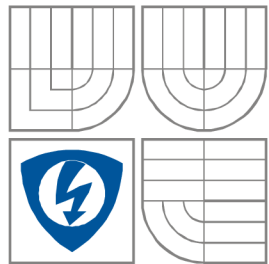


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## OVĚŘOVACÍ SÉRIE RYCHLONABÍJEČŮ PRO OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY 12V A 6V

VERIFICATION SERIES OF FAST-CHARGERS FOR LEAD-ACID ACCUMULATORS 12V AND 6V

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Tomáš Benada

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

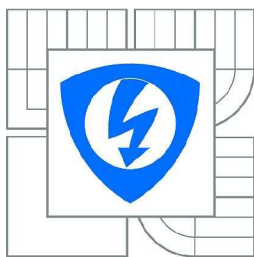
BRNO, 2012

## **Abstrakt**

Tato práce je konstrukčním řešením inteligentní rychlonabíječky olověných akumulátorů. Jsou tu uvedeny výpočty jednotlivých prvků. Základ nabíječky tvoří spínaný zdroj, proto je nabíječka snadno přenosná, lehká a její rozměry jsou malé. Nabíjí akumulátor pomocí metody konstantního napětí, s proudovým omezením 0,5A, 5A, 10A, 50A. Proud 50A využijeme v zimě při startování automobilu, kdy baterie nedodá dostatečný proud. Pro zpětnou kontrolu jsou v přední straně umístěny 3 kontrolní LED diody popisující různé stavy nabíječky. Zařízení také obsahuje bezpečnostní ochrany pro samotnou nabíječku, napájecí síť i baterii.

## **Abstract**

This thesis is an engineering design of an intelligent fast-charger for lead-acid accumulators. It contains calculations of each component. The switching power supply is the mainstay of the charger that makes the charger portable, lightweight and small. The Intelligent fast-charger for lead-acid accumulators charges the accumulator by method of constant voltage with current limitation of 0,5A, 5A, 10A, 50A. 50A current is used in winter during starting of a car, when the battery can't provide sufficient current. There are three LEDs placed on the front side of the charger reflecting status of the device. The device comprises safety protection for the charger, supply network and battery.



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Bc. Tomáš Benada

**ID:** 98209

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Ověřovací série rychlonabíječů pro olovené akumulátory 12V a 6V**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte nezbytné úpravy stávajících řídicích obvodů vyvinuté nabíječky tak, aby byly odstraněny problémy s rozběhem zařízení při sníženém síťovém napětí.
2. Realizujte 10ks nabíječů dříve rozpracovaných na ÚVEE včetně finální montáže do skříněk.
3. Na jednom kusu proveďte podrobná měření průběhů v silovém obvodu, v řídicích obvodech a další měření (výstupní napětí, proud, účinnost, tvar vstupního fázového proudu atd., odezvy regulátorů atd.).
4. Vypracujte kompletní technickou dokumentaci k přístroji a srovnáním rozptylu parametrů jednotlivých kusů proveďte analýzu reprodukovatelnosti výroby.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

**Termín zadání:** 21.9.2011

**Termín odevzdání:** 21.5.2012

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

**Konzultanti diplomové práce:**

**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.

## **Klíčová slova**

Olověný akumulátor; nabíječka; jednopulsní propustný měnič, spínaný zdroj; nabíjení konstantním napětím; proudové omezení; řídicí obvod; proudový omezovač; tranzistory MOS-FET,

## **Keywords**

Lead accumulator, charger, one-pulsed conducting changer, switching source, charging by constantly voltage, current limitation; control circuit; current limiter ; transistors MOS-FET

## **Bibliografická citace**

BENADA, T. *Ověřovací série rychlonabíječů pro olověné akumulátory 12V a 6V*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 54 s. Vedoucí Diplomové práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Ověřovací série rychlonabíječů pro olovené akumulátory 12V a 6V 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 diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

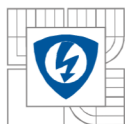
Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

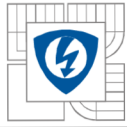
V Brně dne .....

Podpis autora .....



## OBSAH

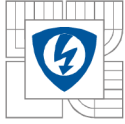
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 ZPŮSOB NABÍJENÍ OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ A JEJICH VLASTNOSTI</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2 KONSTRUKCE OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ</b> .....	<b>13</b>
<b>2.3 VYBÍJECÍ A NABÍJECÍ CHARAKTERISTIKY</b> .....	<b>14</b>
<b>3 SILOVÝ OBVOD AUTONABÍJEČKY</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 VÝKONOVÝ TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 TLUMIVKA NA PRIMÁRNÍ STRANĚ MĚNIČE</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3 PROUDOVÝ TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4 BUDICÍ TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>25</b>
<b>4 CHLAZENÍ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK</b> .....	<b>26</b>
<b>4.1 DIMENZOVÁNÍ DIOD SEKUNDÁRNÍHO USMĚRŇOVAČE:</b> .....	<b>26</b>
<b>4.2 ZTRÁTY TRANZISTORU:</b> .....	<b>27</b>
<b>4.3 MODIFIKACE CHLAZENÍ POLOVODIČOVÝCH PRVKŮ</b> .....	<b>28</b>
<b>5 DESKA REGULÁTORU NAPĚTÍ</b> .....	<b>29</b>
<b>6 PROVEDENÉ MODIFIKACE POMOCNÉHO NAPÁJENÍ</b> .....	<b>30</b>
<b>7 TECHNICKÁ DOKUMENTACE</b> .....	<b>32</b>
<b>8 ZÁKLADNÍ MĚŘENÍ</b> .....	<b>36</b>
<b>9 ZÁVĚR</b> .....	<b>41</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>42</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>43</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr.2.1.1 Nabíjecí a vybíjecí charakteristika olověného akumulátoru .....</i>	<i>12</i>
<i>Obr.2.2.1 Konstrukce klasického olověného akumulátoru [5] .....</i>	<i>13</i>
<i>Obr.2.3.1 Vybíjecí křivka startovacího olověného akumulátoru.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr.2.3.2 Vybíjecí křivka akumulátoru při nízkých teplotách, <math>I_N=0,1\%</math> .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr.3.1: Schéma zapojení výkonové části nabíječky .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr.3.1.1: Proud, který teče jádrem <math>I_\mu</math> primárním vinutím <math>I_1</math> a sekundárním vinutím <math>I_2</math> výkonového transformátoru.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3.2.1: Vliv parazitních kapacit tranzistorů .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3.3.1: Zkreslení informace o pilovitém zvlnění, vlivem proudového transformátoru.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr.6.1: Změny v napájecím obvodu řídicí desky.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr.6.2: Zpoždění sepnutí řídicí desky .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr.6.3: Schéma zapojení zpoždění řídicí desky.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr.7.1: Výkonový transformátor .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr.7.2: Tlumivka .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr.7.3: Přídavná indukčnost .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr.7.4: Vzduchová cívka .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr.7.5: Proudový transformátor .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr.7.6: Budící transformátor .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr.8.1: Proudový odběr zařízení ze sítě.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr.8.2: Napěťový signál proudového trafo .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr.8.3: Napěťový překmit na D7.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr.8.5: Napěťový překmit na D8.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr.8.7: Napětí GE .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr.8.8: Napětí CE .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr.10.1: Profil hliníkového chladiče.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr.10.2: Před zátěží výkonový rezistor 82 <math>\Omega/5w</math>.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr.10.2: Deska plošných spojů strana A-TOP</i>	<i>strana B-Bottom</i> ..... <i>45</i>
<i>Obr.10.3: řídicí deska cesty plošného spoje.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr.10.4: řídicí deska umístění součástek Top .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr.10.5: řídicí deska umístění součástek Bottom.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 10.6: Schéma hlavní desky.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr.10.7: Schéma zapojení desky regulátoru napětí.....</i>	<i>48</i>





---

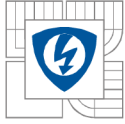
## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulky 10.1: Seznam součástek hlavní desky .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulky 10.2: Seznam součástek ovládací desky .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulky 10.3: Seznam doplňkových součástek.....</i>	<i>53</i>



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$A_l$	součinitel indukčnosti	
$B_{max}$	maximální indukce	[T]
$s_{max}$	maximální střída	[-]
$U_{výst}$	výstupní napětí výkonového transformátoru	[V]
$L_l$	indukčnost primárního vinutí	[H]
$I_{\mu l}$	magnetizační proud výkonového trafo	[A]
$I_{1ef}$	efektivní hodnota primárního proudu výk. tr.	[A]
$I_{2ef}$	efektivní hodnota sekundárního proudu výk. tr.	[A]
$p$	převod výk. tr.	[-]
$J$	proudová hustota	[A/mm <sup>2</sup> ]
$S_{prim}$	průřez prim.vinutí výk.tr.	[mm <sup>2</sup> ]
$S_{sek}$	průřez sek.vinutí výk.tr.	[mm <sup>2</sup> ]
$\delta$	průměr svazku vysokofrekvenčního vodiče	[mm]
$n_{prim}$	počet vodičů prim. vysokofrekvenčního vodiče	[-]
$n_{sek}$	počet vodičů sek. vysokofrekvenčního vodiče	[-]
$I_{\mu p}$	magnetizační proud přídavné tlumivky	[A]
$L_p$	indukčnost přídavné tlumivky	[H]
$L$	indukčnost celé primární strany	[H]
$N_p$	počet závitů přídavné tlumivky	[-]
$R_v$	odpor vzduchové mezery přídavné tlumivky	[Ω]
$A$	součinitel magnetické indukce	[]
$l_v$	délka vzduchové mezery	[mm]
$I_{\mu pef}$	efektivní hodnota proudu přídavné tlumivky	[A]
$d_{Lp}$	průřez vodiče přídavné tlumivky	[mm]
$I_{\mu l2max}$	magnetizační proud proudového transformátoru	[A]
$I_{1max}$	transformovaný proud primárního proudu výk. tr.	[A]
$I_{1max}$	maximální amplituda proudu primárního proudu výk. tr.	[A]
$I_{2max}$	maximální amplituda proudu sekundárního proudu výk. tr.	[A]
$t_l$	maximální doba zapnutí při plné střídě	[s]
$R$	elektrický odpor	[Ω]
$P$	elektrický výkon	[W]
$Q$	elektrický náboj	[C]
$C$	kapacita	[F]
$f$	frekvence	[Hz]
<b>GND</b>	uzel slučující funkci ochranného vodiče a záporného pólu	
$I_z$	svorka ovládací desky, která řídí nabíjecí proud	
$U_{ref}$	referenční napětí řídicího obvodu	
$U_{cc}$	napájecí napětí pro řídicí obvod	
<b>SMD</b>	součástky pro povrchovou montáž (Surface Mount Device)	



# 1 ÚVOD

V této práci se podrobně seznámíme s navrženou nabíječkou olověných akumulátorů, ve které je hlavní jednotkou spínaný zdroj. Řízení nabíječky je nastaveno pro nabíjení olověných akumulátorů. Řízení spočívá v nadřízené napěťové smyčce a podřízené proudové smyčce. Pomocí prvního přepínače volíme mezi 6V a 12V baterií. Pomocí druhého čtyřstupňového přepínače je možno omezovat nabíjecí proud pro různé kapacity baterií, nabíječka je vhodná pro většinu vyráběných kapacit a typů olověných akumulátorů.

Použitá kaskádní regulace s nadřízenou napěťovou a podřízenou proudovou regulační smyčkou zajišťuje, že nemůže dojít k přebití akumulátoru (i když je nabíječka k akumulátoru připojena na dlouhou dobu). Spínaný zdroj je realizován jako jednočinný propustný měnič s transformátorem. Jádrem transformátoru je dvojité využito – pro samotný transformátor a také pro výstupní tlumivku. Spínací frekvence tranzistorů se blíží 150kHz. Tím je dosaženo malých rozměrů a hmotnosti. V rámci této diplomové práce bylo vyrobeno několik kusů nabíječek. Nabíječka je dále vybavena řídicí jednotkou, regulačními obvody pro silový obvod měniče a elektronickými ochranami. Výhodnou vlastností nabíječky je schopnost dodávat dostatečný proud pro pomoc akumulátoru při startování automobilu (okolo 50A). Tato výhoda se uplatní zejména v zimním období, kdy klesající teplota zvyšuje vnitřní odpor olověných akumulátorů a ty pak nejsou schopny dodat dostatečný proud.

## 2 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY

### 2.1 Způsob nabíjení olověných akumulátorů a jejich vlastnosti

Olověné akumulátory se velmi často používají jako sekundární, záložní zdroje. Mezi jejich hlavní výhody patří, že mají přijatelnou cenu, spolehlivost a potřebné vlastnosti. Akumulátor je složen z článků spojených do série. Velmi často bývá zapojeno do série 3 nebo 6 článků - podle toho je baterie 6V nebo 12V. Výrobci je na trh velmi často dodávají v kapacitách v rozmezí od několika Ah po 240Ah. Články jsou složeny z desek (tzv. elektrod), které jsou ponořené do elektrolytu. Elektrolyt v článku je tvořen ředěnou kyselinou sírovou. Nádoby akumulátorů jsou z různých barevných plastů, dnes již mají články pod deskami záchytný prostor pro uvolněný štěp z olověných desek. Kladné póly jsou tvořeny oxidem olovnatým  $PbO_2$  a záporné elektrody samotným olovem Pb. Chemický proces při nabíjení a vybíjení je vratný, pokud zůstane akumulátoru alespoň minimální napětí.

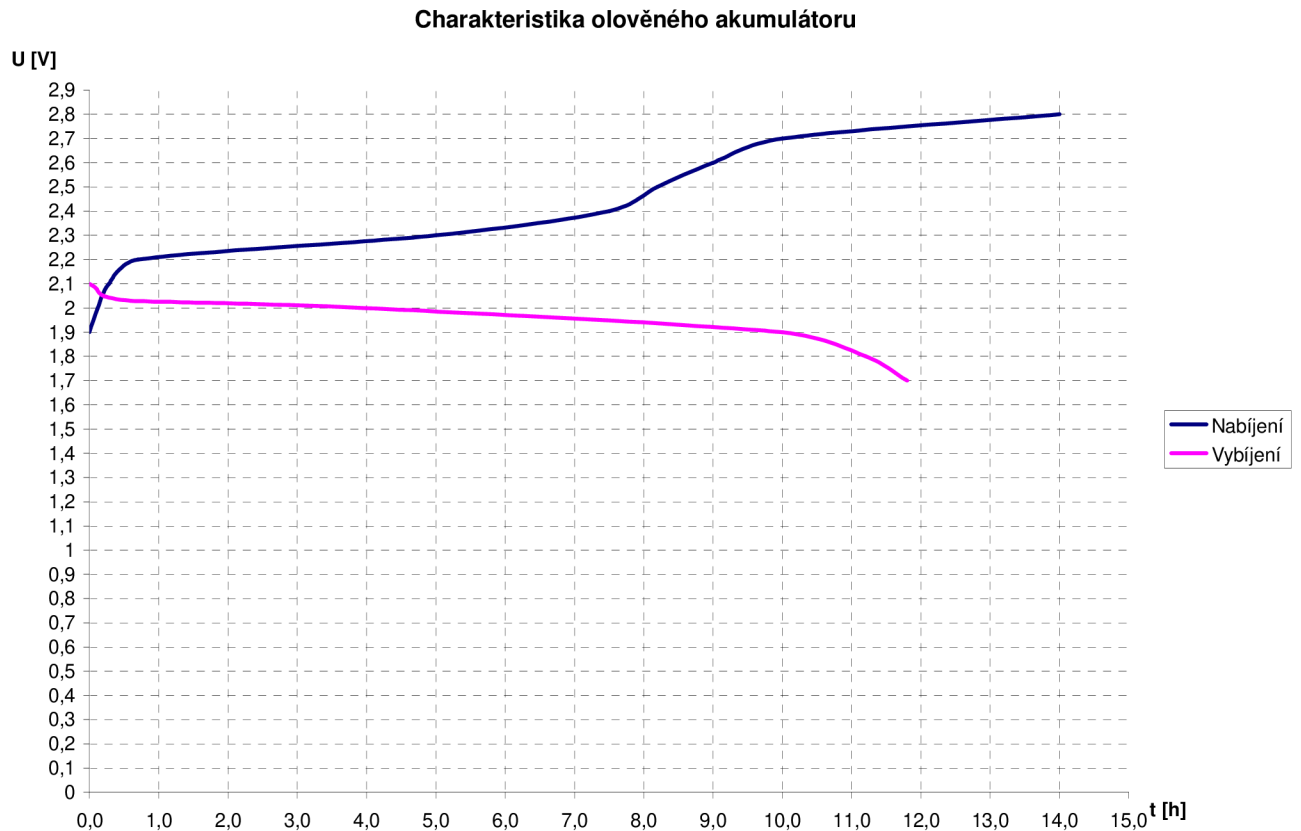
Chemický proces můžeme vyjádřit chemickou rovnicí:



(směr šipky vpravo značí proces při nabíjení a vlevo při vybíjení).

Správným ukazatelem při nabíjení akumulátoru je zvyšující se hustota elektrolytu při růstu napětí při jeho nabíjení. V nabitém akumulátorovém článku je koncentrace  $H_2SO_4$  přibližně 28 až 40% (podle typu akumulátoru). Čím menší je objem elektrolytu v porovnání s množstvím aktivních elektrodových materiálů, tím větší je pokles koncentrace při vybíjení. Ke konci vybíjení se koncentrace pohybuje okolo 12 až 24%. Dle toho je napětí jednoho nabitého článku naprázdno 2,06V až 2,15V a vybitého 1,95V až 2,03V. Pomocí měření hustoty elektrolytu můžeme přesně stanovit stupeň nabití (vybití) akumulátoru, protože pokles koncentrace kyseliny je přímo úměrný plošnému náboji.

Během vybíjení se objem elektrolytu zmenšuje zhruba o 1ml na každou ampérhodinu. Pro nabíjení a vybíjení olověného akumulátoru jsou typické křivky podle Obr.2.1.1.



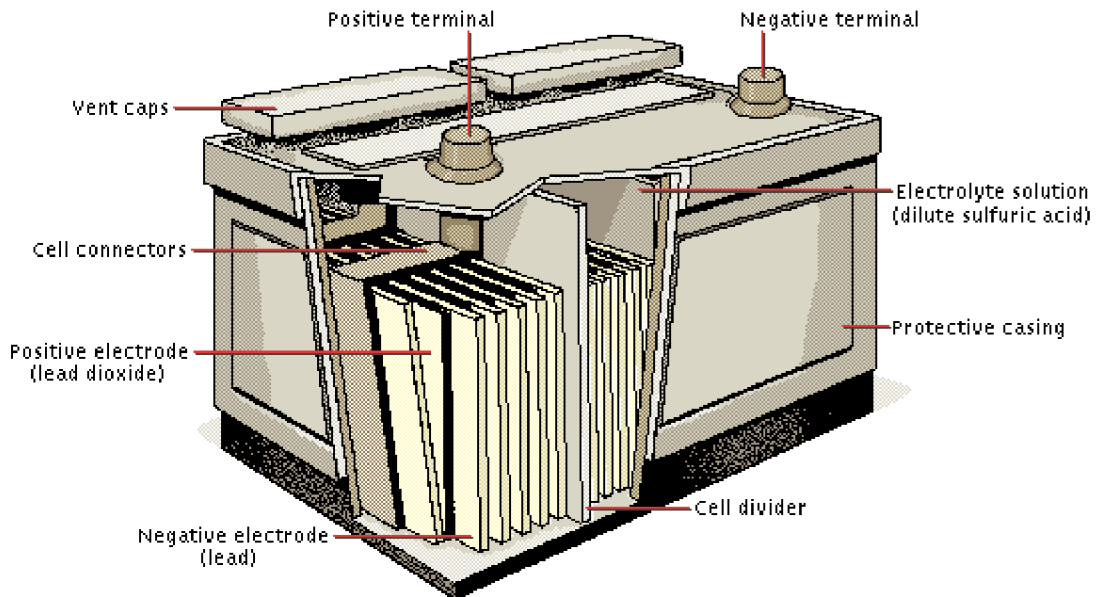
*Obr.2.1.1 Nabíjecí a vybíjecí charakteristika olověného akumulátoru*

Vnitřní odpor olověného akumulátoru se pohybuje v řádu  $m\Omega$ . Závisí na hustotě a teplotě elektrolytu. Obecně platí, že při nabíjení se vnitřní odpor akumulátoru zmenšuje a při vybíjení se zvětšuje. Nabitý akumulátor má asi dvakrát menší vnitřní odpor oproti vybitému akumulátoru. Při poklesu teploty vnitřní odpor akumulátoru roste asi o  $0,4 \% \cdot R_i / ^\circ C$ .

Kapacita akumulátoru je přímo úměrná ploše elektrod. Kapacita akumulátoru také závisí na velikosti vybíjecího proudu. Udává se zaručená minimální kapacita akumulátoru při proudu odpovídajícím  $1/10$  kapacity akumulátoru (v ampérech, po dobu 10 hodin).

## 2.2 Konstrukce olověných akumulátorů

Většina olověných akumulátorů má vlastní samostatné nádoby. Akumulátor, materiály ze kterých je vyroben musí odolávat dlouhodobému účinku kyseliny sírové. Takto odolným materiálem je olovo, a proto jsou všechny části vedoucí proud vyrobeny z olova nebo olověných slitin.

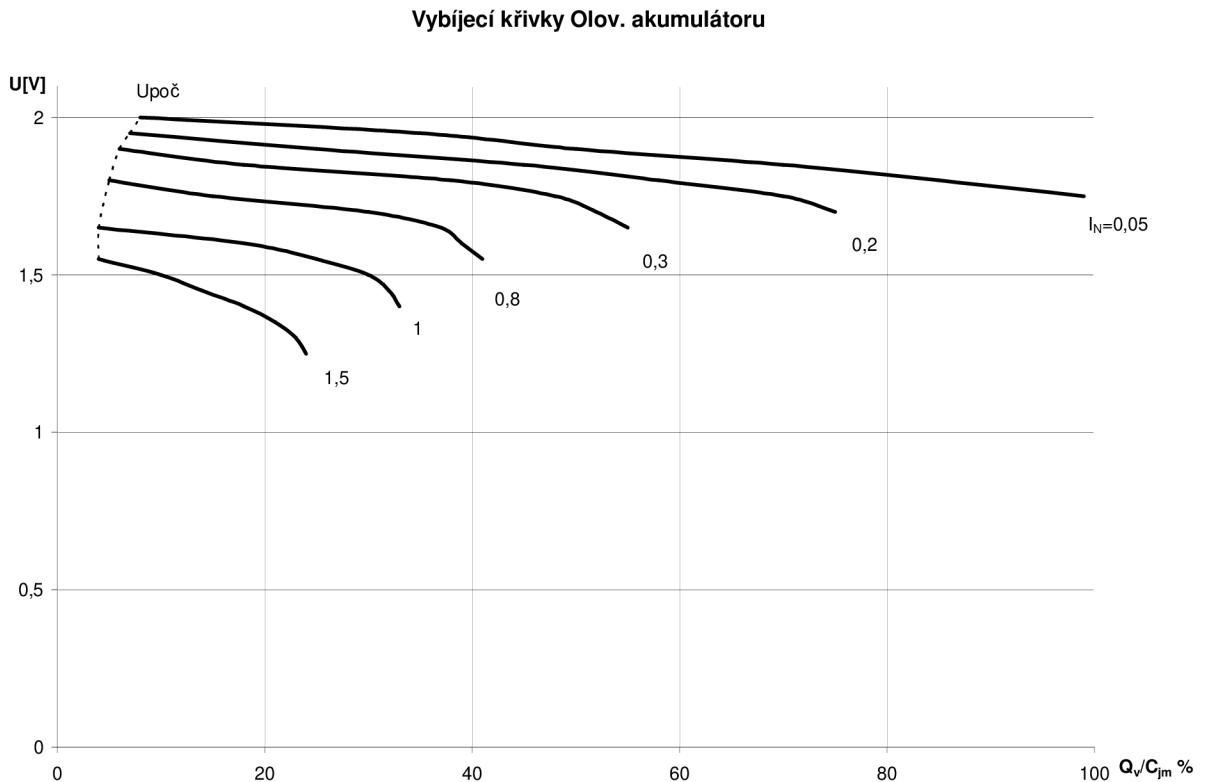


Obr.2.2.1 Konstrukce klasického olověného akumulátoru [11]

Elektrodový komplex je skryt v nádobě z izolačního materiálu (protective casing). Elektrody na krajích (Negative electrode) jsou záporné. V každé elektrodové skupině jsou desky přivařeny k můstkům článků (cell connectors), opatřeným proudovými vývody (positive terminal). Rozdělení jednotlivých článků je provedeno pomocí přepážek (Cell divider). Ve velkých akumulátorech jsou desky zavěšeny na příchytkách nádoby. Vzdálenost mezi horními hranami desek a víkem je minimálně 20mm, aby baterie mohla reagovat na změny hladiny elektrolytu a oddělit kapičky elektrolytu při silném plynování na konci nabíjení. Víko má otvory pro proudové vývody a ventilační zátky (vent caps), které umožňují únik plynů během samovybíjení a malého přebíjení a při tom zabraňuje vylití elektrolytu při sklonech. Otvory pro ventilační zátky se také přidává elektrolyt, určuje se jeho hladina a koncentrace a unikají jím plyny při značném přebíjení. Jednotlivé články jsou spojeny olověnými spojkami (cell connectors).

## 2.3 Vybíjecí a nabíjecí charakteristiky

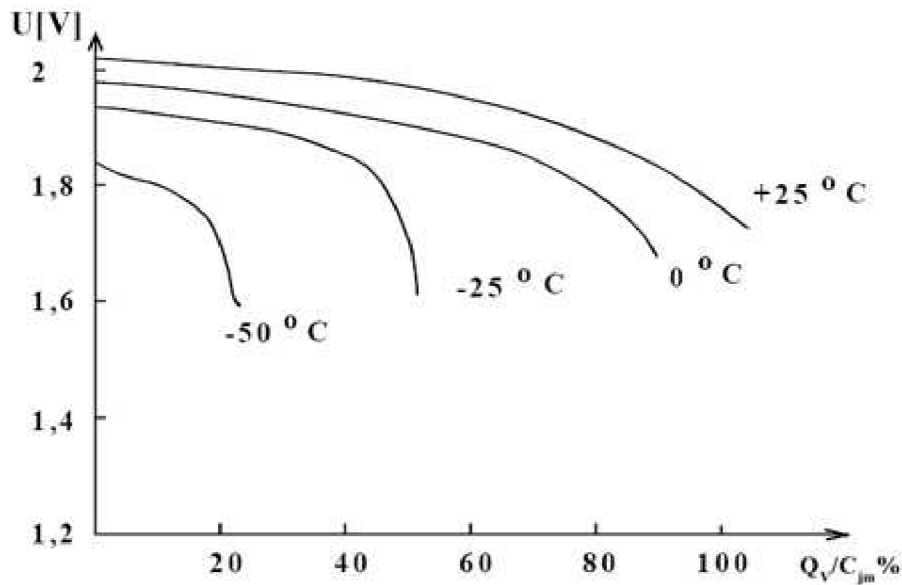
Typické vybíjecí křivky startovacích akumulátorů jsou zachyceny na Obr.2.3.1. Zvýší-li se vybíjecí proud, značně se sníží kapacita a tudíž měrná energie. Změna kapacity je velmi patrná dokonce při změně  $I_N$  z 0,05% na 0,2%. Na to se nesmí zapomenout při porovnávání parametrů akumulátorů, protože akumulátory různých typů mají různé předepsané způsoby vybíjení.



Obr.2.3.1 Vybíjecí křivka startovacího olověného akumulátoru

Na počátku vybíjení není napětí stálé, proto se za výchozí napětí považuje napětí po odebrání částečné kapacity, okolo 10 %. Konečné vybíjecí napětí je nižší zhruba o 0,2V než napětí výchozí a činí 1,75V až 1,8V při malých proudech a 1,2V až 1,5 V při proudech větších. Kapacita akumulátoru je velmi závislá na teplotě. Když  $I_N = 0,1\%$  a teploty jsou nad  $0^\circ\text{C}$  způsobí malý pokles teploty o  $1^\circ\text{C}$  pokles kapacity o 0,6 až 0,7 %.

Velmi prudký pokles kapacity nastává při nízkých teplotách a při velkých proudech (obr. 2.3.2).



Obr.2.3.2 Vybíjecí křivka akumulátoru při nízkých teplotách,  $I_N=0,1\%$

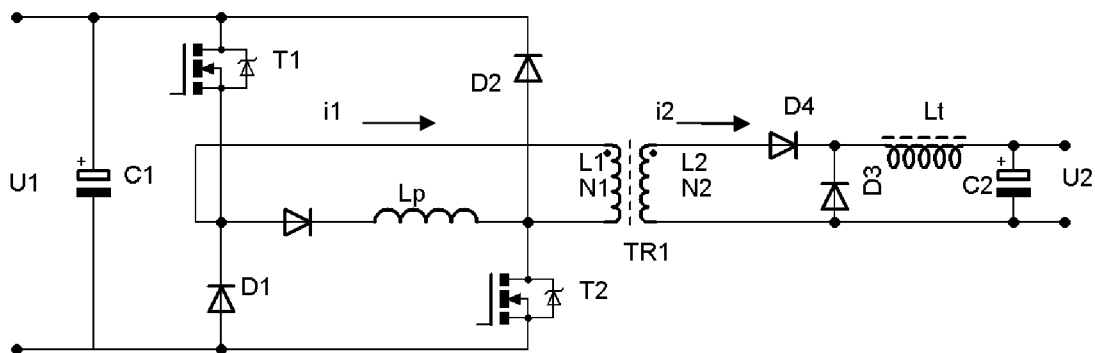
Při nabíjení akumulátoru konstantním proudem, vzrůstá napětí z 2,3 až 2,4 V a blíží se k 2,7 V. Nyní, když je již plně nabitý, dochází k plynování. Pokud by nabíjení konstantním proudem dále pokračovalo, dochází k silnému přebíjení akumulátoru s destruktivními účinky a hrozí i možnost výbuchu vyvíjeného vodíku.

Silné plynování nenávratně poškozuje aktivní plochu desek, lze tomu zabránit, pokud bude nabíjecí proud velice malý ( $I_N < 0,05 \%I$ ). Velmi častým způsobem nabíjení akumulátorů je změna proudu po skocích. Z počátku je velký, z důvodu zkrácení nabíjecího času a schopnosti akumulátoru přijímat velké množství energie a při dosažení napětí 2,4V proud klesne, aby se dokončilo nabíjení. Tento způsob nabíjení již v podstatě vede na myšlenku použití kaskádní regulační struktury – tj. nabíječka se chová naopak jako zdroj konstantního napětí. Existence podřízené proudové smyčky umožňuje snadné zavedení proudového omezení (nastavení nabíjecího proudu ve fázi, kdy napětí ještě nedosahuje koncové hodnoty). Zároveň proudová smyčka přispívá ke stabilitě regulace napětí.

Uvedená kaskádní regulační struktura bývá v literatuře o nabíjení nazývána také CCCV (constant current, constant voltage). Dokud nedosahuje napětí akumulátoru konečné hodnoty, je napěťový regulátor v saturaci a požaduje plný nabíjecí proud. Tento požadavek je veden do proudového regulátoru přes omezovač, v němž lze velikost nabíjecího proudu snížit (nastavit). Jakmile napětí akumulátoru dosahuje konečné hodnoty, musí začít napěťový regulátor snižovat žádaný nabíjecí proud a proces nabíjení tak pokračuje se stále klesajícím proudem tak, aby napětí nepřekročilo koncovou hodnotu. Teoreticky bude proud limitně klesat až k nule.



### 3 SILOVÝ OBVOD AUTONABÍJEČKY



Obr.3.1: Schéma zapojení výkonové části nabíječky

#### 3.1 Výkonový transformátor

Magnetický obvod pro výkonový transformátor je tvořen 6-ti paralelně složenými toroidními jádry LJT2010. Díky paralelnímu uspořádání získáme větší průřez magnetického obvodu.

##### Parametry toroidního jádra LJT 2010:

Materiál: CF138

Průřez jádra  $S_1=48\text{mm}^2$

$Al=2900 \text{ nH/z}^2$

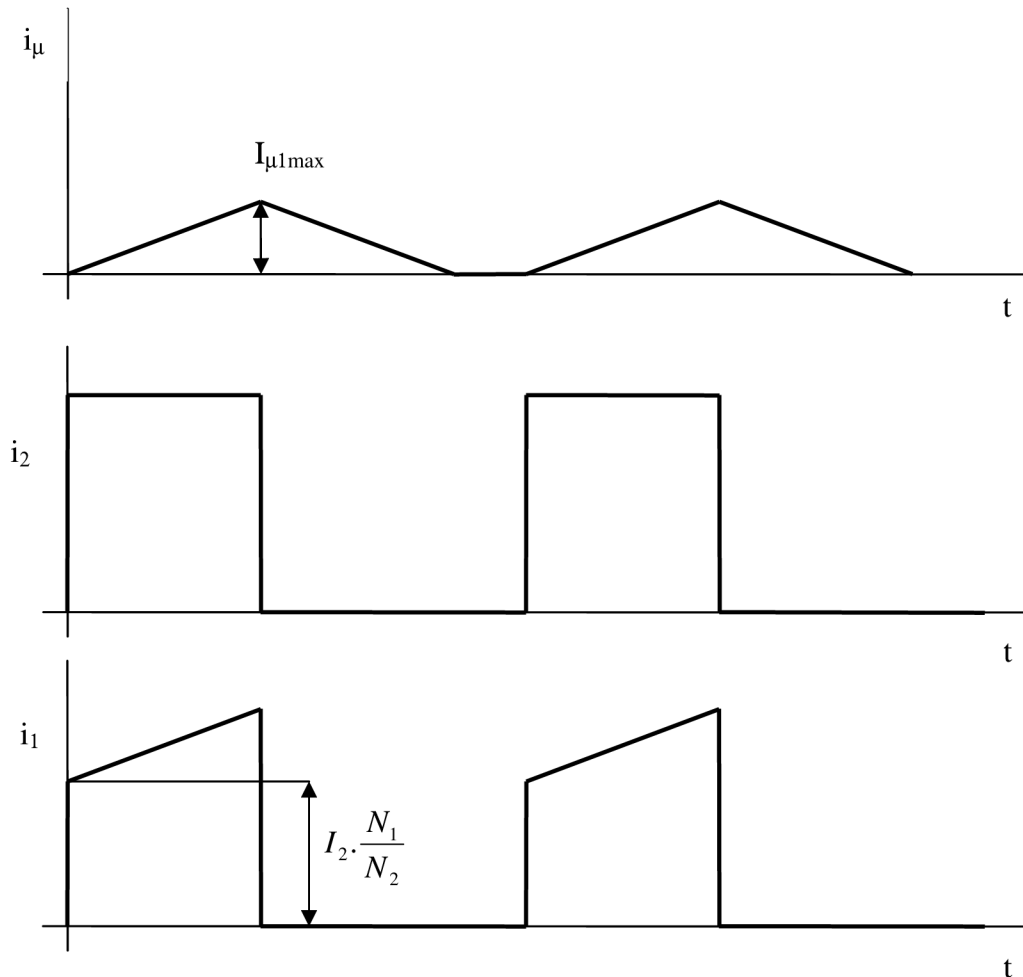
Když budeme uvažovat, že sycení toroidního jádra bude 0,2T a maximální střída se bude rovnat 0,43, můžeme snadno vypočítat počet primárních a sekundárních závitů.

Vypočteme dle vztahů:

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot s_{\max}}{B_{\max} \cdot 6 \cdot S_1 \cdot f} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230V \cdot 0,43}{0,2T \cdot 6 \cdot 0,48 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 20 \cdot 10^4 \text{ Hz}} = 12,15z \cong 12z \quad (3.1.1)$$

$$N_2 = \frac{U_{\text{Výst max}} \cdot N_1}{U_1 \cdot s_{\max}} = \frac{24V \cdot 12}{\sqrt{2} \cdot 230V \cdot 0,43} = 2,06z \cong 2z \quad (3.1.2)$$

Pro zjištění průřezu primárního a sekundárního vinutí je třeba vypočítat efektivní hodnoty primárního a sekundárního proudu. Primární proud bude mít průběh daný superpozicí magnetizačního proudu  $I_{\mu 1}$  a přetransformovaného sekundárního proudu.



Obr.3.1.1: Proud, který teče jádrem  $I_{\mu}$  primárním vinutím  $I_1$  a sekundárním vinutím  $I_2$  výkonového transformátoru

Pro určení magnetizačního proudu  $I_{\mu 1}$  musíme znát indukčnost primárního vinutí. Tu lze spočítat pomocí konstanty  $A_l$  toroidního jádra a z počtu závitů na něm.

$$L_1 = \Lambda \cdot N_1^2 = 6 \cdot A_L N_1^2 = 6,2,9 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2 = 2,5mH \quad (3.1.3)$$

Z toho maximální magnetizační proud  $I_{\mu 1}$  bude:

$$I_{\mu 1} = \frac{N_1 \cdot B_{\max} \cdot S}{L_1} = \frac{12,0,2T \cdot 2,88 \cdot 10^{-4} m^2}{25 \cdot 10^{-4} H} = 0,276A \quad (3.1.4)$$

Z těchto hodnot při respektování průběhů proudů můžeme určit efektivní hodnotu primárního a sekundárního proudu transformátorem.

$$\begin{aligned} I_{1ef} &= \sqrt{\left(I_2 \cdot p \cdot \sqrt{s_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{I_{\mu 1}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2 \cdot s_{\max}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(50A \cdot \frac{2}{12} \sqrt{0,43}\right)^2 + \left(\frac{0,276A}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{0,86}\right)^2} = \\ &= \sqrt{29,861 + 0,022} = 5,467A \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

$$I_{2ef} = I_2 \cdot \sqrt{s_{\max}} = 50A \cdot \sqrt{0,43} = 32,787A \quad (3.1.6)$$

Z výpočtu je patrné že magnetizační proud je více než 1000krát menší než složka přetransformovaného sekundárního proudu a tak ji můžeme zanedbat.

Pak lze zjednodušeně říci, že:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_{2ef}}{I_{1ef}} = p \quad (3.1.7)$$

Nyní můžeme určit průřez primárního a sekundárního vinutí transformátoru, při zvolené proudové hustotě  $J = 6 A/mm^2$

$$S_{prim} = \frac{I_{1ef}}{J} = \frac{5,467A}{6 A/mm^2} = 0,911mm^2 \quad (3.1.8)$$

$$S_{sek} = \frac{I_{2ef}}{J} = \frac{32,787A}{6 A/mm^2} = 5,465mm^2 \quad (3.1.9)$$

Vytváří se zde skin efekt a vodiče se musí realizovat tzv. vysokofrekvenčním svazkem, kde jednotlivé vodiče mají maximální průměr  $2\delta$ . Kde závislost  $\delta$  na frekvenci je dána podle následujícího vztahu:

$$\delta = \frac{75}{\sqrt{f}} = \frac{75}{\sqrt{200 \cdot 10^3 \text{ Hz}}} = 0,1675 \text{ mm} \quad (3.1.10)$$

$$d_{\max} = 2 \cdot \delta = 2 \cdot 0,168 = 0,335 \text{ mm} \quad (3.1.11)$$

Vodič o průměru 0,335mm je pro naše účely přímo vyráběn dokonce se smaltovanou izolací a pak má průměr 0,38mm.

Průřez je roven :

$$S_{\max} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,335^2}{4} = 0,088 \text{ mm}^2 \quad (3.1.12)$$

Počet vodičů v primárním a sekundárním svazku tedy bude:

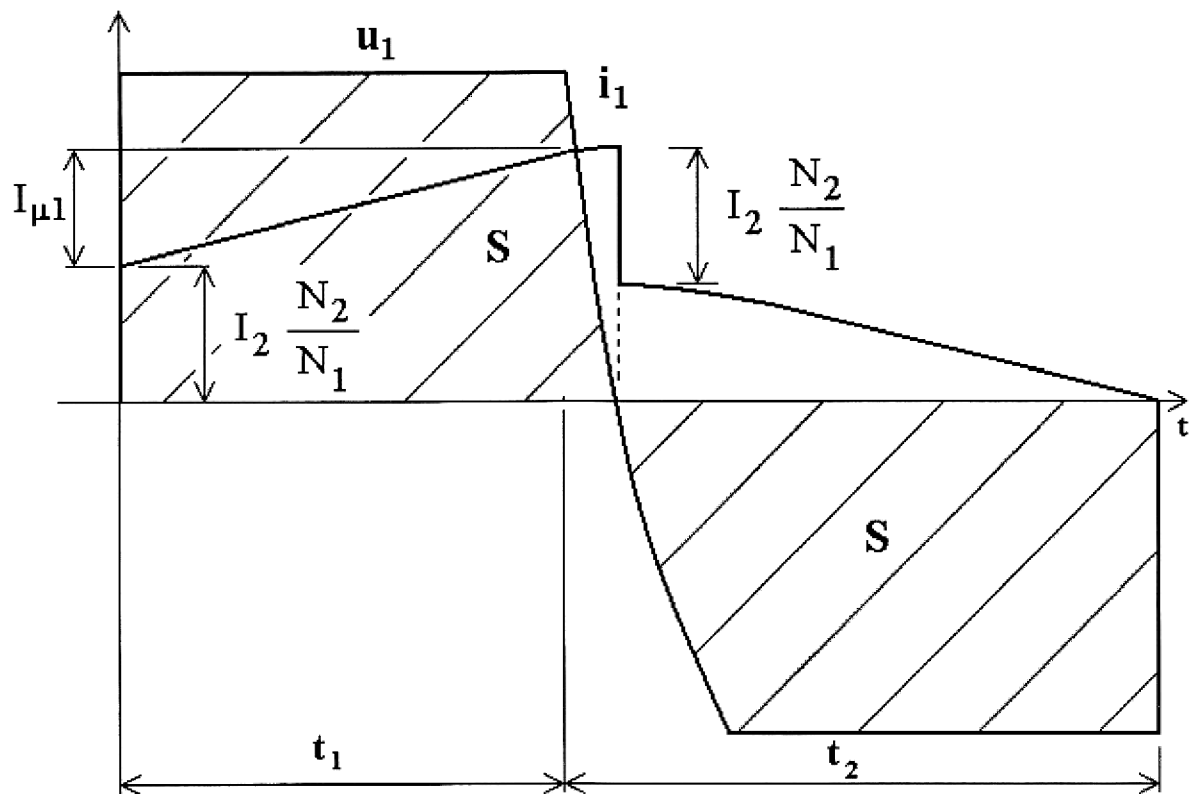
$$n_{\text{prim}} = \frac{S_{\text{prim}}}{S_{\max}} = \frac{0,911}{0,088} \cong 10 \quad (3.1.13)$$

$$n_{\text{sek}} = \frac{S_{\text{sek}}}{S_{\max}} = \frac{5,465}{0,088} \cong 60 \quad (3.1.14)$$

V poslední verzi nabíječky je použito svazkových vodičů Rupalit classic. Mají ve svém sortimentu na výběr nejrůznější tvary a velikosti. Pro náš transformátor byl použit RUPALIT® Classic Ø1mm 35x0,224mm jako primární vinutí a RUPALIT® Classic Ø3mm 120x0,2mm jako sekundární vinutí.

### 3. 2 Tlumivka na primární straně měniče

Tlumivka je připojena paralelně k primárnímu vnutí výkonového transformátoru a to proto, aby se zvýšil magnetizační proud. Zvětšení magnetizačního proudu je důležité z důvodu přebíjení parazitních kapacit mezi kolektorem a emitorem výkonových tranzistorů. Při frekvenci spínání 150 kHz je nutné dostatečně rychle přebít parazitní kapacitu, aby se transformátor mohl co nejrychleji začít demagnetizovat a nemuselo docházet ke zbytečnému snižování střídny, viz *Obr. 3.2.1*



*Obr. 3.2.1: Vliv parazitních kapacit tranzistorů*

Jako ideální zvýšení magnetizačního proudu jsem zvolil zdvojnásobení původního magnetizačního proudu transformátoru:

$$I_{\mu p} = 2 \cdot I_{\mu 1} = 2 \cdot 0,276 = 0,552 \text{ A} \quad (3.2.1)$$

$$L_p = \frac{U_d \cdot t_{zap}}{I_{\mu p}} = \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,43}{0,552 \cdot 20 \cdot 10^3} = 1,267 \text{ mH} \quad (3.2.2)$$

$$L = \frac{L_p \cdot L_1}{L_p + L_1} = \frac{(12,67 \cdot 25) \cdot 10^{-4}}{(12,67 + 25) \cdot 10^{-4}} = 0,841 \text{ mH} \quad (3.2.3)$$

Pro navinutí přídavné tlumivky bylo použito feritové jádro E1605 s průřezem  $S_p = 20 \text{ mm}^2$  s maximální indukci  $B_{\max} = 0,23 \text{ T}$

Počet závitů na přídavné tlumivce určíme pomocí:

$$N = \frac{L_p \cdot I_{\mu 2}}{B_m \cdot S} = \frac{12,67 \cdot 10^{-4} \text{ H} \cdot 0,552 \text{ A}}{0,23 \text{ T} \cdot 0,201 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} \cong 151 \text{ z} \quad (3.2.4)$$

Pokud přepokládáme, že magnetický odpor železa je zanedbatelný oproti odporu vzduchové mezery potom můžeme počítat pomocí vztahu:

$$\frac{1}{\Lambda} = R_v = \frac{l_v}{\mu_0 \cdot S} = \frac{N^2}{L} \quad (3.2.5)$$

po úpravě dostaneme:

$$l_v = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{L} = \frac{151^2 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 2,01 \cdot 10^{-5}}{12,67 \cdot 10^{-4}} = 0,454 \text{ mm}$$

Pro určení průřezu drátu je nezbytné znát efektivní hodnotu proudu tekoucího přídavnou tlumivkou. Efektivní hodnotu je možné určit z tvaru průběhu proudu a jeho maximální hodnoty pomocí následujícího vztahu:

$$I_{\mu \text{Pef}} = \frac{I_{\mu \text{P}}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2 \cdot S_{\max}} = \frac{0,552 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,43}}{\sqrt{3}} = 0,296 \text{ A} \quad (3.2.6)$$

maximální hodnotu proudové hustoty zvolíme  $4 \text{ A/mm}^2$  což je menší proudová hustota než u výkonného transformátoru. Závity tlumivky jsou navinuty těsně vedle sebe a v několika vrstvách a tak se nemohou dostatečně chladit.

$$S_{Lp} = \frac{I_{\mu Pef}}{J} = \frac{0,296A}{4} = 0,074mm^2 \quad (3.2.7)$$

$$d_{Lp} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{Lp}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,074}{\pi}} = 0,307mm \quad (3.2.8)$$

Naše tlumivka je zhotovena z drátu o průměru 0,335mm.

### 3.3 Proudový transformátor

Měřicí transformátor proudu slouží ke snímání skutečného proudu primárního vinutí výkonového transformátoru. Tato hodnota primárního proudu nám s určitou přesností určuje okamžitou velikost sekundárního proudu. Měření nám tedy zachycuje proudové přetížení na primární i sekundární straně silového obvodu. Proud sekundárního vinutí měřicího transformátoru proudu prochází přes diodu a rezistory. Úbytek, který proud sekundárního vinutí proudového transformátoru vytvoří na rezistorech, slouží jako informace o skutečném proudu výkonového transformátoru a dále slouží řídicímu obvodu, který využívá jeho pilovité zvlnění pro realizaci PWM.

#### Výpočet proudového transformátoru:

Toroidní jádro LJT 1306

Materiál CF138

$A_l = 1250nH/z^2$

$S = 17,4mm^2$

Výstupní napětí na měřicím transformátoru zvolíme s ohledem na vlastnosti řídicího obvodu. Řídicí obvod považuje za nadproud napětí vyšší než 2,5V. Vzhledem k tomu že v sérii s rezistory je ještě Schottkyho dioda, uvažujeme maximální napětí 3V.

Z principu funkce proudového transformátoru platí:

$$I_{\mu 2 \max} \ll I_{1 \max}'$$

To plyne z náhradního matematického modelu transformátoru proudu, kdy magnetizační tok (a s ním spjatý magnetizační proud) v jádře je úměrný integrálu sekundárního napětí. Transformovaný proud primárního vinutí je rozdělen na proud magnetizační a výstupní proud. Proto musí být magnetizační proud malý, aby měření výstupního proudu neobsahovalo velkou chybu.

Velikost špičkové hodnoty snímaného proudu na primárním vinutí:

$$I_{1 \max} = I_{2 \max} \cdot \frac{N_2}{N_1} + I_{\mu 1} \cong I_{2 \max} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 50 \text{ A} \cdot \frac{2}{12} = 8,33 \text{ A} \quad (3.3.1)$$

Maximální doba zapnutí odpovídající plné střídě je rovna:

$$t_1 = \frac{s_{\max}}{f} = \frac{0,43}{2 \cdot 10^5} = 2,15 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (3.3.2)$$

Pro magnetizační proud proudového transformátoru platí:

$$I_{\mu 2 \max} = \frac{U_{2 \max} \cdot t_1}{L_2} = \frac{U_{2 \max} \cdot t_1}{\Lambda \cdot N_2^2} \ll I_{2 \max} \quad (3.3.3)$$

$$\frac{U_{2 \max} \cdot t_1}{\Lambda \cdot N_2^2} \ll I_{1 \max} \cdot \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{U_{2 \max} \cdot t_1}{\Lambda \cdot N_2} \ll I_{1 \max} \cdot \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{U_{2 \max} \cdot t_1}{\Lambda \cdot I_{1 \max}} \ll N_1 N_2 \quad (3.3.4)$$

Po dosazení:

$$N_1 \cdot N_2 \gg \frac{U_{2 \max} \cdot t_1}{\Lambda \cdot I_{1 \max}} = \frac{3 \cdot 2,15 \cdot 10^{-6}}{1250 \cdot 10^{-9} \cdot 8,33} \Rightarrow N_1 \cdot N_2 \gg 0,62 \quad (3.3.5)$$

Pokud by součin  $N_1 \cdot N_2$  byl právě 0,62, potom sekundární proud proudového transformátoru právě je roven maximu magnetizačního proudu což by byla chyba. Z počátku pulsu by sice proud proudového transformátoru odpovídal přetransformovanému primárnímu proudu, avšak v průběhu pulsu by se začal zvyšovat magnetizační proud, čímž by se snižoval výstupní proud proudového transformátoru a tím i napětí na jeho zátěži. V důsledku by se pak velmi zkreslilo pilovité zvlnění proudu nezbytné pro řídicí obvod.



Volíme si :

$$N_2=30z$$

$$N_1=2z$$

$$B_{\max} = \frac{U_{2\max} \cdot t_1}{N_2 \cdot S} = \frac{3,2,15 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 17,4 \cdot 10^{-6}} = 0,0124T \quad (3.3.4)$$

$$R_z = \frac{U_{2\max}}{I_{1\max}} \cdot \frac{N_2}{N_1} = \frac{3}{8,33} \cdot \frac{30}{2} = 5,4\Omega \quad (3.3.5)$$

Chyba proudového transformátoru:

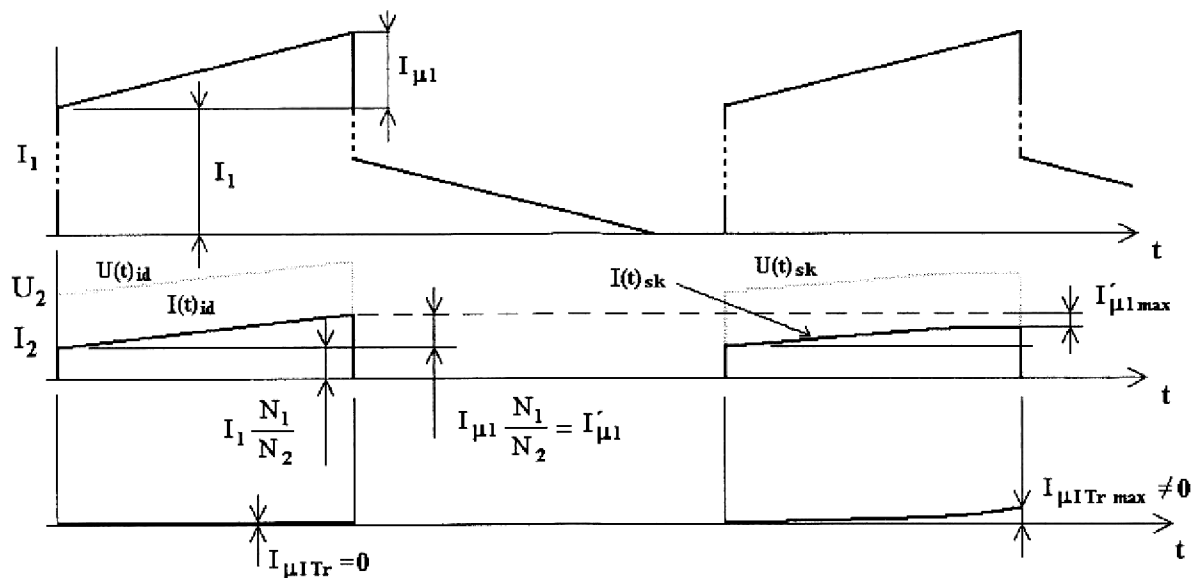
$$I_{\mu 2\max} = \frac{U_{2\max} \cdot t_1}{L_2} = \frac{U_{2\max} \cdot t_1}{\Lambda \cdot N_2^2} = \frac{3,2,15 \cdot 10^{-6}}{1250 \cdot 10^{-9} \cdot 30^2} = 5,73mA \quad (3.3.6)$$

Pokud budeme nyní brát v potaz magnetizační proud primárního vinutí výkonového transformátoru bude tento pilovitý průběh proudu přetransformovaný proudovým transformátorem vytvářet pilovité zvlnění důležité pro řídicí obvod. Pilovité zvlnění proudu výkonového transformátoru je závislé na zatěžovacím proudu sekundárního usměrňovače. Pilovité zvlnění na výstupu proudového transformátoru :

$$\Delta I'_{\mu 1} = I_{\mu 1} \cdot \frac{1}{30} = \frac{0,276}{30} = 9,2mA \quad (3.3.7)$$

$$\Delta I'_{\mu 1} \gg I_{\mu 2\max}$$

Tato podmínka je důležitá pro řídicí obvod. Kdyby na sekundární straně proudového transformátoru neexistoval magnetizační proud, pilovité zvlnění by bylo přesně zkopírované z primárního na sekundární vinutí. Vzhledem k úbytku vlivem magnetizačního proudu v čase se však od proudu sekundárního vinutí odčítá magnetizační proud proudového transformátoru. To má však za následek snížení pilovitého zvlnění na sekundární straně proudového transformátoru. Viz obrázek 3.3.1



Obr. 3.3.1: Zkreslení informace o pilovitém zvlnění, vlivem proudového transformátoru

Na obrázku 3.3.1 Je vidět jak magnetizační proud na sekundární straně proudového transformátoru zkreslí informaci o skutečném proudu a zkreslí pilovité zvlnění magnetizačního proudu výkonové transformátoru. Pokud bychom zvolili menší počet závitů na sekundární straně transformátoru, potom by jistě klesla indukčnost sekundárního vinutí proudového transformátoru a tím vzrostl magnetizační proud, což by mělo nejspíše za následek ztrátu pilovitého zvlnění proudu na výstupu proudového transformátoru a tím i napětí na zátěži proudového transformátoru.

### 3. 4 Budicí transformátor

#### Parametry budícího transformátoru:

2x toroid LJT 1306

$A_l=1250 \text{ nH/z}^2$

Materiál CF 138

$S=17,4\text{mm}^2$

Řídící obvod napájí primární vinutí. Výstupní napětí je o něco menší než napájecí. Předpokládáme, že výstupní napětí řídicího obvodu je 8V a maximální sycení  $B_{\max}=0,1\text{T}$

$$N_1 = \frac{U_{l_{\max}} \cdot t_1}{B_{\max} \cdot S} = \frac{8,2,15 \cdot 10^{-6}}{0,1 \cdot 2,17,4 \cdot 10^{-6}} = 4,94z \cong 5z \quad (3.4.1)$$

MOS-FET tranzistory se spínají napětím 15V. Jsou-li v sérii s hradlem ještě 2 diody, požadujeme výstupní napětí transformátoru 16V.

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_2}{U_1} = 5 \cdot \frac{16}{8} = 10z \quad (3.4.2)$$

Magnetizační proud primárního vinutí se spočte:

$$I_{\mu \max} = \frac{U_{1 \max} I_1}{\Lambda \cdot N_1^2} = \frac{8,2,15 \cdot 10^{-6}}{2,1250 \cdot 10^{-9} \cdot 25} = 0,275A \quad (3.4.3)$$

Proud koncového stupně řídicího obvodu bude ještě větší, protože dochází k impulsnímu nabíjení a vybíjení kapacity mezi G a S výkonového tranzistoru. Ta podle datasheetu je 9nF. Nabíjecí proudové impulsy se přetransformují na primární stranu budícího transformátoru a budou zatěžovat řídicí obvod.

## 4 CHLAZENÍ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK

### 4.1 Dimenzování diod sekundárního usměrňovače:

Viz Obr.3.1

#### D3:

Maximální střední hodnota proudu usměrňovací diodou bude:

$$I_{3avMax.} = I \cdot s_{\max} = 50 \cdot 0,43 = 21,5A \quad (4.1.5)$$

Napětí, které vzroste v závěrném směru na diodě D3 je rovno:

$$U_{D3 \max} = 2 \cdot U_{2 \max} = 2 \cdot 24 = 48$$

#### D4:

Maximální střední hodnota proudu nulovou diodou bude:

$$I_{4avMax} = I \cdot (1 - s_{\min}) = 50A \quad (4.1.6)$$

Napětí které bude při sepnutých tranzistorech na nulové diodě:

$$U_{D4Max} = U_{2 \max} = 24 = 24V$$

**Výkon na diodách D3 a D4 je:**

$$P_D = U_D \cdot I_D = U_D \cdot (I_{D3avMax} \cdot I_{D4avMax}) = U_D \cdot [I_2 \cdot s + I_2 \cdot (1-s)] = U_D \cdot I_2 = 50W \quad (4.1.7)$$

## 4.2 Ztráty tranzistoru:

**Proud tranzistorem:**

Parametry tranzistoru FDH44N50

Turn on-zpoždění  $t_{d(on)}=16ns$

Rise time  $t_r=84ns$

Turn off-zpoždění  $t_{d(off)}=45ns$

Fall time  $t_f=79ns$

$R_{ds(on)}=0,11\Omega$

$$\begin{aligned} I_{TRef} &= \sqrt{(I_O \cdot p \cdot \sqrt{s_{max}})^2 + \left(\frac{I_\mu}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{s_{max}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(50 \cdot \frac{2}{12} \cdot \sqrt{0,43}\right)^2 + \left(\frac{0,828}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{0,43}\right)^2} = \\ &= 5,474A \end{aligned} \quad (4.1.8)$$

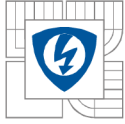
**Ztráty vedením:**

$$P_{vedením} = R_{DS(on)} \cdot I_{1ef}^2 = 0,11 \cdot 5,474^2 = 3,3W \quad (4.1.9)$$

Výpočet Energie potřebné pro vypnutí a zapnutí tranzistoru když zanedbáme parazitní kapacity a rozptyl transformátoru:

$$\begin{aligned} W_{on} &= \frac{U_{max} \cdot I_{max} \cdot (t_{d(on)} + t_r)}{2} = \\ &= \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot \left(50 \cdot \frac{2}{12} + 0,827\right) \cdot (16 \cdot 10^{-9} + 84 \cdot 10^{-9})}{2} = 1,639 \cdot 10^{-4} J \end{aligned} \quad (4.1.10)$$

Přepínací ztráty jsou závislé na frekvenci:



$$P_{\text{přepínac}} = (W_{\text{on}} + W_{\text{off}}) \cdot f = (1,639 \cdot 10^{-4} + 2,032 \cdot 10^{-4}) \cdot 200000 = 73,42W \quad (4.1.11)$$

Teoretická hodnota celkových ztrát:

$$P_{\text{celkové}} = (P_{\text{přepínac}} + P_{\text{vedením}}) = (73,42 + 3,3) \cdot 200000 = 76,72W \quad (4.1.12)$$

Ve skutečnosti budou ztráty na tranzistorech při přepínání o mnoho menší. Při takto vysoké spínací frekvenci se již dostatečně uplatní parazitní kapacity mezi kolektorem a emitorem tranzistoru, které jsou při námi použitých MOS-FET tranzistorech řádově desítky pF. Závisí to přímo úměrně velikosti čipu tranzistoru a také a jeho geometrii a přesnou hodnotu můžeme najít v katalogu. Parazitní kapacita pomáhá odlehčování tranzistoru při vypínání. Během vypínání se cívka snaží udržet proud, který skrze jí tekla při sepnutých tranzistorech. Když tranzistor vypneme, tak proud začíná téct parazitní kapacitou  $C_{ce}$  a nabíjí jí tím. Proto v době vypínání tranzistoru neteče tranzistorem plný proud ale pouze jeho malá část. Tento děj působí příznivě na vypínací ztráty tranzistoru, kdy se zmenšuje součin  $U \cdot I$ , ale nepříznivě působí na chod měniče, kdy se snižuje přípustná střída se kterou může měnič pracovat naprázdno. Při zapínání rozptylová indukčnost výkonového transformátoru nám snižuje zapínací ztráty tranzistoru. Při zapínání tranzistoru rozptylová indukčnost nedovolí, aby proud ihned narostl na jmenovitou hodnotu. Proud narůstá pomaleji a tranzistor se stačí plně zapnout než jím začne téct plný proud.

Celková ztráta vyzářeného tepla bude součtem ztrát na tranzistorech a na diodách. Ztráty budou lineárně vzrůstat při zvyšování nabíjecího proudu přičemž maximum ztrátového výkonu bude:

$$P = P_{\text{celkT}} + P_{\text{celkD}} = 76,72 + 50 = 126,72W \quad (4.1.13)$$

### 4.3 Modifikace chlazení polovodičových prvků

Polovodičové prvky v nabíječce jsou chlazeny do profilu L o rozměrech 158.50.30 mm s tloušťkou stěny 5mm Obr.10.1.

Tento profil je svou jednou stranou spojen s nerezovou krabičkou. Ztrátový výkon se tedy odvádí přímo do krabičky nabíječky. Krabička je zevnitř ofukovaná dvojicí ventilátorů, takže je dostatečně chlazen i výkonový transformátor včetně jeho sekundární tlumivky, která musí snášet velké tepelné zatížení na maximálním rozsahu 50A. Při osazování hlavní desky chladičem je nutno chladič podložit dvěma podložkami z cuprexu viz Obr.10.1

## 5 DESKA REGULÁTORU NAPĚTÍ

Deska je navržena jako nadřazená napěťová a podřízená proudová regulace, která je napájena z hlavní desky. Napětí je snímáno pomocí napěťového děliče přímo na výstupu spínaného zdroje (R8, R7). Proud je snímán proudovým transformátorem TR2 a dále usměrněn diodou D20 a následně přeměněn na napěťovém děliči (R13, R14) na napětí s průběhem Obr.7.2.

Pomocí 3-pólového přepínače lze volit velikost regulace napětí. Načež poloha vlevo odpovídá hodnotě 7,2V pro baterie motocyklů, bateriím s nominálním napětím 6V a poloha vpravo odpovídá hodnotě 14,4V pro baterie automobilů o nominální hodnotě 12V.

Dvojice dvoubarevných LED diod je vizuální kontrolou funkčnosti celého zařízení. Červená barva Led svítí v případě, pokud bude napětí nižší než požadované a v případě pokud dojde k omezení hodnoty proudu. Zelená svítí v případě, že napětí dosáhlo požadované hodnoty a v případě, že proud není omezován.

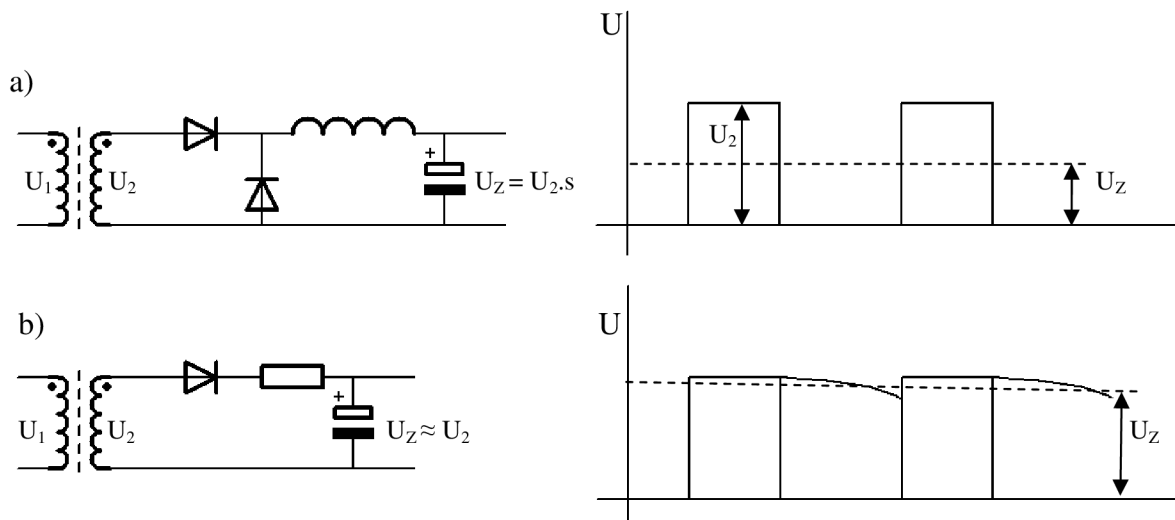
Logaritmický Bargraf zobrazuje velikost Nabíjecího proudu. 10 dílků bargrafu je rozděleno následujícím způsobem 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 25, 35, 50 A.

Čtyřpólový velký přepínač je zde pro omezování velikosti proudu zleva do prava 0,5A, 5A, 10A, 50A.

Na desce regulátoru je také obvod pro spínání relé ovládajícího ventilátory. Délka doběhu ventilátorů je závislá na zatěžovací m proudu.

Deska regulátoru napětí je leptána jen jako jednostranná. Zapojení není složité oproti desce hlavní. Čtyři otvory na desce slouží k uchycení k čelnímu panelu a k hlavní desce. Obě desky plošných spojů se musejí vzájemně propojit pomocí vývodů  $I_z$ ,  $U_{ref}$ ,  $U_{cc}$ , + a GND páskovým vodičem.

## 6 PROVEDENÉ MODIFIKACE POMOCNÉHO NAPÁJENÍ



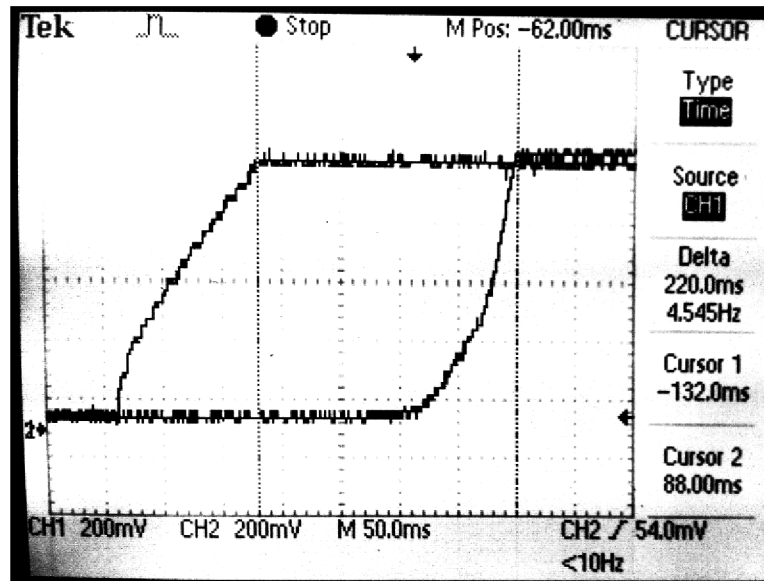
Obr.6.1: Změny v napájecím obvodu řídicí desky

V původním zapojení bylo použito pomocného zdroje s tlumivkou. Při změnách rozsahu 7V, 14V se pohybovala střída ve velkých mezích a byl velký problém ideálně naladit výšku napěťových pulsů pomocného terciárního vinutí. V zapojení je ještě zdroj s malým síťovým transformátorem pro rozběh, ale ten jak testy ukázaly je příliš poddimenzován (odběr řídicí desky je větší než se předpokládalo) a v případě kdy měnič byl provozován naprázdno (tedy s téměř nulovou střídou) nebyl schopen pomocný zdroj z terciárního vinutí dodávat dostatečné napětí pro stabilní napájení řízení a to se vypíná. Samotné terciární vinutí bylo tvořeno 3 závity, což bylo nezbytné pro funkci napájení při omezení regulace napětí na 7,2V, aby zdroj mohl bezpečně fungovat.

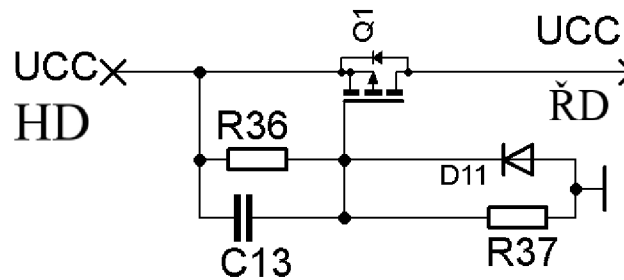
Došlo k úpravě na špičkový detektor, jehož výstupní napětí již je plně nezávislé na střídě, a proto již problém s nedostatečným napájením řízení nenastává. Špičkový detektor již hlídá pouze maximální hodnotu napětí, kterou udržuje kondenzátor do doby dalšího kmitu.

Další úpravou byla po přechodu na špičkový detektor odebrání počtu závitů na terciárním vinutí, protože již není potřeba napětí v tak velkém rozsahu. Protože výstupní napětí již není rovno součinu střídou a výšky pulsu. U špičkového detektoru je výstupní napětí rovno právě výšce napěťového pulsu.

Změna poslední byla v zařazení tzv. předzátěže, která zajistí chod měniče i při sníženém vstupním napájecím napětí. Mezi vývody je přímo vpájen výkonový rezistor 82  $\Omega$ /5W Obr.10.2, který zajišťuje minimální (nenulový) odběr a tím minimální (dostatečně velkou) střídu pro udržení dostatečného napětí výše popsaného špičkového detektoru.



Obr.6.2: Zpoždění sepnutí řídicí desky



Obr.6.3: Schéma zapojení zpoždění řídicí desky

Po zapnutí napájecího napětí se začne nabíjet kondenzátor  $C_{13}$  přes  $R_{37}$ . Při dosažení hodnoty prahové napětí dojde k otevření tranzistor a následnému oživení řídicí desky. Odpor  $R_{37}$  a  $R_{36}$  tvoří napěťový dělič, který brání kondenzátoru v nabití na vyšší hodnotou což by vedlo k poškození hradla tranzistoru. Dioda  $D_{11}$  tvoří vybíjecí obvod kondenzátoru.



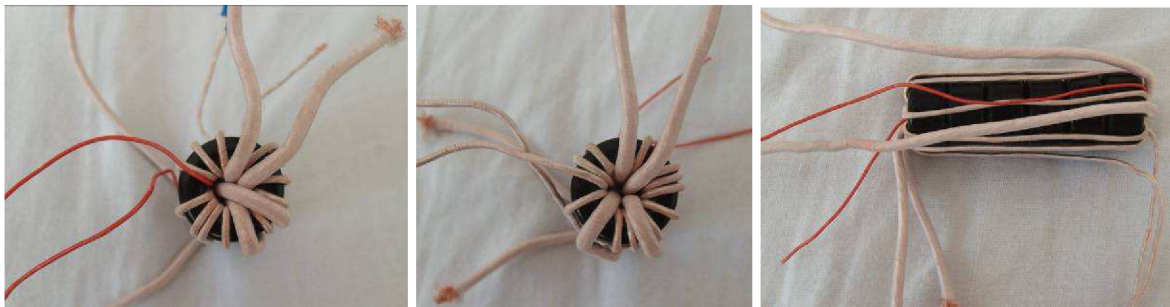
## 7 TECHNICKÁ DOKUMENTACE

### Výkonový transformátor

**Jádro:** 6 kusů slepených toroidních jader typu LJT 2010/ CF138

**Vinutí:** vysokofrekvenční svazek RUPALIT® Classic

- Primární vinutí: - RUPALIT® Classic Ø1mm (35x0,224mm),  
o délce min 226cm, 12 závitů
- Sekundární vinutí: - 2 vysokofrekvenční svazky  
RUPALIT® Classic Ø3mm (120x0,2mm)  
o délce min 46cm, 2 paralelní závity
- Terciární - teflonový drát Ø0,4mm o délce 25cm, 1 závit



*Obr.7.1: Výkonový transformátor*

### Tlumivka

Plochý drát o průřezu  $10\text{mm}^2$  (2mm x 5mm) o délce min 344cm, 29 závitů (14závitu ve spodní vrstvě jedna přechodová a 14 závitu v horní vrstvě), tlumivka má indukčnost asi  $\pm 9\mu\text{H}$ .

Tech.info: Vineme na trn tubus o průměru 30-32mm ve dvou vrstvách s délkou jedné vrstvy cca 75mm (čím větší průměr tím lepší chlazení výkonového transformátoru, čím menší tím lepší umístění do krabičky), pevně stahovat závit vedle závitu aby byly těsné, mezi vrstvy opět vložit izolační papír pro transformátory. Konce vhodně upravit pro usazení do DPS.



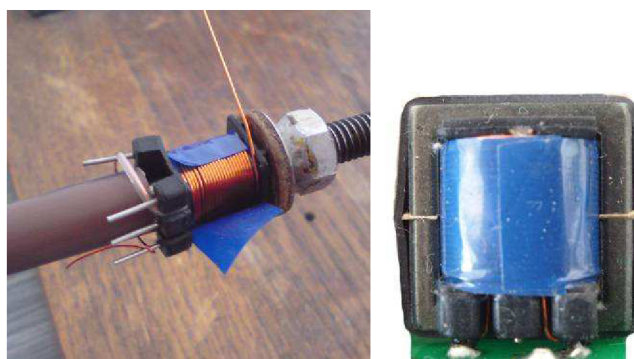
*Obr.7.2: Tlumivka*

### **Přídavná indukčnost**

Jádro: 2 kusy jader typu E typu E1605

Vinutí: 150 závitů vodičem o průměru 0,258mm navinutém na kostřičce mezi jednotlivé vrstvy vinutí vlepena izolační páska.

Tech.info: Závity vineme těsně, nejlépe na navíječe aby byl tah na drát plynulý a rovnoměrný, na navinutou vrstvu nalepíme vždy izolační pásku. Nasadíme jádra z obou stran, mezi které jsme vložili distanční čtverečky vystřižené z izolačního papíru a opatříme smršťovací bužírkou, která je široká jen jako náš čtverec z jader.



*Obr.7.3: Přídavná indukčnost*

### **Vzduchová tlumivka**

Indukčnost cca 1  $\mu\text{H}$  vzduchové cívky je nastavena experimentálně:  $\text{Ø}_{\text{vnitřní}}$  17mm o délce min. 22cm, 2 závity plochým drát o průřezu  $10\text{mm}^2$  (2mm x 5mm) na sebe vinuté

Tech.info: Vineme na kulatinu o prům. 17mm a konce zahneme do roviny, abychom je rovněž mohli připájet na plošky DPS



*Obr.7.4: Vzduchová cívka*

### **Proudový transformátor**

**Jádro:** 1 kus jádra typu LJT 1305/ CF 138

**Vinutí:**

- primární: - 1 závit silnějším lankovým vodičem v silikonové izolaci asi 4cm
- sekundární: - 30 závitů teflonovým drátem  $\text{Ø}$  0,4mm o délce 78cm + 2x15cm

Tech.info: Délku vývodů sekundárního vinutí je třeba ponechat alespoň 15cm. Je vhodné dodržovat rozprostření závitů po celém obvodu toroidu (aby uprostřed zbylo dostatek prostoru pro provlečení primárního průvlaku).



*Obr.7.5: Proudový transformátor*

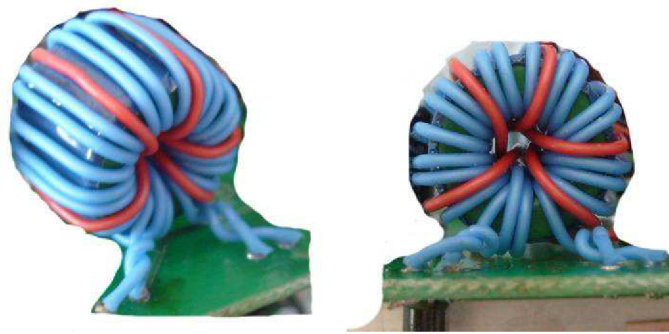
### **Budící transformátor**

**Jádro:** 2 kusy toroidních slepených jader typu LJT 1305/ CF 138

**Vinutí:**

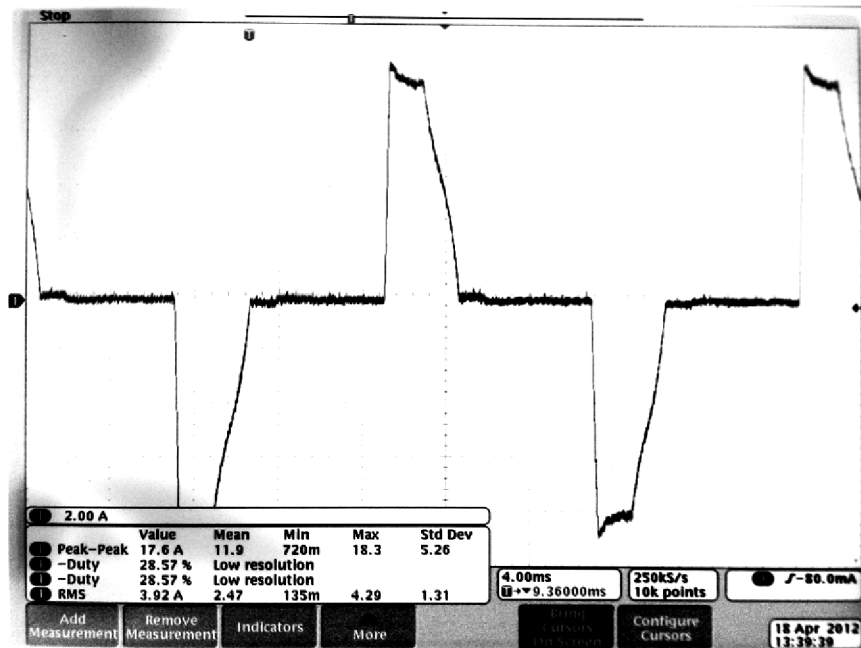
- primární: - 5 závitů o délce min. 22cm
- sekundární: - 2 x 10 závitů, drát  $\varnothing 0,4\text{mm}^2$ , o délce min. 2x 40cm

Tech.info: Dodržovat rozprostření závitů po celém obvodu toroidu primární i sekundární vinutí (minimalizace rozptylu).



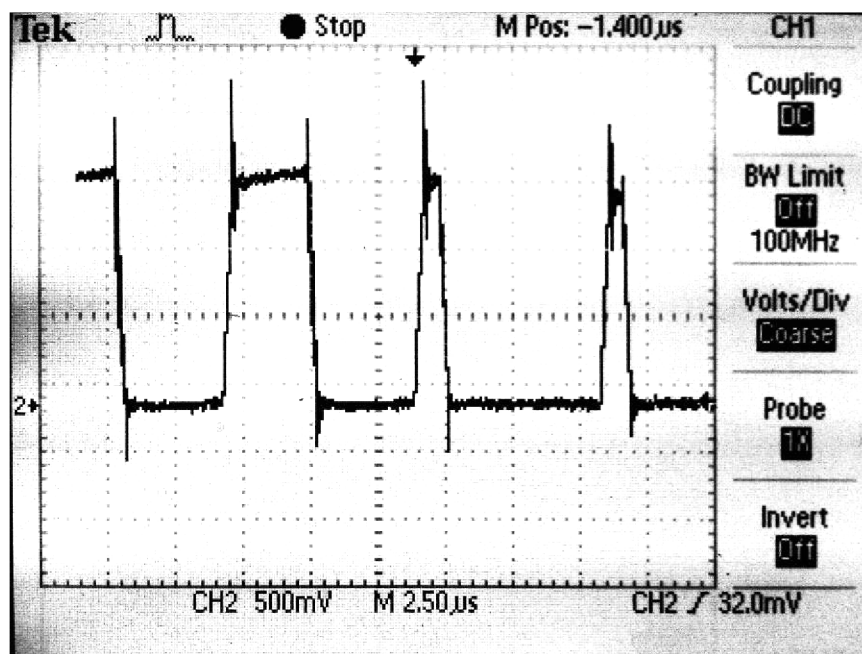
*Obr.7.6: Budící transformátor*

## 8 ZÁKLADNÍ MĚŘENÍ



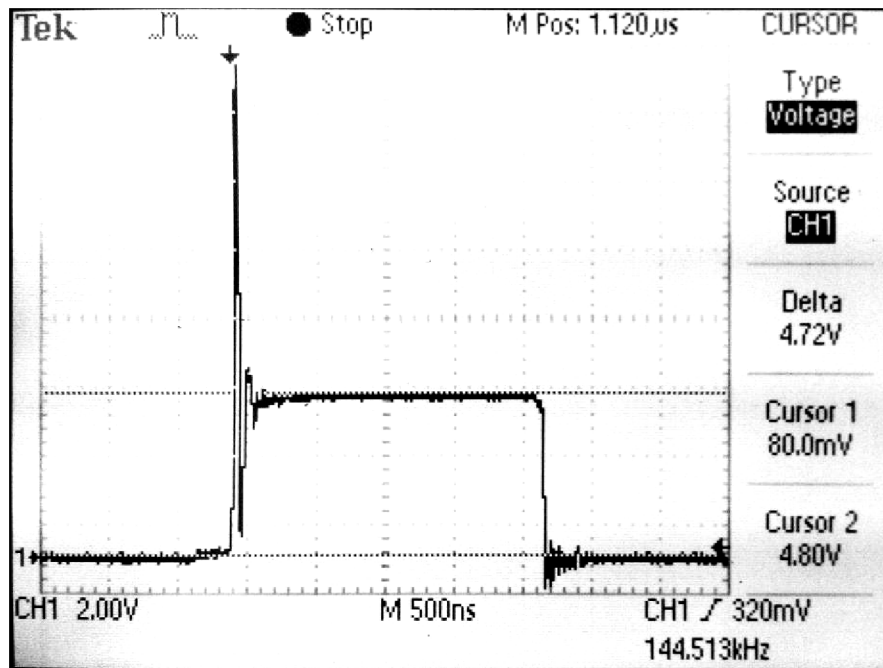
Obr.8.1: Proudový odběr zařízení ze sítě

Průběh proudu napájecí sítě při plném zatížení nabíječky



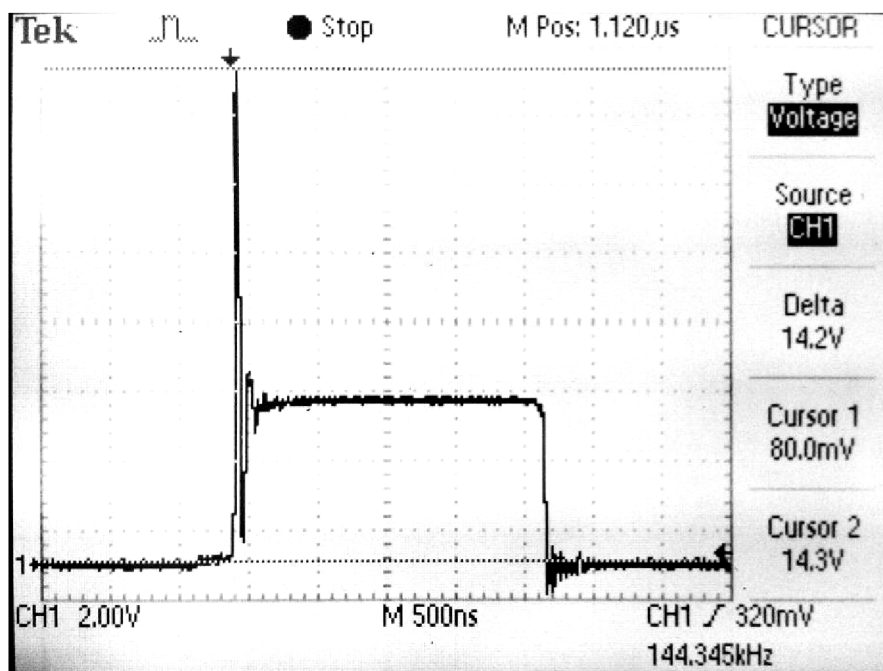
Obr.8.2: Napěťový signál proudového trafo

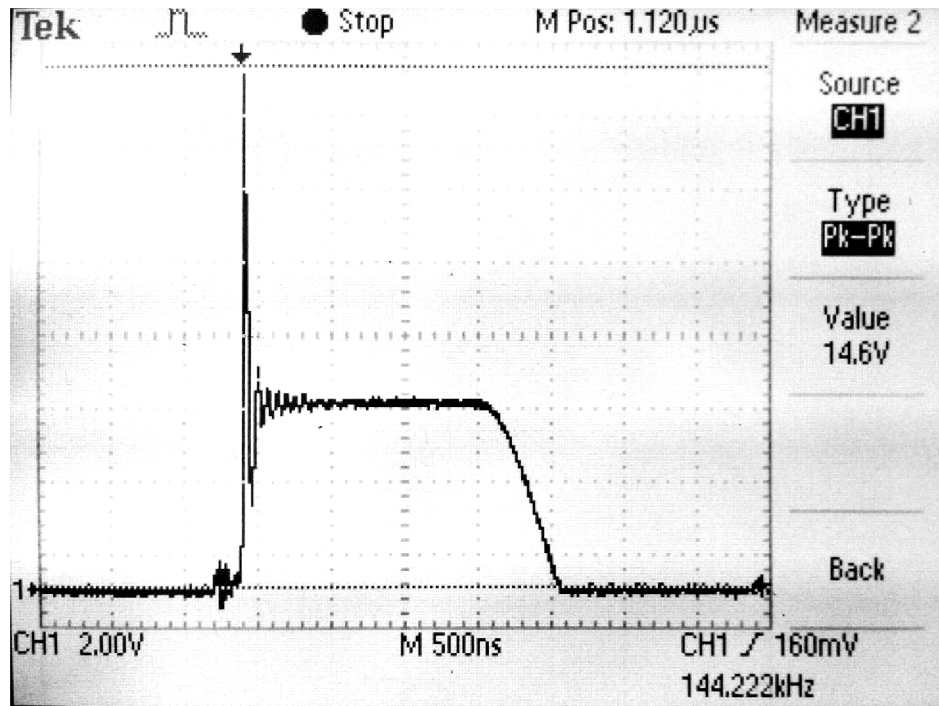
Usměrněný signál z proudového transformátoru měřený přímo na R13 na napěťovém děliči R13 a R14 kde se pomocí špičkového detektoru získává hodnota proudu pro vyhodnocení. Na grafu došlo ke změně okamžité hodnoty střídý vlivem zásahu výstupního proudového regulátoru.



Obr.8.3: Napěťový překmit na D7

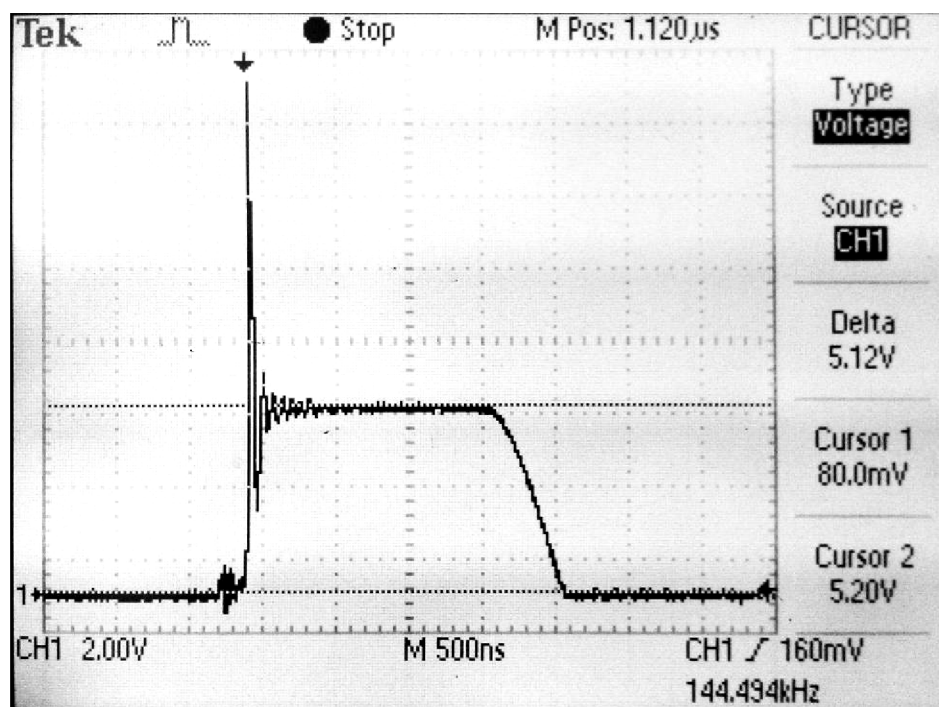
Díky komutačním zkratům v sekundárním usměřovači v součinnosti s rozptylovou indukčností transformátoru vznikají na diodách sekundárního usměřovače napěťové překmity. Napěťový překmit na usměřovací diodě D7 dosahující při plném zatížení 142V oproti ustálenému napětí 47,2V.

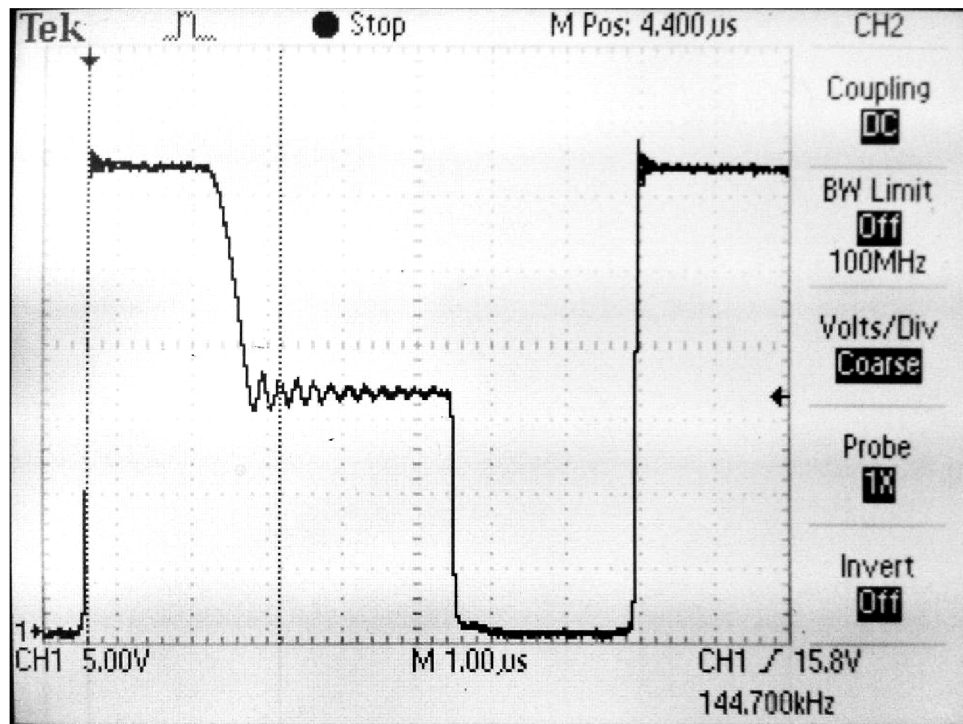




Obr.8.5: Napěťový překmit na D8

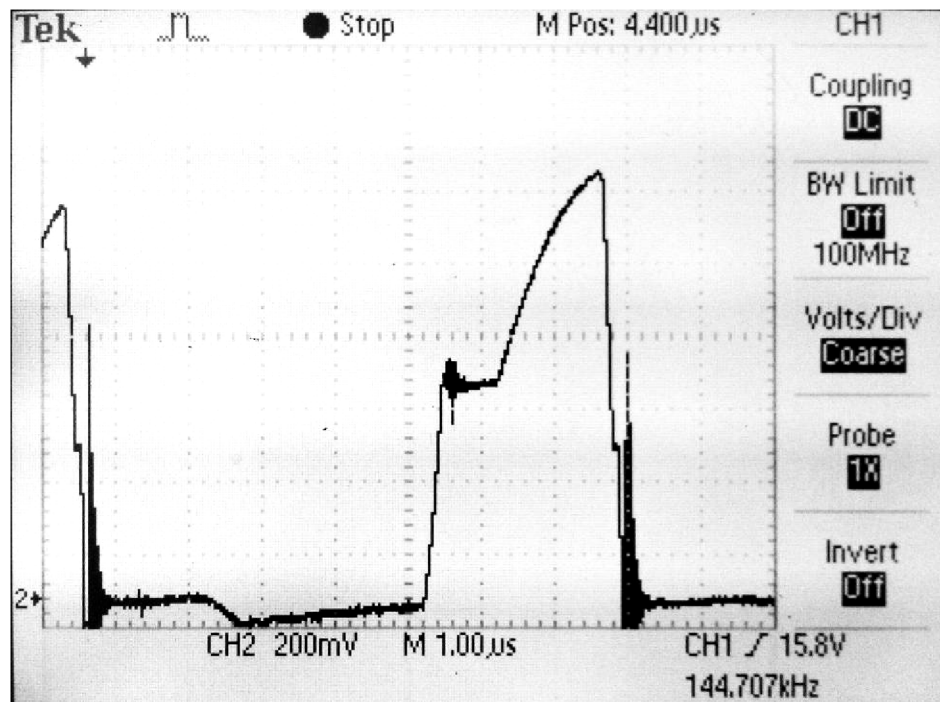
Díky komutačním zkratům v sekundárním usměřovači v součinnosti s rozptylovou indukčností transformátoru vznikají na diodách sekundárního usměřovače napěťové překmity. Napěťový překmit na nulové diodě D8 dosahující při plném zatížení 146V oproti ustálenému napětí 51,2.





Obr.8.7: Napětí GE

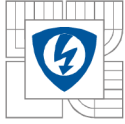
Vidíme strmý nárůst napětí (rychlé přebíjení kapacit) díky rozptylu. Velký zatěžovací proud pomáhá díky rozptylu rychle nabíjet při vypnutí tranzistoru jeho parazitní kapacitu C-E. Po vynutí tranzistoru nastává rychlá demagnetizace, která skončí dostatečně včas, aby mohlo dojít k opětovnému sepnutí.



Obr.8.8: Napětí CE

Vidíme pomlčku při zapínání, kterou způsobuje  $R_{Gon}$ . Pomlčka při vypínání  $R_{Goff}$  je menší a proto jsou omezeny vypínací ztráty.





Nabíječka při maximálním zatížení (plném výkonu) dosahovala parametrů:

Vstup

$$U_{vst}=231V$$

$$I_{vst}=5,9A$$

$$\cos\varphi=0,6743$$

$$P_{vst}=919W$$

Výstup

$$U_{výst}=13,2V$$

$$I_{výst}=50,7A$$

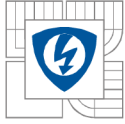
$$P_{výst}=670W$$

Účinnost nabíječky je tedy rovna:

$$\eta = \frac{P_{výst}}{P_{vst}} \cdot 100\% = 73\% \quad (8.1)$$

## 9 ZÁVĚR

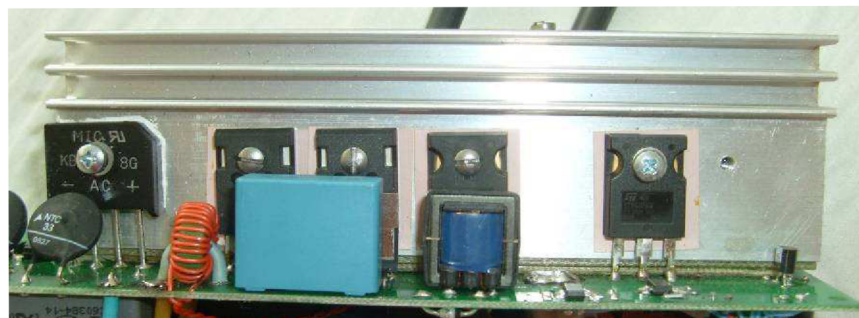
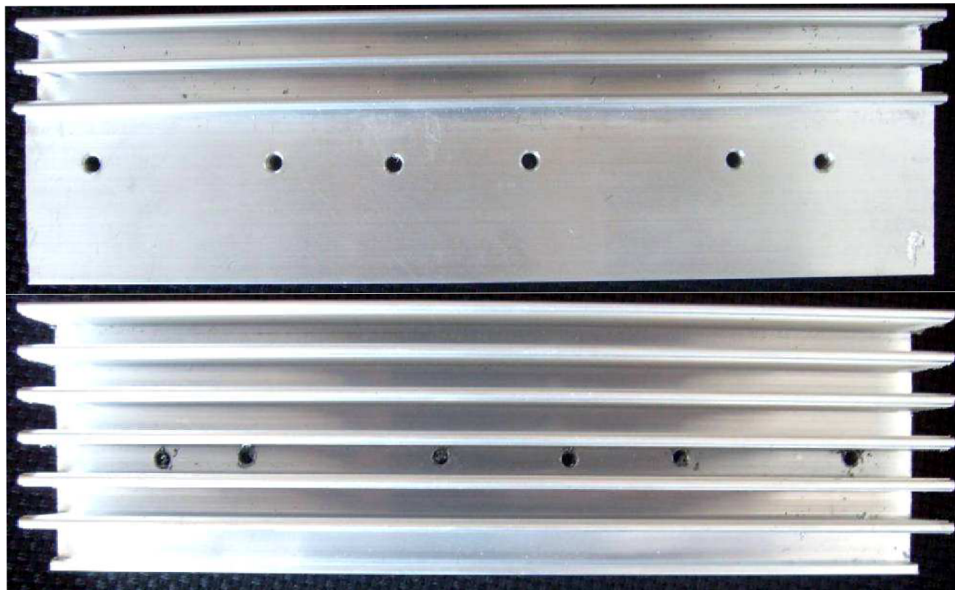
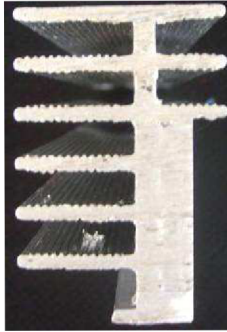
Prakticky jsem zpracoval rozpracovanou nabíječku olověných akumulátorů. Projekt byl pro mě poučný, osvětlil jsem si problematiku spínaných zdrojů. Nabíječka je dimenzovaná na trvalý proud 50A například při startování automobilu v zimních měsících, kdy nemůže baterie dodat dostatečný proud startéru. Plošný spoj je navržen, vyroben a osazen. Pomocí mikropájky byly napájeny SMD součástky na připravené desky. Zhotovil jsem vinuté součástky dle zadání, kde jsem se potýkal s nemalými problémy s přesností. Usazení do krabičky od firmy AZ servis Nové Veselí proběhlo úspěšně a vlastní nabíječka je tak kompletní a chráněna. Oživení nabíječky provázelo pár problému s vlastním rozběhem. Jako základní kámen úrazu se zde projevilo pomocné síťové trafo, které mělo řídicí obvody napájet do doby, než začne pracovat vlastní měnič s pomocným vinutím pulsního transformátoru. Síťové pomocné trafo bylo příliš poddimenzované, v další verzi je třeba zvolit silnější alespoň 1,5VA. Řídicí deska odebírá větší proud, než se předpokládalo. Se zpožděním napájení řídicí desky a zatížením měniče předřadným odporem však problém již nenastává a nabíječka se rozběhne i při sníženém síťovém napětí. Při plném zatížení nabíječky dosahováno účinnosti 73%, což je běžné u spínaných zdrojů. Byla provedena série měření, jednotlivých kusů nabíječek a nikde se neprojevil rozptyl parametrů. Všechny zhotovené kusy se chovaly téměř shodně (napěťová měkkost, schopnost rozběhu při sníženém síťovém napětí, hodnoty výstupních parametrů, pracovní kmitočty apod.), a proto by bylo možno tuto nabíječku vyrábět sériově.



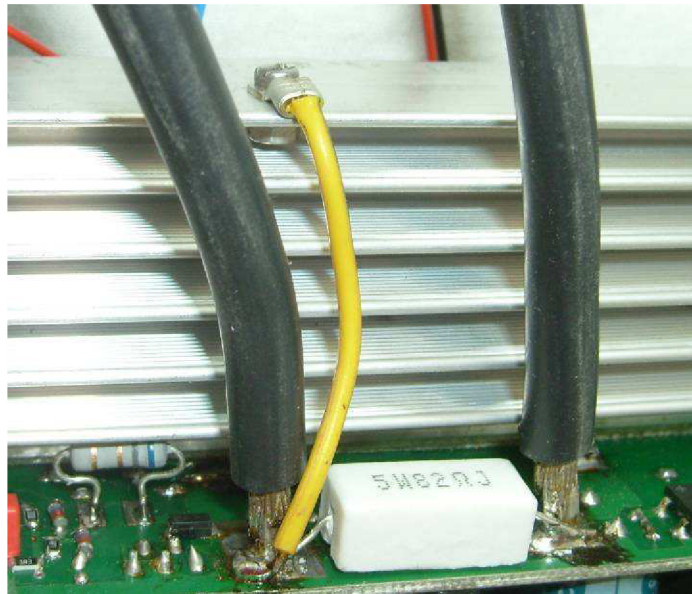
## LITERATURA

- [1] Vorel. P.: Napájení elektronických zařízení elektronické skriptum
- [2] Vorel. P.: Průmyslová elektronika elektronické skriptum
- [3] PATOČKA M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 1, skriptum FEKT, VUT Brno
- [4] PATOČKA M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 2, skriptum FEKT, VUT Brno
- [5] PATOČKA M.: Výkonová elektronika, 1. část - usměrňovače, střídavé měniče napětí, skriptum FEKT, Brno, 2010
- [6] součástky [www.semic.cz](http://www.semic.cz).
- [7] [www.gme.cz](http://www.gme.cz)
- [8] [www.farnell.cz](http://www.farnell.cz)
- [9] Rukopisné poznámky vedoucího projektu.
- [10] Snítily D. : Inteligentní nabíječka pro olověný akumulátor
- [11] Olověný akumulátor <http://www.reuk.co.uk/OtherImages/lead-acid-battery.gif>

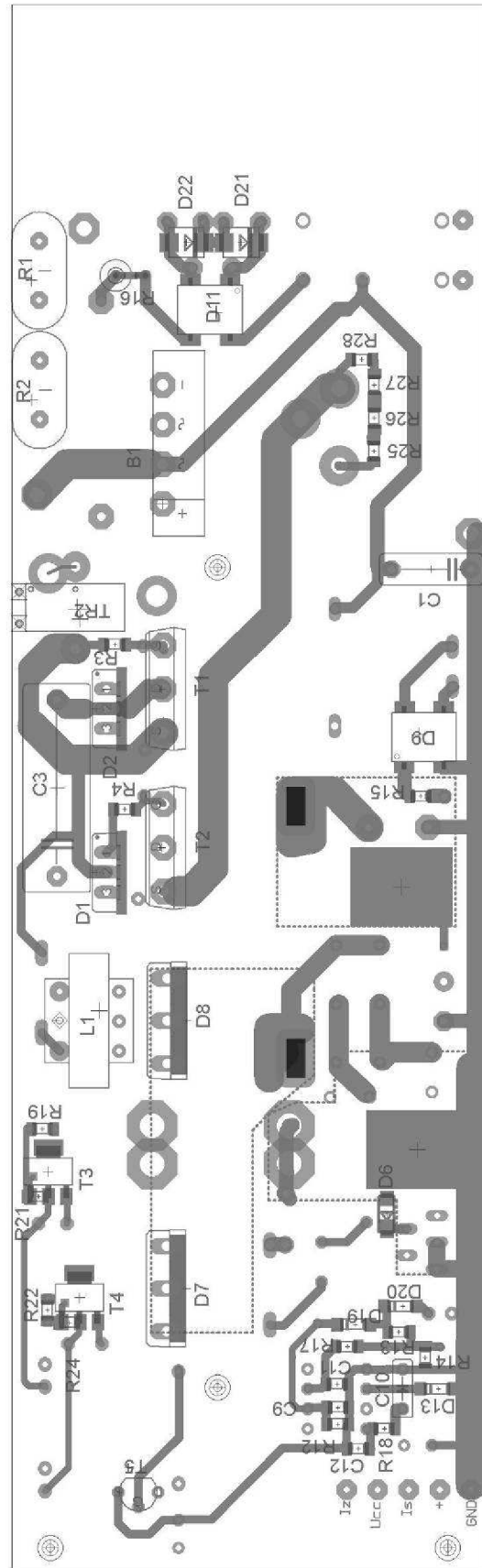
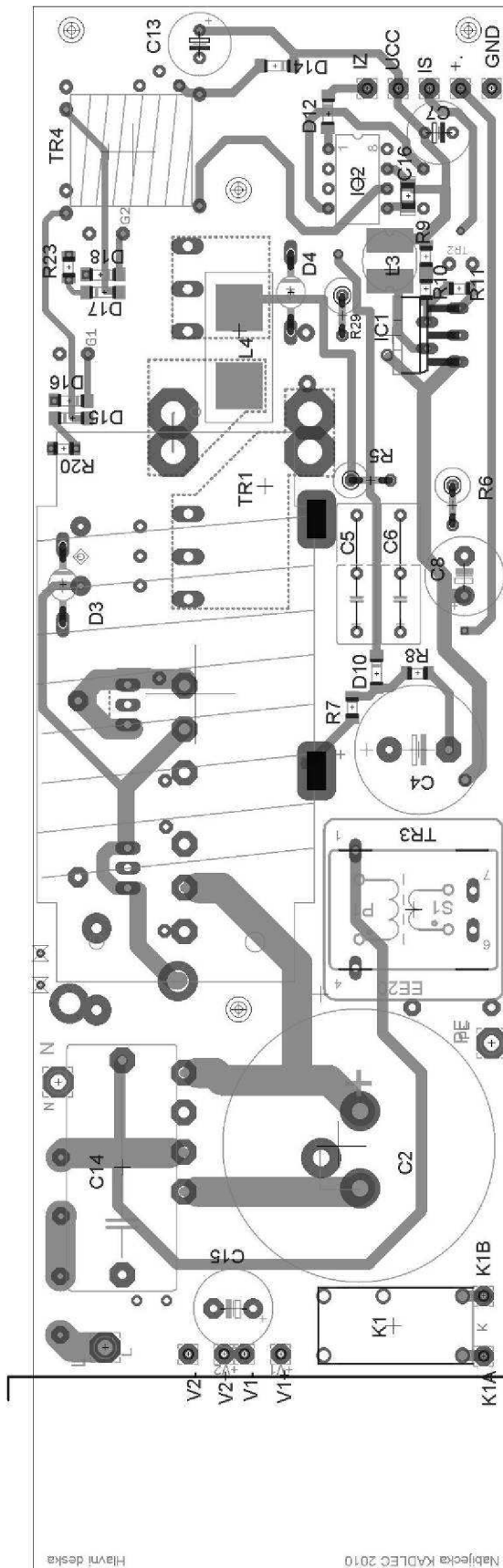
## PŘÍLOHY



*Obr.10.1: Profil hliníkového chladiče*

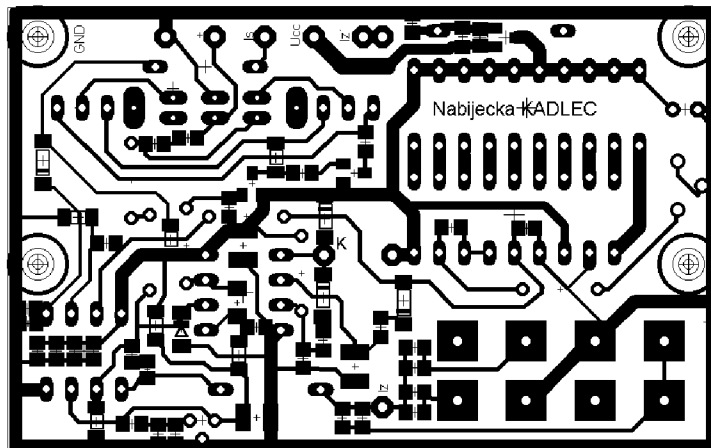


*Obr.10.2: Před zátěž výkonový rezistor 82Ω/5w*

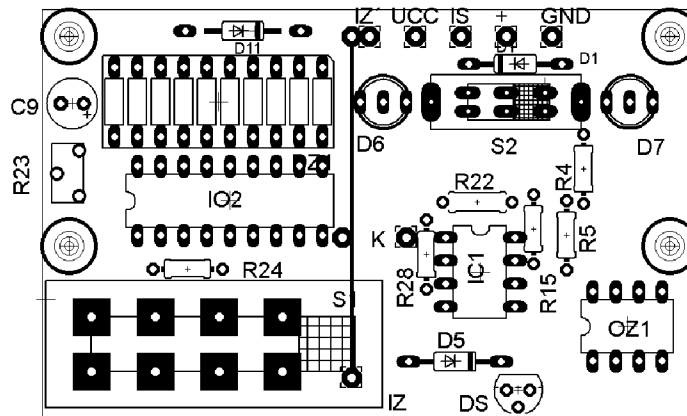


Obr.10.2: Deska plošných spojů strana A-TOP

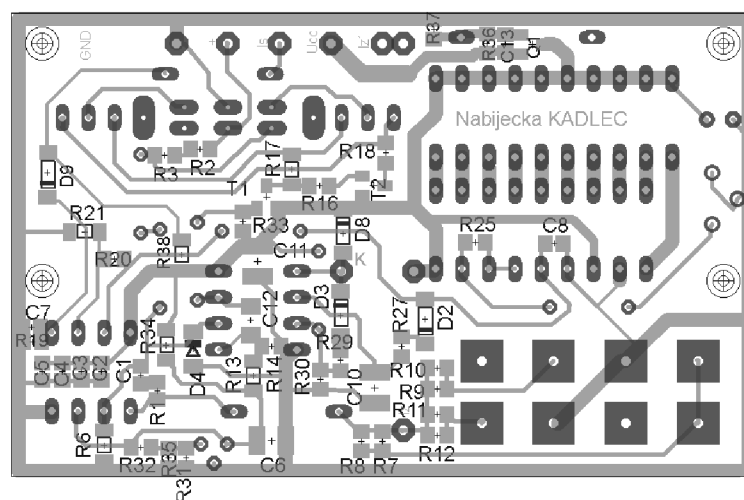
strana B-Bottom



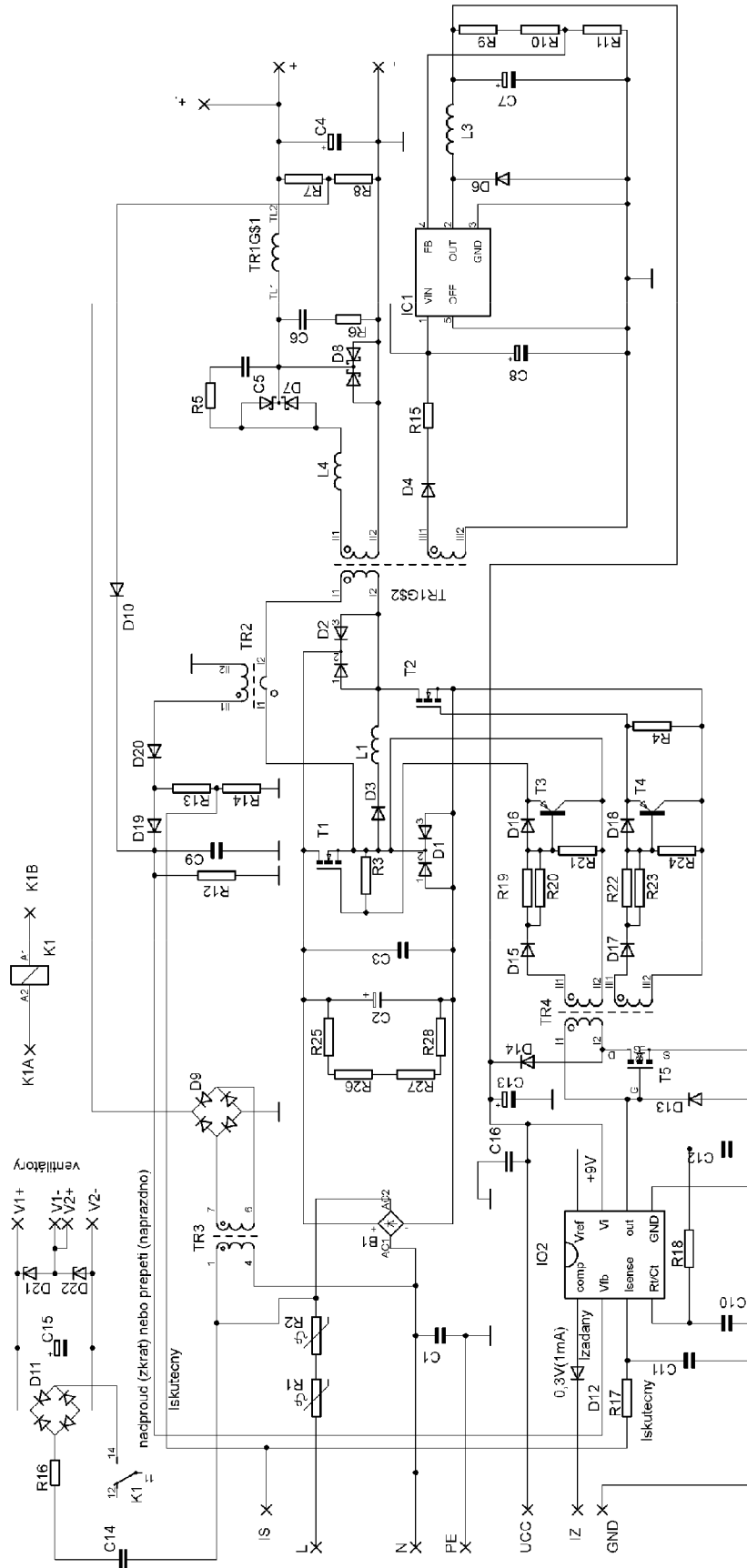
Obr.10.3: Řídící deska cesty plošného spoje



Obr.10.4: Řídící deska umístění součástek Top

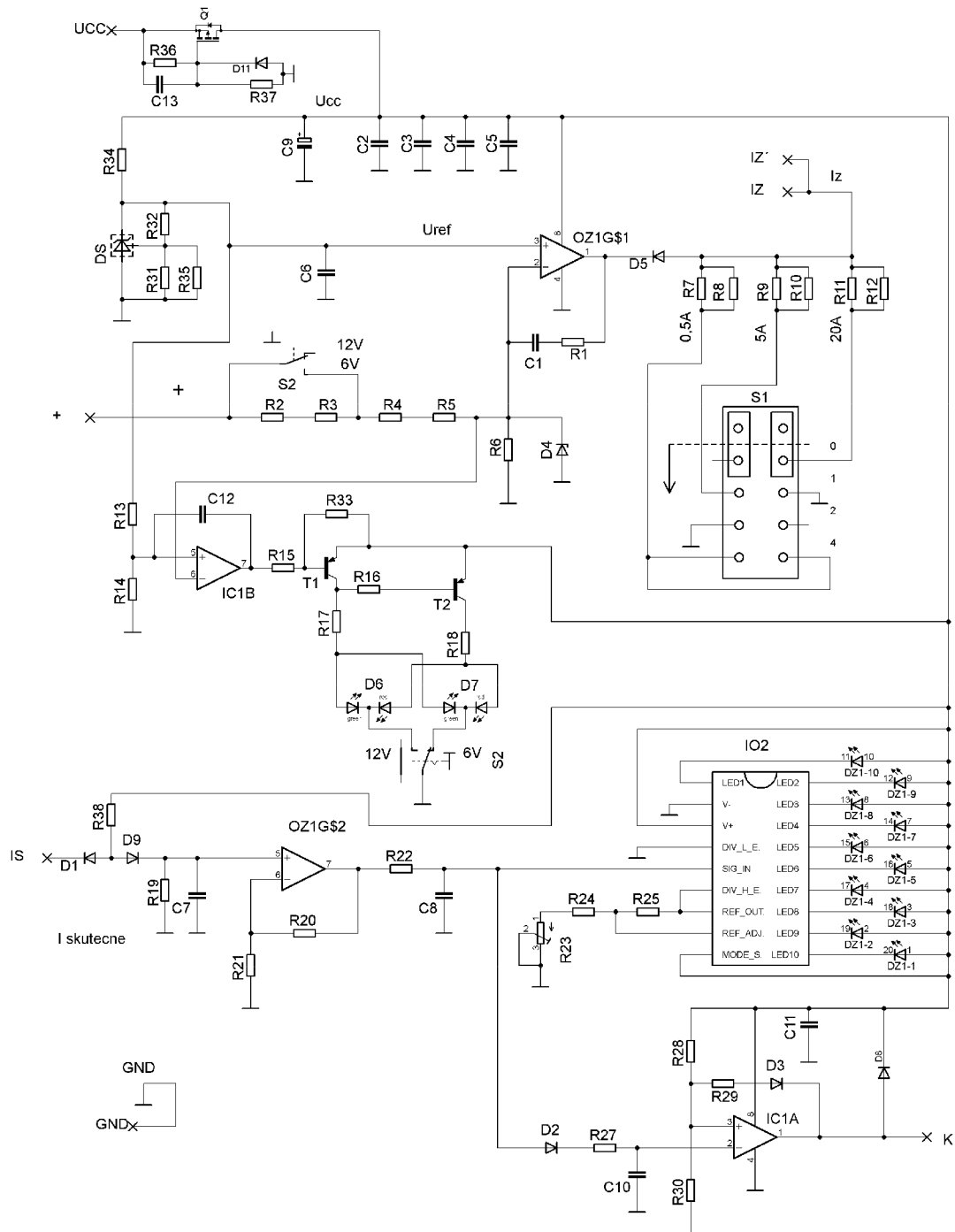


Obr.10.5: Řídící deska umístění součástek Bottom

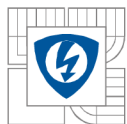


Obr. 10.6: Schéma hlavní desky





Obr.10.7: Schéma zapojení desky regulátoru napětí

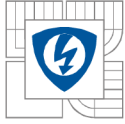


## Seznam součástek

Tabulka 10.1: Seznam součástek hlavní desky

Kondensátory		
popis	velikost	typ pouzdra
C1	4n7/Y	svítkový
C2	470u/400V	elektrolyt
C3	470n/630V	svítkový
C4	1000M/63V	elektrolyt
C5	680p/630V	svítkový
C6	680p/630V	svítkový
C7	220u/25V	elektrolyt
C8	330u/50V	elektrolyt
C9	10n	C1206
C10	330p	svítkový
C11	1n	C1206
C12	100n	C1206
C13	220u/25V	elektrolyt
C14	1u5/275ACV	svítkový
C15	100u/63V	elektrolyt
C16	1u	C1206

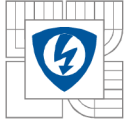
Diody		
popis	velikost	typ pouzdra
B1	KBU8G	KBU
D1	STTH6003CW	SOT93
D2	STTH6003CW	SOT93
D3	BYV26C	SOD57
D4	BYV26C	SOD57
D6	SK36A SMD	SMD
D7	STTH6003CW	SOT93S
D8	STTH6003CW	SOT93S
D9	Diodový můstek DBI06S	GRAETZ_SO4
D10	1N4148	D_SMD
D11	Diodový můstek DBI06S	GRAETZ_SO4
D12	1N4148	D_SMD
D13	BAT46	D_SMD
D14	BAT46	D_SMD
D15	BAT46	D_SMD
D16	BAT46	D_SMD
D17	BAT46	D_SMD
D18	BAT46	D_SMD
D19	BAT46	D_SMD
D20	BAT46	D_SMD
D21	Transil SM6R27ASMD	SMB
D22	Transil SM6R27ASMD	SMB



Integrované obvody		
popis	velikost	typ pouzdra
IC1	LM2576T	TO220-5
IO2	UC3845	DIL8

Tlumivky		
popis	velikost	typ pouzdra
L1	Tlumivka	
L3	TL.SMT75-100uH	DMT75
L4	Vzduchová tlumivka	

Odpory		
popis	velikost	typ pouzdra
R1	NTC 33	B57237S0330M000 - Semic
R2	NTC 33	B57237S0330M000 - Semic
R3	2K2	R1206
R4	2K2	R1206
R5	22	R0411/2W
R6	22	R0411/2W
R7	2k2	R1206
R8	10k	R1206
R9	6k8	R1206
R10	680	R1206
R11	1K2	R1206
R12	10k	R1206
R13	4R7	R1206
R14	3R3	R1206
R15	100	R1206
R16	10	R0411/2W
R17	100	R1206
R18	22k//39k	R1206
R19	33	R1206
R20	33	R1206
R21	470	R1206
R22	33	R1206
R23	33	R1206
R24	470	R1206
R25	47k	R1206
R26	47k	R1206
R27	47k	R1206
R28	47k	R1206
R29	6,8	R0411/2W



Tranzistory		
popis	velikost	typ pouzdra
T1	47N60CFD	FET/TO247
T2	47N60CFD	FET/TO247
T3	BDP950	BDP950
T4	BDP950	BDP950
T5	BS170	BS170

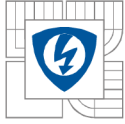
Transformátory		
popis	velikost	typ pouzdra
TR1	Výkonový transformátor	
TR2	Proudový transformátor	
TR3	Transformátor	BV2020159
	230V/12V (0,5VA)	
TR4	Budící transformátor	

Spínací relé		
popis	velikost	typ pouzdra
K1	Relé 250V/5A	RM40-1CO-12V

Tabulka 10.2: Seznam součástek ovládací desky

Kondenzátory		
popis	velikost	typ pouzdra
C1	47n	C0805
C2	100n	C0805
C3	1u	C0805
C4	1u	C0805
C5	1u	C0805
C6	10u	C1210
C7	100n	C0805
C8	100n	C0805
C9	100u/25V	elektrolytický
C10	1u	C1210K
C11	10u	C1210K
C12	1u	C1206
C13	100n	C0805

Diody		
popis	velikost	typ pouzdra
D1	BAT46	SOT80
D2	BAT46	SOT80
D3	BAT46	SOT80
D4	8V	SOD80C
D5	1N4148	DO35-10
D6	DUOLED5MM spol-K	LED 5mm
D7	DUOLED5MM spol-K	LED 5mm
D8	1N4148	SOT80

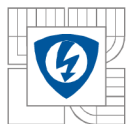


D9	1N4148	SOT80
D11	BAT46	SOT80
DS	TL431 CLP 225	TO-92
DZ1	DC-10GWA	LB10

Integrované obvody		
popis	velikost	typ pouzdra
IC1	LM393N	DIL08
IO2	LM3914	DIL18

Tranzistory		
popis	velikost	typ pouzdra
Q1	BSS84	SMD
T1	BC807-16SMD	SMD
T2	BC807-16SMD	SMD

Odpory		
popis	velikost	typ pouzdra
R1	1k5	R0805
R2	0	R0805
R3	12K	R0805
R4	3K3	R0204/7
R5	330	R0204/7
R6	8K2	R1206
R7	5K6	R0805
R8	560	R0805
R9	1K5	R0805
R10	1K8	R0805
R11	rozpojeno	R0805
R12	1K	R0805
R13	680	R1206
R14	47k	R0805
R15	8k2	R0204/7
R16	8k2	R0805
R17	390	R1206
R18	390	R0805
R19	150K	R0805
R20	6K8	R0805
R21	1K8	R1206
R22	470	R0204/7
R23	500	R-TRIMM3296Y
R24	4K3	R0204/7
R25	1K2	R0805
R27	1M	R0805
R28	15K	R0204/7
R29	2k2	R0805
R30	820	R0805
R31	10K	R0805
R32	10K	R0805



R33	4K7	R0805
R34	1K	R1206
R35	rozpojeno	R0805
R36	1M	R0805
R37	100k	R0805
R38	10K	R1206

Přepínače		
popis	velikost	typ pouzdra
S1	Posuvný 4 pólový přepínač	T24406A
S2	přepínač ON-ON	T561

Tabulka 10.3: Seznam doplňkových součástek

Ostatní součástky související s nabíječkou	
Název	Hodnota
Ventilátory	
V1	KD2406PTS1
V2	KD2406PTS1
Eurokonektor síťového filtru	
EMC	DL-6DZ2R, 250V/6A
Ochranná dioda proti přepólování	dioda
Dx	150EBU02
Pojistky	
F1	Trubičková pojistka 250V/A
F2	pojistka maxi 70A
Přístrojové sloupky	
4ks GF2	
Patice pro integrované obvody SOKL 18	
Patice pro integrované obvody SOKL 20	
Průchodky gumové 2ks KDF10	
Kaptonové podložky 3ks na pouzdro SOT93	
Keramické podložky 2ks na pouzdro SOT93	
Šrouby 6 ks M3 x 36 s pérovkou a podložkou	
Pouzdro na pojistku F2 Maxi	
3ks Faston konektorů samic	
1,5metru 6-8mm vodiče pro nabíjecí vývody	
Krokosvorka pro autobaterie CBC 100A	
15cm 5ti žilového páskového vodiče do 100mA	