

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## RYCHLONABÍJEČ OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ 12 V

FAST-CHARGER FOR LEAD-ACID BATTERIES 12 V

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Kopuleť

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO 2019

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Ondřej Kopuleťý

**ID:** 170889

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Rychlonabíječ olověných akumulátorů 12 V

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Realizujte desky plošných spojů pro veškeré obvody nabíječe navržené v semestrálním projektu.
2. Zkompletujte čtyři kusy nabíječe s využitím stávajících skříněk, desek silových obvodů a nových řídicích a monitorovacích obvodů.
3. Oživte zkompletované nabíječe a proveďte sérii srovnávacích měření.
4. Vypracujte dokumentaci k realizovanému zapojení.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

1. Vorel, P., Patočka M.: Průmyslová elektronika. Skriptum FEKT VUT. 2007
2. Erickson, R.W., Maksimovic, D.: Fundamentals of Power Electronics. 2004
3. Bacha, S., Munteanu, I., Bratcu, A.I.: Power Electronic Converters Modeling and Control. 2014

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 22.5.2019

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá úpravou zapojení nabíječky olověných baterií. Změny jsou zejména provedeny na řídicí desce. V teoretické části je popsán princip nabíjení olověných baterií a popis základních typů měničů spínaných zdrojů. Dále je v práci je také uvedena dimenzace důležitých součástek v obvodu spolu s optimalizací spínací frekvence a parametrů vysokofrekvenčního transformátoru. V závěru práce je postup sestavení celé nabíječky.

## **Klíčová slova**

Nabíječka; olověný akumulátor; optimalizace impulsního transformátoru; dimenzace polovodičových součástek

## **Abstract**

This Master thesis deals with modification of lead battery charger connection. In particular, changes are made to the control board. The theoretical part describes the principle of charging lead batteries and the description of the basic types of switching power supplies. Furthermore, the dimensioning of important components in the circuit together with the optimization of the switching frequency and the parameters of the high-frequency transformer are also presented. At the end of the thesis is the procedure of assembling the whole charger.

## **Keywords**

Charger; lead-acid battery; impulse transformer optimization; dimensioning of semiconductor devices

## **Bibliografická citace:**

KOPULETÝ, Ondřej. Rychlonabíječ olověných akumulátorů 12 V [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113603>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Pavel Vorel.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Rychlonabíječ olověných akumulátorů 12 V jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **22. května 2019**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu semestrální práce doc. Ing. Pavlovi Vorlovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne: **22. května 2018**

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část.....</b>	<b>14</b>
2.1	Princip olověných nabíjení baterií.....	14
2.2	Spínané zdroje .....	16
2.2.1	Jednočinný propustný měnič .....	17
2.2.1.1	Zapojení se dvěma tranzistory .....	18
2.2.1.2	Zapojení s demagnetizačním vinutím .....	22
2.2.2	Jednočinný blokující měnič.....	23
2.2.3	Dvojjinný propustný měnič .....	23
<b>3</b>	<b>Optimalizace vysokofrekvenčního transformátoru .....</b>	<b>25</b>
3.1	Ztrátový výkon nabíječky (aktuální konfigurace).....	25
3.1.1	Ztráty v železe transformátoru .....	26
3.1.2	Joulové ztráty ve vinutí transformátoru .....	27
3.1.3	Přepínací ztráty tranzistorů .....	28
3.2	Změna spínací frekvence a počtu závitů vinutí.....	28
3.3	Změna spínací frekvence se zachováním plochy jádra transformátoru .....	32
3.4	Změna počtu závitů se zachováním spínací frekvence a ostatních parametrů transformátoru .....	34
3.5	Zhodnocení optimalizací .....	37
<b>4</b>	<b>Dimenzování výstupního LC-filtru .....</b>	<b>39</b>
4.1	Tlumivka .....	39
4.2	Kondenzátor .....	41
<b>5</b>	<b>Dimenzování polovodičových součástek .....</b>	<b>43</b>
5.1	Spínací tranzistory.....	43
5.2	Výkonové diody .....	44
<b>6</b>	<b>Dimenzování chladiče .....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>Hlavní deska .....</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>Řídicí deska.....</b>	<b>49</b>
8.1	Napájení řídicí desky.....	50
8.2	PI regulátor a tepelná ochrana .....	50

8.3	Měření výstupního proudu a napětí.....	51
8.4	Indikace nabití baterie .....	53
8.5	Ovládání ventilátorů .....	53
<b>9</b>	<b>Výroba.....</b>	<b>55</b>
9.1	Vinuté součástky .....	55
9.1.1	Výkonový transformátor TR1 a výstupní tlumivka .....	55
9.1.2	Proudový transformátor TR2 .....	56
9.1.3	Budící transformátor TR4 .....	57
9.1.4	Tlumivka L1 .....	57
9.2	Řídicí deska .....	58
9.3	Hlavní deska .....	58
9.3.1	Osazení hlavní desky.....	58
9.3.2	Úpravy na hlavní desce .....	60
9.4	Propojení desek .....	60
9.5	Sestavení nabíječky .....	61
<b>10</b>	<b>Oživování .....</b>	<b>65</b>
10.1	Komplikace při oživování .....	68
<b>11</b>	<b>Srovnávací měření.....</b>	<b>71</b>
<b>12</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>77</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>78</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk.....</b>	<b>79</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>82</b>



## Seznam obrázků

Obr. 2-1 Průběh napětí v čase při vybíjení a nabíjení olověného akumulátoru [3] ..	15
Obr. 2-2 Průběh napětí a proudu v čase při nabíjení konstantním napětím .....	16
Obr. 2-3 Pulzně šířková modulace .....	17
Obr. 2-4 Průběh magnetizačního proudu při střídě větší než 0,5 .....	18
Obr. 2-5 Zapojení jednočinného propustného měniče se dvěma tranzistory .....	19
Obr. 2-6 Průběhy veličin v jednočinném propustném měniči se dvěma tranzistory	21
Obr. 2-7 Zapojení jednočinného propustného měniče s demagnetizačním vinutím.	22
Obr. 2-8 Zapojení jednočinného blokujícího měniče .....	23
Obr. 2-9 Zapojení dvojčinného měniče (poloviční můstek) .....	24
Obr. 4-1 Zapojení výstupního LC filtru .....	39
Obr. 4-2 Průběh proudu a napětí na kondenzátoru .....	41
Obr. 6-1 Tepelné schéma chladiče a připojených součástek .....	46
Obr. 7-1 Schéma zapojení hlavní desky .....	48
Obr. 8-1 Schéma zapojení řídicí desky .....	49
Obr. 8-2 Schéma zapojení napájení řídicí desky .....	50
Obr. 8-3 Schéma zapojení PI regulátoru .....	50
Obr. 8-4 Schéma zapojení signalizace výstupního proudu a napětí .....	51
Obr. 8-5 Schéma zapojení indikace nabití baterie .....	53
Obr. 8-6 Schéma zapojení ovládání ventilátorů .....	53
Obr. 9-1 Výstupní tlumivka (vlevo), výkonový transformátor (uprostřed) a sestavení součástky (vpravo) .....	56
Obr. 9-2 Budicí (vlevo) a proudový (vpravo) transformátor .....	57
Obr. 9-3 Tlumivka L1 .....	58
Obr. 9-4 Výkres pro výrobu chladiče .....	59
Obr. 9-5 Naznačení vyfrézování hlavní desky pro bočník .....	60
Obr. 9-6 Propojky mimo desky .....	61
Obr. 9-7 Výkres pro výrobu .....	63
Obr. 10-1 Výstup z budičů .....	65
Obr. 10-2 Signál mezi drain a source při polovičním napájecím napětím .....	66
Obr. 10-3 Signál mezi drain a source při zatížení .....	66

Obr. 10-4 Zpožděné sepnutí napájení řídicí desky .....	68
Obr. 10-5 Zmenšování úbytku napětí na bočníku.....	69
Obr. 10-6 Zkrat na nulové diodě D1 .....	70
Obr. 11-1 Fotografie z termokamery po 15 minutách při nabíjecím proudu 15 A... 75	
Obr. 11-2 Detailní fotografie z termokamery po 15 minutách při nabíjecím proudu 15 A.....	75
Obr. 11-3 Detailní fotografie z termokamery po 5 minutách při nabíjecím proudu 50 A.....	76

## Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Požadované parametry obvodu nabíječky ovlivňující transformátor... 25	25
Tabulka 3-2 Parametry jádra transformátoru..... 26	26
Tabulka 3-3 Výsledky optimalizace transformátoru..... 31	31
Tabulka 3-4 Rozdělení ztrát v optimalizovaném transformátoru a v tranzistorech.. 32	32
Tabulka 3-5 Rozdělení ztrát v optimalizovaném transformátoru a v tranzistorech.. 34	34
Tabulka 3-6 Rozdělení ztrát v optimalizovaném transformátoru a v tranzistorech.. 37	37
Tabulka 3-7 Přehled ztrátových výkonu při jednotlivých optimalizacích ..... 37	37
Tabulka 5-1 Vybrané parametry tranzistoru FDH44N50 ..... 43	43
Tabulka 5-2 Vybrané parametry výkonových diod STTH6003CW TO – 247 ..... 44	44
Tabulka 6-1 Parametry tranzistorů a diod pro dimenzování chladiče ..... 46	46
Tabulka 8-1 Závislost počtu rozsvícených LED diod na výstupním proudu a napětí nabíječky..... 52	52
Tabulka 9-1 Navíjecí předpis pro výrobu transformátoru ..... 55	55
Tabulka 9-2 Navíjecí předpis pro výrobu výstupní tlumivky..... 55	55
Tabulka 9-3 Navíjecí předpis pro výrobu proudového transformátoru ..... 56	56
Tabulka 9-4 Navíjecí předpis pro výrobu budícího transformátoru ..... 57	57
Tabulka 9-5 Navíjecí předpis pro výrobu tlumivky L1 ..... 57	57
Tabulka 11-1 Nastavení proudových rozsahů nabíječky ..... 71	71
Tabulka 11-2 Zobrazování nabíjecího proudu bargrafem ..... 71	71
Tabulka 11-3 Zobrazování nabíjecího napětí bargrafem ..... 72	72
Tabulka 11-4 Účinnost nabíječka v závislosti na zátěži ..... 72	72
Tabulka 11-5 Zatěžovací charakteristika nabíječe..... 73	73

## Seznam grafů

Graf 3-1 Závislost měrných ztrát v železe transformátoru na spínací frekvenci a sycení .....	27
Graf 3-2 Celkové ztráty v závislosti napočtu závitů a frekvenci .....	31
Graf 3-3 Závislost celkového ztrátového výkonu na frekvenci .....	33
Graf 3-4 Závislost celkového ztrátového výkonu na počtu závitů primárního vinutí .....	36
Graf 11-1 Závislost účinnosti na zatížení nabíječky .....	73
Graf 11-2 Zatěžovací charakteristiky nabíječe .....	74

# 1 ÚVOD

Na UVEE byl rozpracován rychlonabíječ pro olověné akumulátory 12 V s maximální nabíjecím proudem 50 A. Tato diplomová práce se zabývá dokončením návrhu a následnou výrobou a oživením několika kusů nabíječek. Dokončení spočívá v úpravě zapojení některých částí obvodu, sestavení a oživení všech nabíječek.

V teoretické části je popsán princip nabíjení olověných akumulátorů. Nachází se zde také popis základních typů měničů pro spínané zdroje. Podrobněji je popsán jednočinný propustný měnič, který je použit v nabíječi.

Práce také obsahuje několik optimalizací vysokofrekvenčního transformátoru.

Podle požadovaných výstupních parametrů jsou výpočtem nadimenzovány hlavní součástky nabíječe, na které jsou kladeny vysoké požadavky (polovodičové součástky, výstupní LC filtr a chladič).

Podrobně je v práci popsán princip činnosti řídicích obvodů, jsou uvedeny navíjecí předpisy pro vinuté součástky a také je popsána výroba celé nabíječky.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

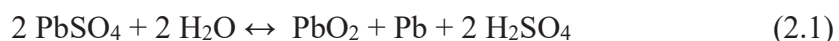
### 2.1 Princip olověných nabíjení baterií

Nabíjení je proces, při kterém dochází k obnově elektrického náboje v akumulátoru. Nabíječka je zařízení, které dodává proud akumulátoru. Tím se na elektrodách obrací průběh chemických reakcí, které probíhají při normálním provozu baterie.

Elektrolyt je tvořen 28-40% roztokem kyseliny sírové ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Ta se chemickou reakcí, která probíhá při vybití, separuje na síran olovnatý ( $\text{PbSO}_4$ ), ten se usazuje na elektrodách, a vodu ( $\text{H}_2\text{O}$ ), která snižuje hustotu elektrolytu.

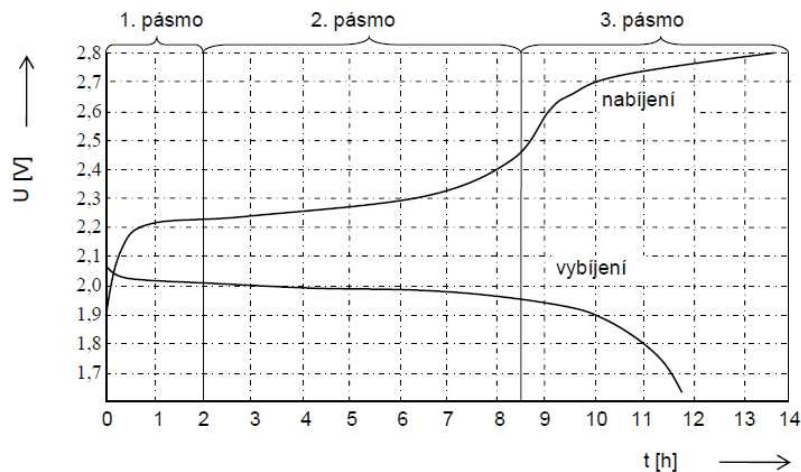
Při nabíjení dochází k opačné chemické reakci, kdy se rozkládá síran olovnatý, na kladné elektrodě vzniká oxid olovičitý ( $\text{PbO}_2$ ), na záporné vzniká olovo ( $\text{Pb}$ ), a v elektrolytu kyselina sírová, čímž stoupá jeho hustota.

Tyto dva procesy jsou popsány chemickou rovnicí (zprava doleva nabíjení a vybití naopak):



Průběh nabíjení lze rozdělit do tří pásem:

1. pásmo: dochází k tvorbě kyseliny v pórech elektrod, napětí se zvyšuje na 2,2 V/čl. z hodnoty, která je daná stavem baterie před připojením nabíječky. Hustota elektrolytu se zvyšuje na 1,15 g/cm<sup>3</sup>.
2. pásmo: dále probíhá přeměna síranu olovnatého, napětí stoupá na 2,45V/čl. a hustota elektrolytu se zvýší na 1,25 g/cm<sup>3</sup>.
3. pásmo: po dosažení napětí 2,45 V/čl. (tzv. plynovací napětí) se kromě síranu olovnatého začne rozkládat i voda, a to na kyslík a vodík. Toto se nazývá plynování akumulátoru. Při dosažení napětí 2,7-2,8 V/čl. je rozložen veškerý síran olovnatý a dále dochází jen k rychlejšímu rozkladu vody a intenzivnějšímu plynování [1].



**Obr. 2-1 Průběh napětí v čase při vybití a nabíjení olověného akumulátoru [3]**

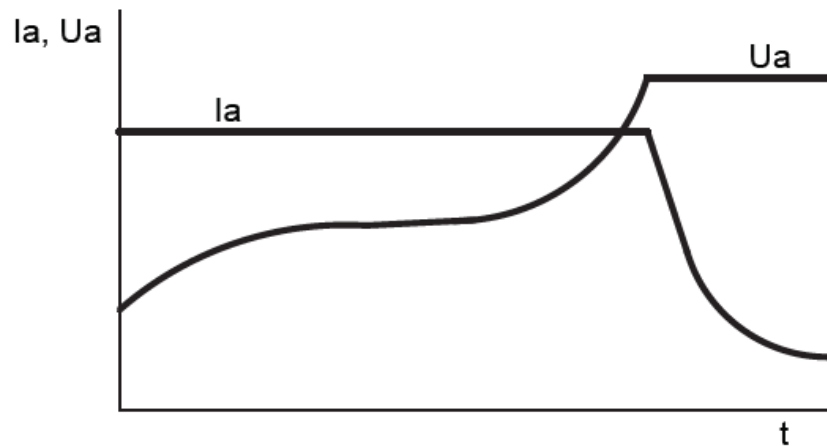
Indikací ukončení nabíjení je hustota elektrolytu. Ta dosahuje 1,26-1,285 g/cm<sup>3</sup> při úplném nabití a při vybití může klesnout až na 0,95 g/cm<sup>3</sup>. Další známkou ukončení nabíjení akumulátoru je dosažení ustáleného napětí na svorkách cca 2,7 - 2,8 V/čl. Po odpojení nabíječky klesne napětí naprázdno na hodnotu 2,06-2,15 V/čl., které při vybitém stavu dosahuje 1,95 – 2,03 V/čl. [2].

Pro nabíjení olověných akumulátorů je možné použít některou z následujících charakteristik nebo jejich kombinaci:

- **Charakteristika U** – nabíjení konstantním napětím s omezením proudu. Během celého procesu nabíjení je snaha přivést na akumulátor konstantní napětí (2,4 V/čl.). Na začátku nabíjení by však proud dosahoval vysokých hodnot v závislosti na hloubce vybití akumulátoru, proto je proud omezen na 0,5 až 1 násobek jmenovité kapacity proudu.
- **Charakteristika I** – nabíjení konstantním proudem. Od začátku do konce se do akumulátoru přivádí konstantní proud. Je možné použít dvoustupňové nabíjení. Nejprve je akumulátor nabíjen například proudem 0,12 C do té doby, než dosáhne plynovacího napětí. Poté se dobíjecí proud přepne na polovinu a tímto proudem se nabíjí až do úplného nabití.
- **Charakteristika W** – nabíjení probíhá při zvyšujícím se napětí a klesajícím proudem. Proud neklesá tak rychle jako u charakteristiky U, proto dochází k rychlejšímu nabití [1].

V tomto konkrétním případě je navržena nabíječka pracující s charakteristikou U. Průběh napětí a proudu dodávaného do akumulátoru je znázorněn na obr. 2-2. Konstantní

hodnota  $I_a$  odpovídá proudovému omezení, které by mělo být nastavené na 0,5 – 1 násobek jmenovité kapacity akumulátoru. Konstantní hodnota napětí  $U_a$  je 2,4 V/čl. V této oblasti se proud neomezuje a dodávaný proud klesá, na konci proud dosahuje pouze 0,002 násobku jmenovité kapacity proudu.



Obr. 2-2 Průběh napětí a proudu v čase při nabíjení konstantním napětím

## 2.2 Spínané zdroje

Spínané zdroje jsou zdroje stejnosměrného napětí a nahrazují starší lineární zdroje. Regulátorem lineárních zdrojů je výkonový tranzistor, kterým prochází výstupní proud do připojené zátěže. Úbytkem napětí na tranzistoru je tedy rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím regulátoru. Proto na tranzistoru vznikají velké ztráty, z čehož vyplývá nízká účinnost celého zdroje. Účinnost těchto zdrojů se pohybuje okolo 30 %.

Regulátorem spínaných zdrojů jsou měniče se spínacími tranzistory, které spínají s vysokou frekvencí. Spínané zdroje regulují výstupní napětí a proud pomocí PWM (Pulse Width Modulation), což je pulzní šířková modulace. Tranzistory se spínají pouze po dobu určité části periody. Střída  $s$  je vyjádřena poměrem mezi dobou sepnutí  $t_{on}$  a celou periodou  $T$ .

$$s = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.2)$$

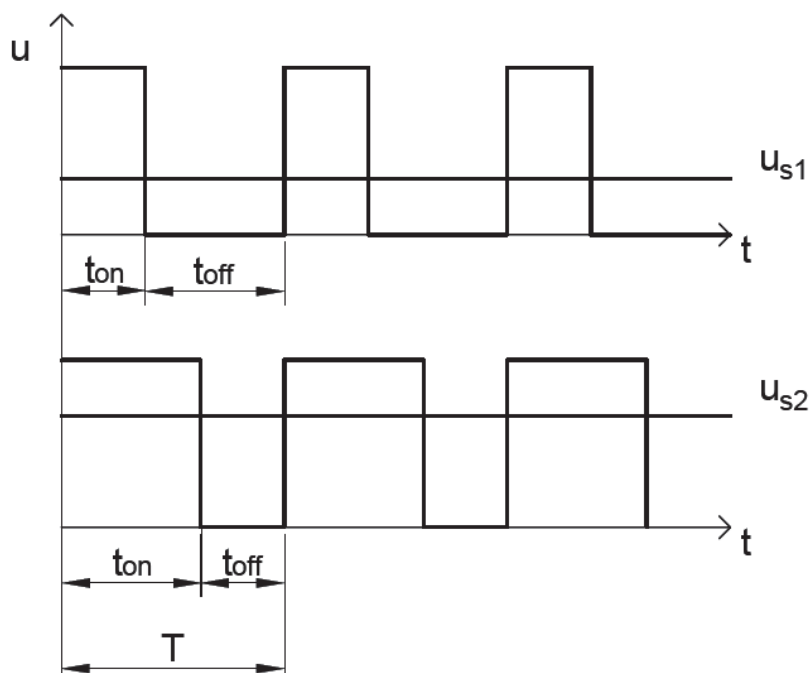
Pomocí střídavy je možné vyjádřit střední hodnotu výstupního napětí:

$$U_s = s * U_1, \quad (2.3)$$

kde  $U_s$  je střední hodnota napětí na výstupu spínaného zdroje a  $s$  je střída.



Na obrázku je znázorněna pulzní šířková modulace pro střidu 1/3 a 2/3. Dále střední hodnoty výstupních napětí  $u_{s1}$  pro střidu 1/3 a  $u_{s2}$  pro střidu 2/3.



**Obr. 2-3 Pulzně šířková modulace**

Napětí tedy nesnižujeme úbytkem napětí na výkonových tranzistorech, jak je tomu u lineárních zdrojů. Z toho vyplývá vyšší účinnost a menší výkonnostní ztráty.

PWM probíhá na řádově vyšších kmitočtech než 50 Hz, na kterých pracují lineární zdroje. Proto je možné použít transformátor s menším objemem jádra a zároveň díky menším ztrátám je možno použít chladič s menším výkonem a menšími rozměry. Tudiž celkový objem a hmotnost spínaných zdrojů je menší než lineárních.

### 2.2.1 Jednočinný propustný měnič

Propustné měniče se vyznačují přenosem elektrické energie při sepnutých tranzistorech na rozdíl od blokujících měničů, které přenášejí elektrickou energii v době vypnutých tranzistorů. Měnič obsahuje vysokofrekvenční impulzní transformátor, který transformuje napětí na požadovanou hodnotu a zároveň galvanicky odděluje vstup a výstup měniče. V době sepnutých tranzistorů se také akumuluje energie v tlumivce, která je připojena mezi sekundární svorky transformátoru a zátěž. Ve zbývajících částech

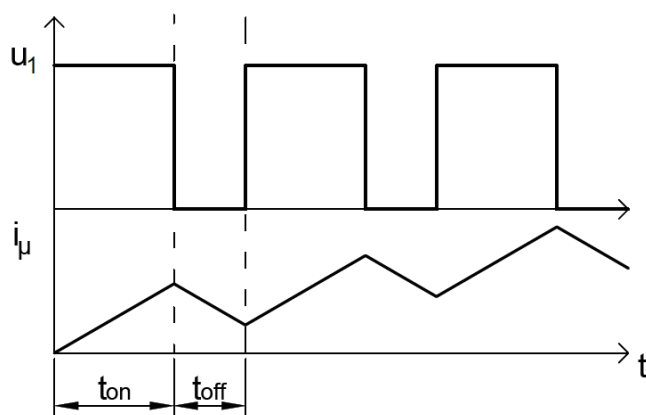
periody je tlumivka oddělena od transformátoru diodou a do zátěže je dodávaná energie naakumulovaná v tlumivce [5].

Tranzistory v měniči spínají s frekvencí 40–120 kHz. Důvodem používání vysokých kmitočtů je zmenšování jader transformátorů a tím celkové velikosti spínaného zdroje.

### 2.2.1.1 Zapojení se dvěma tranzistory

Tento typ měniče byl vybrán pro svou jednoduchost a možnost přenášet velký rozsah výkonů. Nevýhodou jsou ale větší ztráty na tranzistorech, protože jsou dva. Další nevýhodou je nutnost přivést dva budící signály, které jsou od sebe galvanicky oddělené, protože emitory tranzistorů jsou každý na jiném potenciálu.

Doba sepnutí tranzistorů nesmí překročit hodnotu  $T/2$ . Doba magnetizace transformátoru je stejně dlouhá jako jeho demagnetizace. Kdyby doba sepnutí překročila  $T/2$ , transformátor by nestihl demagnetovat a proud transformátorem by stoupal až do jeho zničení, jak je vidět na obr. 2.4 [3]:



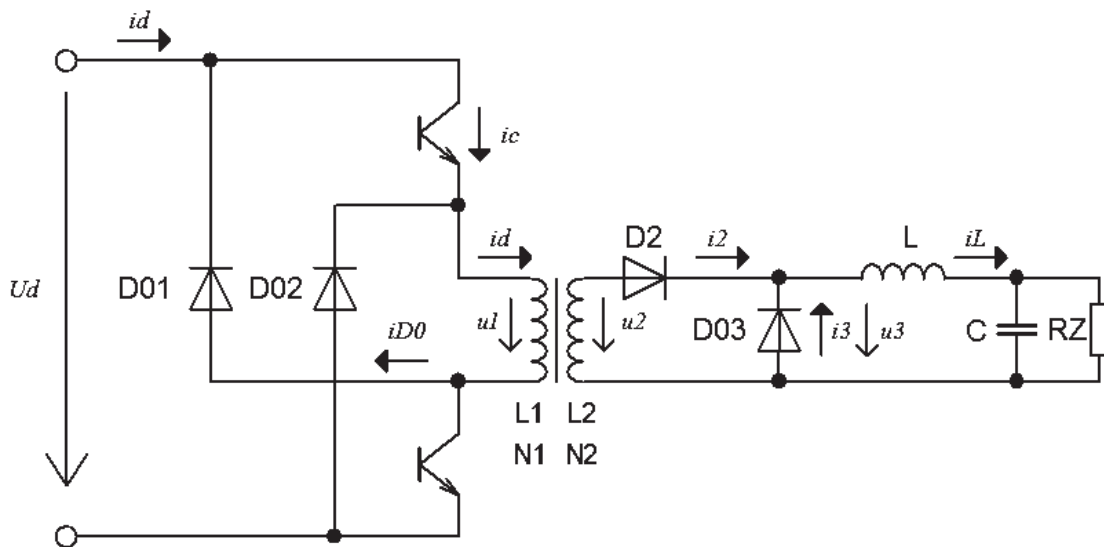
**Obr. 2-4 Průběh magnetizačního proudu při střídě větší než 0,5**

Napětí  $U_d$  a střední hodnota proudu  $i_d$ , který se musí připojit na vstup měniče, je dán následujícími vztahy:

$$I_d = I_z \cdot k \cdot \frac{1}{s} \quad (2.4)$$

$$U_d = U_z \cdot \frac{1}{k} \cdot s \quad (2.5)$$

kde  $k$  je převod transformátoru, který je dán poměrem počtu závitů na sekundární straně a počtu závitů na primární straně,  $N_1$  a  $N_2$  jsou počty závitů primárního a sekundárního vinutí,  $s$  je střída, jež je daná podílem doby sepnutí  $t_{on}$  a celkové periody  $T$ .



**Obr. 2-5 Zapojení jednočinného propustného měniče se dvěma tranzistory**

Na obr. 2-6 (nacházejícím se za touto kapitolou) jsou znázorněny průběhy jednotlivých důležitých proudů a napětí v propustném měniči. Doba sepnutí je  $T/2$  ( $s = 0,5$ ).

Napětí  $u_1$  je napětí, které je připojené na svorky primárního vinutí transformátoru. Při sepnutých tranzistorech je na vinutí L1 napětí  $U_d$ , na které je měnič připojen. Po rozeptnutí tranzistorů se primární vinutí L1 brání změně proudu a snaží se zachovat velikost jí procházejícího magnetizačního proudu  $i_\mu$ . Proud se uzavírá přes diody D01 a D02, ty připojí primární vinutí na napětí  $U_d$ , ale s opačnou polaritou. Tím dojde k demagnetizaci jádra transformátoru. Jelikož demagnetizace probíhá při stejném napětí jako magnetizace, trvá stejně dlouhou dobu.

Napětí  $u_2$  je napětí, které se indukuje v závitech sekundárního vinutí transformátoru. Průběh má stejný tvar jako  $u_1$  o velikosti dané převodem transformátoru podle vztahu:

$$u_2 = u_1 \cdot k \quad (2.6)$$

Záporná část průběhu  $u_2$  nesmí být použita k napájení zátěže, aby demagnetizace jádra transformátoru proběhla v pořádku. Proto je do obvodu připojena dioda D2. Napětí  $u_3$  je tedy průběh napětí za diodou D2. Pulzy mají stejnou velikost jako u napětí  $u_2$ , ale bez záporných impulzů.

Proud tlumivkou  $i_L$  je konstantní (uvažujeme-li nekonečnou hodnotu indukčnosti tlumivky L) a má hodnotu  $I_z$ , což je proud procházející zátěží. Zároveň je to součet proudů  $i_2$  a  $i_3$ .

Magnetizační proud  $i_\mu$  transformátoru v době sepnutých tranzistorů  $t_{on}$  lineárně stoupá (za předpokladu, že se pohybujeme v lineární části hysterezní smyčky). Vinutí L1 magnetuje. V čase  $t_{off}$  proud zase lineárně klesá se stejným sklonem, jako stoupal. Cívka demagnetuje, jak už je popsáno výše. Nulovými diodami D01 a D02 potom prochází proud pouze v čase  $t_{off}$ . Tento proud je magnetizační.

Tranzistory prochází proud  $i_c$  pouze jsou-li sepnuty. Tento proud je součtem magnetizačního proudu a proudu sekundárním vinutím přepočteným na primární stranu přes převod transformátoru:

$$i_c = i_\mu + i_2 \cdot k = i_\mu + i_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (2.7)$$

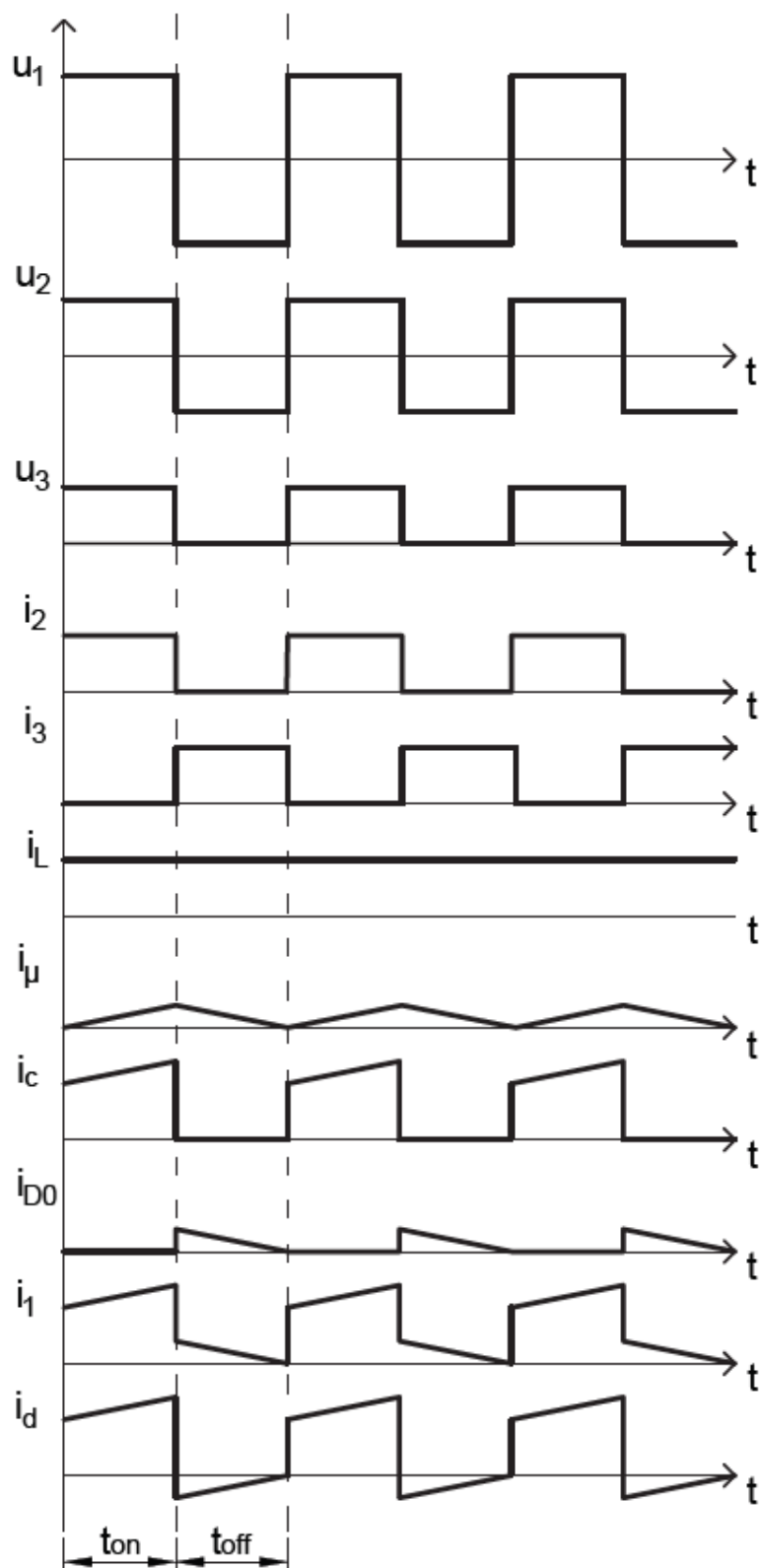
Proud  $i_l$ , který prochází primárním vinutím, se skládá z proudu tranzistory při magnetizaci a proudu nulovými diodami při demagnetizaci.

Výhody:

- velký rozsah přenášených výkonů,
- namáhání tranzistorů pouze napájecím napětím  $U_d$ .

Nevýhody

- větší ztráty vedením použitím dvou tranzistorů,
- nutnost dvou stejných budících signálů, avšak galvanicky oddělených.

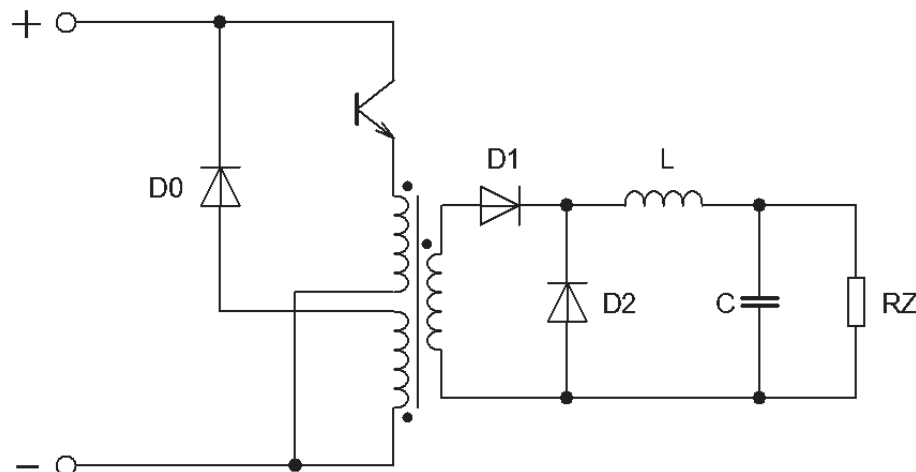


Obr. 2-6 Průběhy veličin v jednočinném propustném měničích se dvěma tranzistory

### 2.2.1.2 Zapojení s demagnetizačním vinutím

Toto zapojení pracuje stejně jako zapojení s dvěma tranzistory, avšak demagnetizace jádra transformátoru probíhá pomocí dalšího vinutí transformátoru. Toto vinutí je zapojeno v opačném směru než primární a má stejný počet závitů jako primární. Při vypnutí tranzistoru se na demagnetizačním vinutí objeví napětí stejně velké jako je napájecí napětí. Tranzistor je tedy ve vypnutém stavu namáhán dvakrát větším napětím, než je napájecí napětí. Magnetizační proud se uzavírá přes nulovou diodu.

Řízení jednočinného propustného měniče s demagnetizačním vinutím je jednodušší oproti zapojení se dvěma tranzistory, z důvodu nutnosti budít pouze jeden tranzistor. Řídicí obvod nemusí být galvanicky oddělen, může být zapojen na stejný potenciál jako emitor tranzistoru.



Obr. 2-7 Zapojení jednočinného propustného měniče s demagnetizačním vinutím

Výhody:

- menší ztráty vedením, pouze na jednom tranzistoru,
- snadné buzení tranzistoru.

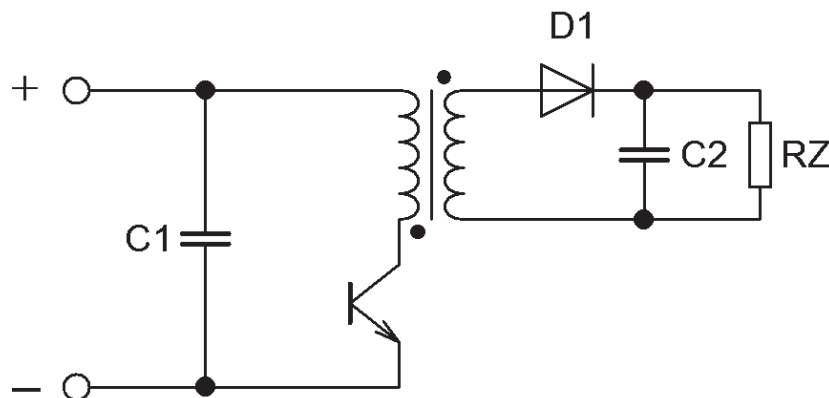
Nevýhody:

- tranzistor musí být dimenzován na dvojnásobek napájecího napětí,
- nutnost dalšího vinutí na transformátoru.

## 2.2.2 Jednočinný blokující měnič

Jedná se o velmi jednoduché zapojení měniče. Tento typ měniče je vhodné používat spíše pro menší výkony. Není nutné řešit demagnetizaci jádra transformátoru dalšími součástkami, protože probíhá pomocí sekundárního vinutí, které je zapojeno opačným směrem než primární. Přenos energie probíhá v době, kdy je tranzistor vypnutý.

Při sepnutí tranzistoru se začne v transformátoru indukovat napětí, ale proud neprochází do zátěže, protože dioda D1 je díky vzájemné orientaci primárního a sekundárního vinutí v této době zavřená. Po vypnutí tranzistoru se jádro transformátoru brání změně proudu a vybudí napětí s opačnou polaritou. Přes diodu začne protékat proud do zátěže.



Obr. 2-8 Zapojení jednočinného blokujícího měniče

Výhody:

- jednoduchost zapojení,
- není nutná výstupní tlumivka.

Nevýhody:

- použitelný pouze pro menší výkony.

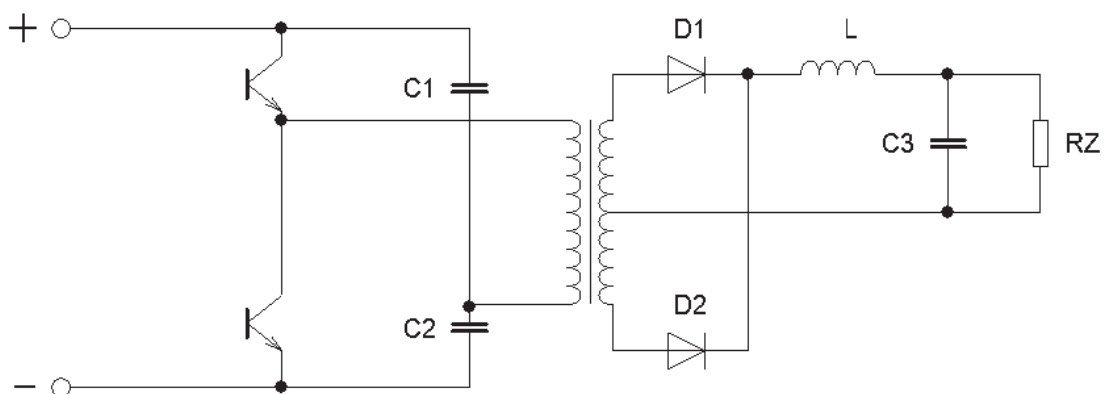
## 2.2.3 Dvojčinný propustný měnič

Dvojčinné propustné měniče se používají pro velké výkony. Nejefektivněji využívají transformátor, proto má toto zapojení má nejlepší poměr mezi výkonem a rozměry transformátoru. Jádro transformátoru je syceno v obou polaritách. Střední hodnota napětí přivedeného na primární vinutí musí být nulová. Kdyby nebyla zajištěna tato podmínka,

docházelo by k neúplné demagnetizaci jádra transformátoru. Magnetizační proud by se zvyšoval až do zničení transformátoru, jak již bylo popsáno výše u jednočinného propustného měniče.

Oba tranzistory musí být sepnuté stejně dlouhou dobu a zároveň se tyto časy nesmí překrýt. Došlo by totiž ke zkratu a následnému zničení tranzistorů. Musí se tedy uvažovat i s celkovou vypínací dobou tranzistoru. Z toho vyplývá, že střída každého tranzistoru musí být menší než 0,5. Výstup transformátoru je usměrněn a přes tlumivku přiveden do zátěže. Pro vyhlazení je možné použít tlumivku s menší indukčností, protože frekvence usměrněného napětí je dvakrát větší a mezery mezi impulzy jsou malé.

Dvojčinné měniče mají několik druhů zapojení primární strany měniče. Na obr. 2-9 je znázorněno zapojení tzv. poloviční můstek.



**Obr. 2-9 Zapojení dvojčinného měniče (poloviční můstek)**

Výhody:

- přenáší vysoké výkony,
- menší rozměry transformátoru,
- menší indukčnost výstupní tlumivky.

Nevýhody:

- složitější buzení tranzistoru,
- složitější transformátor (střední vývod transformátoru),
- nutnost zajistit nulovou střední hodnotu vstupního napětí do transformátoru.



### 3 OPTIMALIZACE VYSOKOFREKVENČNÍHO TRANSFORMÁTORU

Z důvodu vyšší účinnosti celé nabíječky a zároveň nižších ztrát, které je nutné uchladiť chladicí soustavou, byly provedeny optimalizace transformátoru. Nižší ztrátový výkon vede k nižším nárokům na chladicí soustavu a zároveň k možnosti využití vyšších výstupních proudů, tzn. vyšších výkonů nabíječky. Optimalizace spočívají v hledání ideálních parametrů transformátoru spolu se spínací frekvencí tranzistorů pro dosažení co nejnižších ztrát.

Na tuto problematiku lze nahlížet z mnoha stran, které jsou níže vysvětleny. V následující tabulce jsou uvedeny parametry, které je nutné dodržet a jsou neměnné. Optimalizace jsou provedeny pro výstupní proud 15 A, ale s podmínkou nepřesázení proudové hustoty 10 A/mm<sup>2</sup> při 50 A.

**Tabulka 3-1 Požadované parametry obvodu nabíječky ovlivňující transformátor**

$p$	6
$U_D$	$230 \cdot \sqrt{2}$ V
$s_{max}$	0,43
$I_2$	15 A
$B_{max}$	0,452 T

#### 3.1 Ztrátový výkon nabíječky (aktuální konfigurace)

Pro posouzení výsledků optimalizace jsou nejdříve určeny ztráty v aktuálně použité konfiguraci. Celkové ztráty, které je možné ovlivnit touto optimalizací, jsou dány součtem ztrát v železe  $P_{Fe}$ , ve vinutí transformátoru  $P_{Cu}$  a přepínacích ztrát v tranzistorech  $P_T$ .

**Tabulka 3-2 Parametry jádra transformátoru**

$S_{Fe}$	$6,48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
$S_o$	$7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$
$l_{Cu}$	0,13 m
$B_r$	0,18 T
$B_{max}$	0,48 T
$\Delta B_{max}$	0,30 T

### 3.1.1 Ztráty v železe transformátoru

Ztráty v železe určuje materiál, ze kterého je vyrobeno jádro transformátoru. Jsou dané součtem ztrát vířivými proudy a hysterezními. Výrobce v technické dokumentaci udává ztráty v železe, a to graficky v závislosti na spínací frekvenci  $f$  a rozdílu mezi remanentní a maximální magnetickou indukci  $\Delta B$ . Tato závislost pro použitý materiál CF138 je znázorněna v grafu 3-1 a proložením tohoto grafu je funkce (3.1).

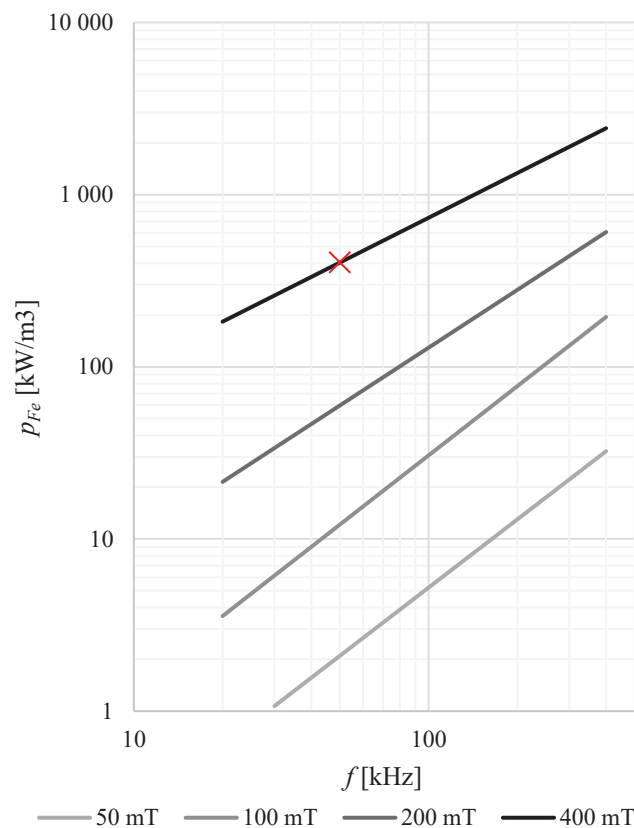
$$\begin{aligned}
 p_{Fe} &= p_{Fe0} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right) \cdot \left(\frac{\Delta B}{\Delta B_0}\right)^2 \\
 &= 400 \cdot 10^3 \left(\frac{f}{50 \cdot 10^3}\right) \cdot \left(\frac{\Delta B}{0,4}\right)^2
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$p_{Fe} = 50 \cdot f \cdot \Delta B^2$$

Rovnice proložením vychází z bodu, který je v grafu 3-1 označen křížkem. Proměnná  $p_{Fe0}$  vyjadřuje měrné ztráty v železe při určité frekvenci  $f_0$  a určité změně magnetické indukce  $\Delta B$ , následně pak  $p_{Fe}$  označuje ztráty pro libovolnou frekvenci  $f$  a libovolnou změnu magnetické indukce  $\Delta B$ .

Výsledné ztráty v železe jsou pak dané součinem objemu jádra  $V_{Fe}$  a měrných ztrát pro zvolenou frekvenci a změnu magnetické indukce:

$$\begin{aligned}
 P_{Fe} &= p_{Fe} \cdot V_{Fe} = 50 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 0,202^2 \cdot 6 \cdot 2092 \cdot 10^{-9} \\
 P_{Fe} &= 5,1 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$



**Graf 3-1 Závislost měrných ztrát v železe transformátoru na spínací frekvenci a sycení**

### 3.1.2 Joulovy ztráty ve vinutí transformátoru

Joulovy ztráty ve vinutí transformátoru jsou lineárně závislé na odporu  $R_{Cu}$  a kvadraticky na efektivní hodnotě protékajícího proudu  $I_{ef}$ . Pro zjednodušení výpočtu můžeme s dostatečnou přesností předpokládat, že celková plocha mědi primárního i sekundárního vinutí je stejně velká. Při zanedbání magnetizačního proudu lze Joulovy ztráty ve vinutí vyjádřit:

$$P_{Cu} = 2 \cdot R_{Cu1} \cdot I_{1ef}^2 = 2 \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{N_1^2 \cdot 2 \cdot l_{Cu}}{S_o \cdot k_{pCu}} \cdot \left( \frac{I_2}{p} \cdot \sqrt{S_{max}} \right)^2$$

$$P_{Cu} = 2,0,0169 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{12^2 \cdot 2,0,13}{7,85 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{15}{6} \cdot \sqrt{0,43} \right)^2 \quad (3.3)$$

$$P_{Cu} = 0,129 \text{ W},$$

kde  $\rho_{Cu}$  je měrná rezistivita mědi, která je rovna  $0,0169 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ ,  $N_1$  je počet závitů primárního vinutí,  $l_{Cu}$  je délka jednoho závitu,  $S_o$  je plocha okna jádra,  $k_{pCu}$  je činitel

plnění v mědi, který byl zvolen 1/3 (vhodné pro ruční navíjení),  $I_2$  je špičková hodnota sekundárního proudu,  $p$  je převod transformátoru a  $s_{max}$  je maximální možná střída jednočinného propustného měniče.

### 3.1.3 Přepínací ztráty tranzistorů

Přepínací ztráty v tranzistorech obsahují pouze ty vypínací. Zapínací ztráty byly eliminovány zapojením indukčnosti do série se sekundárním vinutím. Velikost vypínacích ztrát je daná parametry tranzistorů. Energie  $W_{off}$ , přeměňující se na teplo při vypínání jednoho tranzistoru, je rovna integrálu výkonu v přechodném stavu tranzistoru, který lze s dostatečnou přesností následovně vypočítat:

$$\begin{aligned}
 W_{off} &= \int_0^{t_{off}} p_D(t) dt = \int_0^{t_{off}} u_D(t) i_1(t) dt \\
 &= \frac{1}{4} \cdot U_D \cdot I_1 \cdot (t_{d(OFF)} + t_f) \\
 &= \frac{1}{4} \cdot 230\sqrt{2} \cdot 2,5 \cdot (45 + 79) \cdot 10^{-9} \\
 &= 2,52 \cdot 10^{-5} \text{ J}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

kde  $t_{d(OFF)}$  a  $t_f$  jsou dvě části, na než se dělí celková doba vypnutí tranzistoru. Parametry tranzistorů jsou v tabulce 5-1. Jelikož jsou v obvodu zapojeny dva spínací tranzistory, celkový ztrátový výkon způsobený jejich vypínáním je dán součinem energie a spínací frekvence:

$$\begin{aligned}
 P_{off} &= W_{off} \cdot f = 2,52 \cdot 10^{-5} \cdot 200 \cdot 10^3 P_{off} \\
 &= 10,084 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Celkový ztrátový výkon, který je ovlivnitelný optimalizací transformátoru:

$$\begin{aligned}
 P_{clk} &= P_{Fe} + P_{Cu} + P_{off} = 5,1 + 0,13 + 10,08 \\
 P_{clk} &= 15,31 \text{ W}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

## 3.2 Změna spínací frekvence a počtu závitů vinutí

První možností je úprava spínací frekvence spolu s počtem závitů vinutí (tím změnou magnetické indukce). Výhodou tohoto řešení je možnost zanechat stávající jádro a pouze

převinout vinutí a změnit frekvenci pulzně šířkové modulace. Plocha železa  $S_{Fe}$ , plocha okna  $S_o$  a délka jednoho závitů  $l_{Cu}$  zůstala totožná s aktuální konfigurací.

Celkový ztrátový výkon je nutné vyjádřit pomocí dvou nezávislých proměnných, a to pomocí frekvence  $f$  a počtu primárních závitů  $N_1$ . Vypínací ztráty a ztráty v mědi jsou již takto vyjádřeny v předchozí kapitole (rovnice 3.3 a 3.5).

Pro stejné vyjádření ztrát v železe je nutné změnu magnetické indukce vyjádřit pomocí počtu primárních závitů a frekvence. Změna magnetické indukce je závislá na střední hodnotě napětí připojeného na transformátor, ploše jádra  $S_{Fe}$ , frekvenci  $f$  a počtu závitů vinutí  $N_1$ . Zvolíme popis z primární strany:

$$\Delta B = \frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe} \cdot f \cdot N_1} \quad (3.7)$$

Dosazením rovnic 3.7 a 3.1 do rovnice 3.2 byla získána požadovaná závislost ztrát v železe:

$$P_{Fe} = 50 \left( \frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe}} \right)^2 \cdot V_{Fe} \cdot \frac{1}{f \cdot N_1^2} \quad (3.8)$$

Celkové ztráty v závislosti na frekvenci a počtu primárních závitů:

$$\begin{aligned} P_{clk} &= P_{Fe} + P_{Cu} + P_{off} \\ &= 50 \left( \frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe}} \right)^2 \cdot V_{Fe} \cdot \frac{1}{f \cdot N_1^2} \\ &\quad + 2 \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{N_1^2 \cdot 2 \cdot l_{Cu}}{S_o \cdot k_{pCu}} \cdot \left( \frac{I_2}{p} \cdot \sqrt{S_{max}} \right)^2 \\ &\quad + W_{off} \cdot f \end{aligned} \quad (3.9)$$

Pro získání minima této funkce byly parciální derivace položeny rovno nule:

$$\frac{\partial P_{clk}}{\partial f} = -50 \left( \frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe}} \right)^2 \cdot V_{Fe} \cdot \frac{1}{f^2 \cdot N_1^2} + W_{off} = 0 \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{clk}}{\partial N_1} &= -10050 \left( \frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe}} \right)^2 \cdot V_{Fe} \cdot \frac{1}{f \cdot N_1^3} \\ &\quad + 4 \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{N_1 \cdot 2 \cdot l_{Cu}}{S_o \cdot k_{pCu}} \cdot \left( \frac{I_2}{p} \cdot \sqrt{S_{max}} \right)^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Řešením vzniklé soustavy rovnic o dvou neznámých byly získány vzorce pro optimální spínací kmitočet a počet závitů vinutí, při kterých má transformátor a ostatní prvky minimální ztráty. Vzorec pro  $N_1$ :

$$\begin{aligned}
N_1 &= \sqrt[3]{\frac{400 \cdot U_D \cdot S_0 \cdot V_{Fe}}{S_{Fe} \cdot \rho_{Cu} \cdot I_2^2 \cdot l_{Cu}}} \\
&= \sqrt[3]{\frac{400 \cdot 230 \cdot \sqrt{2} \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} \cdot 6 \cdot 2092 \cdot 10^{-9}}{6,48 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0169 \cdot 10^{-6} \cdot 15^2 \cdot 0,13}} = 96,58 \text{ z}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Z důvodu potřebného převodu transformátoru ( $p=6$ ) je nutné, aby  $N_I$  bylo celé číslo dělitelné 6. Nejbližší takové číslo je  $N_I=96$  (v dalších výpočtech je uvažováno  $N_I=96$ ). Pomocí již známého počtu závitů je dopočtená spínací frekvence:

$$\begin{aligned}
f &= \frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe} \cdot N_1} \sqrt{\frac{50 \cdot V_{Fe}}{W_{off}}} \\
&= \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,43}{6,48 \cdot 10^{-6} \cdot 96} \sqrt{\frac{50 \cdot 6 \cdot 2092 \cdot 10^{-9}}{2,2,52 \cdot 10^{-5}}} \\
&= 17848 \text{ Hz}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Pro ověření této konfigurace je nutné ověřit maximální magnetickou indukci, jestli nepřesáhne zlom v BH charakteristice, čímž by došlo k velkému nárůstu magnetizačního proudu a tím k přetížení transformátoru.

$$\Delta B = \frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe} \cdot f \cdot N_1} = \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,43}{6,48 \cdot 10^{-6} \cdot 35702,48} = 0,28 \text{ T} \tag{3.14}$$

$$B_{max} = B_r + \Delta B = 0,18 + 0,39 = 0,46 \text{ T} \tag{3.15}$$

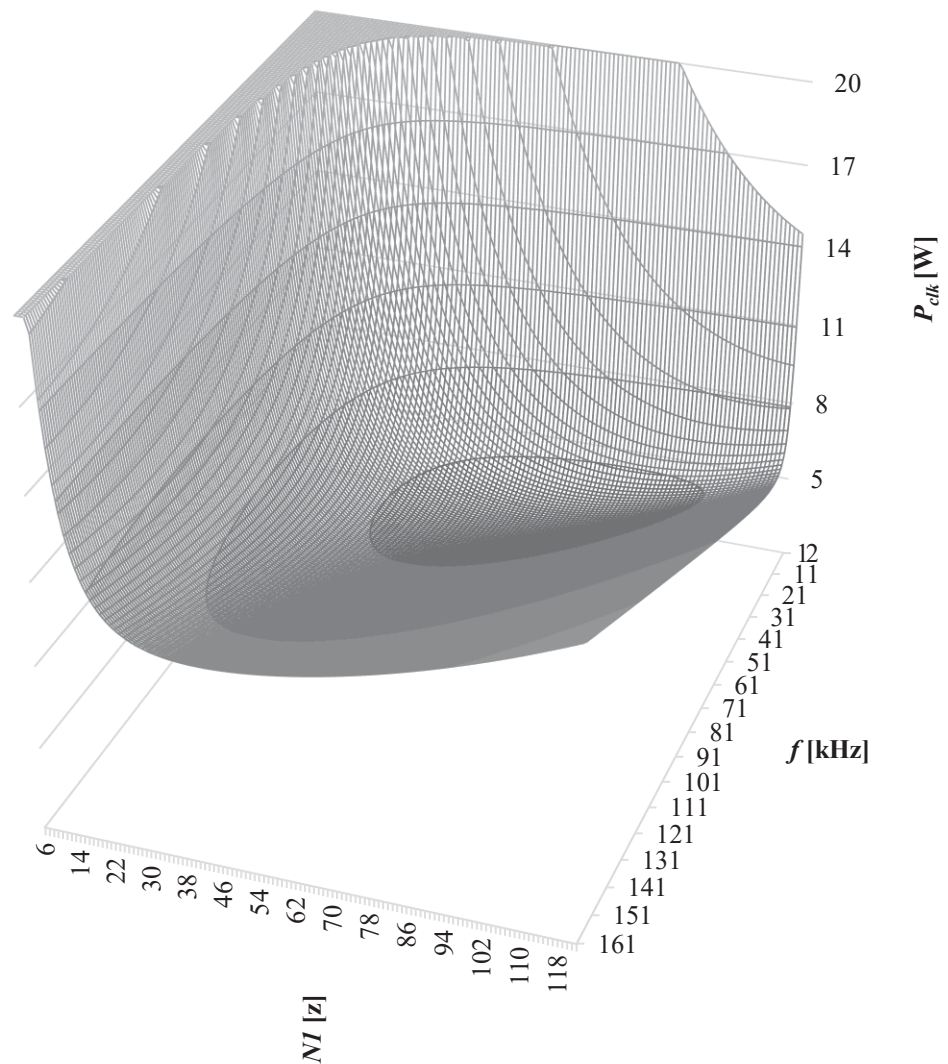
Při porovnání s maximální možnou magnetickou indukcí materiálu CF138 ( $B_{max}=0,48 \text{ T}$ ) je vypočtená indukce sice menší, ale nacházela by se v těsné blízkosti kolena BH charakteristiky. K tomuto došlo, protože tento algoritmus nezohledňuje nelinearitu BH charakteristiky materiálu a není ji možné do tohoto analytického postupu jednoduše započítat.

Pro získání reálně použitelných výsledků byl použit software MS Excel a jeho doplněk Solver. Byla hledaná minimální hodnota ztrátového výkonu s podmínkami, aby  $B_{max}$  nepřekročilo 0,38 T a zároveň aby proudová hustota při proudu 50 A nepřekročila 10 A/mm<sup>2</sup>. Výsledek toho řešení je uveden v tabulce 3-3.

**Tabulka 3-3 Výsledky optimalizace transformátoru**

$N_1$	66 z
$N_2$	11 z
$f$	36074 Hz
$B_{max}$	0,38 T

V následujícím grafu 3-2 je vynesena závislost ztrát nabíječky (při výstupním proudu 15 A) na počtu závitů primárního vinutí a spínací frekvenci. Minimum této funkce je poměrně ploché, proto je možné vypočtené hodnoty pomocí MS Excel považovat za relevantní. Ztráty při těchto parametrech mají malou odchylku od skutečného minima funkce, rozdíl je menší než 1 W.



**Graf 3-2 Celkové ztráty v závislosti napočtu závitů a frekvenci**

Rozdělení ztrátových výkonů při výstupním proudu 15 A jsou uvedeny v následující tabulce:

**Tabulka 3-4 Rozdělení ztrát v optimalizovaném transformátoru a v tranzistorech**

$P_{Cu}$	1,31 W
$P_{Fe}$	0,94 W
$P_{off}$	1,82 W
$P_{celk}$	4,07 W

### 3.3 Změna spínací frekvence se zachováním plochy jádra transformátoru

Další možností optimalizace je variace frekvence s tím, že plocha jádra je stejná jako v aktuální konfiguraci. Pro zamezení problému v přechodí situaci s přesycováním jádra byla pevně zvolená změna magnetické indukce na  $\Delta B=0,2$  T.

V této optimalizaci je vyjádřena závislost ztrát pouze na jedné nezávislé proměnné, a to na frekvenci. Počty závitů vinutí a plocha okna je následně vyjádřena v závislosti na frekvenci. Plocha okna je daná vztahem:

$$S_o = 2 \cdot \frac{I_2 \cdot \sqrt{S_{max}}}{p \cdot \sigma \cdot k_{pCu}} \cdot N_1 \quad (3.16)$$

kde  $\sigma$  je proudová hustota ve vinutí,  $p$  je převod transformátoru,  $k_{pCu}$  je činitel plnění mědi. Tento vztah platí za výše zmíněného předpokladu, že plocha mědi primárního a sekundárního vinutí je stejně velká, a zároveň platí rovnost mezi proudovými hustotami v obou vinutích.

Dosazením rovnic 3.14 a 3.16 do rovnice 3.3 byla získána závislost Joulových ztrát ve vinutí na frekvenci:

$$P_{Cu} = 2 \cdot \frac{\rho_{Cu} \cdot I_2 \cdot S_{max}^{\frac{3}{2}} \cdot U_D \cdot l_{Cu} \cdot \sigma}{p \cdot S_{Fe} \cdot \Delta B \cdot f} \quad (3.17)$$

Ztráty v železe při pevné magnetické indukci jsou poměrně jednodušší než v předchozí optimalizaci. Závislost těchto ztrát na frekvenci byla získána dosazením  $\Delta B=0,2$  T do rovnice 3.1 a následným sloučením s rovnicí 3.2:



$$P_{Fe} = 400 \cdot \left(\frac{f}{50 \cdot 10^3}\right) \cdot \left(\frac{0,2}{0,4}\right)^2 \cdot V_{Fe} = 2 \cdot f \cdot V_{Fe} \quad (3.18)$$

Celkový ztrátový výkon je dán součtem dílčích ztrát. Vypínací ztráty tranzistorů jsou dosazeny ve stejném tvaru jako v předchozí optimalizaci (rovnice 3.5).

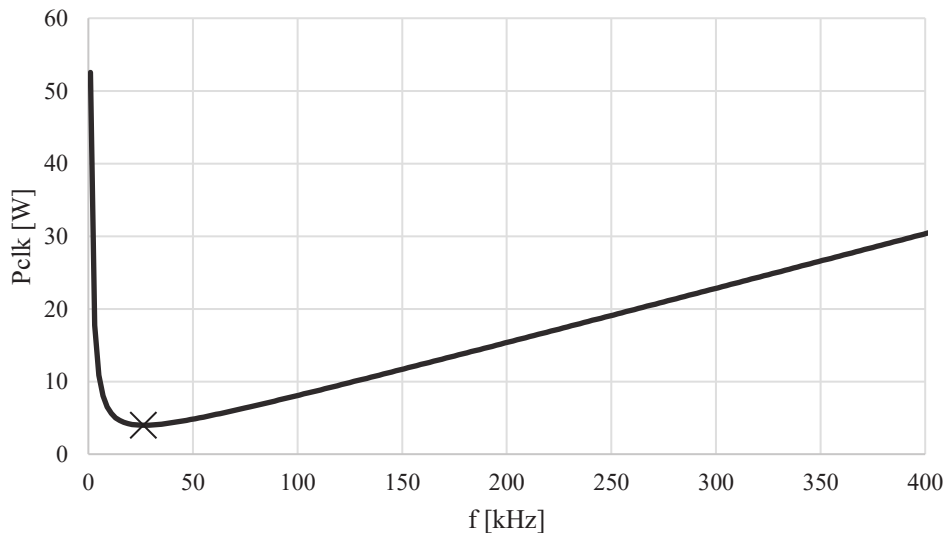
$$\begin{aligned} P_{clk} &= P_{Fe} + P_{Cu} + P_{off} \\ &= 2 \cdot f \cdot V_{Fe} + 2 \cdot \frac{\rho_{Cu} \cdot I_2 \cdot S_{max}^{\frac{3}{2}} \cdot U_D \cdot l_{Cu} \cdot \sigma}{p \cdot S_{Fe} \cdot \Delta B \cdot f} \\ &\quad + W_{off} \cdot f \end{aligned} \quad (3.19)$$

Pro získání minima této funkce byla její derivace podle frekvence položena rovnou nule:

$$\frac{dP_{clk}}{df} = 2 \cdot V_{Fe} - \frac{2 \cdot \rho_{Cu} \cdot I_2 \cdot S_{max}^{\frac{3}{2}} \cdot U_D \cdot l_{Cu} \cdot \sigma}{p \cdot S_{Fe} \cdot \Delta B \cdot f^2} + W_{off} = 0 \quad (3.20)$$

Úpravou této rovnice je optimální frekvence, při které dochází k nejnižším ztrátám:

$$\begin{aligned} f &= \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{Cu} \cdot I_2 \cdot S_{max}^{\frac{3}{2}} \cdot U_D \cdot l_{Cu} \cdot \sigma}{p \cdot S_{Fe} \cdot \Delta B \cdot (W_{off} + 2 \cdot V_{Fe})}} \\ &= \sqrt{2 \cdot \frac{0,0169 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 0,43^{\frac{3}{2}} \cdot 230 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,133 \cdot 10^6}{6,648 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2 \cdot (2,52 \cdot 10^{-5} + 2,6 \cdot 2092 \cdot 10^{-9})}} \\ &= 26359 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (3.21)$$



**Graf 3-3 Závislost celkového ztrátového výkonu na frekvenci**

Proudová hustota byla zvolena 3 A/mm<sup>2</sup> při výstupním proudu 15 A. V grafu 3-3 je zobrazené grafické řešení této optimalizace. Graf zobrazuje závislost celkových ztrát na frekvenci. Minimum této funkce se nachází při frekvenci 26,3 kHz, stejně jako ve výpočtu.

Následně pomocí ideální frekvence a maximální zvolené změně magnetické indukce byl dopočten počet závitů primárního vinutí:

$$N_1 = \frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe} \cdot f \cdot \Delta B} = \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,43}{6,48 \cdot 10^{-6} \cdot 26359,02} = 92,11 \text{ z} \quad (3.22)$$

Počet primárních závitů je zvolen na  $N_1=90$  z. Plocha okna je daná počtem závitů a proudovou hustotou. Proudová hodnota je zvolena na 10 A/mm<sup>2</sup> při výstupním proudu 50 A. Tato proudová hustota je vysoká, ale výstupní proud 50 A bude vždy jen krátkodobý, navíc nabíječka obsahuje tepelnou ochranu, proto je možno takto vysokou hustotu použít.

$$S_o = 2 \cdot \frac{I_2 \cdot \sqrt{S_{max}}}{p \cdot \sigma \cdot k_{pCu}} \cdot N_1 = 2 \cdot \frac{50 \cdot \sqrt{0,43}}{6 \cdot 10 \cdot \frac{1}{3}} \cdot 90 \quad (3.23)$$

$$S_o = 255,7 \text{ mm}^2$$

Rozdělení ztrátových výkonů při výstupním proudu 15 A jsou uvedena v následující tabulce:

**Tabulka 3-5 Rozdělení ztrát v optimalizovaném transformátoru a v tranzistorech**

$P_{Cu}$	1,99 W
$P_{Fe}$	0,66 W
$P_{off}$	1,33 W
$P_{celk}$	3,98 W

### 3.4 Změna počtu závitů se zachováním spínací frekvence a ostatních parametrů transformátoru

Tato optimalizace vychází z již navrženého transformátoru. Transformátor má pevně dané rozměry a spínací frekvence je také pevně daná. Variován bude tedy počet závitů vinutí, čímž bude měněna magnetická indukce v jádře transformátoru.

Přepínací ztráty tranzistorů jsou závislé pouze na frekvenci, která je v této optimalizaci konstantní. Dále v této kapitole uvažovány nebudou.

Ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní v závislosti na počtu závitů primárního vinutí jsou vyjádřeny z rovnic 3.1, 3.2 a 3.14:

$$\begin{aligned}
 P_{Fe} &= p_{Fe0} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right) \cdot \left(\frac{\Delta B}{\Delta B_0}\right)^2 \cdot V_{Fe} = \\
 &= 50 \cdot \frac{1}{f \cdot N_1^2} \cdot V_{Fe} \cdot \left(\frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe}}\right)^2
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

Joulové ztráty ve vinutí v závislosti na počtu závitů jsou dané podle rovnice 3.3., tedy:

$$P_{Cu} = 2 \cdot R_{Cu1} \cdot I_{1ef}^2 = 2 \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{N_1^2 \cdot 2 \cdot l_{Cu}}{S_o \cdot k_{pCu}} \cdot \left(\frac{I_2}{p} \cdot \sqrt{S_{max}}\right)^2
 \tag{3.25}$$

Celkové ztráty v závislost na počtu závitů jsou tedy dané součtem  $P_{Fe}$  a  $P_{Cu}$ :

$$\begin{aligned}
 P_{clk} &= P_{Fe} + P_{Cu} \\
 P_{clk} &= 50 \cdot \frac{1}{f \cdot N_1^2} \cdot V_{Fe} \cdot \left(\frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe}}\right)^2 \\
 &\quad + 2 \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{N_1^2 \cdot 2 \cdot l_{Cu}}{S_o \cdot k_{pCu}} \cdot \left(\frac{I_2}{p} \cdot \sqrt{S_{max}}\right)^2
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

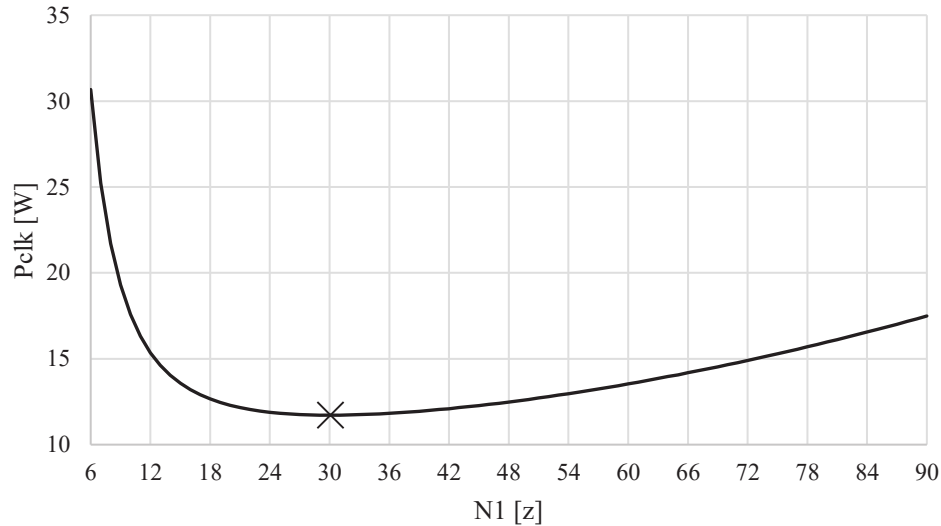
Pro získání minima této funkce byla její derivace podle počtu primárních závitů položena rovno nule:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_{clk}}{dN_1} &= -100 \cdot \frac{1}{f \cdot N_1^3} \cdot V_{Fe} \cdot \left(\frac{U_D \cdot S_{max}}{S_{Fe}}\right)^2 \\
 &\quad + 8 \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{N_1 \cdot l_{Cu}}{S_o \cdot k_{pCu}} \cdot \left(\frac{I_2}{p} \cdot \sqrt{S_{max}}\right)^2 = 0
 \end{aligned}
 \tag{3.27}$$

Upravením této rovnice byl vyjádřen vztah pro optimální počet závitů transformátoru:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \sqrt[4]{12,5 \frac{U_D^2 \cdot S_{max} \cdot S_o \cdot k_{pCu} \cdot p^2 \cdot 6 \cdot V_{Fe}}{S_{Fe}^2 \cdot \rho_{Cu} \cdot l_{Cu} \cdot I_2^2 \cdot f}} \\
 N_1 &= \sqrt[4]{12,5 \frac{230^2 \cdot 2.0,43 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{3} \cdot 6^2 \cdot 6.2092 \cdot 10^{-9}}{(6.48 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,0169 \cdot 10^{-6} \cdot 0,13 \cdot 15^2}} \\
 N_1 &= 30,09 \text{ z}
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

V následujícím grafu 3-4 je zobrazené grafické řešení této optimalizace. Minimum závislosti celkových ztrát na počtu primárních závitů je v bodě cca 30 závitů, což odpovídá číselnému výpočtu.



**Graf 3-4 Závislost celkového ztrátového výkonu na počtu závitů primárního vinutí**

Počet závitů je tedy zvolen na 30, z důvodu požadovaného převodu transformátoru  $p=6$ . Kontrolou této optimalizace je ověření maximální magnetické indukce v jádře (zdali nedochází k přesycování jádra). Maximální magnetická indukce, jak je vypočtená z rovnice 3.30, je menší než maximální dovolená indukce daná materiálem jádra.

$$\Delta B = \frac{U_D \cdot s_{max}}{S_{Fe} \cdot f \cdot N_1} = \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,43}{6,48 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 30} = 0,081 \text{ T} \quad (3.29)$$

$$B_{max} = B_r + \Delta B = 0,18 + 0,081 = 0,26 \text{ T} \quad (3.30)$$

Dále musí být ověřena proudová hustota ve vinutí:

$$\sigma = 2 \cdot \frac{I_2 \cdot \sqrt{s_{max}}}{p \cdot S_o \cdot k_{pCu}} \cdot N_1 = 2 \cdot \frac{15 \cdot \sqrt{0,43}}{6,78 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{3}} \cdot 30 \quad (3.31)$$

$$\sigma = 3,75 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Tato proudová hustota je dostatečně nízká pro trvalý chod nabíječky s chlazením pomocí ventilátorů. Při proudu 50 A proudová hustota vzroste na  $12,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Proud 50 A z nabíječky poteče jen velmi zřídka a maximálně po dobu několika desítek sekund,

navíc je transformátor vybaven tepelnou ochranou. Proto je tato proudová hustota přijatelná.

Rozdělení ztrátových výkonů při výstupním proudu 15 A jsou uvedena v následující tabulce:

**Tabulka 3-6 Rozdělení ztrát v optimalizovaném transformátoru a v tranzistorech**

$P_{Cu}$	0,812 W
$P_{Fe}$	0,82 W
$P_{off}$	10,01 W
$P_{celk}$	11,717 W

### 3.5 Zhodnocení optimalizací

Na výsledky jednotlivých optimalizací je nutno pohlížet z více úhlů pohledu, podle požadavku celkového použití transformátoru. V tabulce 3-7 je přehled ztrát při jednotlivých optimalizacích.

Celkové nejnižší ztráty vznikají v nabíječce navržené podle druhé optimalizace (variace frekvence s pevnou magnetickou indukcí a proudovou hustotou). V této konfiguraci vznikají nižší přepínací ztráty v tranzistorech, ale vyšší ztráty přímo v transformátoru. Tranzistory jsou připojeny na chladič, díky kterému se snadněji chladí, naopak transformátor je chlazen pouze proudícím vzduchem okolo a uvnitř transformátoru. Z tohoto důvodu je tato optimalizace pro řešené použití nevhodná.

Ze stejného důvodu je nevhodná i první optimalizace (variace frekvence spolu s magnetickou indukcí). Další nevýhodou je změna celkové konstrukce transformátoru, tzn. plocha okna se musí zvětšit cca třikrát. Transformátor by se nevešel do skříně nabíječky.

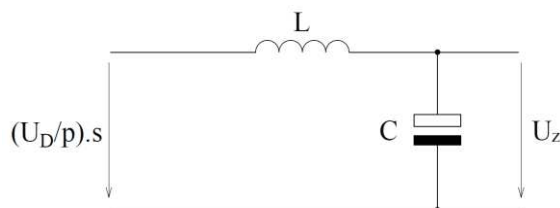
**Tabulka 3-7 Přehled ztrátových výkonů při jednotlivých optimalizacích**

variace	$\Delta B, f$	$f$	$N_I$
změna	$N_I$	$S_o, N_I$	$\Delta B$
$P_{Cu}$ [W]	1,31	1,99	0,812
$P_{Fe}$ [W]	0,94	0,66	0,82
$P_{off}$ [W]	1,82	1,33	10,01
$P_{celk}$ [W]	4,07	3,98	11,717

Nejvýhodnější optimalizací pro toto použití je tedy varianta poslední. Celkové ztráty jsou sice přibližně dvaapůlkrát větší než v předchozích situacích, ale ztráty v transformátoru jsou znatelně nižší při jeho původních rozměrech.

Původní transformátor má 12 primárních závitů. Jak je možné vidět v grafu 3-4 rozdíl mezi ztrátami při dvanácti závitech (původní konfigurace) a třiceti závity (nejoptimálnější konfigurace) je cca 3 W. Tato hodnota je zanedbatelná, proto bude nejvýhodnější zanechat původní parametry transformátoru, jelikož tyto transformátory jsou již vyrobeny v rámci bakalářské práce.

## 4 DIMENZOVÁNÍ VÝSTUPNÍHO LC-FILTRU



Obr. 4-1 Zapojení výstupního LC filtru

### 4.1 Tlumivka

Tlumivkou na výstupu jednočinného propustného měniče teče proud s pilovitým zvlněním. Při zanedbání odporu vinutí tlumivky platí výstupní napětí vztah:

$$U_z = \frac{U_d}{p} \cdot s \quad (4.1)$$

V době zapnutých tranzistorů je tlumivka připojena mezi napětí výstupu transformátoru a napětí na kondenzátoru. Napětí na tlumivce je pak jejich rozdílem. Za tuto dobu vzroste výstupní proud, tedy proud tlumivkou, o dvojnásobek zvlnění proudu  $2 \cdot \Delta I$ . Potom derivace proudu tlumivkou je rovna podílu napětí na ní a její indukčnosti (pouze v lineární části BH charakteristiky):

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{2 \cdot \Delta I_2}{T \cdot s} = \frac{\frac{U_d}{p} - U_C}{L} \quad (4.2)$$

kde  $p$  je převod transformátoru. Úpravou této rovnice a dosazení rovnice 4.1 vznikne vztah pro výpočet výstupní tlumivky:

$$L = \frac{\frac{U_d}{p}}{2 \cdot f \cdot \Delta I} \cdot (1 - s) \cdot s \quad (4.3)$$

Obecně k nejvyššímu zvlnění proudu dochází při střídě 0,5 a nejnižšímu při střídách 0 a 1. V tomto případě nejvyššího zvlnění bude dosaženo při maximální střídě 0,43. Pro zvolené vlnění výstupního proudu 1 A musí být použita tlumivka s indukčností:

$$L = \frac{\frac{230 \cdot \sqrt{2}}{6}}{2 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 1} \cdot (1 - 0,43) \cdot 0,43 = 36,2 \mu\text{H} \quad (4.4)$$

Pro výrobu výstupní tlumivky je použito společné jádro s hlavním transformátorem. Za předpokladu kolmosti magnetických toků transformátoru a tlumivky je možné jádro

využít pro obě aplikace zároveň, aniž by se vinutí vzájemně ovlivňovala. Magnetický tok se uzavírá tedy přes velkou vzduchovou mezeru, kterou není možné vyčíslit. Je nutné experimentálně změřit magnetickou vodivost této vzduchové mezery  $\lambda$ . Při 15 závitěch byla naměřena indukčnost  $10 \mu\text{H}$ .

$$\lambda = \frac{L}{N^2} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{15^2} = 44,44 \cdot 10^{-9} \text{H} \quad (4.5)$$

Z tohoto je vypočten potřebný počet závitů vinutí:

$$N = \frac{L}{\lambda} = \sqrt{\frac{36,2 \cdot 10^{-6}}{44,44 \cdot 10^{-9}}} = 28,54 \text{ z} \quad (4.6)$$

Počet závitů vinutí tlumivky je 28.

Následně je nutné ověřit maximální hodnotu magnetické indukce. Tlumivka je navinuta na společném jádře s transformátorem. Vinutí tlumivky a transformátoru jsou na sebe kolmá, tzn. že se jádro magnetizuje ve dvou směrech. Celková magnetická indukce je daná vektorovým součtem jednotlivých indukcí. Maximální magnetická indukce tlumivky je tedy:

$$\begin{aligned} \Delta B_{Tlmax} &= \sqrt{\Delta B_{max}^2 - \Delta B_{tr}^2} = \sqrt{0,3^2 - 0,202^2} \\ &= 0,22 \text{ T} \end{aligned} \quad (4.7)$$

kde  $\Delta B_{max}$  je maximální změna indukce daná materiálem jádra,  $\Delta B_{tr}$  je změna indukce, kterou způsobuje transformátor.

Pohybuje-li se magnetická indukce v lineární části BH charakteristiky materiálu jádra tlumivky, platí přímá úměra mezi procházejícím proudem  $I_2$  a spráženým magnetickým tokem  $\Psi$ .

$$\Psi = N \cdot \Phi = N \cdot \Delta B \cdot S_{Fe} = L \cdot I \quad (4.8)$$

Úpravou této rovnice byl získán vztah pro ověření maximální indukci jádra:

$$\Delta B_{Tl} = \frac{L \cdot I_{max}}{N \cdot S_{Fe}} = \frac{36,2 \cdot 10^{-6} \cdot 51}{28 \cdot 942,47 \cdot 10^{-6}} = 68,58 \text{ mT} \quad (4.9)$$

Z porovnání s maximální možnou změnou magnetické indukce je zřejmé, že tuto konfiguraci tlumivky je možné použít (jádro se nebude přesycovat).

Relativní zvlnění  $\delta$  je dané maximálním zvlněním proudu tlumivkou a střední hodnotou výstupního proudu. Z tohoto následně vyjde efektivní hodnota proudu



tlumivkou a tím minimální průřez vodiče vinutí, proto uvažujeme maximální hodnotu výstupního proudu  $I_z=50$  A.

$$\delta = \frac{\Delta I}{I_z} = \frac{1}{50} = 0,02 \quad (4.10)$$

Efektivní hodnota proudu procházející tlumivkou:

$$I_{Lef} = I_z \cdot \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{3}} = 50 \cdot \sqrt{1 + \frac{0,02^2}{3}} = 50,003 \text{ A} \quad (4.11)$$

Z tohoto je možné vyvodit, že zvolené zvlnění má velmi malý vliv na efektivní hodnotu proudu tlumivkou. Pro dimenzování vinutí je možné zvlnění zanedbat a počítat se střední hodnotou proudu. Proudová hustota  $\sigma$  byla zvolena na  $3 \text{ Amm}^{-2}$ .

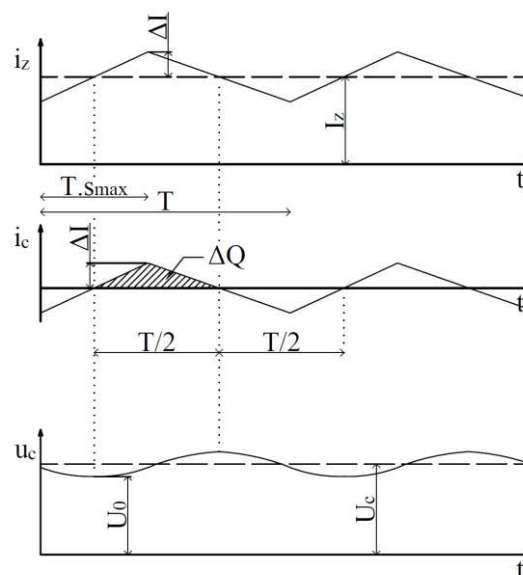
$$S_{Cu} = \frac{I_{ef}}{\sigma} = \frac{I_z}{\sigma} = \frac{50}{3} = 16,67 \text{ mm}^2 \quad (4.12)$$

Byl tedy zvolen plochý vodič 5x2 mm.

## 4.2 Kondenzátor

Kondenzátor výstupního LC filtru určuje zvlnění výstupního napětí. Zároveň je nutné dimenzovat kondenzátor na proud, který jím protéká. Kondenzátor je proudově namáhán podle zvoleného zvlnění výstupního proudu. Musí být schopný vyrovnávat rozdíl mezi zvlněným proudem tekoucí tlumivkou a konstantním proudem tekoucím do zátěže.

V následujícím obrázku jsou znázorněny průběhy veličin v kondenzátoru filtru:



Obr. 4-2 Průběh proudu a napětí na kondenzátoru

Napětí na kondenzátoru je dané jeho minimální hodnotou  $U_0$  a jeho přírůstkem v přechodném ději.

$$u_c(t) = U_0 + \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \quad (4.13)$$

Náboj kondenzátoru  $Q$  v ustáleném stavu je:

$$Q = U \cdot C \quad (4.14)$$

Sloučením předchozích dvou rovnic byl vyjádřen přírůstek náboje kondenzátoru:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \Delta I \cdot \frac{T}{2} \quad (4.15)$$

Potřebná kapacita kondenzátoru je dána podílem změny náboje a zvlnění napětí:

$$C = \frac{\Delta Q}{2 \cdot \Delta U} = \frac{\Delta I \cdot T}{8 \cdot \Delta U} = \frac{\Delta I}{8 \cdot \Delta U \cdot f} = \frac{1}{8,15 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^3} \quad (4.16)$$

$$= 416,6 \text{ uF}$$

Z řady byl vybrán kondenzátor 470 u/63 V, čímž bude dosaženo ještě menší zvlnění výstupního napětí. Je nutné ověřit, zdali tato kombinace tlumivky a kondenzátoru nemá rezonanční frekvenci v okolí spínací frekvence tranzistorů:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{36,2 \cdot 10^{-6} \cdot 416,6 \cdot 10^{-6}}} \quad (4.17)$$

$$= 1296 \text{ Hz}$$

Rezonanční frekvence tohoto LC článku je menší než setina spínací frekvence, tzn. dostatečně vyhovující.

Dále je nutné kondenzátor ověřit na protékající proud. Podle technické dokumentace použitého kondenzátoru je maximální efektivní hodnota protékajícího proudu 810 mA. Průběh proudu kondenzátorem je znázorněn v obr. 4-2. Jeho efektivní hodnota je rovna:

$$I_{cef} = \frac{\Delta I_{max}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 577,4 \text{ mA} \quad (4.18)$$

Efektívní proud při zvoleném maximálním zvlnění je menší než maximální dovolený proud kondenzátorem, tudíž je tento kondenzátor možné využít.

# 5 DIMENZOVÁNÍ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK

## 5.1 Spínací tranzistory

Spínací tranzistory je nutné dimenzovat proudově a napětově. Proudově se tranzistory dimenzují na efektivní hodnotu proudu a zároveň nesmí být překročena jeho maximální špičková hodnota. Všechny prvky musí být dimenzovány na nejhorší možný stav. K němu dochází při maximální střídě  $s=0,43$ , kdy nabíječka vytváří proud 50 A na výstupu. Proud spínacími prvky je tady dán celkovým výstupním proudem  $I_2$ , převodem pulsního transformátoru  $p$ . Výška obdélníkového průběhu (špičková hodnota proudu) tranzistory je:

$$I_{1\text{špič}} = \frac{I_{2\text{max}}}{p} = \frac{50}{6} = 8,33 \text{ A} \quad (5.1)$$

A efektivní hodnota tohoto proudu je daná střídou s:

$$I_{1\text{ef}} = I_{1\text{špič}} \cdot \sqrt{s_{\text{max}}} = 8,33 \cdot \sqrt{0,43} = 5,46 \text{ A} \quad (5.2)$$

Použitý tranzistor musí mít vyšší maximální špičkovou hodnotu proudu, než je maximální vypočtená hodnota výšky obdélníkového pulzu měniče.

Jednočinný propustný měnič je napájen usměrněným napětím sítě, tedy napětím 325 V. Toto je minimální hodnota, na kterou musí být tranzistory dimenzované (napětí ve vypnutém stavu  $U_{DS}$ ). S dostatečnou rozervou pro toleranci síťového napětí a možných překmitů v tranzistorech byla zvolena minimální hodnota  $U_{DS}=500 \text{ V}$ .

S ohledem na tyto požadované parametry byl zvolen tranzistor FDH44N50.

**Tabulka 5-1** Vybrané parametry tranzistoru FDH44N50

$V_{DS}$	500 V
$V_{GS}$	$\pm 30 \text{ V}$
$R_{DS}$	0,11 $\Omega$
$I_D$	44 A
$R_{\text{vjc}}$	0,2 K/W
$R_{\text{bCH}}$	0,24 K/W
$t_r$	84 ns
$t_f$	79 ns
$t_{d(\text{ON})}$	16 ns
$t_{d(\text{OFF})}$	45 ns

V tranzistorech vznikají výkonové ztráty ve formě tepla, které je nutné chladicí soustavou odvést z přístroje. Ztrátový výkon v tranzistorech se skládá ze ztrát přepínacích a ztrát vedením. Ztráty budou vypočteny pro výstupní proud 15 A. I přestože maximální rozsah proudu je 50 A, bude tento proud protékat jen krátkodobě. Nabíječka je navíc vybavena tepelnou ochranou. Proto je možné chladič dimenzovat na proud 15 A.

Přepínací ztráty vznikají v zapínacím a vypínacím ději tranzistoru. V tomto případě je možné zapínací ztráty vyloučit, neboť je v obvodu zapojena indukčnost L4.

Energie, která je přeměněna na teplo během jednoho vypínacího děje tranzistoru, je daná integrálem výkonu v tomto ději (odvození v kapitole 3.1.3):  $W_{off} = 2,52 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ . Ztrátový přepínací výkon  $P_{přep}$  je lineárně závislý na spínací frekvenci.

$$P_{přep} = W_{off} \cdot f = 2,52 \cdot 10^{-5} \cdot 200 \cdot 10^3 = 5,04 \text{ W} \quad (5.3)$$

Ztráty vedením  $P_{ved}$  jsou závislé na efektivní hodnotě protékajícího proudu tranzistorem a odporu v sepnutém stavu  $R_{DS}$ .

$$\begin{aligned} P_{ved} &= R_{DS} \cdot I_{ef}^2 = R_{DS} \cdot (I_{sp} \cdot \sqrt{S_{max}})^2 \\ &= 0,11 \cdot (2,5 \cdot \sqrt{0,43})^2 = 0,3 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Celkový ztrátový výkon v jednom tranzistoru je dán součtem dílčích ztrát:

$$P_{Tztr} = P_{přep} + P_{ved} = 5,04 + 0,3 = 5,34 \text{ W} \quad (5.5)$$

## 5.2 Výkonové diody

Výkonové diody jsou zapojeny na výstupu z impulsního transformátoru. Nejvyšší proud, který bude protékat těmito diodami, je 50 A. Dioda D8 musí být schopna udržet v závěrném směru napětí 54 V a dioda D7 dvojnásobek, tedy 108 V.

Podle těchto požadavků byly zvoleny diody STTH6003CW TO – 247. V následující tabulce jsou uvedeny vybrané parametry diod:

**Tabulka 5-2 Vybrané parametry výkonových diod STTH6003CW TO – 247**

$I_F$	60 A
$V_{RRM}$	300 V
$R_D$	0,004 $\Omega$
$R_{vjc}$	0,55 K/W
$R_{vCH}$	0,1 K/W
$U_p$	0,75 V

Jednou diodou teče proud v době sepnutých tranzistorů a druhou v době vypnutých tranzistorů. Z toho vyplývá, že ztrátový výkon vedením obou diod je možné vyčíslit jako u jedné diody, která pracuje po celou dobu periody, tedy  $s=1$ .

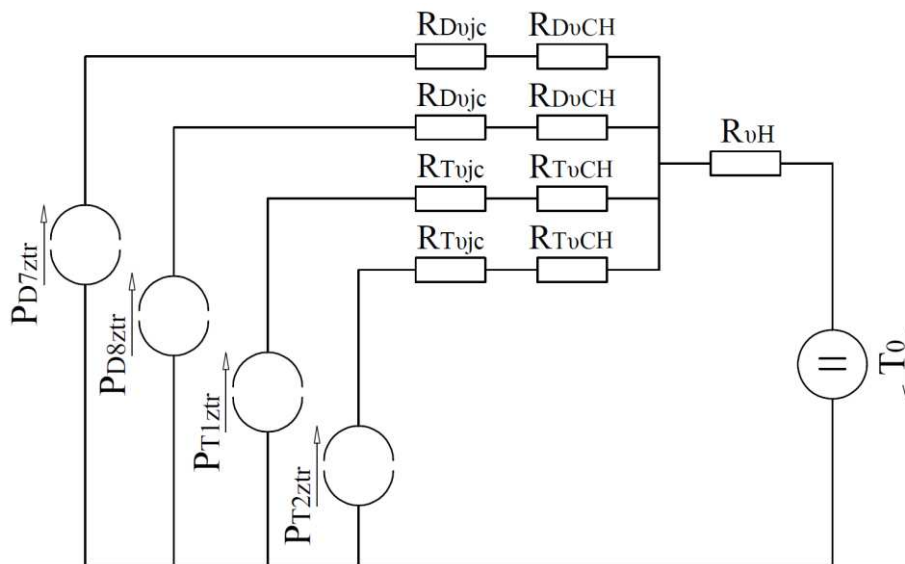
$$\begin{aligned} P_{Dztr} &= U_p \cdot I_{stř} + R_D \cdot I_{ef}^2 = U_p \cdot I_{šp} \cdot s + R_D \cdot (I_{šp} \cdot \sqrt{s})^2 \\ &= 0,75 \cdot 15 \cdot 1 + 0,004 \cdot (15 \cdot \sqrt{1})^2 \\ &= 12,15 \text{ W} \end{aligned} \tag{5.6}$$

## 6 DIMENZOVÁNÍ CHLADIČE

Pro zjištění požadovaného tepelného odporu chladiče je nutné znát ztrátové výkony, které budou tímto chladičem odváděny z obvodu ve formě tepla. Přitom nesmí dojít k překročení maximální dovolené teploty žádné součástky. Každá součástka má tepelný odpor mezi samotným čipem a pouzdrém a mezi pouzdrém a chladičem. Tyto potřebné parametry jsou uvedeny v následující tabulce:

**Tabulka 6-1 Parametry tranzistorů a diod pro dimenzování chladiče**

diody D7 a D8	$P_{Dztr}$	12,15 W
	$R_{D\theta jc}$	0,55 K/W
	$R_{D\theta CH}$	0,1 K/W
	$T_{Djmax}$	175 °C
tranzistory T1 a T2	$P_{T1celk}$	5,34 W
	$R_{T\theta jc}$	0,2 K/W
	$R_{T\theta CH}$	0,24 K/W
	$T_{Tjmax}$	175 °C



**Obr. 6-1 Tepelné schéma chladiče a připojených součástek**

Podle obr. 6-1 byla sestavena rovnice popisující tento tepelný obvod:

$$\frac{\Delta T}{P_{Zcelk}} = R_{\theta jc} + R_{\theta CH} + R_{\theta H} \quad (6.1)$$

kde  $P_{Zcelk}$  je součet ztrátových výkonů všech součástek připojených na chladič,  $\Delta T$  je rozdíl mezi teplotou okolí  $T_0$  a maximální dovolenou teplotou součástek,  $R_{vjc}$  je tepelný odpor mezi čipem a pouzdrém součástek,  $R_{vCH}$  je tepelný odpor mezi pouzdrém součástek a chladičem a  $R_{vH}$  je tepelný odpor samotného chladiče.

Jelikož jsou připojeny dva stejné tranzistory a dvě stejné diody, je možné z rovnice 6.1 vyjádřit vztah pro výpočet tepelného odporu chladiče následovně:

$$R_{\theta H} = \frac{T_{jmax} - T_0}{P_{Dztr} + 2 \cdot P_{Tcelk}} - \frac{R_{D\theta jc} + R_{D\theta CH}}{2} - \frac{R_{T\theta jc} + R_{T\theta CH}}{2}$$

$$R_{\theta H} = \frac{110 - 40}{12,15 + 2 \cdot 2,5,34} - \frac{0,1 + 0,55}{2} - \frac{0,2 + 0,24}{2} \quad (6.2)$$

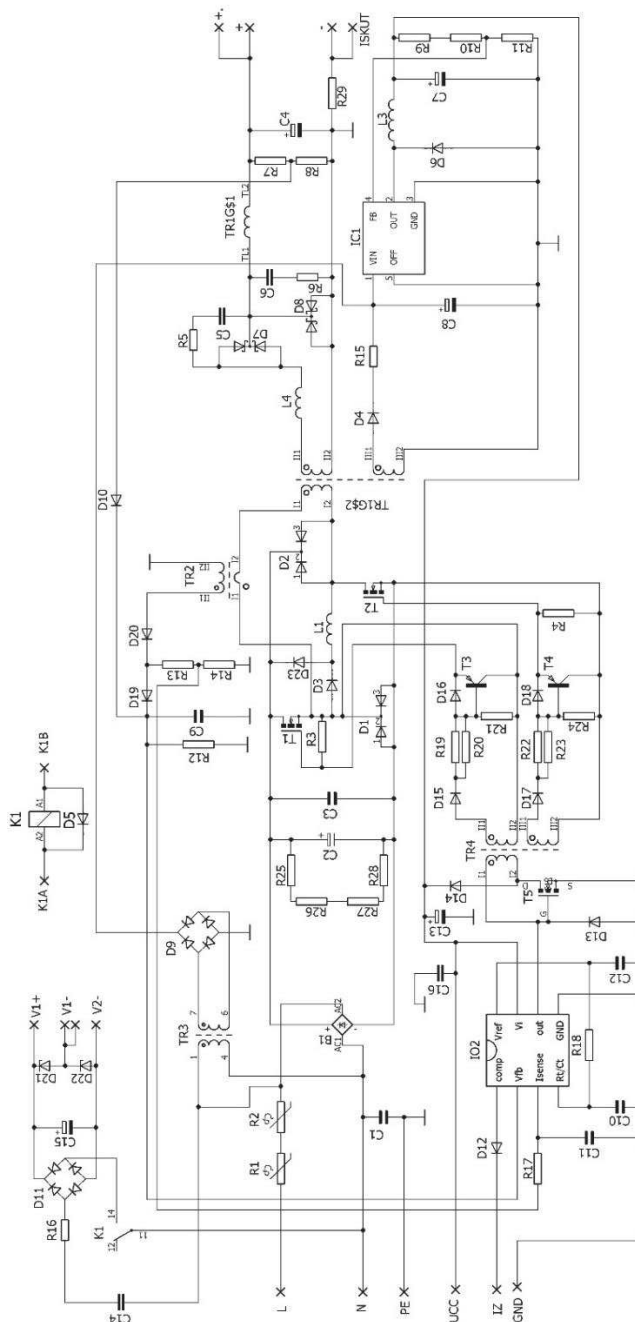
$$= 2,52 \text{ K/W}$$

Teplota okolí byla zvolena na 40 °C a maximální dovolená teplota součástek na 110 °C.

Chladič byl vybrán od firmy Fischer, typ SK 544 o délce 150 mm. Tepelný odpor tohoto chladiče je cca 1,75 K/W, což s dostatečnou rezervou vyhovuje pro ztrátové výkony součástek. Chladicí soustava navíc obsahuje ventilátory, které zvyšují účinnost chladiče a chladí transformátor a ostatní součástky, která nejsou připojeny k chladiči. Obvod je také vybaven tepelnou ochranou, která sníží výstupní proud na 0 A při teplotě 80 °C transformátoru.

# 7 HLAVNÍ DESKA

Tato a následující kapitola se zabývá schématem zapojení celé nabíječky. Obvody vychází z již navrženého prototypu na UVEE. Na hlavní desce byly provedeny pouze minimální změny, které je možné realizovat i na již vyrobených deskách. Změny jsou popsány níže v práci. Podobný funkční popis hlavní desky je uveden v bakalářské práci. Nabíječka pro olověný akumulátor [4].

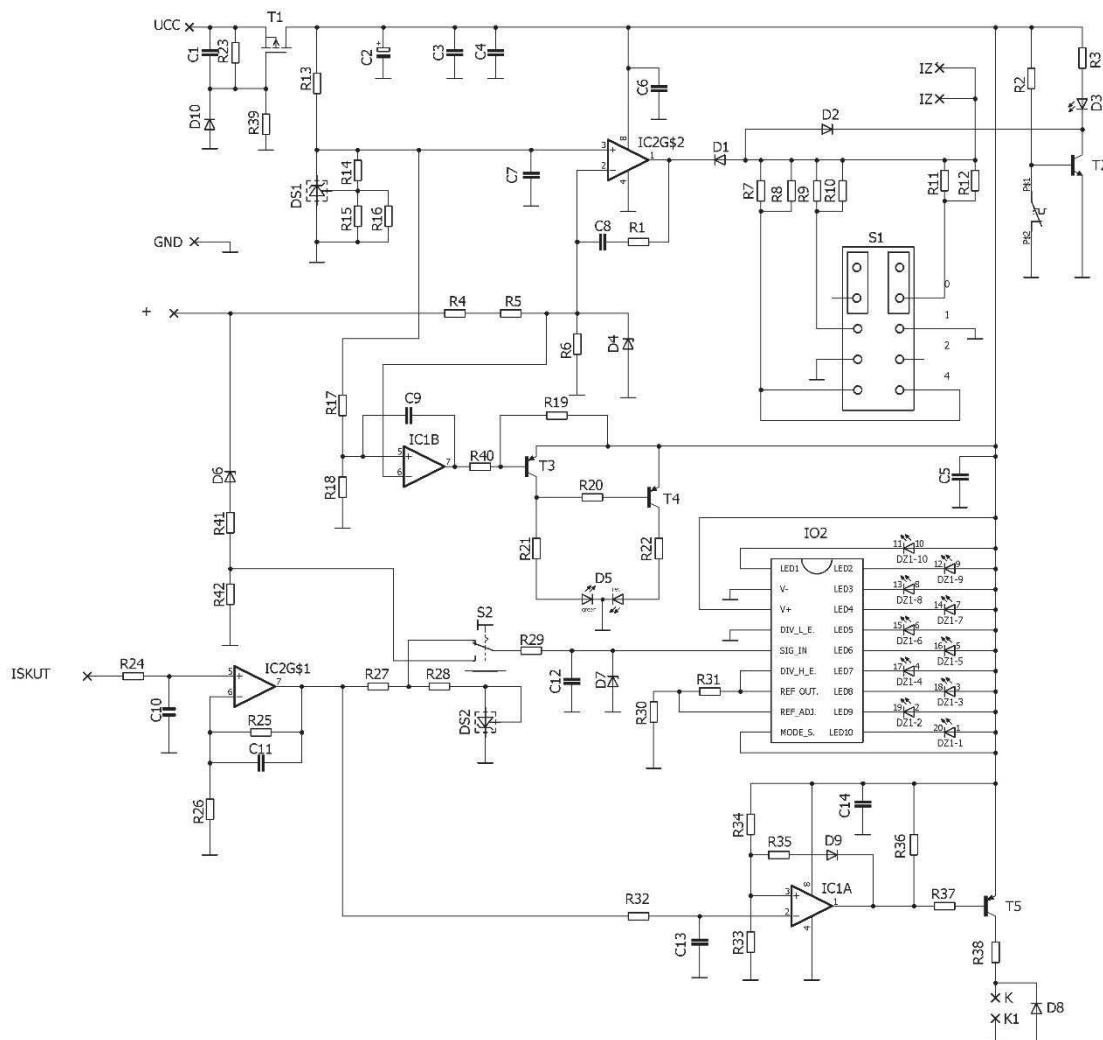


Obr. 7-1 Schéma zapojení hlavní desky



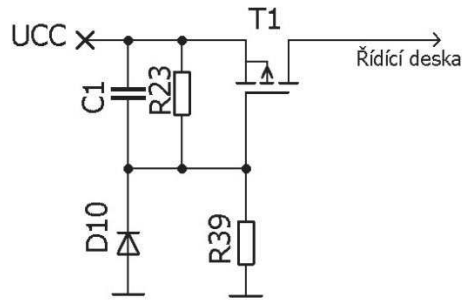
# 8 ŘÍDICÍ DESKA

Tato kapitola popisuje schéma zapojení řídicí desky. Téměř veškeré změny byly provedeny na řídicí desce. Tato deska byla vyrobena nová pro všechny nabíječky.



Obr. 8-1 Schéma zapojení řídicí desky

## 8.1 Napájení řídicí desky

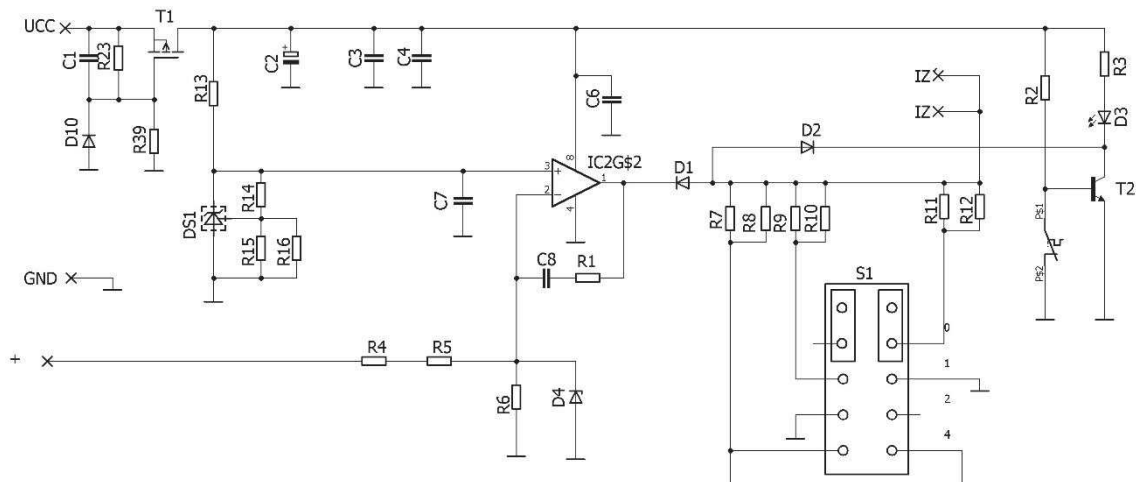


Obr. 8-2 Schéma zapojení napájení řídicí desky

Napájení řídicí desky je přivedeno z pomocného zdroje, umístěného na hlavní desce, přes tranzistor T1 MOSFET s P – kanálem, který se ve vypnutém stavu chová jako dioda v závěrném směru. Mezi source a gate je připojen kondenzátor C1, který zpožďuje sepnutí tranzistoru. Velikostí tohoto kondenzátoru a rezistoru R39 je možné zpoždění nastavit.

Toto opatření je použito, aby nedocházelo k odebrání potřebné energie pro první nabuzení měniče, který zároveň napájí řídicí desku. Měnič je možné spustit bez regulátoru, neboť řídicí obvod UC3845 obsahuje ochranu proti přepětí a nadproudu.

## 8.2 PI regulátor a tepelná ochrana



Obr. 8-3 Schéma zapojení PI regulátoru

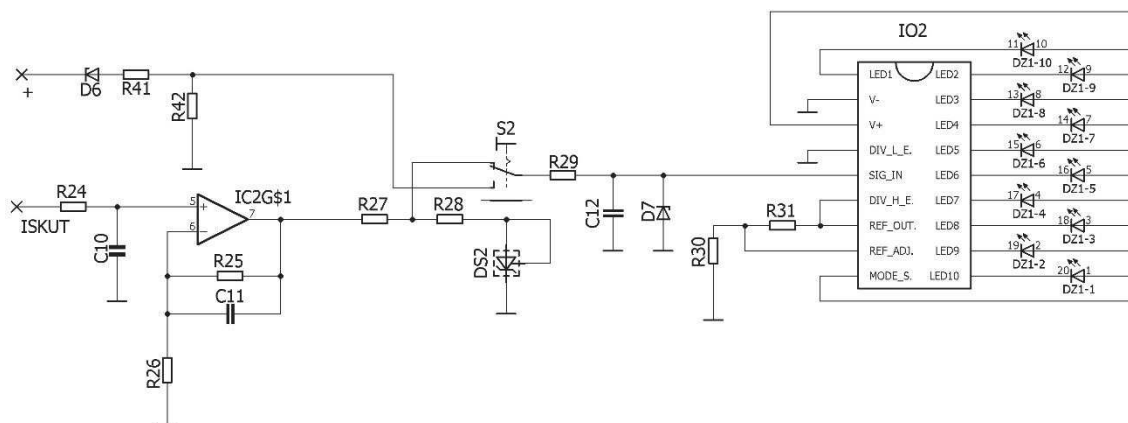
Srdcem řídicí desky je PI regulátor v podobě operačního zesilovače IC2. Na neinvertující vstup zesilovače je přivedeno referenční napětí o velikosti 5 V, které generuje napěťová reference TL431. Na invertující vstup je přiveden signál nosoucí

informaci o velikosti výstupního napětí. Hodnota výstupního napětí je ponížena děličem, který je tvořen rezistory R4, R5 a R6. Hodnoty těchto rezistorů jsou zvoleny tak, aby se při maximálním výstupním napětí objevilo na invertujícím vstupu 5 V. Zenerova dioda D4 slouží jako ochrana operačního zesilovače, aby se na invertujícím vstupu operačního zesilovače neobjevilo větší než Zenerovo napětí diody (8 V).

Žádanou hodnotu proudu nese výstupní signál operačního zesilovače, který je doveden na hlavní desku do řídicího obvodu UC3845. Hodnotu tohoto signálu je možné měnit přepínačem S1, který výstup operačního zesilovače spojuje se zemí přes kombinaci rezistorů. Volbou velikosti těchto rezistorů je možné měnit rozsahy výstupních proudů nabíječky.

Na výstup operačního zesilovače je také připojena tepelná ochrana nabíječky. Ta je tvořena termostatem, který je vložen do vinutí transformátoru. Termostat má při normálním stavu kontakty sepnuté. Dojde-li k překročení teploty 80 °C, termostat rozpojí, čímž se sepne také tranzistor T2. Přes tento tranzistor je výstupní signál z operačního zesilovače sveden na zem, a tím je nastavena žádaná hodnota proudu na 0 A. V tomto poruchovém stavu se rozsvítí LED dioda D3.

### 8.3 Měření výstupního proudu a napětí



**Obr. 8-4 Schéma zapojení signalizace výstupního proudu a napětí**

Pro signalizace velikosti nabíjecího proudu a velikosti napětí na akumulátoru je použit bargraf s 10 LED diodami. Ten je ovládán integrovaným obvodem LM3914 s lineárním průběhem. Rozsah vstupního signálu tohoto integrovaného obvodu je nastaven rezistory R30 a R31 na 0 – 2,5 V. Pomocí přepínače S2 je možné přepínat mezi zobrazením

nabíjecího proudu a výstupního napětí nabíječky. Zenerova dioda D7 s napětím 4,7 V slouží jako ochrana integrovaného obvodu.

Z výstupu nabíječky na hlavní desce je přiveden signál s informací o výstupním napětí nabíječky na řídicí desku. Maximální napětí na akumulátoru může být 14,4 V. Bylo by nevýhodné zobrazovat napětí v rozsahu 0 – 14,4 V, protože napětí na funkčním olověném akumulátoru neklesne pod cca 10 V. Signál je tedy veden přes Zenerovu diodu v závěrném směru se Zenerovým napětím 8,2 V. Za touto diodou signál dosahuje hodnot 0 – 6,2 V. Neboť integrovaný obvod je nastavený na vstupní signál s maximální hodnotou 2,5 V. Je nutné signál s informací o výstupním napětím ponížít děličem napětí tvořeným rezistory R41 a R42.

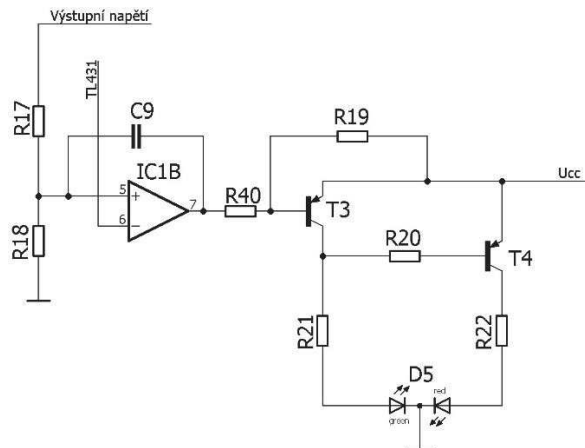
Signál s informací o velikosti nabíjecího proudu je získáván bočником, který je zapojený do série s akumulátorem na výstupu nabíječky. Tento signál dosahuje hodnot přibližně 0–30 mV. Ten je pomocí operačního zesilovače IC2 s neinvertujícím zapojením 201krát zesílen. Nabíječka bude nejvíce využívána s proudem o velikosti jednotek ampér, proto je lineární závislost integrovaného obvodu IO2 nevýhodná. Signál je veden přes dělič napětí, tvořený rezistory R27 a R28. Do série s R28 je zapojena napěťová reference s napětím 1,25 V. Nedosáhne-li signál velikosti 1,25 V, napěťový dělič je vyřazen z provozu. Toto způsobuje zlom v lineární závislosti IO2.

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty měřeného nabíjecího proudu a výstupního napětí, při kterých se rozsvítí určitý počet diody bargrafu.

**Tabulka 8-1 Závislost počtu rozsvícených LED diod na výstupním proudu a napětí nabíječky**

rozs. LED	$I$ [A]	$U$ [V]
1	2,1	8,8
2	4,2	9,4
3	6,3	10,1
4	8,3	10,7
5	10,4	11,3
6	18,3	11,9
7	26,2	12,5
8	34,2	13,2
9	42,1	13,8
10	50	14,4

## 8.4 Indikace nabití baterie

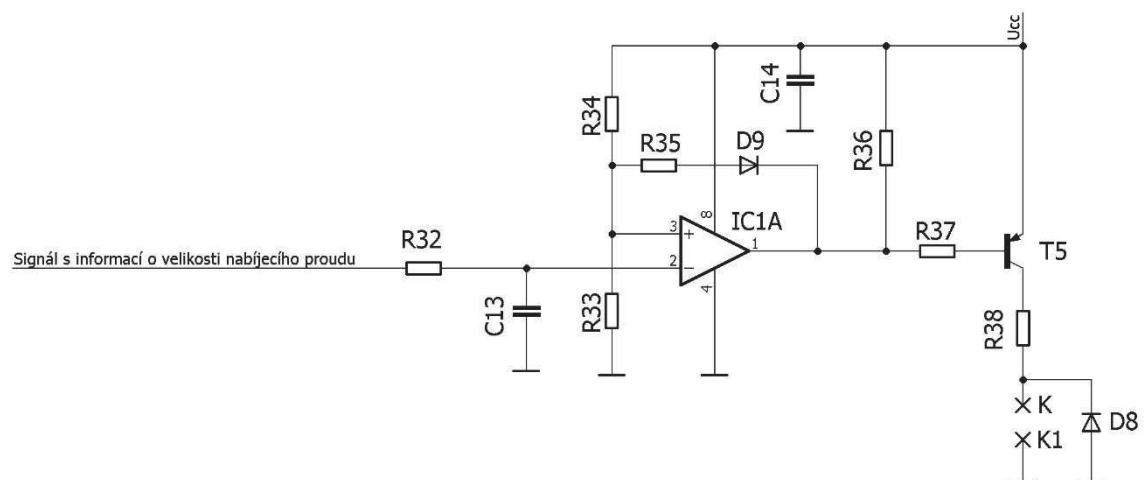


Obr. 8-5 Schéma zapojení indikace nabití baterie

Stav nabití akumulátoru je indikován dvoubarevnou LED diodou D5. Tato dioda je spínána na základě signálu z komparátoru IC1B. Přesáhne-li napětí na výstupu nabíječky 14,4 V (což značí nabití baterie), dioda se rozsvítí zeleně, pokud ne, svítí vždy červeně. Komparátor porovnává signál z referenčního zdroje TL431 se signálem nesoucím informaci o velikosti výstupního napětí.

Komparátor je vybaven hysterezí tvořenou kondenzátorem C9 a rezistorem R19, která zamezí problikávání obou barev při dosažení plného napětí baterie.

## 8.5 Ovládání ventilátorů



Obr. 8-6 Schéma zapojení ovládání ventilátorů

Nabíječka je vybavena dvěma ventilátory, které spíná relé umístěné na hlavní desce. Paralelně k tomuto relé je zapojena dioda D8, která zajišťuje jeho správné vypnutí. Relé

ovládá tranzistor T5, který spíná na základě signálu z komparátoru IC1A. Ten porovnává signál nesoucí informaci o velikosti výstupního proudu s určenou referenční hodnotou, která je výstupem z bočníku tvořeným rezistory R34 a R33.

Napětový signál z měřícího obvodu proudu nabíjí přes rezistor R32 kondenzátor C13. Volbou velikosti těchto dvou součástek je možné nastavit zpožděné sepnutí ventilátorů. Zároveň to dovoluje dochlazení celé nabíječky po ukončení nabíjení. Komparátor je také doplněn rezistorem R35 a diodou D9, což zajišťuje hysterezi.

## 9 VÝROBA

### 9.1 Vinuté součástky

#### 9.1.1 Výkonový transformátor TR1 a výstupní tlumivka

**Tabulka 9-1 Navíjecí předpis pro výrobu transformátoru**

Jádro		6x LJT 2010/CF138	
Vinutí	primární	12 závitů	svazek po 10 vodičích
	sekundární	2 závity	dva svazky po 30 vodičích
		1 závit	Ø 0,4 mm

Výkonový transformátor TR1 obsahuje 3 vinutí, jedno primární a dvě sekundární. Jádro se skládá z 6 kusů typu LJT 2010/CF138, které jsou slepeny rychleschnoucím lepidlem.

Primární vinutí je tvořeno 12 závity svazku s 10 vodiči. Začátek i konec vinutí jsou vyvedeny na jedné straně transformátoru, zbylá dvě sekundární vinutí jsou na druhé straně.

Hlavní výkonové sekundární vinutí je rozděleno na dva svazky po 30 vodičích, které jsou zapojeny paralelně. Dohromady tedy tvoří jeden svazek s 60 vodiči. Obě části musí mít stejné vlastnosti, aby mezi nimi nevznikaly vyrovnávací proudy. Na vývody je navléknuta silikonová bužírka pro vyšší bezpečnost.

Vedlejší sekundární vinutí pro napájení vnitřních obvodů nabíječky je navinuto teflonovým vodičem o průměru 0,4 mm. Toto vinutí je tvořeno jedním závitěm.

Při výrobě je nutné si označit začátky a konce vinutí pro správné připojení celého transformátoru do desky plošných spojů.

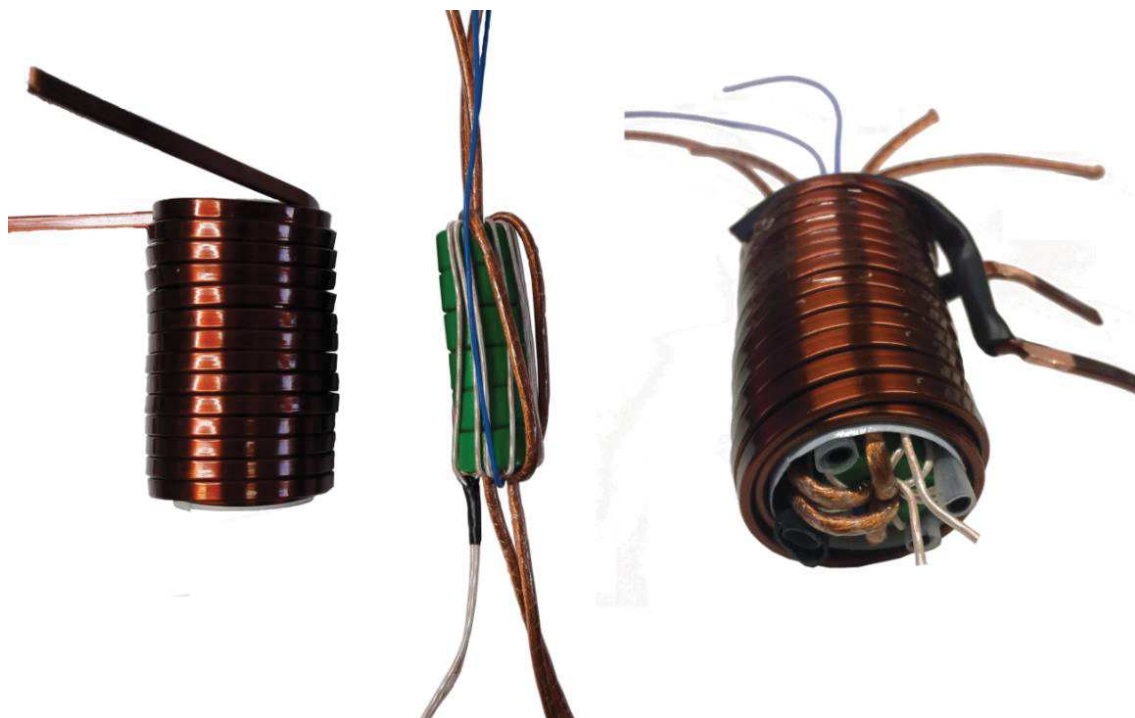
**Tabulka 9-2 Navíjecí předpis pro výrobu výstupní tlumivky**

Jádro	společné s TR1 6x LJT 2010/CF138	
Vinutí	cca 28 závitů	plochý vodič 5x2 mm

Při výrobě výstupní tlumivky je využito společné jádro s transformátorem TR1 z důvodu menších rozměrů. Toho je možné využít pouze v případě, jsou-li směry magnetických toků obou součástí na sebe vzájemně kolmé.

Tlumivka je tvořena závity z plochého smaltovaného vodiče s průřezem 5x2 mm, které jsou navinuty do průměru přibližně 30 mm. Jelikož se jedná o tvrdý vodič, tlumivka zároveň slouží k upevnění výkonového transformátoru.

Mezi transformátorem a tlumivkou je izolační papír a 4 silikonové bužírky, které jsou po obvodu rozmístěny po 90°. Bužírky slouží k vystředění transformátoru a zároveň zajišťují možnost průchodu chladicího vzduchu. Na obr. 9-1 vlevo je vyrobená tlumivka spolu s transformátorem TR1 a vpravo jsou sestaveny do jedné součástky.



Obr. 9-1 Výstupní tlumivka (vlevo), výkonový transformátor (uprostřed) a sestavení součástky (vpravo)

### 9.1.2 Proudový transformátor TR2

Tabulka 9-3 Navíjecí předpis pro výrobu proudového transformátoru

Jádro		LJT 1305/CF 138	
Vinutí	Primární	1 průvlek	
	Sekundární	30 závitů	Ø=0,4 mm

Primární vinutí mařícího transformátoru proudu TR2 má jeden závit tvořený průvlekiem uprostřed toroidního jádra. Primární vinutí zároveň slouží k upevnění transformátoru k desce plošných spojů.



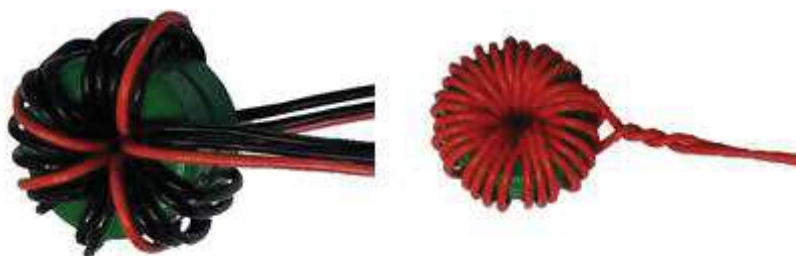
Sekundární vinutí tvoří 30 závitů. Pro zvětšení izolační vzdálenosti se nepřipojuje přímo u transformátoru, ale vývody jsou provlečeny deskou a zkrouceny do sebe. Takto vzniklá kroucená dvojlinka je dovedena do místa připojení sekundárního vinutí proudového transformátoru. Proto je potřeba již při výrobě nechat vývody tohoto vinutí dostatečně dlouhé (přibližně asi 20 cm).

### 9.1.3 Budicí transformátor TR4

**Tabulka 9-4 Navíjecí předpis pro výrobu budicího transformátoru**

Jádro		2xLJT 1305/ CF 138	
Vinutí	primární	5 závitů	Ø = 0,4 mm
	sekundární	2 x 10 závitů	Ø = 0,4 mm

Jádro budicího transformátoru je tvořeno dvěma kusy toroidu typu LJT 1305/ CF 138. Transformátor tvoří 3 vinutí, jedno primární a dvě sekundární, pro každou větev budičů jedno. Všechna vinutí jsou tvořena vodiči o průměru 0,4 mm. Primární vinutí má 5 závitů a každé sekundární 10. Vývody transformátoru zároveň slouží jako upevnění na desku plošných spojů. Vyroběný transformátor je na obr. 9-2 vlevo.



**Obr. 9-2 Budicí (vlevo) a proudový (vpravo) transformátor**

### 9.1.4 Tlumivka L1

**Tabulka 9-5 Navíjecí předpis pro výrobu tlumivky L1**

Jádro	E1605/CF139	
Vinutí	203 závitů	Ø=0,25 mm
Vzduchová mezera	0,8 mm	

Přídavná indukčnost je tvořena vinutím o 203 závitech z vodiče o průměru 0,285 mm. Ten je navinut na kostřičku. Mezi každou vrstvou vinutí je izolační vrstva, která je tvořená

páskou. Začátek a konec vinutí je připájen na nožičky, kterými je poté cívka osazena na desce plošných spojů. Tyto nožičky jsou součástí kostříčky.

Po navinutí je na kostříčku nasunuto E jádro. Vzduchovou mezeru vymezuje papír, který je možné použít, protože relativní permeabilita vzduchu a papíru se blíží jedné. Papír je na sebe navrstvený, tak aby jeho celková tloušťka byla přibližně 0,8 mm. Jednotlivé vrstvy jsou k sobě a k jádru přilepeny sekundovým lepidlem.

Po sestavení tlumivky je jádro zajištěno smršťovací bužirkou, která se navleče přes celé jádro. Následným zahřátím horkovzdušnou pistolí se smrští, čímž drží celou cívku pohromadě.



**Obr. 9-3 Tlumivka L1**

## **9.2 Řídicí deska**

V rámci této práce byly nově vyráběny pouze řídicí desky. Podle zjištěných chyb v předchozím návrhu bylo vytvořené zapojení řídicí desky. Následně v programu Eagle byla navržena deska plošných spojů. Jelikož se jedná pouze o jednostrannou desku, není nutné striktně dodržovat postup osazování.

## **9.3 Hlavní deska**

### **9.3.1 Osazení hlavní desky**

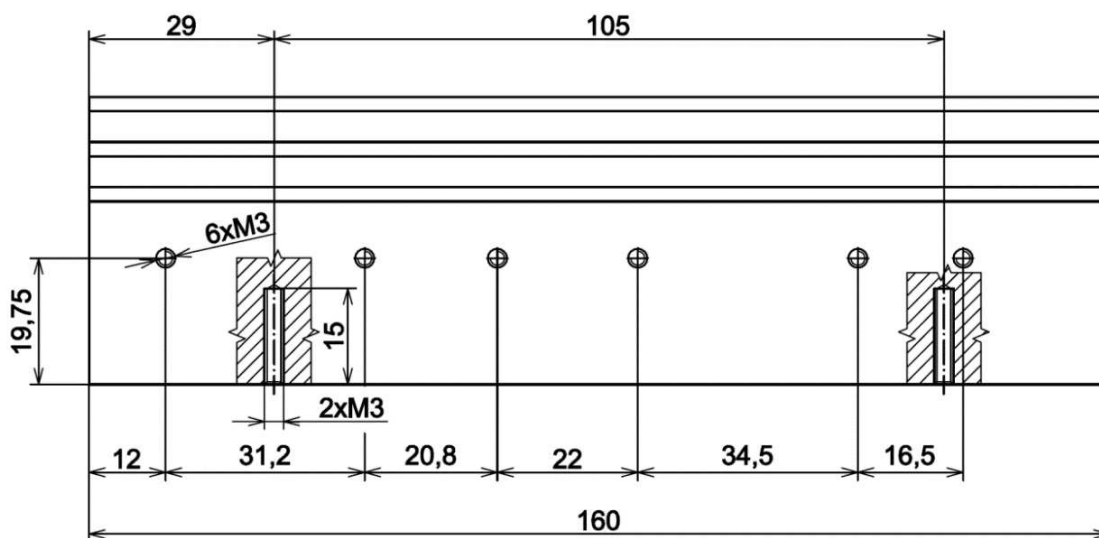
Na hlavní desce je nutné dodržet postup osazování. Nejdříve se osadí SMD součástky, následně drátové, kromě kondenzátorů C14 a C2, transformátoru TR3, vyráběných indukčních součástek a součástek upevněných na chladiči (diody D7, D8, Greatzův můstek B1 a tranzistory T1, T2). Osazení probíhá podle osazovacího plánu a seznamu součástek, který se nachází v přílohách na konci dokumentu.

Následně je připojen měřící transformátor proudu TR2. Prostředkem jádra je provlečen silnější vodič a zapájen na příslušné pady v desce. Tímto se vymezení jeho poloha. Vývody sekundárního vinutí jsou provlečeny deskou a druhou stranou nataženy a připojeny k bočníku, který je tvořen rezistory R13 a R14.

Obdobným způsobem je připojen budící transformátor TR4. Polohu transformátoru vymezují všechny vývody, proto je žádoucí, aby byly co nejkratší. Zároveň je nutné správně zapojit začátky a konce jednotlivých vinutí (k budiči jednoho tranzistoru připojit začátek a konec jednoho sekundárního vinutí).

Následuje upevnění chladiče spolu s upevněnými součástkami. Chladič je nejdříve nutné připravit. Do zakráceného kusu, dlouhého přibližně 16 cm, se připraví závity M3, rozmístěny podle obr. 9-4. Na takto připravený chladič jsou upevněny součástky šrouby M3. Na šrouby pro připevnění tranzistorů jsou navléknuty izolační podložky. Mezi chladič a tranzistory T1, T2 je umístěna izolační kaptonová podložka. Stejná podložka je vložena mezi zbylé diody a chladič. Teplovodivou pastou se potře usměrňovací můstek B1.

Mezi chladič a desku plošných spojů je pro větší izolační vzdálenost vložena podložka, která je vyrobená ze dvou na sobě ležících desek ze stejného materiálu, jako jsou vyrobené plošné spoje. Chladič spolu s podložkou je připevněn dvěma šrouby M3, jejichž rozmístění je znázorněno na obrázku. Nakonec jsou polovodičové součástky připájeny k desce plošných spojů.



Obr. 9-4 Výkres pro výrobu chladiče

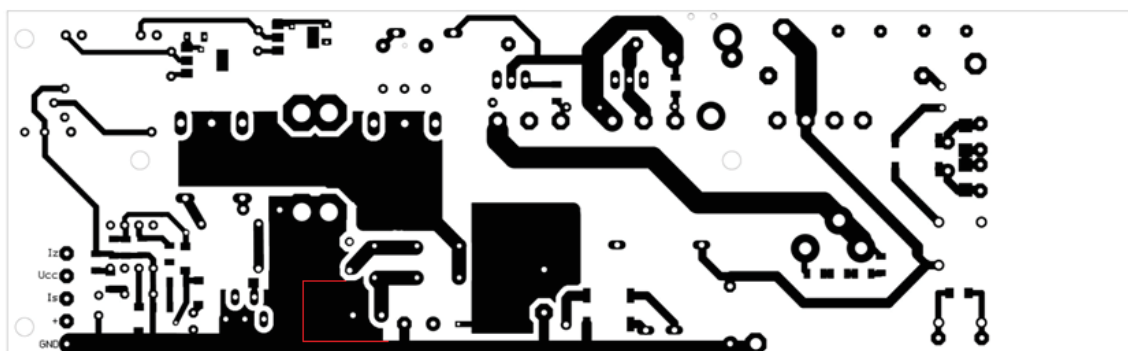
Dalšími součástkami při osazování jsou výkonový transformátor a výstupní tlumivka. Transformátor je nasunut v tlumivce. Tlumivka tvoří pevnou konstrukci pro celou součástku a je tedy připájena jako první, následně primární a obě sekundární vinutí transformátoru. Při pájení těchto součástek i následující výstupní tlumivky je nutné dostatečně ocínovat konce vývodu, protože vodiče pokrývá izolace, která je tímto odstraněna.

Nakonec je osazena tlumivka L4, která je připájena na velké plošky připravené na DPS.

### 9.3.2 Úpravy na hlavní desce

Na hlavní desce byla provedena úprava v měření proudu pro měřící obvody. Signál o velikosti nabíjecího proudu je získáván bočnickem R29, který byl vyroben z konstantanu, s průřezem takovým, že jeden metr vodiče má odpor  $0,127 \Omega$ . Bočník byl vyroben ze dvou 1 cm dlouhých kusů vodiče, které budou zapojeny paralelně, protože požadovaný odpor je  $600 \mu\Omega$ .

V původním návrhu hlavní desky se s bočnickem nepočítalo, proto bylo nutné provést její úpravu. Na plošce pro minusový vývod bylo nutné vyfrézovat „ostrůvek“, podle obr. 9-5. Na tento vytvořený ostrůvek je připájen vývod z nabíječky a jeden konec bočnicku, druhý je připájen ke zbylé části původní plošky minusového vývodu.



Obr. 9-5 Naznačení vyfrézování hlavní desky pro bočník

## 9.4 Propojení desek

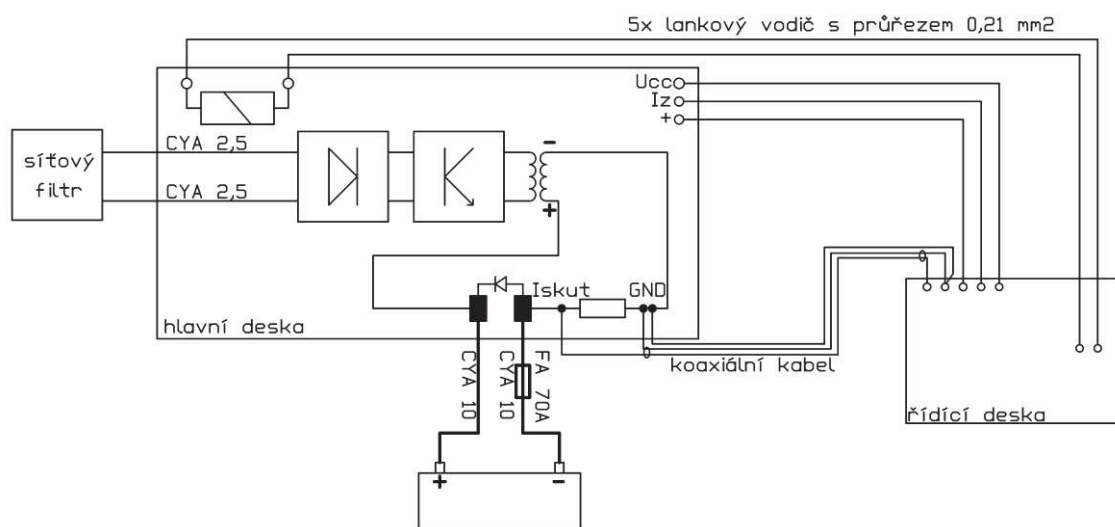
Výstupem z řídicí desky je signál s požadovaným nabíjecím proudem, který je přiveden na hlavní desku. Dále je z hlavní desky na řídicí desku přivedeno napájení  $U_{cc}$ , informace o velikosti výstupního napětí (napětí na baterii) a informace o velikosti

nabíjecího proudu spolu se zemí GND pomocí koaxiálního kabelu. Paralelně je k tomuto kabelu připojen druhý zemnicí vodič, vysvětleno níže.

Napájecí napětí celé nabíječky je připojeno pomocí kabelu přes síťový filtr. Hlavní deska s filtrem je spojena pomocí vodičů CYA 2,5.

Délky všech vodičů musí být zvoleny tak, aby bylo možné desky osadit do přístrojových skříněk.

Na výstupu nabíječky jsou vodiče o průřezu 10 mm<sup>2</sup> ukončeny svorkami, kterými bude nabíječka připojena k baterii. Na jednom z výstupních vodičů je připojena pojistka 70 A, která chrání baterii proti přepólování.



**Obr. 9-6 Propojky mimo desky**

Pro měření některých veličin a průběhů potřebných pro správné oživení celé nabíječky byly připojeny provizorní vývody z nohou výkonových tranzistorů, z místa přívodu Ucc na řídící desku a z GND na řídící desce.

## 9.5 Sestavení nabíječky

Již osazené a mezi sebou propojené desky plošných spojů spolu s připojenými ventilátory a přívodními vodiči síťového napětí se umísťují do plechové přístrojové krabičky. Tato krabička byla vyrobena na zakázku firmou AZ servis Nové Veselí. Při celkovém sestavení je nutné dodržet následující postup.

Výkonová dioda sloužící k ochraně proti přepólování je připojena na vývody nabíječky vodičem o průřezu 6 mm<sup>2</sup> se silikonovou izolací. Na anodu diody je připájen

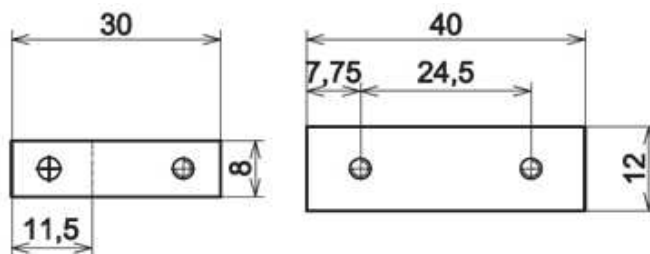
vodič, který ji spojuje se záporným vývodem nabíječky. Druhý vodič spojující katodu s kladným vývodem je spojen s diodou mechanicky. A to okem pro šroub M3, a tímto šroubem je také dioda upevněná k chladiči. Mezi diodu a chladič je nutné umístit izolační podložku a na šroub navléknout plastovou podložku ve tvaru hříbu. Katoda a kladný vývod nesmí být vodivě spojený s chladičem ani šroubem.

Chladič je uzemněný vodičem o průřezu  $2,5 \text{ mm}^2$ , který spojuje chladič se záporným vývodem nabíječky. K chladiči je tento vodič připojen pomocí oka a šroubu, druhý konec je připájen na stejnou plošku jako záporný vývod.

Vývody nabíječky tvoří vodiče o průřezu  $10 \text{ mm}^2$  s barevně odlišnou izolací (červená – kladný, černá – záporný). Na koncích jsou svorky, kterými se bude připojovat nabíjená baterie. Na kladném vývodu je také 70A pojistka, která spolu s dříve připojovanou diodou, tvoří ochranu proti přepólování. Vývody jsou provlečeny čelní stranou přístrojové krabičky předem připravenými otvory s gumovými průchodkami. Nejdříve se připájí záporný vývod, protože je kratší o pojistku, která je umístěna na kladném. Všechny vodiče je nutné dostatečně ocínovat pro správné připojení a vytvoření co nejmenšího přechodového odporu. Záporný vývod je spolu s vodiči od ochranné diody a uzemnění chladiče navlečen do smršťovací bužírky. Tyto vodiče jsou následně připájeny k předem ocínované velké plošce na DPS. Kladný vývod je připojen obdobně do smršťovací bužírky a navlečen spolu s vodičem od katody ochranné diody a připájen k druhé plošce. Mezi tyto plošky je osazen výkonový rezistor, který slouží k vytvoření umělé zátěže při chodu naprázdno. Smršťovací bužírky jsou poté smršťeny pomocí horkého vzduchu.

Hlavní deska je umístěna v přístrojové krabičce vývody směrem ke dnu. Následuje umístění ventilátorů na zadní stranu. Ventilátory jsou připevněny dlouhými M3 šrouby, které současně drží plech s natvarovanými výdechy tak, aby nasávaný a vydechovaný vzduch směřoval jiným směrem. Nejprve se upevní ventilátor směřující na výkonový transformátor a to tak, aby se chladící vzduch tímto ventilátorem vhněl dovnitř. Problematický je spodní šroub uprostřed. Musí být použit kratší šroub, který není skrz celý ventilátor. Druhý ventilátor se osadí stejně a orientovan je tak, aby chladící vzduch vyfukoval ven.

Ventilátory plní také funkci upevnění hlavní desky plošných spojů, která je vsunuta mezi ně. Druhá strana je zajištěna plechy do tvaru L, které byly vyrobeny podle obr. 9-7 vlevo. Tím je deska zajištěna ke dnu krabičky.



**Obr. 9-7 Výkres pro výrobu**

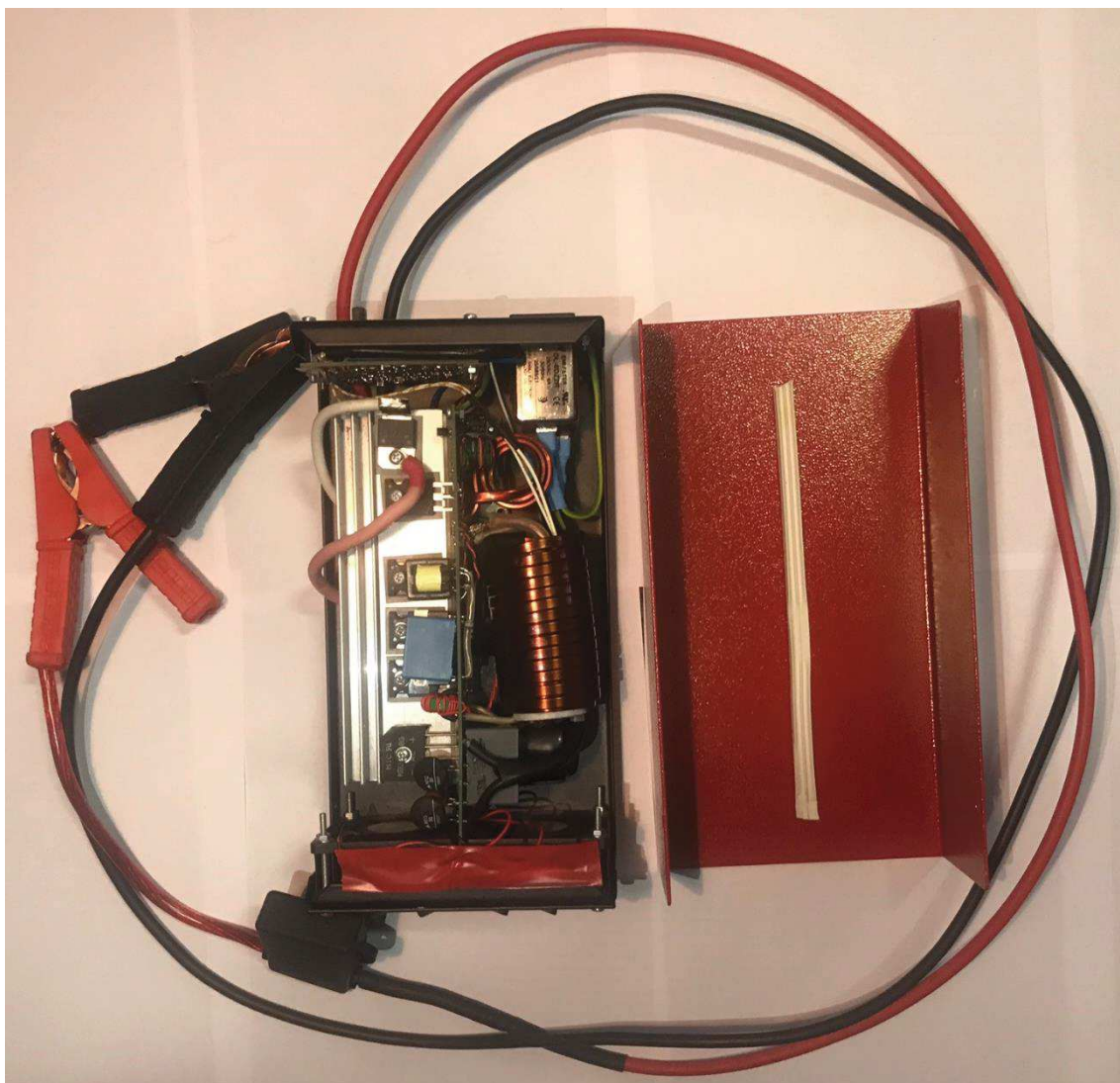
Výstupní vodiče jsou chráněny proti vytrhnutí taktéž plechem vyrobeným podle obr. 9-7 vpravo a je potažený gumou pro zabránění poškození izolace vodiče. Plech je přes výstupní vodiče přitažen dvěma šrouby M3 ke dnu krabičky.

Řídicí deska je umístěna na přední straně přístrojové krabičky. Její polohu vymezují distanční sloupky dlouhé 25 mm. Na přepínač přepínající proudové rozsahy je navlečena guma, která ho ve všech polohách celý zakrývá, čímž je zabráněno dostávání nečistot do přepínače, a tím je prodloužena jeho životnost. Pod maticemi utahujícími řídicí desku k distančním sloupkům jsou umístěny vyrobené podložky z izolačního papíru.

Napájení celé nabíječky je zajištěno EURO kabelem připojeným do filtru, který se také nachází na přední straně. Ten je připevněn šrouby M3 se zápusťnou hlavou alespoň 12 mm dlouhými. Filtr je k hlavní desce připojen pomocí již připravených vodičům pomocí FAST-ON konektorů. Na fázový a střední vodič je navlečena bužírka tak, aby v každém místě měly tyto vodiče dvojitou izolaci. Z konektoru pro ochranné vodiče je vyveden další vodič, který je pomocí oka připevněn ke šroubu držící filtr. Tímto je uzemněna celá přístrojová krabička.

Přívody ventilátoru je nutné svinout a upevnit tak, aby s jistotou nedošlo ke kontaktu mezi nimi a ventilátory.

Na víko přístrojové krabičky je doprostřed na délku hlavní desky nalepena izolační páska. Čtyřmi šrouby M4 je víko připevněno ke zbytku těla nabíječky.



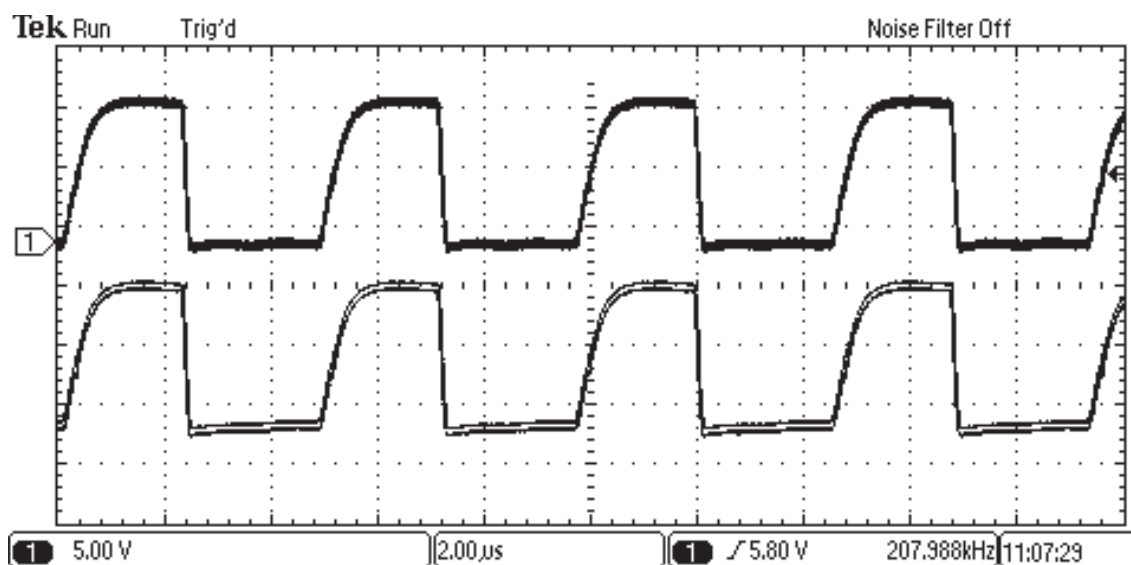
**Obr. 9-8 Sestavená nabíječka**



## 10 OŽIVOVÁNÍ

Před samotným oživením celé nabíječky bylo nutné zkontrolovat několik aspektů. Dříve než byl oživen celý měnič, bylo připojeno napájecí napětí 9 V z externího zdroje s omezením proudu. Tímto byla napájena řídicí deska spolu s integrovaným obvodem UC3845.

Nejdříve byl zkontrolován odebíraný proud ze zdroje. Jestliže vše pracuje správně, odebíraný proud by se měl přibližně rovnat 230 mA. Následně byl zkontrolován průběh na výstupu z budičů, který byl měřen mezi vývody gate a source na výkonových tranzistorech. Správný tvar tohoto signálu je na obr. 10-1.



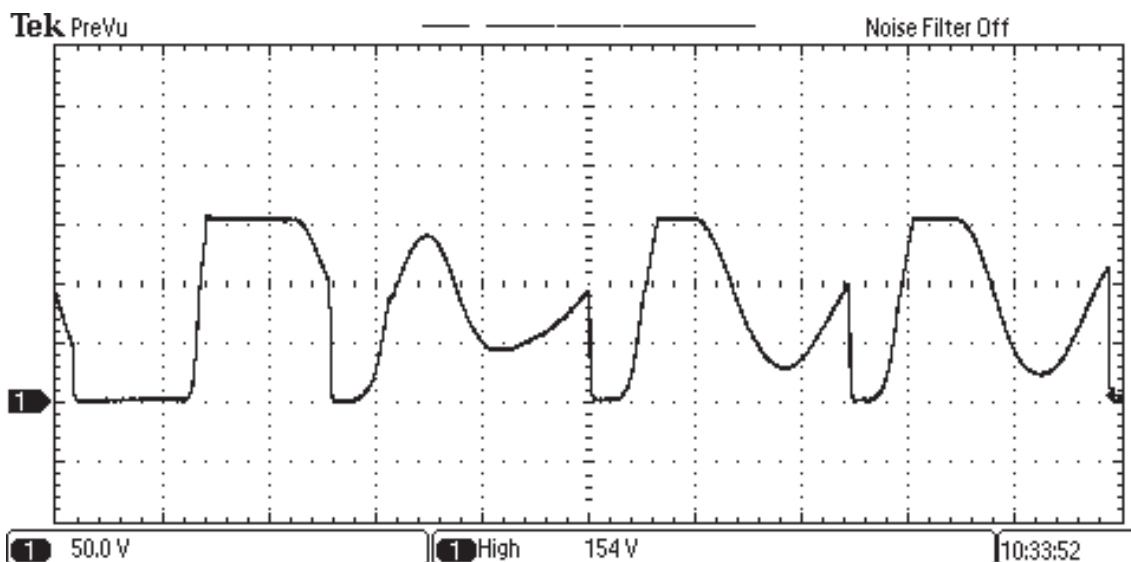
Obr. 10-1 Výstup z budičů

Náběžná hrana tohoto signálu připomíná přechodný děj v kondenzátoru. Toto je způsobené nabíjením parazitních kapacit tranzistorů. Z toho průběhu je možné také zkontrolovat frekvenci pulzně šířkové modulace, která byla zvolena na 200 kHz. V případě odlišné frekvence je nutné změnit rezistor R18 na hlavní desce.

Poté se přešlo o oživování samotného měniče, externí zdroj pro  $U_{cc}$  zůstal připojený a vstup celé nabíječky byl napájen přes autotransformátor. Výstupní svorky nabíječky byly rozpojeny (na prázdno).

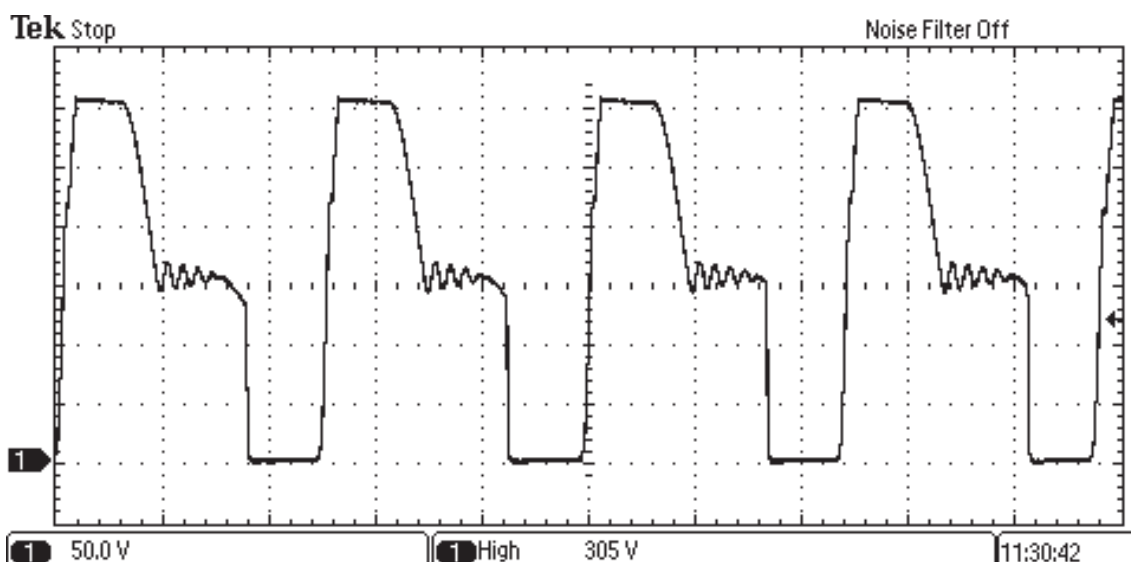
Při postupném zvyšování vstupního napětí pomocí autotransformátoru byly kontrolovány signály mezi drain a source u výkonových tranzistorů. Tyto signály musí být „ořezávány“ na hodnotu, která je právě nastavena autotransformátorem. Toto indikuje

správný chod nulových diod D1 a D2. Tento průběh je zaznamenán na obr. 10-2, při přibližně polovičním vstupním napětím. Průběh je tedy ořezáván na maximální hodnotu 160 V.



**Obr. 10-2 Signál mezi drain a source při polovičním napájecím napětím**

Spolu s chováním výkonových tranzistorů a nulových diod bylo při postupném najíždění kontrolována velikost výstupního napětí, která se musí zastavit na 14,4 V při stavu na prázdno. Pokud se tak nestalo, bylo nutné změnit velikosti odporu R4 – R6 na řídicí desce. A to tak, aby při výstupním napětím 14,4 V byl úbytek na rezistoru R6 přesně 5 V.



**Obr. 10-3 Signál mezi drain a source při zatížení**

Následně byla připojena na výstup nabíječky zátěž v podobě nastavitelných rezistorů s tokovým rozsahem, aby bylo možné nastavit jakýkoliv proud 0–50 A. Po zatížení byly znovu zkontrolovány průběhy na tranzistorech. Nesmí na nich vznikat velké překmity, které by je mohly poškodit. Na obr. 10-3 je zaznamenán správně vypadající průběh.

Jelikož vnitřní zdroj integrovaného obvodu UC3845 má velkou toleranci a může se u různých výrobců velmi lišit, není možné přesně vypočítat velikost rezistorů R7 až R12. Tyto odpory je nutné určit experimentálně na oživené nabíječce a individuálně pro každý kus. Poslední rozsah, tedy 50 A, je nastaven bočníkem na výstupu měřícího transformátoru proudu, tvořený rezistory R13 a R14. Ty je nutné nastavit tak, aby při nabíjecím proudu 50 A byl úbytek na tom to bočníku 2,5 V plus úbytek na diodě D19. Nejvyšší rozsah je omezován pouze nadproudovou ochranou uvnitř UC3845, která porovnává signál dovedený na vstup Vfb s vnitřní referencí 2,5 V.

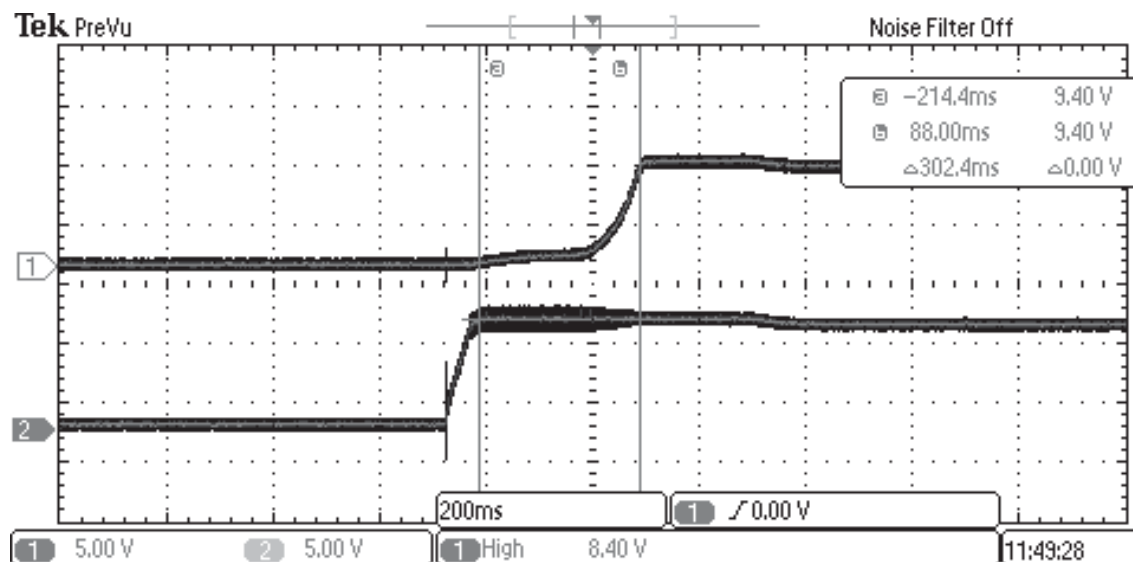
Bočník, měřící výstupní proud z nabíječky, byl vyráběn ručně. Nebylo tedy možné vyrobit bočník s přesnou požadovanou hodnotou. Toto je nutné vykompenzovat úpravou zesílení zesilovače IC2A. Zesílení musí být nastavené tak, aby bargraf rozsvěcel LED diody na požadovaných úrovních nabíjecího proudu. K docílení správného zobrazování nabíjecího proudu bylo možné, kromě úpravy zesílení zesilovače, změnit hodnotu maximálního vstupního signálu do integrovaného obvodu IO2, při které se rozsvítí všech 10 LED diod bargrafu. Rozsah vstupního signálu, na který reaguje integrovaný obvod, je možné nastavit rezistory na řídicí desce R30 a R31.

Ventilátory jsou spínány na základě signálu ze zesilovače IC2A. Tento signál je porovnáván komparátorem s referenční hodnotou, která je získávána děličem napětí tvořeným rezistory R33 a R34 z napájecího napětí  $U_{cc}=9$  V. Na základě předchozí změny zesílení zesilovače je nutné tento dělič upravit tak, aby ventilátory sepnuly při nabíjecím proudu 4 A.

Jestliže došlo ke změně vstupního rozsahu výše zmíněného integrovaného obvodu ovládající bargraf, je nutné upravit signál nesoucí informaci o velikosti napětí na baterii. Toto je možné provést změnou rezistorů R41 a R42, které slouží jako dělič napětí. Dělič musí ponížít 6,2 V na maximální hodnotu vstupního rozsahu IO2.

Pro správné první nabuzení měniče je před řídicí deskou zapojen tranzistor MOSFET s P kanálem. Tím dochází ke zpožděnému sepnutí napájení řídicí desky. Správné nastavení tohoto zpoždění bylo také zkontrolováno. Na obr. 10-4 je vrchní průběh

napájecího napětí řídicí desky a spodní průběh napětí  $U_{cc}$ , které generuje druhé sekundární vinutí transformátoru. Zpoždění by se mělo pohybovat v rozmezí 300–500 ms.



**Obr. 10-4 Zpožděné sepnutí napájení řídicí desky**

Při ožiování byl termostat, který chrání nabíječku před přehřátím, nahrazen vodičem. Pro ověření správné funkčnosti ochranného obvodu byl tento vodič přerušen. Musí se rozsvítit červená LED dioda a nabíjecí proud musí být roven nule.

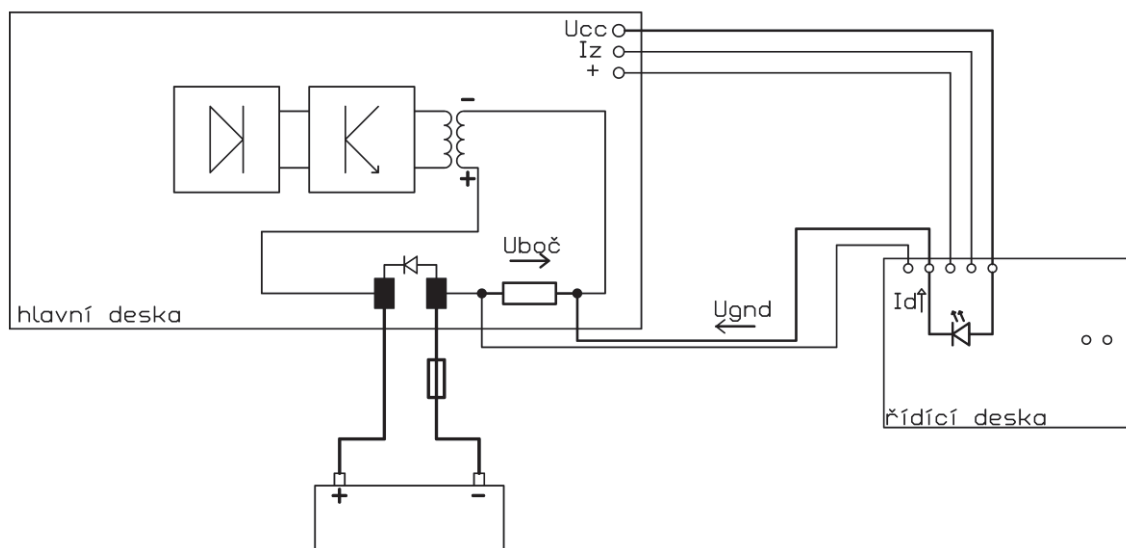
## 10.1 Komplikace při ožiování

Při ožiování jednotlivých nabíječek došlo k několika problémům, se kterými se v návrhu nepočítalo.

Po oživení celé nabíječky se došlo k tomu, že bargraf nerozsvěcí svoje diody podle předpokladu. Bočník měřící výstupní proud má velice malý odpor, a tím na něm vzniká malý úbytek napětí. Zejména při malých proudech do 5 A se úbytek na něm pohybuje 0-3 mV. Problémem bylo rušení, které zanášelo poměrně velkou chybu do tohoto signálu. Řešením bylo použití koaxiálního kabelu namísto původních obyčejných vodičů.

Toto zcela nevyřešilo problém s nesprávným zobrazováním proudu. Spolu s tím se ventilátory spínaly při odlišných nabíjecích proudech, v závislosti polohy přepínače pro zobrazení nabíjecího proudu nebo napětí (závislost na počtu rozsvícených LED diod). Problém spočíval ve velkém odporu zemního vodiče. Opletení koaxiálního kabelu zároveň slouží jako vodič GND pro celou řídicí desku. Při větším počtu rozsvícených

LED diod protéká tímto vodičem proud, který na něm vytváří úbytek napětí  $U_{gnd}$ . Tento úbytek je v opačném směru, než je úbytek na bočníku  $U_{boč}$ . Tyto úbytky se sečetly a výsledkem byla menší velikost signálu s informací o velikosti nabíjecího proudu na vstupu do operačního zesilovače IC2A. Tato situace je znázorněna na obr. 10-5.



**Obr. 10-5 Zmenšování úbytku napětí na bočníku**

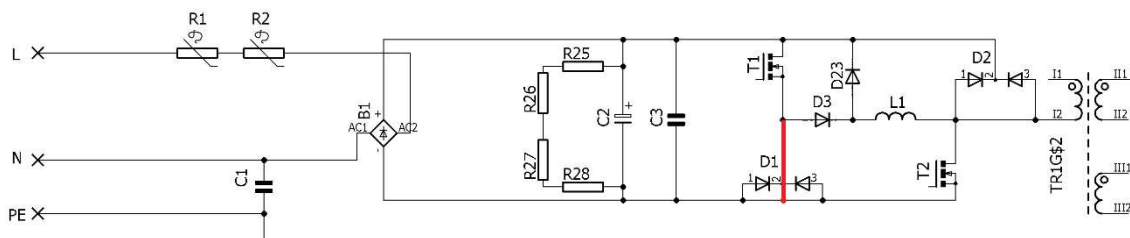
Problém byl vyřešen připojením jednoho vodiče paralelně k opletení koaxiálního kabelu, který snižuje jeho odpor. Toto bylo provedeno u všech nabíječek.

Při opakované zkoušce správného spínání ventilátorů docházelo k destrukci rezistoru R16, který omezuje špičky proudu při nabíjení kondenzátoru C14. Namísto původního vrstevného rezistoru byl použit drátový, který lépe odolává těmto špičkovým proudům.

U jedné z nabíječek docházelo k opětovnému ničení horního tranzistoru v měniči. Příčinou toho byly dva problémy s nulovou diodou D1. Hlavní deska je oboustranná a prokov v otvoru pro katodu nulové diody D1 byl poškozen. Dioda tedy nebyla v obvodu vůbec zapojena, což mělo za následek překmitý mezi drain a source tranzistoru T1 ve vypnutém stavu. Tyto překmitý překračovaly maximální dovolení napětí, a tím došlo k poškození tohoto tranzistoru. Diodu bylo tedy nutné propájet z obou stran desky.

Toto však nebyl jediný problém s tímto tranzistorem. I po vyřešení výše zmíněného problému docházelo k destrukci stejného tranzistoru. V tomto případě docházelo k přetížení tranzistoru, který spínal do zkratu. Na nulové diodě docházelo k přeskoku mezi vývody anody a katody, čímž došlo právě ke zkratu. Toto bylo způsobené sníženým povrchovým odporem pouzdra diody. Při dřívějších pokusech

o oživení této nabíječky mohlo dojít k zapadnutí zbytku vodiče mezi tyto vývody, následovalo jeho vypaření a tím nanesení nečistot na pouzdro nulové diody. Výměna diody zamezila tomuto problému. Na obr. 10-6 je vidět místo, kde docházelo k přeskoku mezi vývody diody, samotná dioda zůstala nepoškozená.



**Obr. 10-6 Zkrat na nulové diodě D1**

# 11 SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ

V tabulce 11-1 jsou uvedeny proudové rozsahy v jednotlivých nabíječkách. Hodnoty odpovídají hranici proudu, při které začíná docházet k omezování. To znamená v bodě, kdy začne klesat výstupní napětí. V prvních třech rozsazích je chyba řádově v jednotkách procent. Tyto chyby jsou pro nabíjení akumulátorů zanedbatelné.

**Tabulka 11-1 Nastavení proudových rozsahů nabíječky**

označení nabíječky		1	2	3	4
proudové rozsahy	1,5	1,47	1,45	1,56	1,5
	5	5,06	4,8	5,2	4,8
	15	15,2	15,1	15,1	15,5
	50	52,2	54	56	50,8

V následujících dvou tabulkách 11-2 a 11-3 jsou zapsány hodnoty proudu a napětí, při kterých dojde k rozsvícení určitého počtu diod. Tyto hodnoty jsou pouze přibližné, protože se špatně odhaduje stejný jas rozsvícení u diod. Ale i přesto největší chyby zobrazení dosahují maximálně 7,5 %, a to při nejmenších proudech, kdy malá absolutní chyba udělá větší relativní chybu. Bargraf plní pouze informativní funkci o průběhu nabíjení, proto je takováto přesnost více než dostatečná.

**Tabulka 11-2 Zobrazování nabíjecího proudu bargrafem**

		požadovaný proud	označení nabíječky			
			1	2	3	4
zobrazování proudu [počet rozsvícených LED diod]	1	2	2	1,9	1,9	2,1
	2	4	4,1	3,7	3,8	4
	3	6	6,1	5,7	6	6
	4	8	8,1	8	8	8
	5	12	12	12	12	12,5
	6	20	21	20	21	20
	7	28	29	28	27	27
	8	36	38	38	35	35
	9	44	45	46	44	43
	10	52	53	52	50	53

**Tabulka 11-3 Zobrazování nabíjecího napětí bargrafem**

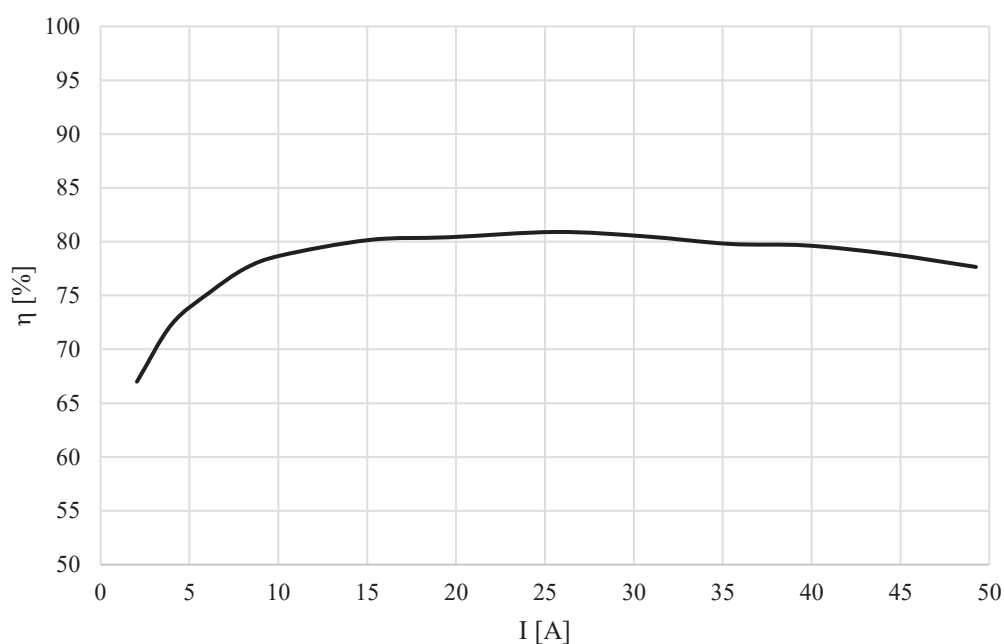
		požadované napětí	označení nabíječky			
			1	2	3	4
zobrazování napětí [počet rozsvícených LED diod]	1	8,8	8,7	8,9	8,8	8,8
	2	9,6	9,3	9,7	9,6	9,5
	3	10,3	9,9	10,5	10,1	10,25
	4	10,9	10,5	11,12	10,85	10,9
	5	11,7	11,2	11,8	11,77	11,65
	6	12,3	12,1	12,4	12,3	12,3
	7	13	12,8	13,2	13	13
	8	13,7	13,4	13,8	13,7	13,7
	9	14,2	14,2	14,4	14,2	14
	10	15	15	15	15	15

V tabulce 11-4 jsou uvedeny účinnosti pro různé hodnoty nabíjecího proudu. Jak bylo uvedeno v části optimalizace vysokofrekvenčního transformátoru, tato konfigurace je ideální pro provoz okolo 15 A, kde také dosahuje nejvyšší účinnosti. Během nízkého zatížení se více projeví vlastní spotřeba nabíječky, která snižuje celkovou účinnost. Při vysokých nabíjecích proudech účinnosti klesá z důvodu úbytků a ztrát na výstupních vodičích, přechodových odporech atd.

**Tabulka 11-4 Účinnost nabíječka v závislosti na zátěži**

I [A]	$\eta$ [%]
2,1	67,0
4,0	72,3
6,1	75,3
8,2	77,5
10,2	78,7
15,1	80,2
19,6	80,4
25,6	80,9
30,6	80,5
35,4	79,8
39,7	79,7
44,4	78,9
49,3	77,7



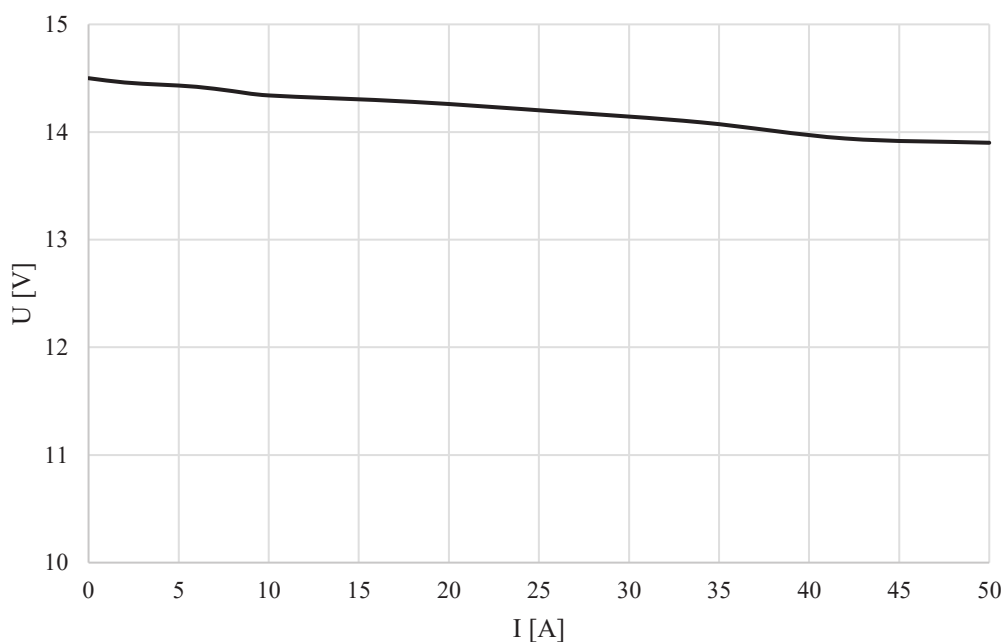


**Graf 11-1 Závislost účinnosti na zatížení nabíječky**

V následující tabulce 11-5 a grafu 11-2 jsou vyneseny zatěžovací charakteristiky nabíječek. V grafu je pro přehlednost pouze jedna nabíječka, a to číslo 3 (nejtvrdší). Vyrobené nabíječky jsou relativně tvrdé zdroje napětí. Největší úbytky napětí vznikají na výstupních vodičích. Tento úbytek může dosahovat až 0,3 V při maximálním zatížení.

**Tabulka 11-5 Zatěžovací charakteristika nabíječe**

označení nabíječky		nabíjecí napětí U [V]			
		1	2	3	4
nabíjecí proud I [A]	2	14,38	14,4	14,46	14,42
	4	14,32	14,34	14,44	14,36
	6	14,29	14,3	14,42	14,32
	8	14,25	14,26	14,38	14,25
	10	14,2	14,18	14,34	14,2
	18	14,13	14,06	14,28	14,05
	26	14	13,92	14,19	13,85
	34	13,88	13,76	14,09	13,75
	42	13,77	13,66	13,94	13,62
	50	13,55	13,47	13,9	13,5

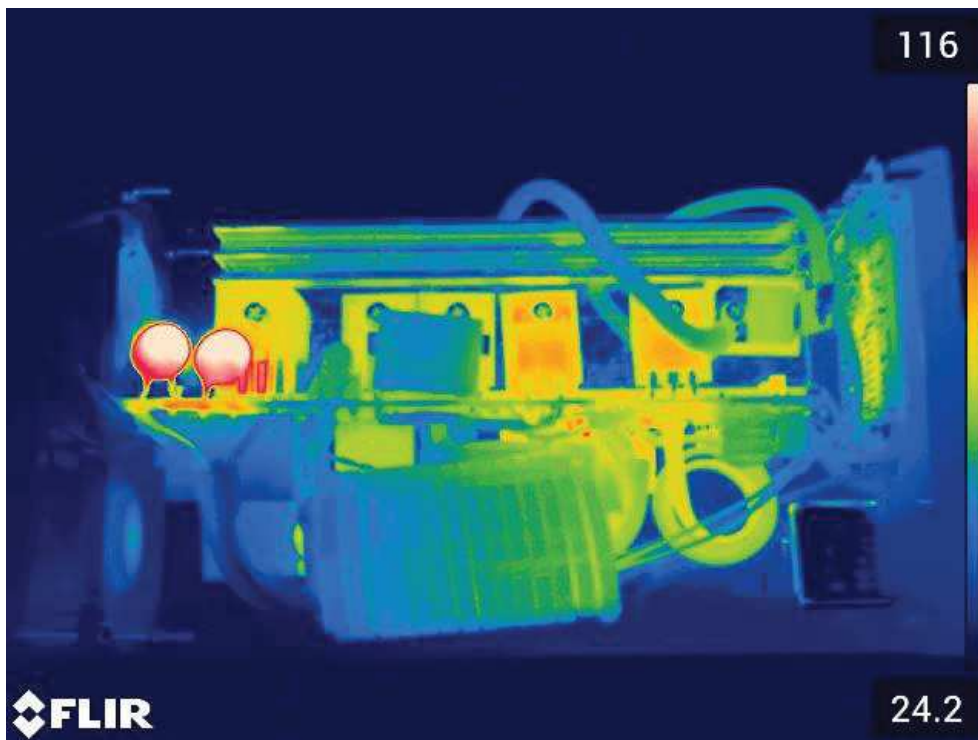


**Graf 11-2 Zatěžovací charakteristiky nabíječe**

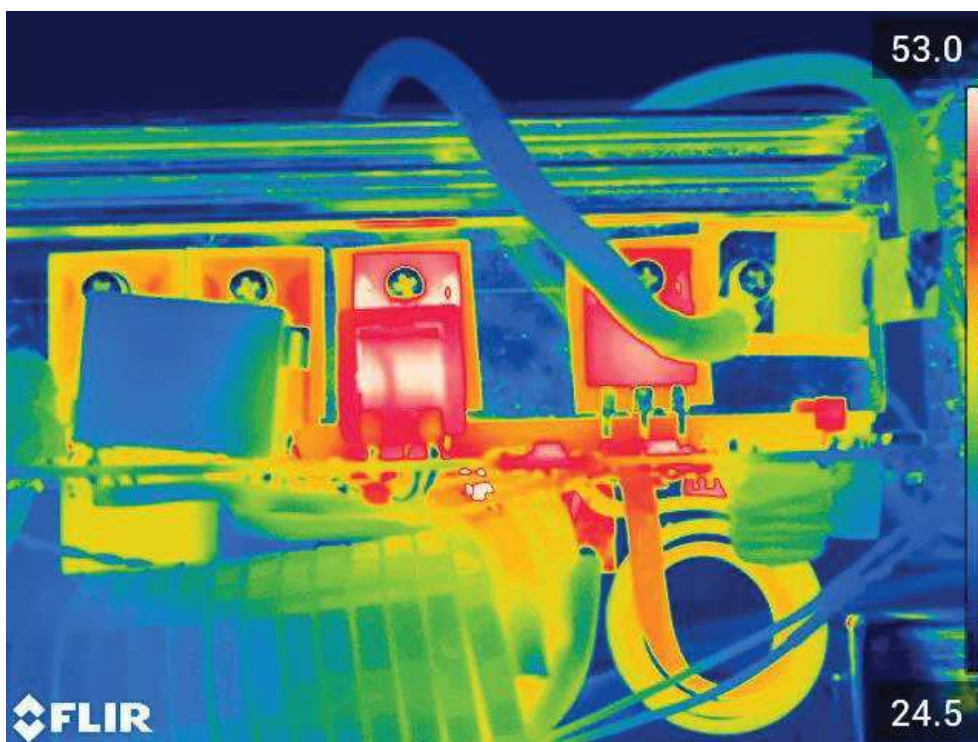
Na následujících fotografiích pořízených termokamerou je rozložení tepla v celé nabíječce. Na obr. 11-1 se nachází fotografie celé nabíječky. Tento obrázek má však nízkou vypovídající hodnotu, protože NTC termistory zvětšují rozsah teplot. Z tohoto důvodu byly pořízeny další snímky pouze tranzistorů, výkonových diod a transformátoru. Tyto součástky jsou nejvíc tepelně namáhány.

Při zatížení 15 A dosahují výkonové diody 53 °C, tato hodnota je dostatečně nízká pro trvalý chod. Při maximálním zatížení, tedy 50 A, tyto diody dosahují 106 °C po pěti minutách chodu. Tato teplota je pro krátkodobý chod přípustná. Dále se předpokládá, že při tomto zatížení bude nabíječka provozována maximálně 1–2 minuty.

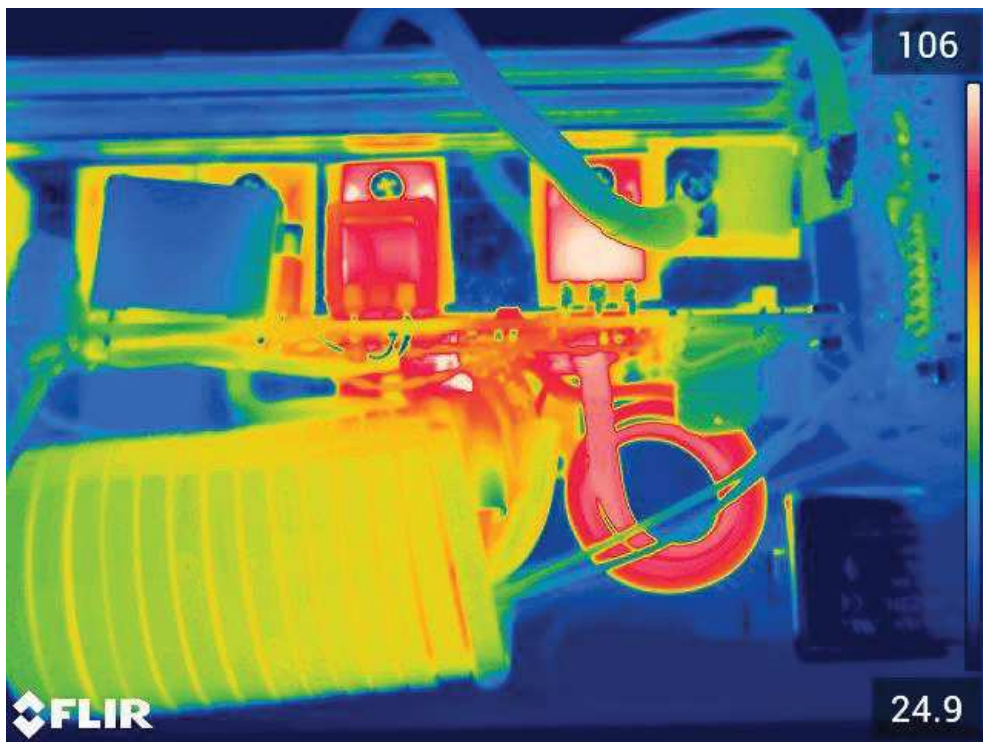
Tyto hodnoty byly změřeny při otevřené přístrojové skříňce. Ve skutečnosti budou teploty o něco nižší, protože skříňka způsobí lepší proud chladícího vzduchu kolem součástek a chladiče.



Obr. 11-1 Fotografie z termokamery po 15 minutách při nabíjecím proudu 15 A



Obr. 11-2 Detailní fotografie z termokamery po 15 minutách při nabíjecím proudu 15 A



Obr. 11-3 Detailní fotografie z termokamery po 5 minutách při nabíjecím proudu 50 A

## 12 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo upravit zapojení obvodu nabíječky olověných akumulátoru tak, aby bez problému plnilo svoji funkci. Na základě problému, které vykazoval navrhnutý prototyp, byly provedeny změny zejména v obvodu řídicí desky. Následně byl sestaven návrh desky plošných spojů pro výrobu nových řídicích desek.

Na hlavní desce bylo provedeno jen minimum změn, které bylo možné aplikovat na již vyrobených deskách.

Na základě návrhu byly vyrobeny nové desky plošných spojů pro všechny nabíječky. Řídicí desky byly následně osazeny a propojeny s upravenými hlavními deskami. Následovalo oživování, při kterém bylo nutné provést drobné úpravy na jednotlivých nabíječkách samostatně. Tyto úpravy jsou uvedeny v práci. Úspěšně byly oživeny všechny čtyři nabíječky, byly na nich provedeny testy správné funkčnosti a srovnávací měření důležitých veličin.

Dalším úkolem bylo provést optimalizaci vysokofrekvenčního transformátoru spolu se spínací frekvencí jednočinného propustného měniče. Byly provedeny celkem tři optimalizace, dvě analyticky a na jednu bylo nutné použít doplněk programu MS Excel – Solver. Variován byl počet závitů vinutí transformátoru, rozměry jádra transformátoru a spínací frekvence tranzistorů v měniči. Výsledky jednotlivých optimalizací jsou v práci vyhodnoceny. Uvedené algoritmy optimalizací je možné po drobné úpravě využít pro optimalizace jiných přístrojů.

Podle požadovaných parametrů nabíječky jsou nadimenzovány polovodičové součástky, které je nutné chladit. Následně byly určeny jejich ztráty, podle kterých byl vybrán potřebný chladič.

Práce obsahuje kompletní dokumentaci, podle které je možné vyrobit celou nabíječku.

## LITERATURA

- [1] VALA, Zdeněk. Nabíjení akumulátorů [online]. [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: [http://www.sossoukyjov.cz/data/File/VY\\_32\\_INOVACE\\_6a04.pdf](http://www.sossoukyjov.cz/data/File/VY_32_INOVACE_6a04.pdf)
- [2] Olověné akumulátory - ošetřování, opravy [online]. 2002 [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: [http://www.zvlasak.net/bat\\_opr\\_s.pdf](http://www.zvlasak.net/bat_opr_s.pdf)
- [3] KADLEC, J. Nabíječka autobaterií se spínaným zdrojem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.
- [4] KOPULETÝ, O. Nabíječka pro olověný akumulátor. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Ondřejček.
- [5] FAKTOR, Zdeněk. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-860-5691-0.

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

PWM ... pulzně šířková modulace

## Symbols:

$B_{max}$	...	maximální magnetická indukce	[T]
$B_r$	...	remanentní indukce	[T]
$C$	...	kapacita	[F]
$f$	...	frekvence	[Hz]
$f_0$	...	frekvence pro dané ztráty	[Hz]
$i_\mu$	...	magnetizační proud	[A]
$i_1$	...	proud procházející primárním vinutím	[A]
$i_2$	...	proud procházející sekundárním vinutím v měniči	[A]
$I_2$	...	výstupní proud nabíječky	[A]
$i_3$	...	proud procházející nulovou diodou v měniči	[A]
$I_a$	...	nabíjecí proud	[A]
$i_c$	...	proud procházející tranzistory	[A]
$I_d$	...	střední hodnota vstupního proudu	[A]
$i_{DO}$	...	proud protékající novými diodami	[A]
$I_{ef}$	...	efektivní hodnota proudu	[A]
$i_L$	...	proud tlumivkou	[A]
$I_Z$	...	výstupní proud měniče	[A]
$k$	...	převod transformátoru	[-]
$k_{pCu}$	...	činitel plnění mědi	[-]
$L_1$	...	indukčnost primárního vinutí	[H]
$l_{Cu}$	...	délka magnetického obvodu	[m]
$N_1$	...	počet závitů primárního vinutí	[z]
$N_2$	...	počet závitů sekundárního vinutí	[z]
$p$	...	převod transformátoru	[-]
$P_{Cu}$	...	Joulovy ztráty ve vinutí	[W]
$P_{Fe}$	...	ztráty v železe	[W]

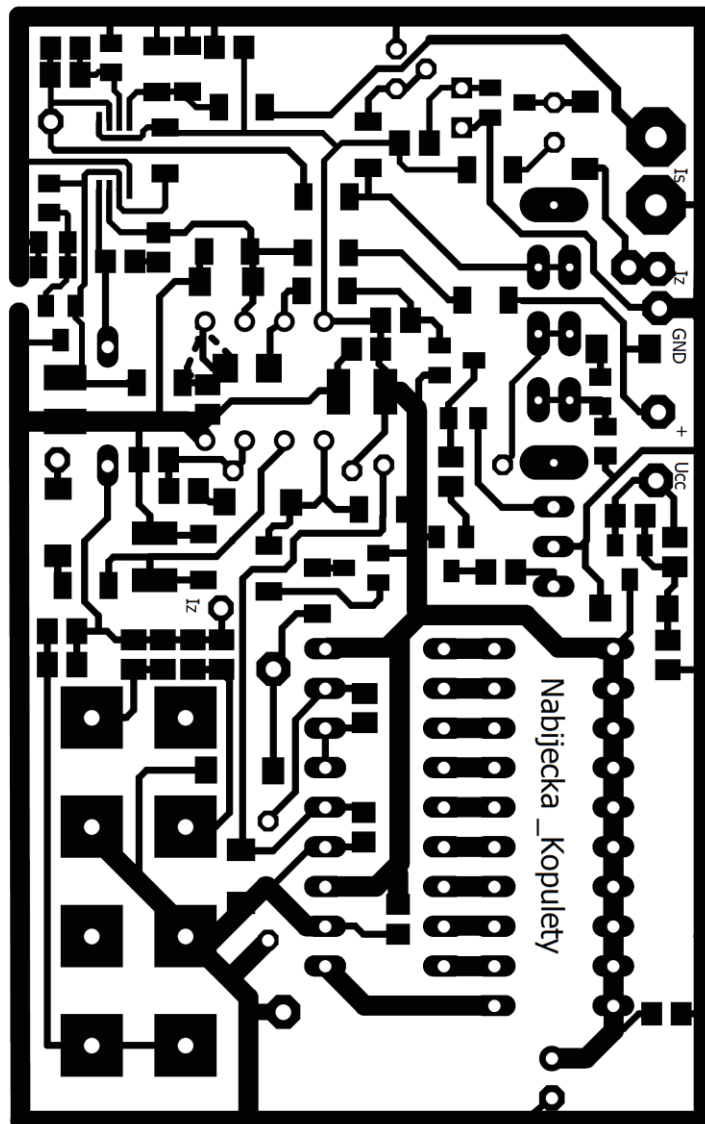
$p_{Fe}$	...	měrné ztráty v železe	[W/m <sup>2</sup> ]
$P_{off}$	...	vypínací ztráty tranzistoru	[W]
$P_T$	...	přepínací ztráty v transformátoru	[W]
$Q$	...	náboj	[C]
$R_{cu}$	...	odpor vinutí	[Ω]
$R_D$	...	odpor diody v propustném směru	[Ω]
$R_{DS}$	...	odpor tranzistoru v zapnutém stavu	[Ω]
$R_{vH}$	...	tepelný odpor chladiče	[K/W]
$R_{vCH}$	...	tepelný odpor mezi pouzdem součástky a chladičem	[K/W]
$R_{vjc}$	...	tepelný odpor mezi čipem a pouzdem součástky	[K/W]
$s$	...	střída	[-]
$S_{Fe}$	...	průřez železa	[m <sup>2</sup> ]
$s_{max}$	...	maximální střída měniče	[-]
$S_o$	...	průřez okna transformátoru	[m <sup>2</sup> ]
$T$	...	perioda	[s]
$t_{d(off)}$	...	zpoždění tranzistoru	[s]
$t_f$	...	doba sestupné hrany tranzistoru	[s]
$t_{off}$	...	doba vypnutí	[s]
$t_{on}$	...	doba sepnutí	[s]
$u_1$	...	vstupní napětí měniče	[V]
$u_2$	...	napětí na výstupu transformátoru	[V]
$u_3$	...	napětí na výstupní diodě	[V]
$U_a$	...	nabíjecí napětí	[V]
$U_{cc}$	...	napájecí napětí vnitřních obvodů nabíječky	[V]
$U_D$	...	vstupní napětí nabíječky	[V]
$U_d$	...	střední hodnota napájecího napětí	[V]
$U_p$	...	prahové napětí diody	[V]
$u_s$	...	střední hodnota výstupního napětí měniče	[V]
$u_{s1}$	...	střední hodnota výstupního napětí měniče	[V]

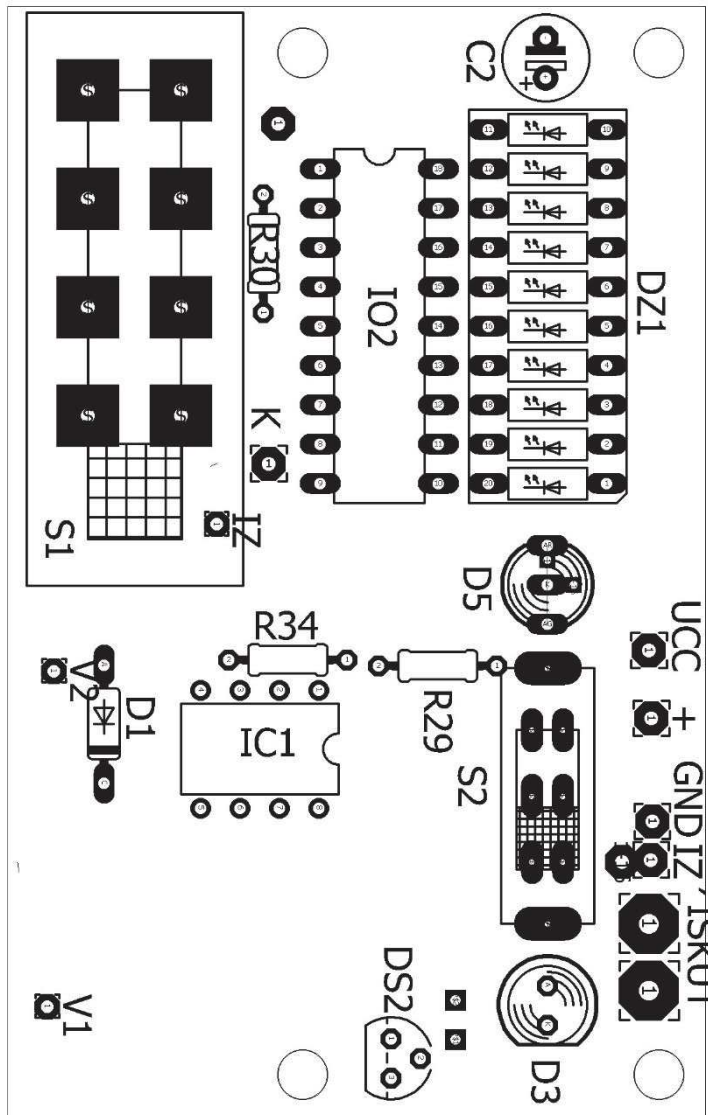


$u_{s2}$	...	střední hodnota výstupního napětí měniče	[V]
$V_{DS}$	...	napětí mezi drain a source	[V]
$V_{Fe}$	...	objem jádra transformátoru	[m <sup>2</sup> ]
$V_{GS}$	...	napětí mezi gate a source	[V]
$V_{RRM}$	...	maximální závěrné napětí diody	[V]
$W_{off}$	...	energie přeměňující se na teplo při vyp. tranzistoru	[J]
$\delta$	...	relativní zvlnění proudu	[-]
$\Delta B_0$	...	změna magnetické indukce pro dané ztráty	[T]
$\Delta B_{max}$	...	maximální změna magnetické indukce	[T]
$\Delta T_H$	...	teplotní spád na chladiči	[K]
$\Delta T_{CH}$	...	teplotní spád mezi chladičem a součástkou	[K]
$\Delta T_{jc}$	...	teplotní spád mezi čipem a pouzdrem součástky	[K]
$\Delta T_{jmax}$	...	maximální teplotní spád na součástce	[K]
$\lambda$	...	vodivost vzduchové mezery	[H]
$\rho$	...	měrná rezistivita	[ $\Omega/m$ ]
$\sigma$	...	proudová hustota	[A/m <sup>2</sup> ]
$\varphi$	...	magnetický tok	[Wb]
$\psi$	...	spřažený magnetický tok	[Wb]

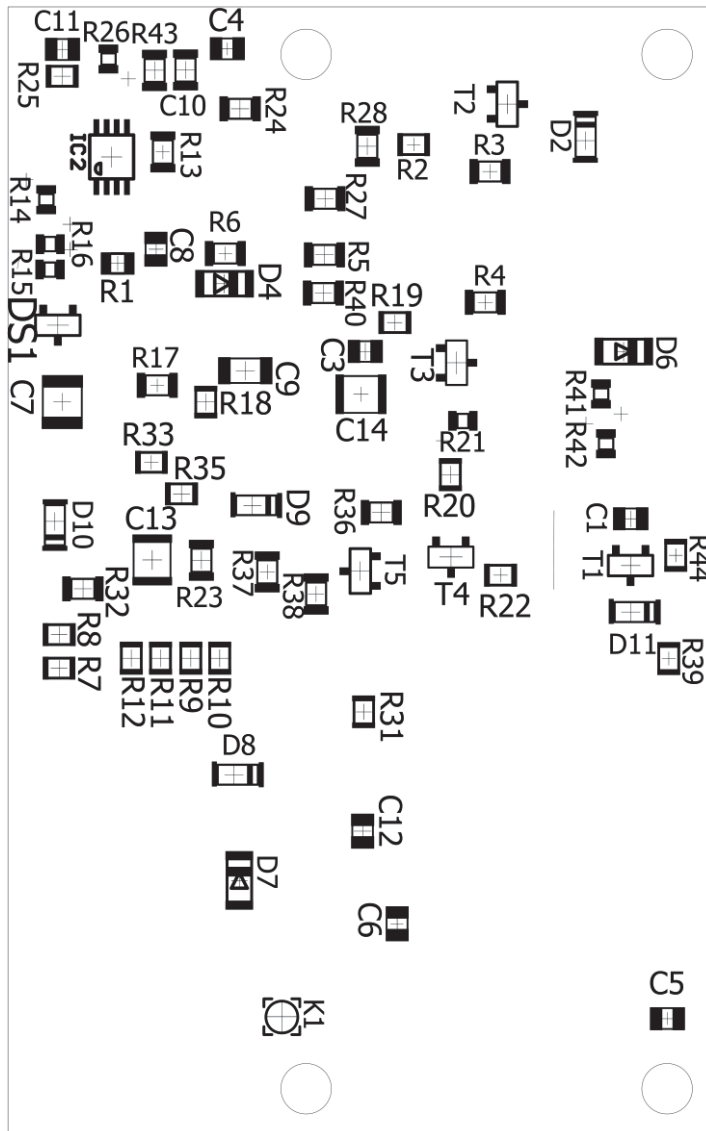
# SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č.1 Deska plošných spojů řídicí desky
- Příloha č.2 Osazovací plán řídicí desky TOP
- Příloha č.3 Osazovací plán řídicí desky BOTTOM
- Příloha č.4 Seznam součástí řídicí desky
- Příloha č.5 Deska plošných spojů hlavní desky
- Příloha č.6 Osazovací plán hlavní desky TOP
- Příloha č.7 Osazovací plán hlavní desky BOTTOM
- Příloha č.8 Seznam součástí hlavní desky





**Příloha č.3 Osazovací plán řídicí desky BOTTOM**



#### Příloha č.4 Seznam součástek řídicí desky

Rezistory		
R1	1k5	SMD 0805
R2	18k	SMD 0805
R3	820	SMD 1206
R4	3k3	SMD 1206
R5	12k	SMD 1206
R6	8k2	SMD 1206
R7	560-910	SMD 0805
R8		SMD 0805
R9	750-1k	SMD 0805
R10		SMD 0805
R11	1k-1k5	SMD 0805
R12		SMD 0805
R13	1k	SMD 1206
R14	10k	SMD 0805
R15	10k	SMD 0805
R16	rozpoj	SMD 0805
R17	680	SMD 1206
R18	47k	SMD 0805
R19	4k7	SMD 0805
R20	8k2	SMD 0805
R21	390	SMD 0805
R22	390	SMD 0805
R23	100k	SMD 0805
R24	100	SMD 1206
R25	20k	SMD 0805
R26	100	SMD 1206
R27	1k	SMD 1206
R28	360	SMD 1206
R29	100	0204/0,5W
R30	2k2	0204/0,5W
R31	2k2	SMD 0805
R32	4k7	SMD 1206
R33	1k2	SMD 0805
R34	8k2	0204/0,5W
R35	2k2	SMD 0805
R36		SMD 1206
R37	62k	SMD 1206
R38	82	SMD 1206

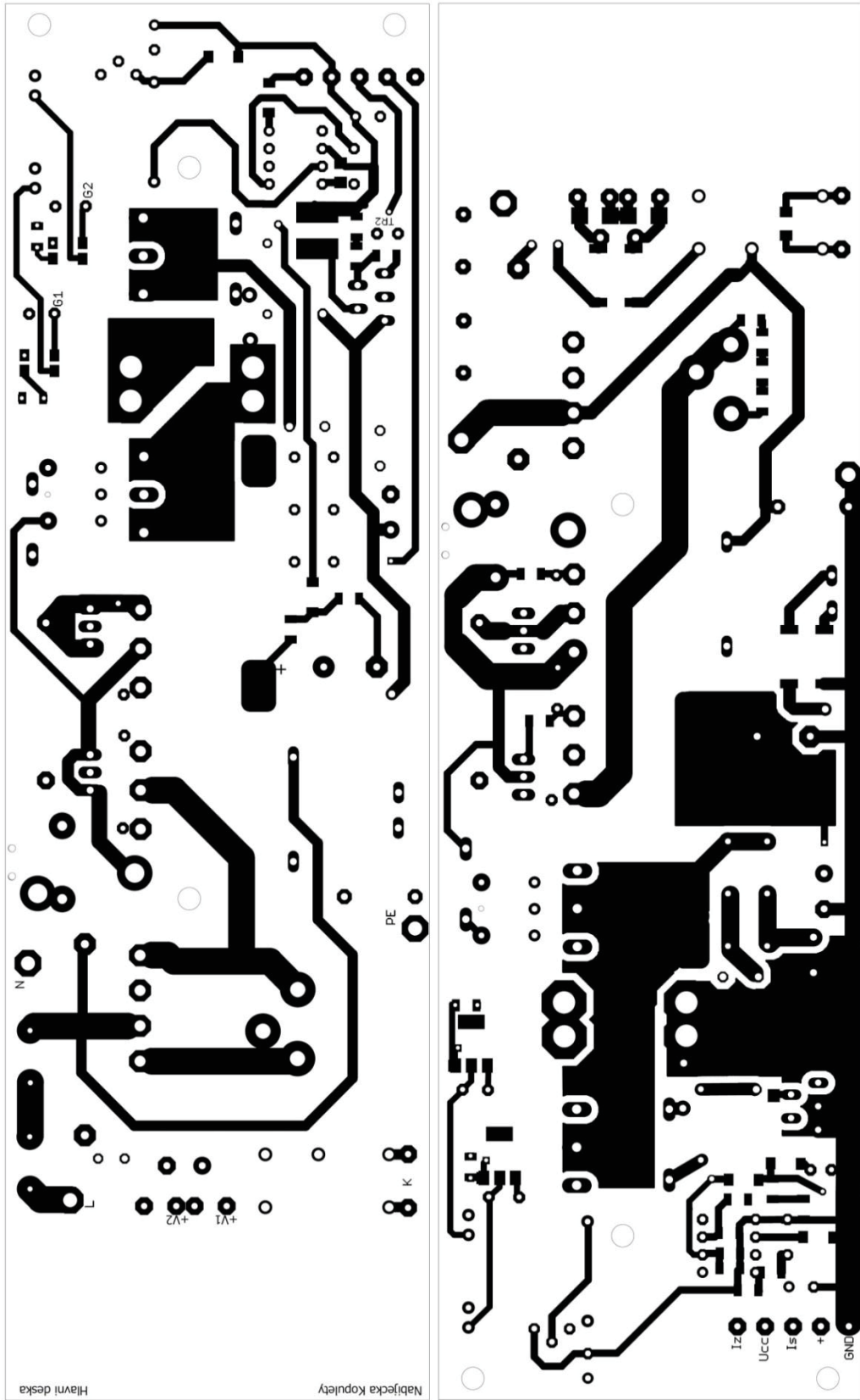
R39	500k	SMD 0805
R40	8k2	SMD 1206
R41	1k5	SMD 0805
R42	1k	SMD 0805
Kondenzátory		
C1	1u	SMD 1206
C2	100u/25V	elektrolitický
C3	100n	SMD 1206
C4	1u	SMD 1206
C5	1u	SMD 1206
C6	1u	SMD 1206
C7	4u7	SMD 1206
C8	47n	SMD 1206
C9	1u	SMD 1206
C10	100n	SMD 1206
C11	100n	SMD 1206
C12	100n	SMD 1206
C13	10u	SMD 1206
C14	10u	SMD 1206
Diody		
D1	1N4148	SOT80
D2	1N4148	SOT80
D3	LED červená	DIL
D4	8V2	SOT80
D5	LED L-59RGC	DIL
D6	8V2	SOT80
D7	4V7	SOT80
D8	BAT46	SOT80
D9	BAT46	SOT80
Integrované obvody		
DS1	TL431	TO-92
DS1	TLV431	SOT23
IO2	LM3914	DIL18
IC1	LM393N	DIL08
IC2	MAX44251	uMAX8

Tranzistory		
T1	MOSFET P	SOT23
T2	BC847	SOT23
T3	BC807	SOT23
T4	BC807	SOT23
T5	BC327	SOT23

<sup>1</sup>Pro paralelní kombinace rezistorů R<sub>7</sub> až R<sub>12</sub> jsou zadané přibližné rozsahy, přesné hodnoty se určí při ožívování, aby odpovídaly požadované proudové rozsahy.

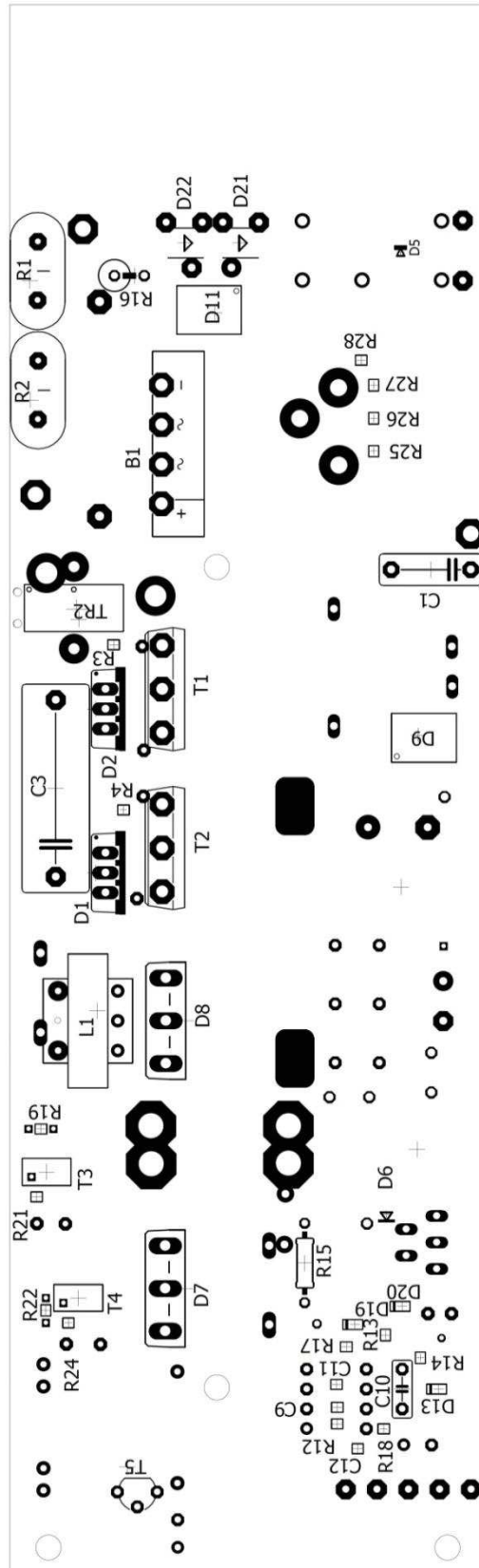
<sup>2</sup>Přesná hodnota R<sub>27</sub> se určí podle prodlevy spínání ventilátorů (při výstupním proudu 4 A, by měly ventilátory spustit do 10 s).

Příloha č.5 Deska plošných spojů hlavní desky









**Příloha č.8 Seznam součástek hlavní desky**

Rezistory			C9	10n	SMD 1206
R1	termistor 33R	B57237S0330M	C10	330p	svitkový
R2	termistor 33R	B57237S0330M	C11	1n	SMD 1206
R3	2K2	SMD 1206	C12	100n	SMD 1206
R4	2K2	SMD 1206	C13	220u/25V	elektrolytický
R5	22	0512/2W	C14	1u5/275V	svitkový
R6	22	0512/2W	C15	100u/63V	elektrolytický
R7	4k7	SMD 1206	C16	1u5/275V	SMD 1206
R8	10k	SMD 1206	<b>Diody</b>		
R9	6k8	SMD 1206	D1	MUR1660CT	TO220
R10	680	SMD 1206	D2	MUR1660CT	TO220
R11	1k2	SMD 1206	D3	BYV26C	SOD57
R12	10k	SMD 1206	D4	BYV26C	SOD57
R13	4R7	SMD 1206	D5	1N4148	SOT80
R14	3R3	SMD 1206	D6	SK36A	SMA
R15	6R8	0512/2W	D7	STTH6003CW	SOT93
R16	10	0512/2W	D8	STTH6003CW	SOT93
R17	100	SMD 1206	D10	1N4148	SOT80
R18	22k//39k <sup>3</sup>	SMD 1206	D12	1N4148	SOT80
R19	33	SMD 1206	D13	BAT46	SOT80
R20	33	SMD 1206	D14	BAT46	SOT80
R21	470	SMD 1206	D15	BAT46	SOT80
R22	33	SMD 1206	D16	BAT46	SOT80
R23	33	SMD 1206	D17	BAT46	SOT80
R24	470	SMD 1206	D18	BAT46	SOT80
R25	47k	SMD 1206	D19	BAT46	SOT80
R26	47k	SMD 1206	D20	BAT46	SOT80
R27	47k	SMD 1206	<b>Transily</b>		
R28	47k	SMD 1206	D21	SM6T27A SMD	SMB
R29	60m	bočník	D22	SM6T27A SMD	SMB
<b>Kondenzátory</b>			<b>Diodové můstky</b>		
C1	4n7	svitkový	B1	KBU8G	
C2	470u/400V	elektrolytický	D9	B250C1000 SMD	SMD
C3	470n/630V	svitkový	D11	B250C1000 SMD	SMD
C4	470u/63V	elektrolytický	<b>Integrované obvody</b>		
C5	680p/630V	svitkový	IC1	LM2576T-ADJ	TO220-5
C6	680p/630V	svitkový	IO2	UC-3845	DIL8
C7	22u/25V	elektrolytický			
C8	330u/50V	elektrolytický			

Indukční součástky		
L3	100uH TL.SMT75	SMT75
TR3	TRHEI202-1X9	EE20
Relé		
K1	RM40-1CO-6VOLT	

<sup>3</sup>Pro rezistor  $R_{18}$  je zadána pouze přibližná hodnota, přesná se určí při oživování, aby odpovídala pracovní frekvence integrovaného obvodu UC-3845 (400 kHz) a zároveň frekvence pulzně šířkové modulace (200 kHz).