



## **Středoškolská technika 2023**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

### **Model frekvenčního měniče**

**Roman Vaněk**

SPŠ a VOŠ Písek, Karla Čapka 402, 397 11 Písek



## Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem práci na téma Návrh a realizace elektrotechnického obvodu (frekvenční měnič) zpracoval sám a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem pro zadání a realizaci maturitní práce a normou ČSN ISO 690:2011.“

V Písku dne .....

.....

Podpis žáka

## **Poděkování:**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Miroslavu Kašparovi za jeho četné rady, připomínky, náměty, trpělivost a ochotu, které mě vždy nasměrovaly ke správnému řešení problematiky, a za poskytnutí možnosti pracovat na praktické části v odborných laboratořích školy. Další dík patří Ing. Josefu Vláškovvi za cenné rady při řešení práce.

## **Anotace**

Práce se zabývá problematikou konstrukce, softwarového řešení frekvenčních měničů a jejich užití pro řízení třífázových synchronních a asynchronních motorů. V úvodu je popsán postupný historický vývoj konstrukčních řešení frekvenčních měničů. V další části následuje rozbor součástí nezbytných pro návrh měniče. Poslední teoretická část řeší jednotlivé druhy motorů, pro které je měnič určen. Druhá polovina práce je zaměřena na praktický návrh frekvenčního měniče. V návrhu je uvedený výběr součástí, návrh jednotlivých částí, rozvržení DPS a tvorba programu pro mikrokontrolér. Frekvenční měnič je řízen mikrokontrolérem Arduino Due. Poslední část sleduje samotné oživení a měření prováděná na zařízení.

## **Klíčová slova**

Frekvenční měnič, střídač, synchronní motor, asynchronní motor, skalární řízení, PWM, SPWM, bezsenzorové řízení, galvanické oddělení, MOSFET, IGBT, gate driver, mikrokontrolér, Arduino Due

## **Annotation**

The graduation thesis deals with the design, software solution of frequency converters and their use for control of three-phase synchronous and asynchronous motors. In the introduction, the historical development of frequency converter designs is described. This is followed by a discussion of the components necessary for the converter design. The last theoretical part deals with the different types of motors for which the converter is designed. The second half of the thesis focuses on the practical design of the frequency converter. The design includes the selection of components, design of the individual parts, PCB layout and the creation of the program for the microcontroller. The frequency converter is controlled by an Arduino Due microcontroller. The last part follows the testing and measurements performed on the device.

## **Key words**

Frequency converter, inverter, synchronous motor, asynchronous motor, scalar control, PWM, SPWM, sensorless control, galvanic isolation, MOSFET, IGBT, gate driver, MCU, Arduino Due

# Obsah

1.	ÚVOD.....	8
2.	FREKVENČNÍ MĚNIČ.....	9
2.1	POUŽITÍ.....	9
2.2	ČÁSTI MĚNIČE.....	9
2.2.1	<i>Usměrňovač</i> .....	10
2.2.2	<i>Meziobvod</i> .....	10
2.2.3	<i>Střídač</i> .....	11
2.2.4	<i>Řídící obvod</i> .....	11
2.3	DOPLŇKOVÁ VÝBAVA MĚNIČŮ.....	12
2.3.1	<i>Terminátory</i> .....	12
2.3.2	<i>Filtr du/dt</i> .....	12
2.3.3	<i>Harmonický filtr</i> .....	13
2.3.4	<i>Brzdné odpory</i> .....	13
3.	SOUČÁSTKY V MĚNIČÍCH.....	14
3.1	MOSFET.....	14
3.1.1	<i>Konstrukce</i> .....	14
3.1.2	<i>Princip činnosti</i> .....	15
3.2	IGBT.....	15
3.3	GATE DRIVER.....	16
3.4	CIPOS™.....	17
3.5	OPTRON.....	17
4.	ELEKTROMOTORY.....	18
4.1	SYNCHRONNÍ MOTOR.....	18
4.2	ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	18
4.2.1	<i>Princip činnosti</i> .....	18
4.3	BLDC MOTOR.....	19
5.	NÁVRH MĚNIČE.....	20
5.1	VSTUPNÍ FILTR.....	20
5.2	USMĚRŇOVAČ.....	21
5.3	STEJNOSMĚRNÝ MEZIOBVOD.....	21
5.4	STŘÍDAČ I.....	22
5.4.1	<i>Výběr tranzistorů</i> .....	22
5.4.2	<i>Výpočet chladiče</i> .....	22
5.4.3	<i>Gate drivery</i> .....	23
5.5	STŘÍDAČ II.....	25
5.5.1	<i>CIPOS™</i> .....	25
5.5.2	<i>Výpočet chladiče</i> .....	26
5.5.3	<i>Plovoucí zdroj</i> .....	26
5.5.4	<i>Nadproudová ochrana</i> .....	26
5.5.5	<i>Teplotní senzor</i> .....	28
5.6	GALVANICKÉ ODDĚLENÍ ŘÍDÍCÍCH SIGNÁLŮ.....	28
5.7	VÝSTUPNÍ FILTR.....	29
6.	NÁVRH DPS.....	30
6.1	NÁVRH DPS STŘÍDAČ I.....	30
6.2	NÁVRH DPS STŘÍDAČ II.....	31

<b>7.</b>	<b>TVORBA PROGRAMU .....</b>	<b>33</b>
7.1	PRINCIPY VÝPOČTU SPWM .....	33
7.1.1	<i>Řízení v reálném čase .....</i>	<i>33</i>
7.1.2	<i>Řízení obdélníkem zarovnaným na střed .....</i>	<i>33</i>
7.1.3	<i>Řízení základní řadou .....</i>	<i>34</i>
7.2	VLASTNÍ PROGRAM .....	34
7.3	ZÁSADY PŘI TVORBĚ PROGRAMU.....	36
<b>8.</b>	<b>OŽIVENÍ A ZÁVĚREČNÁ MĚŘENÍ .....</b>	<b>37</b>
8.1	OŽIVENÍ .....	37
8.1.1	<i>Oživení střídače I. ....</i>	<i>37</i>
8.1.2	<i>Oživení střídače II. ....</i>	<i>37</i>
8.2	MĚŘENÍ .....	37
8.2.3	<i>Měření na výstupech optronů .....</i>	<i>38</i>
8.2.3	<i>Měření průběhů na gatech tranzistorů .....</i>	<i>38</i>
8.2.4	<i>Měření průběhu výstupního a FFT analýza .....</i>	<i>40</i>
	ZÁVĚR .....	43
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	44
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	45

### 1. Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a realizací prototypu měniče frekvence určeného pro řízení 3fázových točivých strojů. Cílem práce bylo navrhnout a realizovat frekvenční měnič umožňující vytvořit 3fázovou síť, s rozsahem frekvence minimálně 30–50 Hz, pro řízení motoru s výkonem do 250 W.

Frekvenční měniče jsou v dnešní době již běžnou součástí našeho života. V podobě, jaké je známe dnes, jsou zde s námi téměř 70 let. Požadavky na vznik zařízení, schopné řídit otáčky motoru, vyvstal během tzv. Druhé průmyslové revoluce koncem 19. století, kdy nastal rozmach v elektrifikaci výrobních linek pro usnadnění a zlevnění výroby. [1] V této době však technologií pro řízení motorů nebylo mnoho. Motory se řídily například pomocí kaskádního řazení motorů, změnou odporu v obvodu kotvy, přepínáním počtu pólových dvojic, změnou statorového napětí nebo pomocí Ward Leonardova soustrojí. [2] Velký zlom nastal až s příchodem prvních polovodičových součástek, zejména tyristoru. Pomocí této součástky, schopné spínat velké výkony, byl vytvořen první frekvenční měnič tzv. cyklokonvertor. Ten však umí frekvenci pouze snižovat a k napájení používá přímo 3fázovou síť. [3] Dalším postupným vývojem polovodičové techniky, vynálezem výkonových BJT, MOSFET, GTO, IGBT a technologie SiC, mohl vzniknout nejmodernější typ frekvenčního měniče, který může být napájen z 1fázové i 3fázové sítě, kterou nejprve usměrní a poté rozstřídá na požadovaný průběh. Tímto měničem se budeme právě dále zabývat.



## 2. Frekvenční měnič

Frekvenční měnič je elektrické zařízení umožňující změnit střídavý proud o jedné frekvenci na proud o frekvenci druhé. Používá se zpravidla pro řízení otáček elektromotorů.

### 2.1 Použití

Důvodů pro užití frekvenčního měniče může být mnoho. Nejenže se používá pro změnu frekvence proudu, ale můžeme s ním provádět například i reverzaci otáček motoru. Dále jej můžeme použít jako softstartér<sup>1</sup>, kde díky použití plynulého rozběhu nezatěžujeme rozvodnou síť proudovými rázy, způsobenými velkými rozběhovými proudy. Další výhodou je, že mnohé frekvenční měniče dokážou napájet 3fázové motory z 1fázové sítě, aniž by výrazně ovlivnily jejich točivý moment, jako je tomu třeba u zapojení s rozběhovým kondenzátorem. Pro účely automatizace můžeme také frekvenční měnič připojit k PLC, pomocí kterého jej můžeme ovládat. Další funkcí měniče může být i brždění motoru. Běžně se používají 3 druhy brždění. Brždění mechanické, brždění protiproudem a brždění generátorické. Do běžné výbavy měničů zapadá i sada ochranných funkcí, mezi které zapadá například ochrana proti zkratu<sup>2</sup>, ochrana proti přetížení elektromotoru i měniče nebo i kontrola teploty vinutí pomocí zpětné vazby z teplotních čidel vinutí. [4]

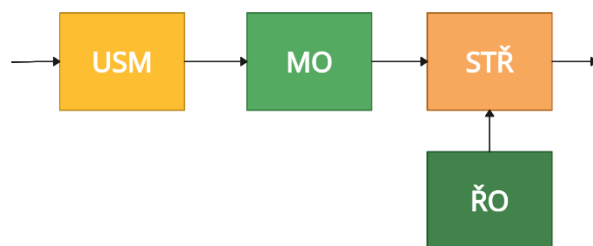
### 2.2 Části měniče

Frekvenční měniče mohou být různé konstrukce. Nejčastější uplatnění najdou však měniče určené pro malé výkony, které bývají nejčastěji konstruovány jako nepřímé měniče kmitočtu se stejnosměrným meziobvodem, využívající pulsní šířkové modulace. Obvod takového měniče můžeme rozdělit do 4 hlavních částí: usměrňovače, meziobvodu, střídače a řídicího obvodu viz Obr. 1.

---

<sup>1</sup> Toto má smysl pouze pro motory velkých výkonů

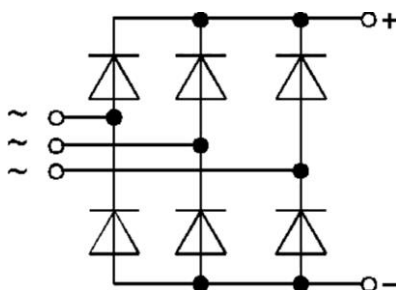
<sup>2</sup> Zemnímu i mezifázovému



Obr. 1 Blokové schéma frekvenčního měniče

### 2.2.1 Usměrňovač

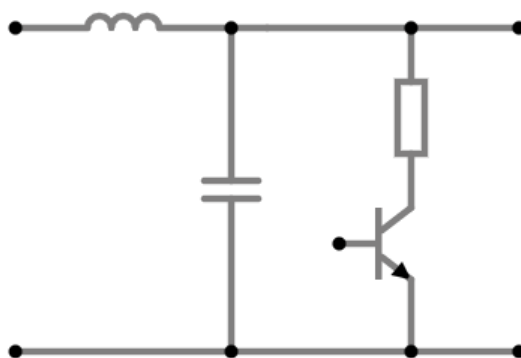
Slouží k převedení střídavého napětí na stejnosměrné. Nejběžněji se používá neřízený usměrňovač ve dvoucestném zapojení. Měniče větších výkonů mají usměrňovač 3fázový. Usměrňovač používáme pro napájení meziobvodu.



Obr. 2 3fázové dvoucestné zapojení usměrňovače

### 2.2.2 Meziobvod

Jedná se o stejnosměrný obvod, který stabilizuje pulzující napětí z usměrňovače, kterým je napájen, a slouží jako zdroj pro střídač. Jedná se zpravidla o výkonový LC filtr. Slouží pro udržení konstantního napětí pro napájení střídače. Další jeho funkcí je omezení proudových rázů v síti. Může být doplněn brzdovým odporem, pokud je vyžadována funkce brždění motorů.



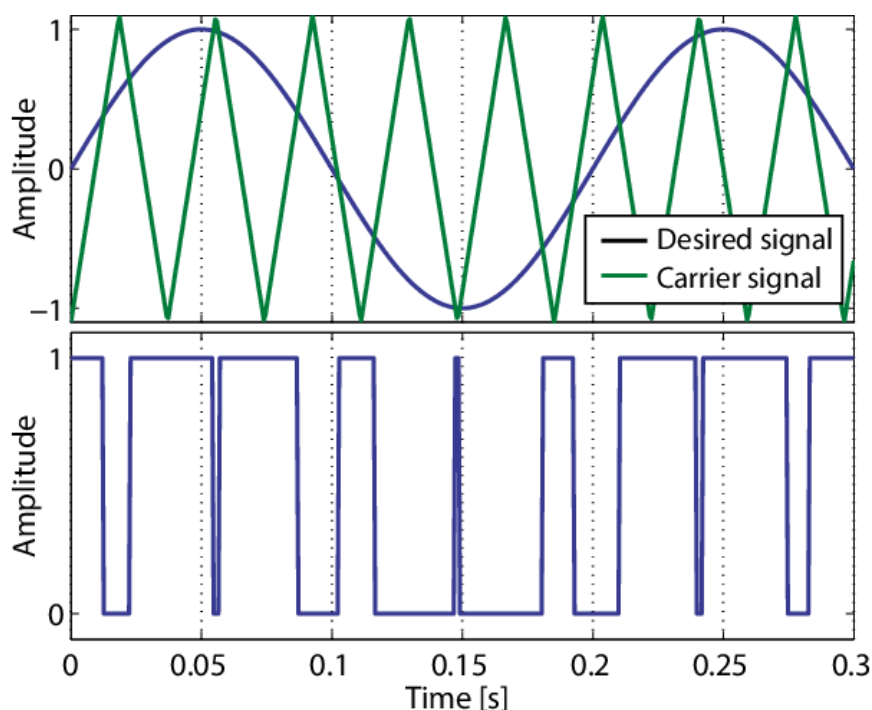
Obr. 3 Stejnosměrný meziobvod s brzdovým odporem

### 2.2.3 Střídač

Střídač je elektrický obvod sloužící ke změně stejnosměrného napětí z meziobvodu na napětí střídavé. Dělalí se v jednofázovém a třífázovém provedení. Jednofázové se užívají například pro napájení zásuvek nebo bojlerů z fotovoltaických panelů. Třífázové se používají zpravidla pro řízení motorů nebo připojování fotovoltaických elektráren k třífázové síti. Střídač je složen z výkonových tranzistorů, budičů pro tranzistory a zpětných ochranných diod. Jeho funkce je řízena pomocí řídicího obvodu.

### 2.2.4 Řídicí obvod

Řídicí obvod je součást měniče sloužící k řízení spínání tranzistorů. Můžeme je rozdělit na dvě skupiny. První skupina, konstrukčně starší, využívá tři oscilátory, jednoho generátoru trojúhelníkovitého signálu a tří komparátorů. Oscilátory generují sinusové průběhy vzájemně o  $120^\circ$  posunuté a s požadovanou výstupní frekvencí. Generátor trojúhelníkového průběhu generuje signál o frekvenci vzorkovacího kmitočtu. Na jeden vstup komparátoru přivádíme vzorkovací signál a na druhý vstup přivádíme požadovaný sinusový průběh. Řídicí signály jsou tedy generovány pomocí SPWM (sinusové modulace šířky pulzu).



obr. 4 SPWM [6]

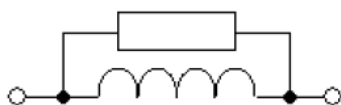
Druhá skupina, používaná dnes, využívá principy skupiny první. Všechny hodnoty jsou ale vypočítávány pomocí matematických vzorců v mikroprocesoru. Mikroprocesor umožňuje snadnou změnu softwaru a pokročilejší řízení motoru, jako je například nastavení rampy. (Rampa je funkce pozvolného náběhu otáček motoru na požadovanou hodnotu)

### 2.3 Doplnková výbava měničů

Doplnkovou výbavou měniče rozumíme přídatná zařízení, která se standartně s měničem nedodávají. Nejčastěji se jedná o výstupní filtry nebo brzdné odpory.

#### 2.3.1 Terminátory

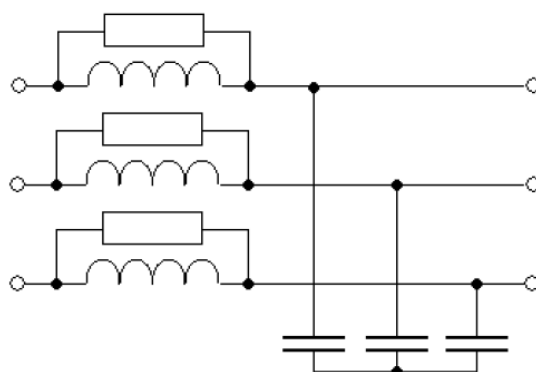
Terminátor je filtr, který zajišťuje impedanční přizpůsobení mezi střídačem a kabelem. Tím zamezí vzniku vysokofrekvenčních napětových špiček, které by mohly prorazit izolaci vinutí motoru, a tím motor nenávratně poničit. Jejich nevýhodou je zvětšení spínacích ztrát a zmenšení 1. harmonické složky výstupního napětí střídače. [5]



obr. 5 Schéma terminátoru jedné fáze [5](upraveno)

#### 2.3.2 Filtr $du/dt$

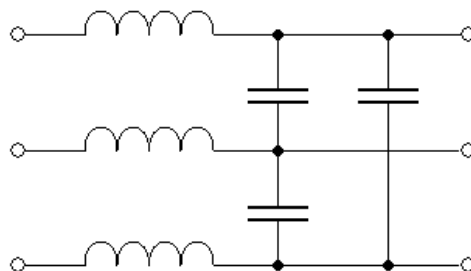
Tento filtr slouží k omezení strmosti napětových pulzů, které vznikají činností střídače. Hlavní výhodou filtru je nízká cena oproti harmonickému filtru. Tento filtr je však závislý na délce kabelu, kterým je motor k měniči připojen. [5]



obr. 6 Schéma třífázového  $du/dt$  filtru [5]

### 2.3.3 Harmonický filtr

Konstrukčně se jedná o LC dolní propust. Jeho účelem je filtrace vyšších harmonických. Tím dokážeme na výstupu vytvořit téměř sinusový průběh, tedy první harmonickou výstupního napětí střídače. Nevýhodou filtru jsou větší vlastní ztráty, rozměry a větší výrobní náklady.



obr. 7 Schéma třífázového harmonického filtru [5]

### 2.3.4 Brzdné odpory

Slouží pro brždění motoru. Připojuje se na zvláštní svorky na měniči. Pracuje na principu maření energie, kterou motor produkuje v generátorickém režimu.

### 3. Součástky v měničích

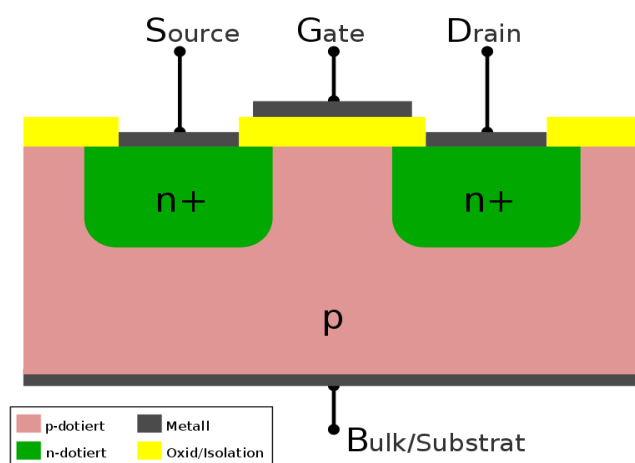
Ve frekvenčních měničích se využívá celé spektrum nejrůznějších součástek. Zaměříme se však pouze na některé z nich. Nejdříve rozebereme tranzistory IGBT a MOSFET. Následovat budou budiče<sup>3</sup> tranzistorů a nakonec se zaměříme na optrony.

#### 3.1 MOSFET

MOSFET je zkratkou pro Metal Oxide Semiconductor Field- Effect Transistor. Jedná se o tranzistor řízený elektrickým polem. Řadíme jej do skupiny unipolárních tranzistorů, protože se přenosu proudu účastní pouze nosiče náboje jedné polaroty. MOSFETy dělíme na dva typy, s vodivým kanálem a s indukovaným kanálem. Pro naše potřeby se zaměříme na MOSFET s indukovaným kanálem, protože je pro naši konstrukci vhodnější.

##### 3.1.1 Konstrukce

Základem je polovodičová destička jednoho typu vodivosti, do které jsou difúzí vytvořeny dvě silně dotované oblasti opačné polaroty. Tyto oblasti jsou připojeny na elektrody Drain (D) a Source (S). Mezi tyto oblasti se na substrátu vytvoří tenká vrstva oxidu křemičitého SiO<sub>2</sub>. Na tuto vrstvu oxidu je nanесena řídící elektroda Gate (G). Typ tranzistoru určuje typ vodivosti silně dotovaných oblastí. Pokud tedy je oblast N+, tak se jedná o MOSFET typu N.

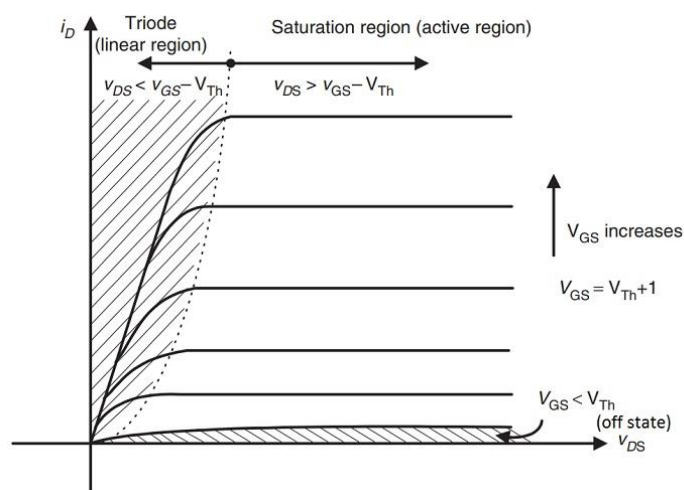


obr. 8 MOSFET - typ N

<sup>3</sup> drivery

#### 3.1.2 Princip činnosti

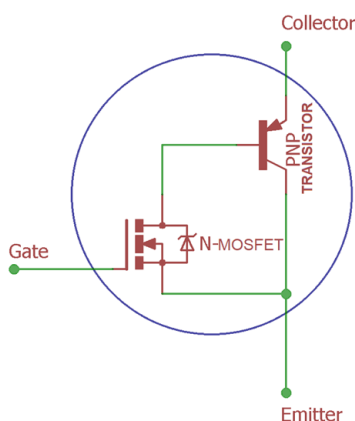
Tranzistor řídíme pomocí napětí přiváděného na řídicí elektrodu. Jelikož je řídicí elektroda izolována, neprotéká zde žádný proud. Izolace elektrody je provedená dielektrikem, díky kterému se na straně kovové elektrody může hromadit náboj. Tím dojde ke vzniku elektrostatického pole, pomocí kterého dokážeme řídit volné nosiče náboje v substrátu. Dokážeme tedy pomocí těchto nosičů indukovat vodivý kanál, který můžeme pomocí napětí na řídicí elektrodě obohacovat nebo ochuzovat. Tak dokážeme měnit vodivost kanálu. Tranzistor může pracovat v režimu zesilovacím a spínacím. My budeme požívat režim spínací. Režimu zesilovacímu se musíme vyhnout kvůli velkým ztrátám.



obr. 9 Výstupní charakteristika MOSFET typ N [9]

#### 3.2 IGBT

Tranzistory IGBT patří mezi nejnovější druhy tranzistorů. Jak z názvu Insulated Gate Bipolar Transistor vyplývá, řadíme je mezi bipolární tranzistory. Oproti ostatním bipolárním tranzistorům jsou odlišné způsobem řízení. Zatímco klasické bipolární tranzistory jsou řízeny proudem do báze, tento je řízen, jako unipolární tranzistory, napětím na řídicí elektrodě. Díky svojí konstrukci kombinuje výhody unipolárních a bipolárních tranzistorů. Při pohledu na náhradní schéma můžeme vidět právě oba typy.

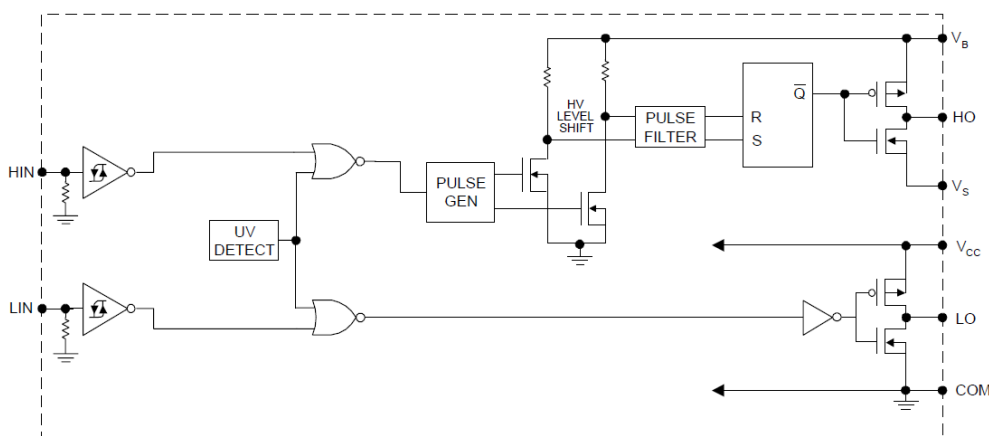


obr. 10 Náhradní schéma IGBT

Z vlastností bipolárních tranzistorů získává větší rozsah spínaných napětí<sup>4</sup> a proudů, se kterými dokáže pracovat. Z vlastností MOSFETů získává nízkou potřebu výkonu na buzení tranzistoru. Hlavní nevýhodou je delší doba spínání než u MOSFETů.

### 3.3 Gate driver

Jedná se o integrovaný obvod sloužící k buzení hradel tranzistorů MOSFET a IGBT. Vyrábí se spousta variací. Některé slouží pro spínání pouze jednoho tranzistoru, některé umožňují spínat soustavu dvojic tranzistorů. Jeho cílem je efektivně<sup>5</sup> spínat tranzistory tak, aby docházelo k co nejmenším spínacím ztrátám. Pro efektivní sepnutí je třeba ve velice krátkém čase přivést na Gate tranzistoru veliký náboj. Příklad takového budiče můžeme vidět na obr. 11



obr. 11 Vnitřní zapojení obvodu IR2101 [10]

<sup>4</sup> až kV

<sup>5</sup> co nejrychleji



### 3.4 CIPOS™

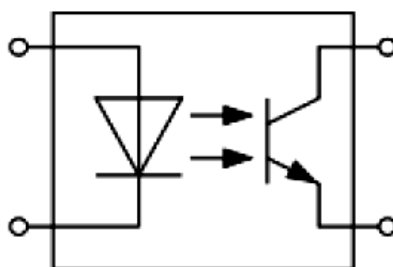
CIPOS™ je obchodní značka firmy Infineon Technologies. Jde o řadu vysoce účinných napájecích modulů. Jedná se o integrované zařízení, obsahující různé napájecí a řídicí komponenty, sloužící pro řízení pohonů s proměnnými otáčkami. Dokážou pracovat s proudy až 30 A a výkony do 3kW. Obvod obsahuje gate drivery, výkonové tranzistory, vestavěný teplotní senzor a může být doplněn o nadproudovou ochranu. Díky své integrované podobě dosahuje velice malých rozměrů.



obr. 12 integrovaný obvod IGCM10F60GA [11]

### 3.5 Optron

Optron je dvojbran s galvanicky odděleným vstupem a výstupem, přičemž vstup a výstup je propojen světelnou vazbou. Optočleny se používají pro galvanické oddělení částí elektronických obvodů kvůli zvýšení bezpečnosti a odolnosti zařízení. Skládá se ze 2 částí: vysílače a přijímače. Vysílačem bývá světlo emitující dioda, přijímačem fototranzistor, ale někdy i fotorezistor, fototyristor, či fototriak. Přijímač i vysílač musí mít stejnou spektrální charakteristiku<sup>6</sup>.



obr. 13 Optron [12]

<sup>6</sup> nejčastěji se používá infračervené pásmo

### 4. Elektromotory

Elektromotor je elektrický točivý stroj, který se používá k přeměně elektrické energie na energii mechanickou. Elektromotory se skládají ze statoru a pohyblivé části, tedy rotoru. Může být poháněn střídavým nebo stejnosměrným proudem. Dále můžeme motory rozdělit na komutátorové a bezkomutátorové. My se omezíme pouze na střídavé bezkomutátorové a jeden speciální typ stejnosměrného bezkomutátorového motoru.

#### 4.1 Synchronní motor

Synchronní motor je založen na principu točivého magnetického pole. Jeho rotor je tvořen permanentními magnety nebo elektromagnetem. Stator, který je napájen střídavým proudem, vytváří rotující magnetické pole. Rotor se snaží uchovat stálou polohu vůči otáčivému magnetickému poli. Otáčky synchronního motoru jsou tedy závislé na frekvenci napájecího proudu. Synchronní motory se užívají jen zřídka, neboť při větší zátěži ztratí synchronizaci s točivým polem a zastaví se.

#### 4.2 Asynchronní motor

Asynchronní motor je konstrukčně velice podobný synchronnímu motoru. Jedinou odlišností je užití jiného rotoru. Asynchronní motor jako rotoru totiž užívá tzv. kotvu nakrátko<sup>7</sup>.

##### 4.2.1 Princip činnosti

Točivé pole tvořené statorem roztáčí kotvu, ale má větší rychlost než otáčky rotoru, proto se nazývá asynchronní. Čím větší je rozdíl rychlosti otáčení magnetického pole a rotoru, tím větší proud se indukuje v kotvě. Tento proud vytváří vlastní magnetické pole kotvy. Se vzrůstajícím proudem v kotvě je pole intenzivnější a má větší snahu dorovnat otáčky točivého pole statoru. Tím je dán točivý moment. Rozdílem mechanických otáček a otáček točivého magnetického pole je udán skluz.

---

<sup>7</sup> klecový rotor

### 4.3 BLDC motor

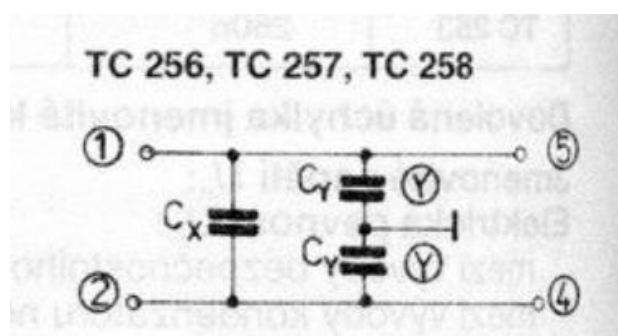
BLDC motor je speciální druh stejnosměrného motoru, který nemá komutátor. Jeho stator se skládá ze soustavy trojic vinutí pootočených o  $120^\circ$ . Jeho rotor je složen z permanentních magnetů. Pro svoji funkci vyžaduje BLDC driver, který pouští stejnosměrné pulzy do jednotlivých vinutí. Uvádím jej zde, protože při připojení na 3fázovou síť se chová jako motor synchronní.

## 5. Návrh měniče

Tato kapitola bude rozdělena do návrhu různých částí měniče. Pro přehlednost budou popsány směrem od vstupu ze sítě kvýstupu z měniče. Jelikož došlo při testování k poruše a nenávratnému poničení první verze střídače<sup>8</sup>, byl jsem nucen vytvořit druhou verzi. Ta je od verze první hodně odlišná. Protože k pochopení funkce střídače druhého je zapotřebí znalostí z návrhu střídače prvního, uvádím i jej.

### 5.1 Vstupní filtr

Vstupní filtr se snaží zabránit šíření vyšších harmonických složek v síti ze střídače. Kvůli této skutečnosti by neměl chybět v žádném zařízení. Jedná se o filtr LC typu dolní propust, nebo o odrušovací kondenzátor. Filtr LC dosahuje lepších výsledků. Je ale omezený protékajícím proudem. Naše zařízení díky naddimenzovanému meziobvodu neprodukuje tolik vyšších harmonických, a proto místo LC filtru použijeme odrušovací kondenzátor. Vybral jsem dříve průmyslově vyráběný kondenzátor Tesla TC 258.



obr. 14 Vnitřní zapojení TC 258

Všeobecně odrušovací kondenzátory pracují na principu paralelní rezonance. Proud o nízkých kmitočtech je dodáván zátěži. Čím větší je kmitočet proudu, tím více je proud kondenzátorem sváděn. Výrobce pro tento typ kondenzátoru uvádí rezonanční kmitočet pro  $C_x f_{res}=1,4\text{MHz}$  a pro  $C_y f_{res}=40\text{MHz}$ .

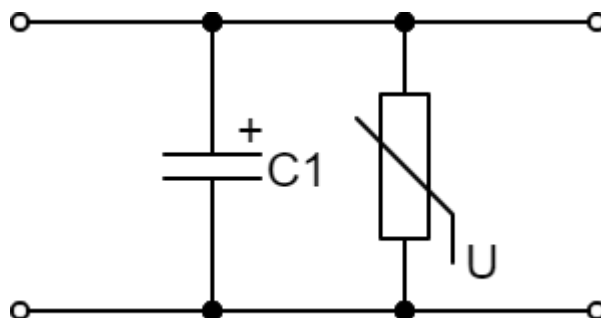
<sup>8</sup> Poruchu střídače popisují podrobně v kapitole 8

## 5.2 Usměrňovač

Pro naše potřeby se jako nejvhodnější jeví usměrňovač v můstkovém zapojení nebo řízený usměrňovač. Řízený usměrňovač je zbytečně konstrukčně náročný. Usměrňovač v můstkovém zapojení je pro naše účely dostačující. Díky dvojcestnému zapojení nám zajistí dostatečné napájení meziobvodu. Zvolil jsem můstkový usměrňovač v integrované podobě D25XB60. Usměrňovač zvládne klidový proud bez chladiče až 3,5A, přičemž úbytek napětí je 1,05V. Dále zvládne závěrné napětí až 600V. Zátěž ze střídače nebude odebírat větší proud než 3A. Proto se nemusíme zabývat chlazením usměrňovače.

## 5.3 Stejnoseměrný meziobvod

Stejnoseměrný meziobvod se pro frekvenční měniče standartně konstruuje jako LC dolní propust. Jeho účelem je vyhlazení zvlněného napětí z usměrňovače. Z návrhu jsem vypustil tlumivku. Jelikož nebude střídač produkovat tak velké proudové rázy, není tlumivky potřeba. Ve výsledném návrhu se jedná o paralelní spojení varistoru s kondenzátorem. Varistor je zde pro zvýšení ochrany zařízení před přepětím. Při vzrůstu napětí se varistor otevře a případná napěťová špička zařízení neohrozí.



obr. 15 Stejnoseměrný meziobvod

Pro naše potřeby jsem zvolil velikost kondenzátoru pomocí následujícího výpočtu. Tento výpočet lze brát pouze jako orientační, protože se v něm počítá, že doba vybíjení je polovina periody. Ta je ve skutečnosti kratší, a proto může být použit kondenzátor o něco menší kapacitě. Z dostupné nabídky kondenzátorů jsem zvolil Elite 180uF.

$$C_1 = \frac{I_{max}}{2f \cdot (U_m - U_x)} = \frac{0,3}{2 \cdot 50 \cdot (60 - 45)} = 200\mu F$$

vzr. 1 Výpočet kapacity kondenzátoru

### 5.4 Střídač I.

První verze střídače je složená z 6 výkonových tranzistorů, 3 gate driverů a pomocných komponent. Nejdříve se zaměříme na výběr tranzistorů. Následovat bude výpočet plochy chladiče. A závěrem se podíváme na gate drivery a jejich pomocné komponenty. Kompletní schéma střídače je k nalezení v příloze I.

#### 5.4.1 Výběr tranzistorů

Mezi nejvhodnější tranzistory pro frekvenční měniče patří IGBT a MOSFET. MOSFETY jsou použitelné pouze pro menší výkony a IGBT jsou vhodnější pro výkony větší. To je dáno spínacími a vodivostními ztrátami těchto tranzistorů. IGBT má spínací ztráty menší. Bohužel u vodivostních ztrát je na tom hůře. To je způsobeno tím, že u něj se musí překonat napětí na přechodu NPN, které je více jak 1,2V<sup>9</sup>. MOSFET nás limituje pouze odporem v sepnutém stavu. Ten je u nových technologií čím dál menší. Ve výsledku můžeme uvažovat, že tranzistory IGBT se vyplácí u proudů nad cca 6A. Náš měnič je navrhovaný na proudy mnohem menší. Přesto jsem se vydal cestou IGBT. Důvodem mého rozhodnutí byly účely vzdělávací, neboť IGBT jsou tranzistory poměrně nové a pro mě neznámé. Proto jsem si chtěl vyzkoušet jejich aplikaci, i když není zrovna vhodná. Zvolil jsem tranzistor STGP6NC60HD, který se vyznačuje rychlým spínáním a malým saturačním napětím. Zvládne napětí až 600V a klidový proud 7A. Má také integrovanou zpětnou diodu.

#### 5.4.2 Výpočet chladiče

Výkonově namáhané součástky produkují velké množství tepla. Teplota polovodičové součástky by neměla dosáhnout určité meze. U křemíkových součástek se tato mez pohybuje v rozpětí 125 až 150 °C. Překročením této hranice se zvyšuje možnost poškození samotné součástky až po nenávratnou degradaci křemíku. Proto je třeba tyto součástky řádně chladit. K tomu využíváme chladičů. Chladiče můžeme rozdělit na 2 druhy: aktivní, které využívají nuceného chlazení proudem vzduchu nebo kapaliny, a pasivní. My využijeme chlazení pasivní. [6]

Každá výkonová součástka má v katalogu uvedenou maximální výkonovou ztrátu, tj. maximální hodnotu výkonu, kterou dokáže předat chladiči. Bez chladiče je schopna sama vyzářit výkon o cca 10 % této hodnoty. Aby byl chladič funkční, musíme

---

<sup>9</sup> Mění se v závislosti na proudu kolektorem

zařídit co nejmenší teplotní odpor na přechodu součástky a chladiče. Toho můžeme dosáhnout pomocí teplovodivé silikonové podložky, která zároveň elektricky izoluje chladič od pouzdra součástky, anebo pomocí teplovodivé pasty. Velikost plochy vypočteme následovně:

Vypočteme celkový ztrátový výkon

$$P_z = n \cdot U_{CE} \cdot I_C = 6 \cdot 2 \cdot 0,5 = 6W$$

Vypočteme teplotu pouzdra

$$V_c = V_j - (K_1 \cdot P) = 150 - (2 \cdot 6) = 138 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vypočteme vnější odpor

$$K_2 = \frac{V_c - V_a}{P} = \frac{138 - 45}{6} = 15,5 \text{ } ^\circ\text{C}/W$$

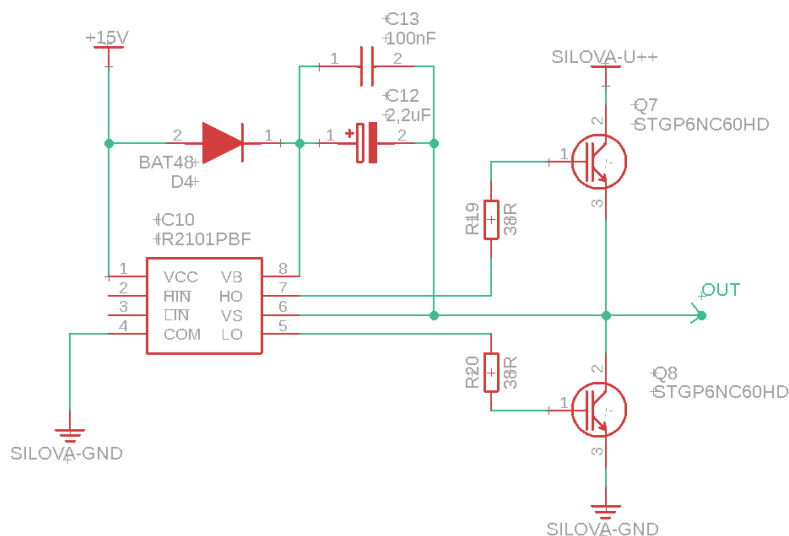
Výpočet plochy hliníkového chladiče

$$S = \frac{C_1 \cdot 7,6 \cdot 10^2 \cdot C_2}{K_2 - C_1 \cdot 1,73} = \frac{1 \cdot 7,6 \cdot 10^2 \cdot 0,5}{15,5 - 1 \cdot 1,73} = 27,60 \text{ cm}^2$$

Musíme tedy zvolit chladič velký minimálně 27,6 cm<sup>2</sup> a zajistit, že teplota uvnitř zařízení nebude větší než 45 °C.

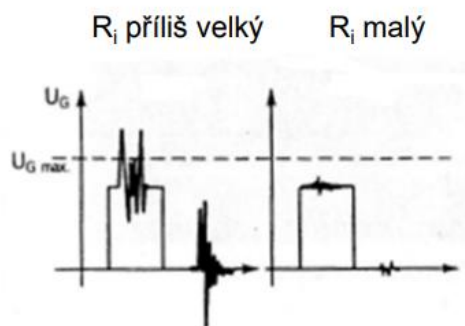
### 5.4.3 Gate drivery

Gate driver, neboli budič hradla tranzistoru je nutný pro efektivní spínání tranzistoru. Není funkčním celkem sám o sobě a musí tedy být doplněn o další součástky. Gate driver se volí na základě proudu, který je schopný na Gate tranzistoru přivést. Velikost proudu odvodíme pomocí kapacity hradla. Čím větší má hradlo kapacitu, tím musí být větší proud, aby se tranzistor otevřel ve stejném čase. Zvolil jsem budič IR2101. Ten je schopný otevírat tranzistor proudem 130 mA a zavírat proudem 270 mA. Jeho typická doba spínání je 160ns. Na obr. 16 je vidět námi použité zapojení pro řízení jedné dvojice tranzistorů.



obr. 16 Zapojení gate driveru IR2101

Hradla tranzistorů se připojují přes rezistory. Tyto rezistory mají za cíl omezit proud tak, aby nebyl budič přetěžován. Musíme si však dát pozor na užití příliš velké hodnoty odporu, neboť by mohl začít obvod kmitat, viz obr. 17. Poněvadž výpočet správné hodnoty rezistoru vyžaduje zapotřebí vyšší matematiky, zjišťoval jsem vhodnou hodnotu rezistoru měřením.

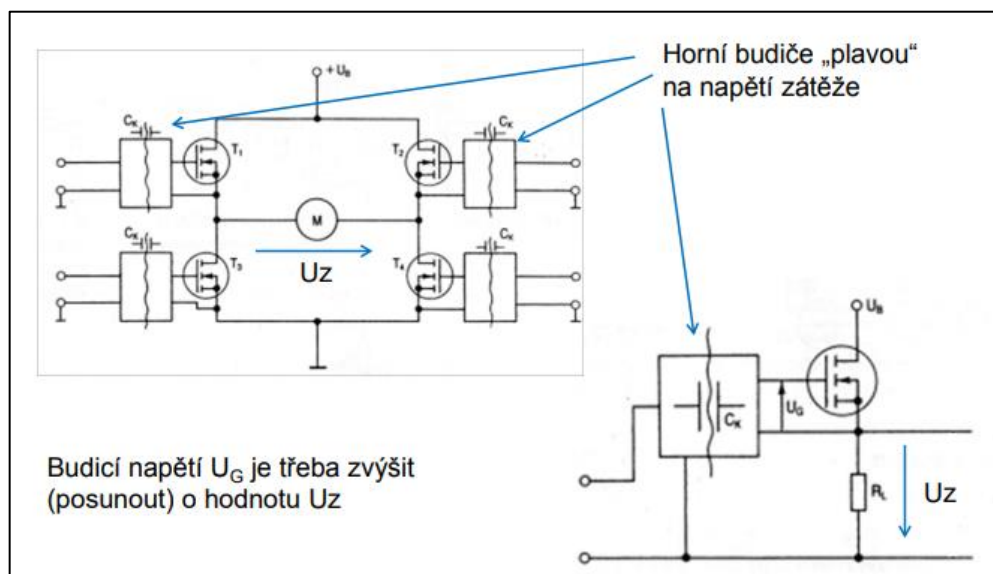


obr. 17 Průběh na Gate v závislosti na R

Protože tranzistory provozujeme v plovoucím režimu, je zapotřebí, abychom mohli řídit horní tranzistor, použít napěťový „výťah“. Ten je zřízen pomocí diody a kondenzátoru. Funguje tak, že při otevřeném dolním tranzistoru se nabíjí kondenzátor přes diodu. Zde musíme užít Schottkyho diodu. Při uzavření dolního tranzistoru vzroste plovoucí napětí na pinu VS. To způsobí, že se zavře dioda a odpojí



15V zdroj<sup>10</sup>. Nabitý kondenzátor nyní slouží jako zdroj napětově zvedlý o plovoucí napětí na dolním tranzistoru.



obr. 18 Plovoucí provoz tranzistorů [7]

Kapacitu kondenzátoru volíme podle potřebného náboje na otevření tranzistoru. Pro náš účel postačuje kapacita 2,2uF. Kondenzátor můžeme doplnit blokovacím kondenzátorem. Ten jsem zvolil o hodnotě 100nF. Blokovací kondenzátor je vhodné připojit také na napájecí svorky budiče. Oba blokovací kondenzátory mají za cíl zachytit a pokrýt napěťové špičky a tím zabránit rušení v obvodu.

### 5.5 Střídač II.

Druhá verze střídače vznikla po poruše verze první. Důvodem byla nedostupnost použitých součástek.

#### 5.5.1 CIPOS™

Základním kamenem nového střídače je integrovaný obvod IGCM10F60GA prodáváný pod obchodní značkou CIPOS™. Tento obvod má v sobě integrováno téměř vše, co najdeme v návrhu střídače I. Dále je doplněn o výstup, na kterém je možno měřit interní teplotu čipu a vstup, který slouží jako nadproudová ochrana. Pochopení vnitřních dějů integrovaného obvodu můžeme nalézt v popisu návrhu střídače I.

<sup>10</sup> Při užití klasické diody, která by se nestihla zavřít, by mohlo dojít ke zničení budičů!

### 5.5.2 Výpočet chladiče

Teorie k výpočtu chladiče je k nalezení v předchozích sekcích, konkrétně 5.4.2. Proto ji zde nebudu znovu uvádět a začnu rovnou výpočtem pro tento konkrétní typ integrovaného obvodu.

Výpočet celkového ztrátového výkonu

$$P_z = n \cdot U_{CE} \cdot I_C = 6 \cdot 1,4 \cdot 0,5 = 4,2W$$

Vypočet teploty pouzdra

$$V_c = V_j - (K_1 \cdot P) = 150 - (4,79 \cdot 4,2) = 129,88 \text{ }^\circ\text{C}$$

Vypočet vnějšího odporu

$$K_2 = \frac{V_c - V_a}{P} = \frac{129,88 - 45}{4,2} = 20,21 \text{ }^\circ\text{C}/W$$

Výpočet plochy hliníkového chladiče

$$S = \frac{C_1 \cdot 7,6 \cdot 10^2 \cdot C_2}{K_2 - C_1 \cdot 1,73} = \frac{1 \cdot 7,6 \cdot 10^2 \cdot 0,43}{20,21 - 1 \cdot 1,73} = 17,68 \text{ cm}^2$$

Oproti předchozímu střídači zde budeme potřebovat mnohem menší chladič. Za to může vysoká účinnost integrovaného obvodu. Chladič je však nutné přilepit k integrovanému obvodu přes teplovodivou pastu, protože pouzdro má větší teplotní odpor. Tímto můžeme tento nedostatek alespoň částečně kompenzovat.

### 5.5.3 Plovoucí zdroj

Plovoucí zdroj napětí je realizován stejně jako u prvního měniče. Je vytvořen pomocí 3 kondenzátorů připojených na svorky VB a VS (viz obr. 19). Napětí na kondenzátorech je opět posunuto o plovoucí napětí na dolním tranzistoru. Zvolená hodnota je opět 2,2uF.

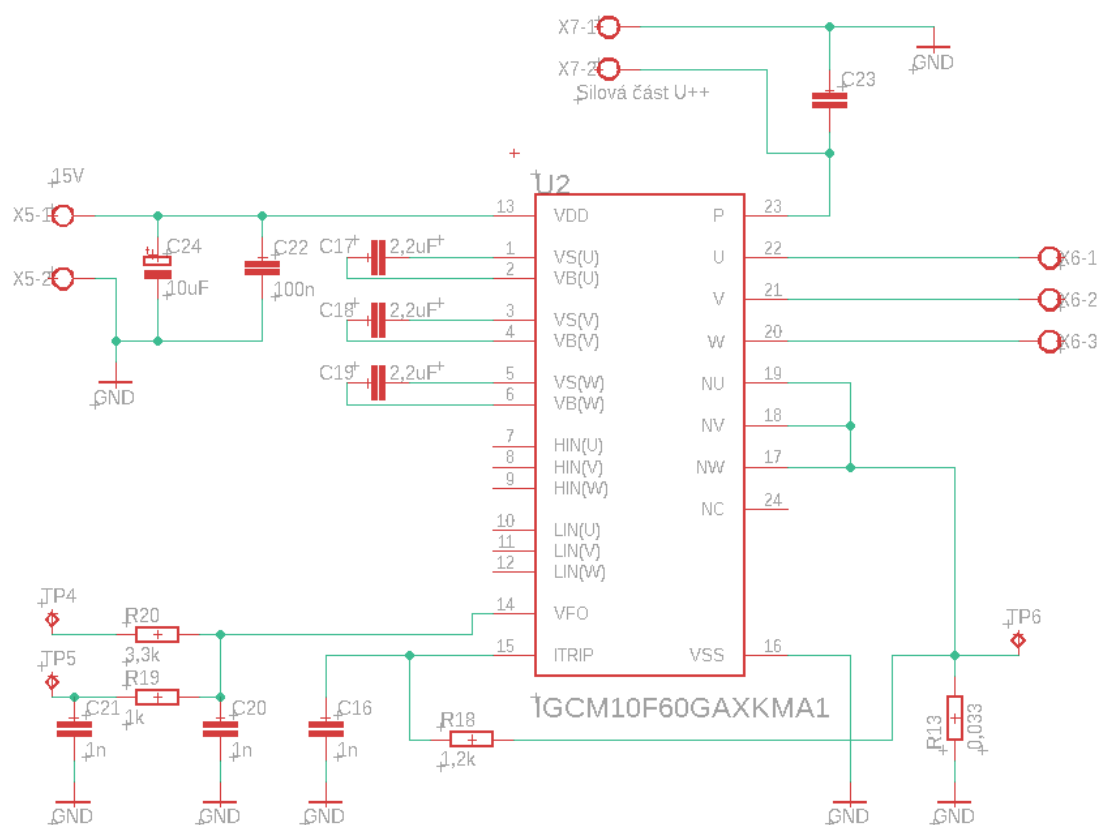
### 5.5.4 Nadproudová ochrana

Nadproudová ochrana slouží k zabránění přetížení zařízení. Je konstruována pomocí bočníku R13 (viz obr.19). V odborné literatuře se tento bočník nazývá shunt. Je připojen mezi zem a výstupy emitorů spodních tranzistorů. Protéká přes něj proud tekoucí zátěží a integrovaným obvodem. Tím se na něm objevuje napětí. To je přes rezistor R18 přivedeno na pin ITRIP. V integrovaném obvodu je pin ITRIP připojen na jeden vstup napěťového komparátoru. Na druhý vstup je připojen interní zdroj referenčního napětí typ. 0,47V. Pokud na shuntu vlivem protékajícího proudu stoupne napětí nad hodnotu referenčního napětí, integrovaný obvod odpojí výstupní tranzistory. Po vypnutí se tranzistory vrátí zpět do provozu po uplynutí časového

zpoždění 1000ns. Vstup je interně chráněn pomocí šumového filtru, díky kterému ignoruje špičky kratší než 530ns. Externě jej můžeme chránit pomocí blokovacího kondenzátoru C16. My jsme pro omezení proudu použili shunt o hodnotě 0,033Ω. Při znalosti této hodnoty a referenčního napětí můžeme určit proud, při kterém ochrana zafunguje.

$$I = \frac{U_{ref}}{R_{13}} = \frac{0,47}{0,033} = 14,24A$$

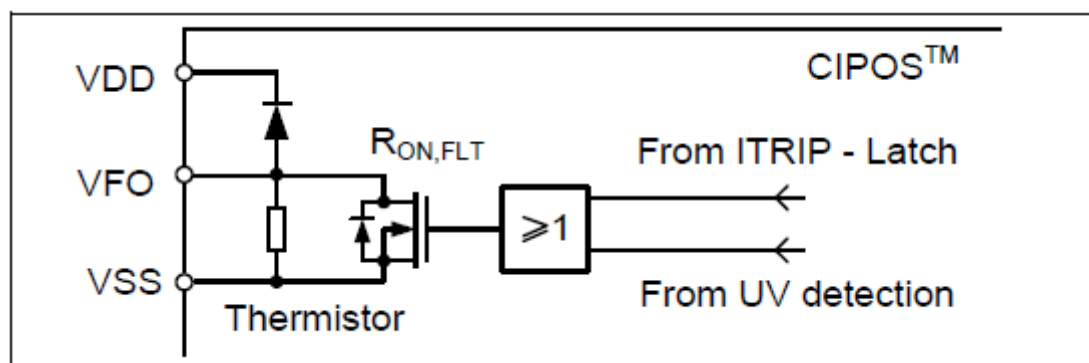
Nadproudovou ochranu v našem řešení používáme jako ochranu proti zkratu zemnímu i mezifázovému. Integrovaný obvod zvládne špičkový proud až 20A po dobu 1ms. Další funkcí integrovaného obvodu je indikace aktivace nadproudové ochrany, kdy se na výstupu VFO objeví logická „0“. Vnitřní zapojení VFO (viz obr.20).



obr. 19 Zapojení IGCM10F60GA

### 5.5.5 Teplotní senzor

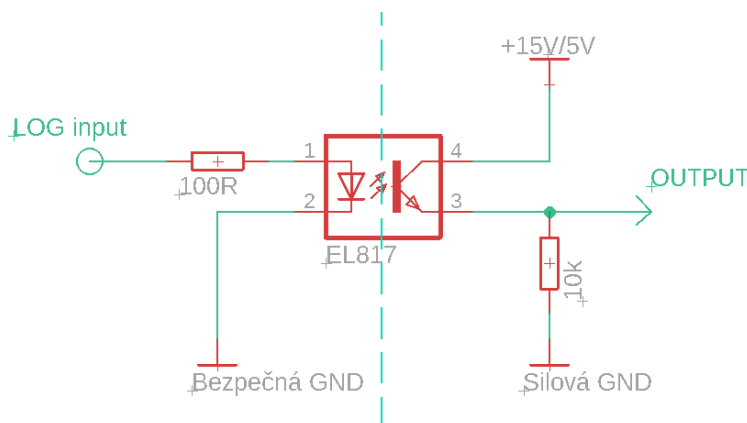
Pro snímání teploty využíváme pinu VFO. Na pin VFO přivedeme napětí pomocí pull-up rezistoru R20. Ten společně s integrovaným termistorem (obr.20) tvoří napěťový dělič. Při ohřátí termistoru klesne jeho odpor, tím na něm poklesne napětí. Toto napětí je snímáno přes rezistor R19. Pin je ošetřen proti rušení blokovacími kondenzátory.



obr. 20 Vnitřní zapojení VFO

### 5.6 Galvanické oddělení řídicích signálů

Galvanické oddělení jsem realizoval pomocí optronů EL817. Zapojení je vidět na obr. 21.



obr. 21 Zapojení EL817

Vstup je ovládán logikou 3,3V. Pro efektivní přenos informace musíme rozsvítit LED diodu proudem alespoň 15mA, který je dán vstupním rezistorem. Pro výpočet hodnoty rezistoru potřebujeme dále vědět napětí na diodě v propustném směru. Výrobce udává  $U_f=1,2V$  při  $I_f = 20mA$ .

$$R_{vst} = \frac{U_{in} - U_f}{I_f} = \frac{3,3 - 1,2}{0,02} = 105\Omega$$

Odpor vyšel 105Ω. Pokud budeme požívat rezistory řady E3, nejbližší nižší hodnotou je 100Ω. Při rozsvícení světlo emitující diody se otevírá fototranzistor. Výstup je realizován zapojením pull-down rezistoru na emitor fototranzistoru. Výstupní napětí snímáme na pull-down rezistoru. Pokud je tranzistor uzavřen, na pull-down rezistoru není žádné napětí. Při otevření tranzistoru se na pull-down rezistoru vlivem protékajícího proudu objeví napětí. Hodnotu pro rezistor jsem zvolil 10kΩ. Tato hodnota se běžně používá v mikroprocesorové technice.

### 5.7 Výstupní filtr

Jako výstupní filtr jsem zvolil harmonický filtr. Důvodem k mému rozhodnutí byla snazší konstrukce a větší účinnost než u du/dt filtru. I když je objemnější, jeho konstrukce se vyplatí. Slouží pro vyfiltrování vyšších harmonických, které produkuje střídač. Tím zajistí plynulejší chod motoru a zlepší podmínky EMC. Měřením jsme zjistili, že nám bude stačit zkonstruovat LC filtr typu dolní propust s  $f_h=900\text{Hz}$ . Výpočet součástek jsme zvolili následujícím kmitočtem.

Měl jsem jediné vhodné kondenzátory o hodnotě  $C=2,2\mu\text{F}$ .

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

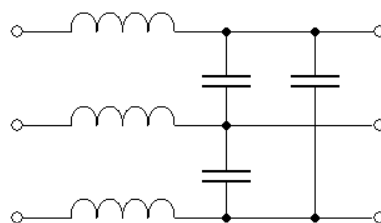
Po úpravě dostaneme

$$L = \frac{1}{4\pi^2(f_c)^2C}$$

Dosadíme a vypočteme

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 900^2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}} = 14\text{mH}$$

Tento výpočet je pouze orientační, neboť jsem zanedbal indukčnost motoru. Po vypočtení hodnoty jsem navinul cívky na toroidní jádro. Po změření měly indukci  $H=15\text{mH}$ . Pokud tuto hodnotu opět dosadím do Thomsonova vztahu, vyjde mi hodnota  $f_h=870\text{Hz}$ . Zapojení je následující.



obr. 22 Zapojení harmonického filtru

## 6. Návrh DPS

Návrh DPS (desky plošných spojů) je rozsáhlou problematikou. Při návrhu je třeba dát pozor na mnoho aspektů. Protože měnič pracuje s nesinusovými signály, objevují se zde ve větším měřítku vyšší harmonické. Ty mohou způsobovat rušení. DPS musí být proto navržena tak, aby nedocházelo k vzájemnému rušení komponent a vodivých cest.

### 6.1 Návrh DPS střídač I.

Střídač I. byl na návrh DPS náročnější. Na DPS bylo třeba rozmístit mnohem více komponent. Na desce je tedy mnohem více cest. Pro usnadnění zde bylo užito techniky oboustranné DPS. Červená na obr.23 značí cesty na pohledové (horní) straně a modrá cesty na straně odvrácené.

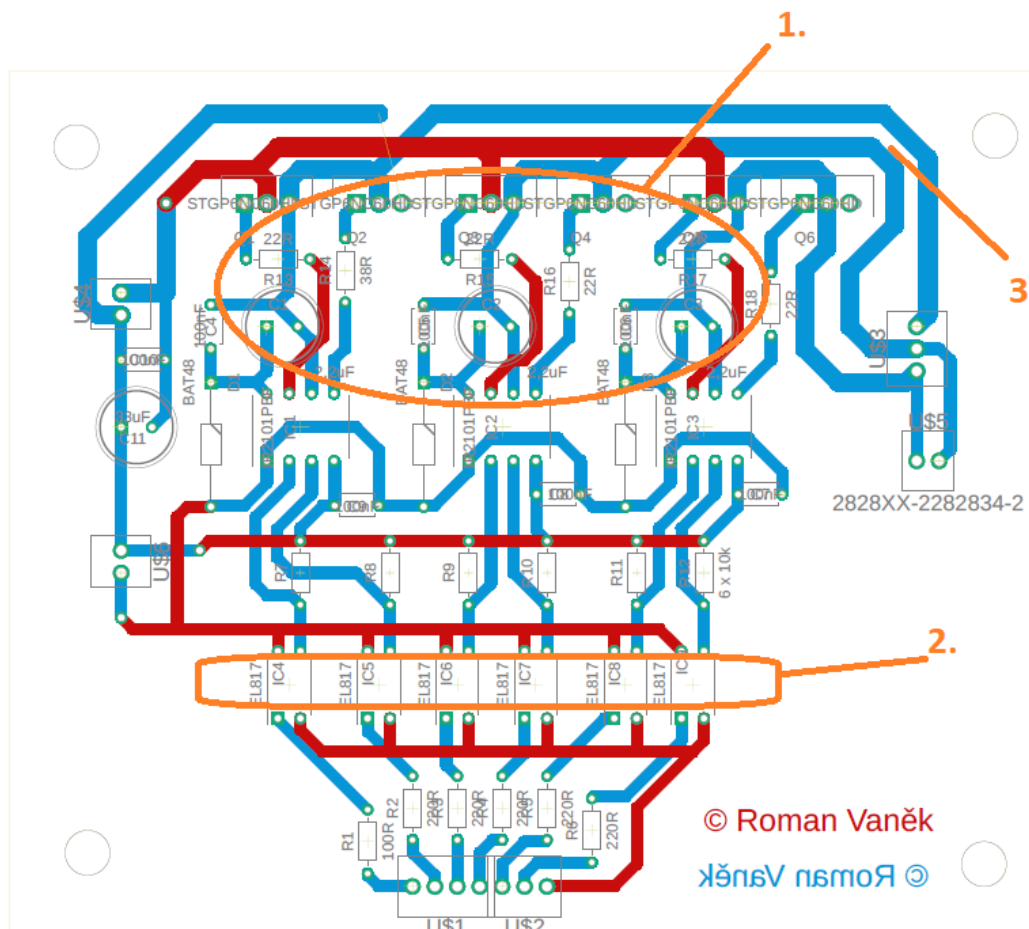
V 1. vyznačené oblasti bylo třeba dbát na zásady návrhu nejvíce. Cestami v této oblasti tečou budící proudy. Ty dosahují hodnot až 0,5A. Navíc se zde objevuje celé spektrum vyšších harmonických. Tyto cesty proto musí vykazovat co nejmenší parazitní kapacitu a nejmenší parazitní indukčnost. Toho docílíme umístěním komponent co nejbliže sebe. Tím dojde ke zkrácení cest a snížení parazitních veličin.

Řešení návrhu 2. vyznačené oblasti se týká především bezpečnosti. Oprony v této oblasti slouží ke galvanickému oddělení silové a řídicí části. Při poruše v silové části se nebezpečné napětí nesmí dostat do řídicí části. Proto bychom neměli umísťovat vodivé cesty pod oprony. Cesty by totiž mohly snížit izolační pevnost mezi řídicí a silovou částí.

Označení 3. poukazuje na silové cesty. Ty nesmí být kvůli rušení vedeny v blízkosti budičů a pomocných komponent budičů. Dále musí mít tyto cesty větší šířku. Tu můžeme vypočítat například pomocí internetové kalkulačky (viz obr. 24). Pro 3A nám vyšla šířka 54 mils.

Inputs:		
Current	3	Amps
Thickness	35	um
Results for External Layers in Air:		
Required Trace Width	53.8	mil
Resistance	0.00938	Ohms
Voltage Drop	0.0281	Volts
Power Loss	0.0844	Watts

obr. 23 Kalkulačka pro výpočet šířky vodivé cesty [15]



obr. 24 Návrh DPS střídač I.

## 6.2 Návrh DPS střídač II.

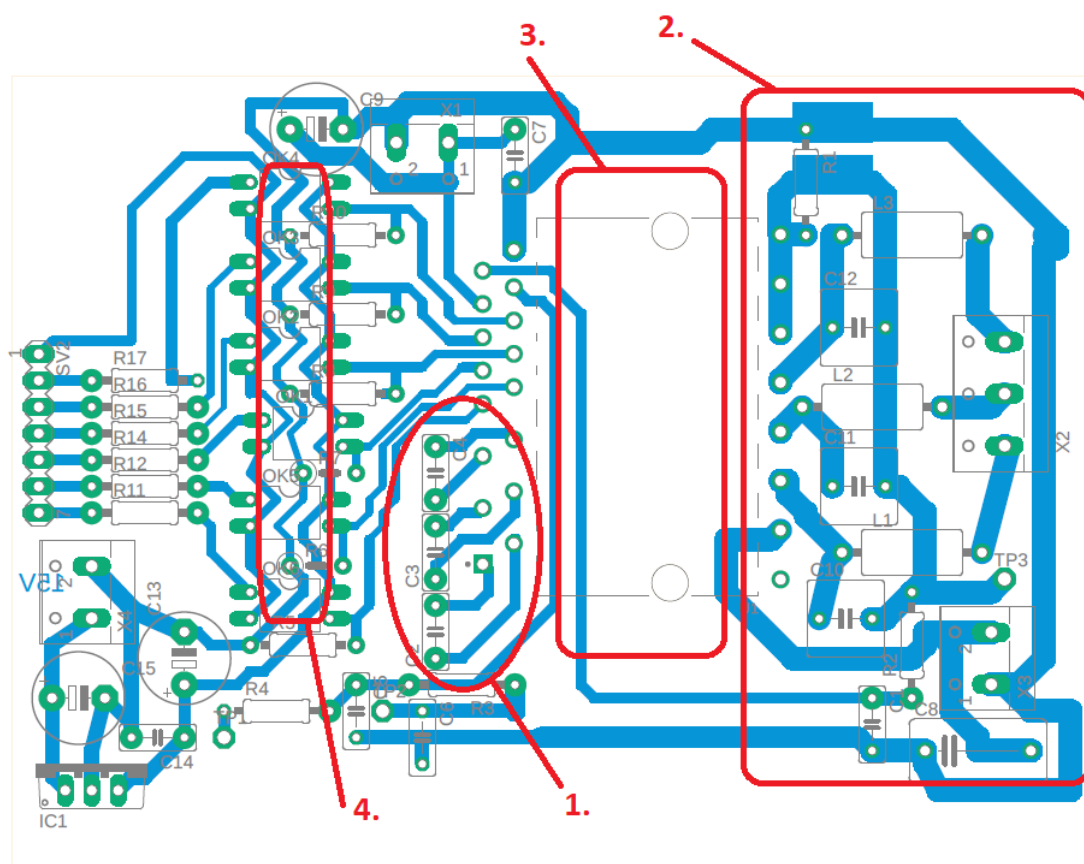
Návrh DPS střídače II. byl jednodušší díky použití CIPOST™. Množství použitých komponent bylo zredukováno a počet vodivých cest tak klesl. Díky tomu postačovalo použití pouze technologie jedné vrstvy. Zásady návrhu jsou podobné jako u střídače I. Viz obr.25.

Oblast 1 obsahuje kondenzátory jako plovoucí zdroje. Při nabíjení a vybíjení kondenzátorů zde tečou velké proudy. Abychom zabránili rušení, umístíme součástky tak, aby vodivé cesty byly co nejkratší. Sám výrobce na tuto skutečnost také upozorňuje.

Oblast 2 označuje silové cesty. Kvůli rušení je lepší tyto cesty vést mimo senzornou část. V oblasti se nachází také shunt. Ten výrobce doporučuje umístit co nejblíže k pinům NU, NV a NW.

Oblast 3 je prostor pod integrovaným obvodem. Zde se doporučuje umísťovat co nejméně vodivých cest z důvodu rušení.

Oblast 4 značí prostor pod optočleny. Sice v předchozím návrhu střídače I. zmiňuji nutnost vynechat prostor pod optočleny volný, ale zde můžeme udělat výjimku. Silová část bude při provozu napájena bezpečným napětím. Kdyby došlo k poruše v silové části, můžeme očekávat maximální nebezpečnou špičku 400V. Pokud upravíme vodivé cesty přestříkáním nevodivým lakem, tak dle normy o konstrukci plošných spojů IPC-2221A bude dostačovat námi navržená vzdálenost mezi cestami 1,5mm. [8]



obr. 25 Návrh DPS střídač II.



## 7. Tvorba programu

Pro střídač jsem zvolil jako řídicí obvod mikroprocesorovou sestavu s mikrokontrolérem Arduino Due. Arduino Due je deska mikrokontroléru založená na 32bitovém procesoru Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Má 54 digitálních vstupních/výstupních pinů (z nichž 12 lze použít jako PWM výstupy), 12 analogových vstupů, 4 UART (hardwarové sériové porty), takt 84 MHz, připojení USB OTG, 2 DAC (digitální na analogový) a 2 I<sup>2</sup>C. Programuje se pomocí jazyku Wiring [9].

### 7.1 Principy výpočtu SPWM

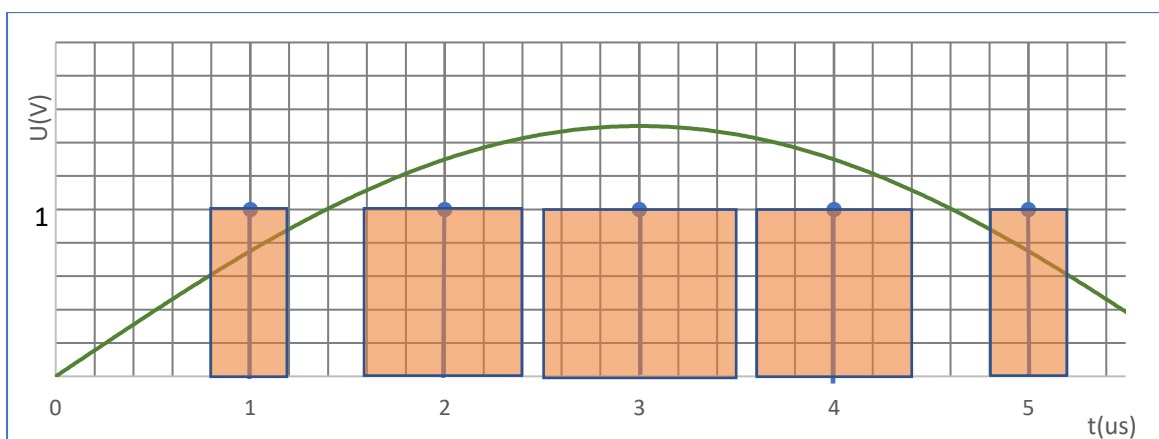
Principů výpočtů SPWM (sinusové modulace šířky pulzů) je mnoho. Nelze říct, které řešení je nejvhodnější, protože každé přináší výhody, ale i nevýhody. V tomto dokumentu uvádím pouze některé z nich. Jednotlivá řízení jsem pojmenoval sám, protože se mi nepodařilo dohledat oficiální názvy.

#### 7.1.1 Řízení v reálném čase

Princip tohoto řízení je výpočetně nejnáročnější. Funguje tak, že program v reálném čase vypočítává 3 sinusové průběhy vzájemně o 120° posunuté a vzorkovací trojúhelníkový signál. Tyto jednotlivé signály v každé jednotce času vezme a porovná. Pokud má vzorkovací průběh menší hodnotu než průběh sinusový, zapínáme výstupní pin pro tranzistor a naopak. Toto řešení je nejkomplikovanější, ale při zajištění dostatečně výkonné výpočetní jednotky dosahuje největší přesnosti.

#### 7.1.2 Řízení obdélníkem zarovnaným na střed

Tento způsob řízení spočívá v nanášení různě širokých pulzů okolo předem definovaných časových stop (modré přímkové obr.26). Šířku těchto pulzů vypočte program pomocí goniometrických funkcí. Tento způsob řízení je výpočetně méně náročný než předchozí způsob. Vyznačuje se solidním výsledným průběhem.



obr. 26 Obdélník zarovnaný na střed

### 7.1.3 Řízení základní řadou

Při snaze najít co nejlepší způsob řízení jsem dospěl k názoru, že z žádných běžně používaných způsobů řízení mi nevyhovuje. Proto jsem vyvinul vlastní způsob řízení, který jsem pojmenoval řízení základní řadou. Tento systém je unikátní v tom, že pro svůj běh vyžaduje minimální výpočetní kapacitu. Základním kamenem tohoto způsobu řízení jsou základní hodnoty časů, které jsem předem vypočítal a vložil do pole<sup>11</sup>. Hodnoty jsou vypočítány pomocí goniometrických funkcí. Program vypočítané hodnoty vezme a na základě jednoduchého algoritmu (násobením přirozeným číslem) převede na požadovanou frekvenci. Tento způsob řízení má jednu velkou nevýhodu. Tou je nestálá vzorkovací frekvence. I když by se mohlo zdát výhodou, že když budeme mít periodu popsanou vždy stejným počtem pulzů, není tomu tak. Při určité frekvenci vzorkovacího signálu nám totiž začal rezonovat výstupní filtr (více v kapitole 8). To je možná i důvod, proč průmyslově vyráběné frekvenční měniče používají vzorkovací frekvenci stálou. Dále si můžeme všimnout, že když budeme roznásobovat základní řadu přirozenými čísly, tak se výstupní frekvence nebude měnit lineárně. Tuto skutečnost jsem nevyřešil softwarově, nýbrž hardwarově pomocí exponenciálního potenciometru, pomocí kterého uživatel mění požadovanou frekvenci.

## 7.2 Vlastní program

Kompletní program je k nalezení v příloze. Jednotlivé řádky kódu jsou přehledně popsány, proto jej zde jen stručně shrnu.

Program začíná načtením knihovny pro LCD displej. Následuje inicializace proměnných nutných pro výčet hodnot ze vstupních periférií a pro výpočet SPWM. Dále jsem zavedl pole se základní řadou proměnných. Následně jsem přiřadil výstupní piny jednotlivým tranzistorům a zavedl proměnné pro snímání polohy potenciometru a přepínače.

V části programu `void Setup()` jsem zapsal pomocí příkazu `pinMode()`, které piny jsou vstupní a které výstupní. Dále se v této části nachází inicializace komunikace s displejem a předeepsání textu na displej.

---

<sup>11</sup> Pole (angl. Array) je jedna z druhu kolekce proměnných v jazyce C++

Hlavní část programu probíhá následovně. Program přečte polohu vypínače, na základě které rozhodne, zda se motor zastaví nebo určí směr otáčení motoru. Následuje čtení polohy potenciometru, podle kterého se určí požadovaná frekvence. Zde pro převod využívám funkci *map()*. Vypočítá se doba periody. Následně se vyčítají hodnoty z pole na základě směru otáčení motoru pomocí proměnných a,b,c (pravotočivé – a, b, c ; levotočivé – b, a, c). Následně proběhne kontrola přetečení proměnných a,b,c. Dále se v programu vypočte délka aktuálního pulzu pro danou fázi. Program pokračuje určením, zda se bude spínat horní nebo dolní tranzistor, a to na základě zápornosti hodnoty vyčtené z pole. Následuje řešení části zápisu na výstupní piny. Program nejdříve seřadí pulzy jednotlivých fází podle velikosti a provede následující výpočet (viz obr. 27).

```
112 /* Výpočet časů pro postupné spínání tranzistorů */
113 if (t1a <= t2a && t2a <= t3a) { // t1a = doba pulzu 1. fáze
114     T1 = t1a; // t2a = doba pulzu 2. fáze
115     T2 = t2a - t1a; // t3a = doba pulzu 3. fáze
116     T3 = t3a - t2a; // dp = doba periody; d = zbylá doba periody
117     d = dp - t3a; // T1,T2,T3 = doba skutečného zápisu
```

obr. 27 výpočet časů pro spínání tranzistorů

Tranzistory jsou spouštěny následovně:

Zapnutí všech fází

Časová prodleva T1

Vypnutí tranzistoru 1. fáze

Časová prodleva T2

Vypnutí tranzistoru 2. fáze

Časová prodleva T3

Vypnutí tranzistoru 3. fáze

Časová prodleva zbytku periody

Program se opakuje s novými hodnotami

Program vždy jednou za zapsání 24 pulzů vypočítá a zapíše aktuální frekvenci na displej.

### 7.3 Zásady při tvorbě programu

Jedinou zásadou, kterou zde zmíním, je rychlost programu. Program se nesmí zpoždovat, jinak by výstupní pulzy byly časově rozhozené a rozstřídaný průběh by nebyl sinusový. Na tuto skutečnost jsem mnohokrát narazil. Tento problém je nejkritičtější při užívání sériové komunikace. Ta je totiž časově velice náročná. Když jsem nejdříve připojil LCD displej pomocí I<sup>2</sup>C, výstupní signál byl značně rozhozený. Pro užití displeje jsem ho musel upravit odpájením převodníku I<sup>2</sup>C a zapojením displeje v paralelním režimu. Zvolil jsem paralelní 4bitový režim. Nabízela se i možnost 8bitového paralelního režimu, ale ta je pro naše potřeby zbytečně složitá.

### 8. Oživení a závěrečná měření

Po výrobě DPS a jejím následném osazení součástkami následuje fáze ožívování. To je vždy pro autora práce nejnapínavější období. Po zprovoznění obvodu následuje provedení měření a ověření správné činnosti zařízení.

#### 8.1 Oživení

Ožívování střídačů I. a II. provázely drobné komplikace. Naštěstí díky správnému postupu při ožívování nedošlo k závažným škodám na zařízení.

##### 8.1.1 Oživení střídače I.

Osazený střídač jsem proměřil pomocí multimetru, zda se někde nenachází zkrat. Následovalo připojení střídače k mikrokontroléru a laboratornímu zdroji. Na zdroji jsem nastavil proudové omezení 100mA a pomalu začal zvedat napětí. Průběžně jsem pomocí osciloskopu sledoval správnost jednotlivých průběhů. Zde jsem narazil na závadu, kdy jeden z optronů nefungoval. Nejspíše byl poškozený pájením nebo už z výroby. K vyřešení závady ho stačilo jen vyměnit. Při připojení zátěže došlo k nenávratné poruše, kdy napětí určené pro napájení motorů prorazilo tranzistory střídače a dostalo se do budičů. Poškození zasáhlo i napájecí zdroj budičů. Jedinou pozitivní věcí této nehody bylo ověření správné funkce optronů, které obstojně ochránily mikroprocesorovou sestavu. Porucha nastala pravděpodobně špatnými tranzistory. Ty, jelikož jsem chtěl ušetřit, pocházely z obchodu, kde nebyl zaručen původ výrobku. Před poruchou se mi povedlo změřit několik parametrů, Více v kapitole měření.

##### 8.1.2 Oživení střídače II.

Oživení střídače proběhlo bez komplikací. Postup je podobný jako u oživení střídače I., proto jej zde neuvádím.

#### 8.2 Měření

Měřením jsem se snažil ověřit kvalitu výsledného výrobku. Měření bylo mnohdy komplikované, neboť v obvodu se objevuje mnoho plovoucích napětí, která se při měření sčítají.

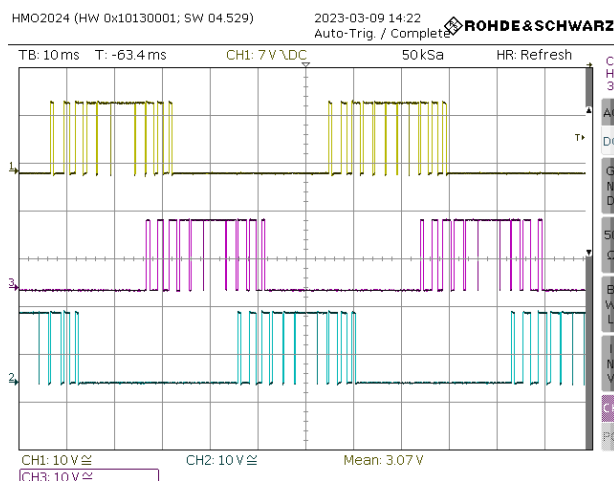
### 8.2.3 Měření na výstupech optronů

Cílem měření výstupního průběhu napětí optronů bylo ověření, zda není signál optrony příliš zpožděn nebo zda se signál přenosem optronem nezkrusuje. Výsledky měření byly dostačující, signál měl stejný průběh na vstupu i výstupu. Celková doba zpoždění byla zjištěná cca 2 $\mu$ s. Toto zpoždění nám nevadí, pokud je na všech linkách stejné.

### 8.2.3 Měření průběhů na gatech tranzistorů

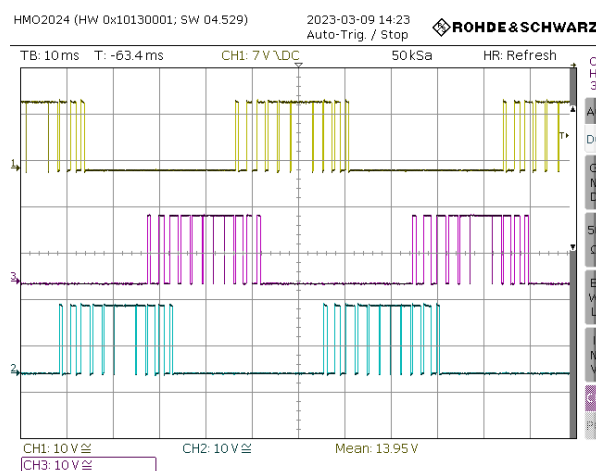
Toto měření je důležité pro zkontrolování správnosti otevírání a zavírání tranzistorů. Měření je komplikováno tím, že při měření horních tranzistorů se přičítá plovoucí napětí zátěže. Horní tranzistory tedy musíme měřit pouze jednotlivě.

Nejdříve jsem změřil pravotočivý průběh napětí na gatech spodních tranzistorů.



obr. 28 Pravotočivý průběh napětí  $U_{ge}$  dolních tranzistorů

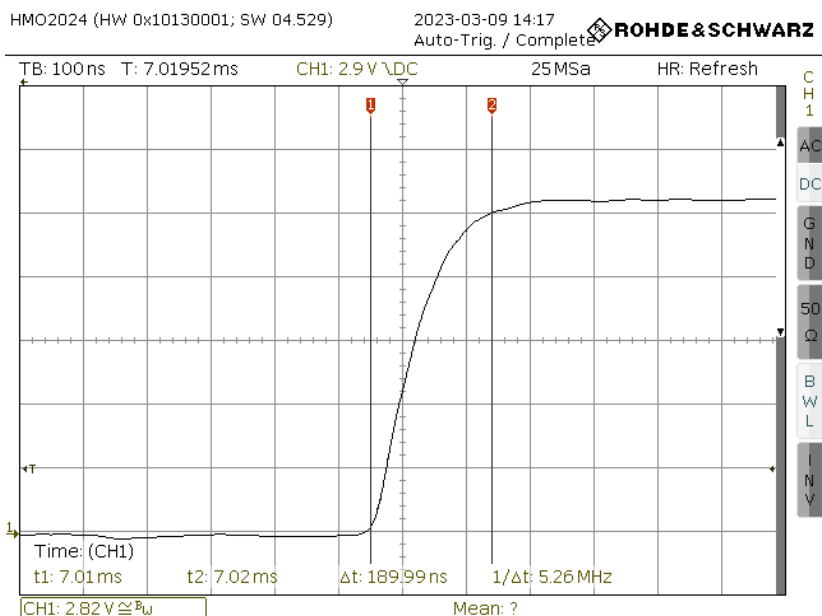
Následovalo změření průběhu levotočivého.



obr. 29 Levotočivý průběh napětí  $U_{ge}$  dolních tranzistorů

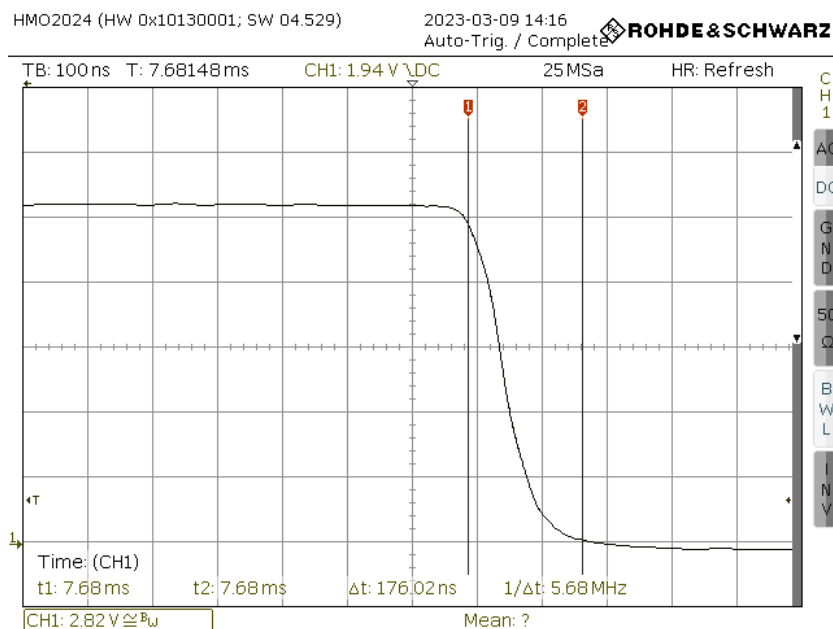
## 8 Oživení a závěrečná měření

Dalším detailem, na který se bylo potřeba zaměřit, byla rychlost dodání potřebného náboje budičem. Budič dokázal sepnout tranzistor za 190ns. Tato doba postačuje, aby se tranzistory příliš nehřály kvůli spínacím ztrátám.



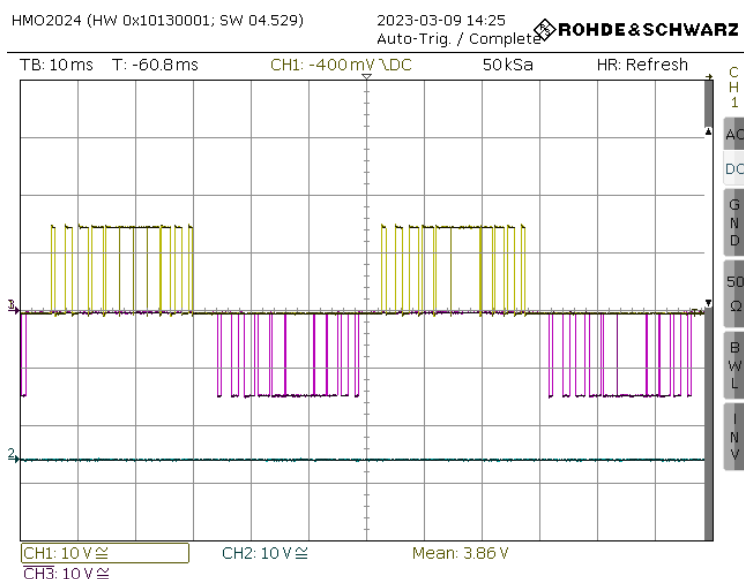
obr. 30 Doba náběhu pulzu na gate

Budič musí také dostatečně rychle tranzistor vypínat. Doba, po kterou budiči trvalo odebrat náboj z gate, byla 176ns.



obr. 31 Doba sestupné hrany pulzu na gate

Dále se pomocí osciloskopu můžeme podívat, jak se vytváří průběh jedné fáze spínáním horního a dolního tranzistoru.

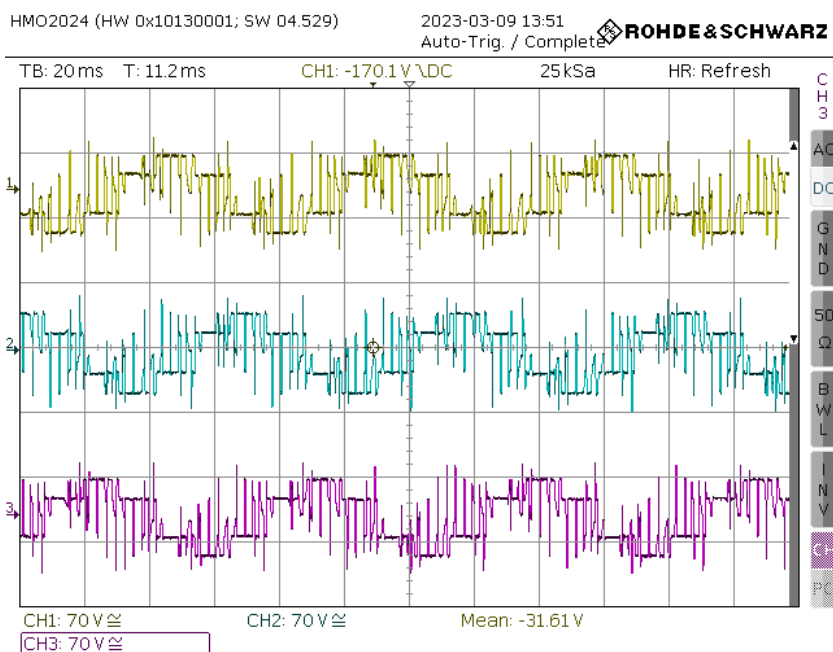


obr. 32 Průběh jedné kompletní fáze v pohledu z gate tranzistorů

Z předchozích měření jsme ověřili, že program, který jsem navrhl, funguje správně a že spínání tranzistorů probíhá ideálně.

### 8.2.4 Měření průběhu výstupního a FFT analýza

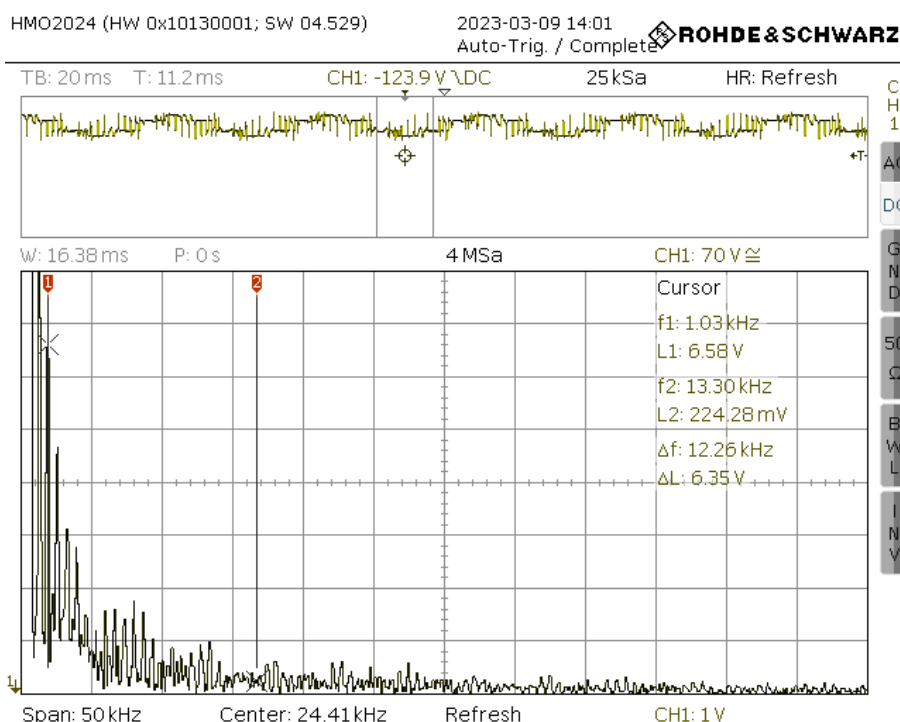
Dalším z měření je měření průběhu výstupního napětí. To bylo měřeno při připojení indukční zátěže s odběrem cca 150mA na každou fázi. Kvalita výsledku pro mě byla překvapující. Osobně jsem očekával mnohem větší rušení.



obr. 33 Měření průběhů napětí na indukční zátěži

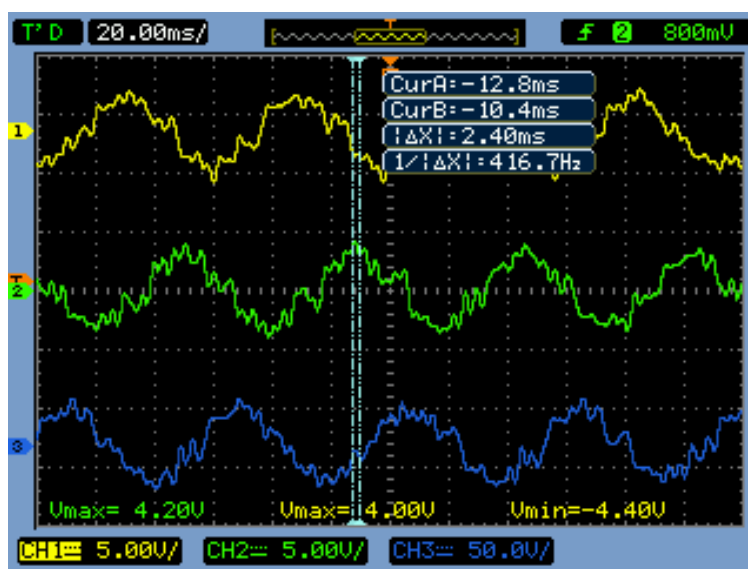


Následně jsem se zajímal o vyšší harmonické na výstupu. Ty jsem zjistil pomocí FFT analýzy na osciloskopu. Zde už jsem s výsledkem nebyl tolik spokojen. Z obr. 34 lze vidět, že i harmonické kolem frekvence 13,3kHz dosahují stále napětí až 225mV.



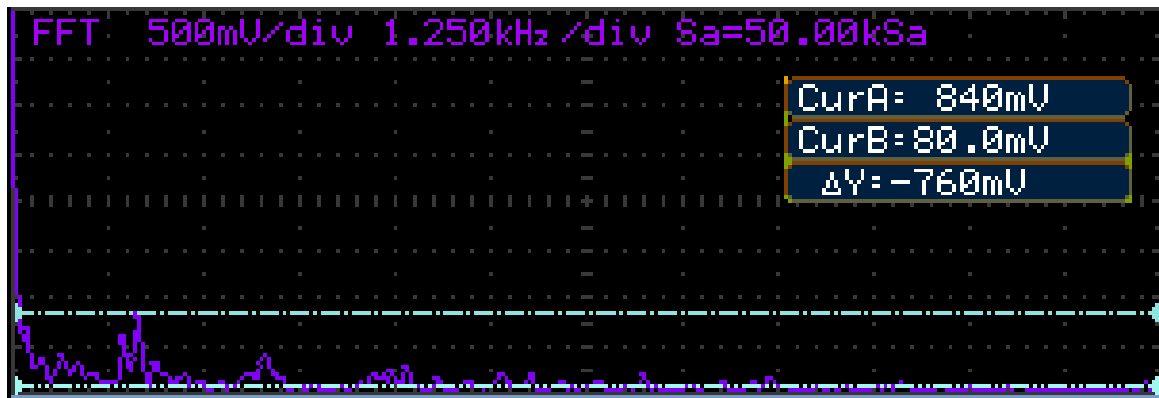
obr. 34 FFT analýza výstupního průběhu

Pro odstranění těchto harmonických jsem se rozhodl sestavit LC harmonický filtr. Pro odhadnutí kmitočtu, pro který má být filtr konstruován, jsem výstupní signál změřil na osciloskopu, který má možnost zařadit digitální filtr. Tento filtr jsem nastavil na 300Hz DP.



obr. 35 Průběh napětí se zařazeným filtrem DP 300Hz

Po zkonstruování harmonického filtru (viz kapitola 5.7), jsem se vrátil k měření. Po zařazení zkonstruovaného filtru jsem byl s úrovní vyšších harmonických spokojen. Vyšší harmonické kolem kmitočtu 1,6kHz dosahovaly amplitudy maximálně 840mV. To je mnohem méně než u přechozího případu. Na frekvenci 13,3kHz dosahovaly amplitudy méně než 80mV.



obr. 36 FFT na výstupu harmonického filtru

Z tohoto měření můžeme usoudit, že výsledné průběhy dosahují výborné kvality a malého rušení způsobovaného vyššími harmonickými.

## Závěr

Cílem této práce bylo sestrojít a odzkoušet frekvenční měnič s výkonem do 250W schopný vytvořit třífázovou síť s minimálním rozsahem frekvencí 30-50Hz. Úkol se mi podařilo splnit, i když jsem narazil na spoustu komplikací. V této práci jsem nejdříve rozebral základní konstrukce nepřímých měničů frekvence. Dále následoval teoretický rozbor příslušenství k frekvenčním měničům a krátce jsem se věnoval i motorům, pro které je frekvenční měnič určen. Po teoretické části jsem se zaměřil na praktický návrh frekvenčního měniče. Postupně jsem popisoval návrh bloku po bloku. Nejdéle jsem se zdržel u střídačů. Ty jsou základním kamenem všech frekvenčních měničů. Střídač jsem vytvořil ve dvou variantách. První z diskrétních součástek a po poruše prvního střídače následoval návrh střídače druhého. Ten jsem navrhl za použití integrovaného obvodu pro řízení třífázových pohonů CIPOS™. Díky dvojímu návrhu jsem měl jedinečnou příležitost porovnat obě zmíněné technologie. Při porovnání jsem dospěl k závěru, že střídač první je na výrobu finančně nákladnější, složitější na návrh, rozměrově větší a začíná se vyplácet pro výkony nad cca 3kW. Střídač druhý je díky integrovanému čipu levnější a obvod ve výsledku dosahuje menších rozměrů. Použitelný je však pouze pro nižší výkony (řízení pohonu pračky, BLDC motorů, ...). Krátce jsem se zdržel i u praktického návrhu DPS, kde jsem upozornil na určitá specifika návrhu pro silové a řídicí části. Dále jsem se věnoval i návrhu programu. Zde jsem vyzkoušel několik metod běžně užívaných v průmyslově vyráběných měničích. Žádná z metod mi však nevyhovovala, a tak jsem navrhl vlastní metodu řízení. Zaměřil jsem se na popis výhod a nevýhod jednotlivých metod. Stručně jsem také popsal mé výsledné programové řešení. V poslední části jsem se věnoval samotnému oživení frekvenčního měniče a prováděn měření na kompletním prototypu. Mimo jiné jsem změřil například výstupní signál z mikrokontroléru, deadtime budiče, dobu spínání tranzistoru, dobu vypínání tranzistoru, zatížený a nezatížený výstup měniče, pomocí FFT vyšší harmonické před harmonickým filtrem a za harmonickým filtrem a mnoho další.

Výsledkem mé práce bylo splnění všech podmínek zadání a nabití mnohých zkušeností. Při průběhu řešení rozličných komplikací se mi spojilo mnoho znalostí z různých předmětů.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Blokové schéma frekvenčního měniče .....	10
Obr. 2 3fázové dvoucestné zapojení usměrňovače .....	10
Obr. 3 Stejnoseměrný meziobvod s brzdým odporem.....	10
obr. 4 SPWM [6] .....	11
obr. 5 Schéma terminátoru jedné fáze [5](upraveno).....	12
obr. 6 Schéma třífázového du/dt filtru [5].....	12
obr. 7 Schéma třífázového harmonického filtru [5] .....	13
obr. 8 MOSFET - typ N.....	14
obr. 9 Výstupní charakteristika MOSFET typ N [9].....	15
obr. 10 Náhradní schéma IGBT .....	16
obr. 11 Vnitřní zapojení obvodu IR2101 [10].....	16
obr. 12 integrovaný obvod IGCM10F60GA [11].....	17
obr. 13 Optron [12] .....	17
obr. 14 Vnitřní zapojení TC 258 .....	20
obr. 15 Stejnoseměrný meziobvod.....	21
obr. 16 Zapojení gate driveru IR2101.....	24
obr. 17 Průběh na Gate v závislosti na R.....	24
obr. 18 Plovoucí provoz tranzistorů [7] .....	25
obr. 19 Zapojení IGCM10F60GA.....	27
obr. 20 Vnitřní zapojení VFO .....	28
obr. 21 Zapojení EL817 .....	28
obr. 22 Zapojení harmonického filtru.....	29
obr. 23 Kalkulačka pro výpočet šířky vodivé cesty [15] .....	30
obr. 24 Návrh DPS střídač I.....	31
obr. 25 Návrh DPS střídač II. ....	32
obr. 26 Obdélník zarovnaný na střed.....	33
obr. 27 výpočet časů pro spínání tranzistorů .....	35
obr. 28 Pravotočivý průběh napětí U <sub>ge</sub> dolních tranzistorů.....	38
obr. 29 Levotočivý průběh napětí U <sub>ge</sub> dolních tranzistorů.....	38
obr. 30 Doba náběhu pulzu na gate .....	39
obr. 31 Doba sestupné hrany pulzu na gate .....	39
obr. 32 Průběh jedné kompletní fáze v pohledu z gate tranzistorů .....	40
obr. 33 Měření průběhů napětí na induktivní zátěži .....	40
obr. 34 FFT analýza výstupního průběhu .....	41
obr. 35 Průběh napětí se zařazeným filtrem DP 300Hz.....	41
obr. 36 FFT na výstupu harmonického filtru .....	42

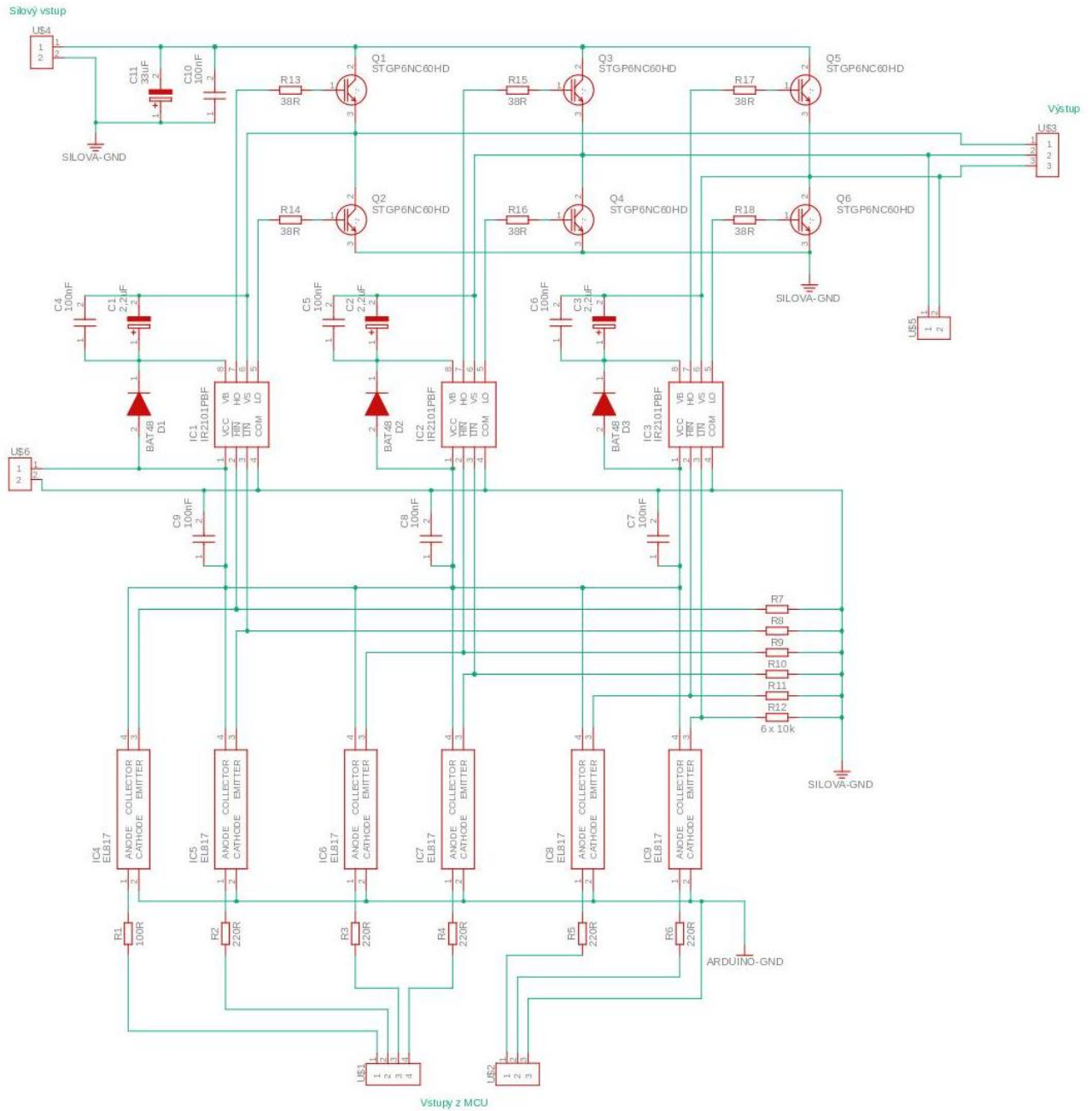
### Seznam použité literatury

- [1] „Průmyslová revoluce – Od Průmyslu 1.0 k Průmyslu 4.0,“ Desoutter Industrial, [Online]. Available: <https://www.desouttertools.cz/prumysl-4-0/novinky/563/prumyslova-revoluce-od-prumyslu-1-0-k-prumyslu-4-0>. [Přístup získán 20 2 2023].
- [2] C. a. k. Doc. Ing. Lumír Kule, Technika elektrických pohonů, Praha: STNL - Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [3] I. P. Koblíček, „<https://docplayer.cz/5561030-Spojite-rizeni-ridici-uhly-tyristoru-se-meni-spojite-rizeni-je-slotitejsi-ale-napeti-ma-vyhodnejsi-prubeh-i-tak-obsahuje-vyssi-harmonicke.html>,“ SPŠ Ústí nad Labem, 2013. [Online].
- [4] „<https://www.elektromotory.cz/frekvencni-menice-proc-a-jak>,“ K-Drives a.s., 2023. [Online].
- [5] B. M. Kortan, „DP Vstupní a výstupní filtry napěťových střídačů,“ ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ, Plzeň, 2012.
- [6] D. Ulrich, „Výpočet chladiče,“ 2011. [Online]. Available: <https://vyuka.hradebni.cz/mod/resource/view.php?inpopup=true&id=5359>.
- [7] [Online]. Available: <https://forum.mcontrollers.com/uploads/short-url/8jrFukjScWRNMf1xgDK1sSSKdf9.pdf>.
- [8] IPC, „IPC-2221A Generic Standard on Printed Board Design,“ [Online]. Available: <https://www.ipc.org/TOC/IPC-2221A.pdf>.
- [9] „Arduino store,“ [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-due>. [Přístup získán 2023].
- [10] P. P. A. M. Luis Ibarra, „ResearchGate,“ 06 2015. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/281555253\\_Generalized\\_d-q\\_frame\\_PWM\\_strategy\\_for\\_three-phase\\_electric\\_machineryO\\_O](https://www.researchgate.net/publication/281555253_Generalized_d-q_frame_PWM_strategy_for_three-phase_electric_machineryO_O). [Přístup získán 13 03 2023].
- [11] neznámý, „<https://cs.wikipedia.org/wiki/MOSFET>,“ [Online]. [Přístup získán 03 2023].
- [12] R. Teja, „<https://www.electronicshub.org/mosfet-as-a-switch/>,“ 2021. [Online].
- [13] International Rectifier, „IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF),“ www.irf.com, California, 2004.

- [14] Mouser Electronics, „IGCM10F60GA,“ [Online]. Available: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Infineon-Technologies/IGCM10F60GA?qs=r1clj14McZcd7kGZZ1wZZw%3D%3D>. [Přístup získán 3 2023].
- [15] I. Kručovčín, „encyklopediapoznania.sk,“ [Online]. Available: <https://encyklopediapoznania.sk/clanok/9256/optron>.
- [16] 4PCB, Advanced Circuits, 2018. [Online]. Available: <https://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>.



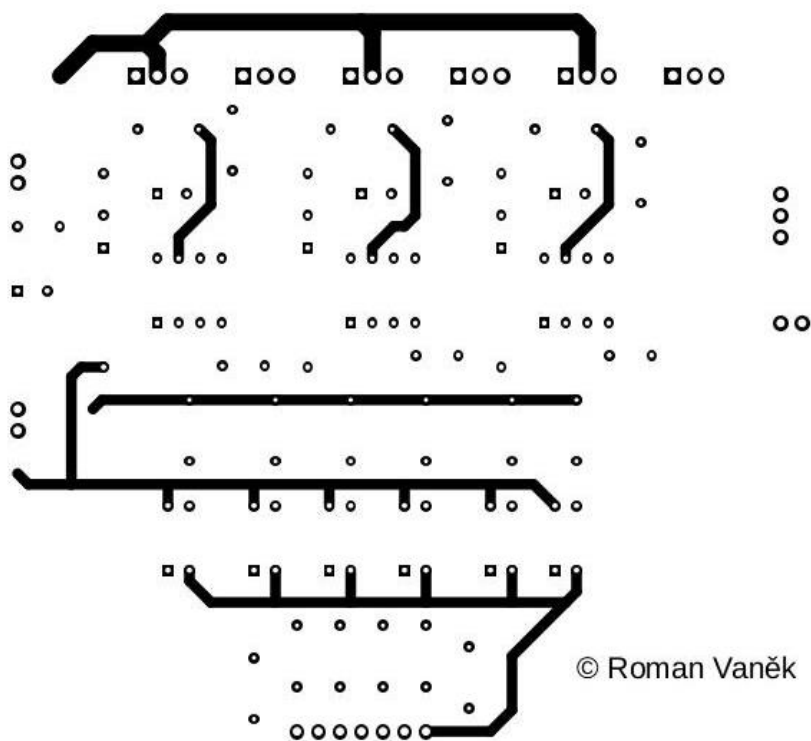
# Schéma střídače I.





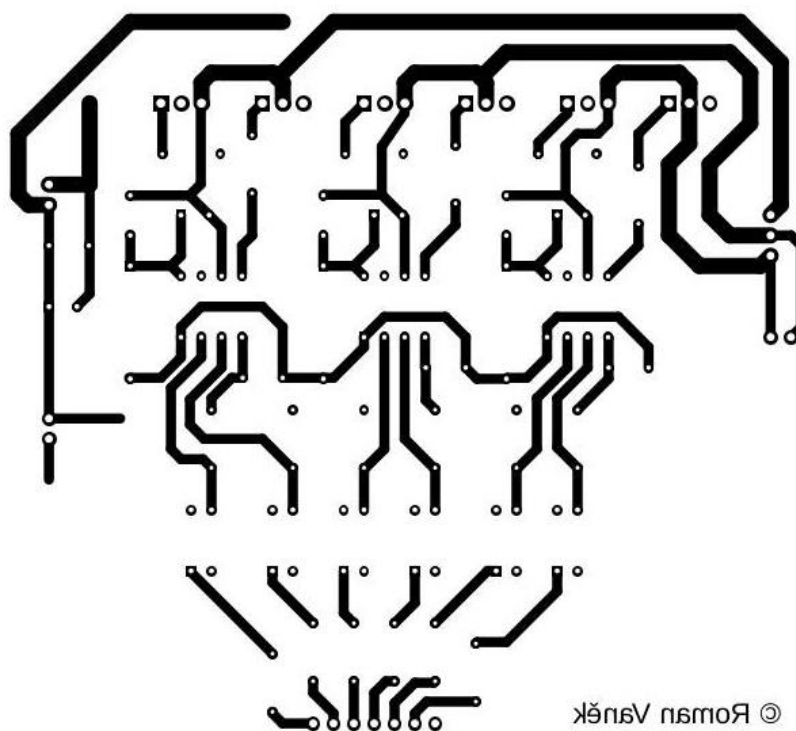
Blackprint - top - střídač I.

měřítko 1:1

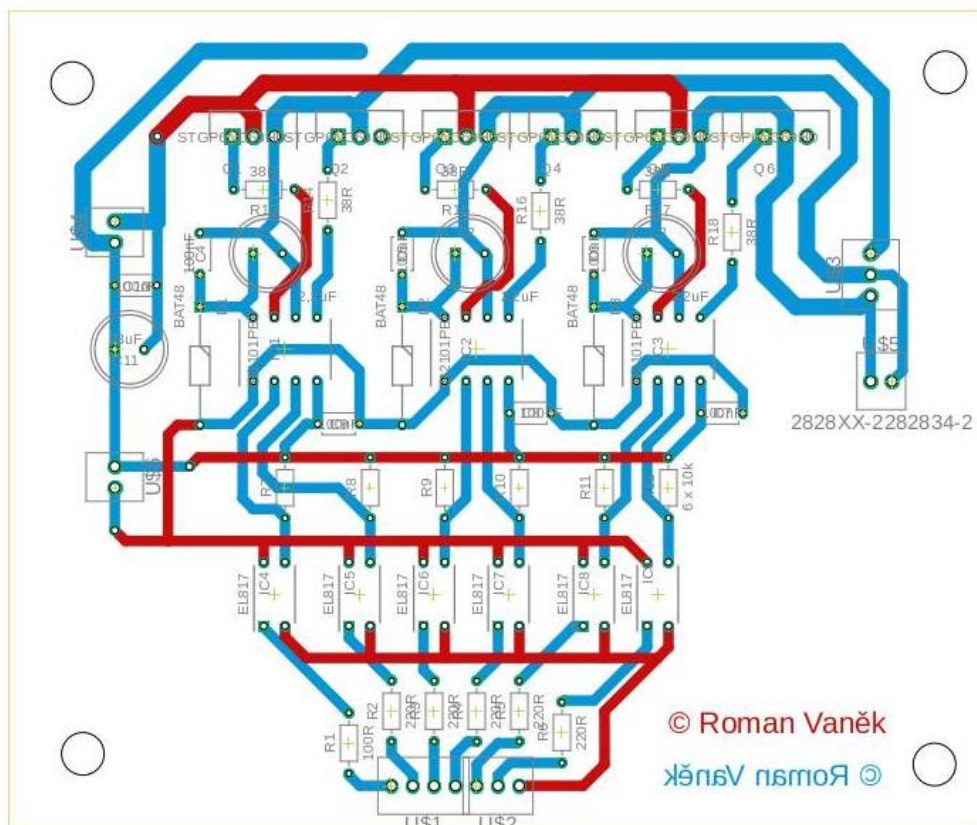


Blackprint - bottom - střídač I.

Měřítko 1:1



## Rozložení cest a součástek – střídač I.



## 3D vizualizace – střídač I.

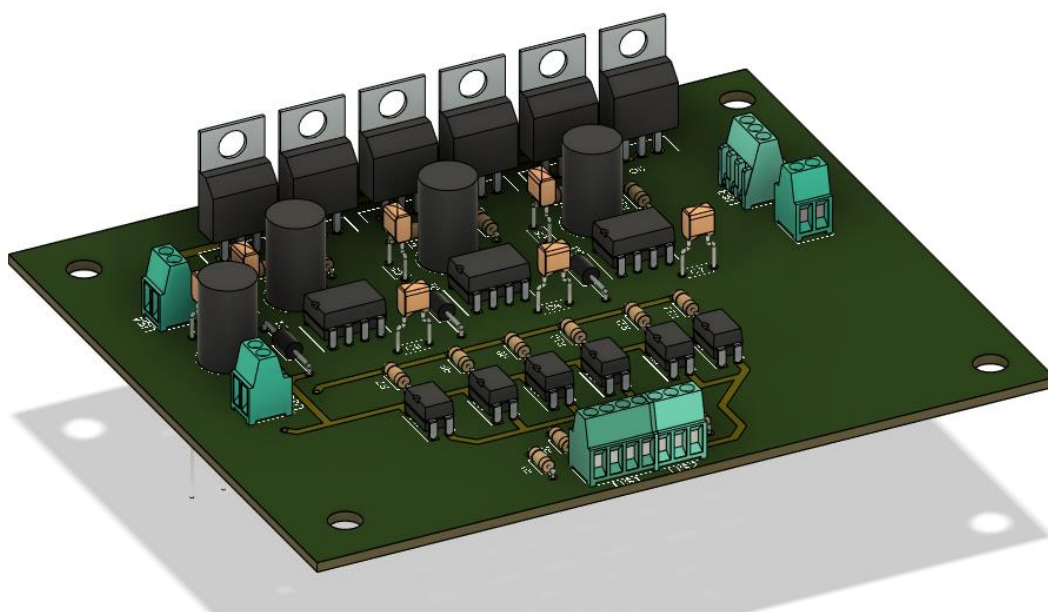
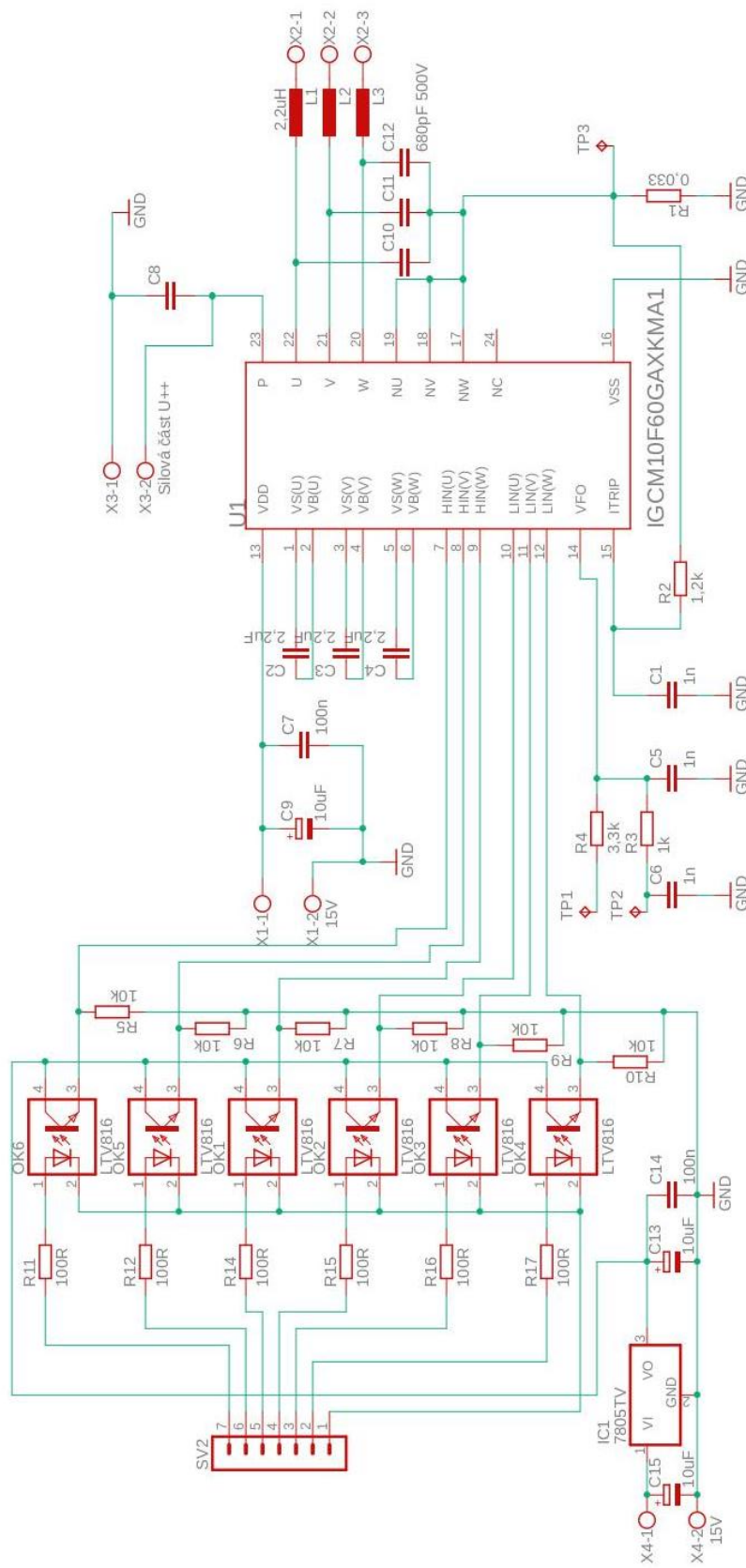
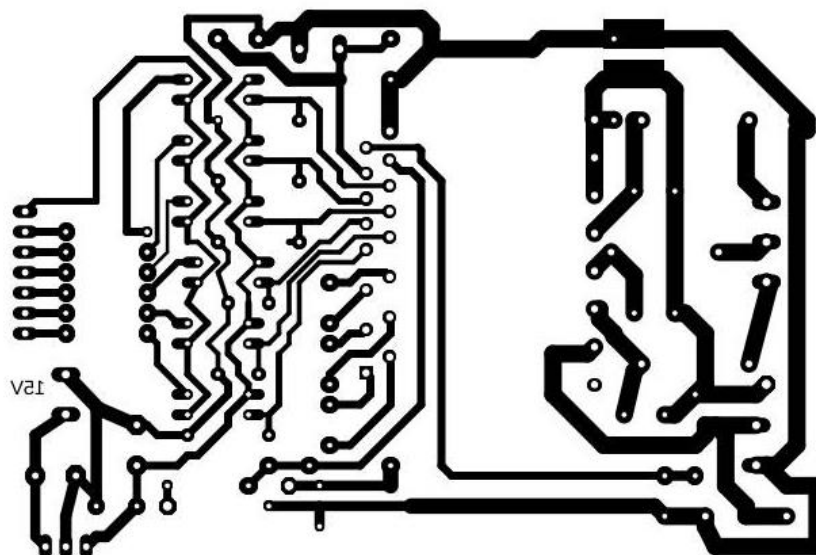
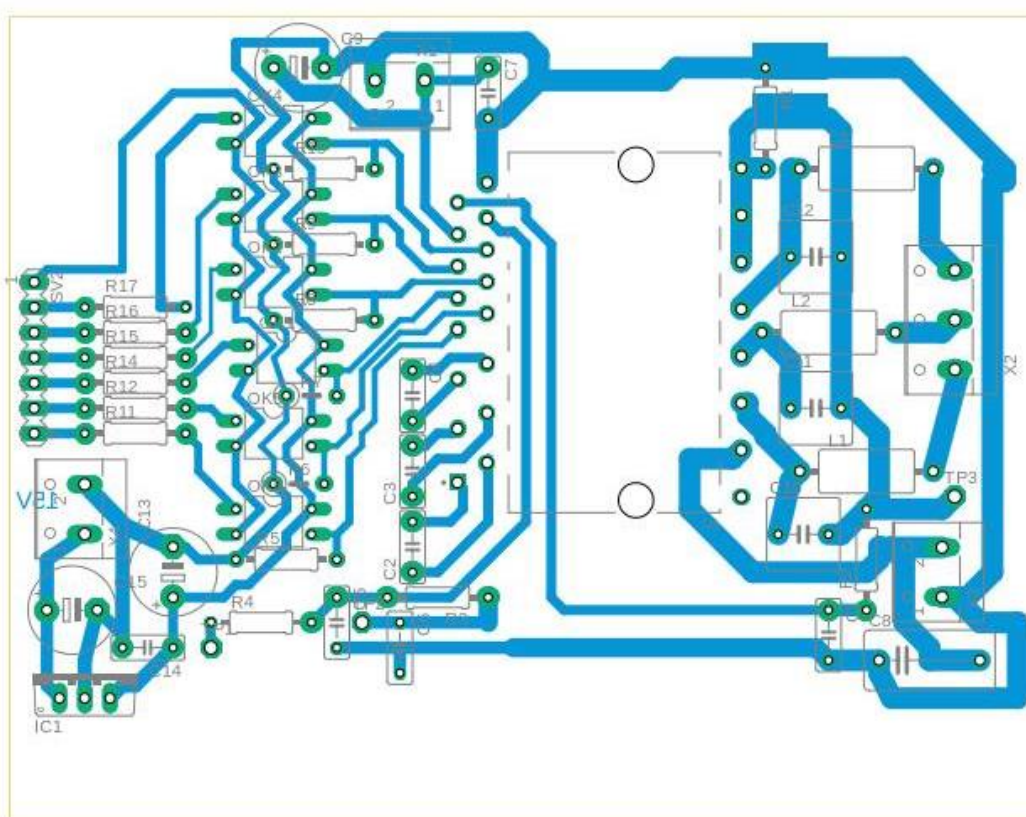


Schéma - střídač II.



**Blackprint - Bottom - střídač II.****Měřítko 1:1****Rozložení součástek a cest**

```
//pin 53 nepoužívat!!

/* nastavení LCD displeje */

#include <LiquidCrystal.h>           //import knihovny pro řízení
LCD                                  LCD

LiquidCrystal lcd(22, 24, 26, 28, 30, 32); //určení pinů displeje

int LCD_led = 34;                    //určení pinu na podsvícení
displeje

/* výpočet SPWM */

int pole[25] = { 0, 3, 6, 9, 11, 12, 13, 12, 11, 9, 6, 3, 0, -3, -6, -9,
-11, -12, -13, -12, -11, -9, -6, -3 }; //řada hodnot pro výpočet SPWM

int a = 0;

                                //časování 1. fáze

int b = 8;

                                //časování 2. fáze

int c = 16;

                                // časování 3. fáze

int i;

                                //určuje frekvenci

int t1, t2, t3;

                                //proměnné pro výčet nefiltrovaných časů

int t1a, t2a, t3a;

                                //absolutní hodnoty nefiltrovaných časů

int T1, T2, T3;

                                //filtrované proměnné

int d;

                                //doba doběhu pulzu

int dp;

                                //doba periody
```

```
/* přiřazení pinu tranzistorů */

int p11 = 5;          //tranzistor HIN(U)
int p12 = 2;          //tranzistor LIN(U)
int p21 = 6;          //tranzistor HIN(V)
int p22 = 3;          //tranzistor LIN(V)
int p31 = 7;          //tranzistor HIN(W)
int p32 = 4;          //tranzistor LIN(W)

int hd1, hd2, hd3;   //proměnné rozhodují zda bude spínán horní, nebo
dolní tranzistor

/*ovládání pomocí potenciometru*/

int pot = A0;        //určení pinu potenciometru
int k;               //proměnná pro výčet hodnot z potenciometru

/* proměnné složící k reverzaci otáček a zastavení programu */

int rs1 = 13;        //piny pro R/L + on/off
int rs2 = 12;

int rsr1, rsr2;     //proměnné pro výčet hodnot z přepínače
int rev;            //pomocné proměnné R/L + on/off
int off;

/*výpočet hodnot pro displej*/

float f1;
int f2;

void setup() {

    /* urční výstupních a vstupních pinů */

    pinMode(p11, OUTPUT);
    pinMode(p12, OUTPUT);
    pinMode(p21, OUTPUT);
    pinMode(p22, OUTPUT);
```

```
pinMode(p31, OUTPUT);
pinMode(p32, OUTPUT);
pinMode(pot, INPUT);
pinMode(rs1, INPUT);
pinMode(rs2, INPUT);
pinMode(LCD_led, OUTPUT);

/* zahájení komunikace s displejem a zápis na displej */
lcd.begin(16, 2); //určí velikost displeje
lcd.clear();
lcd.print("frekvence"); //zápis na displej
lcd.setCursor(3, 1); //presunutí kurzoru
lcd.print("Hz");
digitalWrite(LCD_led, HIGH); //zapnutí podsvícení
lcd.setCursor(10, 0);
lcd.print("| SPS");
lcd.setCursor(10, 1);
lcd.print("|Pisek");
}

void loop() {
    rsr1 = digitalRead(rs1);
    rsr2 = digitalRead(rs2);

    if (rsr1 == 1) { //podmínka určující směr otáčení nebo zastavení
motoru
        rev = 1;
        predprogram();
    } else if (rsr2 == 1) {
        rev = 0;
        predprogram();
    }
}
```



```
    } else {  
        stop2();  
    }  
}  
  
void predprogram() { //přečte hodnotu na potenciometru a vypočítá dobu  
periody  
  
    k = analogRead(pot);  
  
    i = map(k, 0, 1024, 22, 320);  
  
    dp = i * 25;  
  
    reverzace(); //určí směr otáčení motoru  
  
    hlavniprg(); //zahájí hlavní výpočet SPWM  
  
}  
  
void hlavniprg() {  
  
    /* kontrola přetečení a nulování proměnných pro výčet */  
  
    if (a == 24) {  
        a = 0;  
  
        displej(); //zahájení zápisu na displej (je provedeno pouze jednou  
za čas, kvůli časové náročnosti)  
  
    }  
  
    if (b == 24) {  
        b = 0;  
  
    }  
  
    if (c == 24) {  
        c = 0;  
  
    }  
  
  
    /* výpočet skutečné délky pulzu */  
  
    t1a = i * abs(t1);  
  
    t2a = i * abs(t2);  
  
    t3a = i * abs(t3);  

```

```
HD(); //podprogram určující sepnutí horního nebo dolního tranzistoru
```

```
/* Výpočet časů pro postupné vypínání tranzistorů */
```

```
if (t1a <= t2a && t2a <= t3a) {  
    T1 = t1a;  
    T2 = t2a - t1a;  
    T3 = t3a - t2a;  
    d = dp - t3a;  
    run1();  
} else if (t1a <= t3a && t3a <= t2a) {  
    T1 = t1a;  
    T3 = t3a - t1a;  
    T2 = t2a - t3a;  
    d = dp - t2a;  
    run2();  
} else if (t2a <= t1a && t1a <= t3a) {  
    T2 = t2a;  
    T1 = t1a - t2a;  
    T3 = t3a - t1a;  
    d = dp - t3a;  
    run3();  
} else if (t2a <= t3a && t3a <= t1a) {  
    T2 = t2a;  
    T3 = t3a - t2a;  
    T1 = t1a - t3a;  
    d = dp - t1a;  
    run4();  
} else if (t3a <= t1a && t1a <= t2a) {  
    T3 = t3a;  
    T1 = t1a - t3a;
```

```
T2 = t2a - t1a;

d = dp - t2a;

run5();

} else if (t3a <= t2a && t2a <= t1a) {

    T3 = t3a;

    T2 = t2a - t3a;

    T1 = t1a - t2a;

    d = dp - t1a;

    run6();

} else {

} //neprovede nic ( ?° ?? ?°)

stop(); //vypne všechny tranzistory

delayMicroseconds(d + 15); //časový doběh pulzu a bezpečnostní
zpoždění

}

void HD() { //na základě zápornosti hodnot z pole zjistí zda se bude
spínat horní nebo dolní tranzistor

    if (t1 < 0) {

        hd1 = p12;

    } else if (t1 > 0) {

        hd1 = p11;

    } else {

        hd1 = 53;

    }

}

if (t2 < 0) {

    hd2 = p22;

} else if (t2 > 0) {

    hd2 = p21;

} else {

    hd2 = 53;

}
```

```
}

if (t3 < 0) {
    hd3 = p32;
} else if (t3 > 0) {
    hd3 = p31;
} else {
    hd3 = 53;
}
}

/* zápisy na jednotlivé piny podle předem vypočtených časů a tranzistorů
*/

void run1() {
    digitalWrite(hd1, HIGH);
    digitalWrite(hd2, HIGH);
    digitalWrite(hd3, HIGH);
    delayMicroseconds(T1);
    digitalWrite(hd1, LOW);
    delayMicroseconds(T2);
    digitalWrite(hd2, LOW);
    delayMicroseconds(T3);
    digitalWrite(hd3, LOW);
}

void run2() {
    digitalWrite(hd1, HIGH);
    digitalWrite(hd2, HIGH);
    digitalWrite(hd3, HIGH);
    delayMicroseconds(T1);
    digitalWrite(hd1, LOW);
    delayMicroseconds(T3);
}
```

```
digitalWrite (hd3, LOW);  
delayMicroseconds (T2);  
digitalWrite (hd2, LOW);  
}
```

```
void run3 () {  
    digitalWrite (hd1, HIGH);  
    digitalWrite (hd2, HIGH);  
    digitalWrite (hd3, HIGH);  
    delayMicroseconds (T2);  
    digitalWrite (hd2, LOW);  
    delayMicroseconds (T1);  
    digitalWrite (hd1, LOW);  
    delayMicroseconds (T3);  
    digitalWrite (hd3, LOW);  
}
```

```
void run4 () {  
    digitalWrite (hd1, HIGH);  
    digitalWrite (hd2, HIGH);  
    digitalWrite (hd3, HIGH);  
    delayMicroseconds (T2);  
    digitalWrite (hd2, LOW);  
    delayMicroseconds (T3);  
    digitalWrite (hd3, LOW);  
    delayMicroseconds (T1);  
    digitalWrite (hd1, LOW);  
}
```

```
void run5 () {
```

```
digitalWrite (hd1, HIGH);
digitalWrite (hd2, HIGH);
digitalWrite (hd3, HIGH);
delayMicroseconds (T3);
digitalWrite (hd3, LOW);
delayMicroseconds (T1);
digitalWrite (hd1, LOW);
delayMicroseconds (T2);
digitalWrite (hd2, LOW);
}

void run6 () {
digitalWrite (hd1, HIGH);
digitalWrite (hd2, HIGH);
digitalWrite (hd3, HIGH);
delayMicroseconds (T3);
digitalWrite (hd3, LOW);
delayMicroseconds (T2);
digitalWrite (hd2, LOW);
delayMicroseconds (T1);
digitalWrite (hd1, LOW);
}

void stop () { //zastavení sepnutí tranzistorů
digitalWrite (p11, LOW);
digitalWrite (p12, LOW);
digitalWrite (p21, LOW);
digitalWrite (p22, LOW);
digitalWrite (p31, LOW);
digitalWrite (p32, LOW);
```

```
}  
  
void stop2() { //Zastavení s nulováním displeje  
    digitalWrite(p11, LOW);  
    digitalWrite(p12, LOW);  
    digitalWrite(p21, LOW);  
    digitalWrite(p22, LOW);  
    digitalWrite(p31, LOW);  
    digitalWrite(p32, LOW);  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("00");  
}  
  
void reverzace() { //provádí reverzaci na základě výčtu z hodnot pole  
    if (rev == 1) {  
        t1 = pole[a++];  
        t2 = pole[b++];  
        t3 = pole[c++];  
    } else if (rev == 0) {  
        t2 = pole[a++];  
        t1 = pole[b++];  
        t3 = pole[c++];  
    }  
}  
  
void displej() {  
    f1 = i * 0.000760;  
    f2 = 1 / f1; //přepočet času na frekvenci  
    if (f2 <= 9) { //zápis hodnot 0 až 9  
        lcd.setCursor(0, 1);  
        lcd.print("0");  
    }  
}
```

```
lcd.print(f2);  
} else { //zápis hodnot 10 až 99  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print(f2);  
}  
}
```