

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Bakalářská práce

NAPĚŤOVÝ STŘÍDAČ PRO NAPÁJENÍ
VÝUKOVÉHO MODELU ASYNCHRONNÍHO
MOTORU

Jan HENTSCHEL

červen 2017

ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

Práce se věnuje návrhu a konstrukci napěťového střídače pro napájení výukového modelu asynchronního motoru, nacházejícího se na Katedře elektromechaniky a výkonové elektrotechniky Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni. V úvodu práce je stručně popsána teorie asynchronních motorů spolu s výukovým modelem asynchronního motoru, rozdělení výkonových měničů a princip funkce třífázového napěťového střídače s režimy jeho řízení. Dále je popsán postup návrhu a konstrukce konkrétního střídače a jeho budících obvodů. Závěr práce potom zhodnocuje dosažené výsledky a cíle pokračování práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Napěťový střídač, výukový model, asynchronní motor, pulzně šířková modulace, třífázový motor, řízení rychlosti

ANOTATION AND KEYWORDS

The thesis focuses on design and development of a DC/AC power inverter for powering a learning model of an asynchronous induction motor that is located on The department of electromechanics and power electronics, University of Western Bohemia, Pilsen. In the beginning of the thesis the theory of induction motors with the learning model is described, division of power inverters is listed together with explanation of the three phase DC/AC power inverter working principle and its regulation modes. Next the process of design and development of a specific power inverter and its drivers is described. The thesis' end then evaluates accomplished results and further progress.

KEYWORDS

DC/AC power inverter, learning model, asynchronous induction motor, pulse width modulation, three phase motor, speed regulation

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Luboši Streitovi Ph.D. za ochotnou pomoc a cenné rady, které mi při tvorbě této práce poskytl.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení bakalářskou práci, zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury, a pramenů a že veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni, dne datum

Jméno Příjmení

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

\bar{U}	[V,°]	fázor elektrického napětí (ukázka veličiny jako fázoru)
U	V	elektrické napětí
I	A	elektrický proud
R	Ω	elektrický odpor
X	Ω	reaktance
L	H	indukčnost
C	F	kapacita
P	W	činný výkon
Q	VA _r	jalový výkon
S	VA	zdánlivý výkon
$\cos \phi$	–	účiník
f	Hz	frekvence (kmitočet)
ω	rad · s ⁻¹	úhlová rychlost
n	min ⁻¹	otáčky za minutu
M	N · m	moment
F_m	A	magnetomotorické napětí
P	W	činný výkon
s	–	skluz
p	–	počet pólpárů
m	–	počet fází
ψ	°, rad	řídící úhel

OBSAH

i ÚVOD DO PROBLEMATIKY	2
I.1 MOTIVACE A CÍLE PRÁCE	3
I.2 MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU	4
I.2.1 Princip třífázového asynchronního motoru	5
I.2.2 Náhradní schéma asynchronního motoru	6
I.3 DRUHY MĚNIČŮ	8
I.4 PRINCIP NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE A REŽIMY JEHO ŘÍZENÍ	10
I.4.1 Princip napěťového střídače	10
I.4.2 Režimy řízení napěťového střídače	12
ii NÁVRH A KONSTRUKCE NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE	19
II.1 TABULKA A POPIS PARAMETRŮ	20
II.2 NÁVRH STŘÍDAČE	21
II.2.1 Návrh výkonového obvodu	21
II.2.2 Návrh budících obvodů	23
II.2.3 Návrh obvodů pro správu napájení	24
II.3 KONSTRUKCE STŘÍDAČE	28
II.3.1 Návrh desky plošného spoje	28
iii ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR	33
III.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE	34
III.1.1 Zhodnocení dosažených výsledků	34
III.1.2 Směry pokračování práce	35

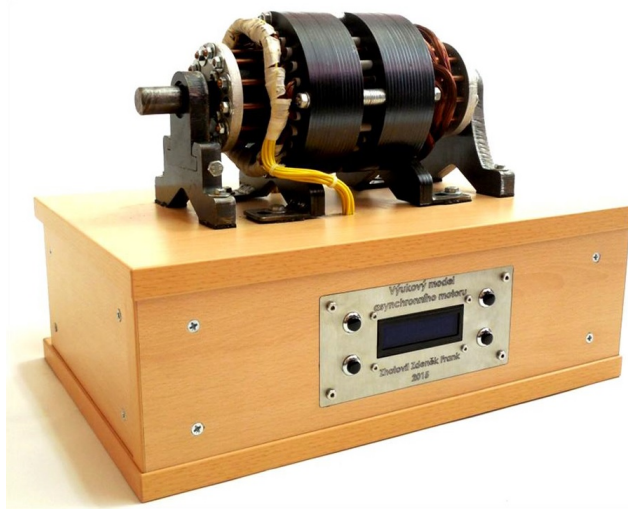
Část I

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

i.1

MOTIVACE A CÍLE PRÁCE

MOTIVACÍ této bakalářské práce je nutnost realizace řízení výukového modelu třífázového asynchronního motoru, který byl již dříve z důvodů zvýšení praktičnosti výuky elektrických strojů a pohonů zkonstruován Bc. Zdeňkem Frankem na Katedře elektromechaniky a výkonové elektrotechniky Fakulty elektrotechnické v Západočeské univerzitě v Plzni. Cílem práce je tedy popis principu napěťového střídače a jeho režimů řízení, návržení a realizace obvodového schématu třífázového napěťového střídače a jeho budících obvodů, implementování U/f řízení střídače, realizace jeho komunikace s displejem, který se již nachází na podstavci motoru a také předváděcího dema. [3]



Obr. 1: Výukový model asynchronního motoru s podstavcem [3]

i.2

MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU

ASYNCHRONNÍ motory v dnešní době patří mezi nejrozšířenější průmyslově používané elektrické stroje. Je to především kvůli jejich jednoduché konstrukci, příznivé pořizovací ceně stroje a také kvůli v dnešní době již cenově dostupné regulaci. I přes stáří konceptu stroje je dnes asynchronní stroj, především zdokonalování jeho konstrukce a regulace stále cílem výzkumů.

Motor, pro který je tato práce určena je zhotoven také s dřevěným podstavcem, do něhož je vsazen displej a čtyři tlačítka určena k ovládní motoru. Konstrukčně je tvořen asynchronní motor částí stojící - statorem a částí točivou - rotorem. Stator se skládá z feromagnetického jádra s drážkami, do kterého je vsazeno nejčastěji třífázové primární vinutí. Rotor se však může lišit. [1]

Asynchronní motory se proto běžně dělí na dva druhy:

- motory s kotvou nakrátko - rotor je klec tvořená z měděných či hliníkových tyčí spojená dokrátka
- motory s kotvou vinutou (kroužkovou) - rotor je navinut podobně jako stator a je do uzlu spojen pomocí kroužků a kartáčů

Výukový model asynchronního motoru použitý v této práci byl však v porovnání s průmyslovými motory zkonstruován s viditelně rozšířenou vzduchovou mezerou a třemi výměnnými klecovými rotory.

I.2.1 PRINCIP TŘÍFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Po připojení třífázového vinutí statoru rozloženého v drážkách po 120° ke zdroji elektrického proudu rozděleného stejně, dojde ve vinutí ke vzniku točivého magnetického pole o magnetomotorickém napětí F_{M1} . Toto pole prochází vodiči rotoru. Protože se pole pohybuje, indukuje se do rotoru napětí U_{i2} . Rotorové vinutí je uzavřené, indukované napětí tedy vyvolá v rotorových vodičích proud I_2 který vytváří své pole o magnetomotorickém napětí F_{M2} . Obě pole na sebe navzájem působí a tím vytváří elektromagnetický moment M . Rotor se rozbíhá a stoupá jeho úhlová rychlost ω_2 resp. otáčky n_2 . Začne se ale snižovat rozdíl mezi synchronní rychlostí točivého pole ω_s a rychlostí rotoru. Rozdíl těchto dvou rychlostí v poměru k synchronní rychlosti pole se nazývá skluz

$$s = \frac{\omega_s - \omega_2}{\omega_s}. \quad (1)$$

Tím pádem klesá napětí indukované do rotoru i jeho frekvence

$$f_2 = sf_1. \quad (2)$$

Aby rychlost rotoru dosáhla rychlosti točivého pole však není možné. Indukované napětí by úplně zaniklo, čímž ale zaniká i rotorový proud a moment. Synchronní rychlost točivého pole se spočítá jako

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p} \quad (3)$$

a protože platí

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (4)$$

platí také

1.2.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU

$$n_s = \frac{60f}{p}, \quad (5)$$

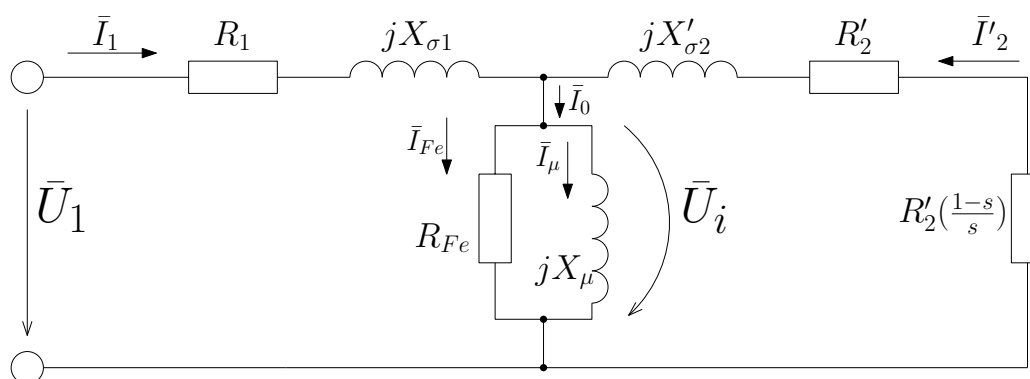
kde p je počet pólových dvojic motoru. [1]

1.2.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Z principu činnosti motoru, lze do určité míry velmi zjednodušeně považovat v náhradním schématu asynchronní motor za transformátor nakrátko.

Oproti transformátoru jsou zde ale rozdíly:

- jiná frekvence proudů statoru a rotoru - $f_2 = sf_1$
- jiný počet fází statoru a rotoru - $m_2 > 3$ - podle počtu tyčí rotoru
- musí zde být vzduchová mezera, zvyšující magnetizační proud
- výkon na hřídeli je respektován vhodně upraveným elektrickým výkonem



Obr. 2: Náhradní schéma asynchronního motoru vyjadřující rozdělení ztrát a mechanického výkonu závislého na skluzu

1.2.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU

- \bar{U}_1 - napětí přivedené ke statorovému vinutí
- \bar{I}_1 - statorový proud
- R_1 - činný odpor statorového vinutí - vyjadřuje Jouleovy ztráty statorem
- $jX_{\sigma 1}$ - rozptylová reaktance statoru
- \bar{I}_0 - proud naprázdno - vyjadřuje ztráty v chodu naprázdno (ztráty v železe a magnetizační ztráty)
- \bar{I}_{Fe} - proud v železe - vyjadřuje ztráty v železe a hysterezní ztráty
- \bar{I}_μ - magnetizační proud motoru
- R_{Fe} - odpor železa - fiktivní parametr určující ztráty v železe
- jX_μ - magnetizační reaktance
- \bar{U}_i - napětí indukované do rotoru
- $jX'_{\sigma 2}$ - rozptylová reaktance rotoru přepočítaná na stator
- R'_2 - činný odpor rotoru přepočítaný na stator - vyjadřuje Jouleovy ztráty rotorem
- \bar{I}'_2 - rotorový proud přepočítaný na stator
- $R'_2(\frac{1-s}{s})$ - parametr respektující mechanický výkon v závislosti na skluzu

i.3

DRUHY MĚNIČŮ

V teorii měničů jsou měniče rozděleny na druhy podle určitých kritérií. Předem je však dobré vysvětlit několik pojmů. [2]

Takt - doba mezi dvěma následovnými změnami vodivosti větve měniče. Je označován dvojicí součástek - takt V_1, V_2 je doba po kterou jsou sepnuté součástky V_1 a V_2 .

Komutace měniče - děj v obvodu měniče, charakteristický přechodem proudu z jedné větve do druhé bez přerušení proudu tekoucího uzlem.

Podle způsobu komutace jsou měniče rozlišovány na:

- měníče s vnější komutací - zdroj komutačního napětí není umístěn uvnitř, ale vně měniče. Takový měnič je pak komutován sítí (síťová komutace), nebo zátěží (zátěžová komutace).
- měníče s vlastní komutací - zdroj komutačního napětí se u takovýchto měničů nachází přímo uvnitř měniče.
- bez komutace (s přerušováním proudu)

DRUHY MĚNIČŮ

Podle funkce jsou měniče rozlišovány na:

- usměrňovače - měniče určené k přeměně střídavé elektrické energie na stejnosměrnou.
- střídače - měniče určené k přeměně stejnosměrné elektrické energie na střídavou
- střídavé měniče napětí - měnič napájený střídavou elektrickou energií, přeměňující velikost střídavého napětí na výstupu
- střídavé měniče frekvence - měnič napájený střídavou elektrickou energií, přeměňující frekvenci střídavého výstupu
- stejnosměrné měniče napětí - někdy nazývané také jako pulzní měniče, jsou napájeny stejnosměrně a mění velikost stejnosměrného výstupního napětí

Podle možnosti řízení výstupních parametrů jsou měniče rozlišovány na:

- řízené
- neřízené

Podle možnosti směru toku energie jsou měniče rozlišovány na:

- jednosměrné
- obousměrné

i.4

PRINCIP NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE A REŽIMY JEHO ŘÍZENÍ

I.4.1 PRINCIP NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE

Ke stejnosměrné straně střídače je připojen zdroj napětí U_d , který je uvažován konstantní. Výkon odebíraný zátěží je

$$P = U_d I_d, \quad (6)$$

kde I_d je střední hodnota proudu. Smysl přenosu výkonu je také změněn směrem proudu I_d , protože smysl napětí U_d je neměnný. Tím pádem platí

$$I_d < 0 \implies P < 0 \dots \text{usměrňovačový chod}$$

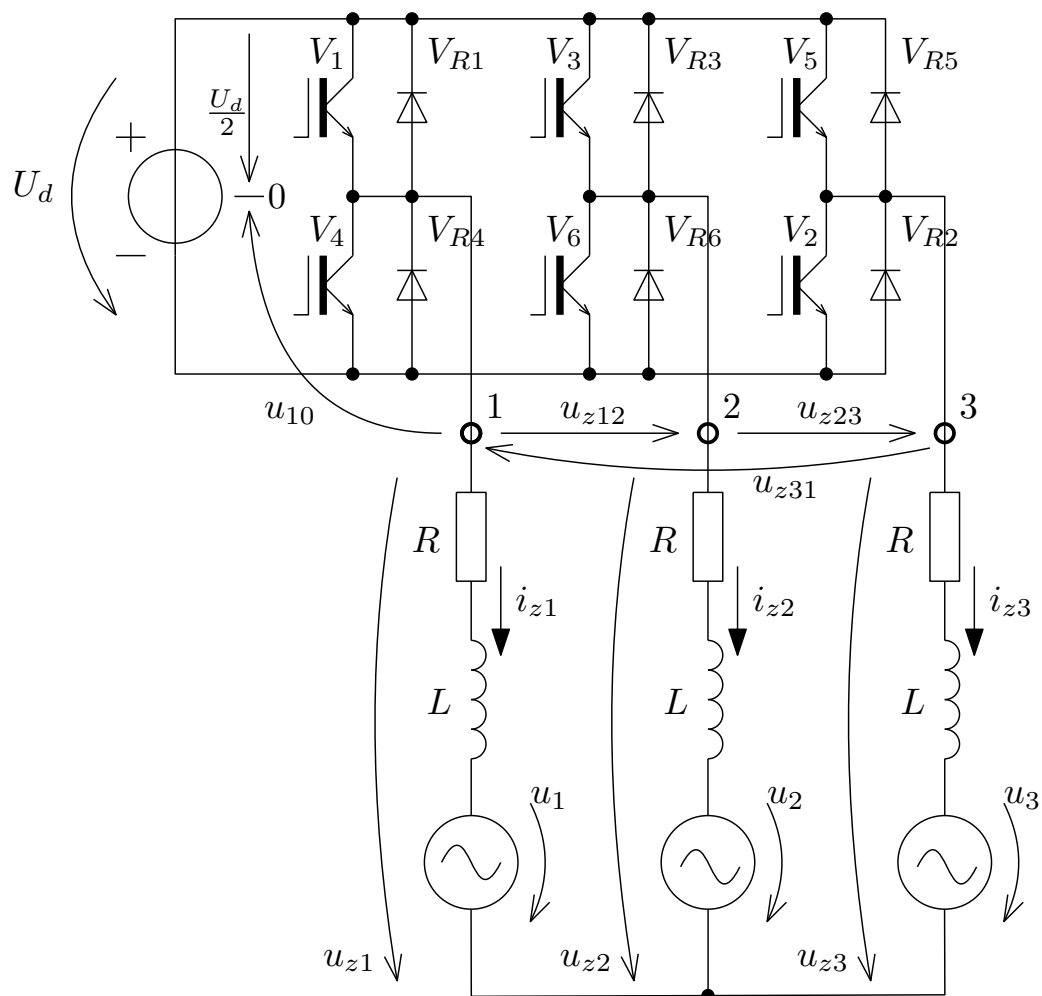
$$I_d > 0 \implies P > 0 \dots \text{střídačový chod}$$

Pro vícefázové střídače platí vztah pro okamžité hodnoty

$$p = m U_d i_d, \quad (7)$$

kde p je okamžitá hodnota výkonu, i_d je okamžitá hodnota proudu a m počet fází střídače.

Pokud předpokládáme zátěž odeberající jalový výkon, dosahuje i_d a tedy i p periodicky záporných i kladných hodnot z čehož vyplývá, že střídač musí umožnit průchod proudu oběma směry. Průchod proudu směrem do zátěže v obvodu střídače umožňují vypínatelné součástky, zatímco průchod proudu zpět do zdroje, tedy odběr jalového výkonu zátěží, umožňují zpětné diody. Ty jsou připojeny antiparalelně k vypínatelným součástkám. Celkově se diody připojené ke každé vypínatelné součástce nazývají zpětný usměrňovač.



Obr. 3: Schéma můstkového třífázového napěťového střídače s odporově induktivní zátěží spojenou do hvězdy

I.4.2 REŽIMY ŘÍZENÍ NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE

Třífázový napěťový střídač je tvořen šesti vypínatelnými součástkami V_1 až V_6 . Ke každé z nich jsou antiparalelně zapojeny zpětné diody V_{R1} až V_{R2} . Zátěž je spojena do uzlu a to buď do hvězdy nebo do trojúhelníku. Každou fází střídače tvoří takzvaný půlmůstek připojený ke stejnosměrnému zdroji U_d , což je spojení dvou výkonových součástek v sérii (např. dvojice V_1 a V_4). První součástka (horní) zajišťuje přivedení proudu k zátěži a druhá (spodní) zase zajišťuje odvedení proudu do zdroje. Do středu mezi tyto dvě součástky (body 1,2 a 3) je potom připojena daná fáze zátěže. [2]

I.4.2 REŽIMY ŘÍZENÍ NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE

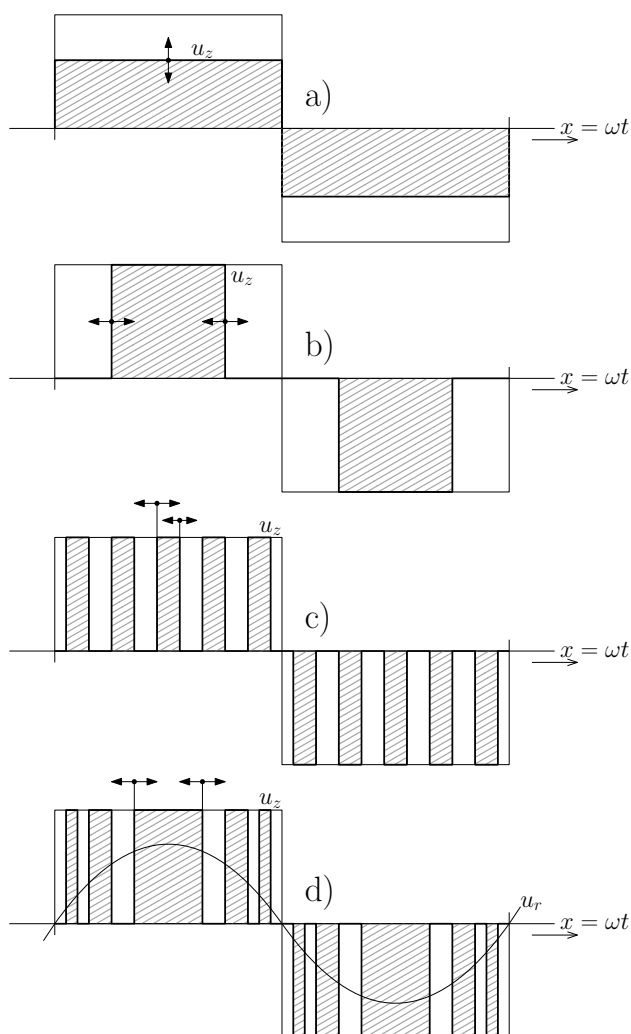
Řízení napěťového střídače zahrnuje kromě řízení výstupního kmitočtu střídače téměř vždy také řízení velikosti výstupního napětí, což platí hlavně při řízení rychlosti střídavých elektrických strojů. Při řízení rychlosti například asynchronního motoru frekvencí statoru má zůstat magnetický tok (resp. magnetizační proud I_μ) konstantní. Čili musí být přibližně [2]

$$I_\mu = \frac{U}{\omega L_\mu} = \text{konst.}, \text{ tedy také } \frac{U}{\omega} = \text{konst.}.$$

Proto jsou použitelné tyto režimy řízení střídače:

- obdélníkové amplitudové
- obdélníkové šířkové
- šířkové pulzní
- šířkově pulzní modulované

i.4.2 REŽIMY ŘÍZENÍ NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE



Obr. 4: a) Obdélníkové amplitudové řízení, b) Obdélníkové šířkové řízení, c) Šířkově pulzní řízení, d) Šířkově pulzně modulované řízení

V dnešní době je nejrozšířenějším způsobem řízení střídače šířkově pulzní modulace (dále jen PWM z angl. Pulse width modulation). Obdélníkové řízení je dnes používáno jen velmi zřídka a to jen u aplikací, které jsou nenáročné a není zde požadavek na řízení výstupního napětí.

Obdélníkové řízení střídače

Dále je vysvětlen obecný postup určení napětí na zátěži ze znalosti stavu sepnutí jakékoli výkonové součástky (jakéhokoliv spínacího diagramu), platný pro všechny druhy řízení střídače. Lze tedy ze stavu sepnutí určit napětí vývodů střídače (1,2 a 3) oproti pomyslnému středu o zdroje U_d neboli fázová napětí střídače u_{10} , u_{20} a u_{30} , která však nejsou fázovými napětími zátěže. Jak lze soudit ze schématu, pokud je vývod střídače připojen k zátěži horní součástkou půlmůstku (např. V_1), vychází pak na tomto vývodu napětí $\frac{U_d}{2}$ a pokud je připojen vývod spodní součástkou (např. V_4) vychází jeho napětí $-\frac{U_d}{2}$. Pro sepnuté součástky tedy platí

$$V_1 \text{ nebo } V_{R1} \dots u_{10} = \frac{U_d}{2}$$

$$V_4 \text{ nebo } V_{R4} \dots u_{10} = -\frac{U_d}{2}$$

$$V_3 \text{ nebo } V_{R3} \dots u_{20} = \frac{U_d}{2}$$

$$V_6 \text{ nebo } V_{R6} \dots u_{20} = -\frac{U_d}{2}$$

$$V_5 \text{ nebo } V_{R5} \dots u_{30} = \frac{U_d}{2}$$

$$V_2 \text{ nebo } V_{R2} \dots u_{30} = -\frac{U_d}{2}.$$

Pro sdružené napětí střídače potom platí

$$u_{z12} = u_{10} - u_{20}$$

$$u_{z23} = u_{20} - u_{30}$$

i.4.2 REŽIMY ŘÍZENÍ NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE

$$u_{z31} = u_{30} - u_{10}.$$

Pro spojení zátěže do trojúhelníku jsou tato sdružená napětí střídače totožná s fázovými napětími zátěže. Při spojení zátěže do hvězdy platí vztahy mezi sdruženými napětími a fázovými napětími zátěže tyto vztahy

$$u_{z12} = u_{z1} - u_{z2}$$

$$u_{z23} = u_{z2} - u_{z3}$$

$$u_{z31} = u_{z3} - u_{z1}.$$

Ze samotných těchto vztahů však kvůli lineární závislosti rovnic nelze fázová napětí určit a proto lze místo jedné z rovnic s předpokladem symetrické zátěže a napětími u_1, u_2 a u_3 , jakožto střídavými indukovanými napětími stroje užít rovnici

$$u_{z1} + u_{z2} + u_{z3} = 0.$$

Samozřejmě pro symetrickou zátěž musí platit fakt, že

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0.$$

A protože musí také platit

$$i_{z1} + i_{z2} + i_{z3} = 0$$

musí tedy být

$$u_{z1} + u_{z2} + u_{z3} = R(i_{z1} + i_{z2} + i_{z3}) + L \frac{d}{dt}(i_{z1} + i_{z2} + i_{z3}) + u_1 + u_2 + u_3 = 0,$$

což dokazuje platnost rovnice

$$u_{z1} + u_{z2} + u_{z3} = 0.$$

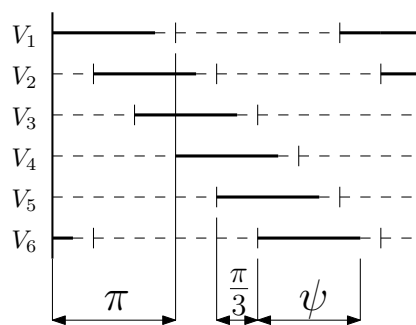
Při využití této rovnice a dalších dvou libovolných rovnic ze soustavy rovnic vztahu fázových a sdružených napětí zátěže získáme pro fázová napětí zátěže tyto vztahy

$$u_{z1} = \frac{1}{3}(u_{z12} - u_{z31})$$

$$u_{z2} = \frac{1}{3}(u_{z23} - u_{z12})$$

$$u_{z3} = \frac{1}{3}(u_{z31} - u_{z23}).$$

Na obr. 5 lze pak vidět jednotlivé úhly sepnutí výkonových součástek ψ vyznačené tučnou čarou. To však nemusí nutně být skutečný úhel sepnutí součástky, ale interval, ve kterém je posílán zapínací impulz pro sepnutí součástky. Začátek sepnutí další součástky je vždy posunut o úhel $\pi/3$. Velikost úhlu ψ musí být u všech součástek stejná.



Obr. 5: Úhly ψ sepnutí výkonových součástek

Z obr. 5 je také vidět možný rozsah úhlu

ψ . Pro možnost uzavírání proudu obvodem, je nutné aby byla sepnuta alespoň jedna

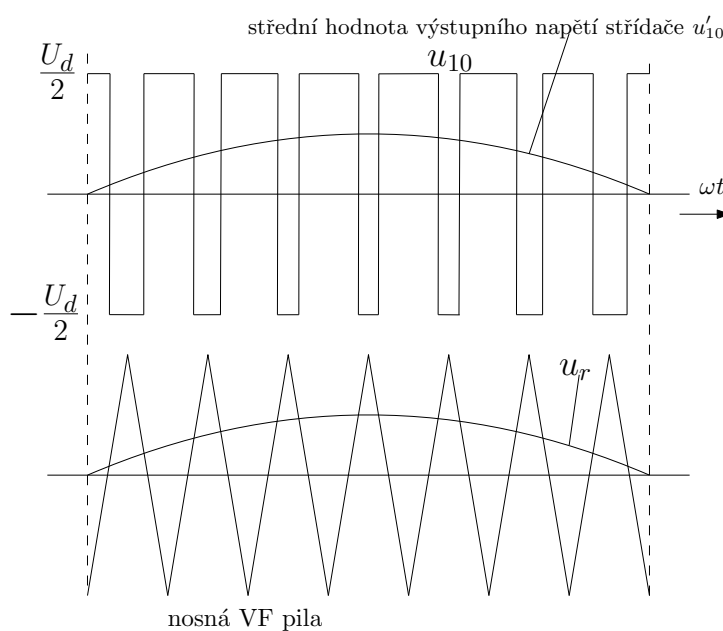
součástka ze skupiny katodové (V_1, V_3 a V_5) a jedna ze skupiny anodové (V_4, V_6 a V_2). Tedy platné jsou jen hodnoty ψ , při kterých se překrývají úhly sepnutí součástky z anodové a katodové skupiny. Z čehož vyplývá, že vyhovujícími hodnotami jsou $\psi > \pi/3$.

Při úhlu $\psi > \pi$ pak zase dochází k překrývání úhlů součástek jedné fáze střídače, při čemž dochází ke zkratu zdroje U_d . Z tohoto důvodu musí být také mezi spínání součástek vložen tzv. mrtvý čas (deadtime). Jelikož je deadtime svou délkou zanedbatelný, je uváděn regulační rozsah ψ jako [2]

$$\frac{\pi}{3} < \psi < \pi \quad (8)$$

Šířkové pulzně modulované řízení

Šířkově pulzní modulace, neboli PWM je speciálním druhem šířkově pulzního řízení, kde je proměnná šířka každého impulsu během jedné periody, závislá na časově proměnné hodnotě jiného parametru. Z obr. 4 vidíme, že to může být např. sinusový průběh modulující šířku daných pulzů. Takový



způsob modulace umožňuje řízení výstupní frekvence střídače.

Principiálně je PWM založena na porovnávání nosného pilového signálu o vysokém kmitočtu s nízkofrekvenčním modulačním signálem, tzv. řídicím napětím u_r . To je vidět z

obr 6. V okamžiku protnutí nosného a modulačního signálu se přepínají spínací impulzy posílané na součástky. V místech, kde je okamžitá hodnota u_r vyšší, než hodnota pilotního signálu, vede např. součástka V_1 a okamžitá hodnota fázového napětí střídače u_{10} je $U_d/2$. V opačném případě je hodnota překlopena na $-U_d/2$. Výsledná střední hodnota napětí střídače potom odpovídá přibližně hodnotě u_r . Čím vyšší je kmitočet pily oproti modulačnímu signálu, tím je střední hodnota výstupního napětí více podobná původnímu u_r .

Z toho je zřejmé, že modulačním napětím se tedy řídí výstupní hodnota jak napětí, tak kmitočtu. [2]

Část II

NÁVRH A KONSTRUKCE NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE

ii.1

TABULKA A POPIS PARAMETRŮ

JAKO začátek návrhu obvodového schématu střídače a jeho budících obvodů posloužily výsledky měření výukového modelu asynchronního motoru v laboratořích Fakulty elektrotechnické ZČU, které jsou popsány dále v tabulce. [3]

Tab. 1: Tabulka výchozích parametrů výukového modelu asynchronního motoru

		rotor č.1	rotor č.2	rotor č.3	bez rotoru
napětí zdroje	U_1	48 V	48 V	48 V	48 V
frekvence	f	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
efektivní hodnota proudu	I_{ef}	2,3 A	2,75 A	2,9 A	3,1 A
maximální hodnota proudu	I_m	3,25 A	3,89 A	4,1 A	4,38 A
odebíraný zdánlivý výkon	S	200 VA	240 VA	250 VA	270 VA
účiník	$\cos \phi$	0,75	0,865	0,855	0,839

Z tohoto měření vychází při napájecím napětí motoru 48 V a frekvenci 50 Hz hodnoty proudu zapsané v tabulce, které vyhovují požadavku na maximální proud odebíraný motorem 5 A. Proud byl měřen pro všechny 3 výměnné rotory a také pro samotný stator bez rotoru.

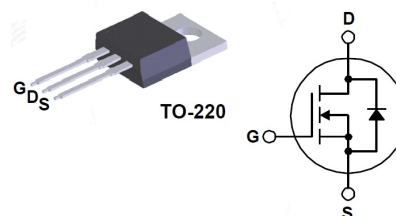
ii.2

NÁVRH STŘÍDAČE

Tato kapitola se věnuje samotnému návrhu obvodu střídače, jeho budících obvodů, napájecím obvodům, reálným součástkám použitých ve schématu a jejich parametřům.

II.2.1 NÁVRH VÝKONOVÉHO OBVODU

Ve výkonovém obvodu schématu bylo použito 6 MOSFET tranzistorů FDP52N20 značky Fairchild. Tranzistory jsou typu N-kanál, již obsahují zpětnou diodu. Součástka je upouzdřena v pouzdře TO-220, což je standardní pouzdro výkonových součástek s kovovými plíšky pro uchycení chladiče.

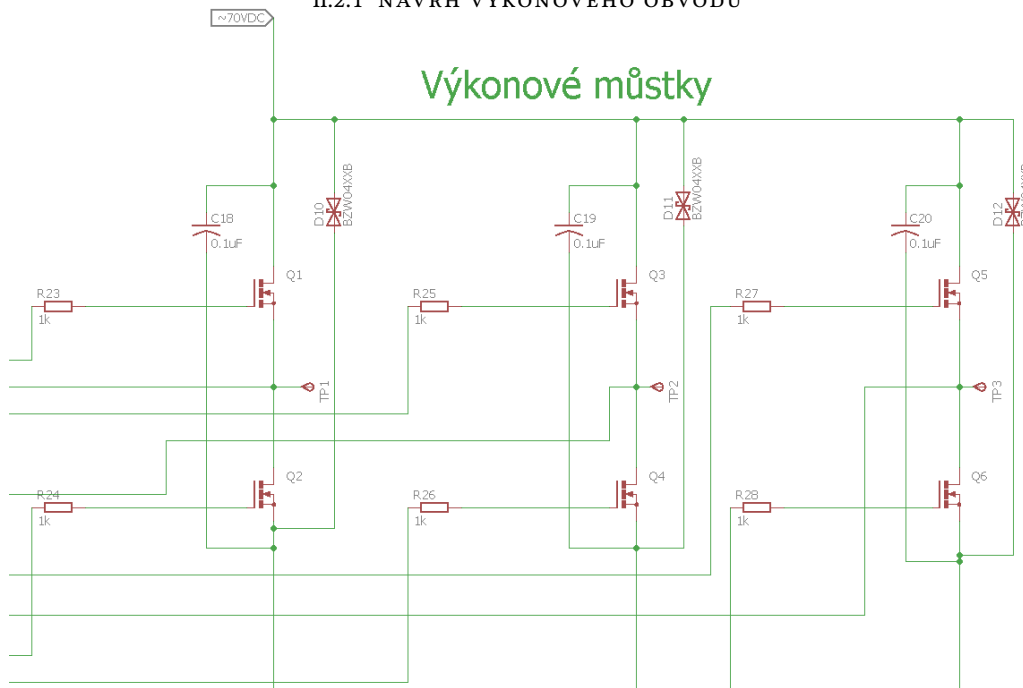


Obr. 7: Tranzistor FDP52N20 v pouzdře TO-220 a jeho schematická značka

Specifikace tranzistoru

- maximální napětí drain-source $U_{DSMAX} = 200 \text{ V}$
- maximální protékající proud $I_{DMAX} = 52 \text{ A}$

ii.2.1 NÁVRH VÝKONOVÉHO OBVODU



Obr. 8: Návrh výkonového obvodu v prostředí EAGLE

Vybrané tranzistory jsou vhodně naddimenzovány, z důvodu menšího zahřívání součástek průchodem jmenovitého proudu. Jako přepětová ochrana výkonového obvodu slouží 3 transily přemostující každou fázi. Na obr. 8 je vidět část schématu střídače z prostředí EAGLE. Je zde vyobrazeno 6 tranzistorů označených Q1-Q6 tvořící samotný výkonový obvod, přepětová ochrana ve formě transilů D10-D12, snubberové kondenzátory C18-C20 a rezistory omezující proud tekoucí gatem tranzistoru R23-R28. Střed můstku je potom vyveden na místa označená jako TP1-TP3. Snubber je svitkový kondenzátory připojený paralelně co nejdříve k drainu horního tranzistoru a source spodního tranzistoru, určený k potlačení přechodných jevů vznikajících na obvodu střídače. Větev označená 70VDC je přívod napětí zdroje z transformátoru.

Jako zdroj stejnosměrného napětí U_d byl vybrán toroidní transformátor TALEMA 230/48 napájející 2-cestný usměrňovač složený ze 4 diod GPA1603. Nábojovou rezervu pak tvoří 2 paralelní kondenzátory o celkové velikosti 2 mF.



Obr. 9: Transformátor TALEMA

Specifikace transformátoru

- primární napětí - 230 V
- sekundární napětí - 48 V
- jmenovitý výkon - 300 VA
- sekundární proud - 6,25 A

II.2.2 NÁVRH BUDÍCÍCH OBVODŮ

Buzení výkonového obvodu střídače je realizováno mikroprocesorem Texas Instruments z řady MSP-430, konkrétně modelem MSP430G2553, určeného k implementaci řízení střídače pomocí PWM. Procesor byl zvolen pro svou kompatibilitu s vývojovou deskou Texas Instruments tzv. launchpadem, který umožňuje programování a ladění procesoru pomocí rozhraní USB. Samotný procesor však k buzení střídače nestačí. Hradla výkonových součástek, v tomto případě výše zvolených tranzistorů, musí být spínána dostatečně velkými napěťovými impulzy, které není samotný procesor schopen poskytnout.

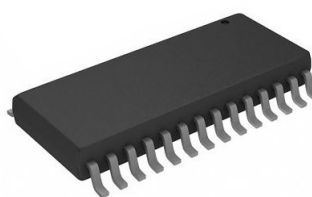
Proto byl pro tuto funkci zvolen vhodný integrovaný obvod - budič výkonových tranzistorů značky Infineon, model IR21364.

Tento obvod je přímo určen pro zpracování signálů PWM o logické hladině na-

pětí 3,3 V, se kterou pracuje zvolený procesor a jejich převodu na signály o napětí dostatečující pro buzení konkrétních tranzistorů. PWM je v tomto případě přijímána obvodem, jako šest signálů, 3 pro otvírání horních tranzistorů a 3 pro otvírání spodních. Zvo-



Obr. 10: Procesor MSP430G2553 v launchpadu



Obr. 11: budič Infineon IR21364

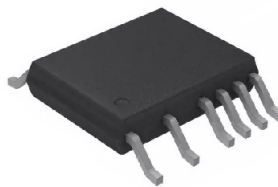
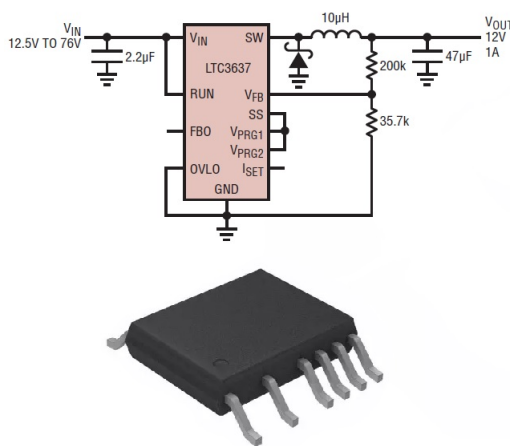
ii.2.3 NÁVRH OBVODŮ PRO SPRÁVU NAPÁJENÍ

lený procesor však nemá pro tuto aplikaci dostatek digitálních vstupů a proto bylo z důvodu šetření vstupy určeno, že třetice signálů, zajišťující otevírání spodních tranzistorů bude realizována obvodem, invertujícím první 3 signály. Ten je popsán dále. Tento obvod umožňuje i funkci sledování nadproudu, kdy při překročení hodnoty proudu protékajícího měřícím odporem, obvod zareaguje dočasným vypnutím budiče a zapnut je opětovně po vypršení časové prodlevy nastavené externím RC obvodem. Obvod může při zaznamenání nadproudu také vyslat digitální signál procesoru.

II.2.3 NÁVRH OBVODŮ PRO SPRÁVU NAPÁJENÍ

Jelikož jsou součástí střídače i obvody, vyžadující jiné napájení, než je napětí dodávané navrženým zdrojem, jako je mikroprocesor, budič a displej v podstavci motoru, je nutné použití obvodů, které upravují napětí na hodnotu požadovanou příčinným dílčím obvodem. Tyto obvody jsou integrované nastavitelné pulzní měniče, které jsou spojené kaskádně za sebe.

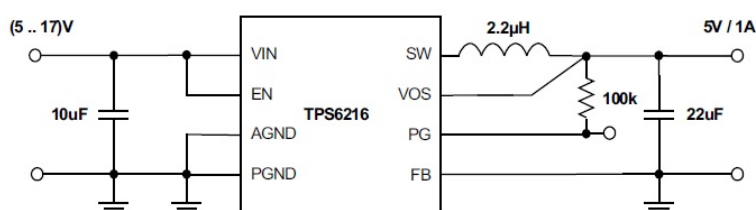
Budič IR21364 vyžaduje napájecí napětí U_{CC} minimálně 11 V, a jako nejuniverzálnější řešení byl zvolen integrovaný obvod LINEAR LTC3637, což je stejnosměrný snižovací pulzní měnič schopný pracovat se vstupem až do 70 V a výstupním proudem maximálně 1 A. Podle aplikační poznámky výrobce byl zvolen již nabízený návrh zvolení součástek vně integrovaného obvodu, které ho nastavují jako měnič snižující napětí na 12 V s maximálním proudem 1 A. Pro tuto aplikaci je zmiňovaný návrh z hlediska odebíraného proudu součástkami připojenými obvodu ke zdroji 12 V naprosto dostačující. Tento obvod je v kaskádě zapojen po stejnosměrném zdroji 48 V jako první.



Obr. 12: Schéma obvodu LTC3637 v dané aplikaci s jeho pouzdrém

ii.2.3 NÁVRH OBVODŮ PRO SPRÁVU NAPÁJENÍ

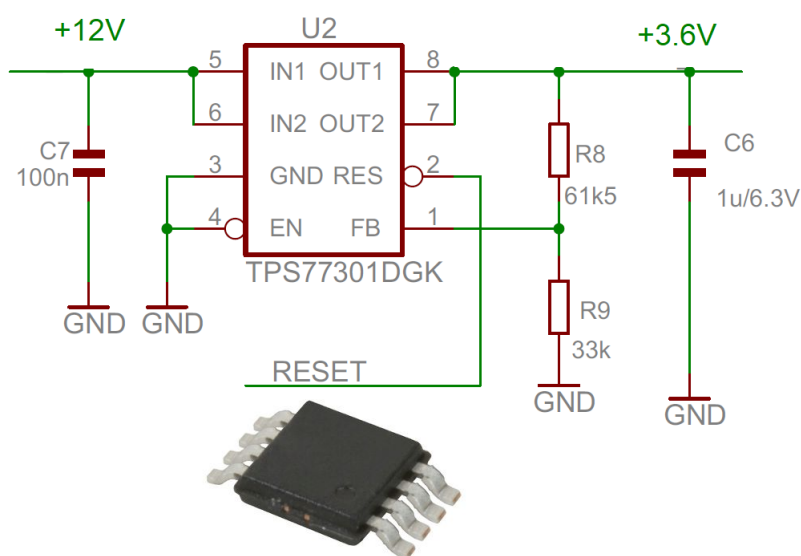
Další v řadě je zapojen obvod Texas Instruments TPS62160, což je snižovací pulzní měnič s rozsahem vstupního napětí 3 – 17 V, který umožňuje i funkci vysílání digitálního signálu procesoru v případě jeho poruchy. Dle doporučení výrobce byly k obvodu



Obr. 13: Schéma obvodu TPS62160 v dané aplikaci s jeho pouzdem

vybrány součástky upravující při vstupu 12 V výstup obvodu 5 V. Tento zdroj je zde nutný pro napájení displeje uloženého v podstavci motoru.

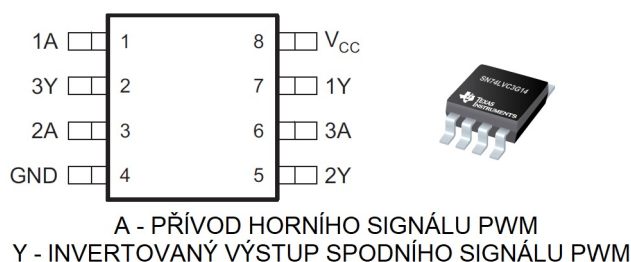
Jako poslední obvod upravující výstupní napětí je ve schématu zapojen obvod Texas Instruments TPS77301, který upravuje hodnotu napětí z 5 V na 3,3 V. To je napětí určené pro napájení procesoru a také invertoru signálů PWM. Návrh součástek nastavujících tento obvod byl inspirován již hotovým návrhem, který je realizován na zmiňovaném launchpadu jako převod napájení z 5 V USB na napájení procesoru.



Obr. 14: Schéma obvodu TPS77301 v dané aplikaci s jeho pouzdem

ii.2.3 NÁVRH OBVODŮ PRO SPRÁVU NAPÁJENÍ

Obvod invertující horní signály PWM, byl zvolen třívstupový invertor Texas Instruments SN74LVC3G14, pracující při napájení 3,3 V. Kvůli logice budiče, je nutné vysílat PWM signály šesti vodiči. Tři signály pro horní tranzistory a tři pro spodní. Spodní signály jsou tedy vytvářeny přivedením horních signálů do invertoru, který je zpracuje a odešle invertovaný výstup - naše požadované spodní signály.

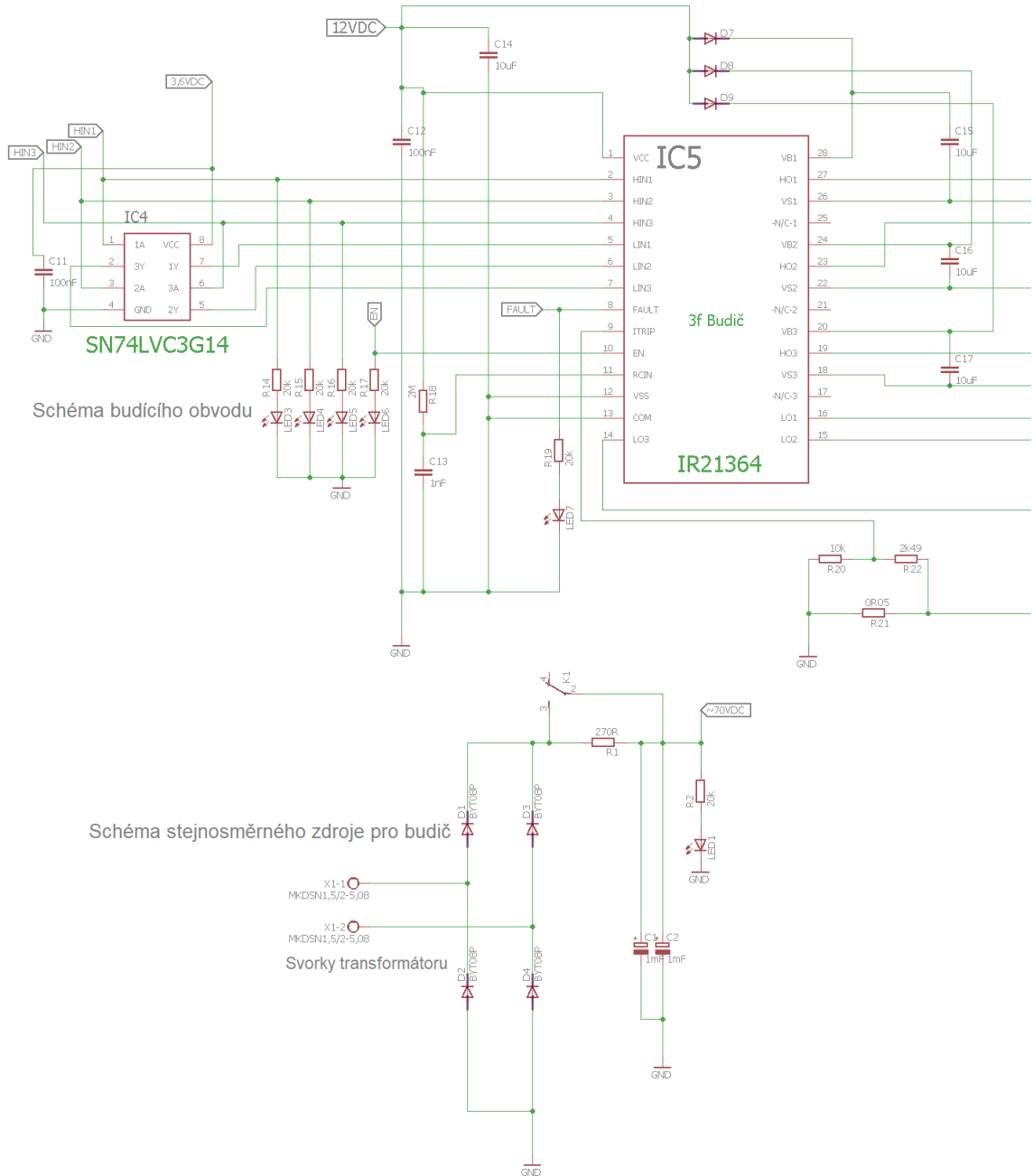


Obr. 15: Schéma třívstupového invertoru SN74LVCG14 s pouzdem.

Na obr. 16 je vidět schéma napájecího zdroje střídače a schéma zapojení obvodu budiče. Signály HIN1-3 zajišťující signály pro zapnutí 3 horních tranzistorů jsou přivedeny na invertor, který je zpracuje a tak mohou být k budiči přivedeny všechny potřebné signály. Součástky C13 a R18 zde tvoří již výše zmiňovaný externí RC obvod a výkonový rezistor R21 o malé velikosti měřící proud (tzv. šunt) spolu s R20 a R22 tvoří dělič zajišťující měření nadproudu. Kondenzátory C15-C17 potom slouží jako nábojová pumpa, zajišťující dostatek náboje pro pulzní spínání výstupů na gate tranzistorů. Je zde zobrazena i signalizace jednotlivých digitálních signálů pomocí LED.

V obvodu zdroje pro střídač je z obr. 16 vidět také řešení přednabíjení vyhlazovacích kondenzátorů, které v momentě hned po zapnutí zdroje nejsou nabity a chtějí odebrat velký proud. To je řešeno výkonovým odporem zapojeným mezi výstup usměrňovače a kondenzátory. Jakmile však hodnota napětí na kondenzátorech stoupne, zapnou se podružné zdroje energie v obvodu, které přes relé obejdou nabíjecí rezistor a povolí odběr jmenovitého proudu.

ii.2.3 NÁVRH OBVODŮ PRO SPRÁVU NAPÁJENÍ



Obr. 16: Schéma zapojení budiče a transformátorového zdroje stejnosměrného napětí pro střídač

ii.3

KONSTRUKCE STŘÍDAČE

V dalších odstavcích je popsán návrh desky plošného spoje, a dalších součástí střídače zohledňující již hotovou konstrukci samotného výukového modelu asynchronního motoru a také podstavce, na kterém je motor uložen.

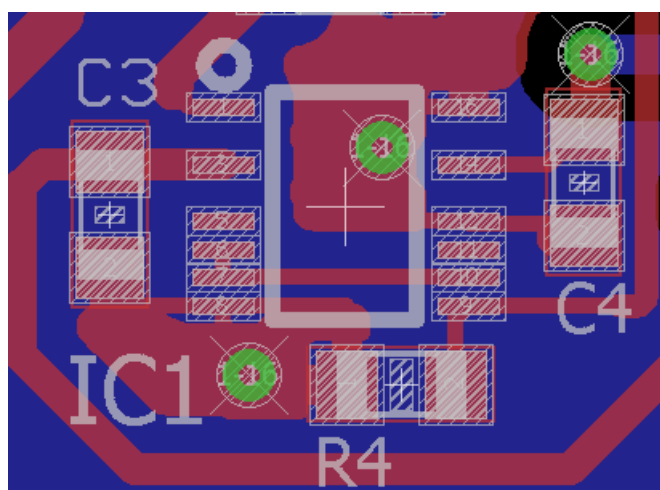
II.3.1 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

Deska plošného spoje (dále jen DPS) byla navržena v návrhovém prostředí určeném k vytváření návrhů schémat a z nich následně DPS, Autodesk EAGLE. Toto uživatelské prostředí je v praxi používáno již mnoho let a i přes své nepříliš uživatelsky přívětivé a neintuitivní ovládání, se stalo téměř standardem, vyučovaným již na středních školách a také výrobcí DPS, což je také důvodem proč byl tento software k návrhu zvolen.

Jak bylo již zmíněno výše, EAGLE vytváří návrh desky z předchozího návrhu schématu, takže byl v tomto prostředí vytvořen i celý obvod střídače se všemi reáliemi. Kompletní schéma celého střídače je uvedeno v přílohách č. 1, 2 a 3. Ukázka prostředí pro tvorbu schématu je na obr. 18. Z tohoto okna pochází téměř všechny úryvky celkového schématu střídače.

V návrhu DPS byly poté dle očekávaných hodnot proudu vhodně naddimenzovány šířky cest spojů. Pro silovou část, kde se očekává proud okolo 5 A byla zvolena šířka cesty 6,18 mm. U signálových cest byla potom vybrána standardní šířka cesty 1 mm, popří-

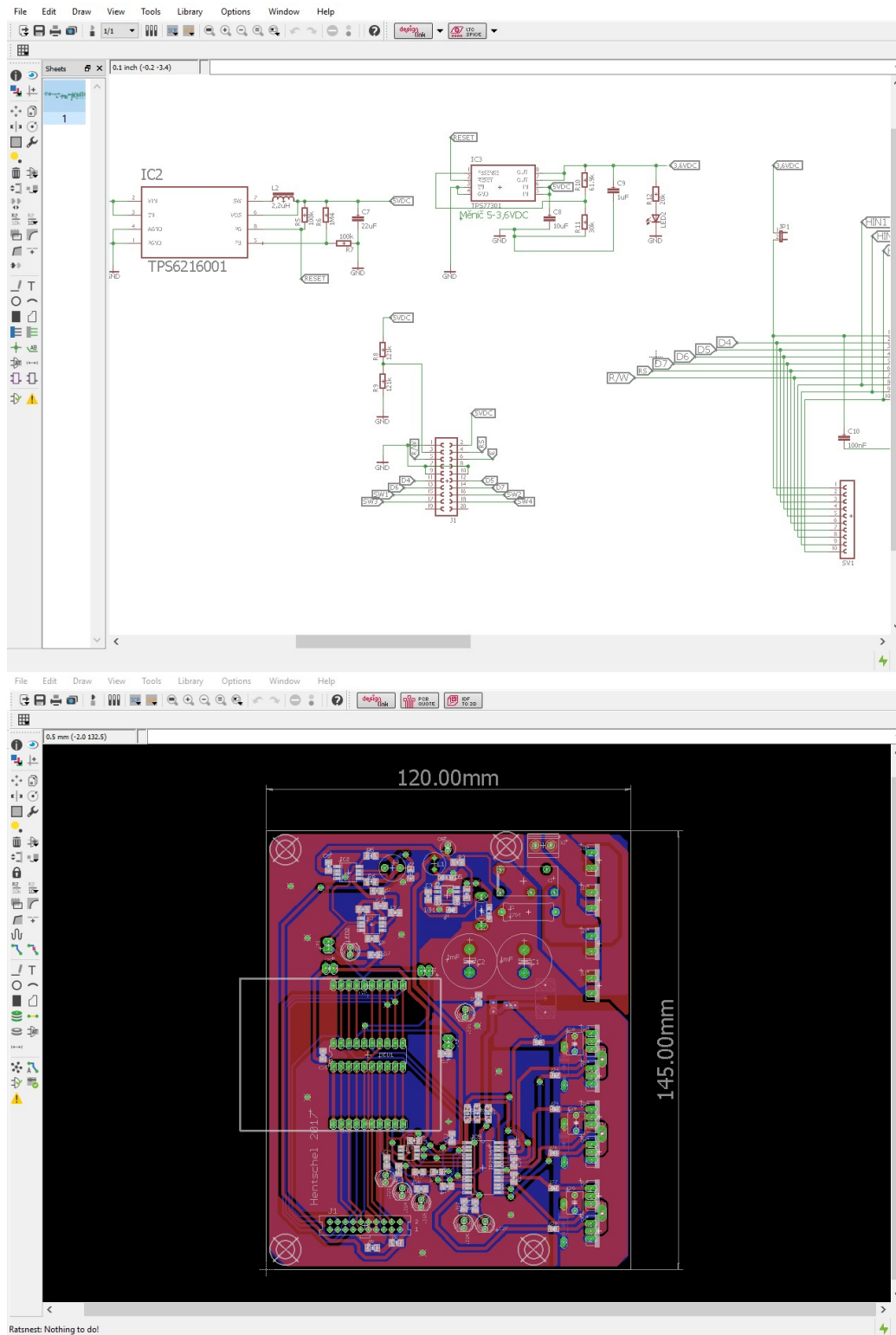
ii.3.1 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE



Obr. 17: Návrh rozložení součástek okolo zdroje 12V LTC3637

padě tenčí, z důvodů místa. Kvůli snadnějšímu průtoku proudu a lepšímu odvodu tepla celé desky byly některé potenciály obvodu "rozlity" do měděných polygonů. Například napětí výkonového obvodu, nebo proudová měřící cesta (cesta mezi source piny tranzistorů a nadproudovým měřícím odporem). Tyto dvě hlavní proudové cesty je také vhodné "rozlít" přímo pod sebe, tzn. jednu proudovou cestu do horní vrstvy DPS a druhou do spodní. Proud potom jde z pohledu desky jednou cestou oběma směry ve dvou vrstvách, což minimalizuje parazitní indukčnosti celého obvodu. Do zbylých ploch v horní i spodní vrstvě je potom také z důvodů dobrého uzavírání proudu "rozlít" potenciál země. Dalším kritériem návrhu DPS je také zapojení malých keramických kondenzátorů co neblíže napájecích a uzemňovacích pinů každého integrovaného obvodu. Tyto kondenzátory (C3 na obr. 17) se nazývají blokovací a jsou určeny potlačení vysokofrekvenčního rušení, které se nakmitává na obvod a oddělení jednotlivých zdrojů různého napětí od sebe. Celý návrh DPS je k vidění v příloze č.4.

ii.3.1 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

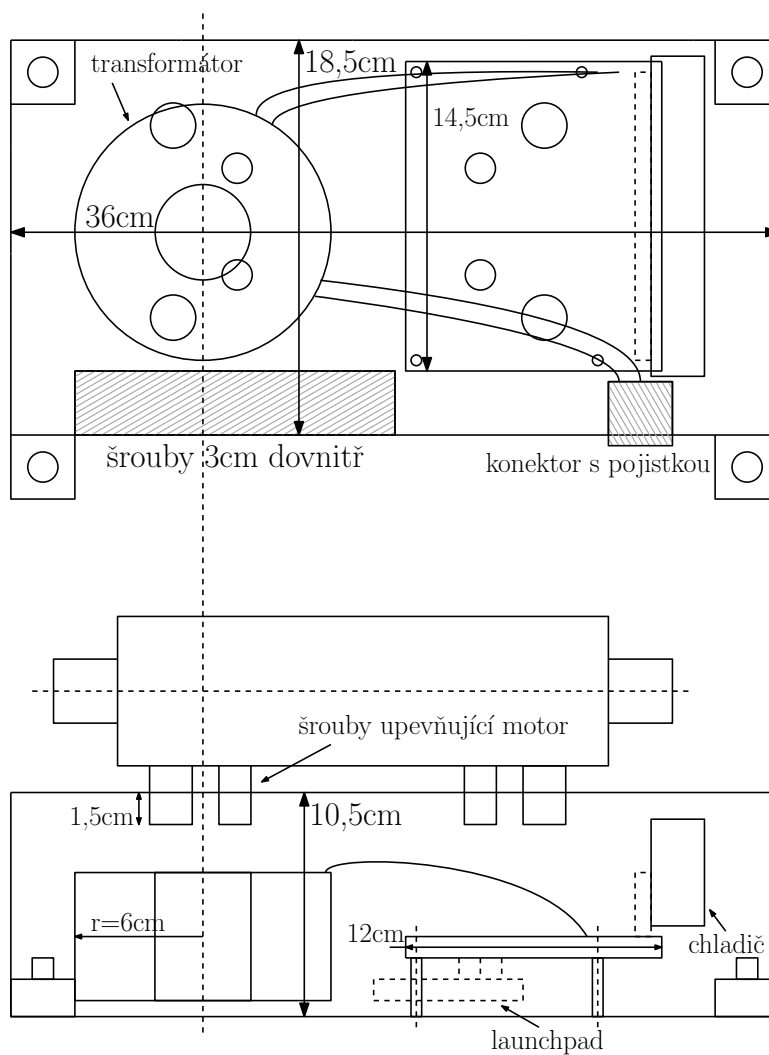


Obr. 18: ukázka okna tvorby schématu a tvorby DPS v prostředí EAGLE

ii.3.1 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

Na obr. 18 je také vidět ukázka okna tvorby DPS s finálním návrhem desky střídače. Jsou zde vidět i finální rozměry desky, které zahrnují konstrukční požadavky, dané velikostí podstavce motoru.

Na dalším obrázku je vyobrazen nákres vnitřního prostoru podstavce motoru, který byl stavebním kamenem návrhu konstrukce střídače i se všemi součástmi uvnitř podstavce.



Obr. 19: Nákres prostoru podstavce

ii.3.1 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

Zvolení umístění součástí střídače a samotné DPS je viditelné na obr. 19. V prostoru podstavce zamezují využití celého prostoru šrouby svorkovnice, na které je motor připojen. Ty vyčnívají dovnitř prostoru podstavce asi o 3cm. Dále konstrukci limitují šrouby, kterými je motor připevněn k podstavci. Ty vyčnívají cca. 1,5cm ze stropu podstavce. Výška podstavce je však 10,5 cm, takže i nejvyšší součást, chladič na DPS nebo transformátor vysoký 6cm nemá problém s umístěním. Ten je v prostoru podstavce uložen vlevo, napravo od něj je umístěna DPS, která má do jisté míry rezervu prostoru zleva, aby mohl k desce být dodatečně připojen launchpad a bylo možné obvod ladit. Od desky musí být prostorová rezerva několik cm i zprava, jelikož je zde ještě nutné mít prostor pro pasivní chladič umístěný na výkonových součástkách střídače. Zvenčí bude podstavec připojen k elektrické síti pomocí standardní evropské koncovky s hlavním vypínačem a pojistkou.

V návrhu je potom řešeno ještě několik věcí, které jsou alespoň z části také vidět na obr. 19. Jednou z nich je patice na připojení launchpadu, která umožňuje kdykoliv odladit program mikroprocesoru, řídící střídač. Dalším konstrukčním prvkem je svorkovnice na připojení sekundárního vinutí transformátoru, umožňující snadnější montáž či případnou výměnu jednotlivých částí měniče. Vývody fází střídače určené k připojení zátěže jsou vyvedeny vodiči na svorkovnici motoru, která je již součástí podstavce.

Část III

ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

iii.1

ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

III.1.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Výsledkem této práce je popis funkčního principu třífázového napěťového střídače a jeho režimů řízení, hotová realizace obvodového schématu napěťového střídače a jeho budících obvodů a návrhu desky plošného spoje s popisem návrhu konstrukce dalších periférií celého zařízení. Z důvodu přehlédnutí nevhodného nákresu již hotových součástek výrobci, které jsou implementovány v knihovnách programu EAGLE a vyskytnutí se vývojářských problémů, jako například problémy s dodavateli daných součástek však nebyla splněna včasná realizace DPS a finální konstrukce střídače s implementovaným řízením v procesoru a tím pádem ani měření výsledků funkčního střídače. Dokončení realizace konstrukce střídače, implementace U/f řízení střídače, komunikace střídače s dvouřádkovým displejem a implementace předváděcího dema, názorně ukazujícího rozběh, chod, řízení a brzdění asynchronního motoru je tedy předmětem nejbližší doby. Dále pak následuje měření výsledného střídače a zhodnocení naměřených výsledků.

iii.1.2 SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

III.1.2 SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

Pokračováním práce je potom rozšíření návrhu obvodu o měřící prvky snímající aktuální hodnotu napětí, proudu a teploty a implementace inteligentnějších nadproudových ochran, přepěťových ochran a také ochran tepelných.

LITERATURA

- [1] BARTOŠ, Václav, *Elektrické stroje*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 8-7043-444-9.
- [2] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*, Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-485-9.
- [3] FRANK, Zdeněk. *Výukový model asynchronního motoru*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2016, Bakalářská práce, Vedoucí práce : Ing. Vladimír Kindl Ph.D.

SEZNAM OBRÁZKŮ

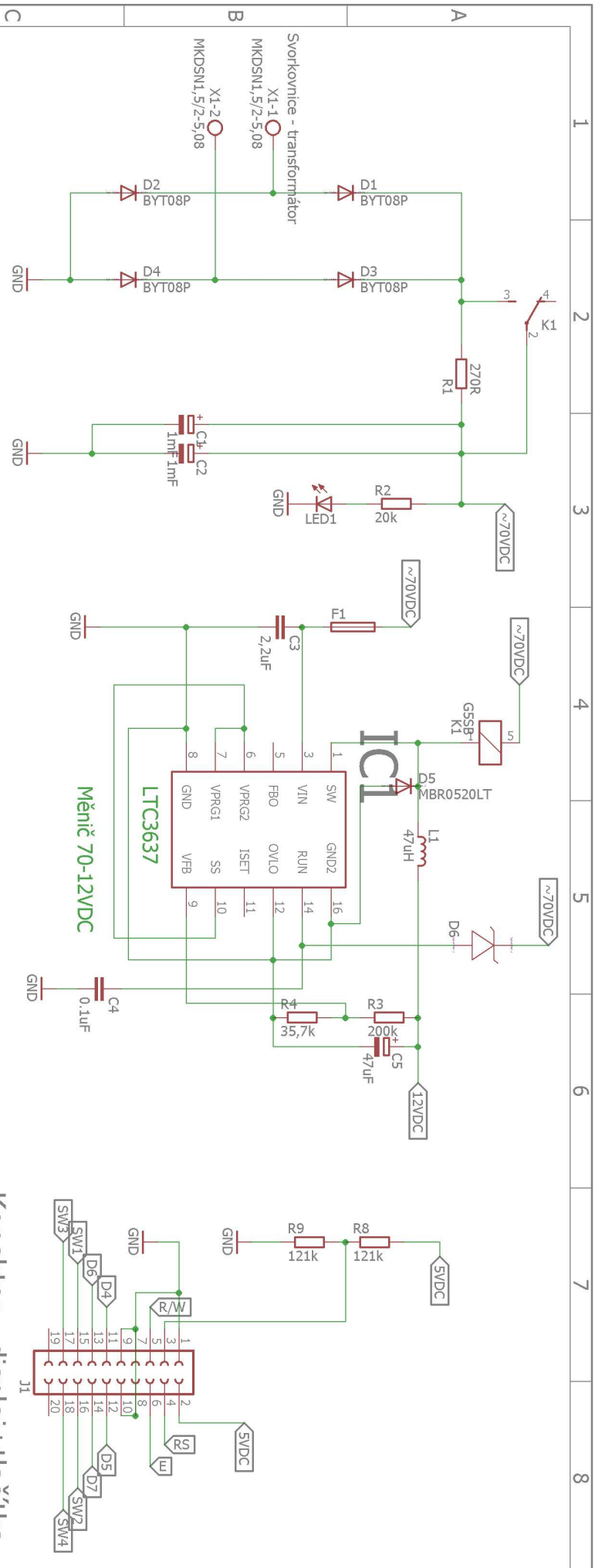
Obrázek 1	Výukový model asynchronního motoru s podstavcem [3]	3
Obrázek 2	Náhradní schéma asynchronního motoru vyjadřující rozdělení ztrát a mechanického výkonu závislého na skluzu	6
Obrázek 3	Schéma můstkového třífázového napěťového střídače s odporově induktivní zátěží spojenou do hvězdy	11
Obrázek 4	a) Obdélníkové amplitudové řízení, b) Obdélníkové šířkové řízení, c) Šířkově pulzní řízení, d) Šířkově pulzně modulované řízení	13
Obrázek 5	Úhly ψ sepnutí výkonových součástek	16
Obrázek 6	Princip PWM založený na porovnávání nosné pily a u_r	17
Obrázek 7	Tranzistor FDP52N20 v pouzdře TO-220 a jeho schematická značka	21
Obrázek 8	Návrh výkonového obvodu v prostředí EAGLE	22
Obrázek 9	Transformátor TALEMA 230/48	22
Obrázek 10	Procesor MSP430G2553 v launchpadu	23
Obrázek 11	budič Infineon IR21364	23
Obrázek 12	Schéma obvodu LTC3637 v dané aplikaci s jeho pouzdrém	24
Obrázek 13	Schéma obvodu TPS62160 v dané aplikaci s jeho pouzdrém	25
Obrázek 14	Schéma obvodu TPS77301 v dané aplikaci s jeho pouzdrém	25
Obrázek 15	Schéma třívstupového invertoru SN74LVCG14 s pouzdrém.	26
Obrázek 16	Schéma zapojení budiče a transformátorového zdroje stejnosměrného napětí pro střídač	27
Obrázek 17	Návrh rozložení součástek okolo zdroje 12V LTC3637	29
Obrázek 18	ukázka okna tvorby schématu a tvorby DPS v prostředí EAGLE	30
Obrázek 19	Nákres prostoru podstavce	31

SEZNAM TABULEK

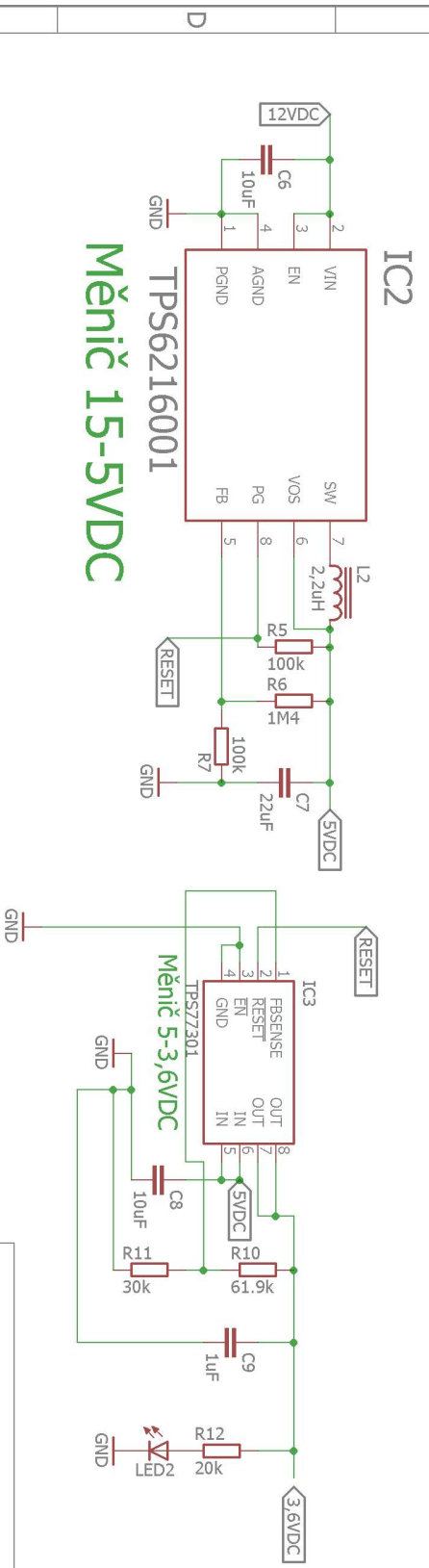
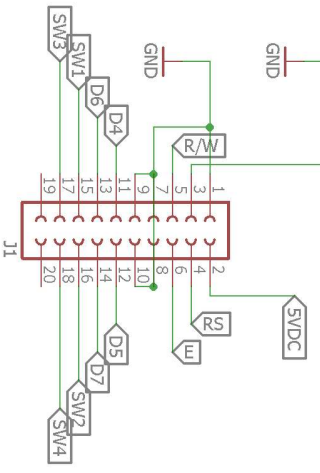
Tabulka 1	Tabulka výchozích parametrů výukového modelu asynchronního motoru	20
-----------	---	----

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 . . . Schéma obvodů pro správu napájení	
Příloha č.2 . . . Schéma zapojení procesoru	
Příloha č.3 . . . Budící a výkonové schéma střídače	
Příloha č.4 . . . Návrh desky plošného spoje	



Konektor - displej+tláčítka



Měnič 15-5VDC

TPS6216001

IC2

Měnič 5-3,6VDC

TPS77301

IC3

Schéma obvodů pro správu napájení

Jan Hentschel

červen 2017 Fakulta elektrotechnická ZČU

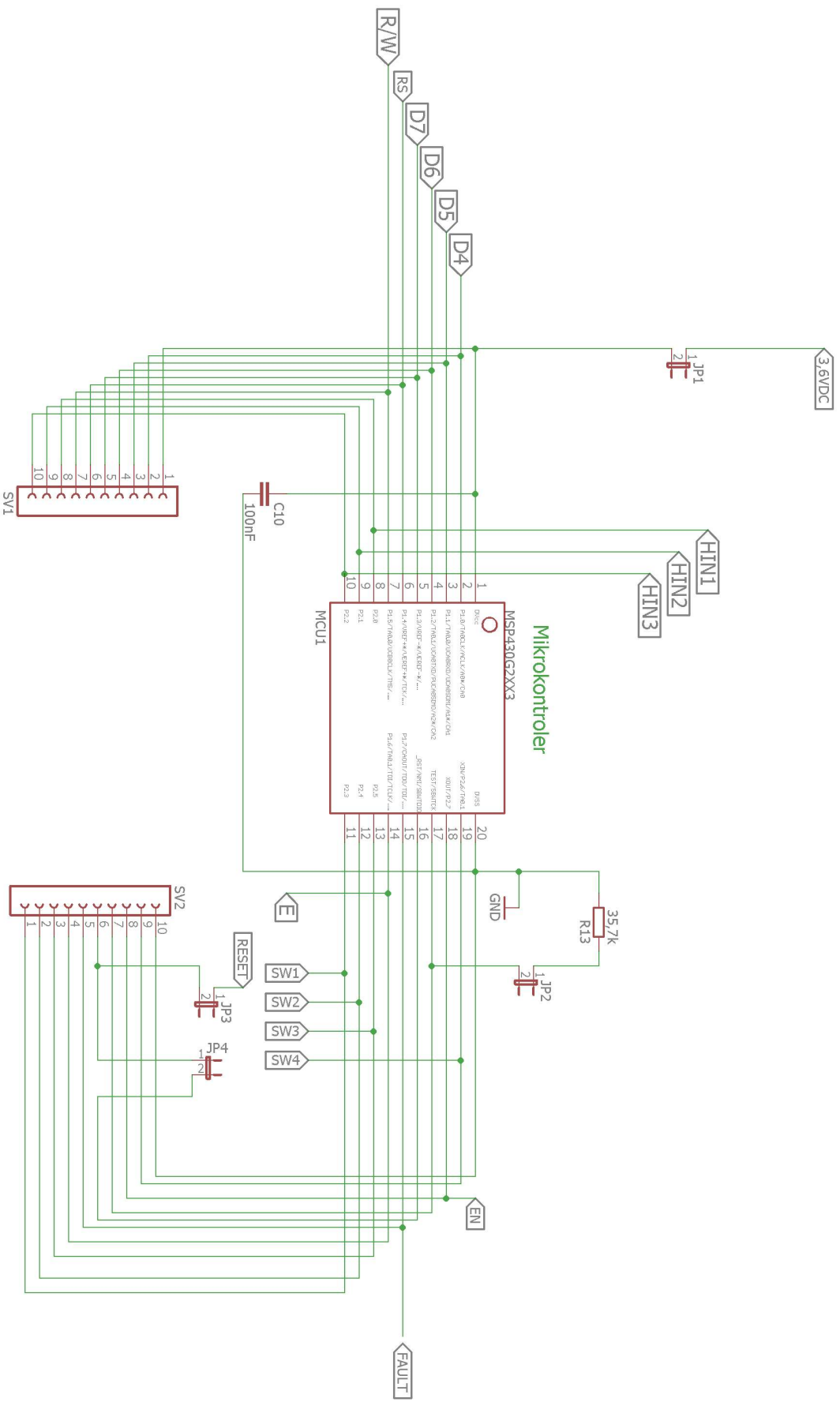
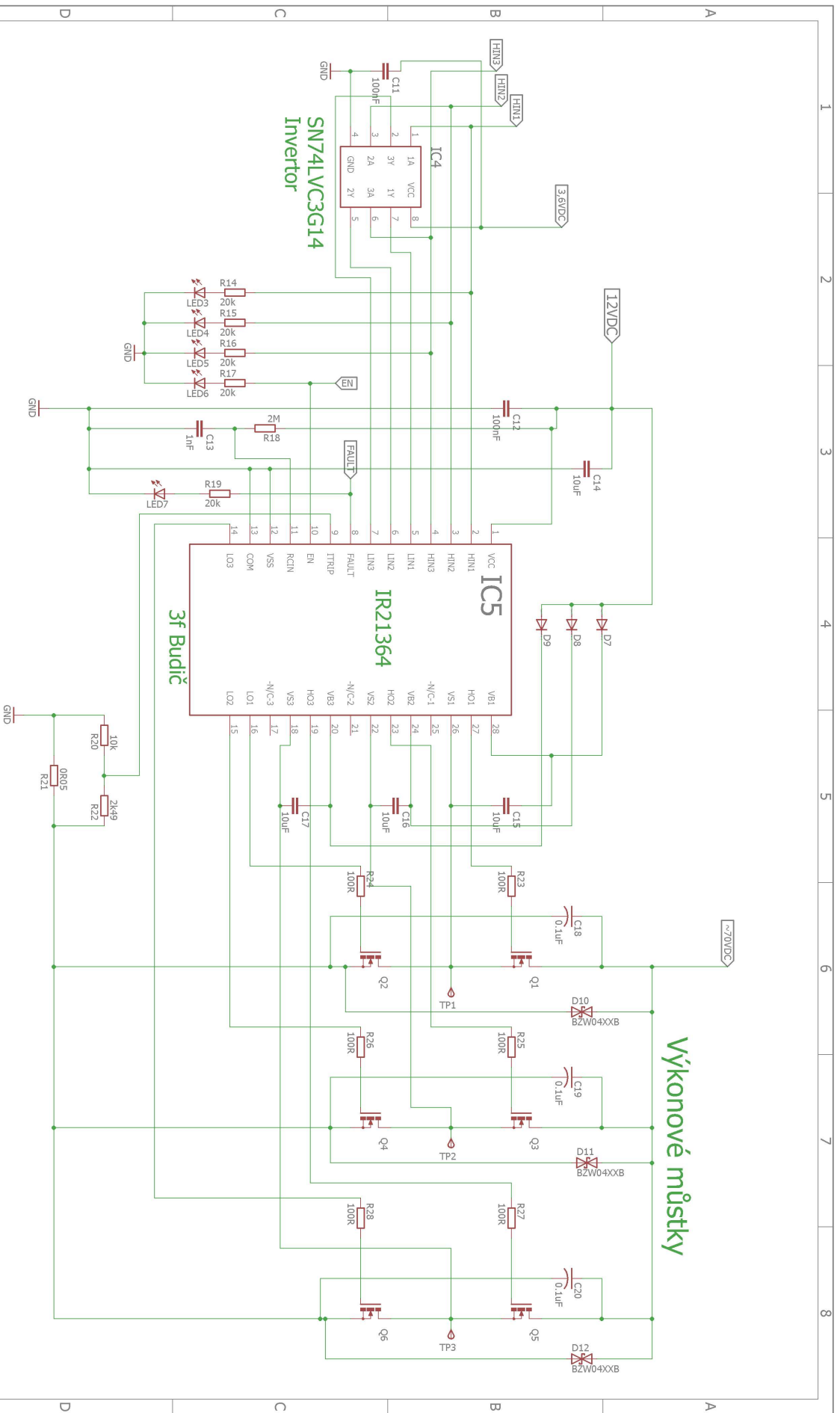


Schéma zapojení procesoru

Jan Hentschel

červen 2017 Fakulta elektrotechnická ZČU



Výkonové můstky

3f Budič

SN74LVC3G14 Invertor

Budičí a výkonové schéma střídače

Jan Hentschel

červen 2017 Fakulta elektrotechnická ZČU

120.00mm

145.00mm

