

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Jednofázový střídač 12VDC/230VAC, 50Hz**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal ŠVAJNER**  
Osobní číslo: **E13B0227P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Jednofázový střídač 12VDC/230VAC, 50Hz**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

**Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :**

Cílem práce je vytvořit jednofázový střídač s napájecím napětím 12V o výkonu 300W. Zařízení by mělo být navrženo s možností napájení z 12V akumulátoru.

1. Prostudujte dostupnou literaturu a navrhnete koncepci zařízení.
2. Vyberte vhodný řídicí prvek a zařízení realizujte.
3. Realizujte nadproudové, podpěťové, přepěťové a tepelné ochrany.
4. Odměřte významné parametry zdroje.
5. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a případně navrhnete další možnosti zlepšení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Rubáš**

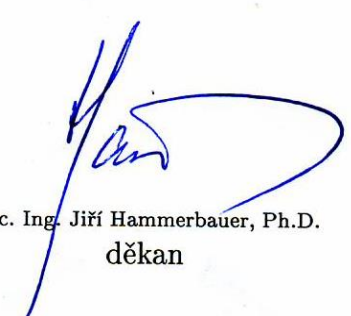
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce:


**14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**8. června 2017**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## Abstrakt

Tato práce se zabývá kompletním návrhem jednofázového střídače 12VDC/230VAC, 50Hz. Systém je vytvořený modulárně a skládá se z osmi navzájem propojených desek plošných spojů. Hlavními částmi jsou dvojčinný měnič 12VDC/330VDC zapojený v plném můstku s přídatnou řídicí deskou a střídač s průběhem modifikované sinusoidy 330VDC/230VAC se svoji řídicí deskou. Další části slouží pro ochrany a indikace stavů jednofázového střídače. Všechny části jsou v této práci popsány. V teoretickém úvodu jsou popsány typy měničů s galvanickým oddělením a základní druhy střídačů. V závěru práce jsou uvedené výsledky měření, možnosti zlepšení a celkové shrnutí práce.

## Klíčová slova

DC/DC měnič, DC/AC měnič, jednofázový střídač, modifikovaný sinus, dvojčinný měnič, LC filtr, návrh transformátoru dvojčinného měniče, výpočet spínacích ztrát tranzistorů, návrh filtrační tlumivky, návrh filtračního kondenzátoru.

## **Abstract**

This thesis deals with a complete design of a single-phase inverter 12VDC/230VAC, 50Hz. The system is created modularly and consists of eight interconnected printed circuit boards. The main parts are a full-bridge push-pull converter 12VDC/330VDC with an additional control board and a modified sinusoidal converter 330VDC/230VAC with a control board. The other parts are for protection and indication of single-phase inverter conditions. All these parts are described in this thesis. Types of converters with a galvanic separation and the other types of converters are described in the theoretical introduction. At the end of the thesis, measurement results, other opportunities of improvement and a summary are listed.

## **Key words**

DC/DC inverter, DC/AC inverter, one-phase inverter, modified sine wave, full bridge push-pull converter, design of LC filter, design of full bridge push-pull transformer, calculation power loss in transistor, design of inductor, design of capacitor.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Michal Švajner

## Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>9</b>
<b><i>Teoretická část</i></b> .....	<b>10</b>
<b>1 Topologie spínaných zdrojů s galvanickým oddělením</b> .....	<b>10</b>
1.1 Jednočinný propustný .....	10
1.1.1 Jednočinný propustný s demagnetizačním vinutím .....	10
1.1.2 Jednočinný propustný můstkový .....	11
1.2 Dvojjinný propustný .....	12
1.2.1 Dvojjinný propustný polomůstkový .....	12
1.2.2 Dvojjinný propustný můstkový .....	13
1.2.3 Dvojjinný propustný push-pull .....	13
1.3 Jednočinný blokující .....	14
<b>2 Topologie střídačů</b> .....	<b>15</b>
2.1 Střídač s obdélníkovým průběhem .....	15
2.2 Střídač s modifikovaným sinusem .....	16
2.3 Střídač se sinusovým průběhem .....	17
<b><i>Praktická část</i></b> .....	<b>18</b>
<b>3 Jednofázový střídač 12VDC/230VAC, 50Hz</b> .....	<b>18</b>
3.1 Silový blok DC-DC .....	19
3.1.1 Návrh transformátoru .....	20
3.1.2 Volba spínacích tranzistorů .....	23
3.1.3 Výpočet ztrát na tranzistorech u silového bloku DC-DC .....	24
3.2 Blok řízení DC-DC .....	25
3.2.1 Popis řídicího obvodu TL494 .....	26
3.2.2 Návrh filtrační tlumivky .....	27

3.2.3	Návrh filtračního kondenzátoru.....	28
3.3	Blok plného můstku DC-AC.....	29
3.4	Blok řízení DC-AC .....	30
3.5	Blok zdroje 12VDC .....	31
3.6	Blok spouštění.....	32
3.7	Blok indikátoru stavu napětí baterie .....	34
3.8	DPS čelního panelu.....	34
<b>4</b>	<b>Umístění zařízení .....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Měření, testování zařízení.....</b>	<b>36</b>
5.1	Funkčnost zařízení .....	36
5.2	Účinnost zařízení .....	37
5.3	Stabilita výstupního napájecího napětí .....	39
5.4	Možnosti zlepšení .....	40
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>Zdroje .....</b>	<b>42</b>
	<b>Přílohy: .....</b>	<b>43</b>



## Seznam symbolů a zkratek

B .....	Magnetická indukce
C .....	Elektrická kapacita
D .....	Drain
GDT .....	Transformátor budící gate tranzistorů
DPS .....	Deska plošného spoje
f .....	Frekvence
G .....	Gate
J .....	Proudová hustota
L .....	Indukčnost
N .....	Počet závitů
P .....	Výkon
S .....	Plocha
T .....	Perioda
U .....	Elektrické stejnosměrné napětí
W .....	Energie
$\mu_0$ .....	Permitivita vakua
$\Phi$ .....	Magnetický tok
$\Psi$ .....	Spřažený magnetický tok

## Úvod

Měníče napětí jsou nedílnou součástí většiny přístrojů, se kterými se denně člověk setkává. Jejich problematika je velice rozsáhlá a není náplní této práce pojednat o všech typech. Co se týče měničů s galvanickým oddělením (transformátorových), dnes dominují topologie spínané. Tyto měniče pracují na vysokých kmitočtech, které jsou výhodnější jak z hlediska hmotnosti, velikosti, tak i účinnosti.

Cílem této práce je zhotovit jednofázový střídač 12VDC/230VAC, který je napájen z autobaterie, popřípadě jiného zdroje v rozsahu 10,5 - 15VDC. Práce se skládá ze dvou hlavních částí. První část tvoří spínaný zdroj s galvanickým oddělením (transformátorový) 12VDC/325VDC v zapojení plný můstek, řízený pomocí integrovaného obvodu TL494. Napětí za transformátorem je vyfiltrováno pomocí LC článku. Druhou část tvoří střídač napětí 325VDC/230VAC řízený mikrokontrolérem PIC16F88. Střídač je také zapojený v plném můstku. Výstupní napětí má tvar modifikované sinusoidy. Další části slouží pro ochrany, indikace napětí napájecího zdroje, rozvod stabilního napájecího napětí pro řídicí logiku, atd. V teoretické části jsou popsány základní topologie spínaných transformátorových zdrojů a střídačů. V praktické části je popsán design celého zařízení včetně fotek ze stavby, výpočtů transformátoru, filtračního LC článku, ztrát na tranzistorech a sedmi volně přiložených schémat. Schémata jsou také k dispozici ve vázaných přílohách v práci, z důvodu ucelení.

# Teoretická část

## 1 Topologie spínaných zdrojů s galvanickým oddělením

Spínané zdroje mají oproti klasickým, pracujícím na frekvenci 50Hz nesporné výhody zmíněné v úvodu. Mezi nevýhody patří složitější návrh jak na konstrukci měniče, tak i na odfiltrování vysokých kmitočtů způsobených vysokými frekvencemi spínání. Topologie spínaných měničů lze rozdělit do třech topologií, a to jednočinné propustné, dvojčinné propustné a jednočinné blokuující. V následujících kapitolách jsou popsány tyto tři topologie.

### 1.1 Jednočinný propustný

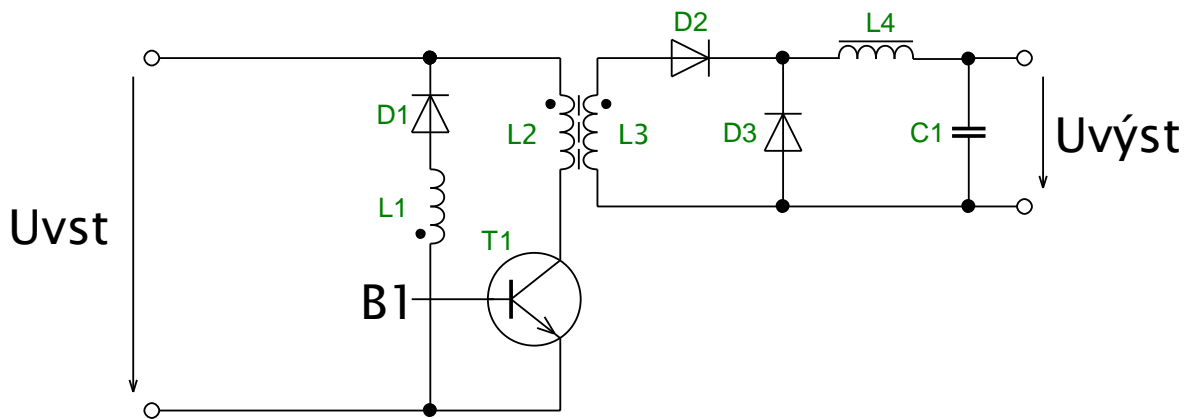
Všechny jednočinné propustné měniče využívají transformátor bez vzduchové mezery. Jednočinné měniče přenášejí energii pouze jednou za periodu a to v době, kdy je tranzistor sepnut. Všechny jednočinné propustné měniče využívají jednocestné usměrnění napětí.

#### 1.1.1 Jednočinný propustný s demagnetizačním vinutím

Tato topologie obsahuje pouze jeden spínací prvek (tranzistor). Demagnetizační vinutí L1 slouží k odvedení magnetizační energie:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot I^2 \quad (1.1)$$

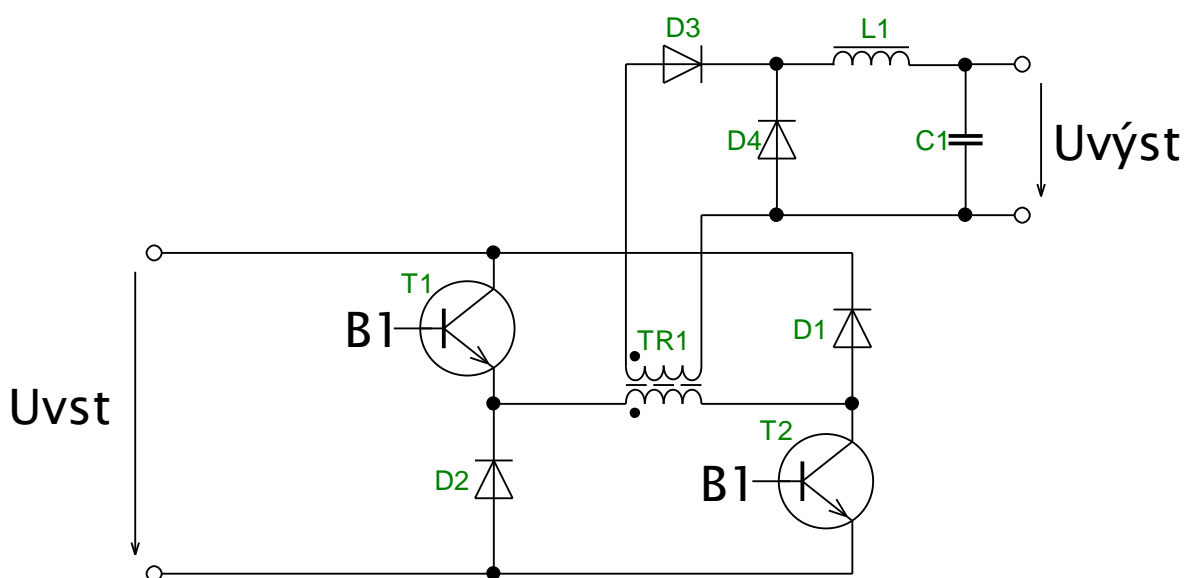
Bez tohoto vinutí by se po rozeznutí tranzistoru tato energie přeměnila na teplo v tranzistoru, které by vedlo u vyšších odebíraných výkonů k jisté destrukci. U této topologie však nelze plně zabránit napěťovým překmitům při vypínání tranzistoru, které vznikají rozptylovou indukčností mezi vinutím L1 a L2. Z tohoto důvodu se tato topologie nehodí pro výkony nad cca 200W [1].



Obr. 1.1 Schéma jednočinného propustného měniče s demagnetizačním vinutím

### 1.1.2 Jednočinný propustný můstkový

Tato topologie obsahuje dva tranzistory. Není zde využito demagnetizační vinutí, protože po vypnutí tranzistorů se cesta magnetizační energie uzavírá přes diody D1 a D2. Díky tomu zde neexistuje rozptylová indukčnost mezi primárním a demagnetizačním vinutím a tranzistory jsou namáhány daleko menšími napěťovými špičkami. Z tohoto důvodu je tato topologie vhodná pro velmi vysoké výkony (jednotky až desítky kW). Za nevýhodu lze považovat skutečnost, že topologie využívá dva tranzistory v sérii. Je také nutné použít shodné budící signály do obou tranzistorů, kde horní tranzistor musí být galvanicky oddělen protože source není na potenciálu země. Oddělení lze zajistit GDT transformátorem nebo specializovanými integrovanými obvody pro plovoucí buzení tranzistorů [1].



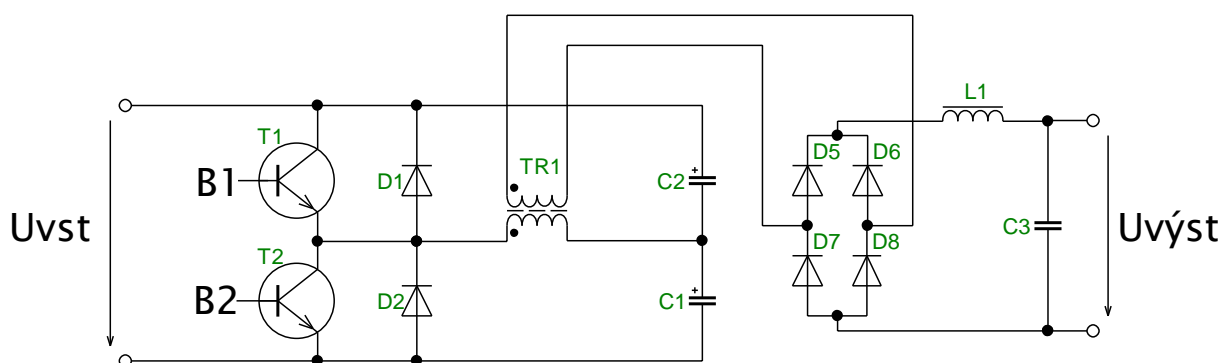
Obr. 1.2 Schéma jednočinného propustného můstkového měniče

## 1.2 Dvojčinný propustný

Všechny dvojčinné propustné měniče využívají transformátor bez vzduchové mezery. Tyto typy zdrojů jsou neefektivnější, dosahují vyšších výkonů o menších velikostech v porovnání s ostatními topologiemi. Vinutí transformátoru se připojuje v obou polaritách, díky tomu stačí použít poloviční počet závitů, lze použít silnější vodiče a přenášet větší výkon. Na sekundárním vinutí transformátoru je vždy usměrnění realizováno buď Graetzovým můstkem nebo dvojitým sekundárním vinutím a následným dvojecestným usměrněním pomocí dvou diod. U dvojčinných zdrojů je nutno dodržet ochranou dobu (dead time). Doba zavírání a otevírání tranzistoru není nulová. Z tohoto důvodu je nutná prodleva mezi zavřením jednoho a otevřením druhého tranzistoru, aby tranzistory spínaly beze ztrát. Je také nutné zajistit nulovou střední hodnotu napětí na primáru, tedy budit tranzistory symetricky, aby nedocházelo k stejnosměrné magnetizaci jádra [1].

### 1.2.1 Dvojčinný propustný polomůstkový

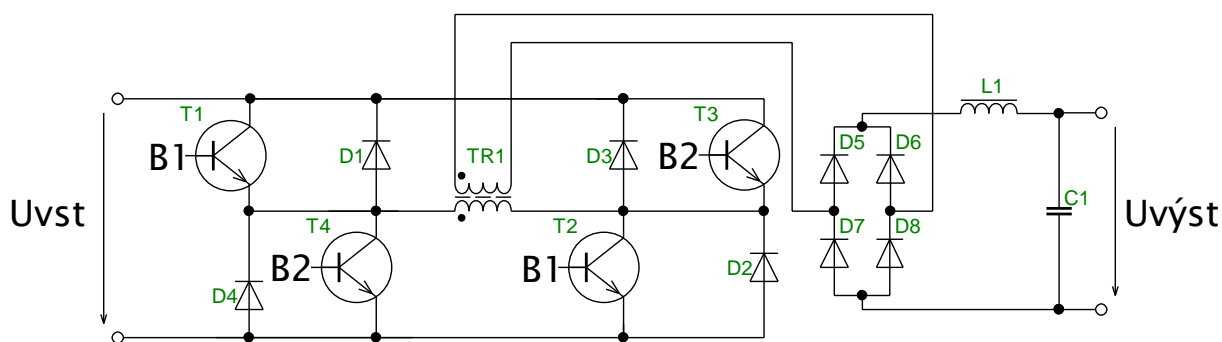
Tato topologie využívá dvou tranzistorů. Kondenzátory C1 a C2 se nabijí na hodnotu napětí  $U_{vst}$  podle toho, který z výkonových prvků je právě sepnut. Kondenzátory mají velkou kapacitu (podle toho jaký výstupní výkon chceme odebrat). Horní tranzistor musí být galvanicky oddělen. Topologie se nehodí pro vysoké výkony z důvodu potřeby tvrdého napájecího napětí na transformátoru, které kondenzátory nedokážou poskytnout [2].



Obr. 1.3 Schéma dvojčinného propustného polomůstkového měniče

### 1.2.2 Dvojčinný propustný můstkový

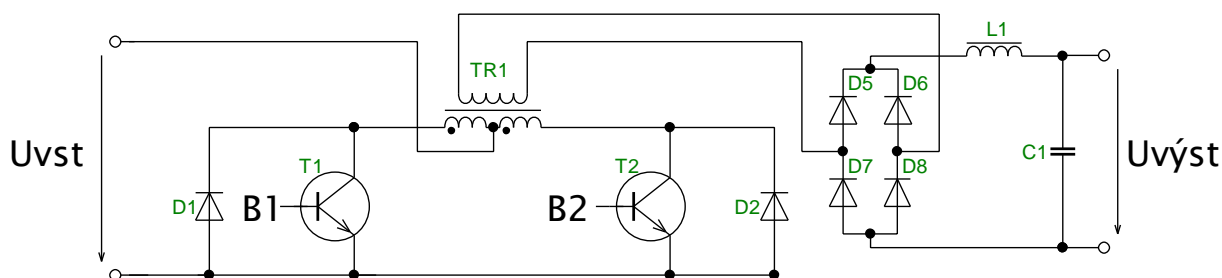
Tato topologie využívá čtyři tranzistory, které spínají v úhlopříčkách, tedy T1 s T2 a T3 s T4. Tranzistory pracují v sérii a je nutno počítat s dvojnásobnými ztrátami na tranzistorech. Horní tranzistory musí být galvanicky odděleny. Topologie je v této práci použita. Na rozdíl od předchozí topologie, tato dokáže dodat tvrdé napájecí napětí na primár transformátoru. Měnič je vhodný pro velmi vysoké výkony až do desítek kW [1], [2].



Obr. 1.4 Schéma dvojčinného propustného můstkového měniče

### 1.2.3 Dvojčinný propustný push-pull

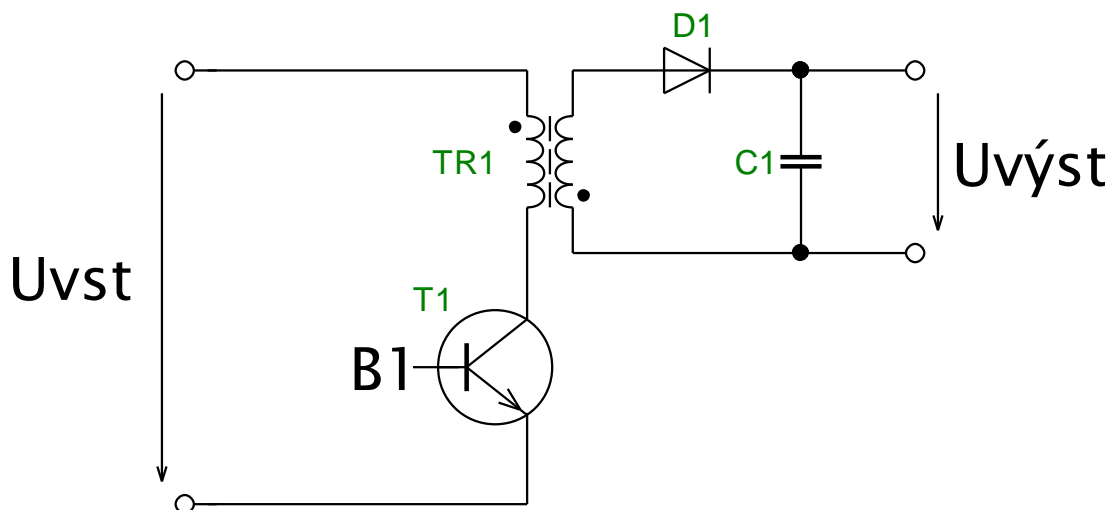
Tato topologie oproti předchozím dvojčinným spínaným zdrojům nepotřebuje galvanicky oddělené buzení. Tranzistory je třeba dimenzovat na dvojnásobek vstupního napětí. Oproti ostatním dvojčinným propustným zdrojům je ale velká nevýhoda v odvádění magnetizační energie. Pro minimalizování rozptylové indukčnosti je potřeba, aby obě primární vinutí měla co největší vazbu, a zároveň návrh DPS musí být co nejsymetrickější s nejkratšími cestami pro minimalizování indukčnosti. Z toho důvodu není tato topologie vhodná pro vysoké výkony [1], [2].



Obr. 1.5 Schéma dvojčinného měniče typu push-pull

### 1.3 Jednočinný blokující

Tato topologie jako jediná využívá transformátor se vzduchovou mezerou. Topologie využívá pouze jednoho tranzistoru. Magnetické účinky v transformátoru se podobají tlumivce. Při sepnutí tranzistoru se v jádře akumuluje energie a při rozepnutí teče proud sekundárním vinutím do zátěže. Výhodou je, že výstupní napětí je závislé na střídě. Z tohoto důvodu je tato topologie vhodná pro vyrobení vysokého výstupního napětí z nízkého vstupního (není potřeba tak velký poměr závitů). Další výhodou je absence tlumivky, která v propustných topologiích měničů musí být. Topologie není vhodná pro vysoké výkony, protože sycení jádra závisí na odebíraném proudu [1], [2].

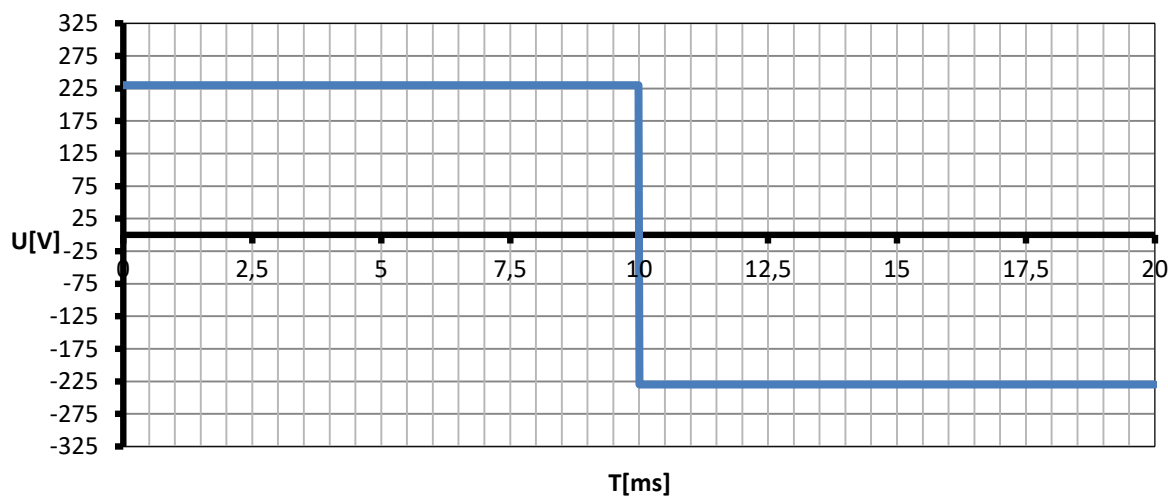


Obr. 1.6 Schéma jednočinného blokujícího měniče

## 2 Topologie střídačů

### 2.1 Střídač s obdélníkovým průběhem

Tento střídač patří mezi nejjednodušší. Využívají ho nejlevnější měniče napětí. Pracuje se vstupním napětím 230VDC které je pomocí můstku rozstředáno. To přináší zásadní problém, efektivní hodnota je sice 230VAC ale amplituda nedosahuje 325V nýbrž pouze 230V. Z tohoto důvodu tento typ střídače není vhodný například pro zátěže, které obsahují usměrňovač a je nutná nesnížená hodnota napětí za ním. Kondenzátor za usměrňovačem se nabíjí na hodnotu amplitudy napětí. Na kondenzátoru bude o cca 40% menší napětí, než má být. Napětí se navíc nemění plynule, ale skokově. To způsobuje například bruceň transformátorů v přístrojích a může zkracovat životnost choulostivějších zařízení.

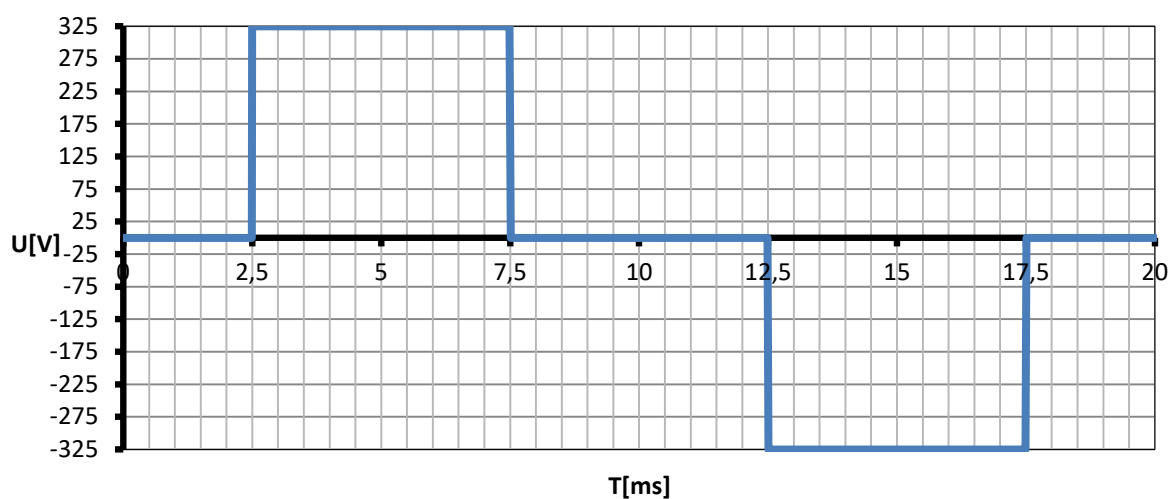


Obr. 2.1 Průběh napětí u střídače s obdélníkovým průběhem



## 2.2 Střídač s modifikovaným sinusem

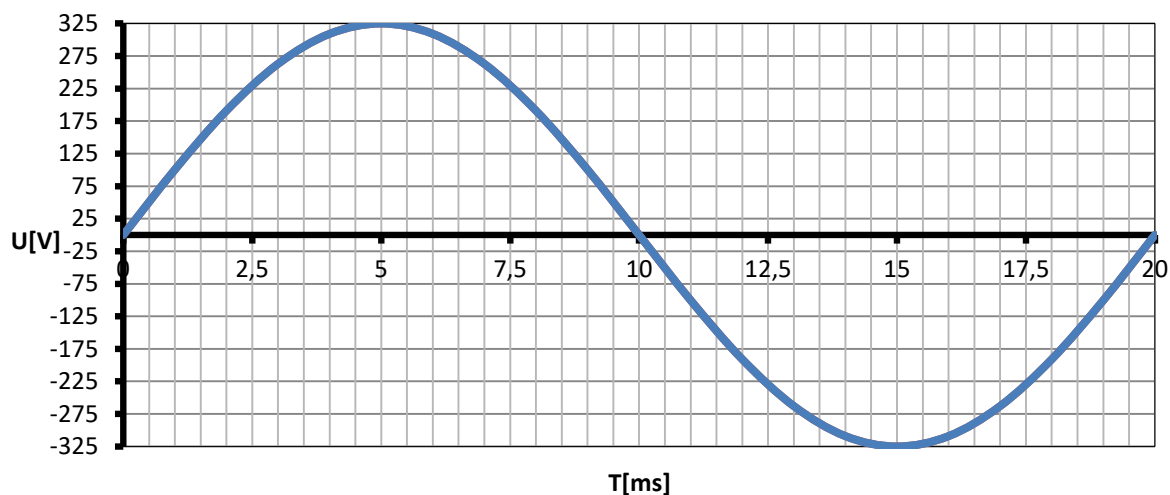
Tento způsob využívá většina továrních měničů napětí. Vstupní napětí je 325VDC které je opět pomocí můstku rozstředáno. Výhodou modifikovaného sinusu je, že oproti obdélníkovému průběhu má stejnou efektivní hodnotu a zároveň i amplitudu sítě. Tyto střídače jsou vhodné pro napájení většiny spotřebičů. Problém s bručením se vyskytuje u této topologie také (napětí se stále nemění plynule) a také přetrvává problém s možným zkracováním životnosti citlivějších zařízení. Tato topologie je v této práci použita.



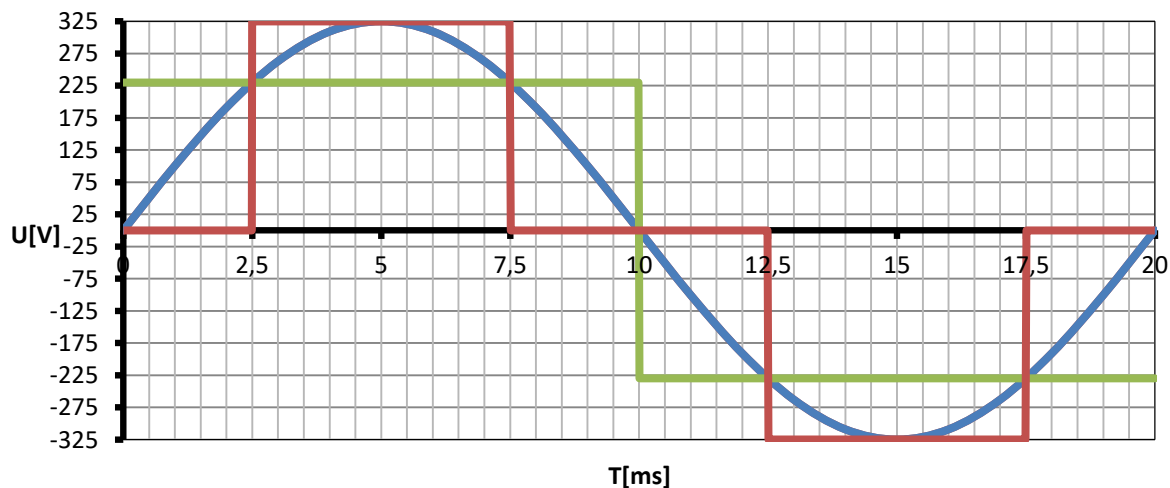
Obr. 2.2 Průběh napětí u střídače s modifikovaným sinusem

### 2.3 Střídač se sinusovým průběhem

Tyto střídače jsou konstrukčně nejsložitější a využívají je nejdražší měniče napětí. Vstupní napětí je 325VDC. Možností jak tento průběh získat za nejmenších ztrát spočívá v použití sinusoidní PWM a následném filtrování LC filtrem. Těmito měniči lze napájet i citlivé přístroje, které vyžadují sinusové napájení.



Obr. 2.3 Průběh napětí u střídače se sinusovým průběhem

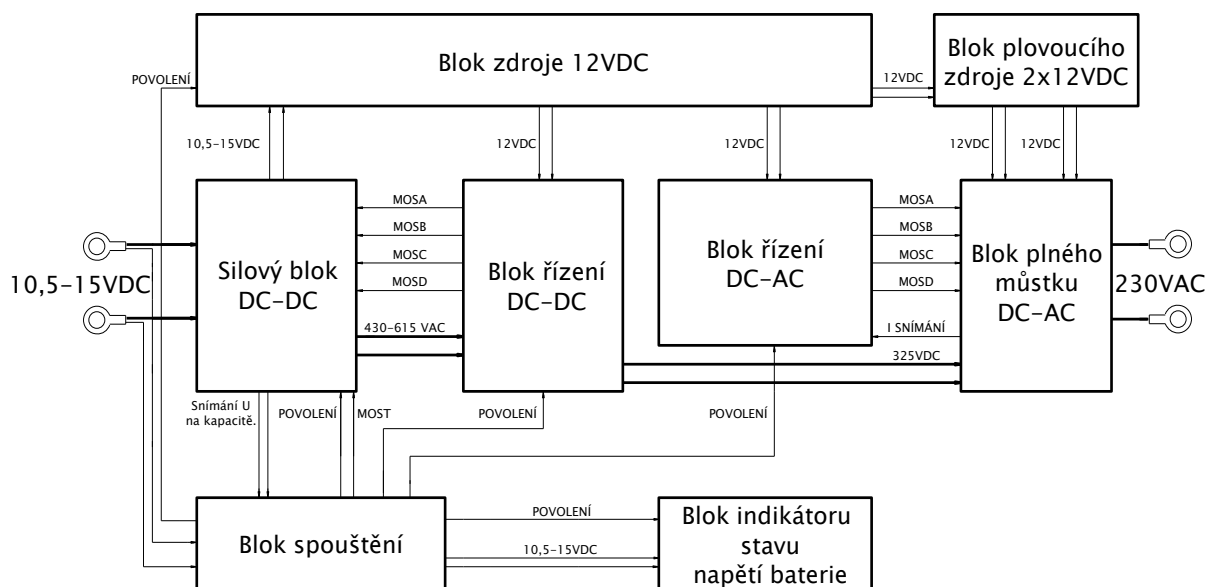


Obr. 2.4 Souhrn průběhů napětí zmíněných střídačů

## Praktická část

### 3 Jednofázový střídač 12VDC/230VAC, 50Hz

Jednofázový střídač 12VDC/230VAC, 50Hz je vyřešen systémem navzájem propojených desek plošných spojů, kde každá z desek má svoji specifickou funkci. Na Obr. 3.1 je pro lepší představu uvedeno blokové schéma celku, kde každý blok představuje jednu desku plošného spoje. Díky modulárnosti jednofázového střídače lze jednoduše nahradit jakýkoliv blok blokem jiným, s lepšími vlastnostmi. První, hlavní částí je DC-DC měnič který se skládá ze silového bloku DC-DC a bloku řízení DC-DC. Druhou, hlavní částí je DC-AC střídač skládající se z bloku plného můstku DC-AC a bloku řízení DC-AC. V následujících kapitolách je postupně popsána funkce těchto jednotlivých bloků.

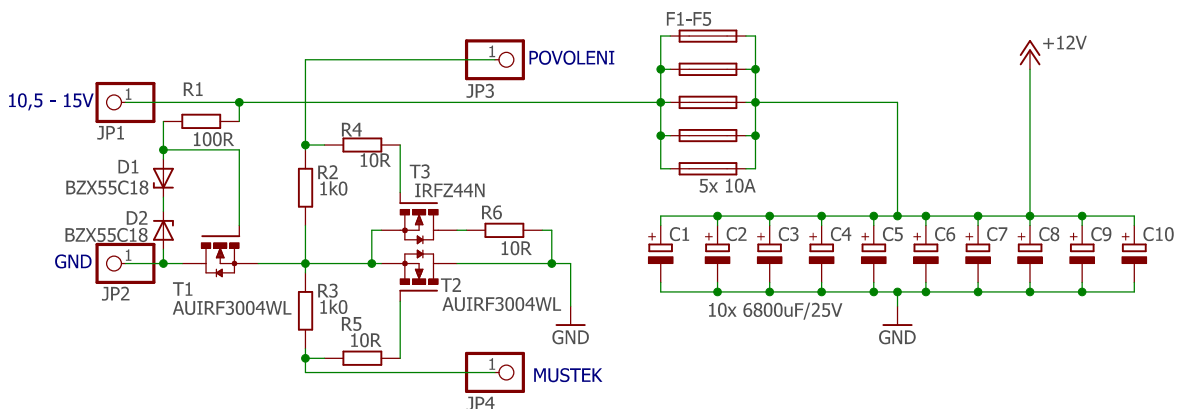


Obr. 3.1 Blokové schéma jednofázového střídače 12VDC/230VAC, 50Hz

### 3.1 Silový blok DC-DC

Na silový blok se přivádí napětí z autobaterie. Vzhledem k vysokým proudům tekoucími vodiči a tímto blokem je nutné, aby cesty měly dostatečnou plochu. Z tohoto důvodu jsou zvoleny vodiče o průřezu  $6\text{mm}^2$  a cesty na DPS jsou  $12\text{mm}$  široké, zesílené dvěma měděnými vodiči o průřezu  $2,5\text{mm}^2$ , které jsou zapájeny na cestách DPS. Tímto způsobem jsou zajištěny minimální úbytky napětí a tedy i nejmenší ztráty.

Na nulovém potenciálu tranzistor T1 slouží jako ochrana zařízení proti přepólování baterie, popř. jiného zdroje. Přepólování není destruktivní, jak je tomu u většiny měničů, kdy je nutné po přepólování měnit pojistku. Tranzistory T2 a T3 se ovládají pomocí signálů POVOLENI a MUSTEK. Tyto signály slouží k uzavření cesty proudu, kdy k T3 je sériově přiřazen odpor R6 který slouží pro omezení proudu. Toho využívá měnič při prvním připojení napájecího napětí, kdy se kondenzátory nabíjejí. Bez odporu by při připojení napětí vznikl velký nárazový proud, který by mohl vzhledem k vysoké kapacitě a nízkému sériovému odporu kondenzátorů prorazit vstupní tranzistory. Také se zabrání opalování přípojných svorek k akumulátoru. Tranzistor T2 zapojený paralelně k T2 a R6 spíná po nabití kondenzátorů a tím zajistí minimální odpor popsané cesty. Mechanismus aktivace/deaktivace signálů POVOLENI A MUSTEK je popsán v kapitole 3.6.



Obr. 3.2 Schéma napájecího bloku silové DPS

Napětí na kondenzátorech je snímáno a porovnáváno blokem spouštění popsaném v kapitole 3.6. Za kondenzátory se nachází tranzistory zapojené v plném můstku, připevněné ke chladiči (tranzistory jsou párované, tedy celkem 8 tranzistorů v můstku). Jednotlivé G tranzistorů jsou dostupné na konektoru. Dále transformátor, jehož sekundár je dostupný na svorkovnici.

Transformátor pracuje na frekvenci 40 kHz v topologii dvojčinného měniče v zapojení plný můstek. Tato topologie je nejvhodnější z důvodu, že je jako jediná schopna dodat vysoké výkony při nízkých napětových špičkách mezi D-S tranzistoru. Popis topologie je v kapitole 1.2.2. Kompletní schéma zapojení silového bloku DC-DC je k dispozici ve volné příloze a v příloze A.

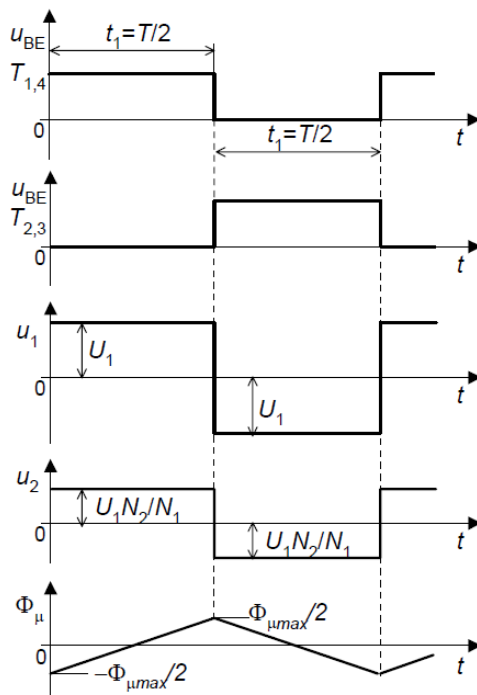


Obr. 3.3 Fotografie silového bloku DC-DC

### 3.1.1 Návrh transformátoru

Bylo zvoleno feritové jádro materiálu 3c90 se značením ETD54 pro jeho výborné vlastnosti v oblasti spínaných napájecích zdrojů do 0,2MHz [6].

Byla zvolena topologie dvojčinného měniče v zapojení plný můstek. Transformátor je třeba navrhovat pro nejhorší případ sycení, který nastává při střídě téměř 0,5 a při maximální hodnotě vstupního napětí.



Obr. 3.4 Nejhorší případ sycení. Převzato z [1].

$\Phi_{\max}/2$  je amplituda toku a  $I_{\max}/2$  je amplituda magnetizačního proudu,  $B_{\max}$  je amplituda sycení, platí následující:

$$\Psi = N_1 \cdot B_{\max} \cdot S \quad (3.1)$$

A zároveň:

$$\Psi = \frac{I_{\max}}{2} \cdot L_1 \quad (3.2)$$

Pak lze zapsat:

$$N_1 \cdot B_{\max} \cdot S = \frac{I_{\max}}{2} \cdot L_1 \quad (3.3)$$

$$u_{L(t)} = L \cdot \frac{d_{iL(t)}}{dt} \quad (3.4)$$

Tok  $\Phi$  stejně jako magnetizační proud  $I$  lineárně narůstá a v  $T/2$  má své maximum, po úpravě rovnice (3.4) lze zapsat:

$$I_{\max} = \frac{U_{1\max} \cdot T}{2 \cdot L_1} \quad (3.5)$$

Po dosažení rovnice (3.5) do rovnice (3.3) vyjde:

$$N_1 = \frac{U_{1max} \cdot T}{4 \cdot B_{max} \cdot S} = \frac{15}{40000 \cdot 4 \cdot 0,2 \cdot 280 \cdot 10^{-6}} = 1,67z \quad (3.6)$$

Výsledný počet závitů primárního vinutí je tedy 2. Počet závitů sekundárního vinutí lze spočítat podle vzorce:

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_2}{U_{1min}} = 2 \cdot \frac{430}{10,5} = 82z \quad (3.7)$$

S ohledem na ztráty byla zvolena napěťová rezerva 105V (325+105=430V)

Je dovolen zhruba 1W ztrátového výkonu na primárním vinutí. Předpokládaný  $I_{max} = 40A$ . Vztah pro dovolený odpor vodiče je:

$$R = \frac{P_{CU}}{I_{ef}^2} = \frac{1}{1600} = 0,63m\Omega \quad (3.8)$$

Délka dvou závitů i s přívodními vodiči je cca 15cm. Celkový průřez potřebný pro dosažení požadovaného odporu lze určit pomocí vztahu:

$$S = \rho_{Cu80} \cdot \frac{l}{R} = 0,022 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,15}{0,625 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^6 = 5,28mm^2 \quad (3.9)$$

Kde  $\rho_{Cu80}$  je měrný odpor mědi při 80°C

S vypočítaným celkovým průřezem lze vypočítat proudovou hustotu:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{40}{5,30} = 7,55 A/mm^2 \quad (3.10)$$

S ohledem na doporučenou proudovou hustotu závitů transformátoru je vhodné zvýšit celkový průřez na 10,6mm<sup>2</sup>. Při tomto průřezu vychází proudová hustota 3,775A/mm<sup>2</sup>

Proti zabránění skin efektu byl zvolen svazek lakovaných vodičů s dvojitou izolací. Hloubku vniku lze stanovit podle zjednodušeného vzorce:

$$d_{max} = \frac{75}{\sqrt{f}} = \frac{75}{\sqrt{40000}} = 0,38mm \quad (3.11)$$

Lze použít vodič maximálně o dvojnásobku, tedy 0,75mm. Byl použit vodič o průměru 0,40mm.

Celkový počet drátů primárního vinutí s ohledem na předchozí výpočty je:

$$n = \frac{4 \cdot S}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 10,6}{\pi \cdot 0,4^2} = 84,4 \text{ tedy } 85 \quad (3.12)$$

Stejným způsobem lze dopočítat i sekundární stranu. Pro délku vodiče 8m,  $I_{\max}=1,3A$  s maximálními dovolenými ztrátami na sekundárním vinutí  $P = 1W$  vychází svazek třech vodičů [1], [5].

### 3.1.2 Volba spínacích tranzistorů

Základní požadavek na volbu tranzistorů je maximální proudové a napěťové namáhání. Mezi další požadavky, které se projevují na ztrátách, patří odpor v sepnutém stavu a doba otevírání/zavírání tranzistoru. Je nutné vybrat určitý kompromis mezi jednotlivými parametry, protože zlepšení jednoho parametru má vždy za následek zhoršení ostatních parametrů. Byl zvolen následující tranzistor, jehož nejdůležitější parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Symbol	Význam	Hodnota
$U_{DS\max}$	maximální napětí drain-source	60V
$I_{D\max}$	maximální (stálý) proud drainem	120A
$R_{DSon}$	odpor v sepnutém stavu	2,9mΩ
$t_r$	doba zapínání	120ns
$t_f$	doba vypínání	20ns

Tab. 3.1 Základní parametry tranzistoru IPP032N06N3GXKSA1 [8]



### 3.1.3 Výpočet ztrát na tranzistorech u silového bloku DC-DC

Existují dva druhy ztrát na tranzistorech a to statické a dynamické. Ztráty statické se projevují pouze odporem v sepnutém stavu. Dynamické jsou způsobeny skutečností, že tranzistor se nezapíná a nevypíná okamžitě.

Pro výpočet statických ztrát lze použít následující vztah:

$$P_{stat} = R_{DSon} \cdot I_{ef}^2 = 0,0029 \cdot 40^2 = 4,64W \quad (3.13)$$

Celkové ztráty činí 4,64W na jednom tranzistoru. U zapojení plného můstku je nutno počítat s dvojnásobkem, protože při spínání v úhlopříčce jsou dva tranzistory v sérii. Ztrátový výkon na tranzistorech při plném zatížení tedy činí 9,28W.

Pro výpočet dynamických ztrát lze použít následující vztah:

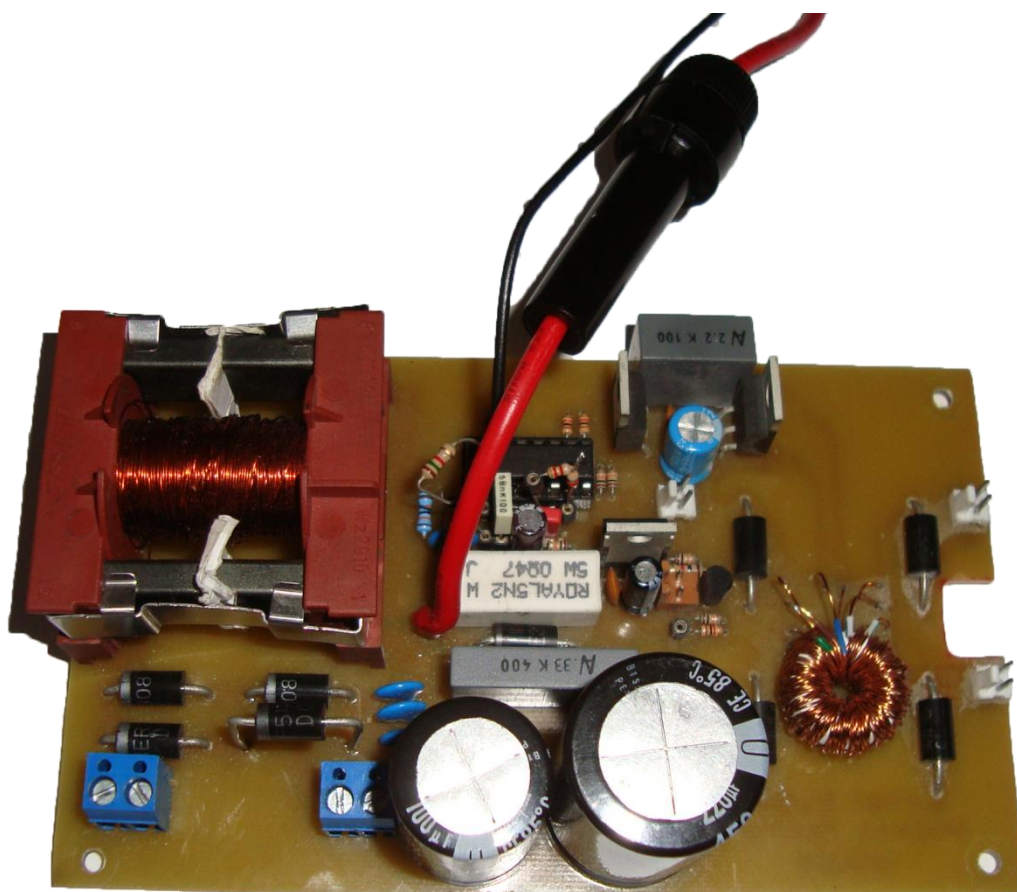
$$P_{dyn} = \frac{U_{DS}}{2} \cdot \frac{I_{DS}}{2} \cdot (t_r + t_f) \cdot f = \frac{15}{2} \cdot \frac{40}{2} \cdot (120 + 20) \cdot 10^{-9} \cdot 40000 = 0,84W \quad (3.14)$$

Hodnota dynamických ztrát se však v praxi značně liší. Velký vliv na dobu zapínání a vypínání má odpor u G, kapacita G a určitý vliv má i délka vodičů ke G. Pro správné určení ztrát je vhodné použít osciloskop pro odměření těchto dob. Z naměřených hodnot vychází hodnota dynamických ztrát 4,20W na jednom tranzistoru a tedy 8,40W na úhlopříčce [1], [5].

Na dynamických ztrátách se také podílí nabíjení parazitní kapacity na G, kdy při sepnutí tranzistoru se kapacita nabíjí a při vypnutí naopak vybíjí. Ztráty jsou však tak malé, že jsou obvykle ve výpočtech zanedbatelné.

### 3.2 Blok řízení DC-DC

Blok řízení DC-DC je pokračováním silového bloku DC-DC. Přes svorky JP4, JP5 a JP6, JP7 je sekundár transformátoru ze silového bloku DC-DC připojen k bloku řízení DC-DC. Napětí na sekundáru transformátoru je usměrněno a vyhlazeno pomocí LC filtru. Napětí za LC filtrem je vedeno na výstupní svorky JP22 a JP23. Zároveň přes odporový dělič zavedeno do řídicího obvodu TL494 [9]. Touto zpětnou vazbou jsou generovány budicí signály, které přes budič TC4422 a GDT budí výkonové tranzistory v můstku silového bloku. Frekvence budicích signálu je 40kHz. Hodnota časovacího odporu a kondenzátoru je určena ze vztahu (3.16). Blok řízení DC-DC je napájen z bloku zdroje 12VDC a je aktivován pomocí signálu POVOLENI. Schéma bloku řízení DC-DC je k dispozici ve volné příloze a v příloze B.



Obr. 3.5 Fotografie bloku řízení DC-DC

### 3.2.1 Popis řídicího obvodu TL494

Jako řídicí prvek byl zvolen integrovaný obvod TL494. Jedná se o řídicí obvod s dvojitým výstupem, který je modulován pulsně - šířkovou modulací (PWM). Frekvence modulace je nastavitelná pomocí časovacího odporu a kondenzátoru vně obvodu na pinech 5,6. Spínací frekvenci lze určit ze vztahů:

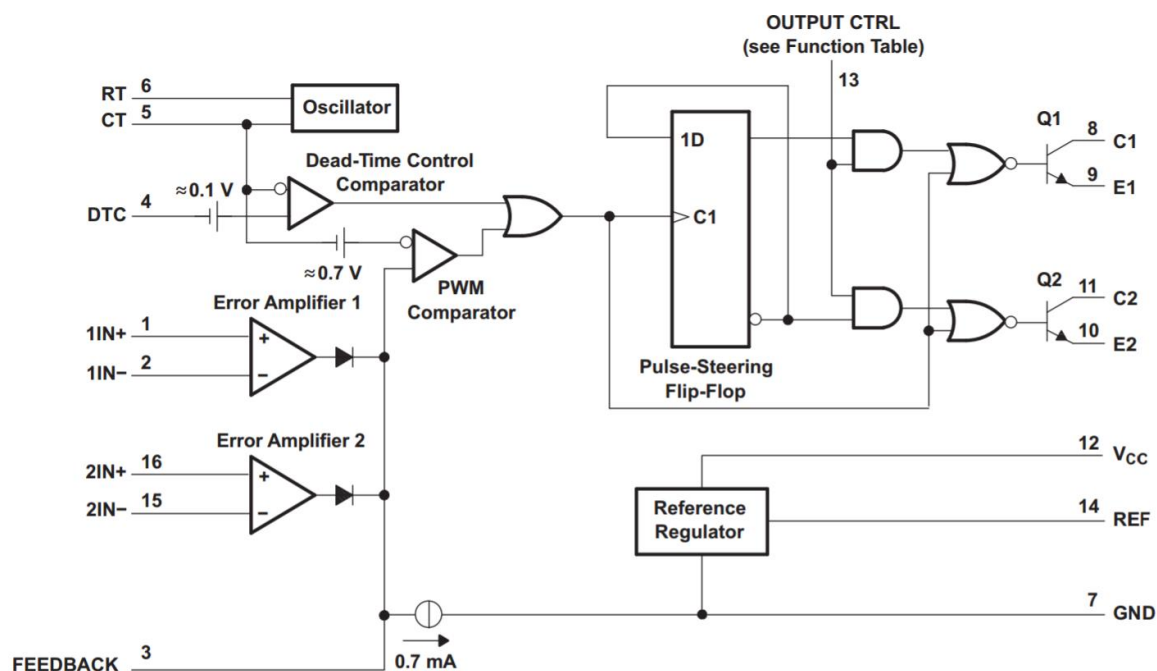
$$f = \frac{1}{R_t \cdot C_t} \quad (3.15)$$

Pro jednočinný výstup.

$$f = \frac{1}{2 \cdot R_t \cdot C_t} \quad (3.16)$$

Pro dvojitý výstup.

Obvod obsahuje dva chybové zesilovače, jejichž vstupy přístupné na pinech 1, 2 a 15, 16. Tyto vstupy slouží obvykle pro snímání napětí a proudu. Výstup chybových zesilovačů je přístupný na pinu 3 a slouží pro nastavení řídicí zpětné vazby. Pin 12 slouží jako zdroj poměrně stabilních 5V pro napájení řídicí logiky. Pin 13 slouží pro konfiguraci výstupních budičů. Pokud bude spojen se zemí, obvod bude pracovat jednočinně (oba tranzistory budou spínat současně). Pokud bude spojen s vývodem 12, bude obvod pracovat dvojitě (tranzistory budou spínat v protifázi). Deadtime je při spojení pinu 4 se zemí nastaven na zhruba 5% z doby periody. Deadtime lze zvyšovat zvyšováním napětí na pin 4 v rozsahu 0 - 3V. Oba tranzistory jsou dostupné na vývodech 8,9 a 10,11 pro různé konfigurace [3]. [9].



Obr. 3.6 Blokové schéma TL494. Převzato z [9]

### 3.2.2 Návrh filtrační tlumivky

Filtrační tlumivka slouží pro vyhlazení proudu. Ze vztahu (3.4) lze vyjádřit potřebnou velikost indukčnosti.

$$L = \frac{0,5 \cdot (U_{Lmax} - U_{OUT})}{\Delta I_L} = \frac{0,5 \cdot (U_{INMAX} \cdot \frac{N_2}{N_1} - U_{OUT})}{\Delta I_L} = \frac{0,5}{80000} \cdot (15 \cdot \frac{82}{2} - 330) = 2,87mH \quad (3.17)$$

Kde  $\Delta t$  je čas, po který tlumivka dodává proud. Při střídě 0,5 je největší proudové zvlnění.  $\Delta I_L$  udává maximální zvlnění proudu tohoto proudu, v tomto případě 30%.

Bylo zvoleno feritové jádro materiálu 3c90 se značením ETD39. Potřebný počet závitů lze určit ze vztahu:

$$N = \frac{L \cdot I_m}{B_m \cdot S} = \frac{2,87 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3}{0,2 \cdot 125 \cdot 10^{-3}} = 150z \quad (3.18)$$

$I_m$  byl zvolen jako 1,30A, tato hodnota odpovídá maximálnímu odebíranému výkonu 300W.

Z následujícího vztahu je určena velikost vzduchové mezery

$$l_{\delta} = \frac{N^2}{L} \cdot \mu_0 \cdot S = \frac{150^2}{2,87 \cdot 10^{-3}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 125 \cdot 10^{-3} = 1,23\text{mm} \quad (3.19)$$

Velikost mezery je 1,23mm. Při použití EE jádra je tedy mezera  $3 \cdot 0,41\text{mm}$

Po aplikaci vzorců (3.8) – (3.12) byl stanoven maximální průměr vodiče s ohledem na skinefekt 0,53mm. Je použit vodič o průměru 0,3mm. Délka vodiče je 10m.  $I_{\max}=1,3\text{A}$  s maximálními dovolenými ztrátami na sekundárním vinutí  $P = 1\text{W}$  Při zachování proudové hustoty 3,60 A/mm vychází 5 vodičů ve svazku [1], [10].

### 3.2.3 Návrh filtračního kondenzátoru

Filtrační kondenzátor slouží pro vyhlazení napětí. Z následujícího vztahu lze vyjádřit po úpravě potřebnou kapacitu kondenzátoru.

$$i_{c(t)} = C \cdot \frac{d_{uc(t)}}{dt} \quad (3.20)$$

$$C = I_{OUT} \cdot \frac{\Delta t \cdot 0,4}{\Delta U_C} = 2 \cdot \frac{1}{80000} \cdot 0,4 = 100\mu\text{F} \quad (3.21)$$

$\Delta U_C$  udává velikost zvlnění napětí za kondenzátorem. Při vstupním napětí 15V bude mít napětí za usměřovacím můstkem při plném zatížení s ohledem na ztráty střidu přibližně 0,6. Doba, kdy se kondenzátor vybíjí je 0,4. Pro tento nejhorší případ je třeba navrhnout dostatečně velkou kapacitu.

Pro kombinaci této kapacity a filtrační indukčnosti spočítané ze vztahu (3.17) je nutné spočítat pomocí Thomsonova vztahu rezonanční frekvenci. Na frekvenci blízké rezonanční nelze tento filtr používat.

$$f_{rez} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L * C}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2,87 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} = 297\text{Hz} \quad (3.22)$$

Hodnota rezonanční frekvence je v pořádku.

V tomto měniči byla použita filtrační kapacita  $220\mu F$  paralelně se  $100\mu F$  a polypropylénovým, bezindukčním kondenzátorem  $0,33\mu F$ . Pro celkovou kapacitu  $330,33\mu F$  je rezonanční frekvence nižší. Dále je nutné zajistit, aby na kondenzátoru nebylo překračované maximální proudové a napěťové zatížení. Maximální napětí použitých kondenzátorů je 450V a proud přes 2A, tyto hodnoty jsou tedy dostatečné [1].

### 3.3 Blok plného můstku DC-AC

Blok plného můstku DC-AC je koncovým blokem jednofázového střídače a tvoří jej 4 tranzistory zapojené v můstku. Byly zvoleny následující tranzistory, jejichž nejdůležitější parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Symbol	Význam	Hodnota
$U_{DSmax}$	maximální napětí drain-source	500V
$I_{Dmax}$	maximální (stálý) proud drainem	14A
$R_{DSon}$	odpor v sepnutém stavu	0,38 $\Omega$
$t_r$	doba zapínání	16ns
$t_f$	doba vypínání	12ns

Tab. 3.2 Základní parametry tranzistoru STW14NK50Z

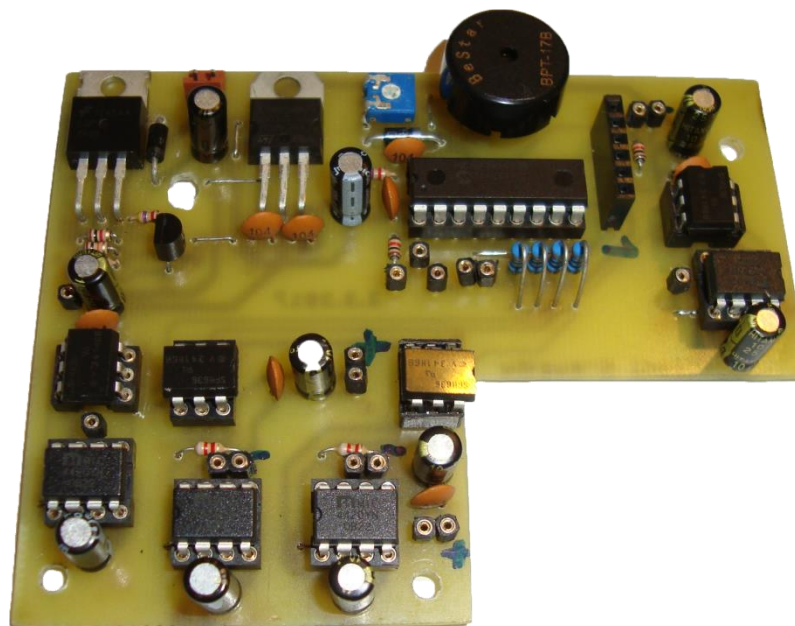
G jednotlivých tranzistorů jsou přístupné na konektorech. Blok obsahuje snímání proudu pomocí bočnicku a v případě zkratu i tlumivku, která zajistí neskokovou změnu proudu. Systém má dostatek času na vypnutí střídače a poté i celého měniče. Napětí na bočnicku je přístupné na svorce JP7. Na výstupní svorkovnici X2 je napětí 230VAC. Svorkovnice je propojená s domovní dvojzásuvkou. Schéma bloku plného můstku DC-AC je k dispozici ve volné příloze a v příloze C.



Obr. 3.7 Fotografie bloku plného můstku DC-AC

### 3.4 Blok řízení DC-AC

Blok řízení DC-AC je napájen z bloku zdroje 12VDC. Blok řízení DC-AC zajišťuje řídicí signály k G tranzistorů v bloku plného můstku DC-AC. Pulsy jsou takové, aby napětí na bloku plného můstku mělo průběh modifikované sinusoidy. Krátký popis tohoto typu střídače je v kapitole 2.2. Jako řídicí prvek byl zvolen mikropočítač PIC16F88. Řídicí signály jsou odděleny pomocí optočlenů SFH636 a posílení signálů obstarává budič MIC4420. Horní tranzistory jsou galvanicky oddělené pomocí dvou DC-DC měničů od firmy TRACO. Blok řízení DC-AC také obsahuje zvukovou signalizaci zapnutí. Svorka JP8 je vstupem pro sledování proudu pro ochranu proti přetížení/zkratu. Práh vypnutí měniče při přetížení lze nastavit trimrem R10. V případě přetížení/zkratu se rozepnou všechny tranzistory po dobu deadtime, a poté sepnou dva spodní. Zároveň je vyslána úroveň H na svorku JP4, do bloku spouštění na vstup signálu ochrany přetížení/zkrat, který celé zařízení vypne. Mechanismus vypínání je popsán v kapitole 3.6. Blok řízení DC-AC je aktivován pomocí signálu POVOLENI. Schéma bloku řízení DC-AC je k dispozici ve volné příloze a v příloze D



Obr. 3.8 Fotografie bloku řízení DC-AC

### 3.5 Blok zdroje 12VDC

Rozsah pracovního vstupního napětí na střídači je 10,5-15V. Z tohoto důvodu je vhodné řídicí elektroniku, ventilátor, atd. napájet zdrojem konstantního napětí, v tomto případě 12V. Je nutné použít topologii, která umožňuje jak zvyšování, tak i snižování napětí. K tomuto účelu se hodí například topologie SEPIC (Single-ended primary-inductor converter). Jedná se o topologii bez galvanického oddělení využívající tlumivku se dvěma vinutími. Topologie je výhodná i z hlediska elektromagnetického vyzařování, které je minimalizované. Další, značnou výhodou je pohlcování napěťových špiček při zavírání tranzistoru kondenzátorem C7. Lze tedy volit tranzistor s menším maximálním napětím na D-S a tím zlepšit ostatní parametry tranzistoru. Jako řídicí prvek byl zvolen integrovaný obvod UC3843. Zdroj je možné zatížit proudem až 1,5A a obsahuje ochranu proti přetížení/zkratu. Napětí je nastavitelné pomocí trimru R3. Blok zdroje 12VDC je aktivován pomocí signálu POVOLENI a má vstup pro budoucí signál POVOLENI 2, který také aktivuje tento zdroj. Signál POVOLENI 2 vyše elektronika řízení ventilátoru v případě, kdy teplota měniče vzrostla nad kritickou mez. V případě, že elektronika vyše signál POVOLENI 2, blok zdroje 12VDC je aktivní i když je již neaktivní signál POVOLENI



(střídač je vypnut) a zajistí cirkulaci vzduchu i po vypnutí střídače. Schéma bloku zdroje 12VDC je k dispozici ve volné příloze a v příloze E.



Obr. 3.9 Fotografie bloku zdroje 12VDC

### 3.6 Blok spouštění

Blok spouštění je napájen pomocí dvou tenkých vodičů, omotaných okolo dvou hlavních silových vodičů. Oddělením od silové části se získává daleko přesnější informace o stavu napětí napájecího zdroje. Neuplatňují se totiž úbytky napětí na silovém vodiči, které při vzrůstajícím proudu vodičem rostou. Blok spouštění generuje signál POVOLENI pro většinu bloků, který určuje, zda je střídač zapnut (úroveň H) či vypnut (úroveň L).

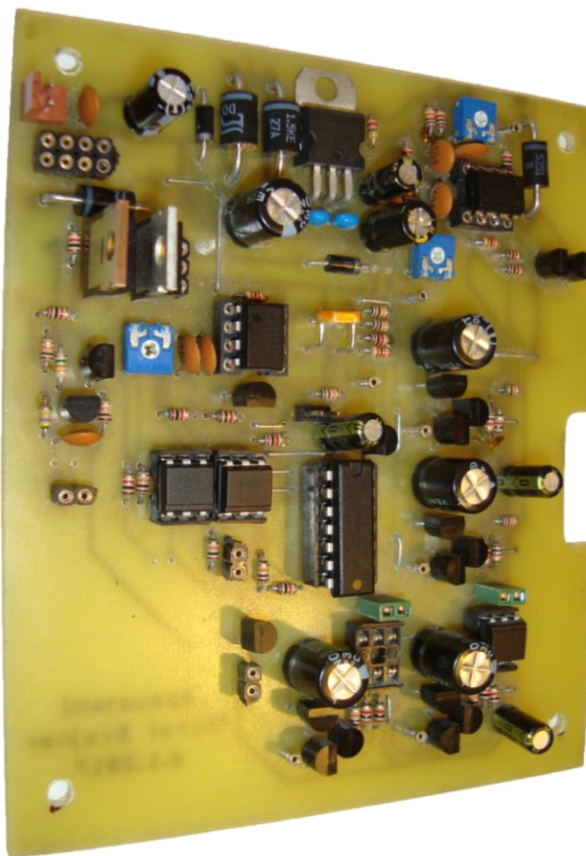
IC3 je logický člen AND se sedmi vstupy, do těchto vstupů jsou zavedeny chybové signály. Pokud je všech 7 chybových signálů úrovně H, na výstupu se objeví také úroveň H a je možné stisknutím tlačítka START připojeného ke konektoru JP16 uvést signál POVOLENI do úrovně H a opětovným stiskem do úrovně L a tímto celý střídač vypínat/zapínat. Pokud je ovšem některý z chybových signálů v úrovni L tak i signál POVOLENI je v úrovni L (funkce AND) a to i po opakovaném stisku tlačítka START.

Před čtyřmi vstupy ANDu jsou obvody, které zajišťují v případě chybového signálu (úroveň L) udržení úrovně L i po jeho odeznění. Tyto chybové signály jsou indikovány pomocí LED a jsou generovány ochranami proti nízkému napájecímu napětí, vysokému napájecímu napětí, přetížení/zkratu a proti překročení kritické teploty. Zároveň pokud není

aktivní ochrana proti nízkému a vysokému napájecímu napětí, je signál MUSTEK v úrovni H. Vstup pro tento signál je na silovém bloku DC-DC. Ochrana proti vysokému napájecímu napětí se aktivuje, když napájecí napětí zdroje přesáhne 15V. Ochrana proti nízkému napájecímu napětí se aktivuje, když napájecí napětí klesne pod 10,5V.

V případě aktivace některého ze čtyř chybových signálů se tedy signál POVOLENI uvede do úrovně L a rozsvítí se příslušná indikační LED. Tento stav přetrvává až do stisku tlačítka RESET, připojeného ke konektoru JP11. Stisk tlačítka RESET resetuje obvod, který udržuje úroveň L i po odeznění chyby. Zároveň po dobu stisku tlačítka RESET je na pátém vstupu ANDu úroveň L, aby nebylo možné uvést signál POVOLENI do úrovně H a tím střídač zapnout.

Šestým vstupem do ANDu je detekce nabití kapacity silového bloku DC-DC. Úroveň H se objeví tehdy, kdy na kapacitě je napětí o 1V menší oproti vstupnímu napětí. Na sedmém vstupu ANDu je připojen obvod, který monitoruje intenzitu osvětlení. Když na fotoodpor dopadá světlo, na vstupu ANDu je úroveň L. Naopak když je fotoodpor ve tmě, je na vstupu ANDu úroveň H. Střídač se nespustí, když je odkrytovaný. Tuto ochranu lze deaktivovat rozpojením svorky JP9. Schéma bloku spouštění je k dispozici ve volné příloze a v příloze F.



Obr. 3.10 Fotografie bloku spouštění

### 3.7 Blok indikátoru stavu napětí baterie

Blok indikátoru stavu napětí baterie je napájen stejným systémem, jako blok spouštění. Jako řídicí obvod byl zvolen LM3914. Tento jednoduchý obvod snímá napětí akumulátoru a stav napětí je indikován sloupcem deseti LED. Rozsah indikace je nastavitelný. Obvod obsahuje funkci pro přepínání pásového/bodového režimu. Blok indikátoru stavu napětí baterie je aktivován pomocí signálu POVOLENI. Schéma bloku indikátoru stavu napětí baterie je k dispozici ve volné příloze a v příloze G.



Obr. 3.11 Fotografie bloku indikátoru stavu napětí baterie

### 3.8 DPS čelního panelu

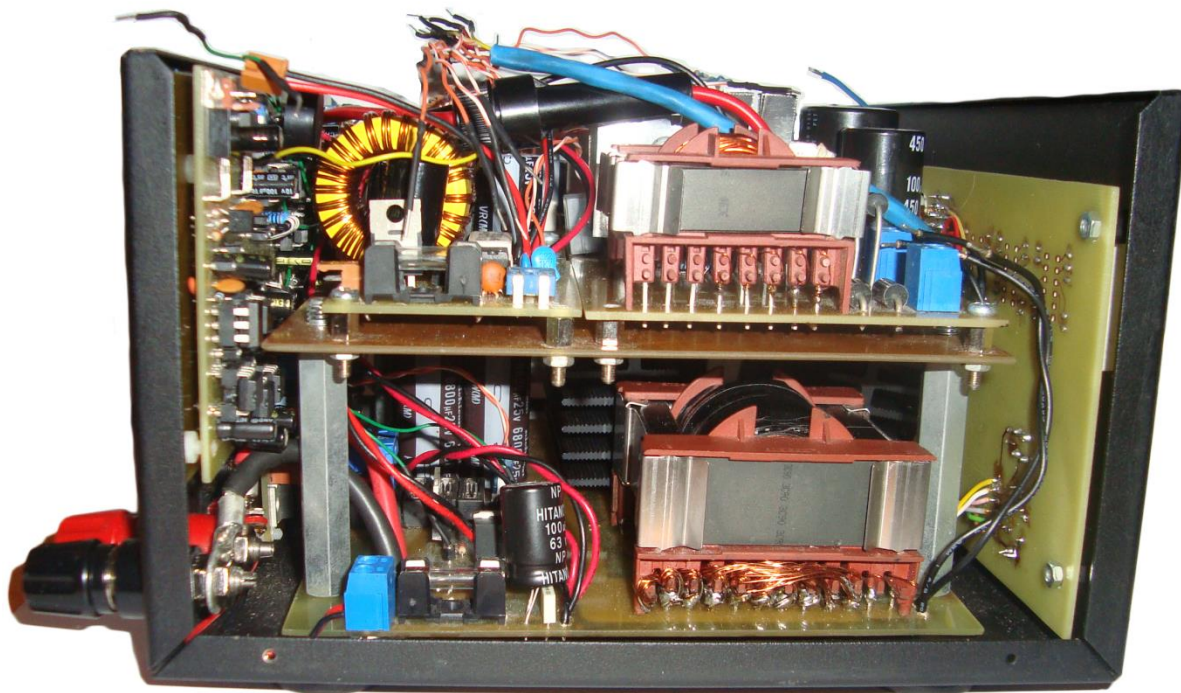
Poslední a zároveň nejjednodušší je DPS čelního panelu. Na této DPS jsou umístěny ovládací prvky, 6x LED, sloupec 10x led pro indikaci stavu napětí akumulátoru, předřadné odpory k LED a LED displej, který bude sloužit pro zobrazení odebíraného výkonu z měniče ve wattech. Všechny tyto prvky jsou propojeny pomocí kabeláže k příslušným řídicím DPS.



Obr. 3.12 Fotografie DPS čelního panelu

## 4 Umístění zařízení

Jednofázový střídač 12VDC/230VAC, 50Hz je umístěn v krabici z ocelového plechu 230x120x200mm. Na dně krabice je umístěn silový blok DC-DC. Nad ním je pomocí distančních sloupků 60mm umístěna stínící DPS. Nad stínící DPS jsou pomocí distančních sloupků 5mm umístěny bloky řízení DC-DC, zdroje 12VDC, plovoucího zdroje 2x 12VDC a plného můstku DC-AC. Na zadní straně krabice je umístěna nosná DPS, na které jsou umístěny bloky řízení DC-AC, spouštění a indikátoru stavu napětí baterie. Dále jsou na zadní straně vyvedeny konektory pro napájení zařízení. Na čelní straně krabice jsou vytvořeny otvory pro prvky na DPS čelního panelu, která je k čelní straně krabice přišroubovaná. Dále je na čelní straně vytvořen otvor pro domovní dvojjásuvku.



Obr. 4.1 Fotografie umístěného, nezkompletovaného zařízení

## 5 Měření, testování zařízení

### 5.1 Funkčnost zařízení

Kromě silového bloku byly všechny bloky navrhované na kontaktním poli. Z tohoto důvodu výsledné DPS po zhotovení nebylo nutné většinou dále upravovat.

Při odpojování a připojování zejména indukčních zátěží byly naměřené napěťové špičky, které prorážely tranzistory v silovém bloku DC-DC. Bylo nutné mezi D-S tranzistorů zařadit ochranné RC články se kterými se bohužel při návrhu DPS nepočítalo, avšak podařilo se všechny potřebné prvky umístit.

Dále byl problém s buzením spodních tranzistorů v bloku plného můstku DC-AC, které bylo nevhodně navrženo a při napětí nad 160V se tyto tranzistory přiotevíraly v době, kdy měly být vypnuté. Tato chyba se částečně podařila odstranit.

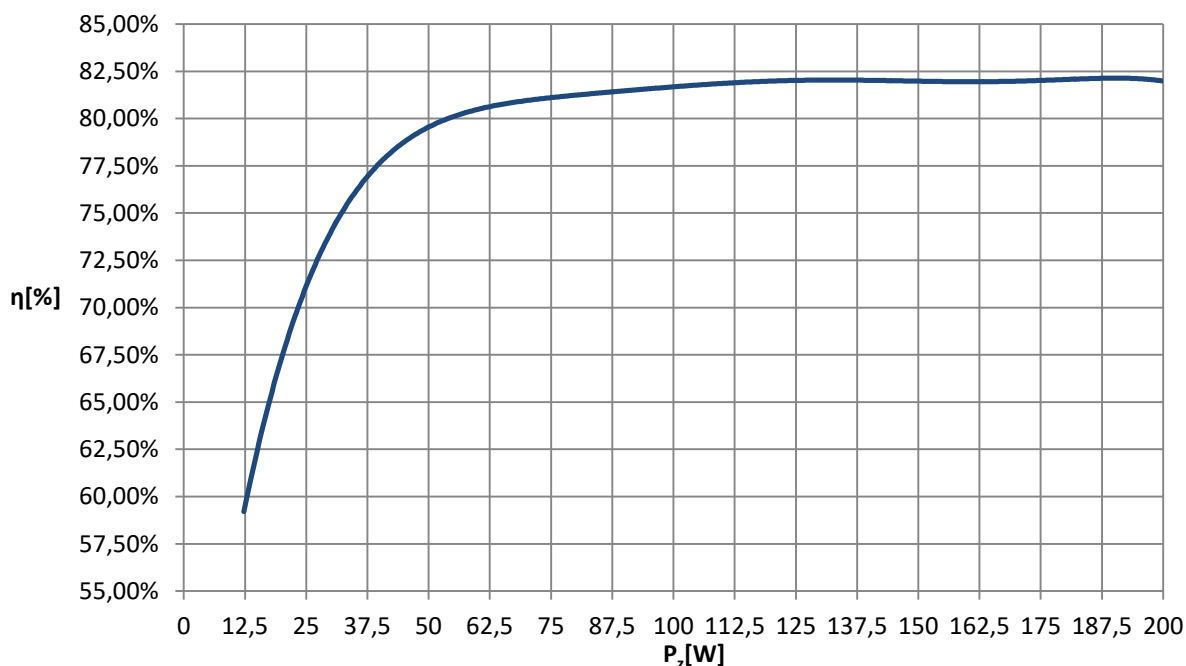
Posledním, zatím se vyskytujícím problémem je prorážení usměrňovacího můstku v bloku řízení DC-DC v důsledku napěťových špiček. Problém lze vyřešit větším napěťovým naddimenzováním diod, nebo vřazením dalšího RC ochranného článku. Tento problém se vyskytuje jen při odpojování větších indukčních zátěží.

Nucené chlazení je řešeno dvěma chladiči SK514-100SA s tepelným odporem 3K/W a ventilátorem 92x92x25mm. Chlazení je dostačující, při příkonu zdroje 240W vzrostla teplota na chladiči zhruba jen o 10°C při minimálním průtoku vzduchu.

Ochrany proti přepětí, podpětí a přetížení pracují správně. Ochrana proti zkratu zatím nebyla otestována, nicméně by měla také pracovat bez větších problémů. Tepelná ochrana zatím není zavedena, avšak je již sestavený prototyp řídicí desky ventilátoru. Při zapnutí měniče se zapne ventilátor na 20% otáčky, které jsou dostačující. Dále se otáčky neregulují.

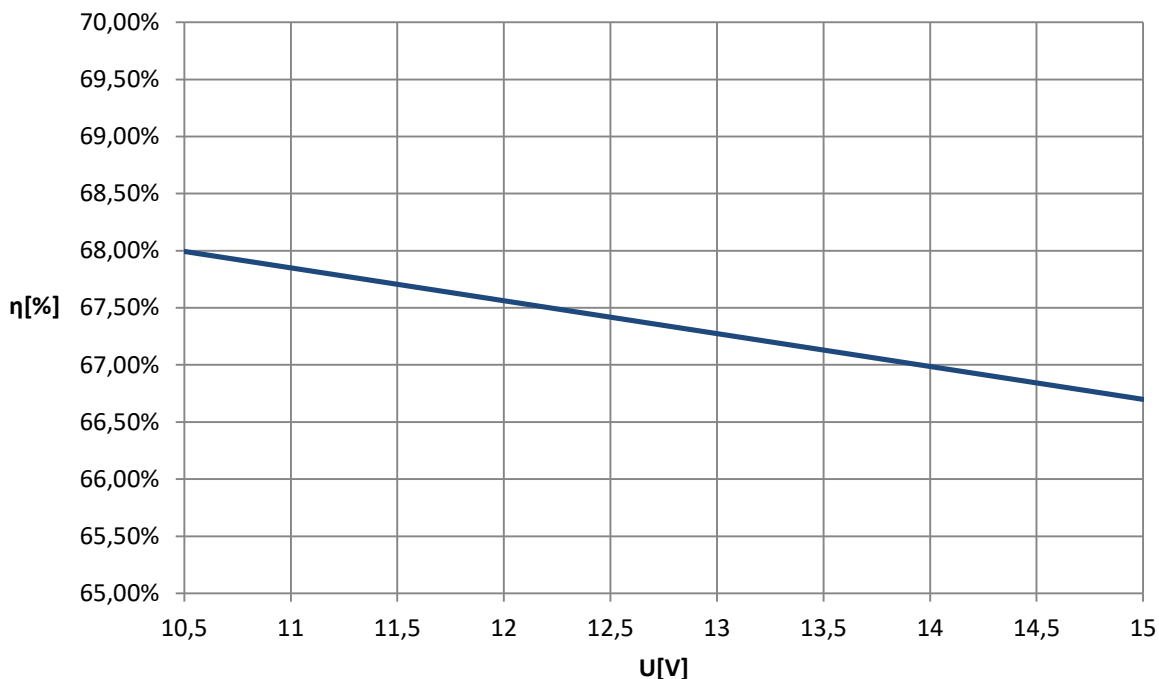
## 5.2 Účinnost zařízení

Účinnost zařízení vyjadřuje následující graf:



Obr. 5.1 Graf účinnosti v závislosti na odebraném výkonu při napětí 12,2V

Maximální odměřená zátěž je 200W. V naměřeném rozsahu zátěží je vstupní napětí 12,2V. Napětí na výstupu jednofázového střídače 235VAC. Nárůst účinnosti v oblasti 0 - 75W je způsoben vlastní spotřebou měniče. Vlastní spotřeba je konstantní a je tedy při větších zátěžích méně znatelná. Příkon zařízení ve stavu naprázdno je 4,88W.

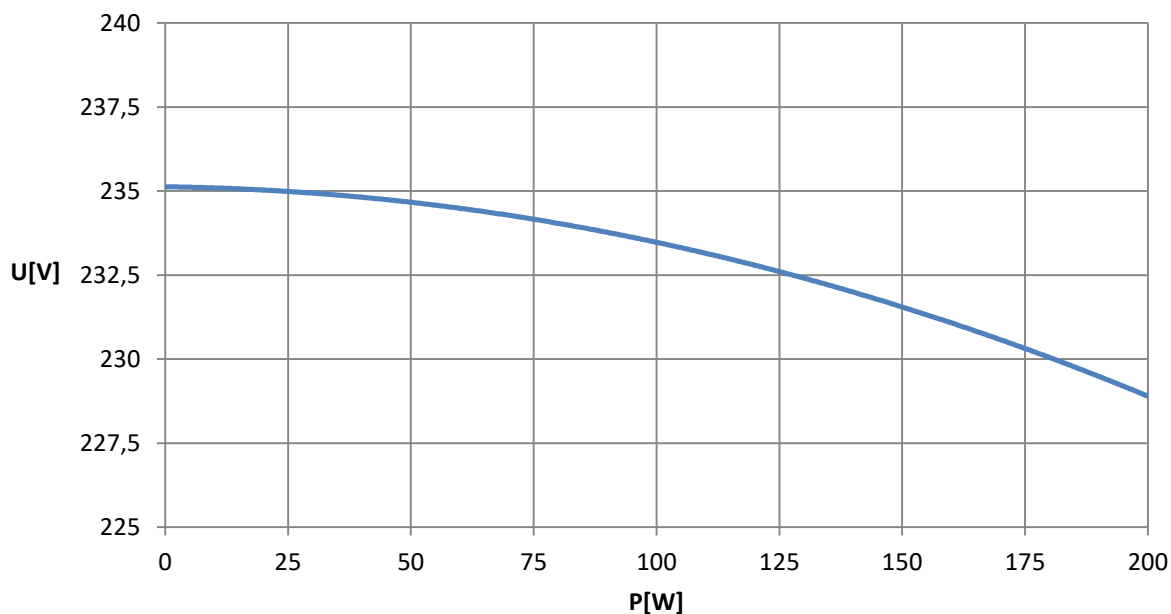


Obr. 5.2 Graf účinnosti v závislosti na vstupním napětí při zátěži 20W

V grafu na Obr. 5.2 je zobrazena účinnost zařízení při zatěžovacím výkonu 20W, v rozsahu napájecího napětí 10,5 – 15VDC. Pokles účinnosti je dán skutečností, že při vyšším napájecím napětí je střída spínání tranzistorů v silovém bloku DC-DC menší. Je nutné dodat větší proudy za kratší čas, než je tomu u nižšího napájecího napětí, kde je větší střída. Delší puls o menším proudu vyvolá na tranzistorech menší ztráty, než kratší puls o vyšším proudu. Je nutné poznamenat, že ztráty se neprojevují pouze u tranzistorů, vyšší proud v kratším intervalu teče i transformátorem, dále LC filtrem což vyvolává také ztráty.

### 5.3 Stabilita výstupního napájecího napětí

O stabilitě jednofázového střídače jasně hovoří následující graf:



Obr. 5.3 Graf stability výstupního napětí v závislosti na odebíraném výkonu při vstupním napětí 10,8V

Minimální vstupní napětí jednofázového střídače je 10,5V. V době měření nebyl k dispozici zdroj, který by dodal 10,5V při proudu přes 20A. Byl zvolen zdroj o 0,3V vyšší, což ale také dává téměř přesnou představu o stabilitě výstupního napětí při minimálním vstupním napětí. Při testování byly v DC-AC části použity tranzistory s odporem  $R_{DSon} = 4\Omega$ . Tranzistory jsou v můstku, celkový odpor je tedy  $8\Omega$ . Při procházejícím proudu 0,87A, což je proud při zatížení 200W vychází úbytek napětí na tranzistorech 6,96V. Hodnoty úbytků napětí pro různé protékající proudy odpovídají poklesům napětí viditelné v grafu. Lze předpokládat, že při použití lepších tranzistorů s menším  $R_{DSon}$  bude stabilita vysoká. Dalším důkazem že tranzistory způsobují pokles stability je napětí na DC-DC části. Napětí je pro různé zátěže stabilních 335V.



## 5.4 Možnosti zlepšení

Účinnost zařízení by jistě vzrostla použitím topologie push-pull, která má poloviční spínací ztráty oproti plnému můstku, ovšem za cenu vyššího napětového namáhání tranzistorů. Přepětové špičky by se musely vhodně filtrovat a bylo by třeba zajistit co nejsymetričtější návrh transformátoru spolu s DPS. Na začátku tohoto projektu byla tato topologie zvolena ale následně po testování zavrhnuta. Změnou topologie by došlo ke zlepšení účinnosti.

K určitému zlepšení účinnosti by došlo při použití lepších spínacích prvků, zejména již zmíněných tranzistorů v DC-AC části, kde by i mimo jiné došlo ke zlepšení stability.

Další, menší zlepšení by zajistilo řízení mikroprocesorem, namísto řady řídicích integrovaných obvodů pro řízení měniče, zajištění ochran měniče, atd. Buzení tranzistorů v bloku plného můstku DC-AC je řešeno pomocí optočlenů a galvanicky oddělovujících zdrojů. Při použití specializovaných integrovaných obvodů pro buzení můstku by značně klesl vlastní odběr zařízení a to o cca 37%. Tato zlepšení by vedla ke znatelnému zlepšení účinnosti zejména v oblasti malých odebíraných výkonů a snížila by již zmíněný vlastní odběr zařízení.

## 6 Závěr

Navzdory složitosti celé konstrukce a problémům, popsaným v kapitole 5.1, se podařilo sestavit funkční jednofázový střídač 12VDC/230VAC, 50Hz s relativně vysokou účinností až 82%. Byla otestovaná maximální zátěž, s odebíraným výkonem 200 wattů. Větší zátěže otestovány nebyly, jelikož poblíž nebyl žádný zdroj, který by dodal proud větší než 20A. Jednofázový střídač poskytuje na svém výstupu poměrně stabilních 230VAC i při minimálním možném napájecím napětí. Střídač je možné zatížit teoreticky daleko vyšším výkonem. Vyšší odběr naprázdno (4,88W) je dán z velké části buzením tranzistorů jak u DC-DC strany tak u DC-AC strany, avšak je stále velmi malý oproti zdrojům téhož výkonu pracujících na 50Hz. Ochrany proti přepětí, podpětí a přetížení pracují bez problémů. Ochrana proti zkratu na výstupu nebyla otestována. Tepelná ochrana je zatím ve fázi vývoje. Ventilátor je při zapnutí provozován na 20% otáčky, což je dostačující při okolní teplotě 25°C. Ve volných a vázaných přílohách jsou umístěna kompletní schémata jednofázového střídače.



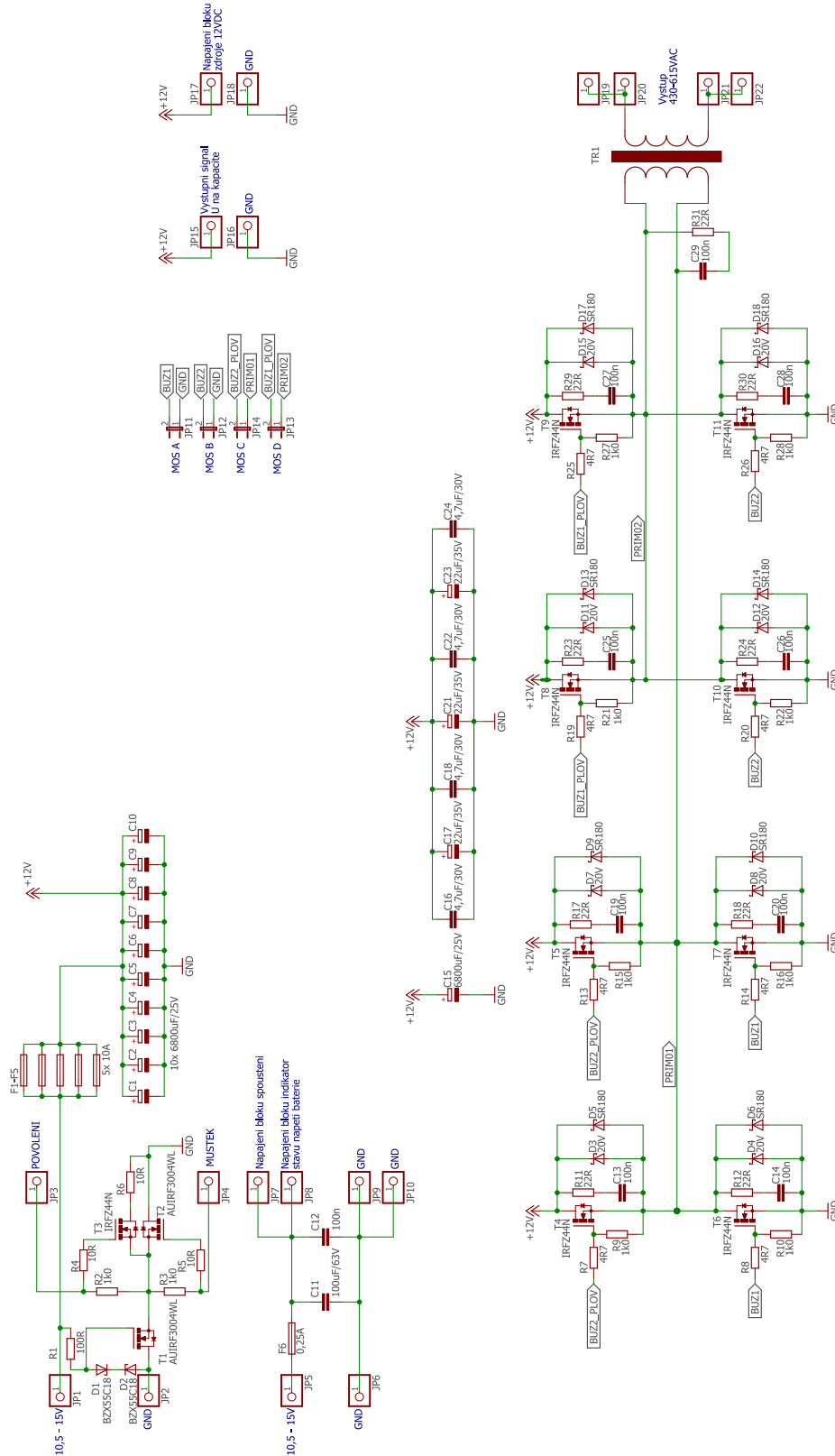
Obr. 6.1 Fotografie zkompletovaného zařízení

## 7 Zdroje

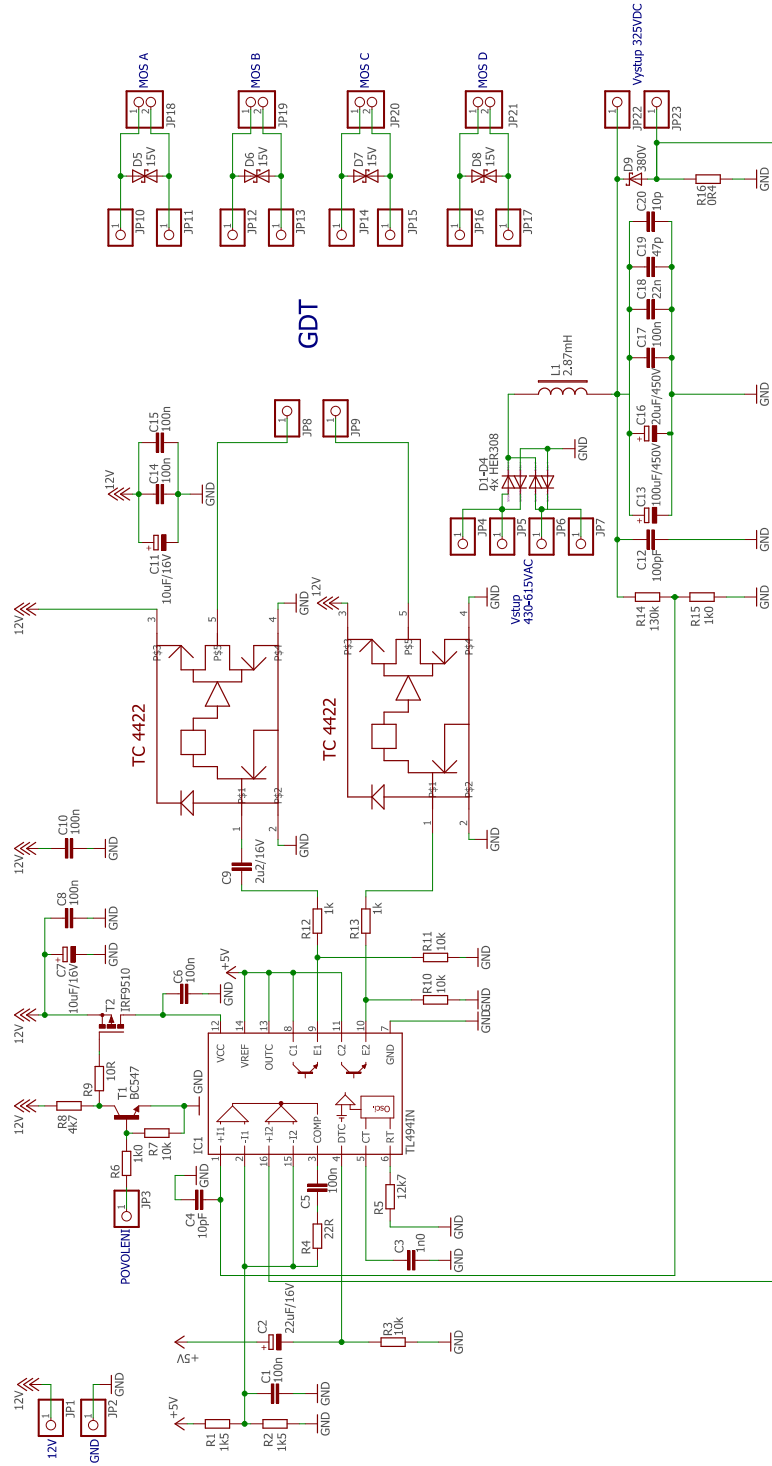
- [1] NOVOTNÝ, Vlastislav, Pavel VOREL a Miroslav PATOČKA. *Napájení elektronických zařízení: přednášky*. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2300-5
- [2] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 80-86056-02-3
- [3] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II*. Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 80-86056-03-1
- [4] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-411-5
- [5] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0
- [6] FERROXCUBE. *Material specification: 3C90*. 2008. Dostupné z: <http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/datasheet/3c90.pdf>
- [7] FERROXCUBE. *ETD cores and accessories: ETD54/28/19*. 2008. Dostupné z: <http://ferroxcube.home.pl/prod/assets/etd54.pdf>
- [8] INFINEON. *Datasheet IPP032N06N3 G*. 2009. Dostupné z: [http://www.infineon.com/dgdl/IPP032N06N3\\_Rev2.2.pdf?folderId=db3a304313b8b5a60113cee8763b02d7&fileId=db3a30432313ff5e01239f2567817160](http://www.infineon.com/dgdl/IPP032N06N3_Rev2.2.pdf?folderId=db3a304313b8b5a60113cee8763b02d7&fileId=db3a30432313ff5e01239f2567817160)
- [9] TEXAS INSTRUMENTS, *Datasheet TL494*. 2017. Dostupné z <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>
- [10] MICROMATERIALS, *Power conversion and line filter applications*. 2007. Dostupné z [http://www.micrometals.com/pcparts/pc\\_1.pdf](http://www.micrometals.com/pcparts/pc_1.pdf)
- [11] ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02193-9

# Přílohy:

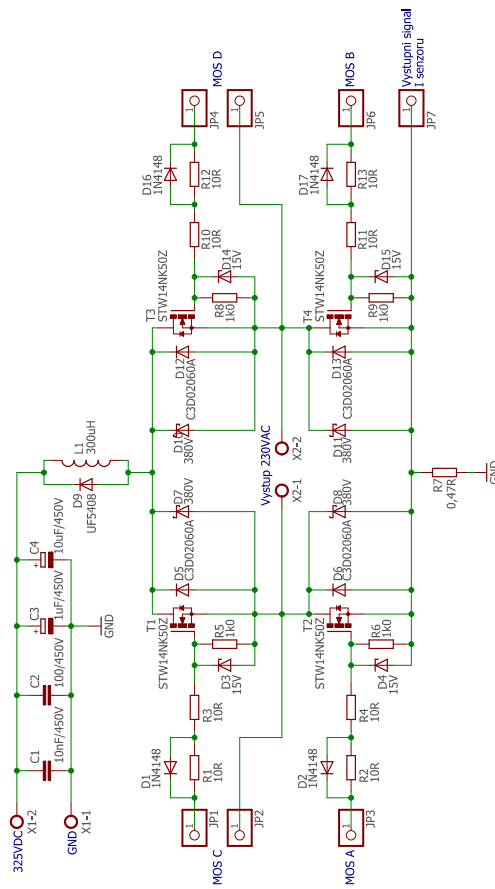
## Příloha A – Silový blok DC-DC



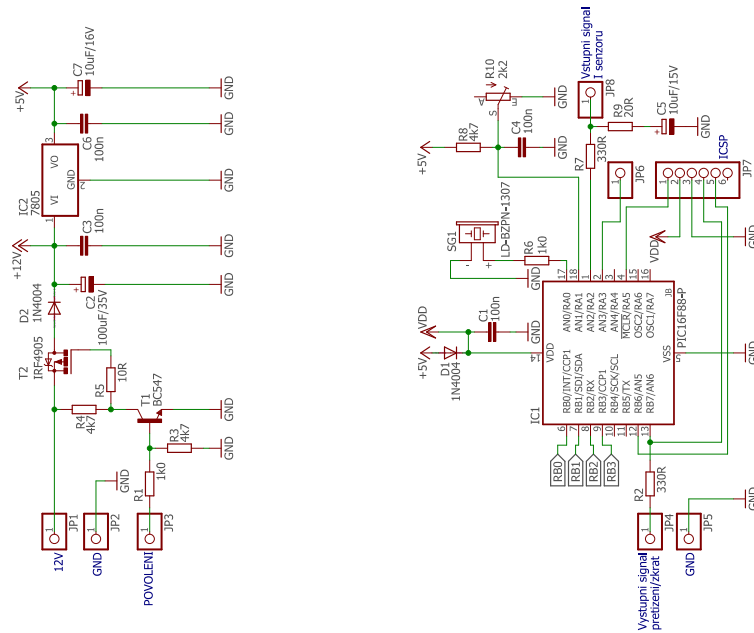
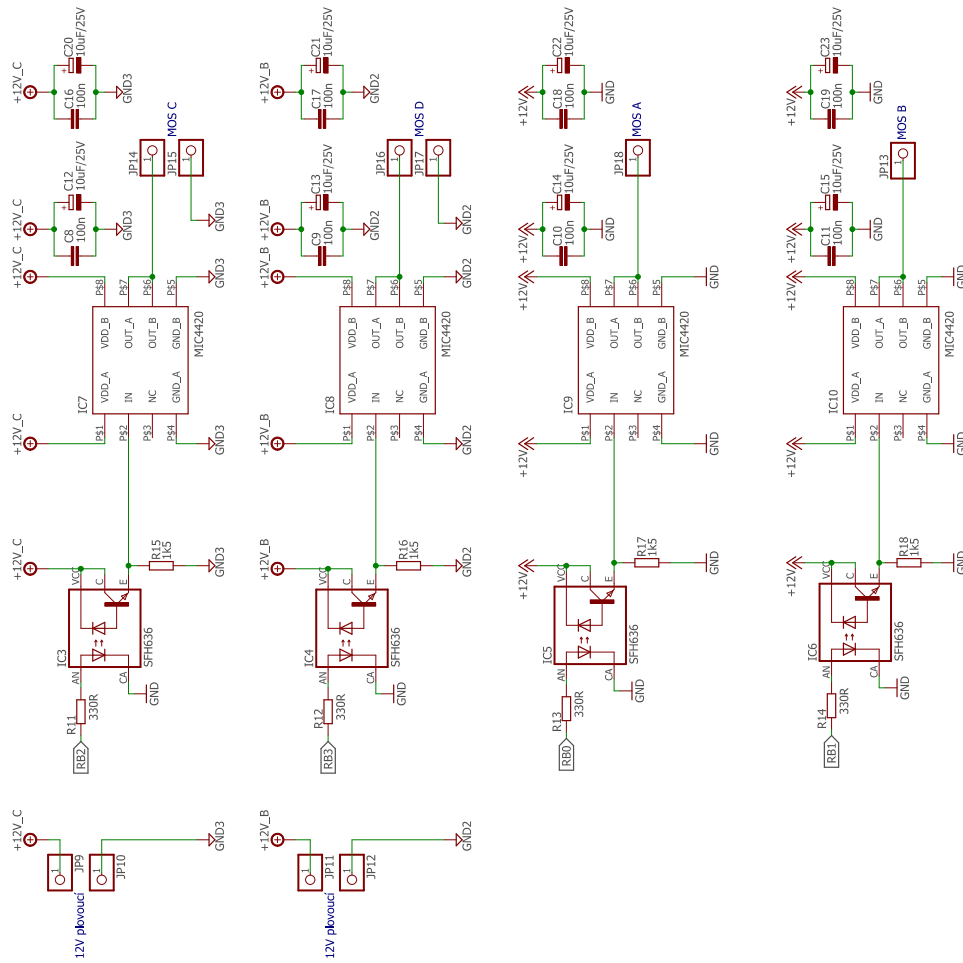
Příloha B – Blok řízení DC-DC



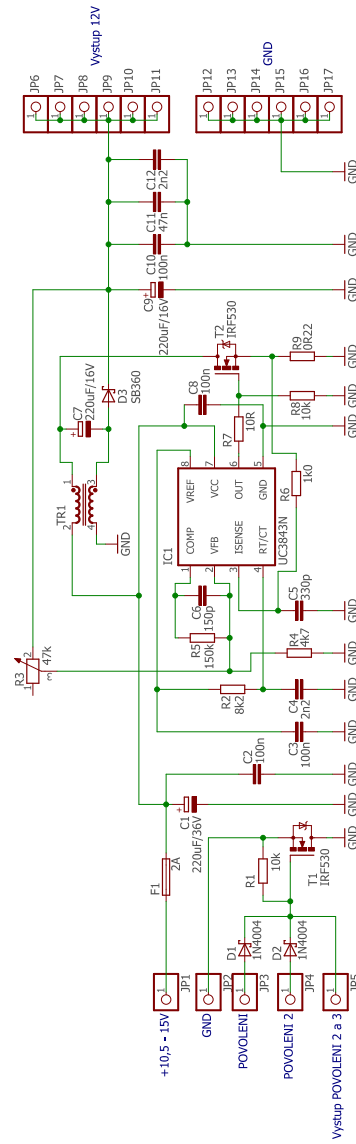
Příloha C – Blok plného můstku DC-AC



Příloha D – Blok řízení DC-AC

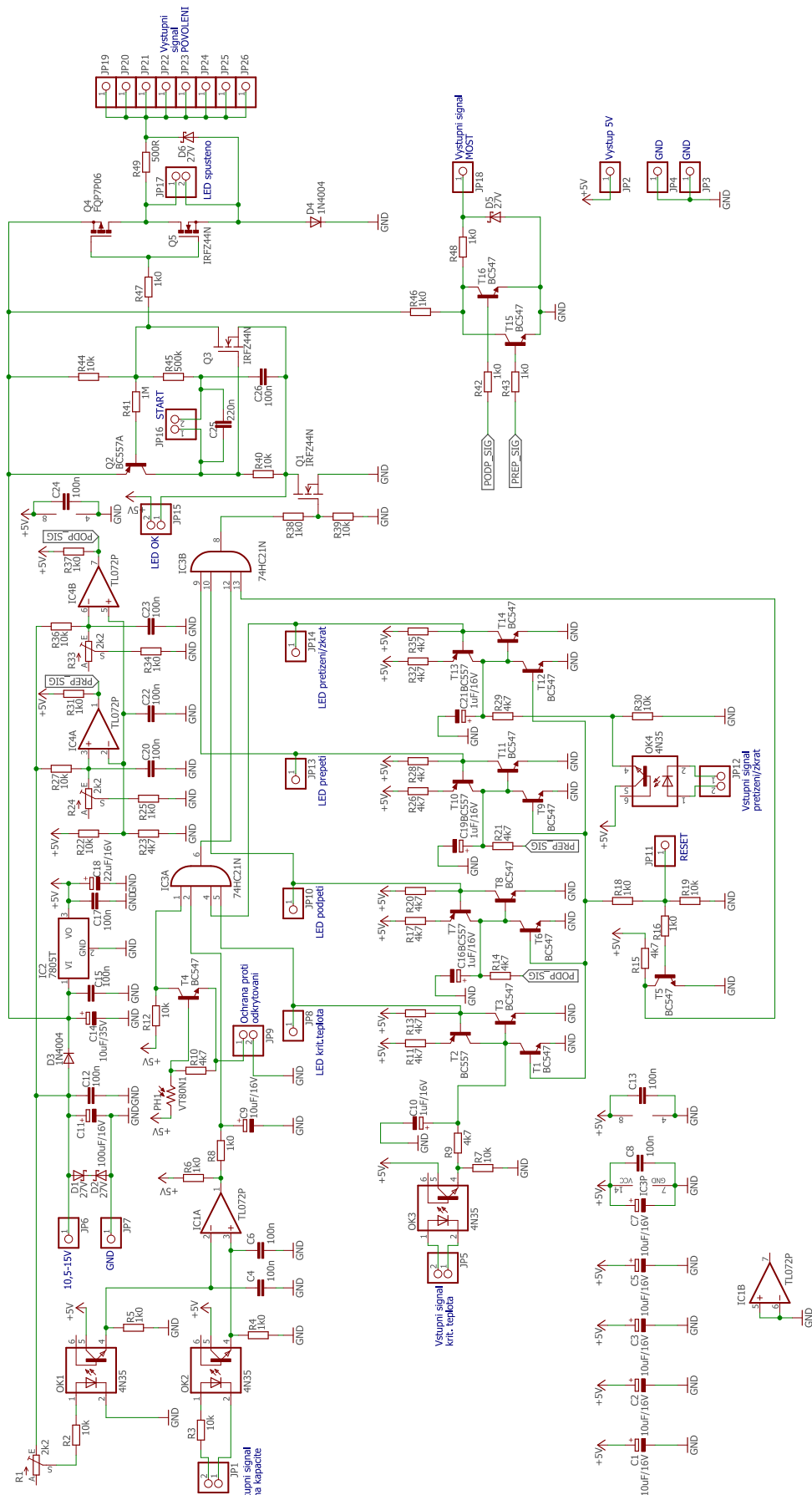


Příloha E – Blok zdroje 12VDC





Příloha F – Blok spouštění



Příloha G – Blok indikátoru stavu napětí baterie

