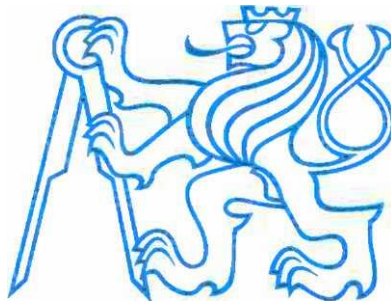


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**K13115 - Katedra Elektroenergetiky**



**Návrh a konstrukce soft startéru pro asynchronní  
motory do 5kW**

**Diplomová práce**

**Bc. František Kroupa  
Praha 2016**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **František Kroupa**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Návrh a konstrukce soft startéru pro asynchronní motory do 5KW**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši problematiky rozběhů asynchronních motorů malých výkonů.
2. Zvolte vhodnou topologii měniče pro rozběh asynchronního motoru.
3. Definujte požadavky na měnič.
4. Na základě požadavků definovaných v bodě 3. proveďte návrh HW a SW části měniče.
5. Funkčnost navrženého zařízení ověřte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Lettl J., Čeřovský Z., Pavelka J. – Výkonová elektronika, skripta ČVUT FEL
- [2] Rashid, M. H.: Power Electronics; Prentice Hall 1992
- [3] PAVELKA, Jiří; ZDĚNEK, Jiří. Elektrické pohony a jejich řízení. 1. vyd., Praha, ČVUT, 2010.

Vedoucí: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016

## **Prohlášení**

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

V Praze dne: 15.5.2016

.....

podpis

## **Poděkování**

Na úvod bych chtěl vyjádřit poděkování vedoucímu své diplomové práce Ing., Janu Bauerovi., Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky, ochotu a vstřícnost při vedení během její tvorby.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko a především návrhem a konstrukcí zařízení Soft startér, pomocí kterého jsou tyto rozběhy realizovány. Cílem práce bylo navrhnout a realizovat levné zařízení z běžně dostupných komponent pro rozběh pohonů instalovaných v malých domovních jednotkách tepelných čerpadel.

Samotný návrh se dělí na čtyři úrovně, a to 1) stanovení požadavků na zařízení, 2) návrh topologie zapojení soft startéru, 3) návrh výkonové části, volba aktivních a pasivních prvků a jejich dimenzování, 4) návrh řídicí části, algoritmy řízení, časování a měření potřebných veličin. Zařízení soft startér bylo zkonstruováno a úspěšně otestováno.

**Klíčová slova:** pohon, třífázový měnič napětí, fázové řízení, tepelné čerpadlo

## Abstract

This thesis deals with the starting of induction squirrel-cage motors and mainly with the design and construction of "Soft starter" which carries out the starting of the motor. The aim of the thesis was to design and implement an inexpensive device from readily available components for starting of drives installed in small residential heat pumps.

The design itself is divided into four levels, namely 1) determination of the requirements for device, 2) design of "soft starter" topology diagram, 3) design of power section, the choice of active and passive components and dimensioning, and 4) design of control part, control algorithms, timing and measuring of the required parameters. Soft starter has been constructed and successfully tested.

**Keywords:** drive, three-phase voltage changer, phase-control, heat pump

# OBSAH

Seznam zkratk a symbolů.....	8
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2. PROBLEMATIKA SPOUŠTĚNÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....</b>	<b>11</b>
2.1    Rozběh asynchronního motoru s kotvou nakrátko.....	14
2.2    Způsoby spouštění ASM s kotvou nakrátko .....	16
2.2.1    Přímé připojení na síť.....	16
2.2.2    Spouštění pomocí frekvenčního měniče .....	17
2.2.3    Spouštění pomocí sníženého napájecího napětí .....	18
<b>3. POŽADAVKY NA ZAŘÍZENÍ SOFTSTARTÉR .....</b>	<b>30</b>
3.1.    Požadavky nutné .....	30
3.2.    Požadavky zvolené .....	31
<b>4. NÁVRH TOPOLOGIE ZAPOJENÍ .....</b>	<b>31</b>
<b>5. NÁVRH ZAŘÍZENÍ SILNOPROUDÁ ČÁST .....</b>	<b>34</b>
5.1.    Určení mezních stavů .....	34
5.2.    Výběr výkonového polovodičového spínače.....	35
5.3.    Výběr vyřazovacího relé .....	36
5.4.    Návrh jištění .....	37
5.5.    Návrh odlehčovacího členu triaku .....	39
5.6.    Návrh budícího obvodu triaku .....	40
5.7.    Obvod synchronizace .....	43
5.8.    Obvod detekce točivosti připojené soustavy .....	44
5.9.    Návrh chladiče.....	45
5.10.    Měření proudu.....	50
5.11.    Měření napětí .....	52
5.12.    Návrh napájení ovládání.....	54
5.13.    Umístnění a připojení silové části.....	57
5.14.    Celkové schéma silové části softstartéru .....	59
<b>6. ŘÍDÍCÍ ČÁST .....</b>	<b>60</b>
6.1    Hlavní program.....	62
6.1.1    Vizualizace.....	63
6.1.2    Start/Stop.....	64

6.1.3	Rozběh/Doběh .....	64
6.2	Asynchronní události.....	69
6.2.1	Synchronizace, časování .....	69
6.2.2	AD převod .....	71
6.3	Celkové schéma řídicí části softstartéru .....	73
<b>7.</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA REÁLNÉM POHONU.....</b>	<b>74</b>
<b>8.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>77</b>
<b>9.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>78</b>
<b>10.</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH NA CD.....</b>	<b>79</b>

## Seznam zkratek a symbolů

<b>SS</b>	Soft Startér	
<b>AM</b>	Asynchronní motor	
<b>TMN</b>	Třífázový měnič napětí	
<b>AT</b>	Autotransformátor	
<b>AC</b>	Střídavý průběh	
<b>DC</b>	Stejnoseměrný průběh	
<b>Y</b>	Zapojení do hvězdy	
<b><math>\Delta</math></b>	Zapojení do trojúhelníku	
<b><math>B_s</math></b>	Magnetická indukce statoru	(T)
<b>c</b>	Měrná tepelná kapacita	(J/kgK)
<b><math>\hat{C}_1</math></b>	Komplexní činitel rozptylu	
<b><math>\cos \varphi_k</math></b>	Účinnost ve stavu nakrátko	
<b><math>\cos \varphi_j</math></b>	Účinnost pro stav jmenovitých hodnot	
<b><math>\varphi_k</math></b>	Fázový posun ve stavu nakrátko	(rad)
<b><math>\varphi_j</math></b>	Fázový posun jmenovitý	(rad)
<b>f</b>	Frekvence	(Hz)
<b><math>f_s</math></b>	Frekvence synchronní	(Hz)
<b><math>f_r</math></b>	Frekvence rotoru	(Hz)
<b><math>f_m</math></b>	Frekvence měniče	(Hz)
<b><math>I^2t</math></b>	Joulův integrál	(A <sup>2</sup> s)
<b><math>I_n</math></b>	Jmenovitý proud	(A)
<b><math>I_k</math></b>	Proud nakrátko	(A)
<b><math>I_r</math></b>	Proud rotoru	(A)
<b><math>I_f</math></b>	Proud fázový	(A)
<b><math>I_F</math></b>	Proud propustný DC	(A)
<b><math>I_s</math></b>	Proud sdružený	(A)
<b><math>I_{fj}</math></b>	Proud fázový jmenovitý	(A)
<b><math>I_m</math></b>	Proud motoru obecně	(A)
<b><math>I_{fr}</math></b>	Rozběhový proud	(A)
<b><math>I_{rms}</math></b>	Maximální souvislý proud DC	(A)
<b><math>I_{tms}</math></b>	Maximální opakovatelný proud DC	(A)
<b><math>I_{gt}</math></b>	Proud gate triaku DC	(A)
<b><math>I_{gm}</math></b>	Maximální proud gate triaku	(A)
<b><math>I_{dps(av)}</math></b>	Střední dovolená hodnota proudu	(A)
<b><math>I_{ofst}</math></b>	Proudový ofset DC	(A)
<b><math>I_1</math></b>	Proud statoru	(A)
<b><math>\hat{I}_1</math></b>	Proud statoru přepočítaný	(A)
<b><math>\hat{I}_2</math></b>	Proud rotoru přepočítaný	(A)
<b><math>I_2</math></b>	Proud rotoru	(A)
<b><math>J_r</math></b>	Moment setrvačnosti rotoru	(kg·m <sup>2</sup> )
<b><math>J_z</math></b>	Moment setrvačnosti připojeného zařízení	(kg·m <sup>2</sup> )
<b><math>K_i</math></b>	Proudová konstanta	(A/mV)



$K_u$	Napěťová konstanta	(V/mV)
$K_{ad}$	Konstanta AD převodníku	(mV/dig.)
$L_{1n}$	Rozptylová indukčnost statoru	(H)
$L_{2n}$	Rozptylová indukčnost rotoru	(H)
$M_i$	Moment vnitřní	(Nm)
$M_z$	Moment zátěže	(Nm)
$M_r$	Moment rozběhový	(Nm)
$M_m$	Moment motoru	(Nm)
$n_s$	Otáčky synchronní	( $\text{min}^{-1}$ )
$n_j$	Otáčky jmenovité	( $\text{min}^{-1}$ )
$p$	Počet pólových nástavců	
$P_{im}$	Elektromechanický výkon	(W)
$P_{el}$	Elektrický výkon	(W)
$P_{\check{c}}$	Činný výkon	(W)
$P_z$	Zdánlivý výkon	(VA)
$P_{cm}$	Maximální kapacitní výkon	(W)
$P_{T(av)}$	Střední disipovaný výkon	(W)
$r_d$	Dynamický odpor	( $\Omega$ )
$R_{th(j-c)}$	Tepelný odpor přechod- pouzdro	(K/W)
$R_{th(c-ch)}$	Tepelný odpor pouzdro - chladič	(K/W)
$R_{th(ch-a)}$	Tepelný odpor chladič - okolí	(K/W)
$s$	Skluz	
$\tau_{rc}$	Časová konstanta	(s)
$T_j$	Teplota přechodu PN	( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{jmax}$	Maximální teplota přechodu PN	( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{ch}$	Teplota chladiče	( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_a$	Teplota okolí	( $^{\circ}\text{C}$ )
$U_f$	Napětí fázové	(V)
$U_F$	Napětí v propustném směru DC	(V)
$U_s$	Napětí sdružené	(V)
$U_{Smef}$	Maximální efektivní hodnota sdruženého napětí	(V)
$U_{Smax}$	Maximální okamžitá hodnota sdruženého napětí	(V)
$U_{fmax}$	Maximální okamžitá hodnota fázového napětí	(V)
$U_{drm}$	Maximální závěrné napětí DC	(V)
$U_n$	Jmenovité napětí	(V)
$U_{T0}$	Úbytek napětí v propustném směru DC	(V)
$U_{br}$	Průrazné napětí DC	(V)
$U_{ofs}$	Napěťový offset DC	(V)
$\omega_{sm}$	Úhlová mechanická rychlost synchronní	( $\text{rad s}^{-1}$ )
$\omega_m$	Úhlová mechanická rychlost	( $\text{rad s}^{-1}$ )
$Z$	Impedance	( $\Omega$ )
$Z_k$	Impedance nakrátko	( $\Omega$ )
$\Delta T$	Dovolené oteplení vodiče	( $^{\circ}\text{C}$ )

# 1. ÚVOD

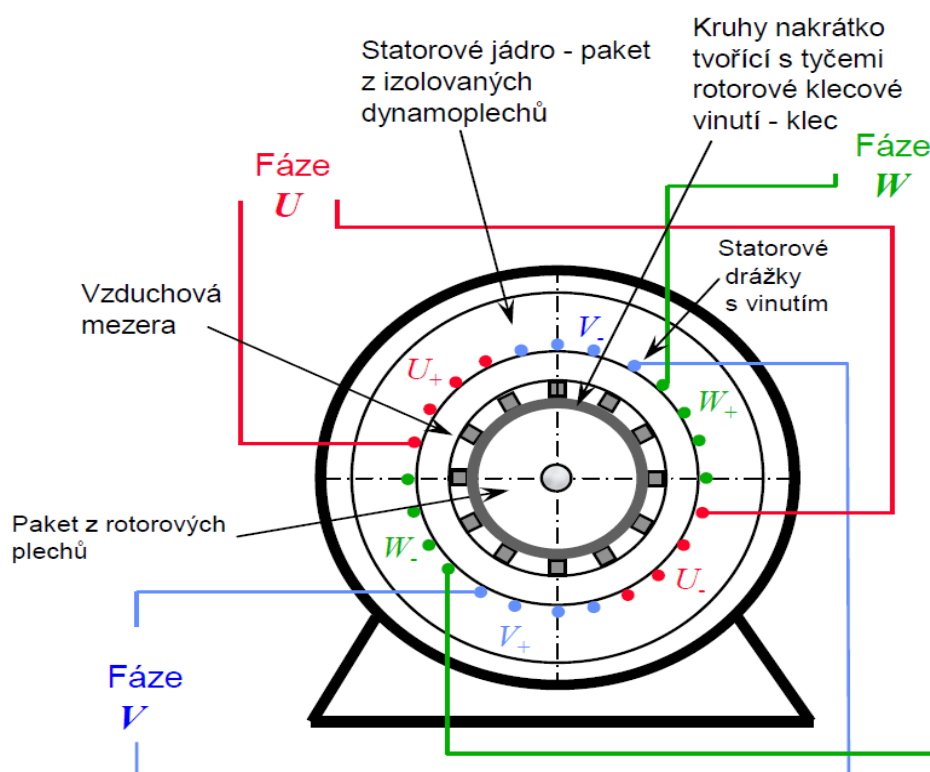
Asynchronní motor je dnes nejrozšířenějším elektrickým strojem vůbec. Celosvětově je jeho zastoupení kolem **90** % z celkově instalovaných pohonů. Asynchronní motor je nejčastěji používán pro svou jednoduchost, nenáročnost na údržbu, poměrně dobrou provozní spolehlivost a pro malou pořizovací cenu. K jeho rozšíření hlavně přispívá všeobecně používaný třífázový rozvod elektrických sítí. K hlavním nevýhodám asynchronních motorů patří vysoká produkce jalové induktivní energie a to hlavně v provozním stavu motoru naprázdno. Další nevýhodou je obtížná regulace otáček a velký proudový ráz při spouštění [4].

V této práci se budu zabývat problematikou spouštění asynchronních motorů a to především s kotvou nakrátko. A pak dále návrhem, konstrukcí výkonové a řídicí části zařízení softstartér, pomocí kterého lze realizovat „měkký“ start těchto motorů. Tento návrh bude určen pro motory instalované v malých domovních jednotkách tepelných čerpadel. Kde jsou speciální požadavky na způsoby spouštění a monitoring, viz. kapitola Požadavky na zařízení.

## 2. PROBLEMATIKA SPOUŠTĚNÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

Asynchronní motor s kotvou nakrátko je indukční stroj skládající se z pevného statoru a pohyblivého rotoru. Stator je tvořen u jednoho pólu párového stroje ze třech vinutí vůči sobě mechanicky i elektricky posunutých o  $120^\circ$  uložených v drážkách magneticky vodivého materiálu. Rotor se skládá z rotorového vinutí, které je nejčastěji tvořeno klecí z tyčí, mědi nebo hliníku, případně mosazi, které jsou spojeny po obou stranách zkratovacími kruhy shodného materiálu. Funkce motoru spočívá ve vytvoření točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře, které je buzeno trojfázovým vinutím statoru s otáčkami  $n_s$ [8].

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ (min}^{-1}\text{)} \quad (2.1)$$



Obr 1 - Koncepte asynchronního motoru s kotvou nakrátko [8]

Rotující elektromagnetické pole indukuje ve vodičích rotorového vinutí nakrátko napětí a toto napětí vyvolává proud, který svojí interakcí s magnetickým polem statoru vytváří tažnou sílu motoru.

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}_s \cdot \mathbf{I}_r \cdot \mathbf{l} \cdot \sin\varphi \text{ (N)} \quad (2.2)$$

Když se rotor otáčí stejnou úhlovou rychlostí, jako má elektromagnetické pole statoru, jsou jím indukované napětí, proud a moment rovny nule. Proto k vytvoření momentu musí mít rotor asynchronního motoru rychlost menší než je rychlost synchronní. Motor ke své činnosti potřebuje stále určitý rozdíl rychlosti rotoru vůči rychlosti synchronní. Tento poměrný pokles otáček se nazývá skluz a je výsledkem rovnováhy momentu motoru proti momentu hnaného zařízení [8].

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.3)$$

Frekvence indukovaného napětí a proudu v rotoru je:

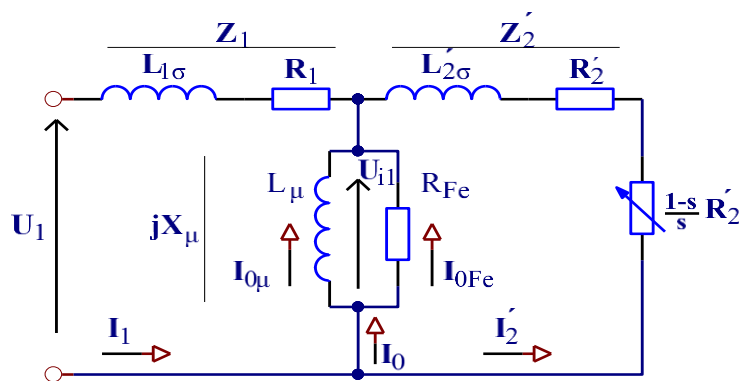
$$f_r = s \cdot f_s \text{ (Hz)} \quad (2.4)$$

Uvedu zde pouze pro formu bez odvození základní přepočítané napěťové rovnice na stranu statoru a náhradní schéma.

$$\widehat{U}_1 = \mathbf{R}_1 \cdot \widehat{I}_1 + j\mathbf{X}_{1\sigma} \cdot \widehat{I}_1 + \widehat{U}_{i1} \quad (2.5)$$

$$\widehat{U}'_{i2} = \frac{\mathbf{R}'_2}{s} \cdot \widehat{I}'_2 + j\mathbf{X}'_{2\sigma} \cdot \widehat{I}'_2 \quad (2.6)$$

$$\frac{\mathbf{R}'_2}{s} = \mathbf{R}'_2 + \frac{1-s}{s} \cdot \mathbf{R}'_2 \quad (2.7)$$



Obr 2 - Náhradní schéma AM T- článek [9]

Proměňovaný elektromechanický výkon trojfázového stoje je dán vztahem:

$$P_{im} = 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot (\mathbf{R}'_2 \cdot I_2'^2 - U_2' \cdot I_2') \quad (2.8)$$

**Vnitřní elektromechanický moment:**

$$M_i = \frac{P_{im}}{\omega_m} = \frac{1}{\omega_{sm} \cdot (1 - s)} \cdot \frac{1 - s}{s} \cdot P_{el} = \frac{1}{\omega_{sm}} \cdot \frac{P_{el}}{s} \quad (2.9)$$

$\omega_{sm}$  - úhlová rychlost mechanická synchronní

$\omega_m$  - úhlová rychlost mechanická

$P_{im}$  - přeměňovaný elektromechanický výkon

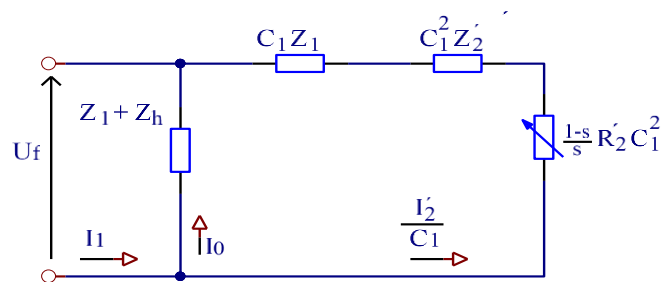
$P_{el}$  - elektrický výkon v sekundárním obvodu AS

$$\omega_m = \omega_{sm} \cdot (1 - s) \quad (2.10)$$

$$M_i = \frac{3}{\omega_{sm}} \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2 \quad (2.11)$$

Pro jednoduší stanovení obvodových veličin transformujeme **P** článek na **Γ** článek pomocí komplexního činitele rozptylu [8].:

$$C_1 = \frac{|Z_{1h}|}{|jX_h|} \cdot e^{j\gamma_1} = C_1 \cdot e^{j\gamma_1} \quad (2.12)$$



**Obr 3 - Náhradní schéma AM  $\Gamma$  – článek [9]**

Na základě náhradního schématu lze vyjádřit přepočítanou hodnotu rotorového proudu  $I_2'$  na stranu statoru a při zanedbání magnetizačního proudu a ztrát v železe, také proud statorový  $I_1$  [8].

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + C_1 \cdot R_2'/s)^2 + (X_{1\sigma} + C_1 \cdot X_{2\sigma}')^2}} \approx I_1 \quad (2.13)$$

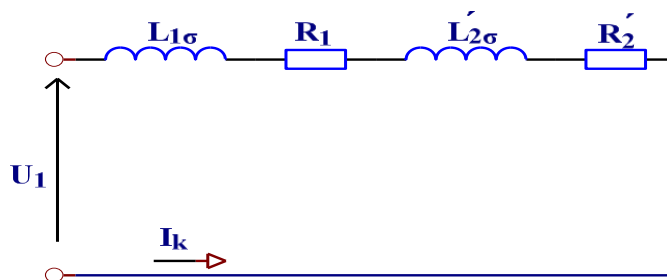
Dosazením do rovnice elektromechanického momentu dostáváme:

$$M_i = \frac{3}{\omega_{sm}} \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot \frac{U_1^2}{(R_1 + C_1 \cdot R_2'/s)^2 + (X_{1\sigma} + C_1 \cdot X_{2\sigma}')^2} \quad (2.14)$$

## 2.1 Rozběh asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Spouštění motorů je činnost potřebná k rozběhu stroje. Jedná se o proces, kdy se motor s klidového stavu rozbíhá na dané jmenovité otáčky. V okamžiku připojení na síť se asynchronní motor chová podobně jako transformátor nakrátko. Na rozdíl od transformátoru, kde se jedná o poruchový stav, u motoru jde o jeden z provozních stavů. V tomto okamžiku protéká statorovým vinutím motoru záběrný proud omezený pouze podélnou impedancí (nakrátko). Záběrný proud malých motorů do **10 kW** přímo připojených na síť se pohybuje kolem **6 ÷ 7** násobku jmenovitého proudu. V porovnání s transformátorem jsou tyto hodnoty asi o **25%** menší a to z důvodu méně těsné magnetické vazby dané především velikostí vzduchové mezery a šířkou drážek statoru a rotoru. Veličiny reprezentující tu to vazbu jsou rozptylové indukčnosti statorového  $X_{1\sigma}$  a rotorového vinutí  $X_{2\sigma}'$ .

Náhradní schéma asynchronního motoru ve stavu nakrátko:



Obr 4 - Stav nakrátko AM [9]

$$Z_k = R_1 + R_2' + X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \quad (2.15)$$

$$I_k = \frac{U_1}{Z_k} \quad (2.16)$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'}{R_1 + R_2'} \quad (2.17)$$

Níže uvedené vztahy zhruba odpovídají pro malé motory do 10 kW

$$I_k = (6 \div 7) \cdot I_n \quad (2.18)$$

$$M_r = (1.5 \div 2) \cdot M_n \quad (2.19)$$

$$\cos\varphi_k = (0.55 \div 0.65) \quad (2.20)$$

Pro rozběh AM platí vztah:

$$M_i = M_z + (J_r + J_z) \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.21)$$

$M_z$  - Moment zátěže

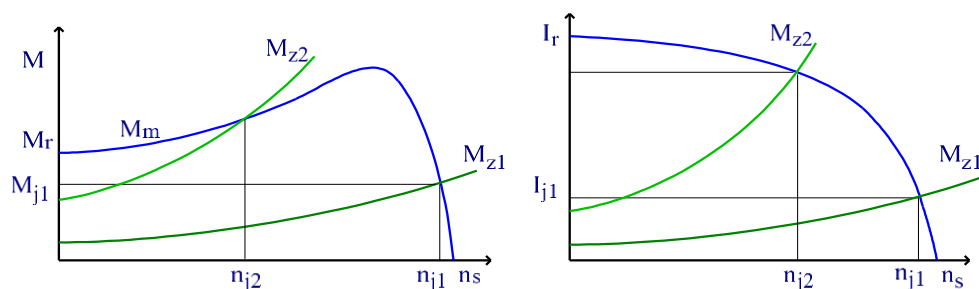
$J_r$  - Moment setrvačnosti rotoru

$J_z$  - Moment setrvačnosti připojeného zařízení

$\omega_m$  - Mechanická úhlová rychlost

Pro stabilní rozběh motoru na jmenovité otáčky musí být splněná podmínka podle rovnice (2.21), kdy moment motoru musí nabývat větších hodnot než moment zátěžný po dobu dosáhnutí pracovní oblasti jmenovitých otáček.

Obrázek momentové charakteristiky AM:



Obr 5 - Momentová a proudová charakteristika AM [zdroj: vlastní zpracování]

Z výše uvedených vztahů vyplývají důležité závěry. Rozběhový proud je přímo úměrný velikosti připojeného napětí. Moment motoru je úměrný druhé mocnině připojeného napětí.

$$M_r = \frac{3}{\omega_{sm}} \cdot R_2' \cdot \frac{U_1^2}{(R_1 + R_2')^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} \quad (2.22)$$

$$I_m \approx U_1 ; M_m \approx U_1^2$$

## 2.2 Způsoby spouštění AM s kotvou nakrátko

Připojování asynchronních motorů s kotvou nakrátko na síť se dá realizovat třemi způsoby.

- Přímé připojení na síť
- Pomocí frekvenčního měniče (u/f řízení)
- Pomocí sníženého napájecího napětí (rozběh Y / D, autotransformátor, 3f měničem napětí)

### 2.2.1 Přímé připojení na síť

Jedná se o jednu z nejběžnějších metod spouštění ve veřejných, tak v průmyslových aplikacích. Tento způsob spouštění je ve veřejných sítích nn limitován spouštěcím výkonem **22 kVA**. To zhruba odpovídá činnému výkonu motoru **3 kW**. V průmyslových aplikacích je přímé spouštění omezeno na hodnotu výkonu motoru vzhledem k výkonu napájecího



transformátoru. Hodnota výkonu motoru by neměla být vyšší než **50%** hodnoty napájecího transformátoru. Tímto způsobem spouštění nelze omezit velký záběrný proud, který jak bylo zmíněno, dosahuje hodnot 6 až 7 násobku proudu jmenovitého. V první periodě 20ms je tato proudová hodnota až 9 násobkem hodnoty jmenovité. Je to způsobeno prvotním nabitím vnitřních kapacit motoru. Odebíraný proud neklesá lineárně s rostoucími otáčkami. Ještě ve **2/3** jmenovitých otáček je proudová hodnota kolem **80%** proudu záběrného.

U přímého připojení na síť nás zajímá jak hodnota záběrného proudu, doba rozběhu s ohledem na jištění a nastavení nadproudových ochran, tak hodnota záběrného momentu. Tato hodnota někdy bývá několika násobě větší než hodnota zátěžná. A to způsobuje velké mechanické rázy, které mohou podstatně snížit životnost nejen připojovaného zařízení, tak i samotného motoru. Ta to metoda spouštění je někdy jediným možným způsobem, pokud potřebujeme rozběh s plným zatížením.

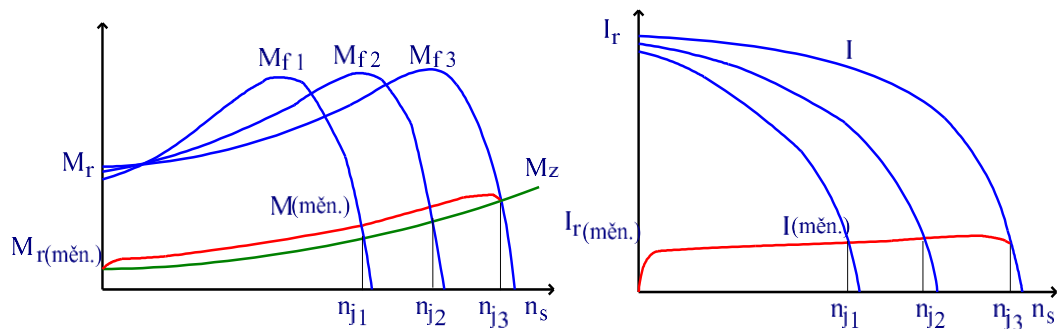
Realizace přímého připojení k síti:

- Pomocí trojpólového spínače
- Pomocí stykače při dálkovém ovládní s kombinací nadproudového relé
- Pomocí motorového spouštěče (kombinace jističe a nadproudového relé)

### 2.2.2 Spouštění pomocí frekvenčního měniče

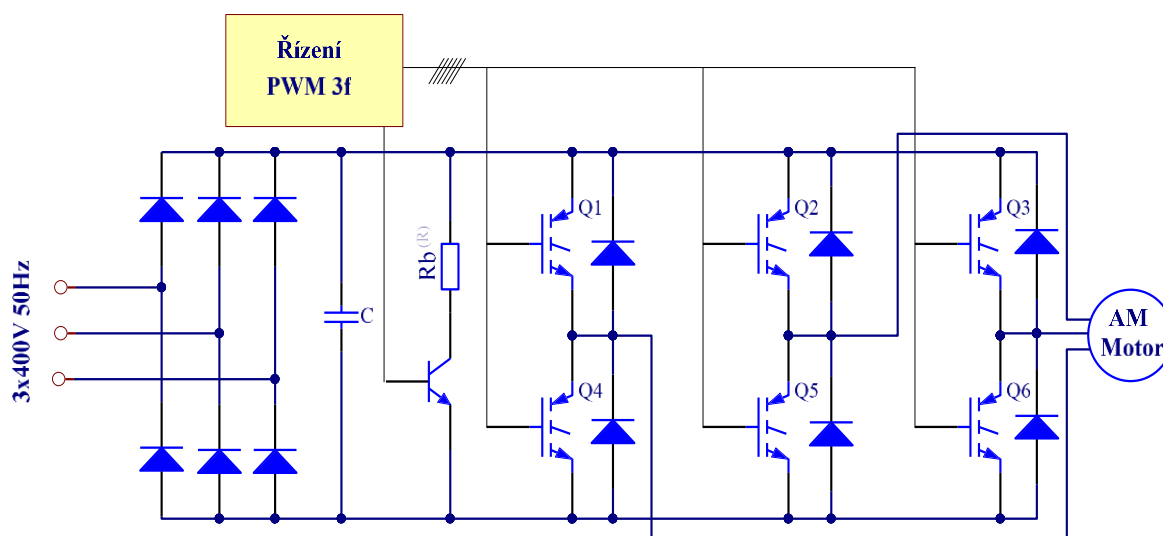
Motor je napájen ze střídače proměnné frekvence, a proto může měnit otáčky motoru  $n = 60 \cdot f_m / p$ . Musí být zajištěn poměr mezi generovaným napětím a frekvencí z důvodu zamezení proudového a magnetického přetěžování motoru  $U/f = \text{Konst.}$

Motor je v praxi rozbíhán střídačem od frekvence napětí  $0.1f_s$  do frekvence synchronní  $f_s$ . Pokud růst frekvence a napětí bude sledovat otáčky motoru nebo bude zajištěn minimální přesah, bude motor při rozběhu na všech otáčkách v pracovní části momentové charakteristiky. Motor bude zatěžován minimálním proudem. V opačném případě se motor dostane na momentové charakteristice za bod zvratu a bude se rozbíhat jako při frekvenčně neřízeném rozběhu s daleko větším proudem. Momentová a proudová charakteristika motoru připojeného na frekvenční měnič.



Obr 6 - Momentová a proudová charakteristika s připojeným měničem frekvence [zdroj: vlastní zpracování]

Frekvenční spouštění je spouštění, které zaručuje nejvyšší momenty při nejnižších proudech. Jedná se o nejlepší možnou volbu v problematice rozběhů. Masové nasazení je problematické z důvodu značné složitosti a hlavně ceny zařízení, která může být několikanásobně vyšší než cena samotného pohonu.



Obr 7 - Třífázový měnič frekvence [zdroj: vlastní zpracování]

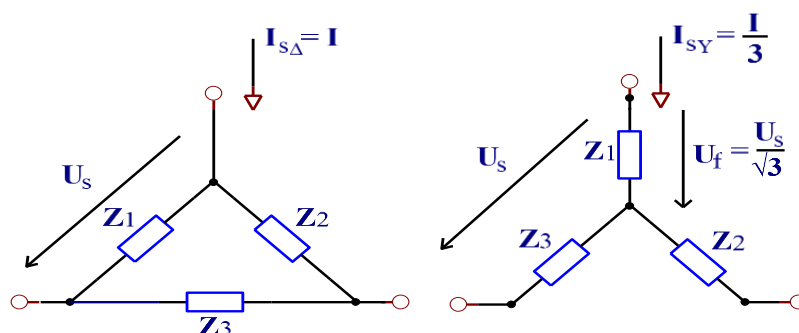
### 2.2.3 Spouštění pomocí sníženého napájecího napětí

Rozběhy asynchronních motorů se sníženým napětím jsou vhodné pro aplikace s nízkým zátěžným momentem, jako aplikace pro čerpadla, ventilátory a kompresory. U těchto aplikací roste zátěžný moment lineárně nebo kvadraticky s otáčky.

### 2.2.3.1 Rozběh hvězda trojúhelník

Realizuje se rozběhem motoru zapojeného do Y a po dosažení klidových otáček dojde k přepnutí v zapojení do  $\Delta$ . Jedná se o rozběh s trvale sníženým napětím do cca. 80% otáček jmenovitých při zapojení do trojúhelníka. Dá se realizovat u motorů pouze s vyvedenými konci vinutí a pro napájecí síť **3x400 V** musí být jeho štítkové hodnoty pro zapojení do **Y – 690 V** a  **$\Delta$  – 400 V** jsou to přípojitelná sdružená napětí při kterých má motor štítkový jmenovitý výkon.

Rozborem obvodového zapojení hvězda, trojúhelník zjistíme, že na impedanci  $Z_1$  v zapojení do Y je v porovnání zapojení do  $\Delta$  napětí:



Obr 8 - Zapojení Y /  $\Delta$  [zdroj: vlastní zpracování]

Fázové napětí na impedanci  $Z_1$  v zapojení Y:

$$U_{Z1} = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = U_f \quad (2.23)$$

Vyjádření impedance  $Z_1$  v zapojení  $\Delta$ :

$$Z_1 = \frac{U_s \cdot \sqrt{3}}{I_{S\Delta}} \quad (2.24)$$

Vyjádření impedance  $Z_1$  v zapojení  $\Delta$ :

$$Z_1 = \frac{U_s \cdot \sqrt{3}}{I_{S\Delta}} \quad (2.25)$$

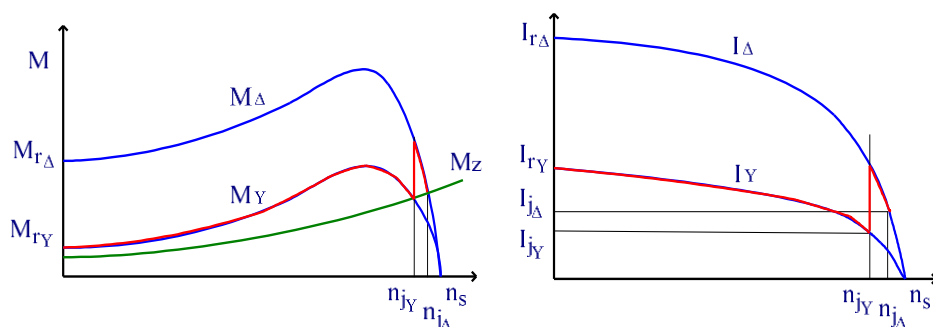
Proud soustavou v zapojení do Y:

$$I_{sY} = \frac{U_f}{Z_1} = \frac{U_s \cdot I_{S\Delta}}{U_s \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{3}} = \frac{I_{S\Delta}}{3} \quad (2.26)$$

Moment motoru v zapojení do Y:

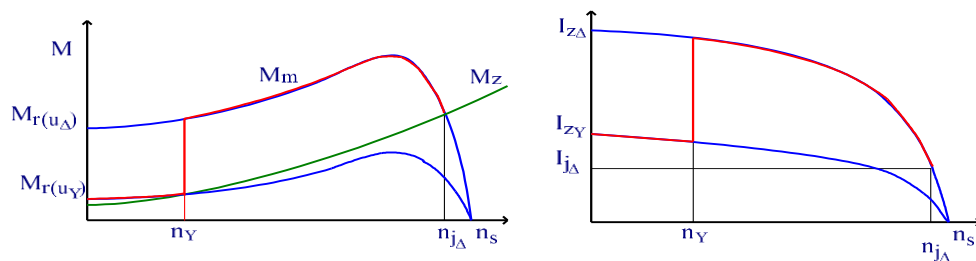
$$\mathbf{M}_{rY} = \frac{\mathbf{M}_{r\Delta}}{3} \quad (2.27)$$

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že záběrný moment a proud motoru v zapojení do Y bude třetinový oproti zapojení do  $\Delta$ . Nevýhodou tohoto způsobu rozběhu, kromě relativně nízkého záběrného momentu je okamžik přepnutí do  $\Delta$ . Přepnutí způsobí jak proudový tak i momentový ráz obrázek 9.



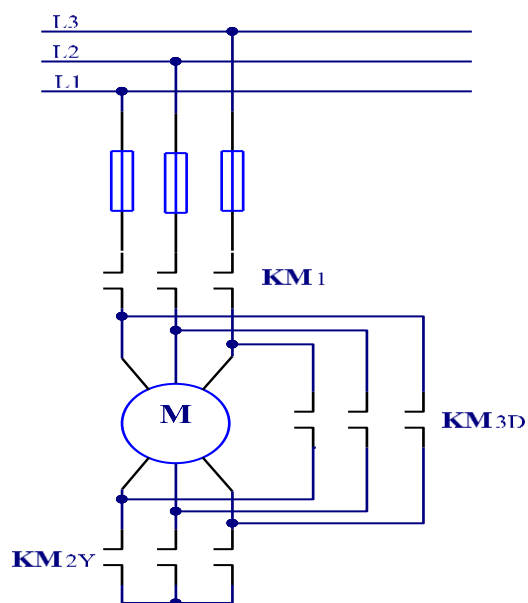
Obr 9 - Momentová a proudová charakteristika pro rozběh Y/D [zdroj: vlastní zpracování]

Další nevýhodou je možnost ustálení se otáček v labilní části momentové charakteristiky dané větším zátěžným momentem. Pak by se tento způsob spouštění minul účinkem a přepnutí do zapojení  $\Delta$  způsobilo téměř stejný proudový ráz jako u přímého připojení na síť. Na obrázku 10 je zobrazena proudová a momentová charakteristika takového případu.



Obr 10 - Momentová a proudová charakteristika pro rozběh Y/D mimo pracovní oblast [zdroj: vlastní zpracování]

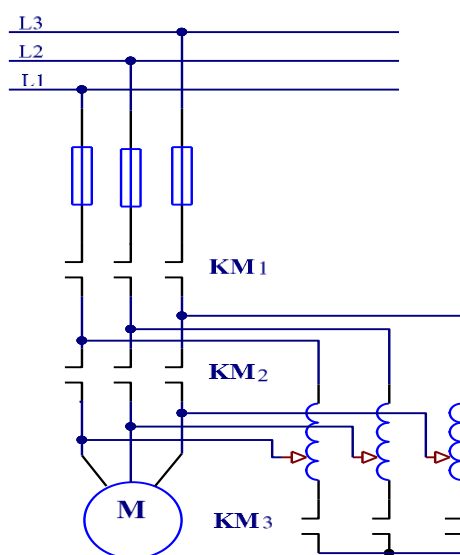
Realizace připojení AM motoru pro rozběh  $Y/\Delta$ :



Obr 11 - Realizace přepínače  $Y/\Delta$  [zdroj: vlastní zpracování]

### 2.2.3.2 Rozběh pomocí autotransformátoru

Rozběh se obvykle realizuje pomocí hodnot startovacího napětí  $(0.5 \div 0.7)U_n$ . Tomu musí odpovídat poloha odbočky na autotransformátoru. Na obrázku 12 je realizace takového spouštění.



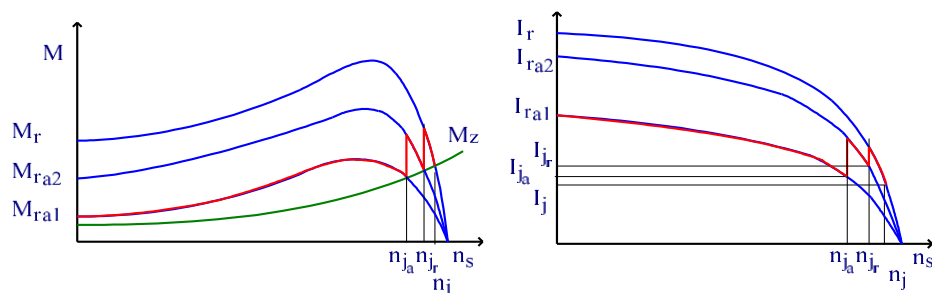
Obr 12 - Realizace rozběhu s autotransfátorem [zdroj: vlastní zpracování]

Pořadí kroků správného rozběhu:

- Sepne stykač **KM<sub>3</sub>** vytvoření nulového bodu na autotransfornátoru.
- Sepne stykač **KM<sub>1</sub>** připojí se motor na snížené napětí přes odbočku autotransfornátoru a dojde k rozběhu.
- Rozepne stykač **KM<sub>3</sub>** po skončení rozběhu z důvodu snížení proudového rázu. Motor je tak připojen přes reaktanci vstupní části autotransfornátoru
- Sepne stykač **KM<sub>2</sub>** dojde k vyřazení autotransfornátoru a motor je připojen na síťové napětí.

Výhodou tohoto zapojení je možnost volby startovacího napětí pro rozběh volbou požadované odbočky na autotransfornátoru. A při znalosti charakteru mechanické zátěže lze zvolit optimální podmínky pro rozběh. Další výhodou oproti rozběhu **Y/Δ** je zmírnění proudového rázu při přepnutí z nižší hladiny na plné síťové napětí, přidání mezikroku vložení samotné reaktance autotransfornátoru do obvodu a následné její úplné vyřazení.

V případě volby  $U_r = 0.5 \cdot U_n$  bude rozběhový proud  $I_{ra} = 0.5 \cdot I_k$  a záběrný moment  $M_{ra} = M_z/4$

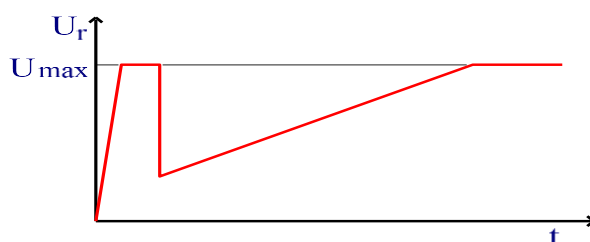


Obr 13 - Momentová a proudová charakteristika pro rozběh s AT [zdroj: vlastní zpracování]

### 2.2.3.3 Rozběh pomocí třífázového měniče

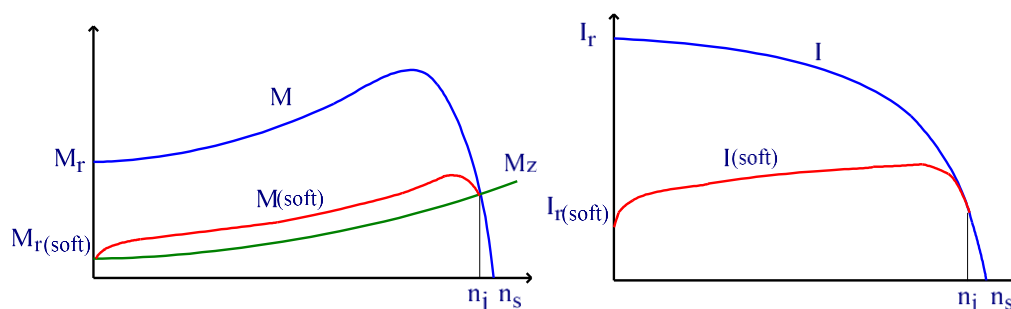
Jedná se o rozběh s téměř spojitým zvyšováním napětí na svorkách motoru na rozdíl od rozběhu **Y/Δ**, kde napětí bylo trvale sníženo. Tím to postupným zvyšováním napětí se motor dostává na stále vyšší hodnoty momentové charakteristiky, až dosáhne jmenovité

hodnoty. Tento způsob rozběhu je výhodnější oproti trvale sníženému napětí, vzhledem k vyššímu zátěžnému momentu, který by mohl způsobit jako v předchozích případech spouštění, ustálení otáček na labilní části momentové charakteristiky před bodem zvratu. Další možností pro připojené zátěže s velkým zátěžným momentem je aplikace funkce „Kikstart“. Princip spočívá v plném otevření polovodičových ventilů po dobu několika desítek period síťového kmitočtu, tím dojde k takzvanému utržení pohonu s klidu s plným záběrným momentem. Dále následuje skokový návrat na hodnotu startovacího napětí a následuje řízený nárůst napětí na výstupu.



Obr 14 - Průběh napětí na výstupu SS [zdroj: vlastní zpracování]

Momentová a proudová charakteristika při vhodně zvoleném času rozběhu je zobrazena na obrázku 15.

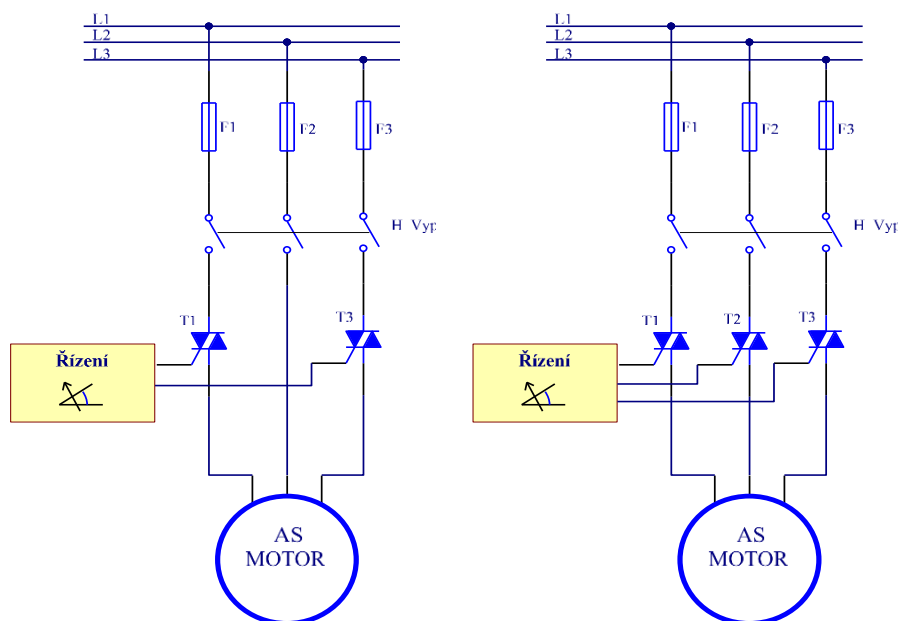


Obr 15 - Momentová a proudová charakteristika pro rozběh se SS [zdroj: vlastní zpracování]

To to spojitě zvyšování napětí je nejčastěji realizováno třífázovým měničem napětí, který je osazen polovodičovými ventily (tyristory, triaky). Nejrozšířenějším způsobem zapojení je plné třífázové a nebo dvoufázové řízení. Vzhledem k dnešním cenám polovodičových součástek se upřednostňuje plné třífázové řízení. Výhodou třífázového řízení oproti dvoufázovému je ne úplně 'tvrdé' připojení jedné z neřízených fází k motoru v době klidového stavu. V tom to stavu je jinak motor stále pod napětím a to přes poměrně vysokou impedanci tyristorů ve vypnutém stavu. Pro to se do napájecího obvodu nejčastěji zařazuje

vypínač nebo stykač, který zajistí galvanické rozeptnutí od připojené sítě. Důvodem je možnost servisu případně práce na elektrickém zařízení napájeném soft startérem.

Příklady zapojení třífázových měničů:



Obr 16 - Zapojení dvoufázového a třífázového měniče [zdroj: vlastní zpracování]

Řízení napětí se realizuje nejčastěji fázově řízeným způsobem pomocí řídicího úhlu. Úhel je ekvivalentem doby od průchodu fázového napětí požadované řízené fáze nulou po dobu trvání celé periody síťového kmitočtu. Změnou úhlu v řízení způsobíme změnu střední hodnoty napětí na připojené zátěži. Požadavek otevření tyristoru pro daný úhel je realizován tak, že nejdříve dojde k synchronizaci časovače na průchod fázového napětí nulou, dále k odměření časového úseku odpovídajícího nastavenému úhlu otevření a po jeho komparaci k vyslání proudového impulsu do gate elektrody tyristoru. Pokud je tyristor v blokovacím režimu uvede se do vodivého stavu, obvodem prochází proud. Ke komutaci neboli vypínání tyristorů dochází přirozenou cestou a to průchodem jeho proudové hodnoty nulou. U činných zátěží je tento okamžik také definován pro vedení pouze dvou tyristorů průchodem sdruženého napětí nulou a pro vedení tří tyristorů průchodem fázového napětí nulou.

Podmínkou chodu měniče je vedení alespoň dvou tyristorů v obvodu. Toho docílíme pomocí řídicího obvodu, který nám generuje šestici řídicích signálů vždy posunutých o  $\pi/3$



pro různé dvojice tyristorů. Při čistě činné zátěži a zapalovacím úhlu  $\alpha < \frac{\pi}{6}$  se tento signál vysílá i pro třetí tyristor ve zbývající větvi. Konec chodu měniče je dán maximálním úhlem otevření  $\alpha = \frac{5}{6}\pi$ , okamžik průchodu sdruženého napětí nulovou hodnotou [5].

Obecně pro čistě ohmické zátěže u třífázového měniče napětí je rozsah úhlu řízení v mezích od  $0 \div \frac{5}{6}\pi$ . U zátěží induktivního charakteru se rozsah úhlu řízení zkracuje. Je to dáno mírou fázového posunu proudu na zátěži, který způsobuje zpožděnou komutaci tyristorů. Závislost rozsahu úhlu otevření na parametrech připojené impedance zátěže je:

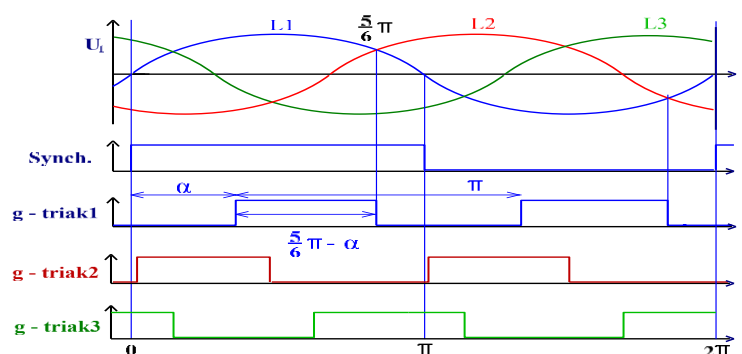
$$\alpha_{100} = \arctg \frac{\omega L}{R} \quad - \text{úhel otevření pro } 100\% \text{ hodnoty výstupního napětí}$$

$$\alpha_0 = \frac{5}{6}\pi \quad - \text{úhel otevření pro } 0\% \text{ hodnoty výstupního napětí}$$

Při řízení obecných RL zátěží, u kterých dochází k změnám fázového posunu v závislosti na provozním stavu a zatížení což jsou například AM, je problém stanovit konec časování úhlu  $\alpha$ , okamžik plně saturovaného třífázového měniče a v případě softstartéru konec rozběhu AM. Důvodem je degenerace výstupního napětí při impulzním řízení na měniči v závislosti na dále se snižujícím řídicím úhlu  $\alpha$ . Tento stav je způsoben absencí znovu zapálení tyristoru po zpožděné komutaci dané fázovým posunem, kdy je tzv. ještě ve své pracovní oblasti. Problémem je jednoduché určení tohoto časového okamžiku. Proto se v praxi u třífázových měničů určených pro rozběhy AM používá dvojí způsob řízení.

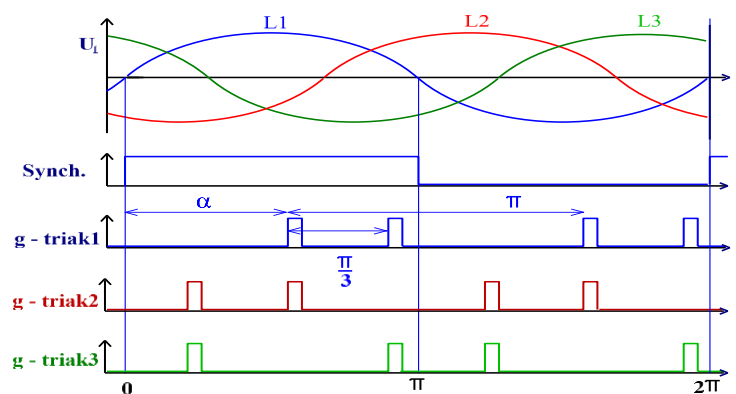
Prvním způsobem řízení je tzv. celo impulzní buzení tyristorů. Jedná se generování zapalovacích impulsů pro tyristory ve svých pracovních oblastech posunutých o  $\frac{2}{3}\pi$  pro každou fázi. Počátky impulsů vždy začínají pro kladnou půlperiodu svých příslušných fází úhlem  $\alpha$  a končí úhlem  $\frac{5}{6}\pi$ , pro zápornou půlperiodu jsou o úhel  $\pi$  posunuty. Tento způsob řízení řeší problém s určením doby opětovného zapálení tyristoru po zpožděné komutaci patřičného tyristoru a to tak, že gate elektrodou teče stále zapínací proud v době trvání impulsu a čeká se na přechod do blokovacího stavu tyristoru, aby mohl opětovně zapnout. Nevýhodou tohoto způsobu buzení je proudové namáhání gate elektrody tyristoru, triaku. Další nevýhodou je příliš veliký startovací úhel měniče  $\alpha = \frac{1}{2}\pi$ , který pro zátěže jako AM generuje startovací napětí kolem 60% vstupního napětí za předpokladu

$\cos(\varphi_k) \approx 0.55$  což je obvyklá hodnota nakrátko pro AM do **10 kW**. Předpoklad startovacího napětí je určen z provozní charakteristiky měniče (2.28).



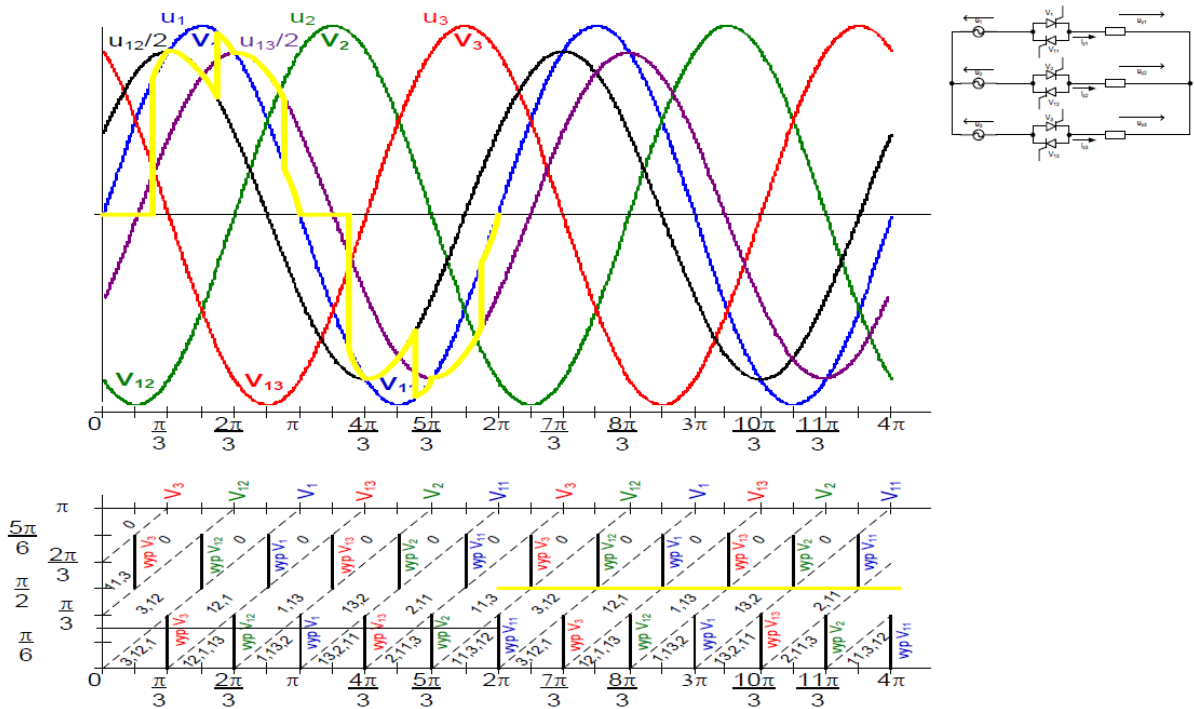
Obr 17 – Časování celoimpulsní mód [zdroj: vlastní zpracování]

Dalším způsobem řízení je kombinace tohoto způsobu a impulzního řízení v šesti taktech s posunem  $\pi/3$  pro určené dvojice tyristorů. Pro rozsah řídicího úhlu  $\{1/2 \pi \leq \alpha < 5/6 \pi\}$  je měnič provozován v impulzním módu a v rozsahu  $\{0 < \alpha < 1/2 \pi\}$  v celoimpulsním módu. Tím to způsobem je možnost nastavení výstupního napětí měniče z celého rozsahu vstupního napětí.



Obr 18 – Časování impulzní mód [zdroj: vlastní zpracování]

Pracovní charakteristika měniče je závislost výstupního fázového napětí na hodnotě řídicího úhlu  $\alpha$  a zároveň fázového posunu  $\varphi$  pro připojovanou impedanci. Pracovní charakteristiku měniče lze bez větších problémů stanovit částečnou sumací fázového napětí  $U_1$  a střídavě polovinou sdružených napětí  $U_{12}$  a  $U_{13}$  pro konkrétní úhly otevření  $\alpha$  a fázové posuny  $\varphi = 0$  (ohmická zátěž) a  $\varphi = 1/2 \pi$  (indukční zátěž).



Obr 19 - Pracovní diagram TMN pro činnou zátěž [3]

K vytvoření pracovních charakteristik jsem použil pracovní diagram pro ohmickou zátěž, který je zobrazen na obrázku 19. Za pomoci programového vybavení jazyka Python v3.3 a matematické knihovny Numpy v1.73. stanovuji střední hodnoty napěťových ploch pro různé zapalovací úhly, které získávám diskrétní sumací s krokem jeden stupeň a pro fázový posun  $\varphi = 0$  tuto funkční závislost aproximuji pomocí polynomu šestého stupně. Kde hodnota argumentu  $\alpha$  je již v úhlových stupních.

$$\begin{aligned}
 U_{(0,\alpha)} \approx U_f \cdot & (-1.41989e - 12 \cdot \alpha^6 + 6.08165e - 10 \cdot \alpha^5 \\
 & - 9.12546e - 08 \cdot \alpha^4 + 6.05295e - 06 \cdot \alpha^3 \\
 & - 2.45265e - 04 \cdot \alpha^2 + 1.84449e - 03 \cdot \alpha \\
 & + 9.96205e - 01)
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

$$\alpha \in < 0, 150^\circ )$$

Výpočet přesných provozních charakteristik pro připojované impedance s různým fázovým posunem  $\varphi$  je značně komplikovaný. Pro to jsem se uchýlil k zjednodušenému

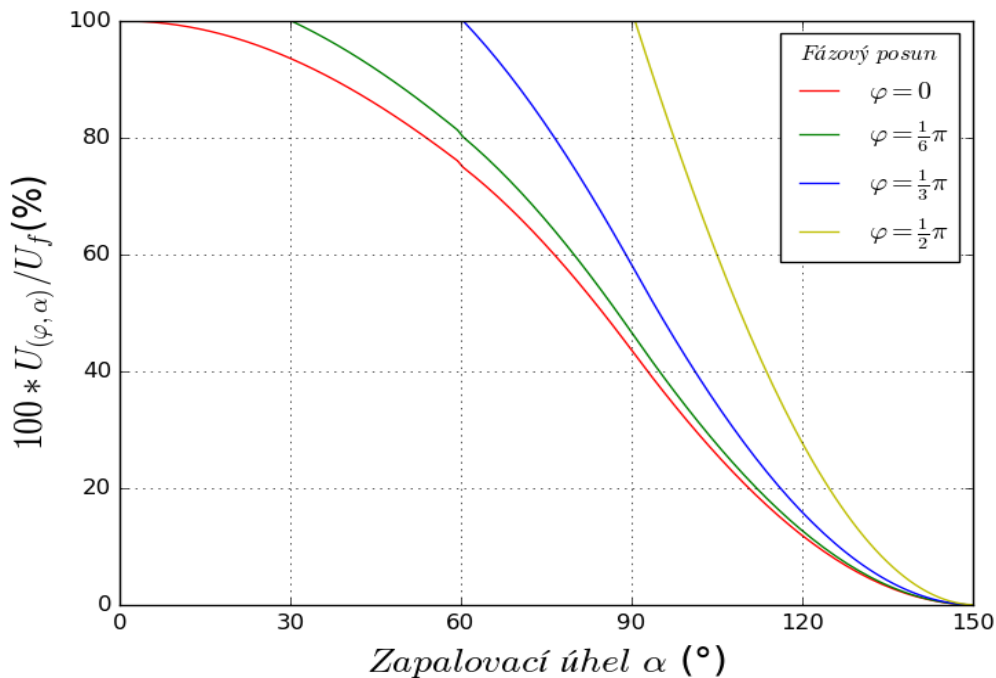
vyjádření ostatních charakteristik  $U_{(\varphi,\alpha)}$  pomocí  $U_{(0,\alpha)}$  kdy transformuji hodnoty jednoduchou úměrou z  $U_{(0,\alpha)}$  pro argumenty  $\alpha$  z rozsahu  $\{\varphi \leq \alpha \leq 150^\circ\}$  na hodnoty  $\{U_f \geq U_{(\varphi,\alpha)} \geq 0\}$ . Maximální nepřesnost pro krajní fázový posun  $\varphi = 90^\circ$ , tedy vyjádření  $U_{(90,\alpha)}$ , nepřekračuje 5%. Což je pro odhad výstupního napětí v praxi postačující. Podobného způsobu výpočtu výstupního napětí měniče využívám v řídicí části softstartéru za účelem stanovení startovacího napětí.

$$U_{(\varphi,\alpha)} \sim \frac{U_{(0,\alpha)}}{U_{(0,\varphi)}} \cdot U_f \quad (2.30)$$

$$\alpha \in \left( \varphi, \frac{5}{6}\pi \right)$$

$$\varphi \in \left( 0, \frac{1}{2}\pi \right)$$

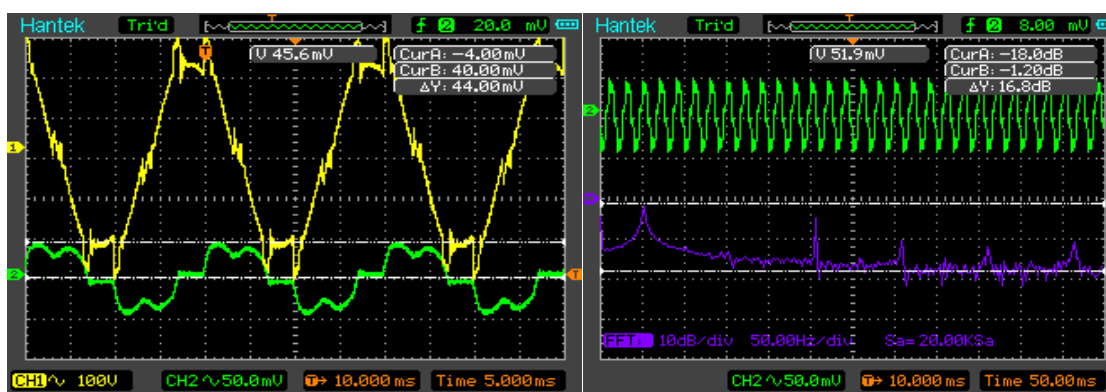
Na obrázku 20 je zobrazeno několik průběhů, rozsahů napětí v závislosti na řídicím úhlu pro dané fázové posuny na připojených impedancích zátěže.



Obr 20 – Výstupní napětí TF v závislosti na řídicím úhlu a fázového posunu  $\varphi$  na zátěži [zdroj: vlastní zpracování]

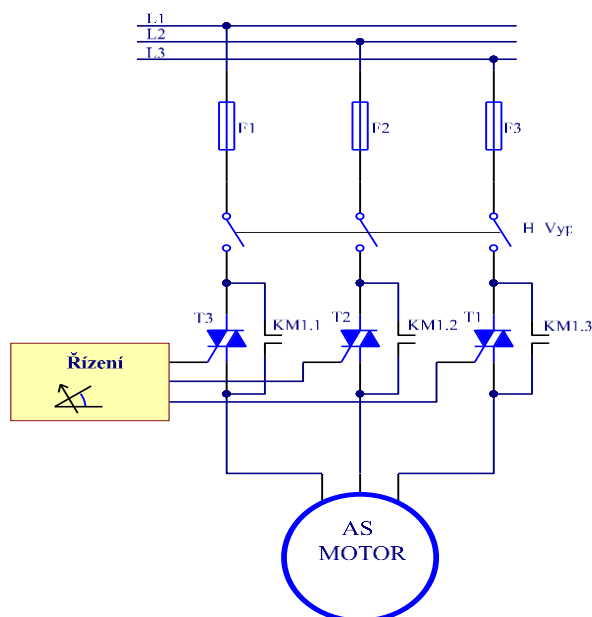
Z řídicí charakteristiky je patrné, že odpovídající startovací napětí u třífázového měniče bude záviset na správné volbě účinníku nakrátko  $\cos \varphi_k$  připojované zátěže (největší zadávaný startovací úhel otevření). A konečný řídicí úhel pro generování plného napětí na zátěži bude záviset na volbě účinníku při jmenovitém zatížení  $\cos \varphi_j$ .

Napětí na připojené zátěži nemá již sinusový průběh a je zvláště značně deformováno pro vysoké úhly otevření. Z toho je patrný negativní vliv provozu měniče na napájecí síť s pohledu proudového harmonického skreslení a to hlavně pro 5 a 7 harmonickou. Pro názornost uvádím obrázek průběhů hodnot napětí, proudu a harmonického zkreslení při úhlu řízení  $110^\circ$  na AM 550W/1480 ot/min, stav bez zatížení.



Obr 21 - Průběhy U, I a FFT pro řídicí úhel  $110^\circ$  TMN [zdroj: vlastní zpracování]

V dnešní době asi nejpoužívanějším zapojením soft startéru je tzv. Hybridní systém. Vzhledem k nezanedbatelné tepelné energii vznikající na výkonových polovodičových prvcích průchodem proudu se soft startéry vybavují mechanickými spínacími prvky, které po rozběhu vyřadí polovodičové spínače. Realizace se provádí kontakty interního relé nebo pomocí externě připojeného stykače.



Obr 22 - Zapojení hybridního třífázového měniče [zdroj: vlastní zpracování]

### 3. POŽADAVKY NA ZAŘÍZENÍ SOFTSTARTÉR

Pro splnění požadavků na označení zařízení CE, schody s Evropskými směrnici, se návrh softstartéru musí řídit podle Evropských standardů IEC.

- IEC 60947-1 Spínací a řídicí přístroje nn. část 1: Všeobecné (odpovídá ČSN EN 60947-1) [4].
- IEC 60947-4-2 Spínací a řídicí přístroje nn. část 4-2: Stykače a spouštěče motorů - polovodičové regulátory a spouštěče motorů na střídavý proud (odpovídá ČSN EN 60947-2) UL508 [4].
- Direktiva EU 89/336/EEC („Směrnice elektromagnetické kompatibility“) CE Týkající se všech zařízení schopných vytvořit elektromagnetické rušení, včetně jeho úrovní vyzářování a odolnosti [4].

#### 3.1. Požadavky nutné

- Připojená napěťová soustava **3 x 400 V AC TNC / 50Hz**
- Detekce přítomnosti třífázového napětí
- Detekce události průchodu nulou zvolené referenční fáze napětí (synchronizace)
- Zjištění točivosti připojené soustavy levá, pravá (řízení triaků)

- Měření proudu alespoň v jedné fázi (reakce zařízení na nepřekročení maximálního proudu určené pro toto zařízení  $I_{vyp}$  plus v ustáleném stavu vstupní hodnota pro výpočet  $P_c, P_z$  )

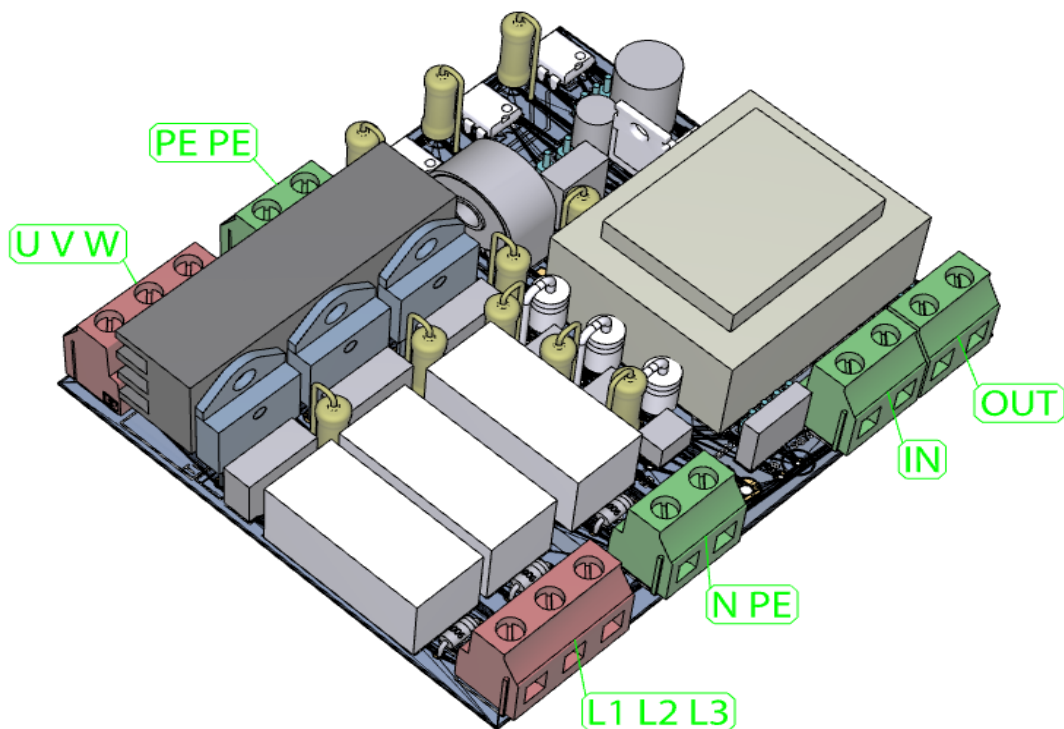
### 3.2. Požadavky zvolené

- Možnost nastavování časů rozběhu a doběhu
- Možnost nastavení úrovně startovacího napětí
- Možnost nastavení  $\cos\varphi_k$  (určuje správné nastavení startovacího napětí)
- Měření napětí na jedné fázi (Výpočet plus vizualizace predikovaných třífázových výkonů ( $P_c, P_z$ ))
- Funkce při rozběhu na nepřekročení námi zadaného proudu  $I_{vyp}$
- Funkce nadproudové ochrany po rozběhu pro námi zvolený proud  $I_{och}$
- Omezení rozběhu pohonu na překročení námi zvoleného počtu startů za hodinu  $CN_s$  (ochrana zařízení tzv. za pohonem v tom to případě dané výrobcem tepelného čerpadla)
- Měření času chodu připojeného zařízení plus celkový počet startů (návaznost na servisní činnost)
- Digitální vstup, ovládání softstartéru start, stop realizováno jako kontaktní vstup, kde se stahuje log. úroveň **3.3 V** přes odpor **4k7** na nulu.
- Digitální poruchový výstup s otevřeným kolektorem NPN **200mA/50V** určeno pro nadřazený systém
- Možnost komunikace s nadřazeným systémem pomocí **RS232 TTL 3.3V**

## 4. NÁVRH TOPOLOGIE ZAPOJENÍ

Zařízení softstartér bude koncipováno jako hybridní plně řízený třífázový střídavý měnič napětí. Topologie tohoto zapojení svými vlastnostmi zaručuje souměrné zatížení napájecí sítě při rozběhu a zároveň téměř nulový napěťový potenciál na svorkách připojovaného pohonu v době provozního režimu stop. Tento napěťový potenciál je definován poměrem impedancí připojovaného pohonu k impedanci uzavřených spínacích polovodičových prvků. Tímto je zajištěno zlepšení bezpečnosti před nahodilým dotykem živých částí pohonu v době provozního stopu softstartéru v případě poruchy izolace nebo krytu svorkovnice pohonu. Řízení softstartéru a následnou vizualizaci provozních stavů bude zajišťovat osmibitový mikrořadič, který dále bude zprostředkovávat nastavování důležitých

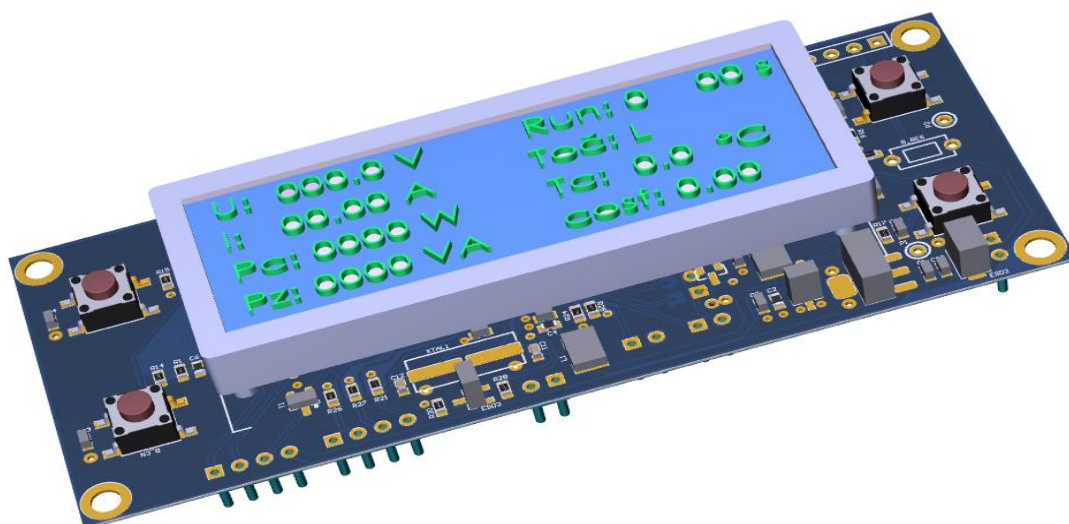
vstupních parametrů pomocí čtyř spínacích tlačítek, kapitola Řízení. Vizualizace provozních vstupních a výstupních parametrů se bude zobrazovat na čtyřřádkovém dvacetiznakovém displeji. Zařízení bude umístěno na dvou pozičně nezávislých dvoustranných plošných spojích. Materiál DPS bude laminátový substrát **FR4** s měděným plátováním **104 μm**. Na jednom z DPS bude osazena výkonová část softstartéru (připojovací svorkovnice, napájení řídicí části, veškeré spínací a měřicí komponenty a to s převážnou částí montáže THT). Viz 3D model výkonové části na obrázku 23.



Obr 23 - Model výkonové části [zdroj: vlastní zpracování]

Na dalším DPS bude osazena řídicí část softstartéru (mikroprocesor, všechny podpůrné obvody pro zpracování měřících a řídicích signálů, ovládací tlačítka a displej již s povrchovou montáží SMD). Viz 3D model řídicí části na obrázku 24.





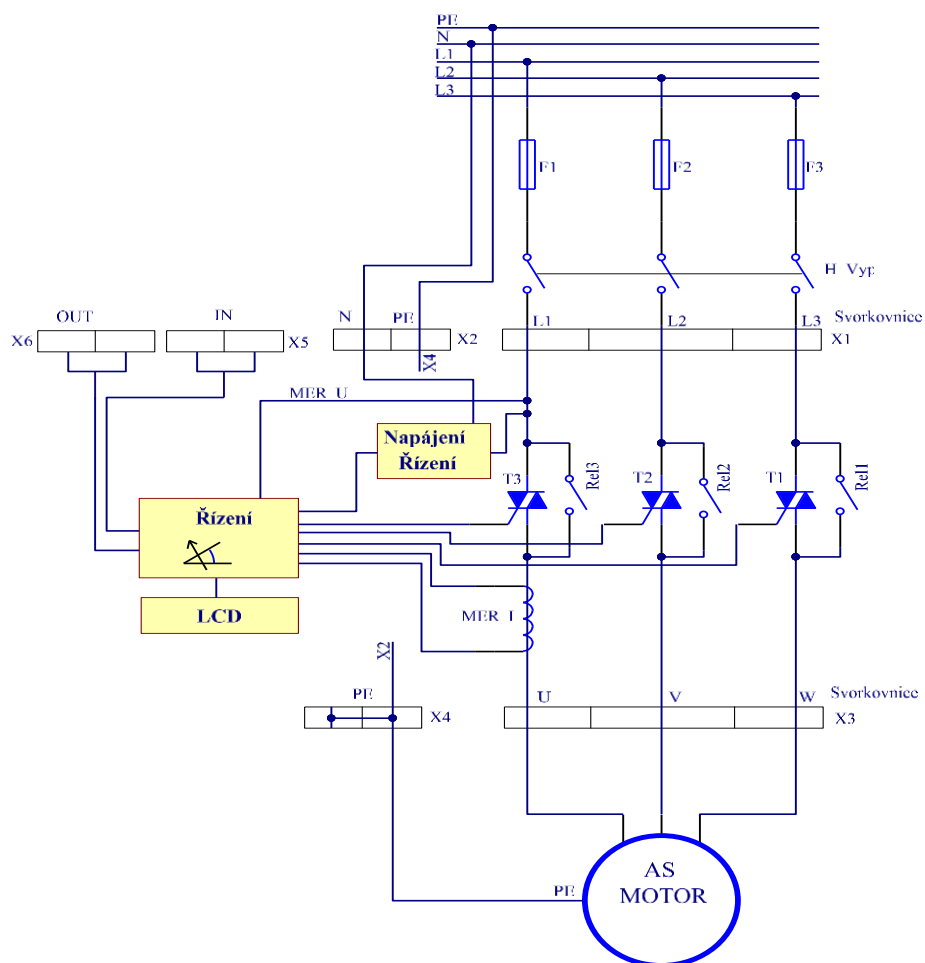
Obr 24 - Model řídicí části [zdroj: vlastní zpracování]

Moduly budou propojeny pomocí samostatných lankových konektorů Kon-pic. A umístěny do pěti modulového vylisovaného prefabrikátu z PVC s montáží na DIN lištu **35 mm** s krytím **IP21** jako součást řídicího rozvaděče pro ovládání požadovaného pohonu.



Obr 25 – PVC krabička na DIN lištu [zdroj: vlastní zpracování]

## 5. NÁVRH ZAŘÍZENÍ SILNOPROUDÁ ČÁST



Obr 26 - Schématické zapojení softstartéru [zdroj: vlastní zpracování]

### 5.1. Určení mezních stavů

Určení krajních veličin napětí a proudu pro námi stanovený maximální výkon. Připojovaná napěťová soustava bude **3x400/230V, 50Hz**. Z hlediska dimenzování připojených vodičů, svorkovnic, relé, polovodičových ventilů, kapacit a odporů určíme maximální možné napětí, které se může objevit na těchto komponentech. Na základě těchto údajů provedeme požadovaný výběr.

Stanovení maximálního okamžitého napětí pro připojovanou síť **3x400/230V TNC** z ohledem na toleranci vstupního napětí  $\pm 10\%$ , která je doporučením pro dodavatele el. energie v místě předávky.

Maximální efektivní hodnota:

$$U_{S\text{mef}} = U_{S\text{ef}} \cdot 1.1 = 400 \cdot 1.1 = 440 \text{ V} \quad (5.1)$$

Okamžitá maximální hodnota napětí:

$$U_{S\text{max}} = \sqrt{2} \cdot U_{S\text{mef}} = 624.9 \text{ V} \quad (5.2)$$

Připojovaný maximální výkon motoru volím **5 kW** s ohledem na řadu instalovaných výkonů u malých domovních jednotek tepelných čerpadel.

Fázový proud jmenovitý:

$$I_{fj} = \frac{P_{\check{c}}}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos\varphi_k} = \frac{5000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.82} = 8.81 \text{ A} \quad (5.3)$$

Maximální rozběhový proud bez funkce softstartu:

$$I_{fr} = (6 \div 7) \cdot I_{fj} = 61.6 \text{ A} \quad (5.4)$$

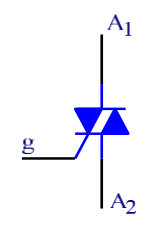
Z důvodu možného nevhodně zvoleného času rozběhu bude u zařízení implementována funkce na nepřekročení stanovené maximální proudové hodnoty. Tu to hodnotu stanovuji na **15 A**. A to vzhledem k instalování zařízení převážně v občanské výstavbě, kde hodnoty hlavních domovních jističů nejsou nižší než **16 A**. A dále z důvodu redukce objemů chladičů na použitých polovodičových prvcích.

## 5.2. Výběr výkonového polovodičového spínače

S ohledem na stanovené maximální provozní hodnoty napětí a proudu volím pro řízení třífázového měniče triak od fi. STMicroelectronics typ. BTA41 v pouzdře TO3, který bude v činnosti pouze po dobu rozběhu a případně doběhu pohonu. Výběr byl předurčen

vysokou hodnotou závěrného napětí, jmenovitým proudem a v neposlední řadě vysokou proudovou přetížitelností.

Triak BTA 41		
$I_{rms}$	40	A
$U_{drm}$	800	V
$I_{tms}$	400/20	A/ms
$dU/dt$	100	V/us
$dI/dt$	50	A/us
$I_{gt}$	50	mA
$I_{gm}$	8	A
$I^2t$	1000	A <sup>2</sup> s



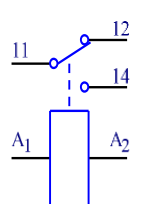
Tabulka 1- Parametry Triaku [zdroj: vlastní zpracování]

### 5.3. Výběr vyřazovacího relé

Vyřazovací relé v této aplikaci působí až po konci rozběhu pohonu. Triaky jsou plně otevřené a úbytek napětí na těchto prvcích je kolem **1V**. Pak dojde k jejich přemostění pomocí kontaktu relé. Důvodem přemostění je vysoká tepelná ztráta na tyristorech, která v ustáleném stavu plně otevřeného triaku odpovídá podle výrobce hodnotám **1A**  $\approx$  **1W**. Při pokrytí celého proudového rozsahu softstartéru by chladič vycházel příliš veliký s tepelným odporem cca. **5°C/W** vzhledem k umístění do vylisovaného plastového prefabrikátu rozměrech cca 5modulů Typ.: 6MDH53/5 na DIN lištu. Dalším důvodem je větší zkratová odolnost a v neposlední řadě energetická šetrnost.

Relé jsem volil s montáží na PCB od fi. Relpol, typ: RM83-P-5V.

Relé RM83-P-5V		
$I_n$	16	A (AC1)
$U_n$	250	V
$U_{max}$	440	V
$U_{izo}$	1000	V
$I_{rms}$	120/20	A/ms
$P_{spi}/1c$	4400	VA (AC1)
$U_{A1,2}$	5	V (DC)
$I_{A1,2}$	120	mA (DC)
$P_{dis}$	0.6	W (DC)



Tabulka 2 - Parametry Relé [zdroj: vlastní zpracování]

Relé disponuje dvěma spínacími kontakty, které budou zapojené paralelně. Což bude odpovídat proudové zatížitelnosti **32 A**. Proudová hodnota kontaktů je stanovena pro zátěž typu **AC1** (činná zátěž). Vzhledem k provozním stavům, kdy relé bude vyřazovat plně otevřený triak nebo ho rozpínat, vždy se bude spínat maximálně napětí jednotek volt, což je úbytek napětí na plně otevřeném triaku v ustáleném stavu. Další výhodou je proudová přetížitelnost kontaktu relé: **120 A / 20ms**

## 5.4. Návrh jištění

Každé elektrické zařízení by mělo být chráněno proti působení zkratových proudů. A to především omezením zkratového proudu obvodu za pojistkou. Vzhledem k tomu že se zařízení skládá s polovodičových součástek, které jsou nejvíce náchylné na velikost zkratových proudů a především doby jejich trvání, je třeba klást patřičné ohledy.

Při volbě jisticího prvku je třeba rozhodnout, jestli má být zařízení chráněno před zkratem a přetížením nebo pouze před zkratem. Dalším krokem je stanovení minimální proudové hodnoty. Pro spolehlivý chod zařízení a maximální proudové hodnoty s ohledem na selektivnost navazujících ochranných zařízení.

Nejdůležitějším podmiňujícím parametrem je určení prvku s nejmenší hodnotou Joulova integrálu v obvodu. Jedná se o míru energie, kterou pojistka před svým přetavením a zhasnutím oblouku propustí do připojeného obvodu. Jedná se o teplo, které svým působením zvyšuje teplotní namáhání zařízení. Hodnota Joulova integrálu by měla vždy být u jisticího zařízení nižší než u jištěného zařízení. Tento předpoklad způsobí spolehlivé vypnutí chráněného zařízení před jeho poškozením působením zkratového proudu [8].

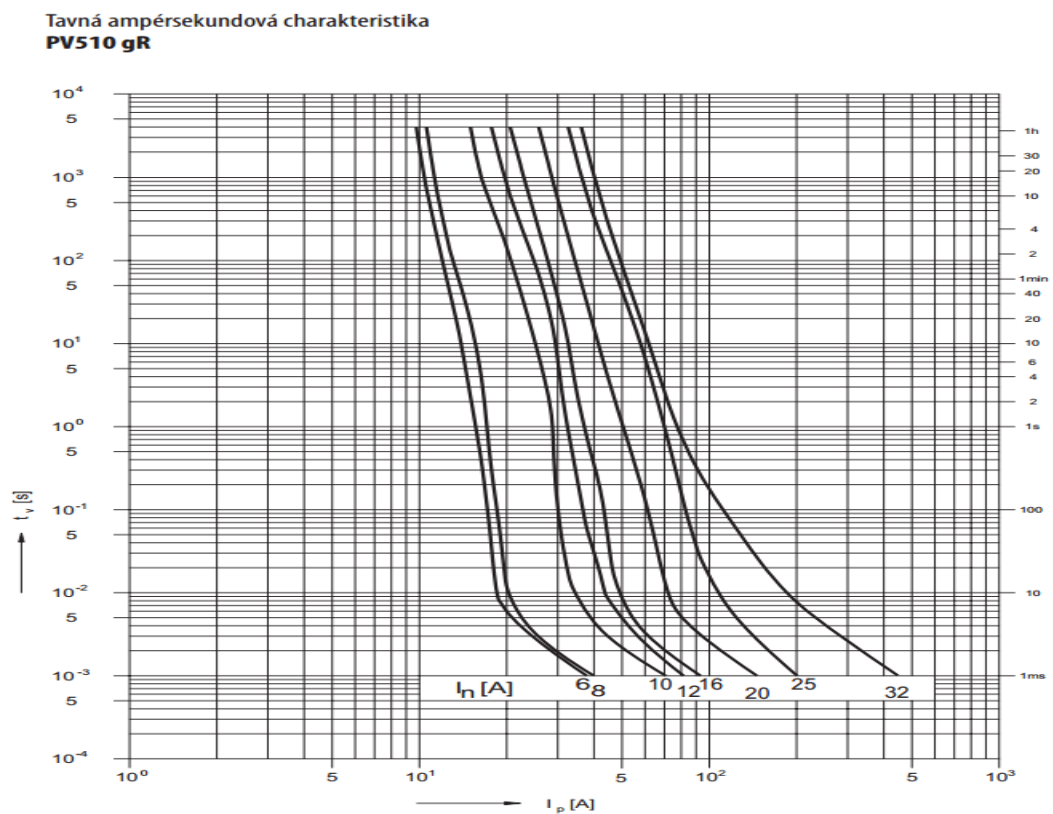
V tom to konkrétním případě budeme zařízení chránit pouze proti zkratu. Ochranu proti přetížení bude zajišťovat softstartér s touto implementovanou funkcí. Pro stanovení proudové hodnoty jisticího zařízení vycházíme z námi definovaného maximálního rozběhového proudu **15 A**. Na nepřekročení této hodnoty bude softstartér reagovat zvýšením zapalovacího úhlu triaky. Hodnota nejbližší vyšší v rámci dobré selektivity je **20 A**. Vzhledem k jištění pouze proti zkratu volím pojistku s charakteristikou **aR** případně **gR**.

Charakteristika **aR** je charakteristika chránící polovodičové zařízení pouze proti zkratu.  
 Charakteristika **gR** je charakteristika chránící polovodičové zařízení proti zkratu a nadproudu.

Volíme jisticí zařízení s Joulovým integrálem menším než

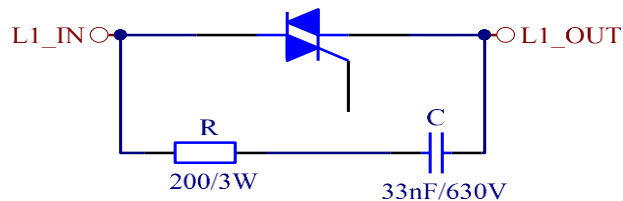
$$I^2t < 1000 \text{ A}^2\text{s} \quad (5.5)$$

což je Joulův integrál triaku. Jako vhodné jisticí zařízení se pro toto zařízení jeví válcová pojistka od fi. OEZ Typ: PV510 20A gR  $I_n = 20\text{A}$



Obr 27- Ampérsekundová charakteristika pojistky Pv510 gR [9]

## 5.5. Návrh odlehčovacího členu triaku



Obr 28 - Odlehčovací RC člen triaku [zdroj: vlastní zpracování]

Triaky jsou vybaveny odlehčovacím RC obvodem, který zabraňuje nebezpečnému nárůstu blokovacího napětí na triaku  $\frac{dU}{dt}$ , která je definována výrobcem. Tím se zabrání samovolnému otevření triaku v blokovacím stavu bez požadavku na zapnutí.

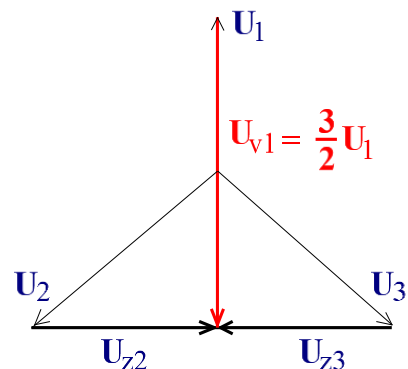
Ten to stav nastává především po komutaci triaku, tyristoru na induktivních zátěžích.

### Výpočet RC:

Katalogový údaj triaku  $\frac{dU}{dt} < \frac{100V}{\mu s}$  při dynamickém stavu do  $15A/\mu s$

V nejnepříznivějším případě se na triaku v době komutace induktivní zátěže může objevit **1.5** násobek maximálního fázového napětí. Ten to stav nastává při střídání vedení pouze dvou tyristorů, triaků.

Hodnotu **C** vypočítám z nerovnosti:



Obr 29 - Fázory napětí při vedení dvou triaků [zdroj: vlastní zpracování]

$$\frac{U_{v1}}{\tau_{rc}} < \frac{100V}{\mu s} \quad (5.6)$$

$$\frac{U_{v1}}{RC} < \frac{100V}{\mu s} \quad (5.7)$$

Výpočet maximálního možného okamžitého napětí, které se může objevit na triaku:

$$U_{v1} = 1.1 \cdot 1.5 \cdot \sqrt{2} \cdot 230 = 539 V \quad (5.8)$$

$$\tau_{rc} = RC ; R = 200 \Omega$$

$$C > \frac{U_{v1} \cdot 10^{-6}}{100 \cdot R} > \frac{539 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 100} > 26.9 \text{ nF} \quad (5.9)$$

Hodnota nejbližší vyšší v řadě je **33 nF**. Volím plypropylénový kondenzátor s montáží THT s maximálním napětím **630V DC** pro impulzní aplikace.

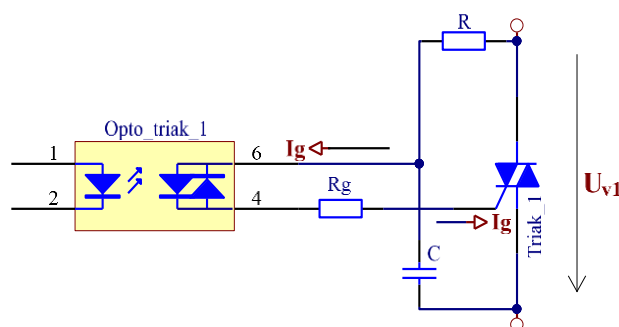
Výkonovou ztrátu na odporu **R** určím z energetické bilance vybíjení kondenzátoru **C** podle vztahu viz níže, kde **P<sub>cm</sub>** je maximální elektrický výkon, kterým může disponovat nabitá kapacita **C**.

$$P_{cm} = (1.1 \cdot U_f)^2 \cdot \omega \cdot C \quad (5.10)$$

$$P_{cm} = (252)^2 \cdot 314 \cdot 33 \cdot 10^{-9} = 0.66 \text{ W} \quad (5.11)$$

Impedance kondenzátoru je v porovnání s odporem **R** je cca **230x** větší proto volím ve výpočtu kapacitního výkonu plné fázové napětí **U<sub>f</sub>**. V našem případě dojde k vybíjení kondenzátoru dvakrát na periodu v souvislosti s řízením, proto bude disipovaný výkon na odporu **R** dvakrát větší. Odpor **R** volím s dovolenou výkonovou ztrátou **3 W**.

## 5.6. Návrh budícího obvodu triaku



Obr 30 - Spínání triaku optotriakem 1 větev [zdroj: vlastní zpracování]

Ke spínání triaků jsem použil optotriaků od fi. Fairchild Semiconductor typ. IL 4218



Jedním z hlavních důvodů je galvanické oddělení silové části od řídicí. Tyto optotriaky jsou již ovládány z řídicí části **3.3 V** logikou.

Optotriak IL 4218		
$I_{rms}$	300	mA
$U_{drm}$	800	V
$I_{tm}$	3	A
$dU/dt$	100	V/us
$dI/dt$	12	A/us
$I_{ft}$	5	mA
$U_f$	1.3	V

Tabulka 3- Parametry Optotriaku [zdroj: vlastní zpracování]

Podle doporučení výrobce optotriaku se jako zdroj pro řídicí impuls odebírá z kondenzátoru odlehčovacího obvodu **RC**. Pro zajištění optimálního sepnutí triaku i při nízkých hodnotách napětí volím maximální proud gate triaku s ohledem na ostatní zapojené součástky v obvodu buzení.

Pro stanovení proudu gate elektrodou triaku vycházím s nerovnosti:

$$I_G < I_{Gtrmax} < I_{opmax} \quad (5.12)$$

$$I_{Gtrmax} = 8A \quad \text{-maximální proud gate triaku}$$

$$I_{opmax} = 300mA \quad \text{-maximální proud optotriaku}$$

Na základě nerovnosti (5.12) stanovím maximální proud gate elektrodou.

$$R_g > \frac{U_{v1}}{I_G} \quad (5.14)$$

$$U_{v1} = 539 V; I_G = 300mA$$

$$R_g > \frac{539}{0.3} > 1796 \Omega \quad (5.15)$$

Nejbližší v řadě je **2kΩ** s výkonovou ztrátou **1W**

Jako přepětovou ochranu výkonového triaku a zároveň optotriaku volím transil. Bude se jednat o zapojení dvou transilů do série z důvodů vysoké bezpečnostní napěťové hladiny. Napěťovou bezpečnostní hladinu  $U_{br}$  a hladinu state-off  $U_{wm}$  transilu určím z nerovnosti:

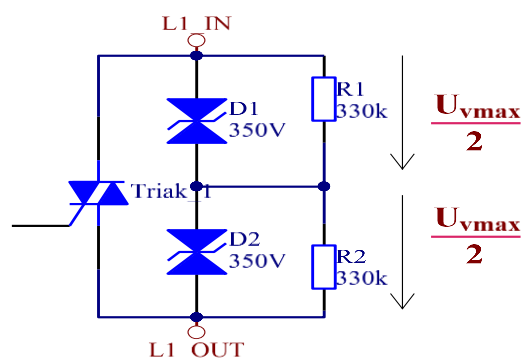
$$U_{vmax} < 2 \cdot U_{wm} < 2 \cdot U_{br} < U_{drm} \quad (5.16)$$

Maximální okamžitá hodnota napětí na triaku:

$$U_{vmax} = 539 \text{ V}$$

Maximální napětí triaku:

$$U_{drm} = 800 \text{ V}$$



Obr 31 – Sériové zapojení transilů [zdroj: vlastní zpracování]

$$539 < 2 \cdot U_{wm} < 2 \cdot U_{br} < 800 \quad (5.17)$$

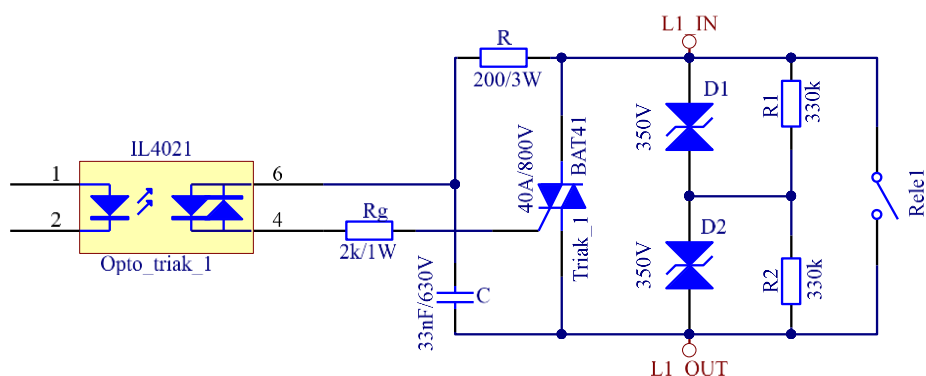
Volím transil typ: BZV06-299 s impulzní výkonovou ztrátou **600W** od fi. Diotec Semiconductor AG

Transil BZV06-299			
$U_{wm}$	299	V	
$U_{br}$	350	V	
$U_c$	482	V	
$I_{pp}$	1.3	A	
$I_d$	5	uA	
$P_{pp}$	600	W	

Tabulka 4 - Parametry Transilu [zdroj: vlastní zpracování]

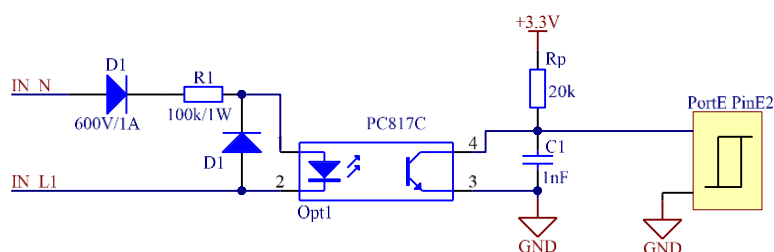
Zapojení doplňuji o dva paralelně zapojené odpory velikosti **330 kΩ**, které nám zajistí rovnoměrné rozložení napětí na transilech a tím spolehlivou reakci na přepětí u tohoto sériového zapojení.

Celkové schéma pro řízení jedné fáze je na obrázku 32.



Obr 32 - Úplné řízení jedné fáze [zdroj: vlastní zpracování]

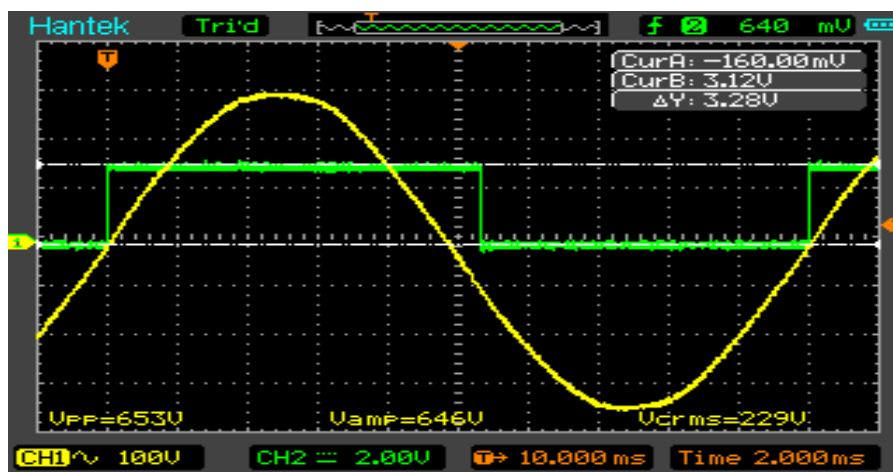
## 5.7. Obvod synchronizace



Obr 33 - Detekce průchodu nulou napětí [zdroj: vlastní zpracování]

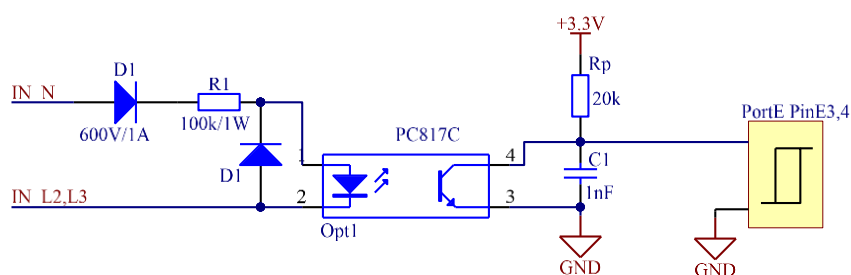
Obvod synchronizace, detekce průchodu nulou, řeším pomocí optočlenu. Jedná se o jedno pulsní usměrňovač pro zápornou půlperiodu. V časové oblasti záporné půlperrody je výstupní tranzistor optočlenu saturován přes pullup odpor  $R_p$  a při přechodu síťového napětí do kladné hodnoty se uzavírá a napětí na něm roste. To to napětí je připojeno na hranově citlivý vstup mikroprocesoru a generuje příslušné přerušení, od kterého se odvíjí řízení a časování kapitola **Řídící část**.

Hodnota pullup odporu  $R_p$  je zvolená na základě měření **20 k $\Omega$** . Ta to hodnota se vstupní kapacitou hradla portu **E** velice dobře kompenzuje předčasné uzavření výstupního tranzistoru optočlenu a s přesností desítek mikrosekund, pouze na vzestupnou hranu značuje průchod nulou.



Obr 34 - Detekce průchodu napětí nulou [zdroj: vlastní zpracování]

## 5.8. Obvod detekce točivosti připojené soustavy



Obr 35 - Detekce točivosti připojené soustavy [zdroj: vlastní zpracování]

Detekce točivosti a kompletnosti připojené napěťové soustavy je realizována opět pomocí optočlenů v téměř stejném zapojení jako pro fázi **L1**, ale již bez externích pullup odporů, které jsou v tom to případě aktivovány na vnitřních vstupech Portu **E.3** a **E.4** (fáze **L2,L3**). Zde nezáleží na přesných časových značkách průchodu nulou pro fáze **L2,L3**. Ty jsou připojeny na **Port E2,E3** kde není aktivován hranově citlivý vstup. Vstupy **E3 => L2**, **E4 => L3** se periodicky vzorkují každých **10 ms** a na základě vzorkovaných hodnot, se určuje točivost levá, pravá a tím pádem kompletnost třífázové soustavy. Detekce točivosti je zásadní pro správné časování triaků **Tr2,Tr3**.

## 5.9. Návrh chladiče

Úkolem chladiče je odvést teplo vznikající průchodem proudu polovodičovou strukturou, které by mohlo způsobit nadměrné ohřátí polovodičového přechodu a tím nevratnou destrukci. Při řešení budeme uvažovat odvod tepla generovaného v polovodiči do chladiče a odtud do okolního prostředí. Obecně lze tok tepelné energie za jednotku času v ustáleném stavu definovat pro jednorozměrný případ vztahem:

$$P_{th} = \lambda S \frac{dT}{dx} = \lambda S \frac{\Delta T}{l} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (5.18)$$

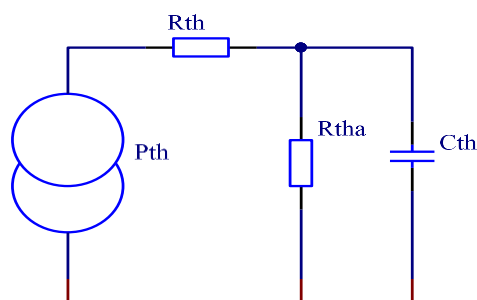
$R_{th}$  – Tepelný odpor

$\Delta T$  – Rozdíl teplot

Pokud zároveň dochází k ohřevu tělesa s měrným teplem materiálu  $c$  o objemu  $V$  a hustotě  $\rho_m$  je proces ohřevu tělesa analogický k nabíjení kondenzátoru a zavádí se tepelná kapacita  $C_{th}$ , která je analogií kapacitě kondenzátoru.

$$P_{th} = \rho_m c V \frac{dT}{dt} = C_{th} \frac{dT}{dt} \quad (5.19)$$

Přechodový děj odvodu tepla tělesem při jeho současném ohřevu můžeme modelovat jako nabíjení tepelné kapacity  $C_{th}$  přes odpor  $R_{th}$  a zároveň paralelně vyzařovaný přes odpor chladič-okolí  $R_{tha}$ .



Obr 36 - Náhradní schéma polovodič, chladič [zdroj: vlastní zpracování]

Chladič bude koncipován jako modulový. Tzv. Jeden společný monolit pro tři triaky. Triaky jsou v galvanicky izolovaném provedení přechod - pouzdro. Bude se jednat o hliníkový

profil ve vertikální poloze nesený triaky. Úlohou chladiče nebude vyzářit celý generovaný výkon triaku, ale především akumulovat energii do hraniční doby rozběhu třífázového měniče. Předpokladem je tuto teplotu a dobu sledovat než dojde k jejímu překročení. S tím nastává potřeba měření teploty chladiče a na základě této hodnoty v hraničních případech omezit nebo vyřadit softstartér s provozu.

Metoda návrhu spočívá v odhadu rozměrů, hmotnosti a provedení. Na základě těchto údajů vytvořit odpovídající matematický model a vypočítat závislost růstu teploty polovodiče, potažmo teploty chladiče na čase.

Důležitými parametry pro návrh chladiče jsou

- $t_{rz}$  maximální doby rozběhu softstartéru
- $T_{jmax}$  maximální dovolená teplota přechodu polovodiče
- $T_j$  teplota přechodu polovodiče
- $T_a$  teplota okolí
- $T_{ch}$  teplota chladiče
- $P_{T(av)}$  střední tepelný výkon generovaný polovodičem
- $R_{th(j-c)}$  tepelný odpor přechod pouzdro
- $R_{th(c-ch)}$  tepelný odpor pouzdro chladič
- $R_{th(ch-a)}$  tepelný odpor chladič okolí
- $m$  hmotnost chladiče
- $c$  měrná tepelná kapacita materiálu chladiče

Tepelný ztrátový výkon triaku se dá obecně stanovit jako

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u} \cdot \mathbf{i} \cdot dt \quad (5.20)$$

Tepelné ztráty jsou závislé na stavu, ve kterých právě triak pracuje. Nás budou zajímat především ztráty způsobené průchodem propustného proudu. Vzhledem k provozu triaku na síťovém kmitočtu **50 Hz** ztráty zapínací a vypínací zanedbávám.

Ztráty způsobené průchodem propustného proudu:

$$P_{T(av)} = U_{T0} \cdot I_{F(av)} + r_d \cdot I_{F(rms)}^2 \quad (5.21)$$

- $U_{T0}$  prahové napětí
- $r_d$  diferenciální odpor
- $I_{F(av)} = \frac{1}{T} \int i_{(t)} dt$  střední hodnota proudu
- $I_{F(rms)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i_{(t)}^2 dt}$  efektivní hodnota proudu

Pro náš případ budeme uvažovat ten nejnepříznivější stav. To je stav kdy od začátku až do konce rozběhu bude triak namáhán maximálním zvoleným proudem.

$$I_{F(rms)} = 15 \text{ A}$$

$$U_{T0} = 0.85 \text{ V}$$

$$r_d = 10^{-2} \Omega$$

$$I_{F(av)} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{F(rms)} = 13.5 \text{ A} \quad (5.22)$$

$$P_{T(av)} = 0.85 \cdot 13.5 + 10^{-2} \cdot 15^2 = 13.7 \text{ W} \quad (5.23)$$

Výkonová ztráta pro jeden triak vychází **13.7 W**.

Při návrh chladiče vycházím se zjednodušeného modelu tří jedno kapacitních soustav zobrazeného na obrázku 37. Dalším zjednodušením je převedení, těchto soustav na jednu jedno kapacitní soustavu zobrazenou na obrázku 38. Model jsem převedl na analogii s elektrickým obvodem. Zdroje ztrátového výkonu jsem převedl na proudový zdroj, tepelné odpory na odpory, tepelné akumulční hmoty na kapacity a teplotu na napětí.

Definované vstupní parametry:

$$t_{rz} < 15 \text{ s}$$

$$T_{jmax} = 125 \text{ °C}$$

$$T_a = 25 \text{ °C}$$

$$P_{T(av)} = 13.7 \text{ W}$$

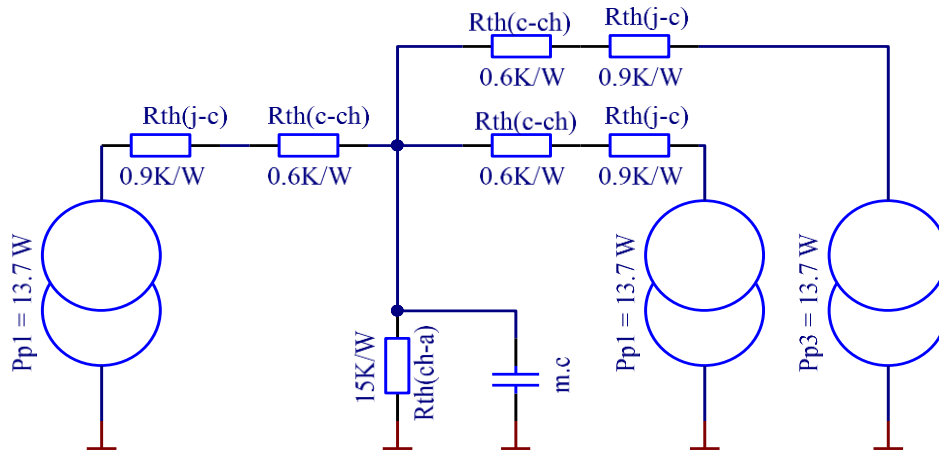
$$R_{th(j-c)} = 0.9 \text{ K/W}$$

$$R_{th(c-ch)} = 0.6 \text{ K/W}$$

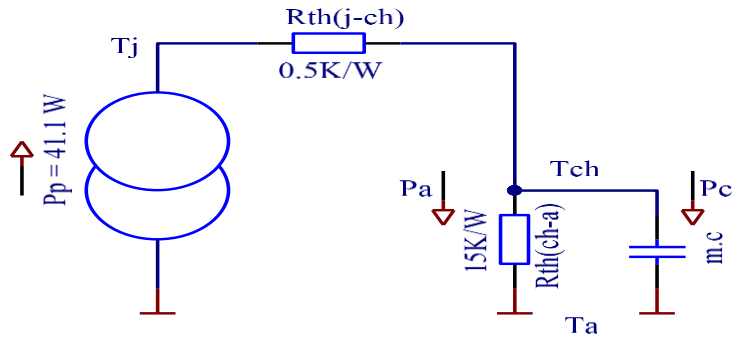
$$R_{th(ch-a)} = 15 \text{ K/W}$$

$$m = 80 \text{ g}$$

$$c = 836 \text{ J/kgK}$$



Obr 37 - Tepelné náhradní schéma triaků a chladiče [zdroj: vlastní zpracování]



Obr 38 - Zjednodušené tepelné náhradní schéma [zdroj: vlastní zpracování]

Výpočet se zakládá na řešení diferenciální rovnice prvního řádu.

$$P_p = P_a + P_c \tag{5.24}$$

$$P_p = \frac{T_{ch} - T_a}{R_{th(ch-a)}} + m \cdot c \cdot \frac{dT_{ch}}{dt} \tag{5.25}$$



$$\frac{dt}{m \cdot c \cdot R_{th(ch-a)}} = \frac{dT_{ch}}{P_p \cdot R_{th(ch-a)} + T_a - T_{ch}} \quad (5.26)$$

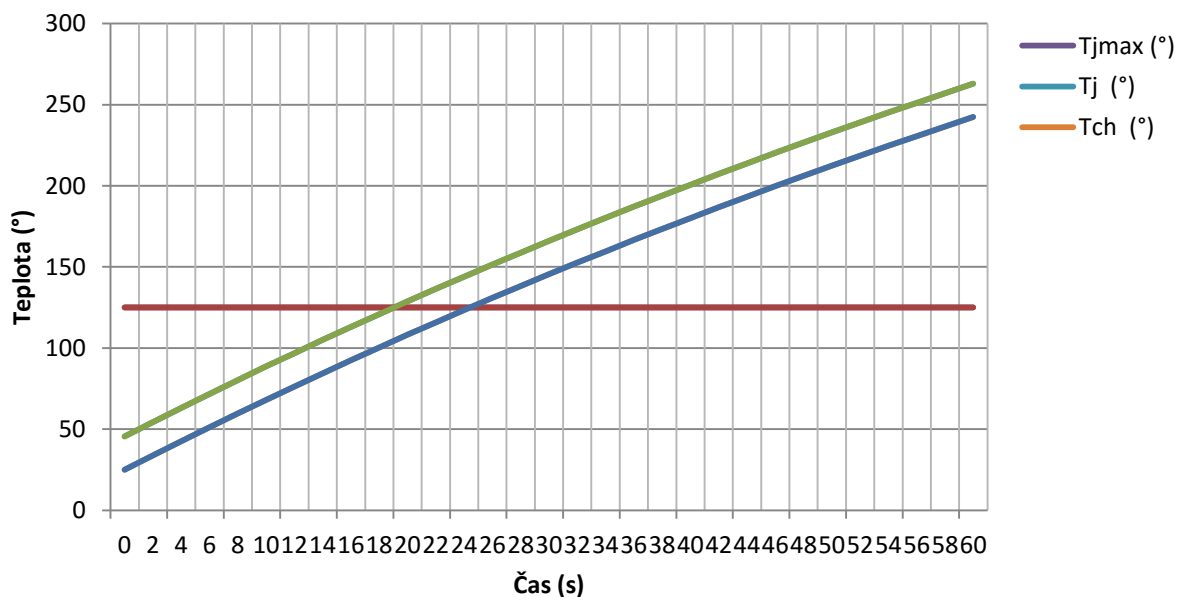
Výsledek řešením diferenciální rovnice je závislost teploty chladiče na čase při počátečních podmínkách  $T_{ch} = T_a$  a  $t = 0$ .

$$T_{ch} = P_p \cdot R_{th(ch-a)} + T_a - P_p \cdot R_{th(ch-a)} \cdot e^{\frac{-t}{m \cdot c \cdot R_{th(ch-a)}}} \quad (5.27)$$

Zde je uvedena závislost teploty přechodu na čase.

$$T_j = P_p \cdot R_{th(j-ch)} + \frac{P_p \cdot R_{th(ch-a)} + T_a - P_p \cdot R_{th(ch-a)}}{e^{\frac{-t}{m \cdot c \cdot R_{th(ch-a)}}}} \quad (5.28)$$

Závislost teploty přechodu a chladiče na čase s vyznačením kritické teploty přechodu.

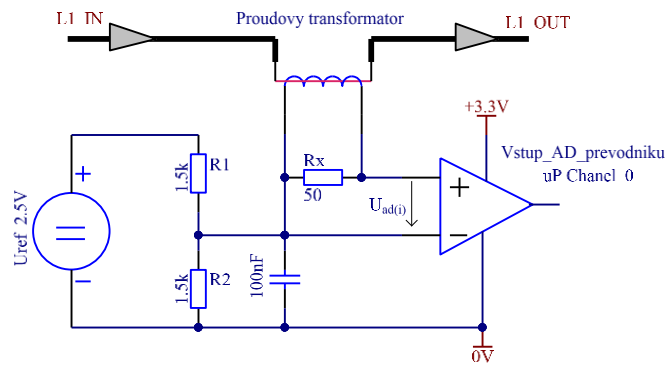


Obr 39 - Teplotní závislost přechodu a chladiče na čase [zdroj: vlastní zpracování]

Tato závislost nám ukazuje hraniční časy rozběhů a doběhů soft startéru, než dojde k nevratným změnám na triaku. Zvolený chladič po několikáté iteraci svými parametry vyhovuje našim podmínkám. Jedná se o profilovaný chladič z hliníku, rozměrech **25x20x55 mm** o hmotnosti **80 g** s tepelným odporem  $R_{th(ch-a)} = 15 \text{ K/W}$ .

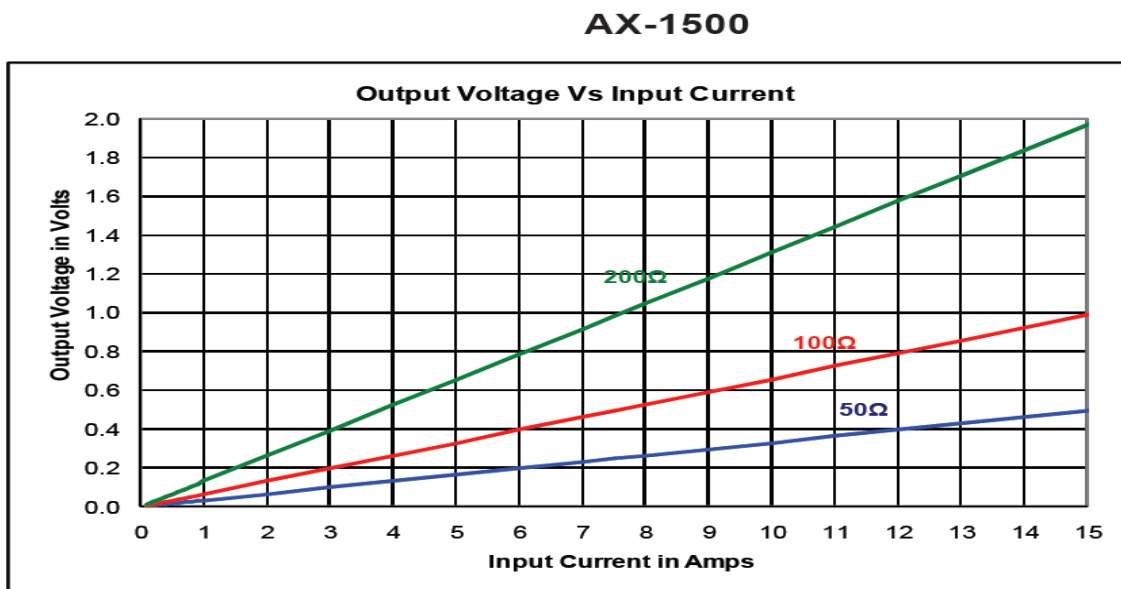
## 5.10. Měření proudu

K měření proudu jsem vybral proudový transformátor s montáží na PCB od fi. Talema typ. AX 1500. K měření používám pouze jednoho měřicího transformátoru a to na referenční fázi **L1**. Předpokládám symetrii připojené zátěže.



Obr 40 - Zapojení proudového transformátoru [zdroj: vlastní zpracování]

Jmenovitý proudový rozsah je **0 – 15 A**. Izolační napětí je **2.5 kV**. Proudové číslo je **3.3** a při připojení čtecího odporu **50 Ω** je chyba linearity zanedbatelná v rozsahu proudů nad jmenovitý rozsah do hodnot **50 A**. Na grafu níže je zobrazena závislost měřeného proudu a napětí generovaném na námi zvoleném čtecím odporu **50 Ω**.

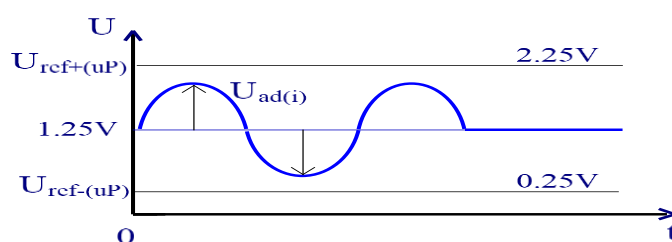


Obr 41 - Proudová závislost na výstupním napětí pro zvolený čtecí odpor [9]

Napětově proudová závislost v oboru efektivních hodnot na odporu  $50 \Omega$  se dá vyjádřit vztahem:

$$U_{itr} = 0.333 \cdot I_{tr} \quad (5.29)$$

Maximální měřená efektivní proudová hodnota je omezena na cca.  $21 \text{ A}$  ta odpovídá maximální okamžité hodnotě napětí na čtecím odporu  $1.00 \text{ V}$  což je referenční napětová hodnota 12 bitového AD převodníku. Tu to napětovou střídavou hodnotu moduluje na stejnosměrnou, pomocí napětového děliče  $1:1$  napájeného externím precizním zdrojem napětí  $2.5 \text{ V}$  a tím vytváří virtuální nulovou hodnotu na potenciálu  $1.25 \text{ V}$  připojenou na invertující vstup AD převodníku. Rozkmit tohoto maximálního napětí je  $0.25 \div 2.25 \text{ V}$ . Na obrázku 42 je názorně zobrazen na modulovaný průběh napětí generovaný proudovým transformátorem.

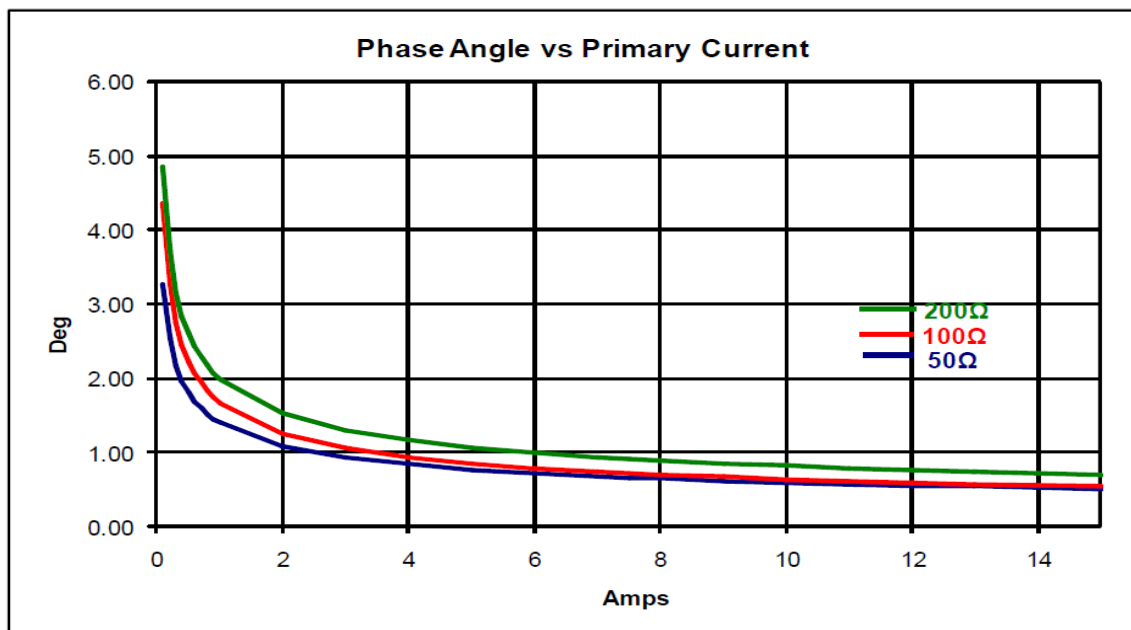


Obr 42 – Na modulovaná střídavá složka napětí [zdroj: vlastní zpracování]

Samotné zpracování tohoto signálu reprezentující proudovou hodnotu je vysvětleno v kapitole Řídící část.

Na dalším grafu je uvedena závislost chyby úhlu na měřeném proudu. V pracovním rozsahu proudů, ve kterých bude softstartér provozován je chyba úhlu menší než  $1^\circ$ . Tato chyba bude kompenzována přímkovou aproximací. Důvodem je získat nejpřesnější hodnoty pro pozdější výpočet hodnot třífázového činného výkonu  $P_\zeta$  a  $\cos\varphi$ .

## AX-1500



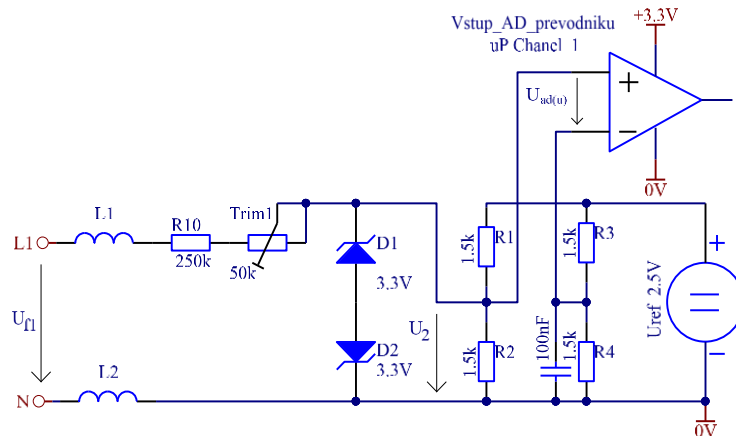
Obr 43 - Závislost chyby úhlu na měřeném proudu [9]

### 5.11. Měření napětí

Měření napětí jsem chtěl koncipovat opět jako galvanicky oddělené za pomoci obyčejného zalévaného transformátoru o výkonu **350 mW**, ale vzhledem k značně deformovanému sekundárnímu výstupnímu napětí dané magnetizačním proudem u malých zalévaných transformátorů je tento způsob měření napětí naprosto nevhodný pro pozdější výpočet činného výkonu, potažmo  $\cos(\varphi)$ .

Měření napětí se uskutečňuje pouze na připojené fázi **L1** a vzhledem k výpočtům dalších závislých veličin se předpokládá souměrnost připojené soustavy.

Transformaci napětí realizuji odporovým děličem za cenu galvanického spojení pracovního nulového vodiče **N** se záporným pólem napájecího napětí řídicí části. Toto střídavé napětí opět modulují na stejnosměrné za pomoci napěťového děliče připojeného pomocí napěťové reference **2.50 V** jako v předešlém případě měření proudových hodnot.



Obr 44 - Zapojení měření napětí [zdroj: vlastní zpracování]

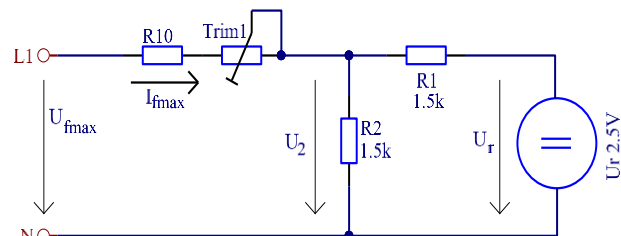
Mezní hodnoty měřeného napětového rozsahu stanovým na základě ČSN 33 0121 Elektrotechnické předpisy – Jmenovitá napětí veřejných distribučních sítí **NN**, kde rozsah fázového napětí pro síť **NN** v místě předávky (elektroměr) distributorem je stanoven na **230 V ± 10% (207 ÷ 253 V)**.

Výpočet napětového děliče provedu v oboru okamžitých napětových hodnot, kde maximální vstupní napětová hodnota musí odpovídat hodnotě vnitřní napětové referenci AD převodníku, což je **±1.00 V** z důvodu rezervy volím **±0.95 V**.

$$U_{fmax} = (R_{10} + T_{rim1}) \cdot I_f + U_2 \quad (5.30)$$

$$I_f = \frac{U_{fmax}}{R_{10} + T_{rim1} + R_2} \quad (5.31)$$

$$U_2 = 1.25 + 0.95 = 2.2 \text{ V} \quad (5.32)$$



Obr 45 - Náhradní schéma pro výpočet děliče [zdroj: vlastní zpracování]

$$R_{10} + T_{rim1} = R_2 \cdot \frac{U_{fmax} - U_2}{U_2} = 1.5 \cdot \frac{(1.1 \cdot \sqrt{2} \cdot 230) - 2.2}{2.2} = 243.5 \text{ k}\Omega \quad (5.33)$$

Tedy volím pro **R<sub>10</sub> = 220 k; 200ppm/K** a pro **T<sub>rim1</sub> = 50 kΩ**

**T<sub>rim1</sub>** je deseti otáčkový cermentový laditelný trimer, kterým nastavím požadované výstupní napětí. Analogový vstup chráním dvojitým transilem **3.3 V** proti přepětí ze strany sítě. Dále

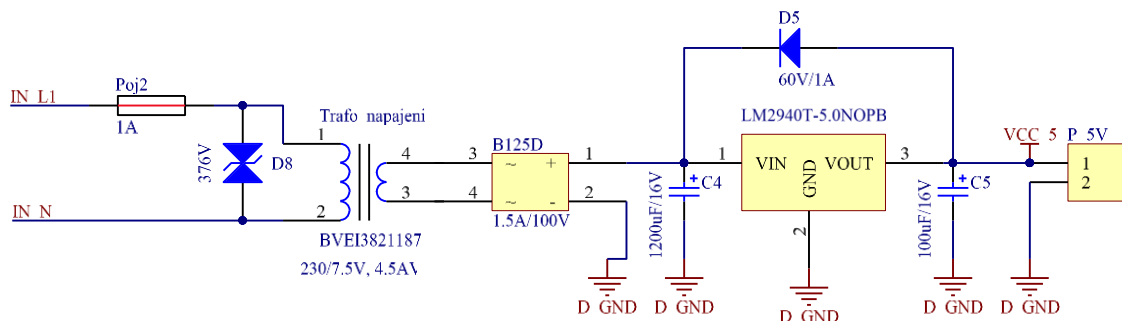
vstupní obvod doplňuji o dvě sériově zapojené tlumivky **100  $\mu\text{H}$**  z důvodu filtrace krátkých napěťových špiček.

Odpory vstupního modulačního děliče  **$R_1, R_2$**  a referenčního děliče  **$R_3, R_4$**  volím precizní **0.1%** s teplotní stabilitou **200 ppm/K**.

## 5.12. Návrh napájení ovládací části

Zařízení je napájeno pomocí transformátoru chráněného proti zkratu polyswitch pojistkou FT120-36 1A/250V a chráněno proti přepětí obousměrným transilem BZW06-376B 376V/600W. Schéma zapojení napájení ovládací části je na obrázku 46.

Prvním krokem je stanovení celkového odebíraného proudu zařízením. Pro napájení ovládací části volím dvě napěťové úrovně. Napěťovou úroveň **5 V DC** pro ovládací výřazovacích relé a úroveň **3.3 V DC** pro napájení mikroprocesoru a měřících periférií.



Obr 46 - Zapojení napájení ovládací části [zdroj: vlastní zpracování]

Odebíraný proud na straně **5 V** je dán vybavovacím cívkovým proudem relé a to **120 mA / relé**.

- $I_{rel3} = 360 \text{ mA}$
- $I_{uP} = 12 \text{ mA}$ ,
- $I_{opt3} = 30 \text{ mA}$
- $I_{dis} = 5 \text{ mA}$
- $I_{temp} = 0.1 \text{ mA}$

Odebíraný proud 3x relé

Odebíraný proud na straně 3.3V je dán odběrem mikroprocesoru při taktu 32Mhz.

Vybavovací proud 3x optotriak (10mA/opto).

Napájecí proud LCD displeje.

Napájecí proud snímače teploty

Celkový ovládací proud:

$$I_{ovl} = 407 \text{ mA}$$

Pro předpokládané sekundární napětí transformátoru  $U_{sef} = 7.5 \text{ V AC}$  stanovým výkon transformátoru jako:

$$P_{t\check{c}} = U_{se} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot I_{ovl} = 3.35 \text{ W} \quad (5.34)$$

$$P_{ts} = \frac{P_t}{\cos \varphi} = \frac{3.35}{0.8} = 4.1 \text{ VA} \quad (5.35)$$

Pro napájení volím transformátor zaléváný s montáží na PCB od fi. HAHN typ: BV EI 382 1187

$$P_{ts} = 4.5 \text{ VA}; \quad U_{pr} = 230 \text{ V AC}; \quad U_{se} = 7.5 \text{ V AC}; \quad I_{se} = 600 \text{ mA AC}$$

Pro usměrnění volím usměrňovací můstek v provedení DIL 4 od fi. DIOTEC SEMICONDUCTOR  
Typ: B125D

$$I_F = 1 \text{ A}; \quad U_{rms} = 250 \text{ V}; \quad I_{trm} = 10 \text{ A}; \quad U_f = 0.8 \text{ V}$$

Hodnota můstku  $I_{trm} = 10 \text{ A}$  je zárukou že můstek vydrží proudové přetížení při zapnutí zařízení způsobené prvotním nabíjením filtrační kapacity. Přibližný odhad zkratového proudu transformátoru při zapnutí, přepočítaný na sekundární stranu:

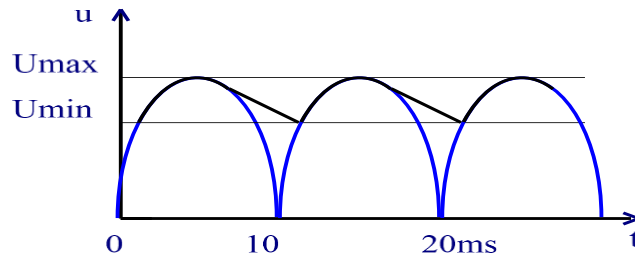
$U_k = 30\% \sim$  napětí nakrátko pro transformátory **5VA**.

$$I_k = I_{sef} \cdot \frac{100}{U_k} = 2 \text{ A} \quad (5.36)$$

$$I_{kmax} = 1.1 \cdot \sqrt{2} \cdot I_k = 3.15 \text{ A} \quad (5.37)$$

Tato hodnota je 3x nižší než  $I_{trm}$  můstku.

Pro spolehlivé fungování lineárního stabilizátoru je třeba věnovat patřičnou pozornost výpočtu filtračního kondenzátoru **C4** umístěného za usměrňovacím můstkem viz. obrázek 46.



Obr 47 - Zvlnění napětí na filtrační kapacitě zapojené za můstkem [zdroj: vlastní zpracování]

Pro výpočet je nutné definovat maximální zvlnění vstupního napětí pro lineární stabilizátor. Volba stabilizátoru padla na stabilizátor s nízkým napěťovým driftem, tak že **LDO** od fi. TEXAS INSTRUMENTS Typ: LM2940T-5.0/NOPB. Napěťový drift je výrobcem stanoven na hodnotu **1.1 V**, minimální vstupní napětí pro stabilizátor je dáno jako:

$$U_{\min} = U_{\text{dr}} + U_{\text{stab}} = 1.1 + 5 = 6.1 \text{ V} \quad (5.38)$$

$$U_{\max} = 0.9 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{Sef}} = 9.6 \text{ V} \quad (5.39)$$

$$U_{\Delta} = U_{\max} - U_{\min} = 3.55 \text{ V} \quad (5.40)$$

$U_{\text{fd}} = 0.8 \text{ V}$  - úbytek napětí v propustném směru pro jednu diodu u můstku

Výpočet filtrační kapacity **C4**:

$$C > \frac{I_{\text{ovl}} \cdot t_s}{U_{\Delta} - 2 \cdot U_{\text{fd}}} > \frac{0.407 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3.55 - 1.6} > 1040 \text{ uF} \quad (5.41)$$

Výpočet maximálního ztrátového výkonu stabilizátoru **5 V** a teploty přechodu:

$$P_{\text{stb}} = U_{\text{dstab}} \cdot I_{\text{ovl}} = \left( \frac{U_{\Delta}}{2} + U_{\text{dr}} \right) \cdot I_{\text{ovl}} \quad (5.42)$$

$$P_{\text{stb}} = (1.78 + 1.1) \cdot 0.407 = 1.17 \text{ W} \quad (5.43)$$

$R_{\text{th(j-c)}} = 1.1 \text{ K/W}$  - tepelný odpor přechodu a pouzdra

$R_{\text{th(c-a)}} = 23.3 \text{ K/W}$  - platí pro pouzdro TO220 vertikální montáž

$T_{\text{jmax}} = 125^{\circ}\text{C}$  - maximální teplota přechodu

$T_{\text{a}} = 25^{\circ}\text{C}$  - teplota okolí



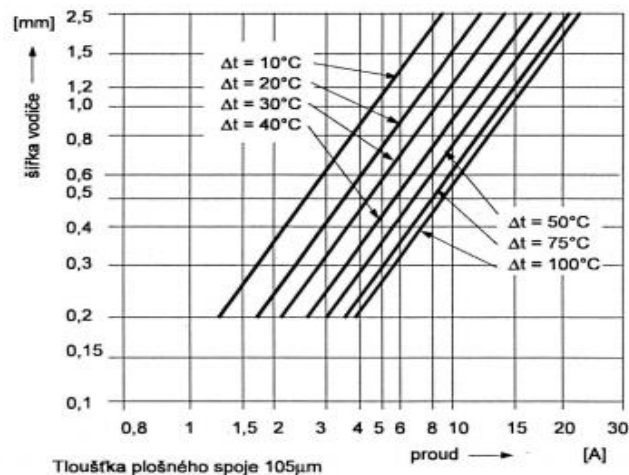
$$T_j = ((R_{th(j-c)} + R_{th(c-a)}) \cdot P_{stb}) + T_a \quad (5.44)$$

$$T_j = ((1.1 + 23.3) \cdot 1.17) + 25 = 53.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.45)$$

Na základě vypočítané hodnoty přechodu, pro daný maximální zatěžovací proud stabilizátorem, vychází teplota hluboko pod hranicí maximální teploty dané výrobcem, proto není třeba příslušný stabilizátor osazovat chladičem.

### 5.13. Umístnění a připojení silové části

Silová část je osazena na standartním laminátu **FR4** tloušťky **1.2 mm** v provedení dvou vrstev s plátováním **105 μm Cu**. Vodivé cesty propojující svorkovnice s triaky jsou realizovány v obou vrstvách s šířkou **3 mm**. Pro stanovení příslušné tloušťky jsem vyšel z normy **IPC - D - 275** ( stanovení pro vnější vodiče ). Viz. obrázek 48:



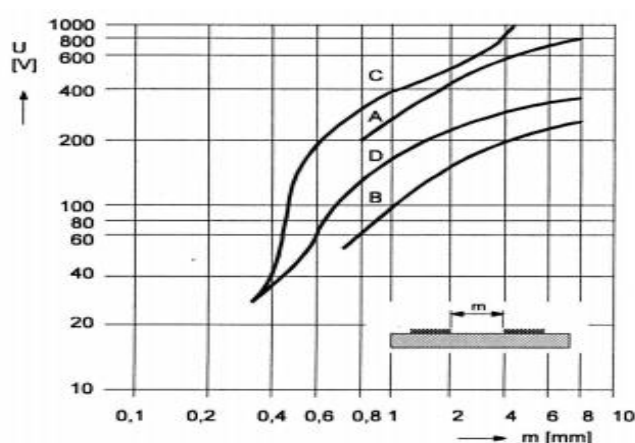
Obr 48 - Závislost šířky vodiče na proudu pro různá oteplení [1]

Výpočet proudové zatížitelnosti vodičů na DPS v závislosti na průřezu vodivé cesty a oteplení vodiče.

$$I_{dps(av)} = 0.015 \cdot (\Delta T^{0.5453}) \cdot (A^{0.7349}) \quad (5.46)$$

- $I_{dps(av)}$  střední dovolená hodnota proudu cestou DPS (A)
- $\Delta T$  přípustné oteplení vodiče ( $^\circ\text{C}$ )
- $A$  plocha průřezu ve čtverečních milsech ( $\text{mil}^2$ )

Teplota plošného spoje by neměla překročit únosnou mez **80 °C**. V žádném případě pak nesmí teplota dlouhodobě překročit teplotu skelného přechodu  $T_g$  základního materiálu plošného spoje. Pro materiál **FR4** je  $T_g = 130 °C$ . Při teplotě okolí  $T_a = 25 °C$  volím maximální přípustné oteplení **30 °C**. Výsledná maximální teplota **DPS < 55 °C**. Tloušťku plátování volím **105 um** z důvodu vyšší mechanické a elektrické odolnosti. Šířku silové cesty volím maximální možnou a to **2.5 mm** s ohledem na nejmenší možnou mezeru v návrhu mezi cestami. Tu jsem stanovil na **3 mm** z důvodu elektrické pevnosti pro daný materiál **FR4** s lakováním. Elektrická pevnost odpovídá cca.  $U_{max} = 630 V$  pro nadmořské výšky do **3000 m** [1]. Viz obrázek 49.



Obr 49 - Závislost napěťové pevnosti na vzdálenosti mezi vodiči u DPS [1]

Proudová zatížitelnost pak vychází:  $I_{dps(av)} = 18 A$  pro jednu cestu

Vzhledem k maximálním provozním podmínkám což je fázový proud efektivní hodnoty **15 A** je tento návrh přijatelný.

Připojení napěťové soustavy k zařízení je realizováno pomocí šroubových svorkovnic s montáží na DPS. Fázové vstupy a výstupy jsou realizovány 2 x třípólová svorkovnice **TB-7.5 P-3P-S**, vstup a výstup ochranného a pracovního nulového vodiče 2 x dvoupólová svorkovnice **TB-7.5-P-2P-S**.

Parametry svorkovnice:

$$I_n = 24A$$

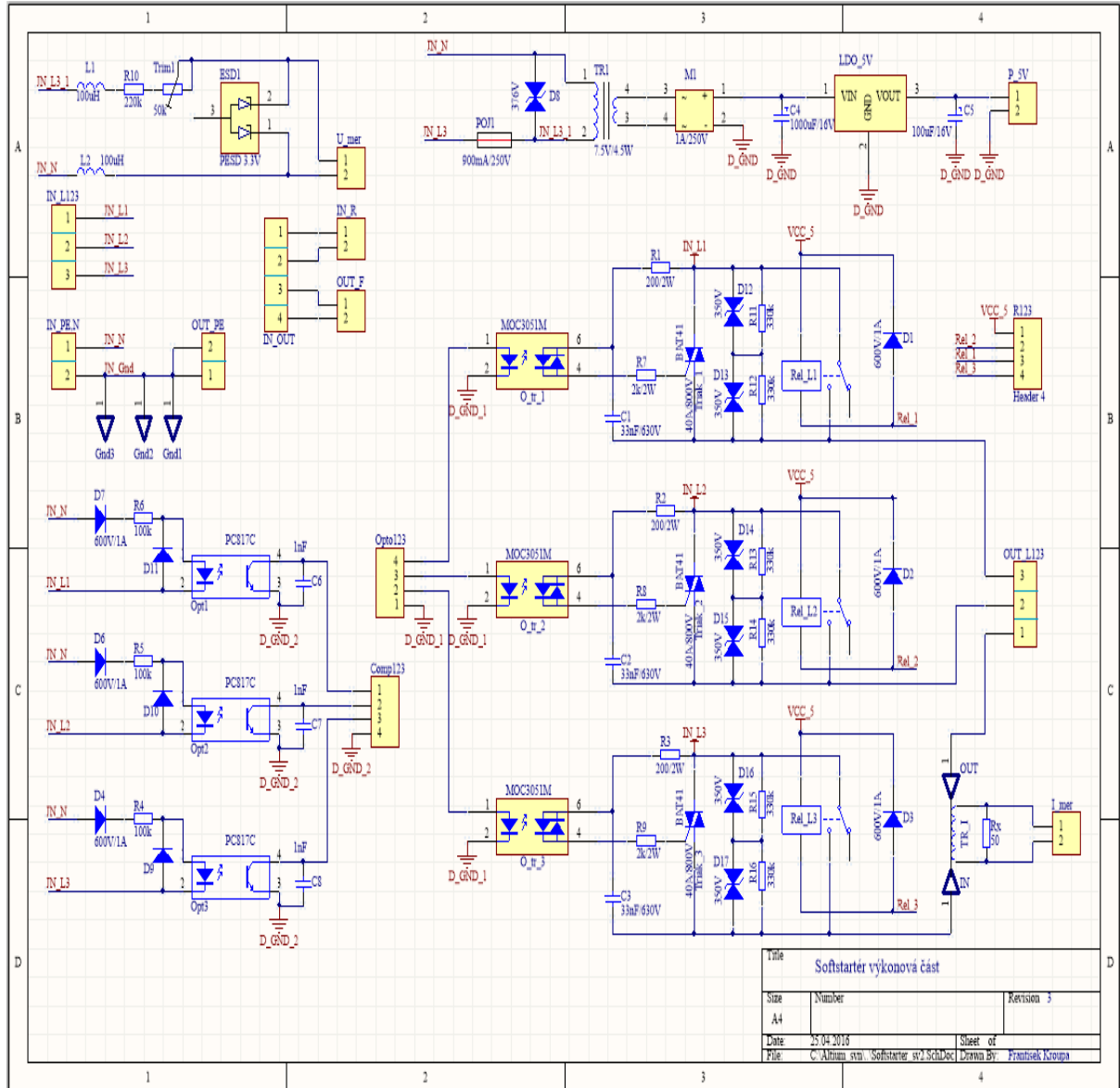
$$U_n = 500V$$

$$S_n = 2.5 \text{ mm}^2$$



Obr 50 - Třípólová svorkovnice [zdroj: vlastní zpracování]

## 5.14. Celkové schéma silové části softstartéru

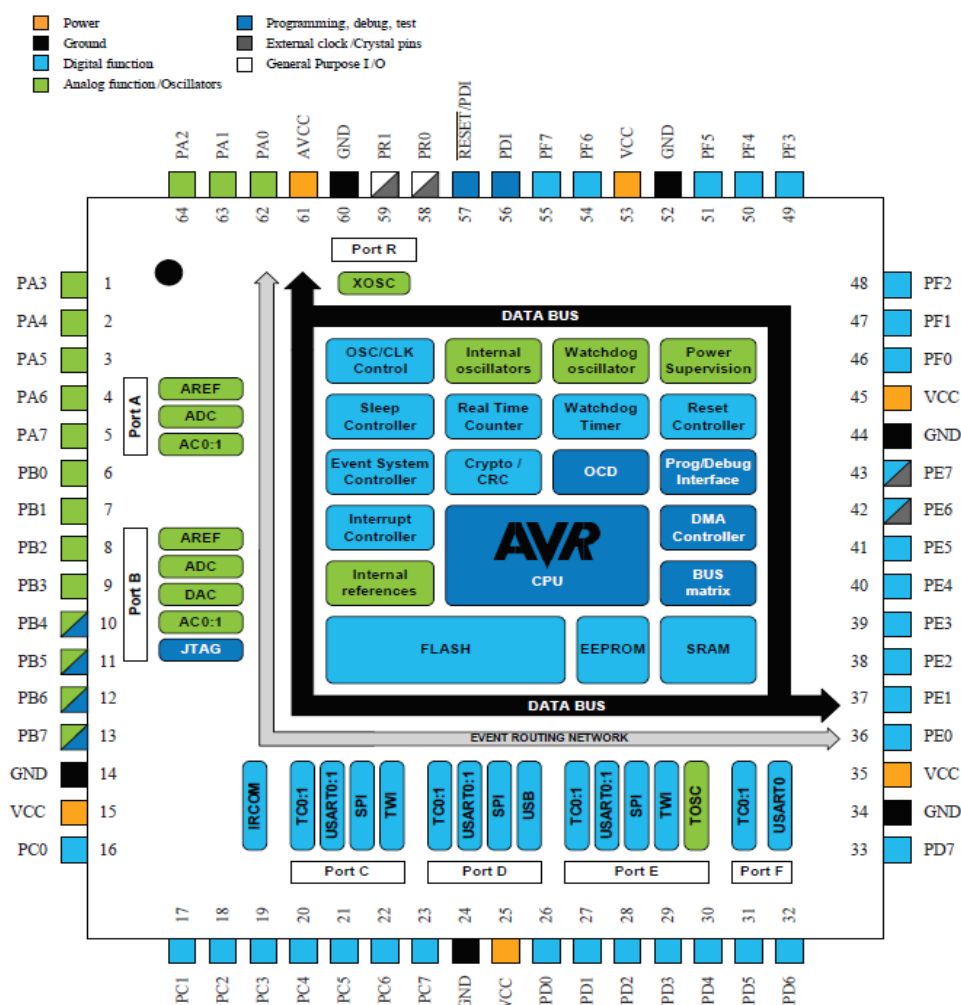


Obr 51 - Schéma výkonové části [zdroj: vlastní zpracování]

## 6. ŘÍDÍCÍ ČÁST

Řídící část je postavena na osmibitovém mikrořadiči RISC Atxmega128A3u s výpočetním výkonem **1Mips/1Mhz**. Jedná se o nejvyšší řadu z rodiny osmibitových mikrokontrolérů od fi. Atmel, který disponuje pokročilým událostním systémem přerušení, 8x16bitovými čítači/časovači, perifériemi pro zpracování analogového signálu (4 x 12bitový AD převodník, 2 x 12bitový DA převodník), DMA kontrolérem a v neposlední řadě bohatou konfigurovatelností vstupně výstupních pinů. Dále obsahuje

- 128KB paměti Flash
- 8KB paměti Sram
- 4KB paměti Eeprom



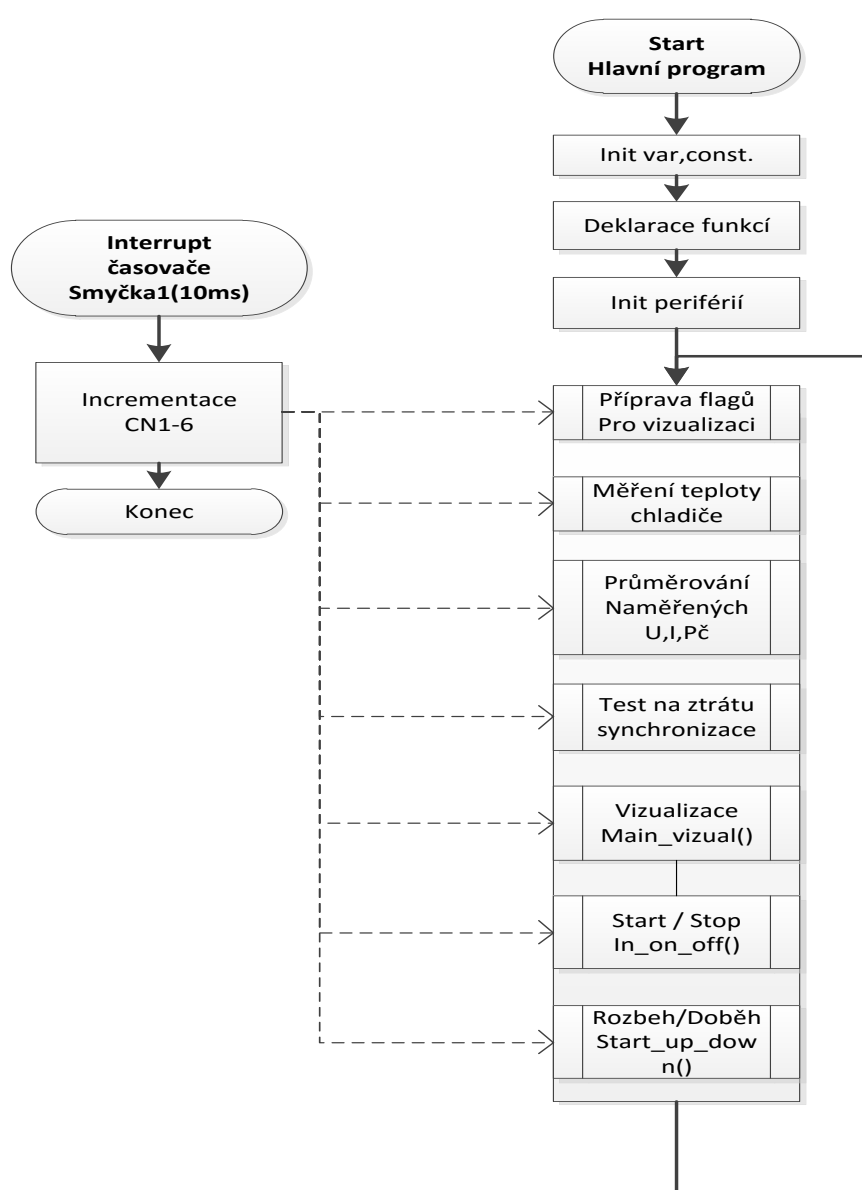
Obr 52 - Mikrokontrolér ATxmega 128a3u [2]

K programování mikrořadiče jsem použil vývojové prostředí od fi.Mcs Elektronik, Bascom-AVR v2.0.7.8, jehož jsem oprávněným vlastníkem. Jedná se o vysoko úrovněové programování založené na syntaxi programového jazyka BASIC. K zavádění kódu do řadiče používám sériovou linku **3.3V TTL** a programového vybavení Mcs-bootloader. Velikost výsledného strojového kódu se pohybuje kolem **12 kB** a v prostředí Bascom je prezentována cca. 1800 řádky, což znamená v další revizi záměnu mikrořadiče za pinově kompatibilní ATxmega16 s 16 kB flash v nižší cenové hladině. Dalším obvodem, který používám v řídicí části je převodník k měření teploty chladiče. Jedná se o obvod od fi. Microchip MCP 9800 v pouzdře 5-pin SOT 23-5 s teplotním rozsahem (  $-55^{\circ} \div 125^{\circ}$ ) v rozlišení 12bit. Komunikaci s tímto obvodem zajišťuji pomocí virtualizované přístrojové sběrnici I2C na portech mikrořadiče PD3,4. A posledním obvodem je precizní napěťová reference MCP1525  $U_{out} = 2.50 V \pm 50 ppm/1^{\circ}C$  sloužící jako referenční zdroj napětí pro dělič s výstupem **1.25 V** připojeným na invertující vstup AD převodníku mikrořadiče.

Programový kód je v mikrořadiči vykonáván na hodinovém taktu 32Mhz, který zajišťuje vnitřní kalibrovatelný RC oscilátor. Řízení soft startéru se dá rozdělit na dvě základní běhové úrovně. První běhovou úrovní je hlavní program, proces běžící na popředí, který zajišťuje základní řídicí algoritmy, obsluhu kláves a LCD displeje, přípravu dat pro časování optotriaků, zachytávání a obsluhu poruchových stavů atd. Další úrovní jsou asynchronní události běžící na pozadí, které jsou vyvolávány danými přerušeními. Jako synchronizace na průchod napětí nulu fáze L1, časování zapalovacích impulzů pro optotriaky, časování AD převodů U, I.

## 6.1 Hlavní program

Celý zdrojový kód s komentářem je součástí přílohy na CD, proto zde provedu pouze základní popis vybraných sub procesů hlavního programu. Základní struktura hlavního programu je popsána vývojovým diagramem na obrázku 53. Jedná se o proces běžící v nekonečné smyčce, kde jeho jednotlivé sub procesy jsou synchronizovány časovačem **Smyčka1** s nejmenším časovým krokem **10 ms**. Potřebné časové úseky jsou realizovány inkrementací proměnných **Cn1-6** a následné komparaci s požadovanými hodnotami pro vybrané sub procesy.



Obr 53 – Vývojový diagram hlavního programu [zdroj: vlastní zpracování]

## 6.1.1 Vizualizace

K zobrazování parametrů používám 4x20 znakový LCD displej ze standardním řadičem HD8760 zapojeným pomocí paralelní sběrnice konfigurovaném ve čtyř bitovém módu. Hodnoty jsou prezentovány celkově na třech obrazovkách (Menu1,2,3). Pohyb v menu, změnu parametrů zajišťuji pomocí tlačítek Up/Down. Vnoření, editaci pomocí tlačítek En/Esc. Menu1,2 jsou pouze informačního charakteru. Menu3 je editační určeno k zadávání vstupních parametrů.

LCD Menu1 - zobrazuje nejdůležitější provozní parametry SS

- **U** – Efektivní hodnota fázového napětí
- **I** – Efektivní hodnota proudu fáze L1
- **Pc** – Činný výkon
- **Pz** – Zdánlivý výkon
- **Run** – 0 => vypnuto, 1=> zapnuto
- **Toč** – Točivost připojené soustavy L= Levá, P = Pravá
- **Tch** – Teplota chladiče
- **cos φ** – Aktuální hodnota

### LCD Menu1

<b>U:</b> xxx.x V	<b>Run:</b> x xx s
<b>I:</b> xx.xx A	<b>Toč:</b> L/P
<b>Pc:</b> xxxx W	<b>Tch:</b> xx.x °C
<b>Pz:</b> xxxx VA	<b>cosφ:</b> x.xx

Obr 54 - Zobrazení Menu1 na LCD

LCD Menu2 - zobrazuje statistiku chodu SS

- **Cs** – Celkový počet rozběhů
- **Cs24** – Počet rozběhů za 24 hodin
- **MI** – Doba chodu od posledního zapnutí
- **Mh** – Celková doba chodu
- **W** – Celková spotřebovaná energie

### LCD Menu2

<b>Cs:</b> xxxx	<b>Cs24:</b> xxx
<b>MI:</b> x.xx h	<b>Errl:</b> x
<b>Mh:</b> xxxxx.xx	h
<b>W:</b> xxxxx.xxx	kWh

Obr 55 - Zobrazení Menu2 na LCD

LCD Menu3 - měnitelné parametry SS

- **Casu** – Doba rozběhu
- **Casd** – Doba doběhu
- **Resp** – Reset parametrů Menu2
- **Cosj** – Hodnota stanovující konec rozběhu
- **StrU** – Startovací napětí
- **loch** – Aktuální proudová hodnota ochrany
- **Ivyp** – Maximální proud při rozběhu
- **Cmax** – Maximální povolený počet startů za hodinu

### LCD Menu3

<b>Casu:</b> xx s	<b>StrU:</b> xx %
<b>Casd:</b> xx s	<b>loch:</b> x.x A
<b>Resp:</b> x	<b>Ivyp:</b> xx.x A
<b>Cosj:</b> x.xx	<b>Cmax:</b> x

Obr 56 - Zobrazení Menu3 na LCD

## 6.1.2 Start/Stop

Tato procedura je napsána jako stavový automat. S průchodem každých **10 ms** testuje stav vstupního portu **PF6** určeného pro ovládání soft startéru (start, stop) a zároveň všechny definované poruchové stavy. Definovaných poruchových stavů je celkem 6.

- Ztráta fáze
- Ztráta synchronizace
- Překročení teploty na chladiči triaků **Tmax** (80°C)
- Příliš dlouhý rozběh **trmax** (20 s)
- Reakce nadproudové ochrany **Ioch** (zvolená hodnota A)
- Překročení maximálního počtu startů do hodiny **Cmax**

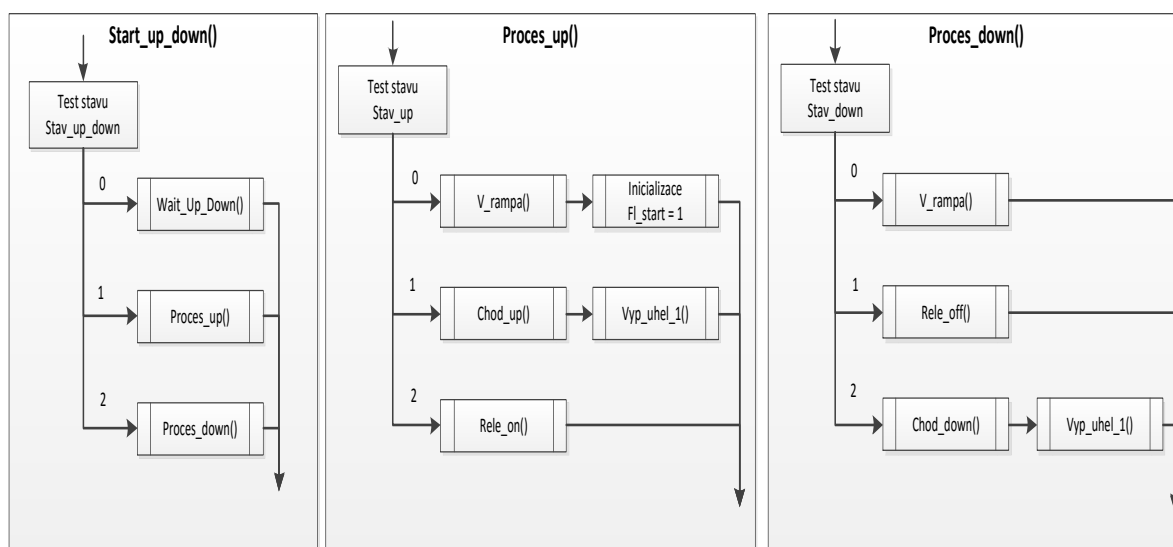
Při splnění alespoň jedné z chybových podmínek dochází k vyvolání procedury **Nouzovy\_stop()**, která na základě provozního stavu **SS** zajistí korektní odstavení. V případě stavu rozběhu dojde k okamžitému vypnutí časování triaků. V ustáleném stavu po konci rozběhu dojde k vypnutí vyřazovacích **Relé1,2,3** a po uplynutí časového úseku **60 ms** k vypnutí časování triaků. Časový úsek **60 ms** by měl být dostatečný k zajištění odpojení kontaktů relé a tím zabránit jeho přetěžování. Tento poruchový stav se na **LCD** displeji zobrazí jako hláška **NOUZOVY STOP** s poruchou, která ho vyvolala. Podmínkou ukončení tohoto stavu je odstranění poruchy, nastavení ovládacího vstupu do OFF a jeho potvrzení tlačítkem **Esc**. Při splnění všech bezporuchových podmínek a požadavku na start je nastaven centrální flag **In\_start = 1** v opačném případě **In\_start = 0**, který zajistí odpovídající chování navazujících procesů viz. níže.

## 6.1.3 Rozběh/Doběh

Jedná se opět o stavový automat s průchodem každých **10 ms** se třemi stavy. V provozním stavu OFF a nebo v ustáleném stavu po rozběhu, se neustále vykonává procedurální rutina **Wait\_Up\_Down()**, která čeká na změnu stavu flagu **In\_start**. V případě požadavku na start (předchozí stav **OFF**, **In\_start =1**) dojde k vykonávání opět dalšího sub automatu **Proces\_up**, také se třemi stavy. Startovací stav **Stav\_up=0** v **Proces\_up** se vykoná jako první a pouze jednou. V tomto okamžiku dojde k výpočtu rozběhové rampy na základě



vstupních parametrů a nastavení interního flagu **Fl\_start = 1**, který zajišťuje povolení přístupu k výstupním portům **PC.5-7** buzení opto triaků v rutinách časování řídicího úhlu. Tím to dochází k přepnutí na **Stav\_up=1** a dalšími průchody k vykonávání rutin **Chod\_up()**,**Vyp\_uhel\_1()** do okamžiku ukončení rozběhu. Dále nastává přepnutí na **Stav\_up=2**, kde se vykoná rutina **Rele\_on()** to je sepnutí vyřazovacích relé. Tímto je rozběh ukončen a řízení vráceno do rutiny **Wait\_Up\_Down()**.



Obr 57 - Vývojový diagram Rozběh/Doběh [zdroj: vlastní zpracování]

### Popis funkce **V\_rampa()** s parametry:

- **Uhel\_min\_set** - minimální úhel otevření triaků (konstanta 4° úhlové)
- **Cv\_csup** - čas rozběhu (hodnota nastavitelná v Menu3)
- **Uhel\_max\_set** – maximální neboli startovací úhel otevření triaků (hodnota vypočtená ze startovacího napětí opět parametr v Menu3)

Výstupem funkce **V\_rampa()** je počet **10 ms** intervalů na úhlový **1°**.

Výpočet parametru **Uhel\_max\_set** stanovuji na základě vstupních parametrů  $\cos \varphi_k$  a startovacího napětí.  $\cos \varphi_k$  je konstanta s hodnotou **0.55**. Výpočet je realizován přibližnou aproximací (6.1) na základě pracovní charakteristiky třífázového měniče pro zátěž čistě činného charakteru. Z důvodu omezeného výpočetního výkonu aproximuji charakteristiku na tabulku hodnot v rozsahu **(0-149)** s názvem **Uhel\_proc\_0** s krokem **1°**

(číslo pozice = úhel, pozice = procentní napětí) dále vytvářím tabulku inverzní v rozsahu **(0-100)** s názvem **Proc\_uhel\_0** (číslo pozice = procentní napětí, pozice = úhel). Na základě těchto tabulkových hodnot a pomocí jednoduché lineární závislosti stanovuji startovací řídicí úhel v závislosti na startovacím napětí.

### Popis rutiny **Chod\_up()**:

Úkolem rutiny je čítání počtu průchodů a ty porovnává s hodnotou vygenerovanou funkcí **V\_rampa()**. V případě shody dojde k dekrementaci o jedničku řídicího úhlu a nulování čítače průchodů. Proces začíná od hodnoty řídicího úhlu **Uhel\_max\_set** a dekrementace je ukončena dosažením hodnoty řídicího úhlu **Uhel\_min\_set**. Tímto způsobem je dosaženo stupňovitěho snižování řídicího úhlu v daném časovém úseku (čas rozběhu). Dalším úkolem je porovnávání měřeného proudu s hodnotou **I<sub>vyp</sub>** maximálního rozběhového proudu, který je opět parametr nacházející se v **Menu3**. V okamžiku překročení této hodnoty je snižování řídicího úhlu pozastaveno a čeká se na pokles. Proces může být násilně ukončen překročením maximální doby stanovené pro rozběh **trmax**. Tento stav je zachycen procedurou **In\_on\_off()**, kapitola Start/Stop a dochází k odstavení měniče s poruchou.

### Popis rutiny **Vyp\_uhel\_1()**:

Úkolem rutiny je výpočet 6 x 16 bitových hodnot pro komparační registry na základě aktuálního řídicího úhlu. Těmito hodnotami se aktualizují komparační registry v asynchronní rutině **Comp\_l1()**, kapitola Asynchronní události, která je vyvolána přerušením na hranově citlivém vstupu portu E2 od periférie zjišťující průchod napětí fáze L1 nulovou hodnotou.

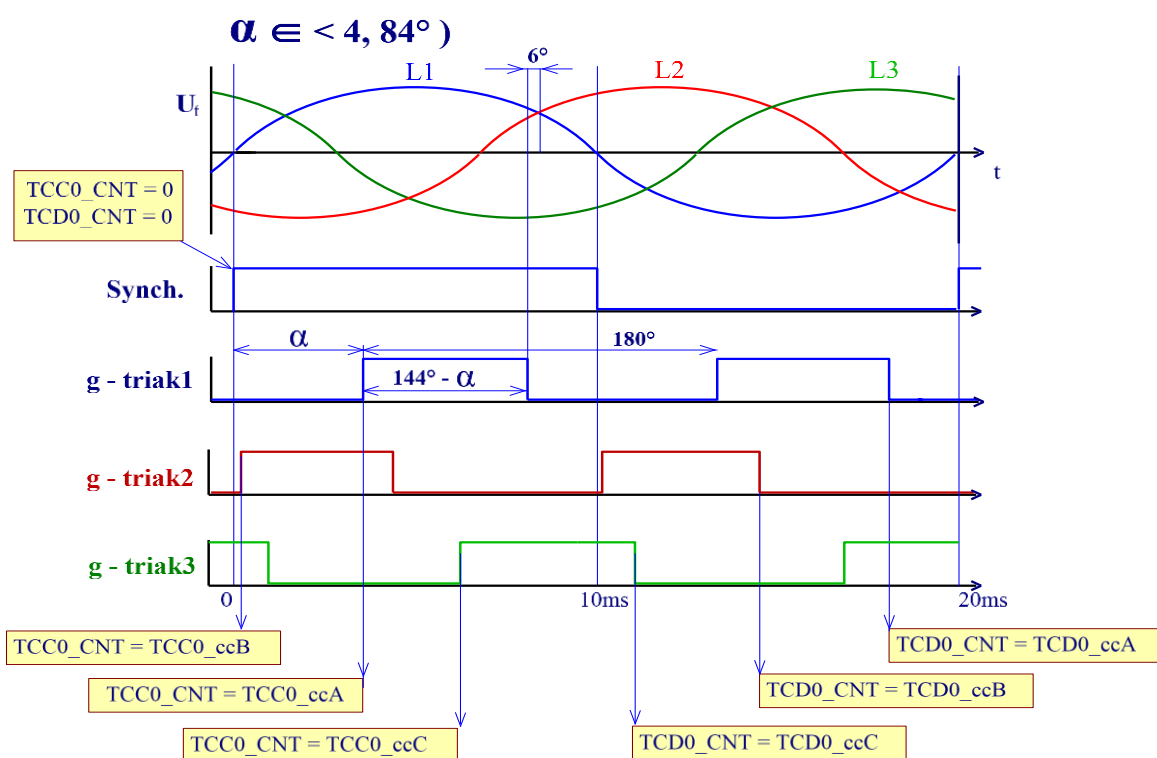
K časování jednotlivých triaků jsem využil dvou časovačů/čítačů nakonfigurovaných jako 16 bitové s před děličkou **1/64** systémových hodin (32Mhz). Tzv. jeden **digit = 2 μs**. Velikost časového okna časování je **20 ms** (1 perioda) a vždy začíná od okamžiku vzestupné hrany průchodu napětí nulou od fáze L1. Nejmenší časovatelnou hodnotou je **1°** úhlový. Tomu odpovídá časová hodnota **~55 μs => ~ 27 digitů čítače**.

U každého čítače lze aktivovat 4 komparační registry, konfiguruji pouze tři.

Pro čítač **TCC0\_CNT** to jsou (**Tcc0\_cca**, **Tcc0\_ccb**, **Tcc0\_ccc**)

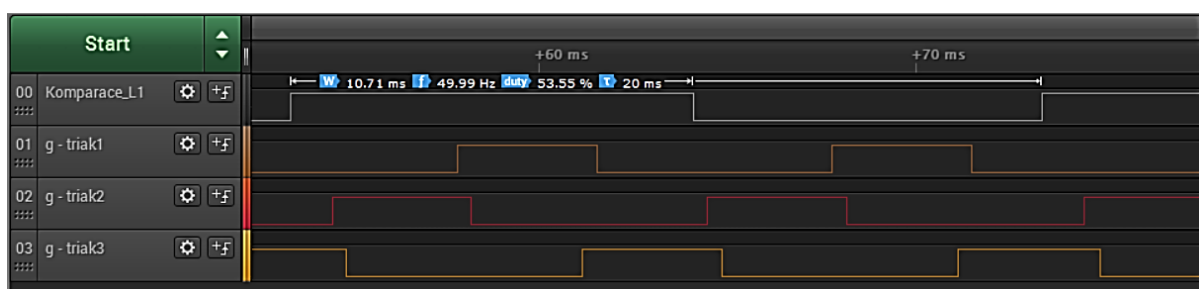
Pro čítač **TCD0\_CNT** to jsou (**Tcd0\_cca**, **Tcd0\_ccb**, **Tcd0\_ccc**)

Pro časování používám dvou nezávislých režimů řízení, kapitola TMN. Pro rozsah řídicího úhlu  $4^\circ \leq \alpha < 84^\circ$  celo impulsní režim.



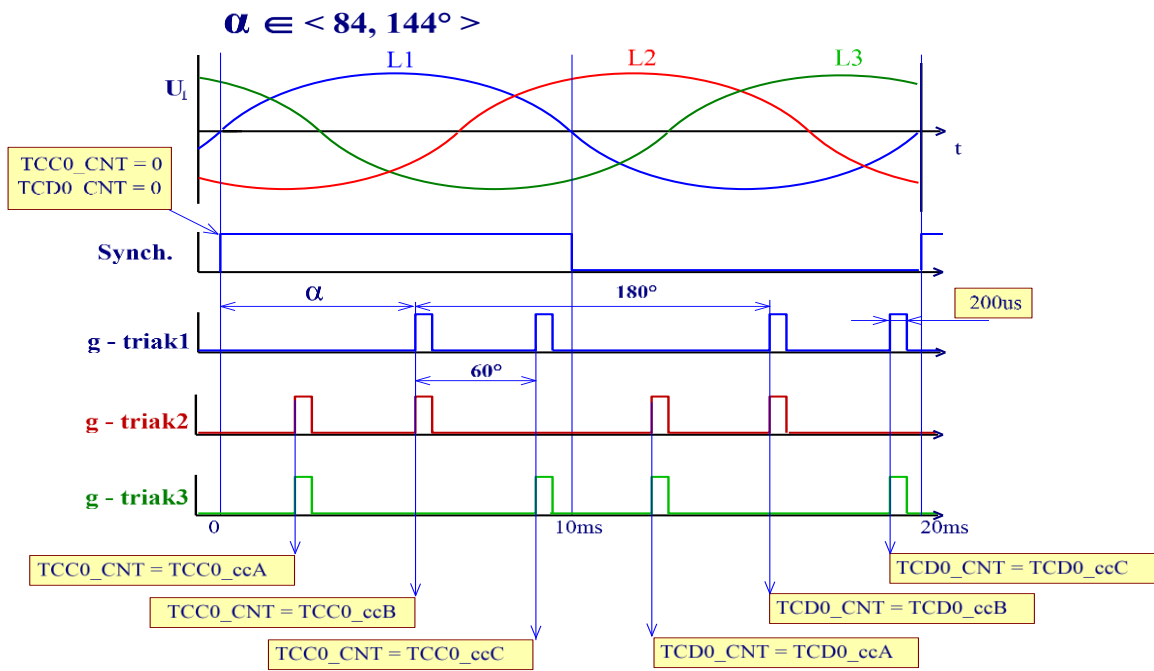
Obr 58 - Celo impulsní režim časování [zdroj: vlastní zpracování]

Na obrázku 59 je zobrazen reálný průběh zapalovacích impulsů pro řídicí úhel  $\alpha = 80^\circ$ . Obrázek získán z měření na logickém analyzátoru Saleae Logic 1.2.8.

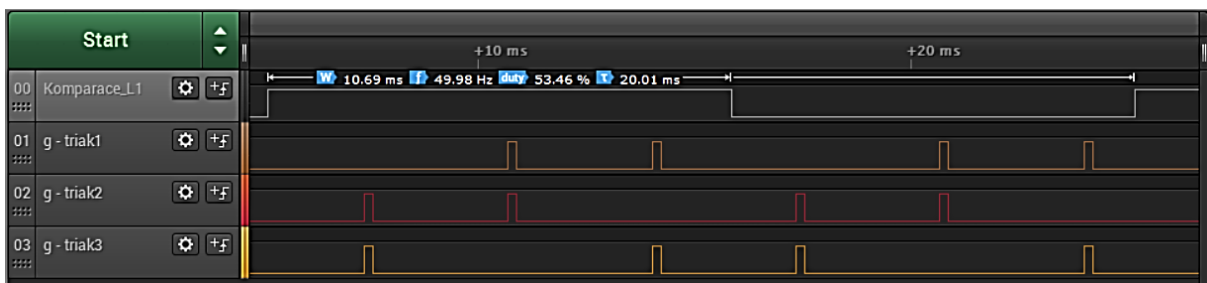


Obr 59 - Reálné časování optotriaků SS pro úhel  $80^\circ$  [zdroj: vlastní zpracování]

Pro rozsah řídicího úhlu  $84^\circ \leq \alpha \leq 144^\circ$  impulsní režim.



Obr 60 - Impulsní režim řízení [zdroj: vlastní zpracování]

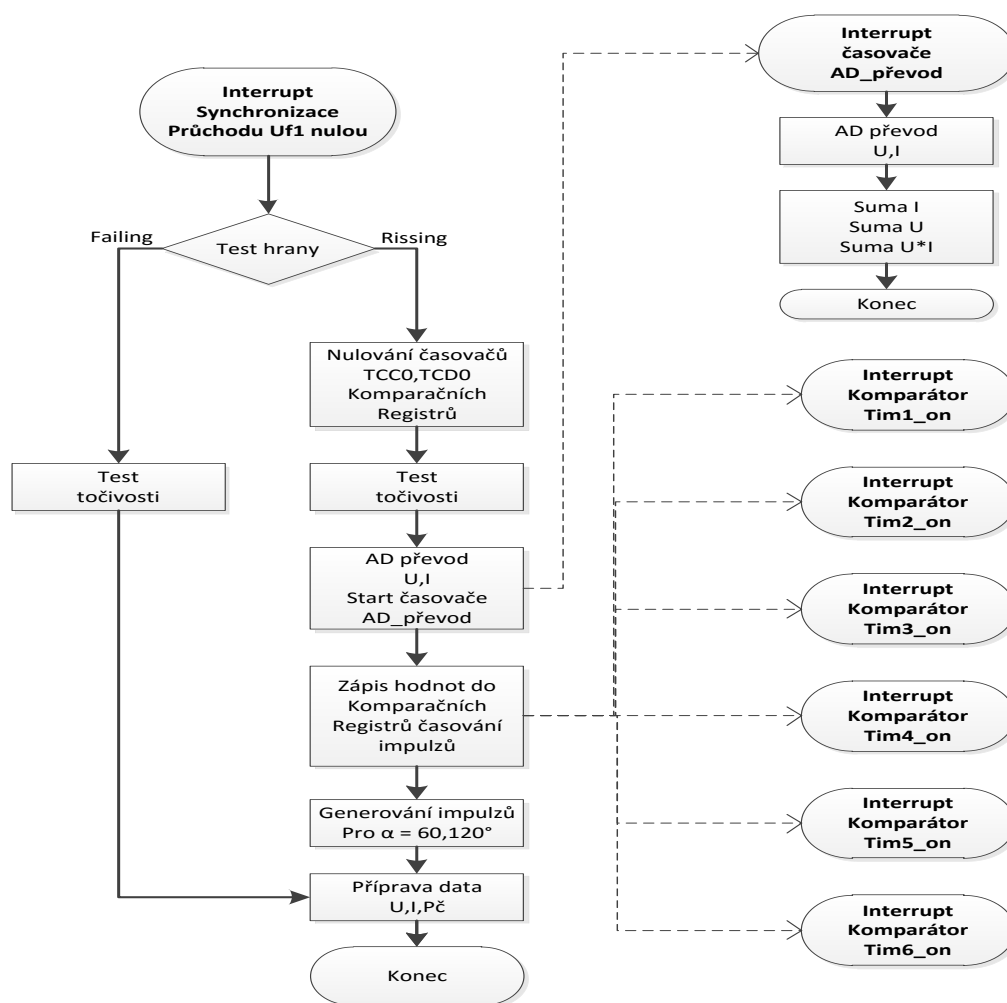


Obr 61 - Reálné časování optotriaků SS pro úhel 100° [zdroj: vlastní zpracování]

## 6.2 Asynchronní události

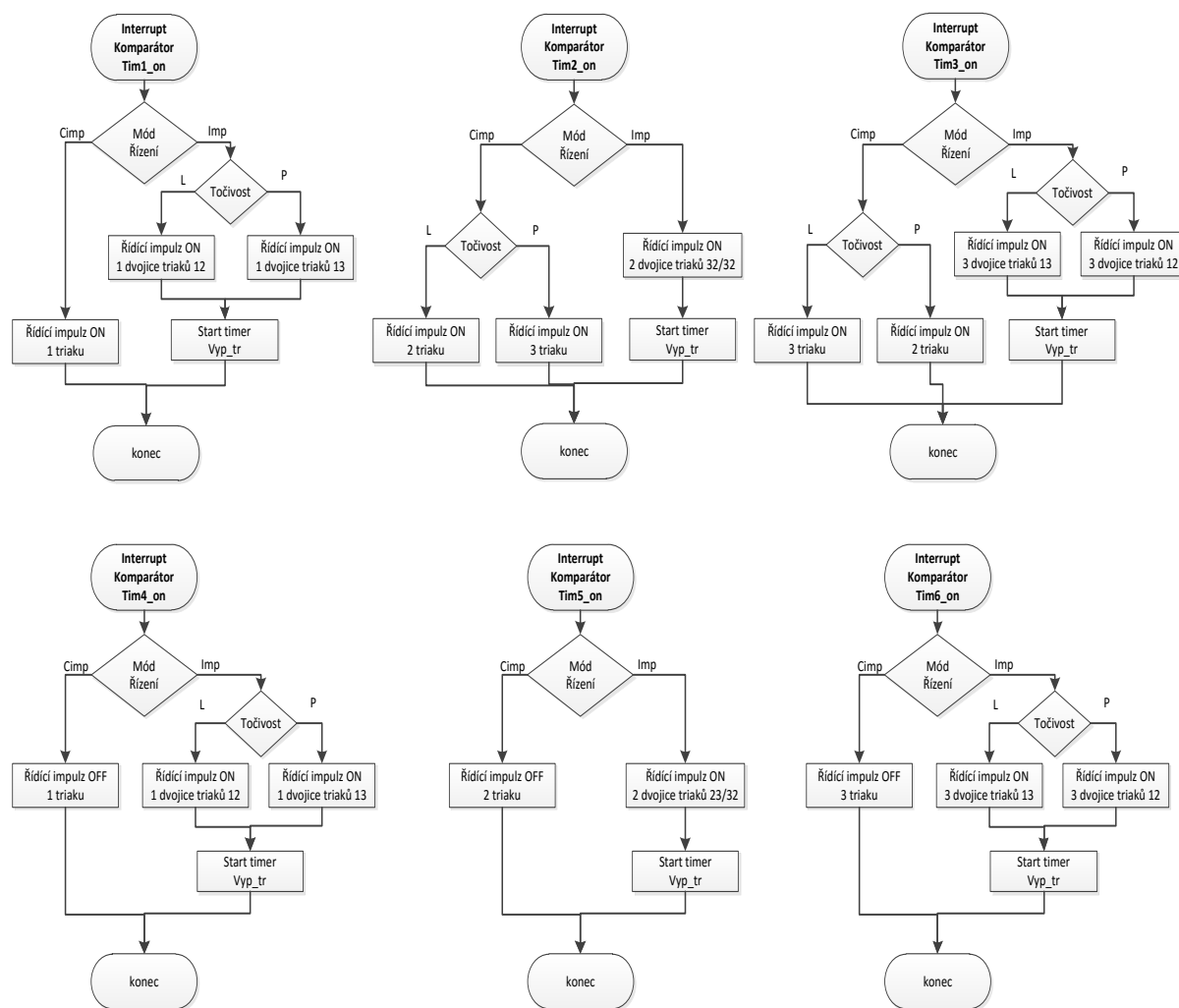
### 6.2.1 Synchronizace, časování

Na obrázku 62 je zobrazen velice zjednodušený vývojový diagram základních procesů běžících na pozadí. Asi nejdůležitějším procesem z hlediska časování je synchronizace na průchod fázového napětí nulovou hodnotou. Jedná se o rutinu, která je vyvolána přerušením od vstupního portu **E2** mikrořadiče s nejvyšší prioritou. Tento port je konfigurován jako hranově citlivý. Tato rutina je vykonána každým průchodem napětí nulou jak na sestupnou tak vzestupnou hranu. Pro synchronizaci je směrodatná vzestupná hrana, to je přechod fázového napětí nulou do kladných hodnot. V tom to okamžiku nastává nulování čítačů **TCCO\_CNT**, **TCDO\_CNT**, **TCFO\_CNT**(AD převodník) a jejich opětovný start. Testování točivosti, kompletnosti připojené třífázové soustavy.



Obr 62 - Vývojový diagram asynchronních událostí [zdroj: vlastní zpracování]

První AD převod U, I. Naplnění komparačních registrů vypočítanými hodnotami z funkce **Vyp\_uhel\_1()** a dále viz vývojový diagram. Od tohoto okamžiku dochází k čítání čítačů **TCC0\_CNT**, **TCDO\_CNT** a v každém strojovém cyklu mikrořadiče k porovnávání jeho obsahu s patřičnou sadou komparačních registrů. V okamžiku schody dojde k vyvolání přerušení a vykonání rutiny obsluhy přerušení od požadovaného komparačního registru. V těchto rutinách přerušení dochází na základě módu řízení a točivosti k aktivaci výstupních portů pro buzení optotriaků a dále triaků. Jedná se o porty mikrokontroléru **PC 5,6,7** konfigurované jako výstupní v módu **Totem**. Tato konfigurace výstupního portu zaručuje buzení logických hodnot **log 0** a **log 1** relativně vysokými proudovými hodnotami (komplementární zapojení, zesilovač třídy B).



**Obr 63 – Vývojový diagram obsluhy přerušení od jednotlivých komparačních registrů [zdroj: vlastní zpracování]**

## 6.2.2 AD převod

K měření vstupních veličin napětí, proudu jsem použil jeden implementovaný AD převodníky v mikrokontroléru ATxmega s dvěma kanály ADCA0, ADCA1. Kanál ADCA0 slouží k převodu napětí a kanál ADCA1 k převodu proudu. Převodníky jsou konfigurovány s rozlišení 12bit v diferenciálním signed módu s před děličkou **1/8** a vnitřní napěťovou referencí **1.00V**. Hodnota hodinového signálu taktování odpovídá **1Mhz**. V této konfiguraci je vstupní napěťová hodnota reprezentována číslem (digitem) **RES** podle vztahu (6.1). Hodnota **TOP** pro signed mód je 2047.

$$\mathbf{RES} = \frac{\mathbf{U_{in+}} - \mathbf{U_{in-}}}{\mathbf{U_{ref}}} \cdot \mathbf{TOP} \quad (6.2)$$

Hodnota RES pro  $\Delta U_{in} = -1.00 \text{ V} \Rightarrow -2047$  a pro  $\Delta U_{in} = +1.00 \text{ V} \Rightarrow 2047$ . Konstanta převodníku  $\mathbf{K_{ad}} = \mathbf{0.488 \text{ mV/digit}}$ .

Efektivní hodnoty napětí, proudu získávám výpočtem ze středních hodnot postupně vzorkovaného vstupního signálu. A to z důvodu se vyhnout výpočtům v „plovoucí čárce“ (odmocnina ze sumy kvadrátů nevzorkovaných hodnot) přímý výpočet efektivní hodnoty. K vzorkování hodnot dochází v pravidelných intervalech **100 μs** vždy po dobu trvání jedné periody síťového kmitočtu. Začátek cyklu je odstartován v rutině synchronizace na vzestupnou hranu signálu. Zde je provedeno první vzorkování kanálů ADCA0, ADCA1, nulování a start čítače **TCF0\_CNT**, který způsobuje periodické volání rutiny **AD\_převod**, každých **100 μs**. V této rutině dochází k vzorkování a postupné sumaci absolutních hodnot pro pozdější výpočet U, I. U přípravy hodnot k výpočtu činného výkonu dochází k postupné sumaci okamžitých hodnot vzorků U, I již bez absolutní hodnoty. Proces končí v rutině synchronizace, kde dojde k výpočtu střední hodnot ze sum vzorků pro U, I, Pč. Ty to hodnoty jsou dále předány pro zpracování v hlavní smyčce programu (násobení konstant převodů, průměrování).

Výsledkem jsou tyto vztahy:

$$I_{ef} = K_i \cdot \frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} |(\text{RES}_i \cdot K_{ad}) - I_{ofst}| \quad (6.3)$$

$$U_{ef} = K_u \cdot \frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} |(\text{RES}_u \cdot K_{ad}) - U_{ofst}| \quad (6.4)$$

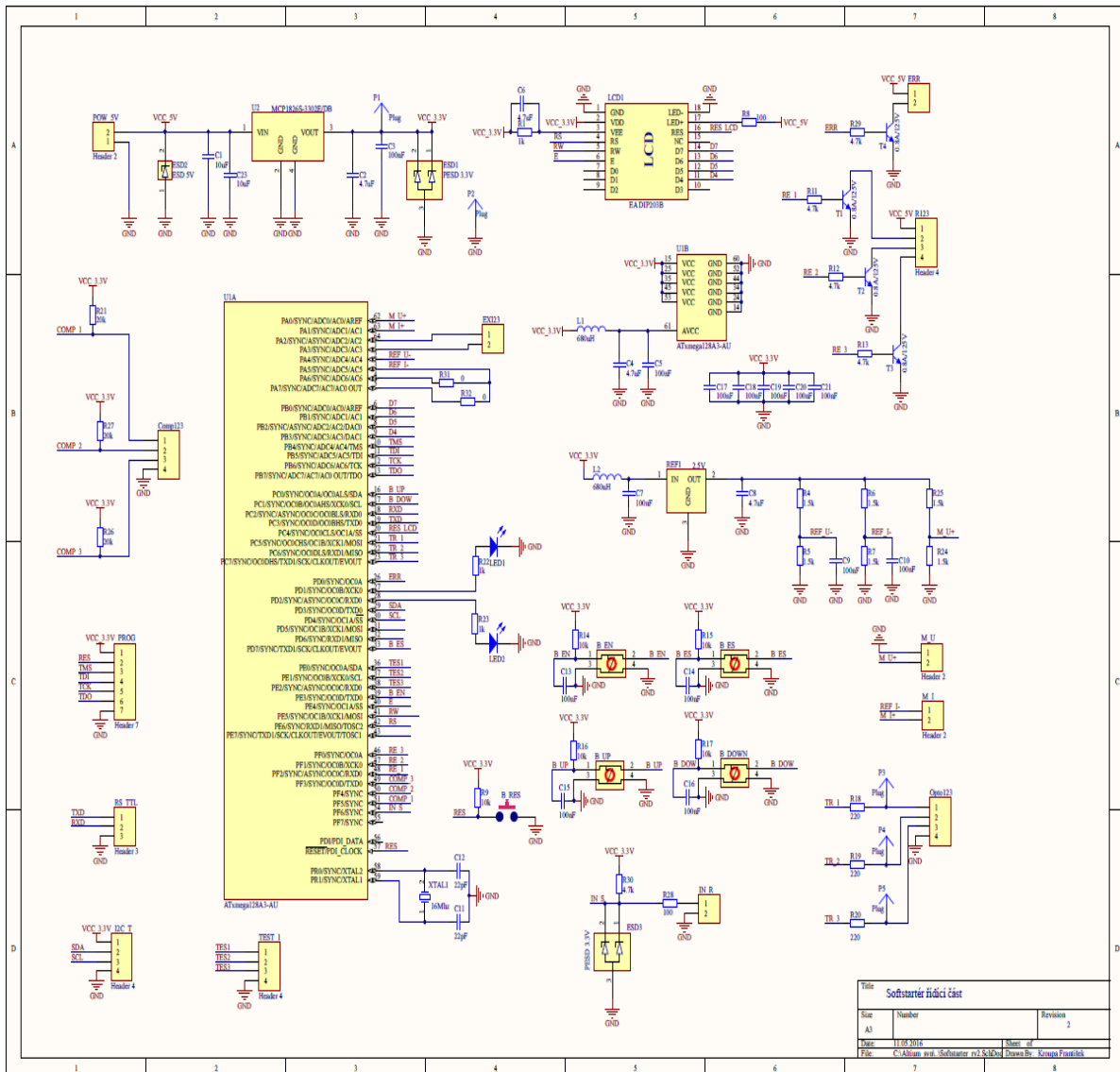
$$P_{\check{c}} = K_{ui} \cdot \frac{3}{200} \sum_{i=1}^{200} (\text{RES}_u \cdot K_{ad} \cdot \text{RES}_i \cdot K_{ad}) - UI_{ofs} \quad (6.5)$$

$$P_z = 3 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \quad (6.6)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P_{\check{c}}}{P_z} \quad (6.7)$$



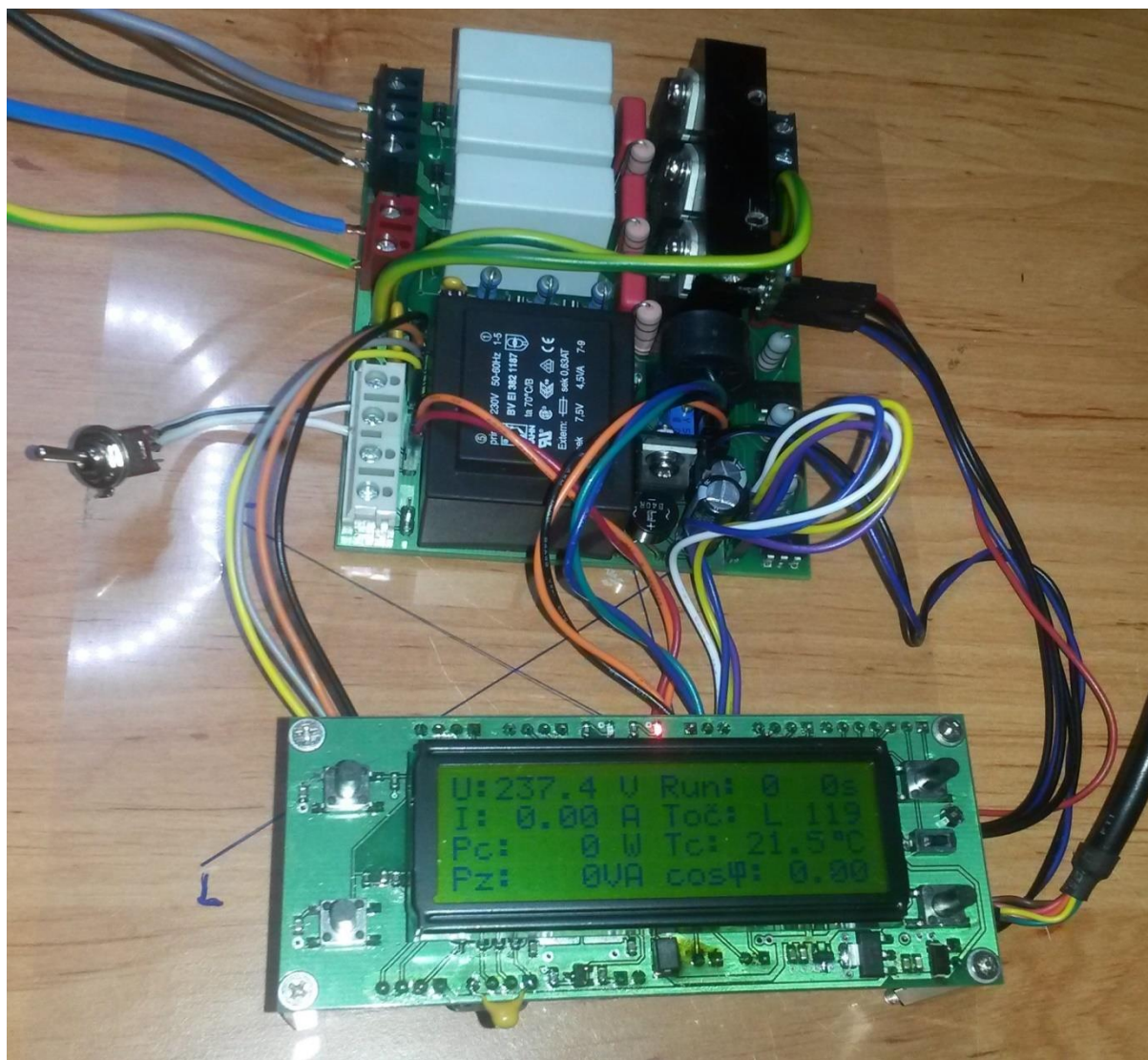
## 6.3 Celkové schéma řídicí části softstartéru



Obr 64 - Schéma řídicí části [zdroj: vlastní zpracování]

## 7. VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA REÁLNÉM POHONU

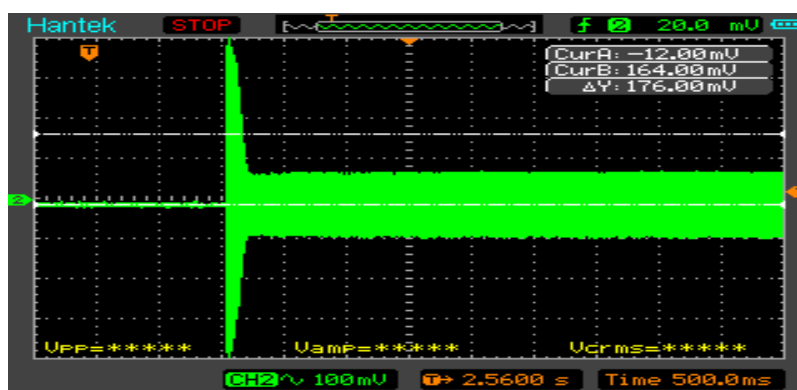
Na obrázku 65 je zobrazena pracovní verze softstartéru s kterým byl proveden rozběh pohonu a následné měření proudových rozběhových charakteristik.



Obr 65 - Zrealizovaný softstartér do výkonu 5kW [zdroj: vlastní zpracování]

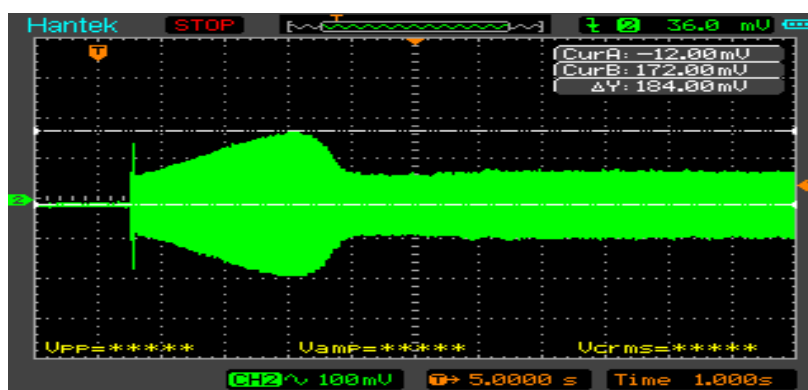
Testování SS bylo provedeno na malém pístovém kompresoru: VKDI ORLÍK, Typ: NSW-50-3 osazeným dvoupólovým třífázovým AM o výkonu  $P = 1100 \text{ W}$ ,  $n = 1485 \text{ ot./min}$ ,  $U = 400 \text{ V}$ ,  $I_j = 1.9 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi = 0.80$  zapojeným do hvězdy. Měření bylo uskutečněno na dvoukanálovém osciloskopu HANTEK 1200 s proudovou sondou Talema typ. AX 1500 zapojenou na kanál č. 2 (proudová konstanta  $2.8 \text{ A/100 mV}$ ).

Na obrázku 66 je zobrazena proudová charakteristika rozběhu kompresoru pomocí přímého připojení na síť. Z obrázku je patrný proudový ráz  $\approx 7.9 \text{ A}$  efektivní hodnoty. Ustálená proudová hodnota odpovídá  $\approx 1.6 \text{ A}$



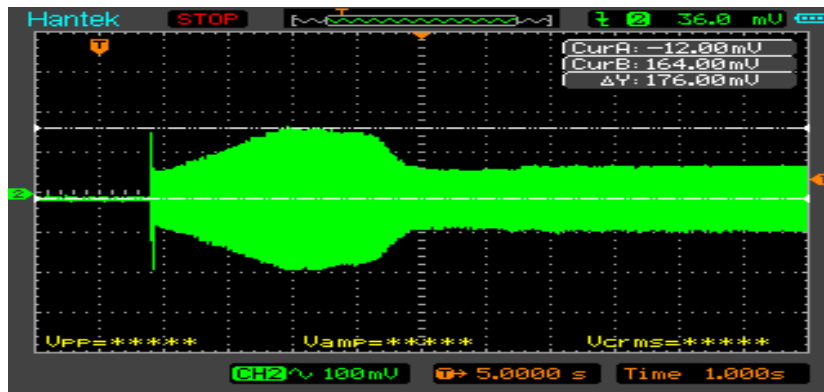
Obr 66 - Proudová charakteristika přímého připojení na síť [zdroj: vlastní zpracování]

Na obrázku 67 je zobrazen rozběh pomocí SS s parametry startovacího napětí **20%** a rozběhovou rampou **7 s**. Proudový ráz při zapnutí je na úrovni proudové hodnoty  $\approx 1.6 \text{ A}$  a celkově maximální proud nepřekročuje hodnotu  $\approx 3.6 \text{ A}$ .



Obr 67 - Rozběh pomocí SS startovací napětí 20% bez proudového omezení [zdroj: vlastní zpracování]

Na obrázku 68 je zobrazen rozběh pomocí SS s parametry startovacího napětí **20%**, rozběhovou rampou **7 s** a s proudovým omezením  $I_{vyp} = 3.4 \text{ A}$ . Z průběhu je patrná reakce SS na nepřekročení hodnoty  $I_{vyp}$  na úkor prodloužení skutečné doby rozběhu o  $\approx 1 \text{ s}$  oproti nastavení bez proudového omezení.



Obr 68 - Rozběh pomocí SS startovací napětí 20% s proudovým omezením 3.4A [zdroj: vlastní zpracování]

## 8. ZÁVĚR

V této práci byla objasněna problematika spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Byly zde popsány a porovnány nejčastěji realizované způsoby rozběhů. Důraz byl kladen především na podrobnější popis rozběhů se sníženým napětím realizovaný třífázovým měničem napětí. Vzhledem k nízké ceně polovodičových součástek začíná být stále častěji populárnější rozběh asynchronních motorů pomocí softstartéru.

Dále byl proveden podrobný návrh výkonové části zařízení softstartér s ohledem na definované mezní hodnoty a stavy. V řídicí části byly popsány pouze vybrané algoritmy řízení vzhledem k značnému rozsahu. Zařízení softstartér bylo zkonstruováno a otestováno. Testování proběhlo v laboratořích ČVUT za odborné asistence vedoucího práce Ing. Jana Bauera., Ph.D. Byly změřeny průběhy napětí a proudu pro vybrané řídicí úhly a provedeno několik rozběhů a doběhů pro různé záběrné momentové zatížení malého dvoupólového **750 W** asynchronního motoru. Byl proveden i velký zátěžový test rozběhu na motoru **7.5 kW** s již vyřazenou funkcí na nepřekročení rozběhového proudu  $I_{vyp}$ . Zařízení se ve všech směrech chovalo správně a předvídatelně, tím pádem nic nebrání nasazení v testování „ostrého“ provozu. Z důvodu velké časové náročnosti nebyla u softstartéru zatím implementována funkce nadproudové ochrany v ustáleném provozu.

Hlavním cílem práce bylo navrhnout, zkonstruovat levné a funkční zařízení pro rozběh asynchronních motorů osazených v malých domovních jednotkách tepelných čerpadel s možností monitoringu provozních parametrů, což bylo bezesbytku splněno.

## 9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Abel, M.: *Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce*, Platan, Pardubice 2000, ISBN 80-902733-2-7
- [2] Atmel Corporation.: *ATxmega128A3U*. <http://www.atmel.com>. [online]. 12.5.2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8386-8-and-16-bit-AVR-Microcontroller-ATxmega64A3U-128A3U-192A3U-256A3U\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8386-8-and-16-bit-AVR-Microcontroller-ATxmega64A3U-128A3U-192A3U-256A3U_datasheet.pdf)
- [3] Jan Bauer.: *AD1M14VE2*. <http://motor.feld.cvut.cz>. [online]. 12.5.2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/AD1M14VE2/VE2\\_D2015\\_pr2.pdf](http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/AD1M14VE2/VE2_D2015_pr2.pdf)
- [4] Jiří Vašínska.: *Softstarter Handbook – ABB*. <https://library.e.abb.com>. [online]. 12.5.2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/6b4e1a3530814df0c12579bb0030e58b/1SFC132060M0201.pdf>
- [5] Lettl J., Čeřovský Z., Pavelka J.: *Výkonová elektronika*, skripta CVUT FEL
- [6] Pavelka, Jiří; Zdeněk, Jiří. :*Elektrické pohony a jejich řízení*. 1. vyd., Praha, CVUT, 2010.
- [7] Vítězslav Stýskal.: *Studium bakalářské Elektrotechnika II. (FS)*. <http://fei1.vsb.cz>. [online]. 12.5.2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FS/prednasky/sylab\\_As-Motory%20nazorne%206\\_2.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_As-Motory%20nazorne%206_2.pdf)
- [8] Voženílek P., Novotný V., Mindl P.: *Elektromechanické měniče*, ČVUT, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04875-7
- [9] OEZ.: *katalogy*. <http://www.oez.cz>. [online]. 12.5.2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1336-Z01-10\\_CZ\\_SK.pdf](http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/1336-Z01-10_CZ_SK.pdf)

## 10. SEZNAM PŘÍLOH NA CD

### Adresáře:

- **PCB**
  - Softstarter\_rv2.PcbDoc (Řídící DPS Layout)
  - Softstarter\_rv2.SchDoc (Řídící DPS Schéma)
  - Softstarter\_sv2.PcbDoc (Výkonová DPS Layout)
  - Softstarter\_sv2.SchDoc (Výkonová DPS Schéma)
- **Software**
  - Soft\_v10\_main.bas (Hlavní program)
  - Soft\_v10\_var.inc (Deklarace proměnných)
  - Soft\_v10\_config.inc (Konfigurace)
  - Soft\_v10\_init.inc (Inicializace)
  - Soft\_v10\_sub.inc (Deklarace funkcí, procedur)
  - Soft\_v10\_main.bin (Zkompilovaná binárka)