2 SVPWM SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION	15
3.3 VYSOCE PŘESNÁ METODA DPWM	17
3.3.1 Princip	18
KAPITOLA 4: SIMULACE	20
4.1 PARAMETRY JEDNOTLIVÝCH KOMPONENTŮ	20
4.2 VÝSLEDKY SIMULACE	20
ZÁVĚR	25
LITERATURA	26

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Stator a rotor s klecovým vinutím asynchronního motoru [6].....	
Obr. 2 Statorové vinutí pro různé počty pólových párů [3].....	
Obr. 3 Náhradní schéma asynchronního motoru [7]	
Obr. 4 Momentová a proudová charakteristika asynchronního motoru [8]	
Obr. 5 Tyčí rotoru asynchronního motoru s kleci [3].....	
Obr. 6 Frekvenční měnič.....	
Obr. 7 Třífázový napěťový střídač v můstkovém zapojení [5]	
Obr. 8 Prostorové vektory	
Obr. 9 Vinutí statoru a rotoru asynchronního motoru [1]	
Obr. 10 Strukturní schéma vektorové regulace s čidlem otáček rotoru [1]	
Obr. 11 Model vektorové regulace v prostředí MATLAB Simulink	
Obr. 12 Proudový I-n model.....	
Obr. 13 Ovládací část vektorové regulace asynchronního motoru	
Obr. 14 PI regulátor	
Obr. 15 Modulátor pulzů	
Obr. 16 Modulační průběhy moderních metod PWM [4]	
Obr. 17 Šestipulzní obdélníková modulace [2].....	
Obr. 18 Pulzně šířková modulace (Suboscilační modulace) [1]	
Obr. 19 Princip PWM pro DC signál.....	
Obr. 20 Technika trojúhelníkového průřezu, vstup a výstup modulátoru.....	
Obr. 21 Technika trojúhelníkového průřezu tvorba pulzů	
Obr. 22 Modulace SVPWM	
Obr. 23 Základní přepínání, vektory a sektory [9].....	
Obr. 24 Model SVPWM v prostředí MATLAB Simulink.....	
Obr. 25 Modulace napětí, metoda SVPWM	
Obr. 26 Modulace DPWM3.....	
Obr. 27 Model DPWM1 v prostředí MATLAB Simulink	
Obr. 28 Modulace napětí, metoda DPWM1	
Obr. 29 Chování motoru při Suboscilační metodě	
Obr. 30 Chování motoru při SVPWM	
Obr. 31 Chování motoru při DPWM1	
Obr. 32 Chování motoru při Obdélníkovém řízení	
Obr. 33 Aplikace Fourierovy transformace na SPWM.....	
Obr. 34 Aplikace Fourierovy transformace na SVPWM.....	
Obr. 35 Aplikace Fourierovy transformace na DPWM	
Obr. 36 Aplikace Fourierovy transformace na Obdélníkové řízení.....	

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Nejběžnější rychlostní provozy asynchronního motoru	
Tab. 2 Parametry motoru	
Tab. 3 Parametry PI regulátorů.....	
Tab. 4 Parametry DC částí.....	

ÚVOD

Asynchronní motory s vektorovým řízením jsou široce používanými pohonnými systémy v průmyslových aplikacích díky své vysoké účinnosti a spolehlivosti. Efektivní řízení takových motorů je klíčové pro dosažení optimálního výkonu a minimalizaci energetických ztrát.

Modulační strategie hrají významnou roli při řízení asynchronních motorů. Správný výběr modulační strategie může ovlivnit výkon motoru, účinnost a kvalitu napětí a proudu. Mezi nejčastěji používané modulační strategie patří Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM), Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) a Discontinuous Pulse Width Modulation (DPWM). SVPWM je známá svou schopností minimalizovat harmonické zkreslení a dosahovat vysoké účinnosti, zatímco DPWM je výhodná pro jednodušší implementaci a menší nároky na výpočetní prostředky.

Cílem této bakalářské práce je provést podrobnou analýzu a porovnání modulačních strategií SPWM, SVPWM a DPWM pro asynchronní motor s vektorovým řízením. Pro tento účel byla vytvořena simulace v prostředí Simulink, která umožnila detailní zkoumání a hodnocení strategií.

Výsledky této práce poskytnou užitečné informace pro seznámení se s asynchronními motory s vektorovým řízením. Budou sloužit jako vstupní data pro vývoj a optimalizaci řídicích algoritmů, které budou přizpůsobeny specifickým požadavkům konkrétních aplikací.

KAPITOLA 1: POHONY S ASYNCHRONNÍMI MOTORY

Asynchronní motor nebo indukční motor, je napájen z jednofázového nebo třífázového střídavého zdroje. Výhodnou asynchronního motoru je snadná instalace a možnost jeho připojení rovnou na napájecí síť. Navíc tento druh motorů je velmi úsporný a bezúdržbový. Díky tomu jsou pohony s indukčními motory hodně rozšířené a vyskytují se nejčastěji v průmyslových aplikacích. Výkonový rozsah těchto pohonů začíná na hodnotách kolem 100 W a dosahuje až do megawattového rozsahu.

Asynchronní motory umožňují implementaci složitých řídicích algoritmů, a díky tomu jsou z hlediska přesnosti a dynamiky srovnatelné se stejnosměrnými pohony.

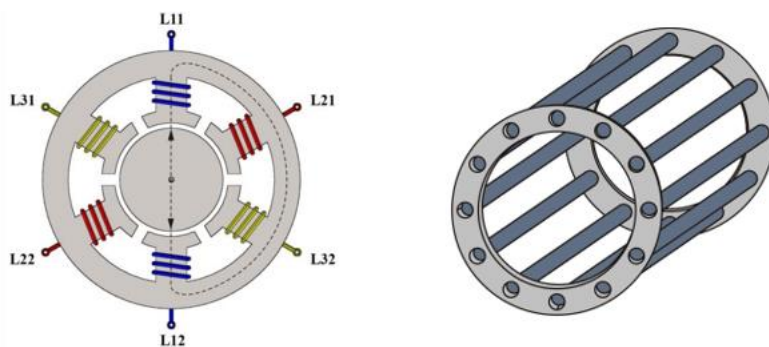
1.1 Princip funkce a konstrukce

Asynchronní motory můžeme rozdělit podle počtu fází napájecího napětí na jednofázové a třífázové. Třífázové střídavé motory se dělí podle konstrukce rotoru na rotor s klecovým vinutím a rotor na kroužky. Poslední se používají pro speciální aplikace v oblasti vysokých výkonů.

1.1.1 Asynchronní motor s kleci na rotoru

Tento druh motorů je nejrozšířenější. Vinutí asynchronního motoru je umístěno na statoru, na rotoru jeho funkce nahrazuje klec. Díky tomu přenos energie je bezkontaktní, a motor je prakticky bezúdržbový.

Jak vyplývá z názvu, třífázový asynchronní motor má na statoru tři vinutí, které jsou posunuté vůči sobě o 120°. Rotor se skládá z laminovaného jádra s drážkami, ve kterých je vytvořena hliníková nebo měděná klec.



Obr. 1 Stator a rotor s klecovým vinutím asynchronního motoru [6]

Vinutím statoru protéká třífázový sinusový proud s fázovým posunem 120°, který vyvolává točivé magnetické pole. Toto magnetické pole působením na rotor indukuje v jeho tyčích elektrické napětí, které vede k průtoku proudu.

Tyče vedoucí proud se nacházejí v magnetickém poli statoru. Ze základu elektromagnetického pole víme, že v tomto případě na každou tyč působí Lorentzova síla. Tyto síly se přenášejí na rotor a vytvářejí točivý moment. Jako reakci, rotor začíná vykonávat otáčivý pohyb, který sleduje otáčení magnetického pole statoru.

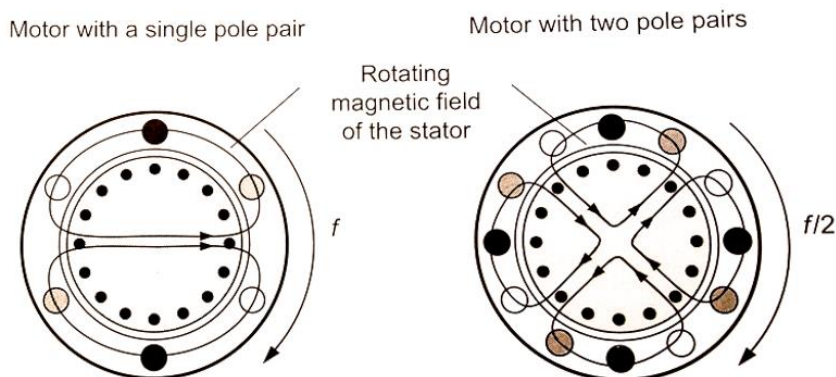
Avšak rychlost rotoru a pole statoru není stejná. V případě motoru se rotor otáčí s nižšími otáčkami. To je nezbytná podmínka, protože jen díky ní se v rotoru indukuje napětí, jehož výsledkem je tok proudu. Proto tomuto druhu motoru se říká „asynchronní“. Míru rozdílu otáček magnetického pole a rotoru nazýváme skluzem. Jeho velikost je závislá na zatížení.

$$s = \frac{n_d - n}{n_d} \quad (1)$$

Tato veličina popisuje rozdíl mezi synchronními otáčkami n_d a mechanickými otáčkami n . Pro asynchronní motor platí: $s = 0$ pro stav bez zatížení a $s = 1$ pro nulové otáčky. Proto se v motorovém režimu skluz pohybuje v rozmezí 0 až 1.

1.1.2 Pólové dvojice

Počet pólových dvojic nebo pól párů je určen konstrukčním řešením motoru. Na Obr. 2 je znázorněn případ motoru s jednou a dvěma pólovými dvojicemi.



Obr. 2 Statorové vinutí pro různé počty pólových párů [3]

Pokud třífázovým systémem vinutí vede fázový proud, má magnetické pole statoru severní i jižní pól. Většího počtu pól párů dosáhneme opakováním uspořádání systému třífázového vinutí. Jejich počet ovlivňuje rotační frekvenci statorového pole, a tedy i rotační frekvenci rotoru. Rychlost otáčení, se kterou se motor otáčí, se značí n .

$$n = \frac{60 \cdot f}{p_p} \quad (2)$$

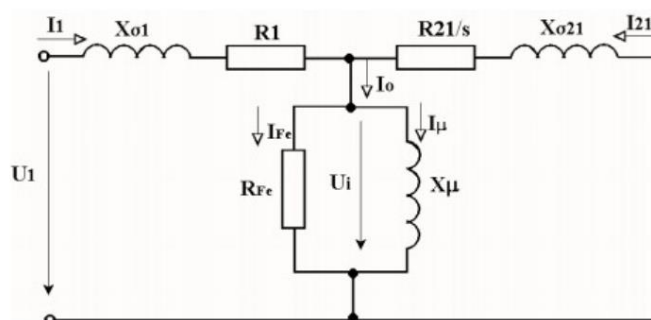
Nejčastěji se používají asynchronní motory s jedním až čtyřmi pól páry. Z toho můžeme naznačit nejběžnější rychlosti provozu z napájecí frekvencí 50 Hz.

Tab. 1 Nejběžnější rychlostní provozu asynchronního motoru

Počet p_p	1	2	3	4
n (ot/min)	3000	1500	1000	750

1.2 Náhradní schéma

Zpravidla se náhradní schéma asynchronního motoru počítá pro ustálený stav. Stroj je pak napájen střídavým napětím s pevně stanovenou amplitudou a frekvencí.



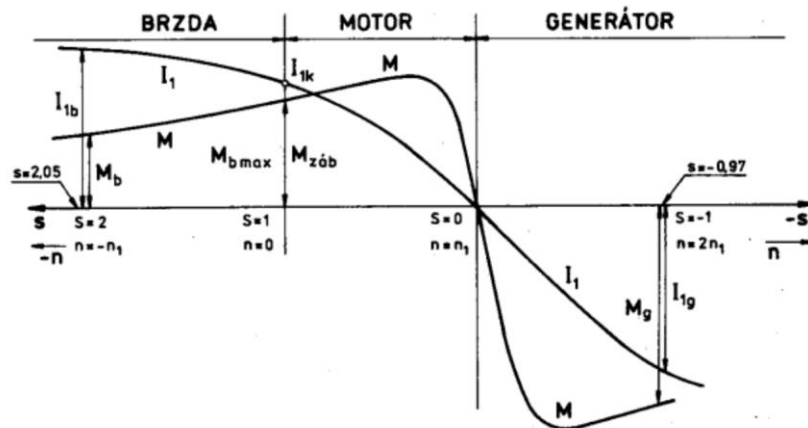
Obr. 3 Náhradní schéma asynchronního motoru [7]

Náhradní schéma zahrnuje vždy rozptylovou reaktanci, činný odpor vinutí a odpor, na kterém vzniknou ztráty odpovídající ztrátám v železe vzájemnou reaktanci, ve které se indukují napětí.

Toto schéma je podobné náhradnímu schématu transformátoru. Rozdíl lze nalézt na sekundární straně. U transformátoru je na tuto stranu připojen spotřebič, ale u asynchronního motoru je sekundární strana spojená nakrátko.

1.3 Momentová a proudová charakteristika

Momentová charakteristika je nejdůležitější charakteristikou elektrického motoru. Díky ní můžeme vyjádřit závislost momentu M na otáčkách n .



Obr. 4 Momentová a proudová charakteristika asynchronního motoru [8]

V oblastí synchronních otáček je momentová charakteristika skoro lineární, a hodnoty otáček a satorového proudu jsou závislé na zatížení.

Jak je znázorněno na Obr. 4 asynchronní stroj může pracovat v třech režimech – brzda, motor a generátor. Graf momentové charakteristiky vyplývá z následující rovnice:

$$M = \frac{3R_2 p_p}{s \omega_1} \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2} \quad (3)$$

Rozběh motoru je doprovázen velkým záběrným proudem, který může dosahovat 5 až 8násobek proudu jmenovitého. Avšak, záběrný moment je často menší než jeho jmenovitá hodnota. S rostoucími otáčkami se pak u většiny motorů točivý moment zvětšuje, dokud nedosáhne maximálního momentu. Když se dostane nad synchronní otáčky, točivý moment změní své znaménko a asynchronní stroj bude pracovat jako generátor.

Momentovou charakteristiku asynchronního motoru je možné ovlivnit konstrukcí tyčí rotoru s klecí. Největší změny můžeme pozorovat v rozsahu záběrného momentu. Na Obr. 5 jsou znázorněné různé konstrukce tyčí rotoru pro jednoduchou, hlubokou nebo zúženou a dvojitou klec.



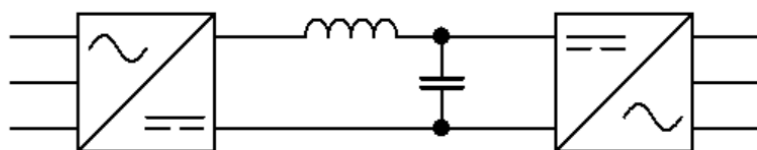
Obr. 5 Tyčí rotoru asynchronního motoru s klecí [3]

1.4 Řízení otáček

Pohony s proměnnými otáčkami jsou rozšířené v průmyslové praxi. Používají se tam, kde jsou poháněným strojem vyžadované nastavitelné otáčky a odolnost vůči kolísání zátěže. Řídicí jednotka u asynchronního motorů obvykle pracuje buď s frekvenčním měničem, nebo se stykačovým řízením, kde se přepíná směr točivého pole, anebo počet aktivních pólů.

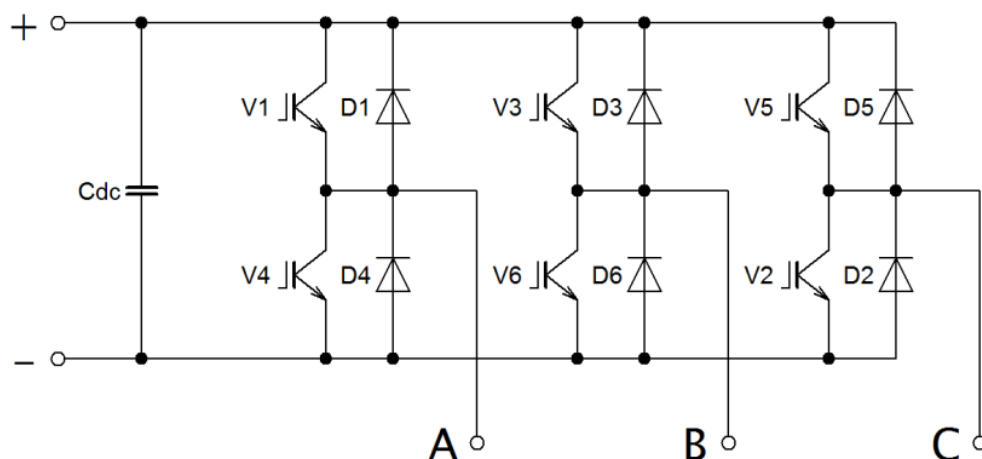
1.4.1 Řízení otáček frekvenčním měničem

Otáčky asynchronního motoru by se měly měnit plynule, proto se v tomto případě využívají frekvenční měniče. Rozumíme tomu jako skupině dvou měničů napětí se stejnosměrným meziobvodem.



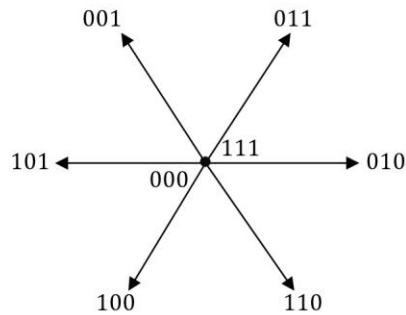
Obr. 6 Frekvenční měnič

Střídavé napětí přes usměrňovač prochází stejnosměrným meziobvodem a vstupuje do střídače. Ten se skládá z šesti tranzistorů a sejného počtu diod. Celá tato soustava převádí stejnosměrné síťové napětí na třífázové pulzní výstupní napětí.



Obr. 7 Třífázový napěťový střídač v můstkovém zapojení [5]

Tranzistory musí být řízeny tak, aby v každém rameni byl vodivý pouze jeden: buď horní nebo dolní tranzistor. Výsledné napětí je součtem napětí na všech třech vinutích, které je závislé na spínacích stavech jednotlivých ramen můstku. Pro praktické účely lze využít znalost prostorových vektorů, které geometricky představují okamžitý stav satorového napětí, proudu a magnetického toku.



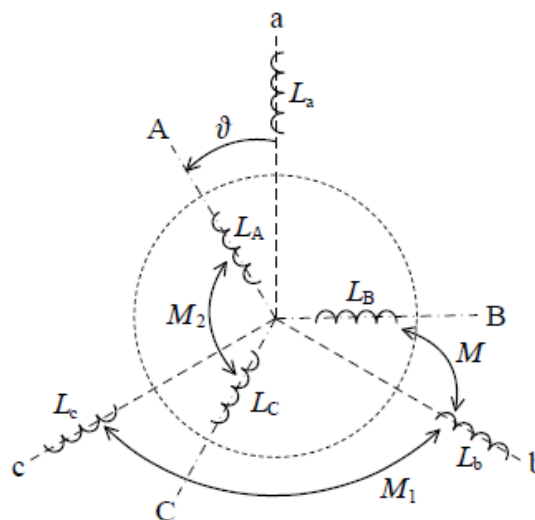
Obr. 8 Prostorové vektory

Na předchozím obrázku uvažujeme výstupní napětí jako prostorový vektor, se započtením všech možných spínacích stavů měniče. Ten je sestaven ze třech kombinací tranzistorů (horní a dolní), které nabízejí dva možné výstupy: 01 a 10. Z toho vyplývá, že na výstupu střidače je celkem $2^3 = 8$ vektorů. Dva nulové vektory a šest vektorů činného napětí s nenulovou velikostí. Pozadované výsledné napětí se pak vyrábí z posloupnosti prostorových vektorů. Jeho velikost je řízena dobou zapnutí tranzistorů.

1.5 Matematický model

Pro to abychom mohli odvodit matematický model asynchronního motoru, potřebujeme stanovit určité předpoklady:

- Motor je napájen třífázovou symetrickou sinusovou elektrickou soustavou
- Hodnoty indukčnosti a odporů jednotlivých fází jsou shodné: $L_a=L_b=L_c$, $L_A=L_B=L_C$
- Vinutí jednotlivých fází je pravidelně rozloženo po statorovém a rotorovém obvodu
- Ztráty v železe jsou zanedbatelné
- Uvažujeme třífázový asynchronní kroužkový motor, který má tři vinutí na statoru a tři na rotoru



Obr. 9 Vinutí statoru a rotoru asynchronního motoru [1]

Můžeme napsat šest rovnic pro magnetické toky jednotlivých vinutí.

$$\begin{aligned}\psi_a &= L_1 i_a + L_{1h} i_A \\ \psi_A &= L_2 i_A + L_{2h} i_a \\ \psi_b &= L_1 i_b + L_{1h} i_B \\ \psi_B &= L_2 i_B + L_{2h} i_b \\ \psi_c &= L_1 i_c + L_{1h} i_C \\ \psi_C &= L_2 i_C + L_{2h} i_c\end{aligned}\tag{4}$$

kde L_1 – je výsledná indukčnost jedné fáze statorového vinutí

L_2 – je výsledná indukčnost jedné fáze rotorového vinutí

L_{1h}, L_{2h} – označují výslednou vzájemnou indukčnost se všemi ostatními vinutími

i_a, i_b, i_c – statorové proudy

i_A, i_B, i_C – rotorové proudy

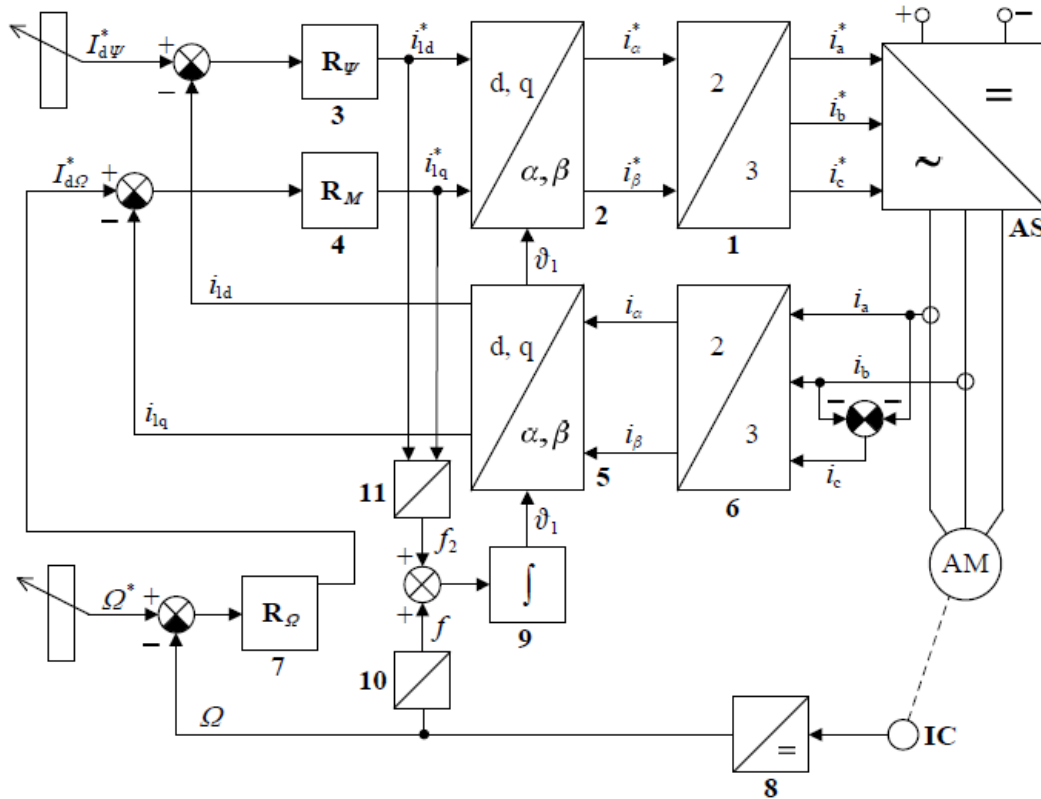
Obdobným způsobem, s využitím předchozích rovnic, stanovíme vztahy pro napětí.

$$\begin{aligned}u_a &= R_1 i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_A &= R_2 i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_b &= R_1 i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_B &= R_2 i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_c &= R_1 i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \\ u_C &= R_2 i_C + \frac{d\psi_C}{dt}\end{aligned}\tag{5}$$

Znát matematický model asynchronního stroje je nezbytné pro pochopení principu vektorového řízení, které bude probráno v následujících kapitolách.

KAPITOLA 2: VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Vektorové řízení asynchronního motoru je pokročilou technikou řízení, která umožňuje lepší výkon, efektivitu a kontrolu nad provozem motoru. Při vektorovém řízení je motor řízen na základě jeho matematického modelu, který zahrnuje vektorovou reprezentaci proudů a napětí motoru. Kromě velikosti magnetického toku vektorové řízení umožňuje nastavovat i jeho směr a tím docílit plynulou změnu otáček.

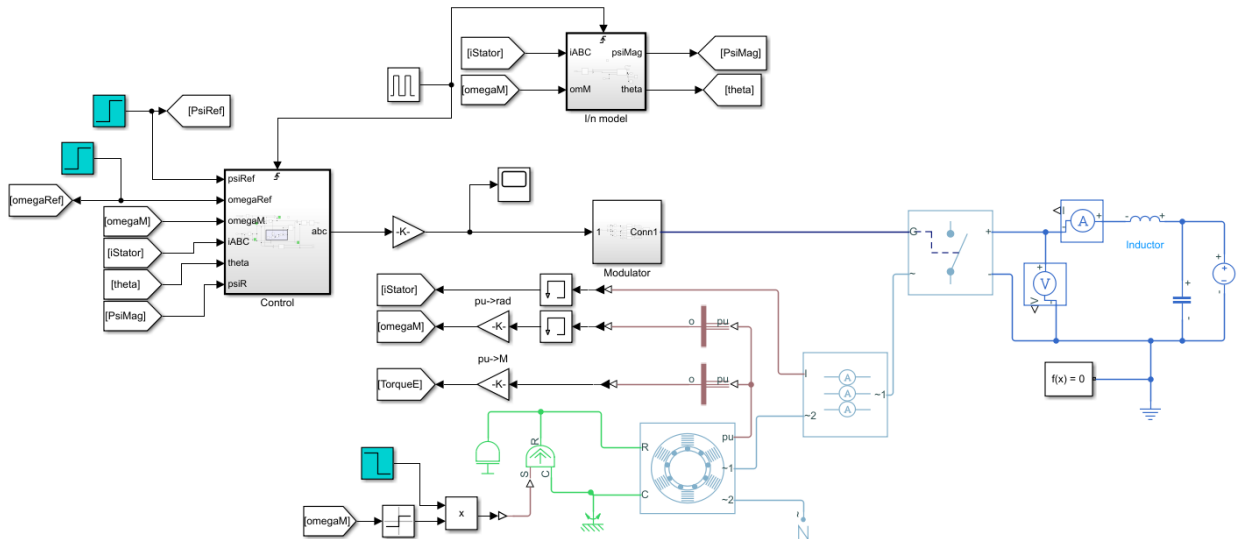


Obr. 10 Strukturální schéma vektorové regulace s čidlem otáček rotoru [1]

Hlavním cílem vektorového řízení asynchronního motoru je dosáhnout jeho optimálního výkonu při různých pracovních podmínkách, jako je změna zátěže, rychlosti, nebo provozního režimu. Regulací napájecího napětí a proudu dosahuje motor požadované rychlosti a momentu. Vektorové řízení umožňuje precizní kontrolu motoru v celém momentovém a rychlostním rozsahu, a to i za nízkých otáček. Jsou tady vyžadované sofistikované algoritmy a výpočty, které určují hodnoty napětí a proudu na základě aktuálního stavu motoru, jako je rychlost otáčení, moment, napětí a proud. Tento proces probíhá v reálném čase s vysokou rychlostí vzorkování, aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího řízení.

2.1 Navržené schéma vektorové regulace

Prvním praktickým úkolem této práce bylo navrhnout model vektorového řízení asynchronního motoru pomocí MATLAB Simulink.



Obr. 11 Model vektorové regulace v prostředí MATLAB Simulink

Tento model zahrnuje v sobě tři základní části.

2.1.1 Proudový I-n model

Je jeden z nejpoužívanějších modelů ve vektorové regulaci. Je založen na proudové reprezentaci motoru a zahrnuje vztahy mezi proudy, napětím a otáčkami motoru. Je to matematický model, který se používá k popisu chování motoru ve vztahu k jeho proudům a otáčkám.

Pro sestavení modelu je potřeba znát dvě rovnice:

$$\frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = \frac{L_m R_2}{L_2} i_{1\alpha} - \frac{R_2}{L_2} \psi_{2\alpha} - \omega \psi_{2\beta} \quad (6)$$

$$\frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = \frac{L_m R_2}{L_1} i_{1\beta} - \frac{R_2}{L_1} \psi_{2\beta} + \omega \psi_{2\alpha}$$

kde $\psi_{2\alpha}$, $\psi_{2\beta}$ – imaginární a reálná část rotorových toků

$L_m = 82,5\text{mH}$ – je vzájemná indukčnost

$L_1 = 84,77\text{mH}$

$L_2 = 84,77\text{mH}$

$R_2 = 225\text{m}\Omega$

Které lze odvodit z rovnic matematického modelu motoru v souřadnicovém systému svázaným se státorem. Kdy budeme uvažovat asynchronní motor s kotvou nakrátko (tj. $u_2 = 0$).

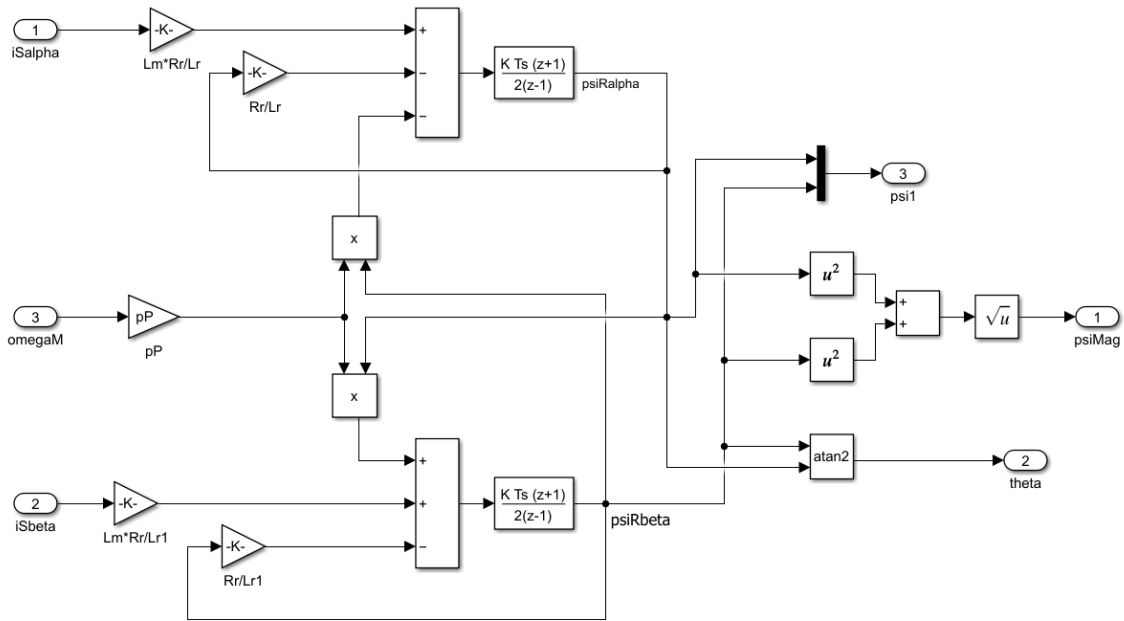
$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_k \psi_1$$

$$0 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_k - \omega) \psi_2 \quad (7)$$

$$\psi_1 = L_1 i_1 + L_m i_2$$

$$\psi_2 = L_2 i_2 + L_m i_1$$

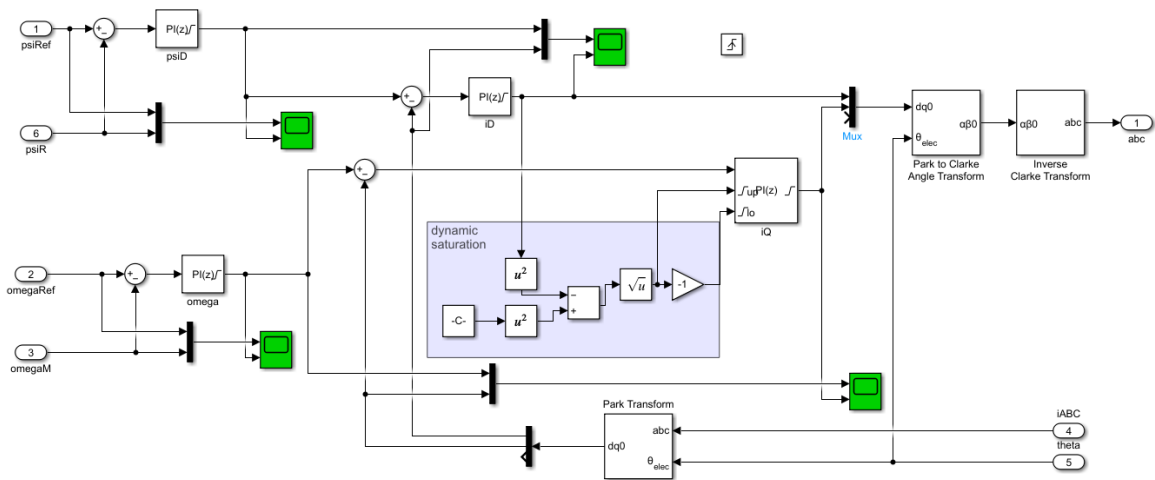
Na výstupu modelu dostáváme rotorové toky $\psi_{2\alpha}$ a $\psi_{2\beta}$ v souřadnicovém systému $\alpha\beta$, z nich pak můžeme vypočítat požadovaný úhel θ .



Obr. 12 Proudový I-n model

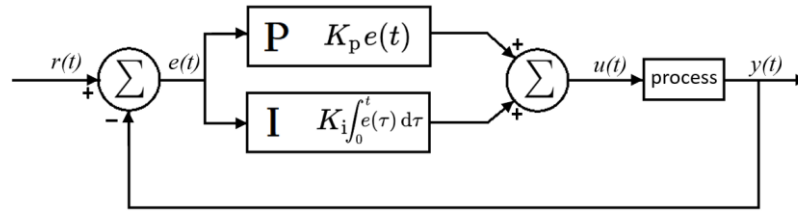
2.1.2 Ovládací část

Ovládací část má za úkol vytvořit z výstupního proudu motoru třífázové sinusové napětí u_{abc} , které následně vstupuje do modulátoru. Pomocí Clarkové, Parkové transformace a úhlu θ vytvoříme dva proudy v souřadnicovém systému dq , které následně použijeme k regulaci rychlosti motoru. Díky regulátorům proudů a napětí, ze vstupních požadovaných otáček dostaneme průběhy napětí u_d a u_q . Využitím inverzní Parkové a Clarkové transformace docílíme k požadovanému sinusovému napětí u_{abc} .



Obr. 13 Ovládací část vektorové regulace asynchronního motoru

Pro lepší pochopení funkce ovládací části je potřeba znát parametry a princip regulátorů. PID regulátor patří mezi spojité regulátory, je složen z Proporcionální, Integrovaní a Derivační částí. Jeho hlavní funkcí je nepřetržité počítání regulační odchylky, která je dána rozdílem mezi požadovanou veličinou a výstupem regulátoru.



Obr. 14 PI regulátor

V této simulaci byly použité tři PI regulátory, jejichž parametry jsou zaznamenány v Tab. 3.

Dalším důležitým bodem ovládací částí jsou transformace. V této modulační úloze použijeme Clarkovu ($abc \rightarrow \alpha\beta$), Parkovu ($\alpha\beta \rightarrow dq$)/($abc \rightarrow dq$) transformaci a jejich inverzní funkce.

- Clarkova transformace převádí veličiny ze systému abc do systému os $\alpha\beta$ pevně svázaným se státorem. Tato transformace je vhodná pro sledování statorových veličin. U asynchronního motoru, který nemá vyniklou osu symetrie, můžeme definovat polohu vztahného vektoru libovolně. Většinou se poloha osy α ztotožňuje s polohou vinutí a , proto můžeme stanovit vztahy mezi těmito souřadnicovými systémy

$$\begin{aligned} i_\alpha &= K \left(i_a - \frac{i_b}{2} - \frac{i_c}{2} \right) = \frac{3}{2} K i_a \\ i_\beta &= K \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} i_b + \frac{\sqrt{3}}{2} i_c \right) = \frac{\sqrt{3}}{2} K (-i_b + i_c) \end{aligned} \quad (8)$$

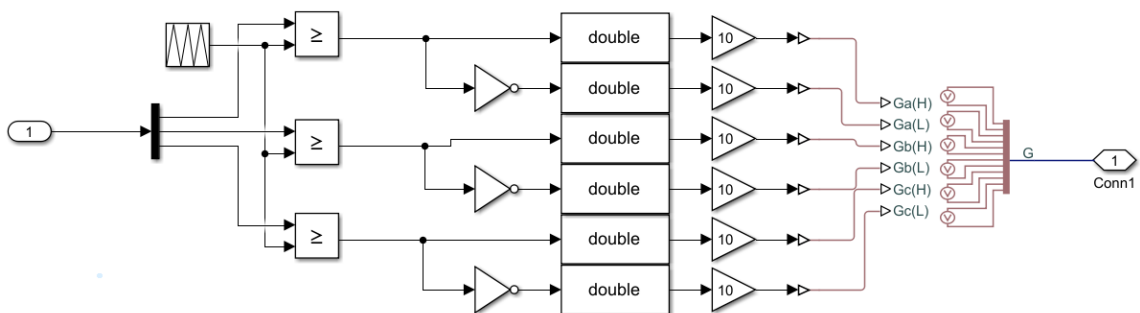
- Parkova transformace se využívá pro převod veličin ze systému abc do systému os dq rotující rychlosti točivého magnetického pole motoru. Také je možné jej popsat jako transformování vektoru střídavého proudu na stejnosměrné veličiny a naopak.

$$\begin{aligned} u_{dq} &= \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = T_p u_{abc} = T_p \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \\ i_{dq} &= \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = T_p i_{abc} = T_p \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

kde T_p – je transformační matice

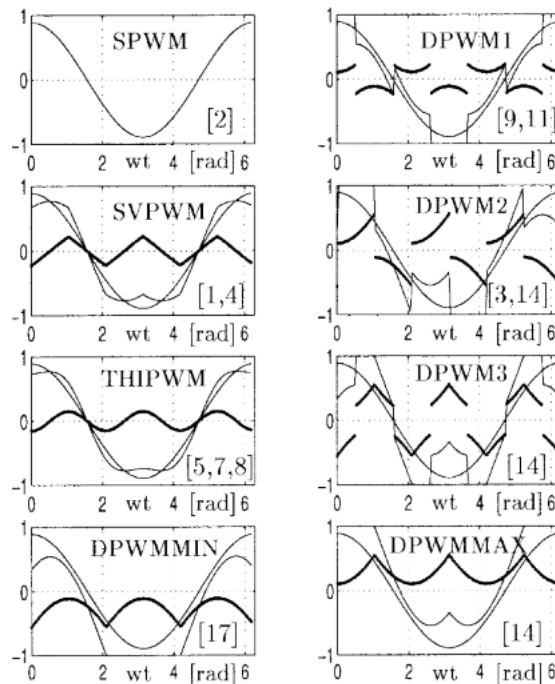
2.1.3 Modulátor

Asynchronní motor je napájen stejnosměrným napětím, které vstupuje do střídače, sestaveného z šesti tranzistorů. Tranzistor je položená součástka, kterou umíme sepnout a tím řídit výstupní napětí. Pomocí modulátoru dokážeme vytvořit potřebnou kombinaci pulsů pro napájení tranzistorů.



Obr. 15 Modulátor pulzů

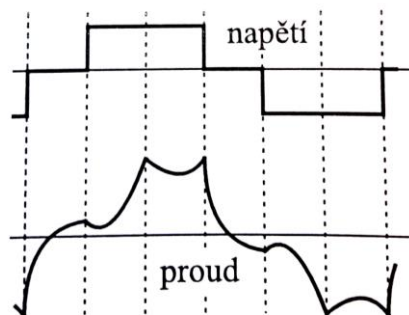
Existuje mnoho modulačních strategií, které se používají při generování pulsů tranzistorů. Od nejjednodušší trojúhelníkové metody Obr. 19 do složitějších DPWM metod.



Obr. 16 Modulační průběhy moderních metod PWM [4]

- Trojúhelníková metoda neboli SPWM díky své jednoduchosti našla široké uplatnění. Avšak kvůli její linearitě dochází ke špatnému využití vstupního napětí.
- Metoda prostorového vektoru neboli SVPWM výrazně zlepšuje využití měniče.
- THIPWM zahrnuje v sobě injekci třetí harmonické.
- De-penbroková metoda neboli DPWM využívá nespojitý signál s nulovou sekvencí a poskytuje širší rozsah linearity, díky eliminaci spínacích ztrát příslušného ramene měniče.

Dalším známým způsobem řízení je obdélníková metoda. Tato regulace pracuje se čtvercovými pulsy napětí, které jsou aplikovány na vinutí statoru asynchronního motoru. Princip obdélníkového řízení spočívá v použití střídavého napětí o konstantní frekvenci a proměnné šířce pulsu. Šířka pulsu je řízena tak, aby se dosáhlo požadovaného výstupního napětí.



Obr. 17 Šestipulzní obdélníková modulace [2]

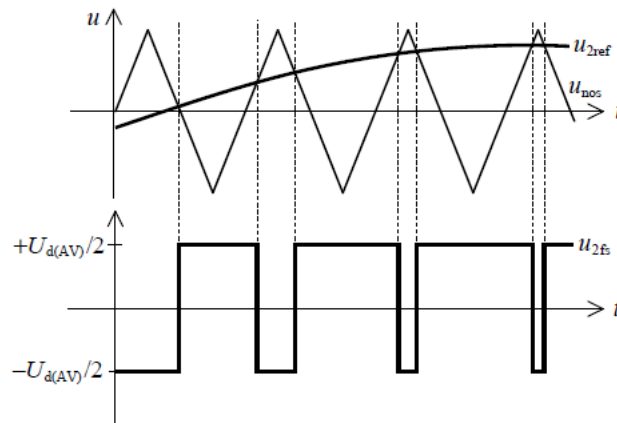
Při obdélníkovém řízení se mění šířka pulsu ve srovnání se střední hodnotou napětí. Pokud je šířka pulsu blízká nule, motor obdrží minimální napájecí napětí a jeho rychlost klesá.

Naopak, při maximální šířce pulsu je motor napájen plným napětím a jeho rychlost se zvyšuje. Pro správné fungování obdélníkového řízení je nezbytné měřit momentální rychlost motoru. K tomu se obvykle používají enkodéry nebo jiné snímače rychlosti. Na základě naměřené rychlosti je pak řídicí systém schopen upravit šířku pulsu a udržovat tak požadovanou rychlost.

Obdélníkové řízení umožňuje regulovat rychlost motoru a také poskytuje relativně vysoký výkon, avšak při tomto způsobu dostáváme poměrně nepříznivý průběh proudu. Je to způsobeno jednoduchostí spínání, kvůli které neumíme měnit amplitudu základní harmonické výstupního napětí. A proto je asynchronní motor při zvyšující se rychlosti potřeba odbuzovat. Daný způsob se z těchto důvodů používá pouze u speciálních pohonů vyšších výkonů pro vyšší otáčkovou oblast.

KAPITOLA 3: PULZNĚ ŠÍŘKOVÁ MODULACE – PWM

PWM metoda je způsob řízení signálu, který se používá pro řízení výkonu v různých elektronických zařízeních. Jedná se o modulační techniku, při které se mění šířka impulzů v časovém intervalu. Velikost okamžitého výstupního napětí střídače je určena střední hodnotou dvou sousedních různě širokých pulzů opačné polaroty.



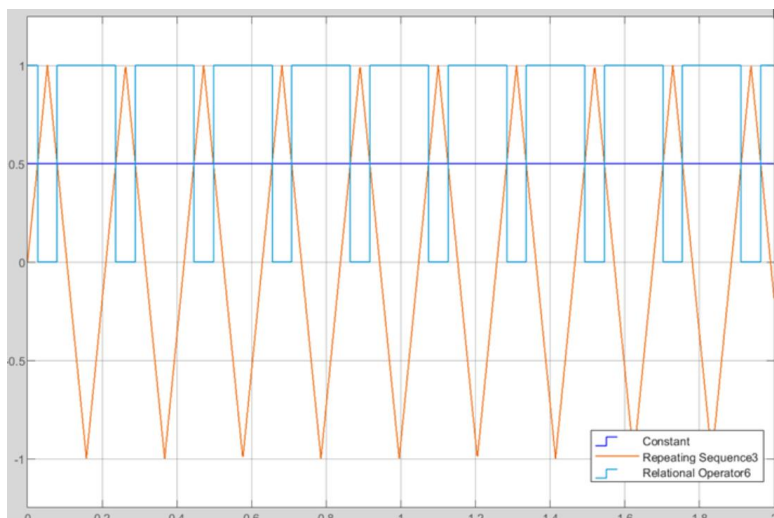
Obr. 18 Pulzně šířková modulace (Suboscilační modulace) [1]

Signál u_{2ref} , který je úměrný okamžité hodnotě žádaného napětí se porovnává s okamžitou hodnotou pilovitého nosného signálu. Kmitočet u_{nos} musí být vyšší než kmitočet referenčního napětí, a je dán spínací frekvencí použitých součástek. Přepnutí spínačů je určeno průsečíky obou signálů. Požadovaného průběhu výstupního napětí lze dosáhnout pomocí časové změny šířek impulzů – změna šířky signálu ovlivňuje dobu zapnutí tranzistoru a následně i velikost výstupního napětí. Za hlavní cíl každé modulační techniky považujeme získání takového poměrného výstupu, který má maximální základní složku s minimem harmonických.

Existují dvě hlavní implementační techniky PWM: technika průniku trojúhelníků a přímá digitální technika.

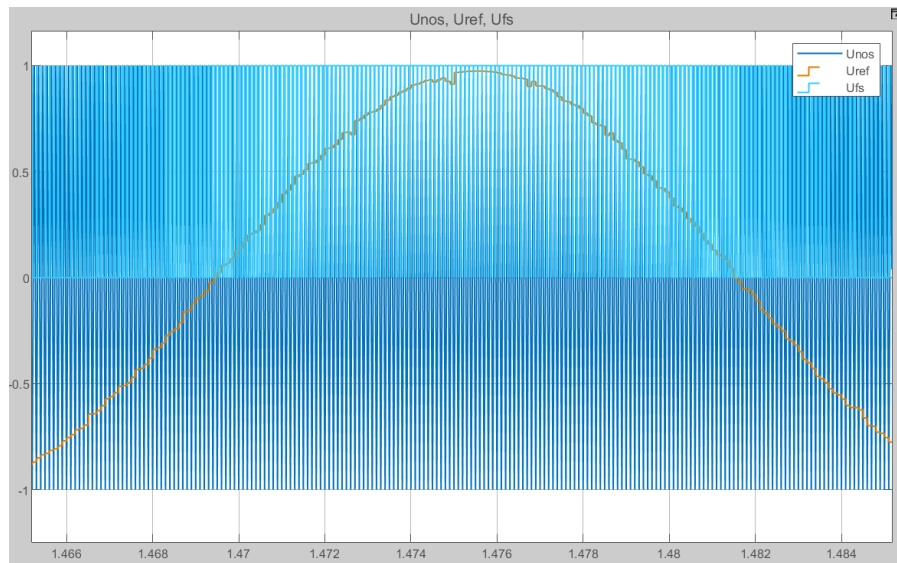
3.1 Technika trojúhelníkového průniku SPWM (Suboscilační modulace)

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších metod. Referenční modulární vlna neboli signál úměrný okamžité hodnotě žádaného napětí je porovnáván s trojúhelníkovou nosnou vlnou, tak aby se generovaly signály PWM. Průsečíky těchto dvou signálů definují okamžiky přepnutí spínače dané fáze.

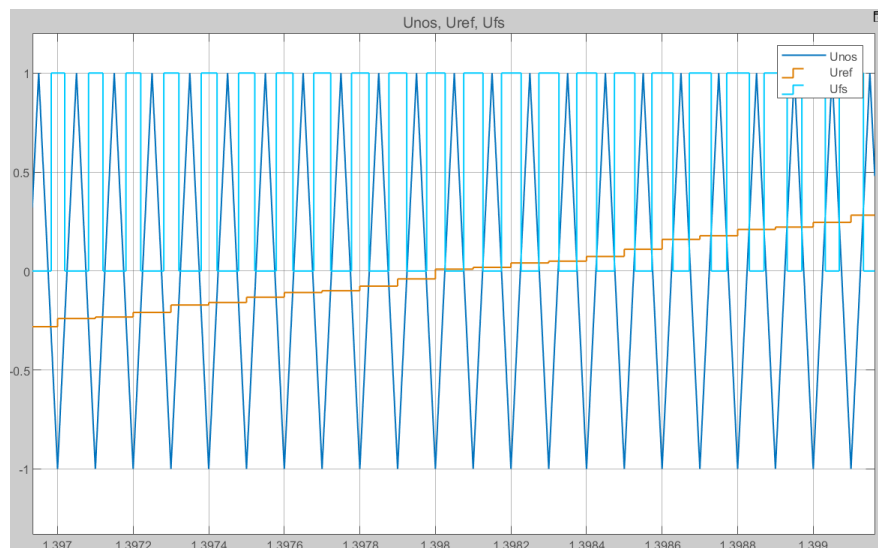


Obr. 19 Princip PWM pro DC signál

Výsledkem tohoto způsobu modelování pro sinusový vstupní signál jsou pulzy různé šířky a stejné amplitudy.



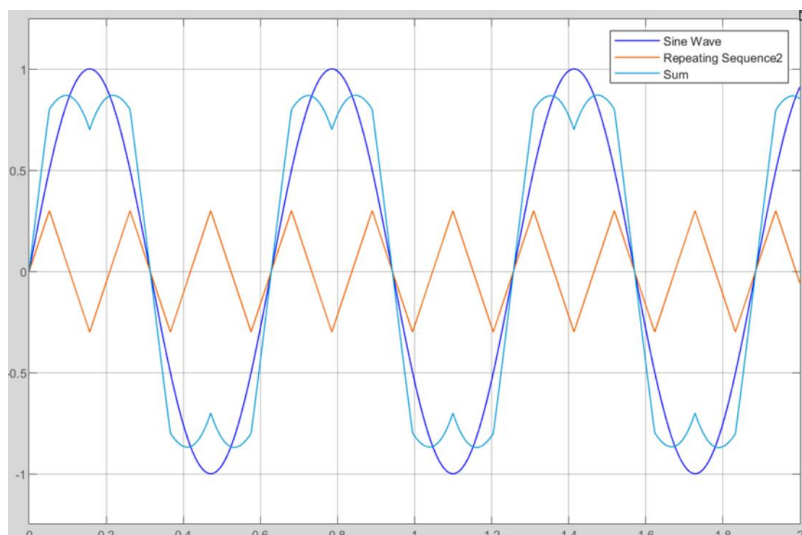
Obr. 20 Technika trojúhelníkového průniku, vstup a výstup modulátoru



Obr. 21 Technika trojúhelníkového průniku tvorba pulzů

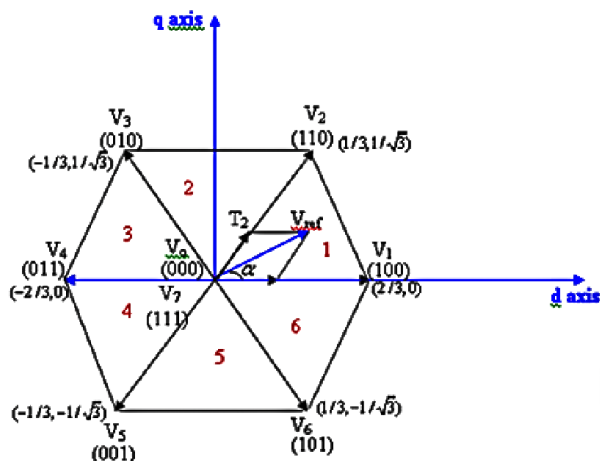
3.2 SVPWM Space Vector Pulse Width Modulation

Trend využívání prostorových vektorových PWM se stále zvětšuje, kvůli jejich snadnější digitální realizaci a lepšímu využití stejnosměrné sběrnice. Původně prostorová vektorová regulace byla vyvinuta jako vektorový přístup k pulzně šířkové modulaci pro třífázové měniče. SVPWM je jednou z běžných moderních metod pro řízení motorů, poskytuje vyšší napětí motoru s nižším celkovým harmonickým zkreslením výstupních napětí a/nebo proudů přiváděných do fází střídavého motoru, a tím zajišťuje efektivnější využití stejnosměrného vstupního napětí. Řízení pohonu při vektorové modulaci je vykonáváno v rotující referenční soustavě, a proto se dána metoda používá pro generování referenčního napětí.



Obr. 22 Modulační SVPWM

Napětí do motoru je přiváděno třífázovým měničem, který je složen ze šesti tranzistorů (tři horní a tři dolní tranzistory). Třífázová soustava generuje osm spínacích stavů, nebo základních prostorových, které jsou znázorněny na Obr. 23. Tyto stavy jsou vyneseny do hexagonálního hvězdného diagramu, kde každý vektor tvoří paprsek hvězdy s fázovým rozdílem 60 stupňů a dodávají zátěži energii. Dva poslední stavy jsou nulové vektory ve středu, které obsahují buď všechny kladné nebo záporné stavy a dodávají do zátěže nulové napětí.



Obr. 23 Základní přepínání, vektory a sektory [9]

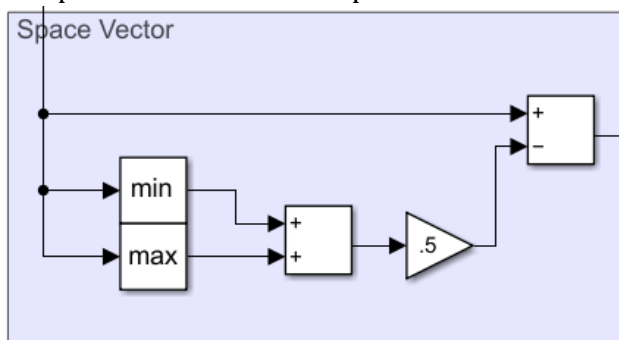
Hlavním cílem SVPWM je aproximace „středního vektoru“ během periody, který se bude rovnat požadovanému referenčnímu vektoru výstupního napětí. Referenční vektor představuje třífázové sinusové napětí. Základ SVPWM metody se spočívá v přepínání mezi dvěma nejbližšími aktivními vektory a nulovým vektorem. Optimálního harmonického výkonu a pevné spínací frekvence dosáhneme tím, že každý vektor musí změnit svou polohu pouze jednou za jednu spínací periodu. Výsledný prostorový vektor tvoří kruhovou trajektorii uvnitř šestiúhelníku, a proto poloměr největší vepsané kružnice je roven maximální velikosti výstupního napětí. Princip SVPWM spočívá ve využití prostorové vektorové reprezentace napětí v rovině „ α - β “.

Požadovaného průběhu vstupního napětí, který je znázorněn na Obr. 22 můžeme dosáhnout pomocí následujícího vztahu:

$$V = -\frac{1}{2} \{ \max(V_A^*, V_B^*, V_C^*) + \min(V_A^*, V_B^*, V_C^*) \} \quad (10)$$

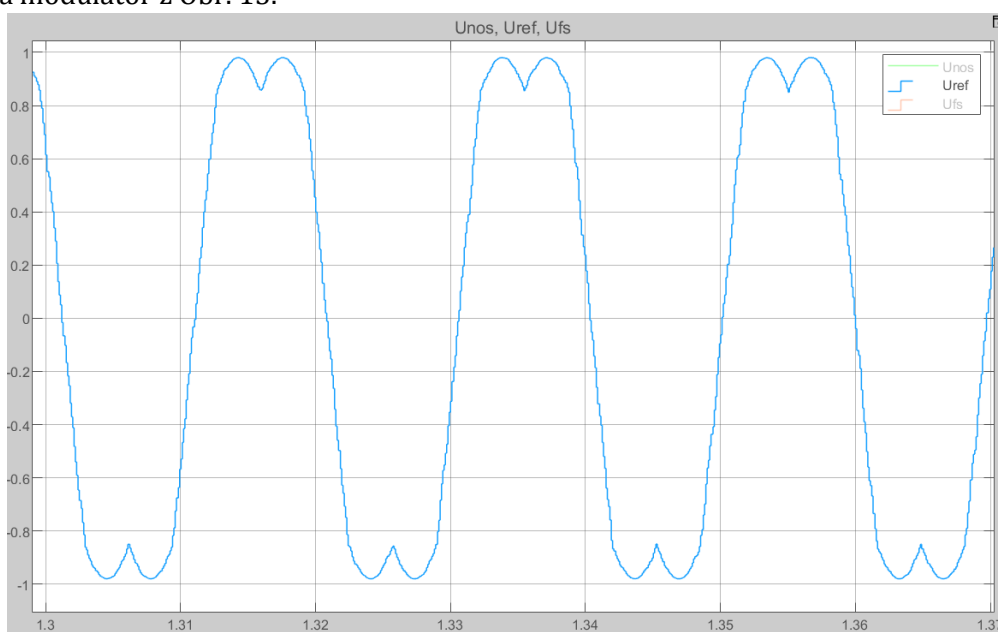
kde (V_A^*, V_B^*, V_C^*) jsou referenční fázová napětí jednotlivých fází

S využitím této rovnice můžeme v prostředí MATLAB Simulink sestavit potřebný model, který nám umožní dosáhnout požadovaného tvaru napětí.



Obr. 24 Model SVPWM v prostředí MATLAB Simulink

Do tohoto modelu vstupuje třífázové sinusové napětí z ovládacích částí u_{abc} , a výstup je napojen na modulátor z Obr. 15.



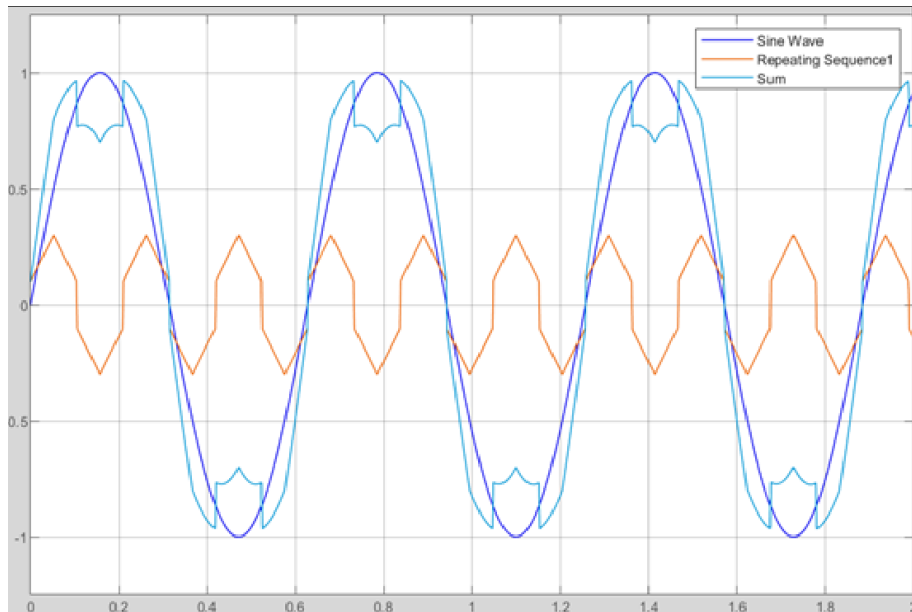
Obr. 25 Modulace napětí, metoda SVPWM

Tato metoda nám umožní dosáhnout větších hodnot napětí motoru, než dostáváme při Suboscilační metodě.

3.3 Vysoce přesná metoda DPWM

V této části budeme povídat o zobecněné metodě nespojitě pulzně-šířkové modulace, která má vynikající výkonnostní charakteristiky pro vysoký rozsah modulace. Daná metoda zahrnuje v sebe řadu modulátorů včetně metod DPWM0, DPWM1, DPWM2 a DPWM3.

DPWM neboli „Zobecněná diskontinuální modulace šířky pulzu“ je díky své výkonosti a přesnosti často používanou metodou. Například při vynaložené snaze lze docílit co nejmenších přepínacích ztrát, optimalizace kvality průběhu proudu nebo výkonosti v oblasti přemodulování pohonu měniče napětí se zdrojem PWM. Na rozdíl od konvenčního prostorového vektoru modulace šířky pulzu (CSVPWM) eliminuje přílišnou složitost této metody. DPWM metoda vzniká, když budeme implementovat SVPWM bez použití jednoho ze dvou nulových vektorů, a proto toto spínání nebude spojitě.



Obr. 26 Modulace DPWM3

Vycházející technikou pro DPWM je metoda PWM, která má několik typů, jako například tradiční PWM nebo sinusová PWM, respektive technika trojúhelníkového průsečíku (SPWM), avšak DPWM je z těchto metod nejvýkonnější. Další její výhodou je snadná implementace na digitálním signálovém procesoru (DSP) nebo mikroprocesoru, protože vyžaduje pouze operaci fázového posunu (otáčení) s několika porovnáními.

3.3.1 Princip

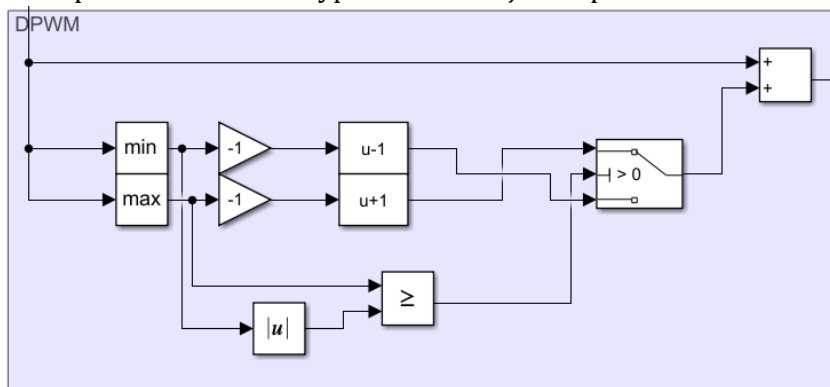
Princip této metody spočívá v manipulaci s aplikací nulového vektoru, kde v jedné spínací periodě zůstává jedna větev měniče během jednoho spínacího intervalu nedomulovaná. Proto přepínání probíhá ve dvou větvích: na kladnou nebo zápornou stejnosměrnou sběrnici. Počet spínání je díky tomu snížen na dvě třetiny.

Pro vytvoření modelu v prostředí MATLAB Simulink je potřeba vědět následující vztah:

$$V = \begin{cases} \frac{V_{DC(av)}}{2} - V_{max} & |V_{max}| \geq |V_{min}| \\ -\frac{V_{DC(av)}}{2} - V_{min} & |V_{max}| < |V_{min}| \end{cases} \quad (11)$$

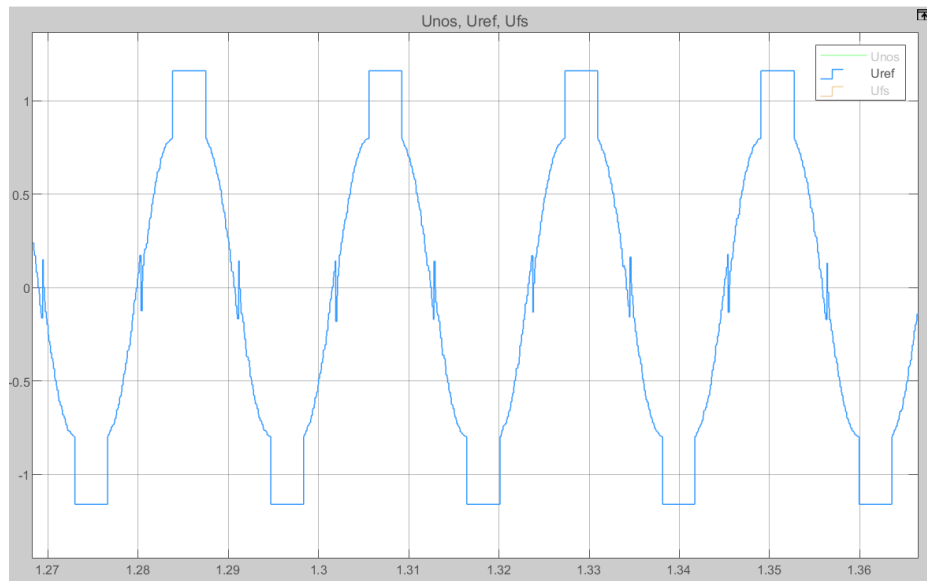
kde $V_{max} = \max(V_A^*, V_B^*, V_C^*)$ a $V_{min} = \min(V_A^*, V_B^*, V_C^*)$

Podle toho model pro DPWM1 bude vypadat následujícím způsobem



Obr. 27 Model DPWM1 v prostředí MATLAB Simulink

Stejně jako u SVPWM je na vstupu třífázové sinusové napětí u_{abc} , a výstup je napojen na modulátor.



Obr. 28 Modulace napětí, metoda DPWM1

KAPITOLA 4: SIMULACE

Praktickým úkolem této práce bylo prozkoumat modulační strategii asynchronního motoru při vektorovém řízení. Proto byl navržen model vektorové regulace v prostředí MATLAB Simulink.

4.1 Parametry jednotlivých komponentů

V simulaci modelu vektorové regulace byl použit třífázový asynchronní motor s následujícími parametry:

Tab. 2 Parametry motoru

Jmenovitý výkon	P (kW)	12
Jmenovité napětí	U_n (V)	380
Jmenovitý proud	I_n (A)	22
Frekvence	f (Hz)	50
Počet pólových dvojíc	p_p (-)	2
Statorový odpor	R_1 (Ω)	0,25
Rotorový odpor	R_2 (Ω)	0,14
Indukčnost vinutí statoru	L_1 (mH)	84,77
Indukčnost vinutí rotoru	L_2 (mH)	84,77
Vzájemná indukčnost	L_m (mH)	82,5

V ovládací části modelu se nachází čtyři PI regulátory:

Tab. 3 Parametry PI regulátorů

Regulátor	psiD	iD	omega	iQ
Proporcionální člen	350	25	25	75
Integrační člen	250	45	5	125

Dál zaznamenáme parametry stejnosměrné části, která je napojená na střídač:

Tab. 4 Parametry DC částí

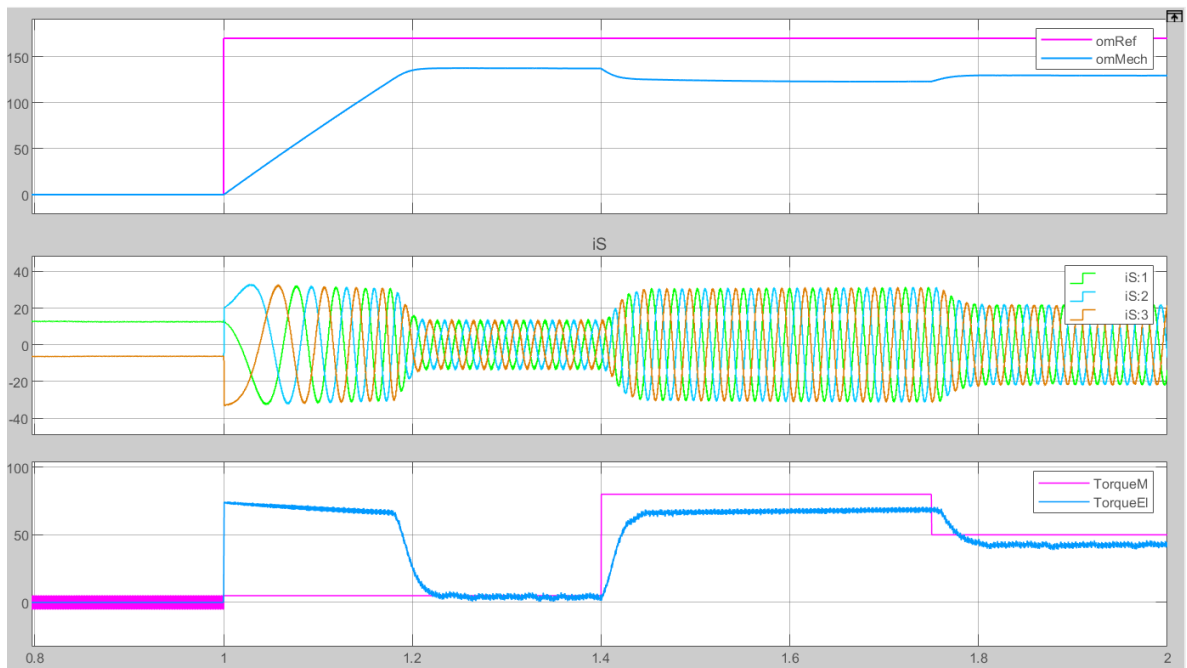
Napájecí zdroj	U_{dc} (V)	560
Cívka	L (mH)	10
Kondenzátor	C (mF)	10
Solver configuration		
Consistency tolerance	1e-6	
Solver type	Trapezoidal Rule	
Sample time	2e-6	
Filtering time	0,001	

Jako výpočetní metoda byla použita metoda Runge-Kutta, a velikost kroku odpovídala 1e-6.

4.2 Výsledky simulace

Posoudit a porovnat výkon jednotlivých metod můžeme na základě chování určitých veličin motoru, takových jako:

- Mechanická rychlost otáčení rotoru
- Statorové proudy
- Elektrický moment



Obr. 29 Chování motoru při Suboscilační metodě

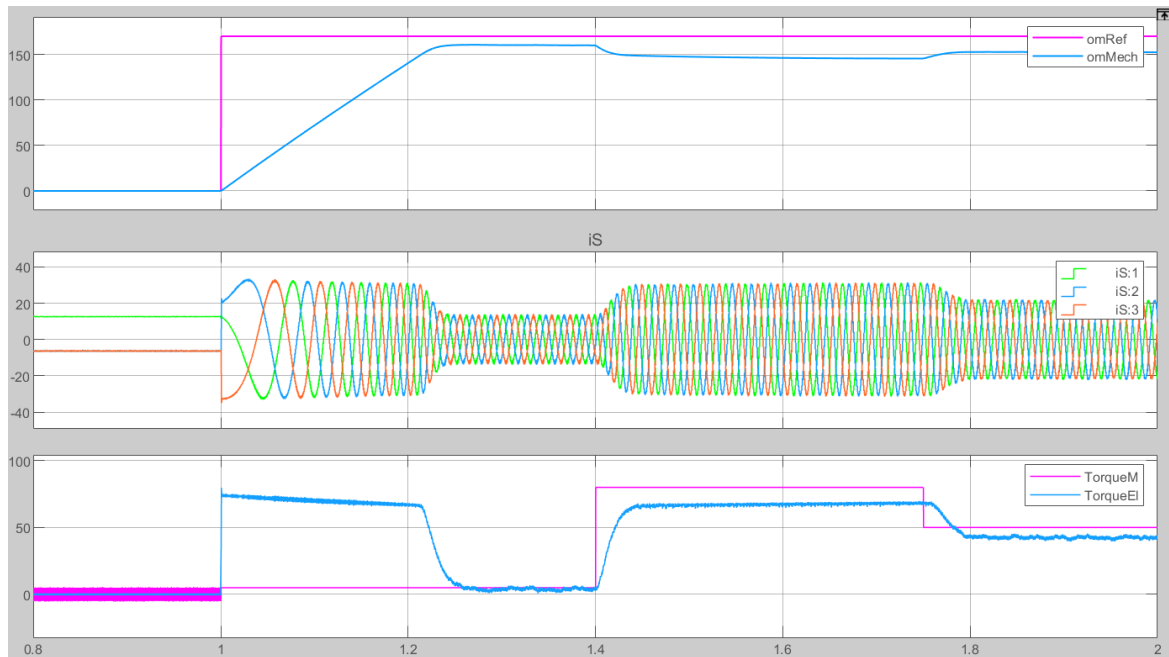
Na Obr. 29 jsou znázorněny tři grafy udávající rychlost, proud a moment motoru. V následujících odstavcích je definován jejich podrobnější popis.

Před rozběhem je potřeba motor nabudit. Z tohoto důvodu je nárůst všech veličin opožděn.

Na prvním grafu můžeme sledovat chování otáček motoru. Růžovou barvou (omRef) je značena požadovaná hodnota, kterou se otáčivá rychlost „omMech“ snaží dosáhnout. Z průběhu vidíme, že se motoru nepovedlo roztočit na žádané otáčky, kvůli nedostatečné velikosti napájecího napětí.

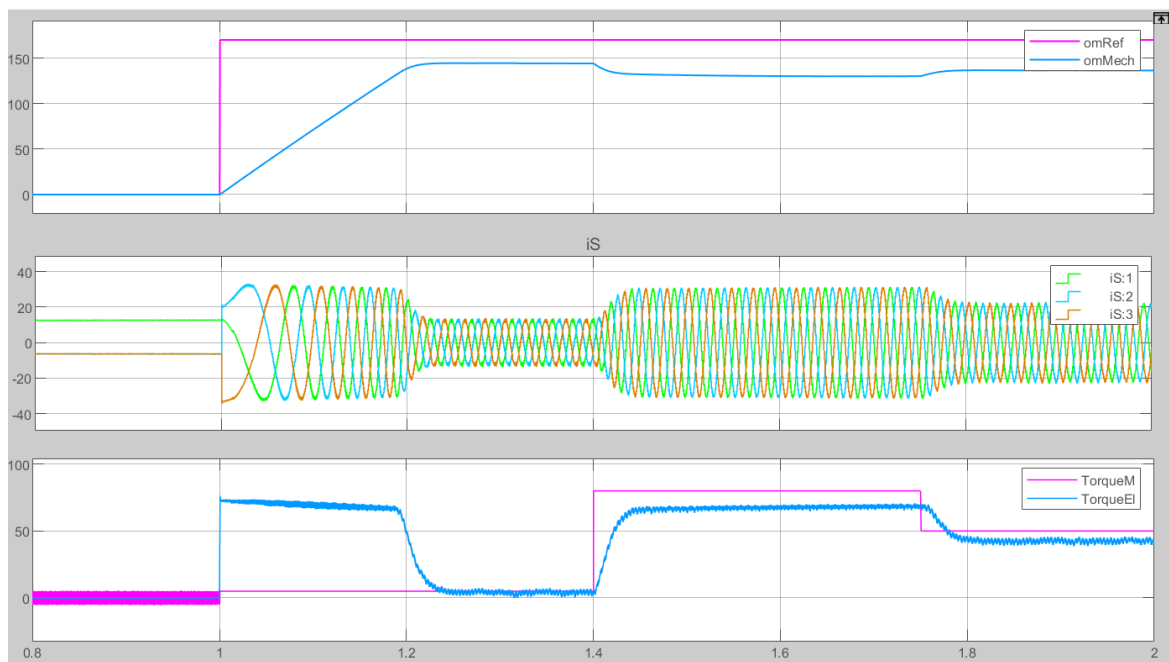
Druhý graf znázorňuje chování statorových proudů. Je vidět, že při rozběhu motoru jejich amplituda dosahuje maximálních hodnot. Po ustálení nárustu otáček velikosti proudů poklesnou a zůstanou na konstantní hodnotě.

Na posledním grafu je vykreslen průběh momentu motoru. Pomocí „TorqueM“ lze zadat hodnotu, kterou je potřeba dosáhnout. Při rozběhu je požadovaný moment minimální, a proto se po ustálení rychlostí „TorqueEL“ blíží nule. V čase 1.4 skokově zvětšíme „TorqueM“, moment motoru vzroste, ale požadované veličiny nedosáhne, protože tato hodnota je větší než maximální moment stroje. Nakonec snížíme požadovaný moment a tím tak i elektrický, abychom mohli ověřit správnou reakci motoru na požadavek poklesu.



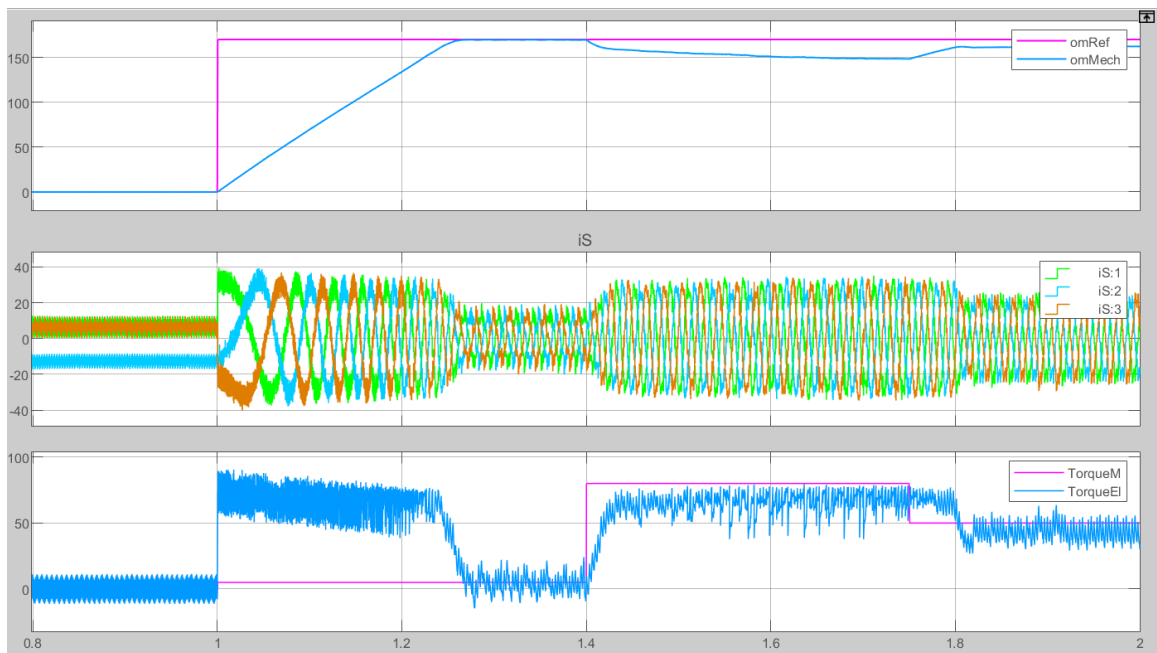
Obr. 30 Chování motoru při SVPWM

Zapojením prostorových vektorů dosáhneme vyšších hodnot výkonu. Motoru se skoro povede roztočit na požadované otáčky, průběhy proudů a momentu zůstávají podobné SPWM metodě.



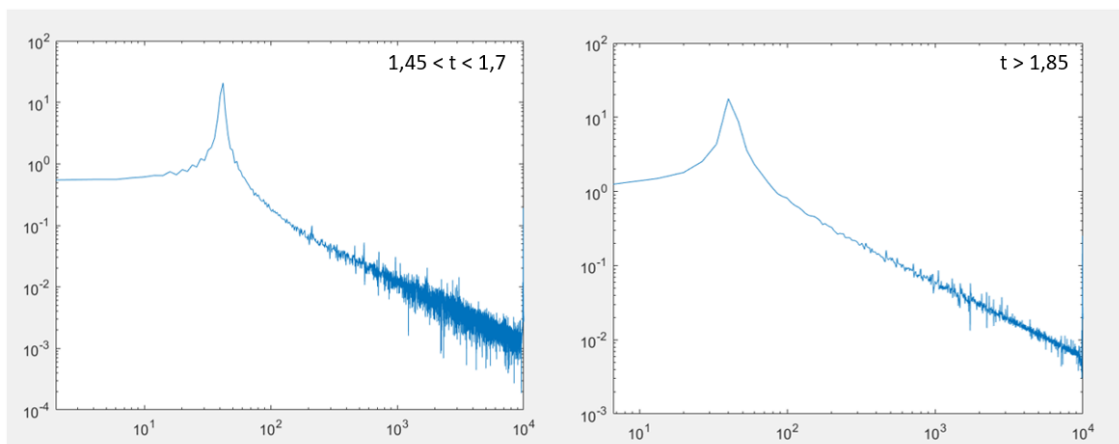
Obr. 31 Chování motoru při DPWM1

Simulace obdélíkového řízení v Sinulink je náročná, a proto je v této práci použita pouze ukázková verze. Dosáhneme toho zvětšením vstupního sinusového napětí modulátoru SPWM 10⁶krát. Jenom při této metodě se motor roztočí na požadované otáčky, což potvrzuje její největší účinnost.

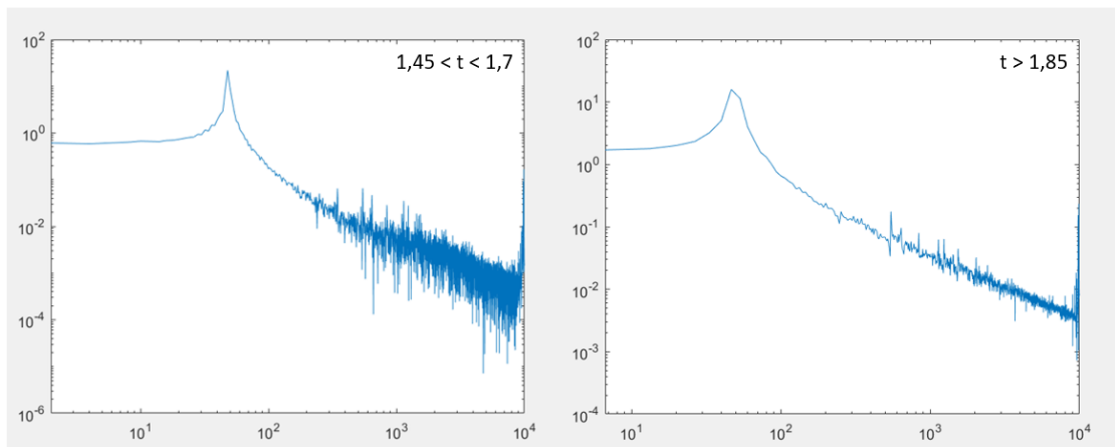


Obr. 32 Chování motoru při Obdélníkovém řízení

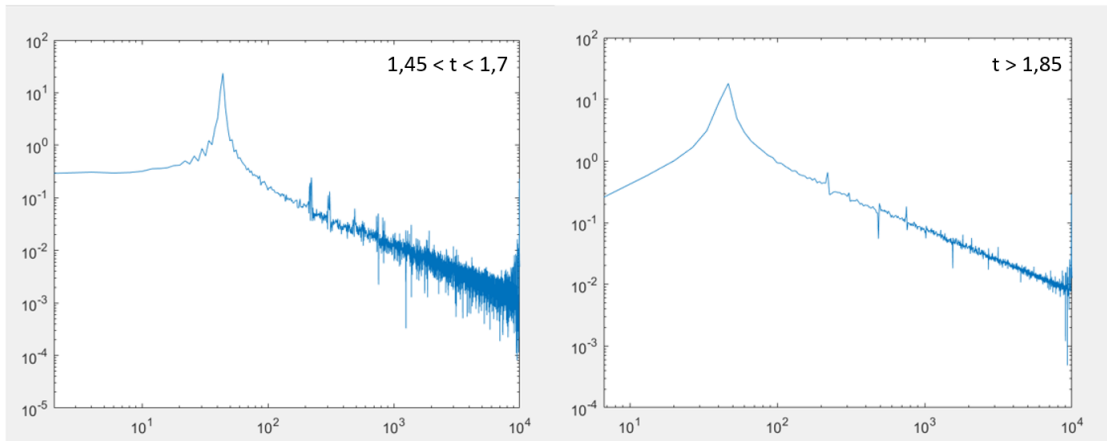
V další části aplikujeme Fourierovu transformaci na každou ze čtyřech metod. Zvolíme dva úsečky s maximálním ($1,45 < t < 1,7$) a sníženým ($t > 1,85$) momentem.



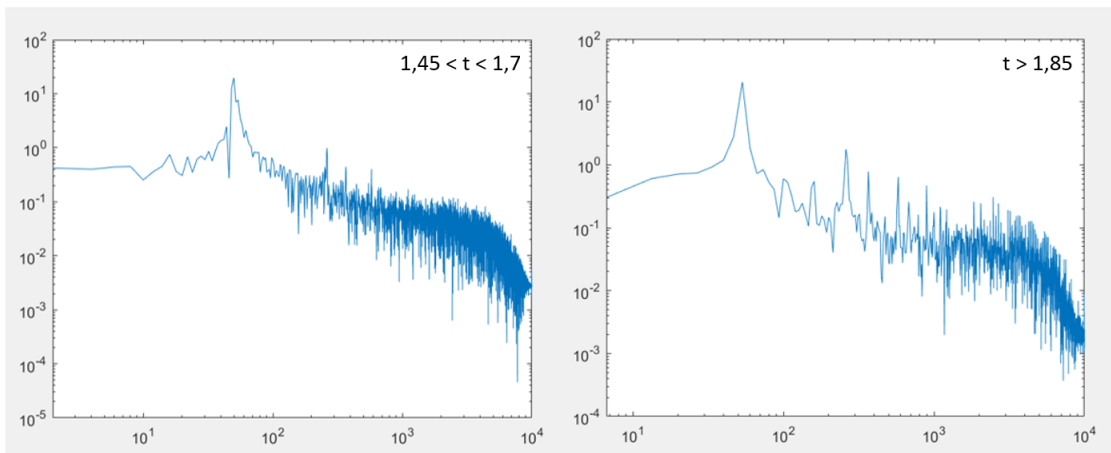
Obr. 33 Aplikace Fourierovy transformace na SPWM



Obr. 34 Aplikace Fourierovy transformace na SVPWM



Obr. 35 Aplikace Fourierovy transformace na DPWM



Obr. 36 Aplikace Fourierovy transformace na Obdélníkové řízení

Díky Fourierovy transformaci můžeme pozorovat měnící se počet vyšších harmonických na základě vybrané metody. Tyto frekvence mohou mít vliv na výkon a provoz asynchronního motoru. Například mohou způsobit zvýšené ztráty v magnetických jádrech motoru. To může vést ke zvýšenému zahřívání a snížení účinnosti. Ztráty ve vodičích jsou také ovlivněné těmito frekvencemi, například jevem jako skin efekt, který způsobuje koncentraci proudu na povrchu vodiče. Vyšší harmonické frekvence mají tendenci proudit povrchem vodičů, což vede ke zvýšeným ztrátám. Navíc vyšší frekvence způsobují zvýšené vibrační a zvukové účinky, které mohou ovlivnit výkon chladicího systému motoru.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zkoumat a porovnat tři modulační strategie – SPWM, SVPWM a DPWM – pro asynchronní motor s vektorovým řízením. K dosažení tohoto cíle byla vytvořena simulace v prostředí Simulink, která umožnila analyzovat chování motoru a porovnat výstupní signály při použití jednotlivých strategií.

Na základě provedených simulací a analýzy získaných výsledků můžeme zdůraznit metodu SVPWM, která dosahuje nejlepších výsledků v oblasti účinnosti a dynamické odezvy. Tato strategie umožňuje dosáhnout vysoké kvality výstupního signálu a efektivního využití energetických zdrojů.

SPWM je běžně používanou modulační strategií, která je relativně jednoduchá a snadno implementovatelná. Při porovnání s SVPWM je však pozorováno vyšší harmonické zkreslení a nižší účinnost.

DPWM je strategie, která se zaměřuje na minimalizaci přepínacích ztrát výkonového měniče. I když dosahuje nízkých přepínacích ztrát, vykazuje vyšší harmonické zkreslení a nižší účinnost vůči předchozím.

Obdélníkové řízení, zatímco není tak rozšířené jako modulační strategie založené na pulzech, je jednoduché a přímočaré. Poskytuje přijatelnou účinnost a je vhodné pro některé jednoduché aplikace. Nicméně vykazuje větší harmonické zkreslení a nižší dynamickou odezvu ve srovnání s jinými strategiemi.

Na základě těchto závěrů lze doporučit, že volba modulační strategie pro asynchronní motor s vektorovým řízením by měla být zvážena s ohledem na konkrétní požadavky a požadované výstupní charakteristiky aplikace. SVPWM je vhodnou volbou pro aplikace, které vyžadují vysokou kvalitu výstupního signálu a efektivní využití energie. SPWM je vhodným kompromisem mezi jednoduchostí implementace a výkonností. Je nezastupitelná pro aplikace, které kladou důraz na sinusoidální výstupní signál a nízké harmonické zkreslení. DPWM a obdélníkové řízení mohou být použity v jednodušších aplikacích, které nevyžadují vysokou účinnost a mají menší požadavky na kvalitu výstupního signálu.

Pro další výzkum a rozvoj modulačních strategií pro asynchronní motory s vektorovým řízením je možné se zaměřit na optimalizaci jednotlivých strategií s ohledem na specifické parametry motoru a aplikace. Dále je také možné zkoumat jiné modulační strategie a jejich vliv na chování motoru.

LITERATURA

- [1] Pavel Koblík, Jiří Pavelka: Elektrické pohony a jejich řízení, Praha 2016
- [2] Jiří Javůrek: Regulace moderních elektrických pohonů, Praha 2003
- [3] Jens Weidauer, Richard Messer: Electrical Drives, Erlangen 2014
- [4] A high-performance generalized discontinuous PWM algorithm | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. *301 Moved Permanently*. © Copyright 2023 IEEE Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/720446?casa_token=ZMBBvbyYCakAAAA:s7hYjGPe4PVUq0MjP2rjnqOyhRbQVmiJGfLigwX0ZPLfx4ZHRvRzwbF8RGg3MhZvATQJx-uwvAY
- [5] Bc. Tomáš Havlíček: Diplomová práce – Návrh výstupních filtrů napěťového střídače o výkonu 100kW až 0,5MW, 2018
- [6] Bc. Jan Turek: Diplomová práce – Analýza a návrh frekvenčně řízeného pohonu pro pohyb gumárenských kalandrů
- [7] Úplné náhradní schéma asynchronního motoru, fázorový diagram | Maturitka. *Maturitka / studijní materiály* [online]. Copyright © 2021 Maturitka [cit. 26.05.2023]. Dostupné z: <https://www.maturitka.cz/es-ustni-12.php>
- [8] *studijní materiály elektro* [online]. Copyright © [cit. 26.05.2023]. Dostupné z: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2016/04/T2-asynchronní-stroj.pdf>
- [9] *ResearchGate | Find and share research* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Space-Vector-Representation-Steps-involved-in-implementing-the-space-vector-PWM-is-given_fig3_336362151
- [10] Bc. Ondřej Lipčák: Diplomová práce – Vektorové řízení asynchronního motoru pomocí DSP, 2018