

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Nabíječ lithiových akumulátorů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal VILDMAN**  
Osobní číslo: **E14B0074P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Nabíječ lithiových akumulátorů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Zhodnoňte problematiku nabíjení lithiových akumulátorů.
2. Navrhněte nabíječ lithiového článku. Nabíječ s výstupním proudem alespoň 5A bude napájen 230V AC nebo 12V DC, jeho výstup bude galvanicky oddělen od vstupu. Nabíječ bude obsahovat ochrany proti přetížení, zkratu a přehřátí. Při návrhu dbejte na vysokou účinnost nabíječe.
3. Sestavte funkční model nabíječe (konstrukční návrh, dimenzování součástí, sestavení + oživení zařízení, laboratorní ověření činnosti a otestování dosažených vlastností).
4. Zhodnoňte navržené zařízení a uveďte možnosti dalšího vylepšení či rozšíření.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. HAMMERBAUER, Jiří, Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. 2. vyd. Plzeň: Vydavatelství západočeské univerzity, duben 1998. 181 s.
2. Přednášky či skripta z doporučených předmětů, elektronické informační zdroje, katalogy.
3. Další dle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Marek Stejskal**


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku lithiových akumulátorů a sestavením zdroje pro jejich nabíjení. Jsou zde popsány jejich základní principy, z nichž vycházejí jejich přednosti i nedostatky, specifika nabíjení a zásady bezpečného zacházení. Dalším bodem jsou napájecí zdroje, podstata funkce několika základních topologií a jejich porovnání. Poslední část se pak zabývá návrhem a funkcí prototypu, určenému k nabíjení výše zmiňovaných akumulátorů.

## **Klíčová slova**

Lithiový článek, lithiová baterie, nabíjení lithiových článků, napájecí zdroj, spínaný zdroj

## **Abstract**

Presented bachelor thesis is focused on the issue of lithium accumulators and the construction of a source for their charging. This work describes basic principles, based on their strengths and ailments, the specifics of charging and the principle of safe handling. The next part is about power supplies, the essence of the function of several basic topologies and their comparison. At the end the thesis deals with the design and function of a prototype made for charge the above-mentioned accumulators.

## **Key words**

Lithium cell, lithium battery, charging lithium cells, power supply, switched power supply

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2018

Michal Vildman

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Markovi Stejskalovi za odborné rady, kterými se mi do poslední chvíle snažil pomoci při sestavování nabíjecího zařízení a za pomoc s formálním uspořádáním práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 LITHIOVÉ ČLÁNKY</b> .....	<b>12</b>
1.1 HISTORIE .....	12
1.2 VÝHODY A NEVÝHODY LITHIOVÝCH ČLÁNKŮ .....	12
1.3 ZÁKLADNÍ PRINCIP A KONSTRUKCE LI-ION .....	13
1.4 KAPACITA .....	15
<b>2 NABÍJENÍ LITHIOVÝCH ČLÁNKŮ</b> .....	<b>15</b>
2.1 NABÍJECÍ NAPĚTÍ .....	16
2.1.1 <i>Hodnoty nabíjecích napětí</i> .....	16
2.1.2 <i>Nedodržení nabíjecího napětí</i> .....	17
2.2 VYBÍJECÍ NAPĚTÍ .....	17
2.3 NABÍJECÍ PROUD .....	19
2.4 PROCES NABÍJENÍ .....	19
2.4.1 <i>Klasický cyklus</i> .....	19
2.4.2 <i>Fáze formování</i> .....	20
2.5 NABÍJENÍ VÍCE ČLÁNKŮ .....	21
2.5.1 <i>Pasivní balancery</i> .....	21
2.5.2 <i>Aktivní balancery</i> .....	22
2.6 TEPLoty PŘI NABÍJENÍ .....	23
<b>3 NAPÁJECÍ ZDROJE</b> .....	<b>24</b>
3.1 LINEÁRNÍ ZDROJE .....	24
3.2 SPÍNANÉ ZDROJE .....	26
3.2.1 <i>Spínané zdroje bez transformátoru</i> .....	27
3.2.2 <i>Spínané zdroje s transformátorem</i> .....	28
<b>4 VÝBĚR A REALIZACE KONKRÉTNÍHO ZDROJE</b> .....	<b>33</b>
4.1 NÁVRH PROTOTYPU .....	34
4.2 FUNKCE ŘÍDÍCÍHO OBVODU UC3842N .....	35
4.3 VÝSLEDNÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ OBVODU A PODROBNÝ POPIS JEHO FUNKCE .....	37
4.4 VÝROBA A SEŠTAVENÍ PROTOTYPU .....	38
4.5 OŽIVENÍ A DETEKCE CHYB, FUNKCE PROTOTYPU .....	40



4.6	SHRNUTÍ FUNKCE .....	45
4.7	OCHRANA PROTI PŘEHŘÁTÍ .....	45
4.8	MOŽNOSTI DALŠÍHO VYLEPŠENÍ .....	46
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>47</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>48</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>

## Úvod

Lithiové články jsou dnes jedny z nejpoužívanějších přenosných zdrojů elektrické energie pro spotřební elektroniku. Stýkáme se s nimi prakticky každý den v mobilních telefonech, noteboocích, fotoaparátech a dalších zařízeních. Svoje místo však mají i v energeticky náročnějších aplikacích, jakým je například ruční elektrické nářadí a v dnešní době se používají i pro napájení elektromobilů. Jako všechna zařízení mají své přednosti, ale i nedostatky a je důležité vědět, jak s takovými články zacházet.

První částí této práce je stručné seznámení s vývojem, konstrukcí a základními principy. Následuje podrobnější popis jejich nabíjení a vybíjení. Lithiové články mají specifické nabíjení, je žádoucí dodržovat přesné nabíjecí napětí a při něm maximální dovolený proud. Důležité je tyto parametry znát, protože mají přímý vliv na životnost, funkci a hlavně bezpečnost.

Dalším bodem práce je návrh a výroba nabíječe uváděných článků, proto jsou v teoretické části ještě uvedeny základní typy napájecích zdrojů. Ty se dají rozdělit na dva základní typy, lineární a spínané. Rozdíl mezi nimi je zřejmý z jejich funkce, jež bude popsána. Pro aplikace podobného typu, jakým je nabíjení, se většinou používají spínané. Jejich popis obsahuje základní používané topologie a jejich funkci.

Navrhovaný nabíječ je určen pro nabíjení jednoho článku s dodržением požadovaných parametrů. Podstatou nabíjecího zařízení je spínaný zdroj typu flyback. Ten je vhodný z hlediska požadovaného galvanického oddělení, jelikož obsahuje transformátor a taky je jeho použití pro aplikace podobných výkonů obvyklé. Praktická část obsahuje tedy návrh takového zdroje a sestavení z něho vycházejícího schématu zapojení. Pokračuje výrobou plošného spoje, sestavením prototypu, jeho oživením a zkouškou funkce.

## Seznam symbolů a zkratek

V	volt - jednotka elektrického napětí
Wh/kg	watthodina/kilogram - jednotka hustoty energie
C	coulomb - elektrický náboj
Ah	ampérhodina - jednotka kapacity baterií
h	hodina
I <sub>v</sub>	vyrovnávací proud
C	jmenovitá kapacita akumulátoru
Hz	hertz - jednotka frekvence
AC	obecné označení střídavého proudu
DC	obecné označení stejnosměrného proudu
PWM	pulzně šířková modulace
FET	tranzistor řízený elektrickým polem
VF	vysokofrekvenční
W	watt - jednotka výkonu
A	ampér - jednotka elektrického proudu
F	farad - jednotka kapacity
H	henry - jednotka indukčnosti
Ω	ohm - jednotka elektrického odporu
DPS	deska plošného spoje
OZ	operační zesilovač
kW	kilowatt - jednotka výkonu

# 1 Lithiové články

Lithiové články jsou dnes nejrozšířenějším zdrojem energie v oblasti spotřební elektroniky. Buď jako primární články v zařízeních s požadavkem na dlouhou výdrž (např. hodinky), nebo jako sekundární pro mobilní telefony, notebooky apod. Toto odvětví baterií je poměrně mladé a neustále se vyvíjí.

## 1.1 Historie

První pokusy s lithiovými články začaly již roku 1912 [3], ale první použitelné a dostupné články byly vyvinuty až v šedesátých letech 20. století [13]. Nejprve to byly články primární (nenabíjecí). Tyto články vykazovaly vyšší energetickou hustotu, objemovou i hmotnostní a nižší samovybíjení, než u dalších doposud používaných článků. Následně se, po pokusech v osmdesátých letech 20. století, ukázalo, že je možné vyrábět je i jako články sekundární (nabíjitelné). Zpočátku byly tyto pokusy o nabíjitelné lithiové články neúspěšné, neboť tyto články snadno explodovaly [10]. Po vyřešení tohoto problému v devadesátých letech byly poprvé použity komerčně [3]. Od této doby nahrazují akumulátory Ni-Cd a Ni-Mh, jelikož je ve většině svých parametrů překonávají. V dnešní době je nalezneme ve většině elektroniky [6].

Nejčastěji jsou využívány dva druhy lithiových článků, lithium-iontové (Li-ion) a lithium-polymerové (Li-pol).

## 1.2 Výhody a nevýhody lithiových článků

V porovnání lithiových a niklových článků je, při stejném objemu, do lithiových možné uložit až čtyřikrát více energie. Také jmenovité napětí mají výrazně vyšší [12].

Tab. 1.1 Porovnání základních článků [12][20][21][22][23][24][25][26][27]

Článek	Jmenovité napětí [V]	Měrná hustota energie [Wh/kg]	Max. nabíjecí proud	Max. vybíjecí proud
Ni-MH	1,2	30 - 100	1C	6C
Ni-Cd	1,2	40 - 60	1C	10C
Li-ion	3,6	150 - 250	10C	20C
Li-pol	3,7	130 - 200	2C	20C
LiFePO <sub>4</sub>	3,3	90 - 110	3C	20C
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3,7	100 - 150	3C	10C

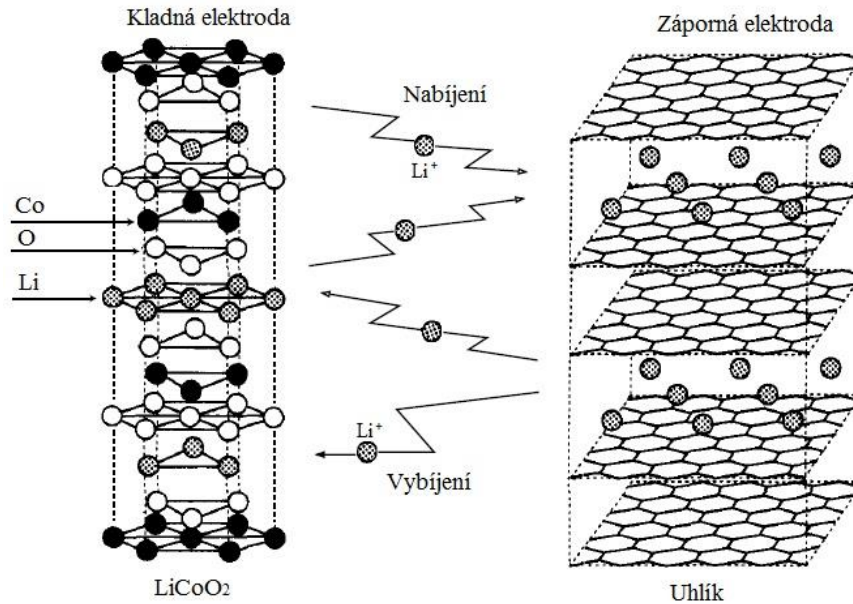
Další dobrou vlastností je možnost dobíjení v různém stavu vybití bez toho, aby článek nějak zhoršoval svoje vlastnosti [5]. Mají delší životnost [3]. Mohou se vyrábět v různých tvarech [5], například jako ploché články s tloušťkou od několika desetin milimetru. Takové články jsou ideální pro aplikace dnešních tenkých zařízení spotřební elektroniky (mobilní telefony, tablety, notebooky,...), díky možnosti výroby v různých tvarech se dobře hodí i pro ruční nářadí. V neposlední řadě jsou také méně toxické, oproti například olověným a jsou tak brány za ekologicky méně závadné, než ostatní používané [7].

Naopak mezi nevýhody patří křehkost těchto článků, kvůli které musí být v kvalitních a pevných obalech [3]. Dále podléhají stárnutí, bez ohledu na četnost používání a také jim nesvědčí přílišné výkyvy teplot [3]. Oproti niklovým mají vyšší vnitřní odpor a díky tomu z nich nelze získat stejně vysoký proud [12].

### 1.3 Základní princip a konstrukce Li-ion

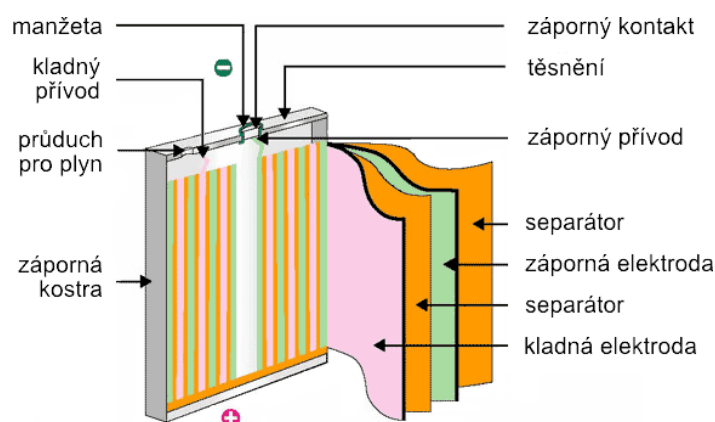
Článek je tvořen dvěma elektrodami, kladnou a zápornou a kapalným bezvodým tuhým elektrolytem. Ten je tvořen lithiovou solí rozpuštěnou v organickém rozpouštědle [11]. Záporná elektroda (nazývaná anoda) je vyrobena ze sloučeniny uhlíku a grafitu [11]. Do její krystalové mřížky se pouze vměšují ionty lithia, a tedy v podstatě neprobíhá chemická reakce [5], což je rozdíl oproti jiným článkům. Tím je vnitřní struktura „šetřena“ a díky tomu dosahují články delší životnosti bez podstatných změn ve výkonech článku. Kladná elektroda (katoda) je ve více provedeních, nejčastěji je to však kysličník lithia a

kobaltu  $\text{LiCoO}_2$  (dále např.  $\text{LiNiO}_2$ ) [5]. Lithium-ionty se pohybují elektrolytem, podle toho jestli se článek vybíjí nebo nabíjí, mezi kladnou a zápornou elektrodou. Tyto ionty přenášejí elektrický náboj. Jmenovité napětí jednoho článku je 3,6 V a nabíjecí napětí 4,2V [5].



Obr. 1.1 Pohyb iontu  $\text{Li}^+$  při nabíjení a vybíjení [12]

Tyto články jsou často jako válcové, kde jsou elektrody svinuty na sobě [5]. Obal je tvořen kovem s tlakovou pojistkou pro případ úniku plynů při přebití [5]. Díky tomuto obalu jsou relativně bezpečné a mechanicky odolné [5].



Obr. 1.2 Struktura Li článku [5]

## 1.4 Kapacita

Kapacita elektrického článku je množství elektrického náboje, které může článek dodat za určitého vybíjení. Jednotkou pro elektrický náboj je coulomb [C], používá se však vyjádření v ampérhodinách [Ah]. Například kapacita 450mAh udává, že akumulátor je schopen dodávat proud 100mA po dobu 4,5 hodiny, nebo proud 450mA po dobu 1 hodiny apod.

Lithiové články jsou dostupné ve velkém rozmezí kapacit. K běžnému dostání jsou články kapacit od desítek mAh až po stovky (až tisíce) Ah. Typické kapacity lithiových akumulátorů v notebookích nebo např. digitálních fotoaparátech jsou dnes v jednotkách Ah. Je také možné je řadit sériově či paralelně do baterií složených z několika článků a tak zvyšovat jejich kapacitu a výstupní napětí. Mohou to pak být baterie v řádech mAh, ale také v tisících Ah. Ovšem při sériovém řazení je nutné, aby byly baterie vybavené tzv. balančními obvody (popsané v kapitole 2.5), které hlídají napětí na jednotlivých článcích [5]. Napětí vyrovnávají tak, aby bylo na všech článcích shodné. Pokud by tyto obvody chyběly, hrozilo by nadměrné rozdílné nabití či vybití jednotlivých článků a tím ke zničení celé baterie [5].

## 2 Nabíjení lithiových článků

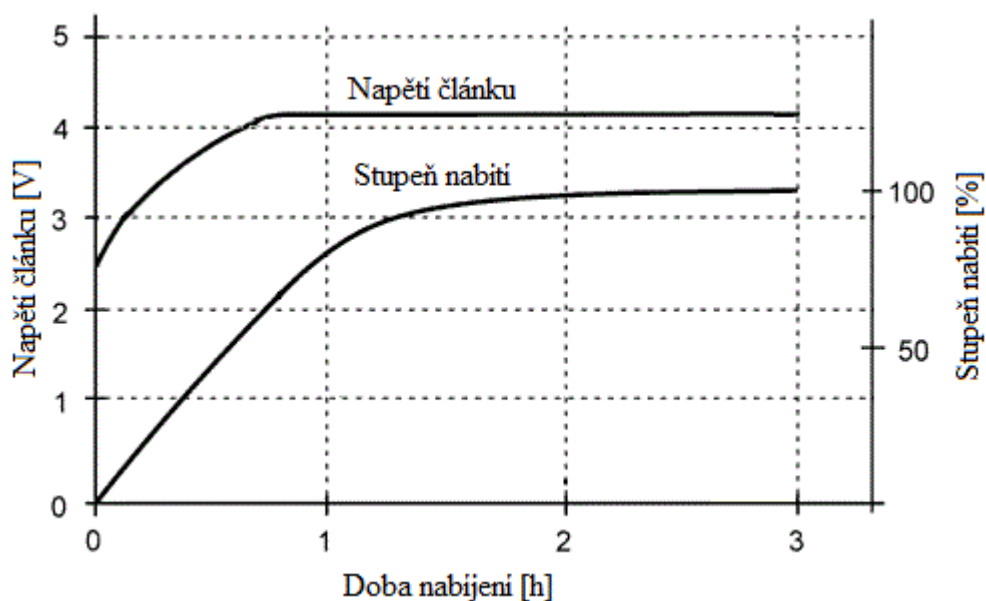
Správné nabíjení, ale i míra vybití, mají zásadní vliv na výkony, životnost a bezpečnost článku. Nesmí být překročeno maximální nabíjecí napětí a při vybíjení by zase neměla být překročena hranice nejnižšího povoleného napětí. Dále nesmí být překročen nabíjecí proud, ale ten nemusí mít předem daný průběh, ani zůstat na předem dané úrovni, jako napětí. S tím související a nejdůležitější pro bezpečnost je dodržení teplot. Při překročení jedné z těchto hranic hrozí trvalé zničení akumulátoru, které může skončit zhoršením vlastností, v krajním případě až výbuchem.

## 2.1 Nabíjecí napětí

Nabíjecí napětí je velmi zásadní parametr pro nabíjení lithiových článků a je zvláště důležité toto napětí přesně dodržet. Jeho velikost má přímý vliv na životnost a bezpečnost článku. Jelikož existuje více druhů článků, lišících se v konstrukci a tedy i ve velikosti nabíjecího napětí, nelze použít univerzálně nabíječku na jakýkoli lithiový článek, ale je nutné předem zjistit, jaké nabíjecí napětí konkrétní článek vyžaduje.

### 2.1.1 Hodnoty nabíjecích napětí

Jak již bylo řečeno, existuje více druhů článků s různou velikostí nabíjecího napětí. To se liší s materiálem, který je použit na kladnou elektrodu. Nejběžnější je Li-ion článek s kobaltovou elektrodou  $\text{LiCoO}_2$  a ten má nabíjecí napětí 4,2 V [8]. To je potřeba udržet velmi přesně, s výrobcem udávanou tolerancí  $\pm 1\%$ . Ovšem kromě tohoto nejběžnějšího se stále vyrábějí i další články s odlišným nabíjecím napětím, které se pohybuje nejčastěji v rozmezí od 3,6 V do 4,3 V [8]. Například akumulátory používané v průmyslu nebo ve vojenských aplikacích mají nabíjecí napětí 3,9 V [35]. Jsou ale i speciální články s nabíjecím napětím 1,3 V až 2,0 V [8]. Trendem je úsilí sloučit toto napětí u nově vyráběných článků na 4,2 V [13].



Obr. 2.1 Průběh napětí při nabíjení - upraveno z [10]



### 2.1.2 Nedodržení nabíjecího napětí

Již malé nedodržení nabíjecího napětí směrem nahoru má za následek degradaci parametrů a může být i příčinou zničení článku. Překračováním se výrazně snižuje počet nabíjecích cyklů a tedy životnost. Článek s koncovým nabíjecím napětím 4,2 V má kritické napětí už 4,3 V, které je v některých zdrojích uváděno jako hraniční, které ještě článek vydrží, v jiných zase, že již začínají probíhat nevratné změny a dochází k podstatné degradaci vlastností. Proto je žádoucí dodržovat toto napětí v mezích maximálně  $\pm 0,05$  V [35], tedy do 4,25 V, což udávají výrobci. Překročením 4,3 V se počet nabíjecích cyklů zkrátí na pouhé desítky [12], může však, vlivem chemických reakcí ve struktuře, které uvolňují kyslík a tím zvyšují tlak uvnitř článku, dojít až k přerušení pojistky a nevratnému zničení. Při překročení se také značně ohřívá. Některé články jsou proto vybaveny implementovanými elektronickými obvody pro odpojení napájení při překročení kritického napětí nebo teploty akumulátoru.

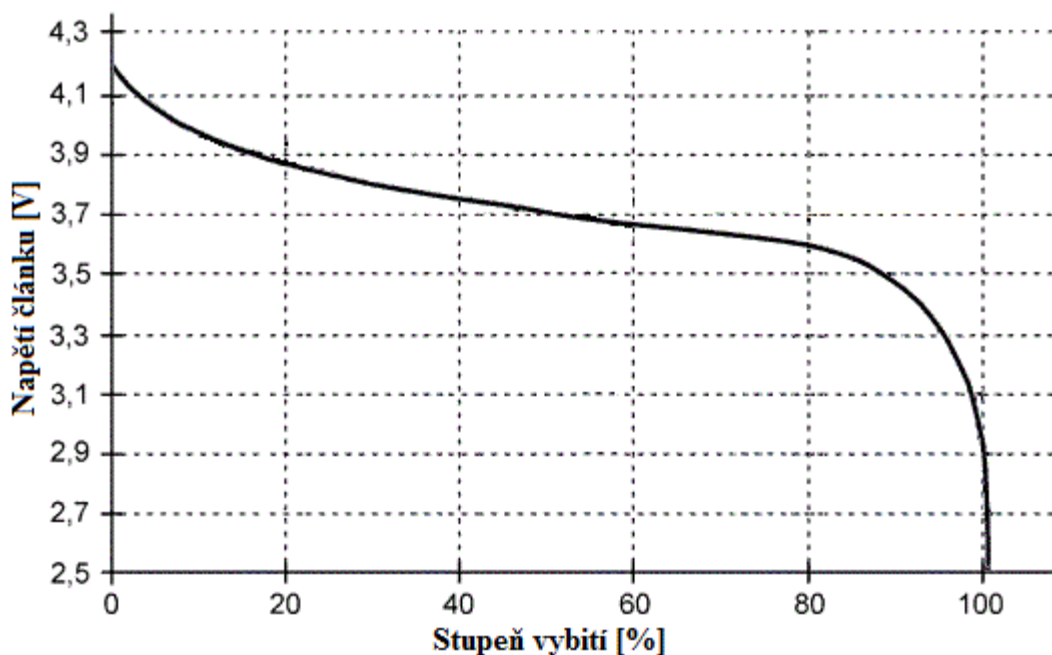
Naopak pokud se článek opět s koncovým napětím 4,2 V nabíjí na napětí menší, nehrozí žádné nebezpečí a dokonce se mu zvýší počet nabíjecích cyklů [12]. Ovšem není nabit na svoji jmenovitou kapacitu.

Tab. 2.1 Porovnání počtu nabíjecích cyklů v závislosti na nabíjecím napětí pro daný článek s napětím 4,2 V [12]

Konečné nabíjecí napětí [V]	Využitá kapacita [%]	Počet nabíjecích cyklů [%]
4,10	85	150
4,20	100	100
4,25	110	70

### 2.2 Vybíjecí napětí

Pro nabíjení je důležité znát také vybíjecí napětí. Napětí plně nabitého článku po připojení k zátěži nejprve rychleji klesá k hodnotám okolo 3,6 až 3,7 V. V této oblasti pracuje článek nejdelší dobu a po vyčerpání svojí energie začne napětí klesat s velkou strmostí.



Obr. 2.2 Vybíjecí křivka Li-ion článku s nabíjecím napětím 4,2 V - upraveno z [10]

Doporučuje se ukončit vybití článku při poklesu na konečné vybíjecí napětí, udávané většinou v rozmezí 2,7 V – 3,0 V. Při vybití na 2,5 V se článku již velice významně zkracuje životnost a zhoršují vlastnosti. 2,5 V je na hranici zničení článku, jelikož ve struktuře začínají probíhat nevratné změny a při ještě hlubším vybití hrozí trvalé zničení. Takto hluboce vybité akumulátory, s napětím 2,5 V a nižším, je ještě šance oživit. Musí se nejprve několik hodin nabíjet velice malým proudem, v řádu setin jmenovité kapacity článků C, než jejich napětí překročí hranici alespoň 2,7 V a pak zkusit nabíjet normálním způsobem [10]. Článek se nesmí zahřívát. Pokud se zahřívá, je nenávratně zničen, pokud ne a dosáhne svého nabíjecího napětí, je ještě použitelný. Jeho vlastnosti budou ale zcela jistě podstatně zhoršené [17]. Takto vybité články by se neměly připojovat k nabíječce a proces oživení je nutné provést externě. Existují sice chytré nabíječky, které poznají hluboce vybité články a mají pro jejich nabíjení speciální cyklus, ale je nutné to vědět. Po připojení k běžné nabíječce dojde u hluboce vybitého článku vlivem vysokého proudu k vážnému poškození. Běžné přístroje proto obsahují elektronické obvody pro odpojení zátěže od baterie při dosažení kritického vybíjecího napětí [10]. V běžné praxi by se proto neměly podvybité články objevit.

## 2.3 Nabíjecí proud

Tento proud je udáván v násobcích jmenovité kapacity článku C. Například pokud má článek kapacitu 600mAh a má se nabíjet proudem 2C, bude maximální nabíjecí 1200 mA.

Nabíjecí proudy se u starších článků pohybovaly okolo 0,1 C. Dnes běžně dostupné články zvládají proudy v rozmezí 1 až 10 C. Hodnota maximálního nabíjecího proudu konkrétního článku pro nabíjení musí být známa. Větším proudem se nabíjet nesmí, článek se pak začne nadměrně zahřívat a hrozí nebezpečí přerušení článku, v krajním případě až k explozi. Pokud bude proud menší, nabíjení bude pouze trvat déle. Existují dnes už i akumulátory pro výkonové aplikace, které zvládnou proud až 10 C. Vybíjecí proud pak může být i několikanásobně vyšší, ovšem i ten má svoji mez kdy se článek začne velice zahřívat, při zkratu pak může dojít až k destrukci. [10][14]

## 2.4 Proces nabíjení

### 2.4.1 Klasický cyklus

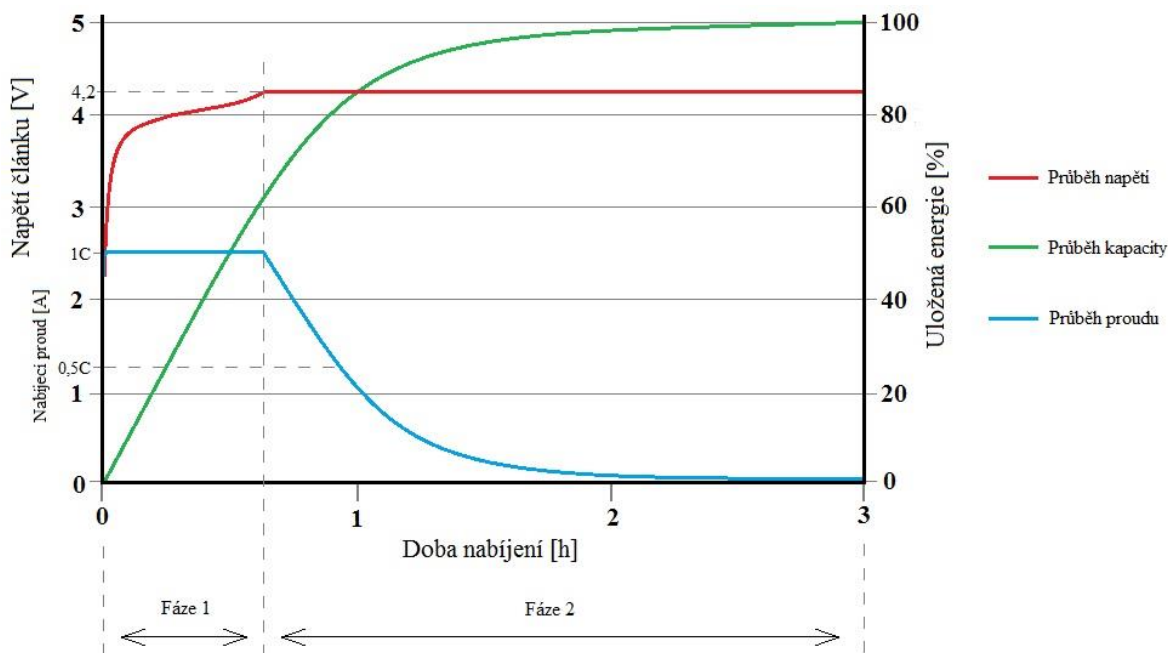
Obvykle se pro nabíjení lithiových článků používá tzv. napěťové nabíjení. Je to nabíjení ze zdroje napětí, nastaveného na určitou hodnotu, s omezením výstupního proudu [8]. Nabíjení se dá rozdělit do určitých fází.

V první fázi, po připojení článku na nabíječ, se nabíjí nabíjecím proudem, dokud napětí nevzroste na konečné nabíjecí napětí [10]. Proud je omezen výrobcem udávanou velikostí pro daný článek, případně maximálním proudem, který je nabíječ schopen dodávat. Tato část nabíjení probíhá relativně rychle. Doba závisí na velikosti nabíjecího proudu a začíná na několika desítkách minut [19]. Ve chvíli, kdy je tato fáze u konce, je v článku uloženo asi 75% energie za předpokladu, že byl článek na začátku zcela vybit. V případě nabíjení menším proudem bude energie na konci této fáze o něco vyšší, nabíjení se ovšem prodlouží [10].

Zbytek energie bude nabit ve druhé fázi. V té se již drží dosažené napětí na konstantní hodnotě. Nabíjecí proud postupně klesá až k nule. Nejprve klesá strměji, ale čím blíže k nule je, tím klesá pomaleji. Uvádí se, že článek je plně nabit a nabíjení se může ukončit,

pokud proud klesne na zlomek nabíjecího proudu. Nejčastěji se udává hodnota 2 – 3 % [19], tedy 0,02 C – 0,03 C. Takto pracující nabíječka může nabíjet články o různé kapacitě, pokud není překročen nabíjecí proud článku s nejmenší kapacitou. Musí mít samozřejmě shodné konečné napětí. Článek s vyšší kapacitou se bude pouze nabíjet déle [10]. Tím, že proud postupně klesne až k nule, nehrozí přebití. Výhodou tedy je, že se nemusí hlídat ukončení nabíjení a akumulátor může zůstat připojen k nabíječce libovolně dlouho [11].

Existuje také časové ukončení a to tak, že je udáváno nabíjení například 0,5 C + 2 h. Znamená to, že v první fázi se nabíjí proudem 0,5 C a po ukončení první fáze se nabíjí ve druhé fázi ještě 2 hodiny [8]. Tento způsob je vhodný pouze pro stejné články se shodnou kapacitou.



Obr. 2.3 Klasický cyklus se dvěma fázemi článku s nabíjecím napětím 4,2 V - upraveno z [18]

#### 2.4.2 Fáze formování

V některých vyspělejších nabíječkách může ještě na začátku být jedna fáze, tzv. formování. To je určeno pro články vybité pod bezpečnou mez, tj. pod již zmiňovaných 2,5 V. Nabíječka zjistí, že napětí článku je nižší a bude ho nabíjet velmi malým proudem, než dosáhne alespoň 2,7 V. Po té přejde do prvního cyklu klasického nabíjení. Tato fáze trvá

dlouho, několik hodin. Pokud článek je ale nad hranicí kritického vybíjecího napětí, tuto fázi samozřejmě přeskočí. [10]

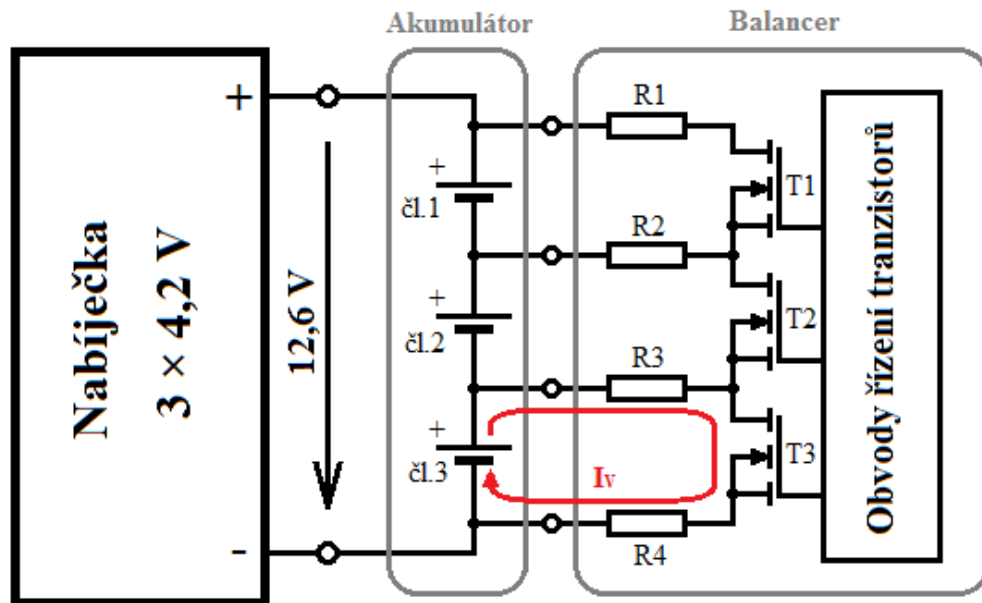
## 2.5 Nabíjení více článků

Při nabíjení akumulátoru složeného z více článků je důležité, kontrolovat napětí na jednotlivých člancích a napětí mezi nimi vyrovnávat. Akumulátor nelze pouze připojit ke zdroji, jehož napětí by odpovídalo nabíjecímu napětí jednoho článku vynásobeného jejich počtem v akumulátoru. Články nikdy nejsou úplně přesně stejné a časem se rozdíly mohou ještě zvětšovat [29]. Potom se každý článek chová trochu odlišně a problémem je, že články nedosáhnou svého nabíjecího napětí všechny ve stejnou dobu. Po připojení akumulátoru k nabíječce článek s napětím nejvyšším dosáhne konečného napětí nejdříve a bude se přebíjet. To samé platí při vybíjení, kdy článek s nejnižším napětím dosáhne rychleji podvybití. Při těchto stavech pak platí stejná rizika, jak jsou popsány výše pro jednotlivý článek.

Proto se používají ochranné obvody, tzv. balancery, které mají za úkol sledovat napětí jednotlivých článků a zároveň ho mezi nimi vyrovnávat na stejnou úroveň. Zároveň mají ochrannou funkci. Při poškození některého z článků nabíječ nedokáže napětí vyrovnat a celý akumulátor odpojí [28]. Tyto obvody mohou být jak součástí nabíječky, tak akumulátoru. Pokud jsou součástí nabíječky, musí mít akumulátor do ní připojované vyvedené kontakty všech článků. Tyto balancery existují dvojího typu, pasivní a aktivní.

### 2.5.1 Pasivní balancery

V běžném použití převažují pasivní balancery. A to především pro svoji jednoduchost, nízkou cenu a spolehlivost. To vše ale za cenu špatné účinnosti [29]. Toto jednoduché řešení ovšem napětí nebalancuje, ale pouze ho omezuje na jednotlivých člancích na hodnotu, na kterou je nastaven [30]. Nastavuje se často pomocí trimrů, což pro účinnost a přesnost není to nejlepší [30]. Je to ale mnohem lepší řešení, než úplná absence těchto obvodů, protože alespoň nedovolí překročit kritické nabíjecí napětí. Nejčastěji jsou konstruovány z vyvažovacích rezistorů a spínačů. Tyto spínače jsou nejčastěji realizovány tranzistory typu MOSFET. Základní princip je naznačen na následujícím obrázku.



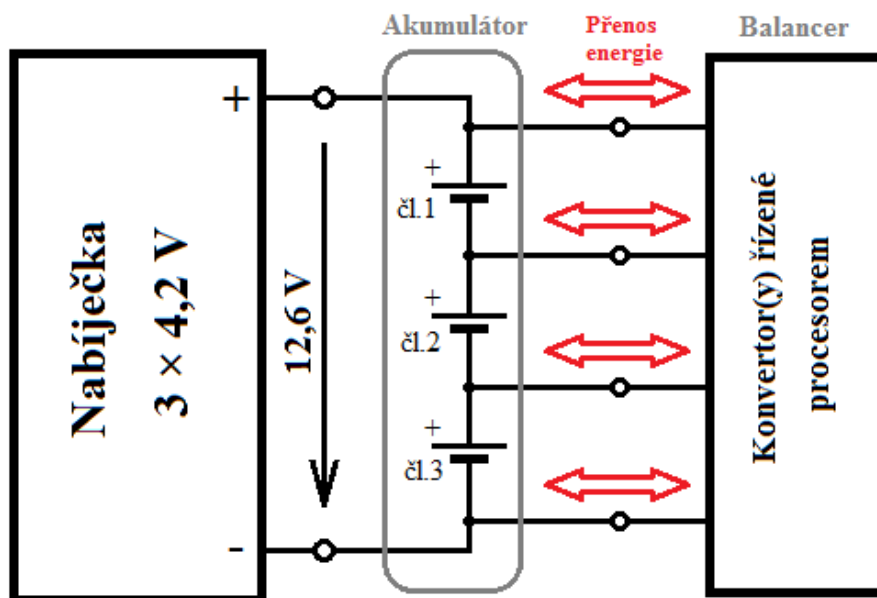
Obr 2.4 Pasivní balancer - upraveno z [29][30]

Při dosažení nastaveného konečného napětí připne tranzistor rezistory k vyvažovaným článkům, začne se na nich omezovat napětí a začne protékat vyrovnávací proud  $I_v$ . Pokud je konečné napětí nastaveno například na 4,25 V a jeden z článků je v okamžiku připojení k nabíječce více vybit, dosáhnou další dva konečného napětí dříve. Po dosažení napětí nabíječky (12,6 V) se začne snižovat nabíjecí proud a článek, který byl na začátku vybit více, se nabije pouze na 4,1 V. To už zůstane do konce nabíjení a tento článek nebude plně nabit. Při vybíjení pak bude opět vybit více a jako první. [29][30]

### 2.5.2 Aktivní balancery

Aktivní balancery již napětí opravdu balancují mezi články, a to během celého nabíjení, takže i při předčasném ukončení nabíjení budou všechny články nabitý stejně [30]. Jsou řízeny procesorem, který je ve výrobě pevně kalibrován a zůstane tak pracovat se stále stejnou přesností, obvykle  $\pm 0,01V$  [30]. Oproti pasivním jsou účinnější, ale podstatně dražší a složitější. Díky řízení procesorem dokážou rozpoznat poškozené články, články podvybité nebo překročení napětí celého akumulátoru vlivem vadné nabíječky. Na tyto věci pak dokáží upozornit jak akusticky, tak světelnou indikací [32]. Mohou se použít k nabíječce jak stejnosměrným, tak i k pulzním. Energie mezi články je přenášena stejnosměrnými konvertory. Přenášení energie mezi články může být rozděleno na 4

způsoby, a to mezi vyvažovaným článkem a zbytkem článků, mezi dvěma sousedními články, mezi různými články pomocí napěťové sběrnice a opět mezi dvěma různými články, ale pomocí přepínací sítě [29].



Obr. 2.5 Aktivní balancer - upraveno [29][30]

## 2.6 Teploty při nabíjení

Před nabíjením by měl být článek ponechán při pokojové teplotě, aby se vyrovnaly teploty uvnitř článku, což trvá alespoň dvě hodiny [9]. Nabíjení příliš studených nebo naopak příliš teplých článků může vést k jejich zničení. Také skladovány by měly být při pokojové teplotě.

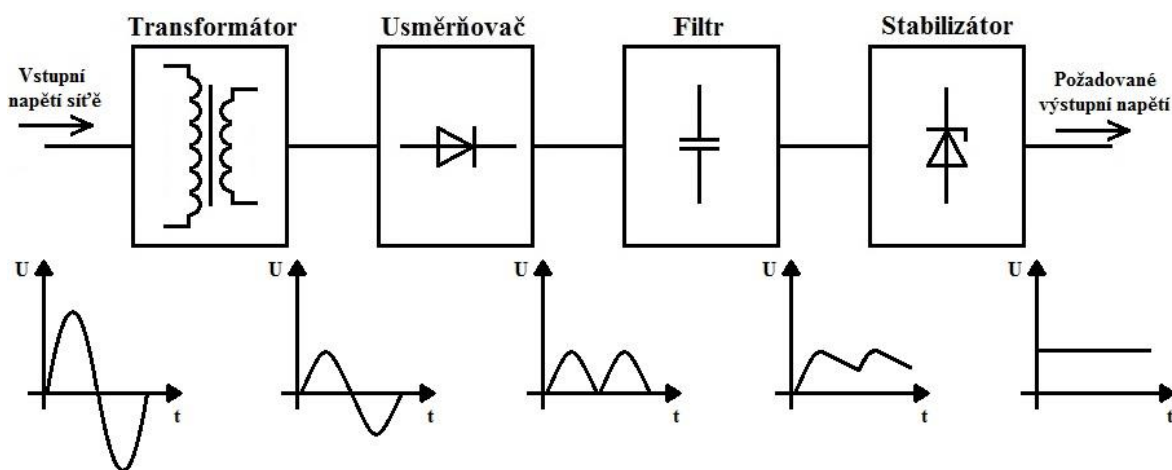
Při samotném nabíjení je potřeba zajistit volné proudění vzduchu kolem článku, které slouží jako pasivní chlazení [9]. Správně nabíjený článek by se pak neměl zahřívat. Pokud přece jen dojde k zahřátí, značí to nesprávné nabíjení a je nutné jej co nejdříve přerušit [16]. Při zvyšování teploty hrozí nebezpečí výbuchu, který je doprovázen hořením. Podle výrobců by k tomuto krajnímu stavu nemělo dojít do teploty 60°C [14]. Nejčastější příčinou zvyšování teploty je překročení nabíjecího proudu nebo napětí, případně zkratem [16]. Doporučuje se nenechávat nabíjení bez dozoru a nabíjet na nehořlavém povrchu, například na betonové podlaze apod.

### 3 Napájecí zdroje

Pro elektroniku se obvykle používají napájecí zdroje typu AC/DC. Jsou tedy napájené střídavým napětím (sítovým) a výstup je požadován stejnosměrný, obvykle o nižší úrovni napětí, než napětí vstupní. Tyto zdroje se dělí na dvě hlavní skupiny. Lineární a spínané.

#### 3.1 Lineární zdroje

Tyto zdroje jsou poměrně jednoduché, tudíž i levné. Ovšem se zvyšujícím se výkonem cena roste, jelikož je třeba většího transformátoru, který je poměrně drahý. Používají sítový transformátor s frekvencí 50 Hz k přeměně vstupního napětí na požadovanou velikost. Dále se napětí přeměňuje ze střídavého na stejnosměrné. K tomu slouží usměrňovač, složený z diod. Napětí z usměrňovače je podstatně zvlněné a vyhlazuje se filtrem k tomu určeným. Ten ovšem zvlnění pouze sníží. Konstantního stejnosměrného napětí, které bude nezávislé na změně odebíraného proudu či změnách vstupního napětí, se dosáhne stabilizátorem napětí, tvořeným zenerovou diodou. Výsledné zvlnění takových zdrojů je poměrně dobré, udává se asi 5 mV. Účinnost se u těchto zdrojů pohybuje jen okolo 30 %. [2][33][34]



Obr. 3.1 Blokové schéma lineárního zdroje



Jednotlivé části blokového schéma:

Transformátor – Slouží k přeměně velikosti vstupního napětí na požadovanou. Dále galvanicky odděluje vstup od výstupu. Transformátor je největší a nejtěžší součást celého zdroje, je totiž tvořen feromagnetickými plechy a vinutím z měděných vodičů. To, že transformátor musí být takto velký, určuje relativně malá frekvence sítě, 50 Hz. Průřez jádra na ní totiž nepřímo závisí. Uvádí se, že při zvýšení frekvence na dvojnásobek by se mohl průřez jádra transformátoru snížit už asi o 40 % [1].

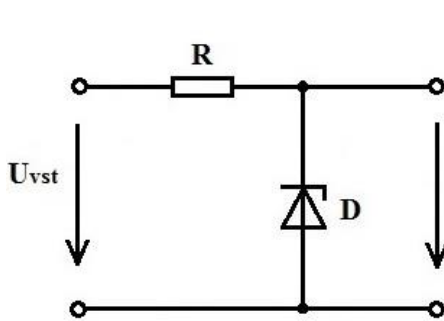
Usměrňovač – Používá se k přeměně střídavého napětí na stejnosměrné. Samotný usměrňovač však pouze ořezává, případně překlápí (dle typu použitého usměrňovače) spodní půl vlnu napětí. Je tvořen polovodičovými diodami. Nejpoužívanější zapojení je dvoucestný můstkový usměrňovač, tzv. Graetzův můstek. Ten záporné půl vlny překlápí do kladné části. Výsledkem je tedy pulzní napětí s dvojnásobnou frekvencí. Je tvořen čtyřmi diodami, kdy v každé půl vlně vedou dvě a dvě jsou v závěrném směru.

Filtr – Je v podstatě vždy řazen za usměrňovač pro zmenšení zvlnění napětí z usměrňovače. Je tvořen pouze kondenzátorem, obvykle elektrolytickým. Ten se nabije na maximální napětí a následně svým vybíjením nedovolí napětí klesnout až k nule, ale postupně se vybíjí, než přijde další pulz, který kondenzátor opět dobije. Jeho velikost určuje činitel zvlnění. To je poměr zbytkového střídavého napětí a výsledného stejnosměrného napětí. Tento činitel by neměl přesáhnout 10 – 15 % [34].

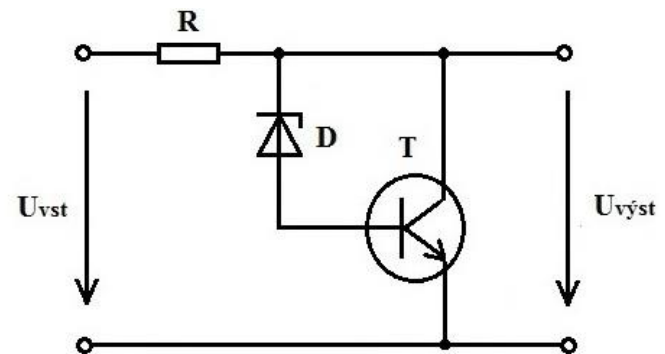
Stabilizátor – Má za úkol stabilizovat napětí tak, aby se neměnilo se změnami vstupního napětí, či se změnou odebíraného proudu. Základem je zenerova dioda zapojená v závěrném směru. Využívá se její vlastnosti, že po překročení závěrného napětí se dioda neprorazí, jako obyčejná dioda, ale s dalším zvyšováním proudu již napětí zůstává téměř konstantní. Složitější, ale účinnější verzí je tzv. zpětnovazební stabilizátor, kdy zpětnou vazbou výstupního napětí je řízen tranzistor a ten udržuje napětí na požadované úrovni. Existují i integrované stabilizátory, které jsou nejučinnější variantou stabilizátorů. Stabilizátory dělíme na sériové a paralelní.

Nejjednodušší paralelní stabilizátor je tvořen pouze zenerovou diodou, připojenou v závěrném směru paralelně se zdrojem napětí. Toto zapojení může být vylepšeno

tranzistorem, výstupní napětí je pak součtem napětí na diodě a napětí  $U_{be}$  tranzistoru. Čím větší je zesilovací činitel tranzistoru, tím větší je dynamický odpor stabilizátoru [39].

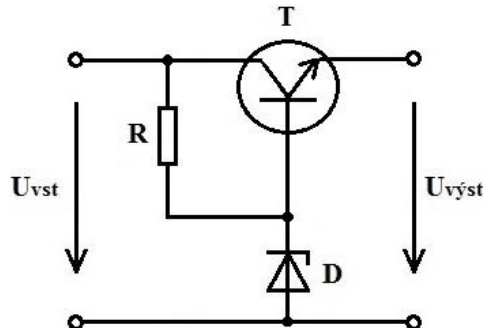


Obr. 3.2 Paralelní stabilizátor



Obr. 3.3 Paralelní stabilizátor s tranzistorem

Tranzistor v sériovém zapojení je ovládán rozdílem referenčního napětí, jehož zdrojem je zenerova dioda a napětím výstupním  $U_{výst}$ . Při poklesu výstupního napětí se tranzistor více otevírá a tím se napětí na výstupu opět zvýší. Účinnost tohoto zapojení je vyšší, než u paralelního zapojení [43].



Obr. 3.4 Sériový stabilizátor

### 3.2 Spínané zdroje

Oproti lineárním jsou výrazně složitější díky nutnosti řízení spínače, případně díky mnohem vyšším frekvencím. To je také důvodem kladení vyšších požadavků na kvalitu součástek. Existují i spínané zdroje s frekvencí sítě, ale ty se dnes v podstatě nepoužívají. Cena je právě díky kvalitnějším součástkám vyšší, ale s výkonem, na rozdíl od lineárních zdrojů, zůstává přibližně konstantní [34]. Hlavní předností těchto zdrojů je vysoká účinnost, okolo 85 % [34], která se dosahuje díky absenci regulace odporovými prvky, ale

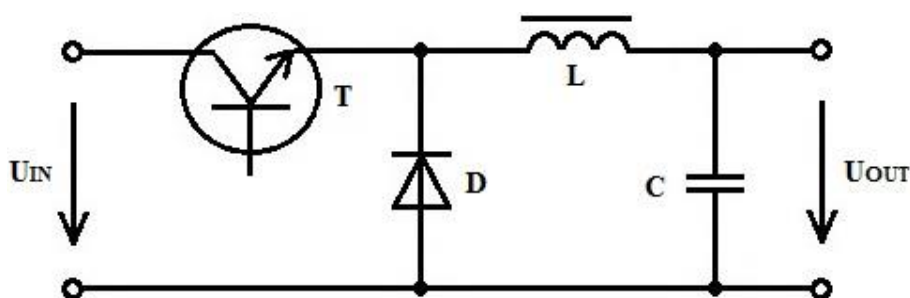
regulací spínací. Mezi nevýhody patří možnost vzniku vysokofrekvenčního rušení, které vzniká při spínání spínacího prvku. Oproti lineárním zdrojům mají asi desetkrát větší zvlnění výstupního napětí (50 mV) [2].

Kromě dělení, zda pracují se sítovou frekvencí, nebo vyšší, je lze dělit také podle toho, jestli obsahují transformátor.

### 3.2.1 Spínané zdroje bez transformátoru

Pro aplikace, kde není nutné obvod galvanicky oddělovat od vstupního napětí, nebo to dokonce není žádoucí (obvody napájené z baterií) [40], existují měniče bez transformátoru. Používají se ale jen pro malá napětí (např. měnič z 5 na 12 V) a s výkonem do 30 W. [24]. Základními typy těchto obvodů jsou zvyšující (step-up) měnič a snižující (step-down) měnič.

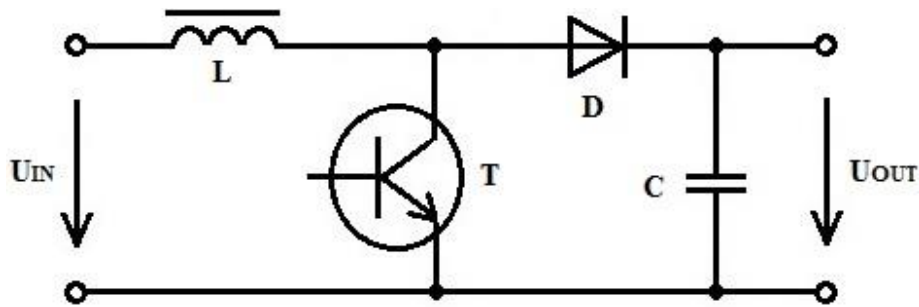
#### 3.2.1.1 Snižující měnič (step-down, buck regulátor)



Obr. 3.5 Základní zapojení step-down měniče [1]

Výstupní napětí je regulováno na napětí nižší, než je vstupní. Při sepnutí tranzistoru teče proud přes cívku a kondenzátor se nabíjí (maximálně na napětí  $U_{IN}$ ). Napětí kondenzátoru je také na výstupu. Pokud tranzistor vypne, cívka se snaží držet směr a velikost proudu, kondenzátor se chová jako zdroj napětí a proud se uzavírá před diodu, kondenzátor se vybíjí a napětí na výstupu klesá. Vhodným řízením určujeme dobu, kdy je tranzistor sepnut a kdy vypnut a tím je možné vstupní napětí snižovat. Řízení je ve většině případů provedeno pomocí PWM. Dosahuje vysoké účinnosti. [1][2]

### 3.2.1.2 Zvyšující měnič (step-up, boost regulátor)

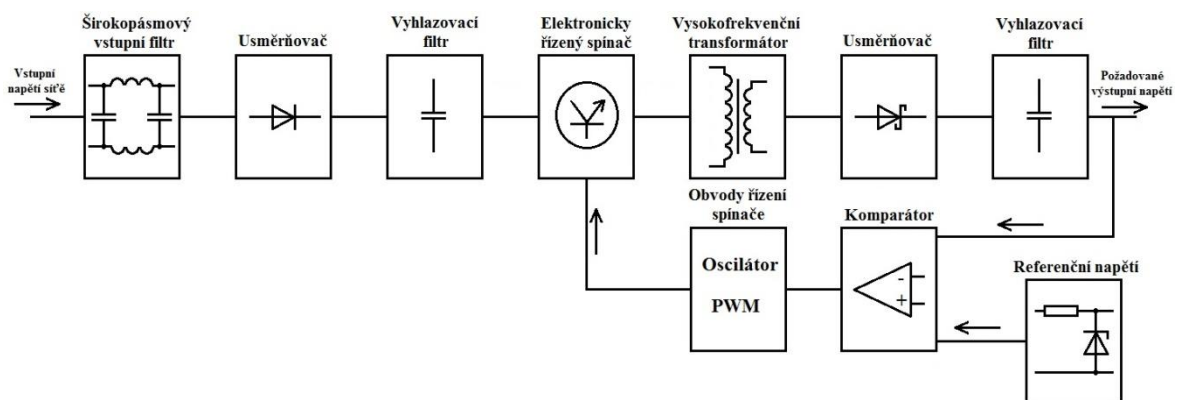


Obr. 3.6 Základní zapojení step-up měniče [1]

Zde je výstupní napětí regulováno na napětí vyšší, než je vstupní. Při sepnutém tranzistoru se akumuluje energie v indukčnosti a kondenzátor se vybíjí do zátěže. Dioda je uzavřena a odděluje vstupní obvod od výstupního. Po rozeptnutí tranzistoru se cívka snaží udržet proud ve stejném směru, nahromaděná energie v ní vytvoří indukované napětí, a otevře se dioda. Napětí na indukčnosti je sériově spojeno s napětím zdroje, tato napětí se sečtou a výstupní napětí je tedy vyšší, než napětí zdroje. Z tohoto výsledného napětí se odebírá proud do zátěže a k nabití kondenzátoru. [1][2]

### 3.2.2 Spínané zdroje s transformátorem

Základním principem je převedení vstupního napětí na stejnosměrné a pomocí vysokofrekvenčního spínače převedení zpět na střídavé, ale o mnohem vyšší frekvenci. To umožňuje použít transformátory menších rozměrů a hmotnosti, což vede na celkovou úsporu váhy a objemu. To je další předností spínaných zdrojů. Mezi základní topologie těchto zdrojů patří propustný a blokující měnič, půlmůstek a plný můstek.



Obr. 3.7 Blokové schéma spínaného zdroje

Jednotlivé části blokového schéma:

Širokopásmový vstupní filtr – Slouží k odfiltrování rušivé vysokofrekvenční složky, která by mohla být přenášena ze zdroje zpět do sítě.

Usměrňovač a vyhlazovací filtr – Obvykle je realizován Graetzovým můstkem. Vstupní napětí sítě usměrňují a vyhlazují na stejnosměrnou hodnotu. Toto napětí by mělo být usměrněné a zbavené střídavé složky co nejlépe.

Spínač – Nejčastěji bývá realizován tranzistory typu FET. U nich je požadavek na vysoké spínací frekvence a s tím spojené časy na sepnutí a rozepnutí. Musí zvládat proudy v jednotkách ampér a závěrné napětí ve stovkách voltů. Vytváří tedy vysokofrekvenční napětí a zároveň reguluje, pomocí zpětné vazby, výstupní napětí. Může být zařazen i za transformátorem, pak je to spínaný zdroj s regulací v sekundárním obvodu (takové zdroje se moc nepoužívají).

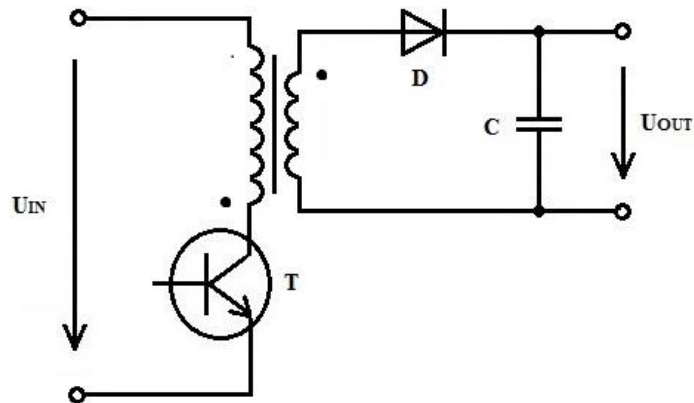
VF transformátor – Spolu se spínacím prvkem je nejdůležitějším prvkem spínaného zdroje. Musí být navržen na vysokou frekvenci. Převádí úroveň napětí na požadovanou hodnotu a galvanicky odděluje primární část od sekundární.

2. Usměrňovač a filtr – Tento usměrňovač musí být konstruován z rychlých Schottkyho diod, jelikož zde usměrňuje vysoké frekvence. Jeho zapojení je opět nejčastější Graetzův můstek. Usměrňuje a filtruje na již požadované výstupní stejnosměrné napětí.

Bloky zpětné vazby – Ve zpětné vazbě se srovnává referenční napětí s výstupním pomocí komparátoru, který při vyšším výstupním napětí dává povel k uzavření tranzistoru, při nižším k jeho sepnutí. Tím se napětí stabilizuje.

Řízení tranzistoru – Tranzistor je řízen pulzně šířkovou modulací, kdy oscilátor vytváří pilovitý průběh o určité frekvenci a ten je srovnáván s komparovaným napětím.

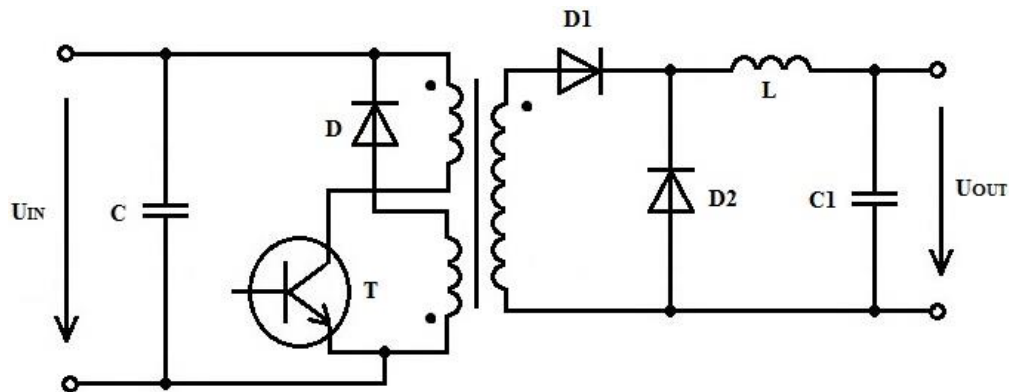
### 3.2.2.1 Blokující měnič (akumulující měnič, flyback)



Obr. 3.8 Základní zapojení blokujícího měniče [1]

Pokud je výkonový spínač sepnut, proud teče cívkou primárního vinutí transformátoru a energie se ukládá v magnetickém poli transformátoru. Sekundární vinutí je vůči primárnímu polarizováno obráceně, a tedy dioda je v závěrném směru. Proud sekundárním vinutím v tomto stavu neteče. Po rozepnutí spínače je přerušen proud a magnetický tok, který vznikl při sepnutém spínači, brání změně proudu primárním vinutím. Tím se obrátí polarita napětí na sekundárním vinutí a energie uložená v primárním vinutí je do něj dodávána. Dioda je v tu chvíli polarizována v propustném směru a proud teče do kondenzátoru a do zátěže připojené na výstupní svorky. Výstupní napětí můžeme regulovat vhodným řízením a díky transformátoru může být toto napětí vyšší i nižší, než napětí vstupní. Transformátor pro tento typ zapojení musí mít vzduchovou mezeru v magnetickém obvodu pro zvýšení magnetické impedance, aby se jádro nepřebudilo (běžné transformátory tuto mezeru nemají). Používá se pro výkony přibližně do 50W. [2][41]

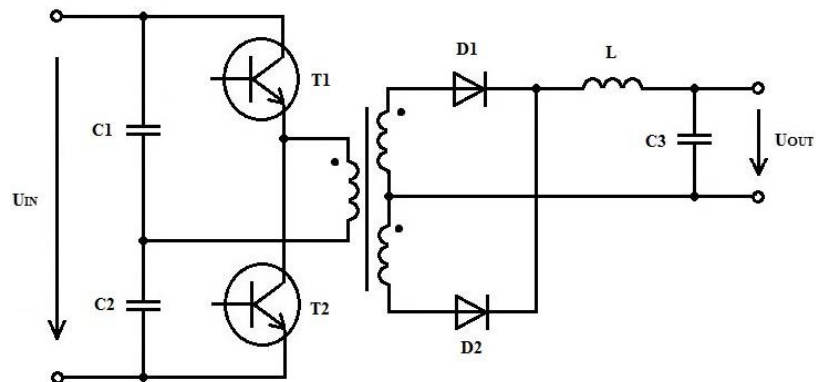
### 3.2.2.2 Propustný měnič (forward)



Obr. 3.9 Základní zapojení blokujícího měniče [1]

Obvod vypadá zdánlivě podobně, jako u flyback měniče, ale zde jsou souhlasně orientována vinutí transformátoru. Při sepnutém tranzistoru teče primárním vinutím proud a vzhledem k orientaci vinutí teče tento proud, s ohledem na poměr transformátoru, také sekundárním vinutím. Dioda D1 je polarizována v propustném směru, proud teče přes cívku, kde je akumulována část energie, nabíjí kondenzátor a teče do zátěže. Při rozepnutí tranzistoru se obrací polarity napětí obou vinutí transformátoru, dioda D1 je v tuto chvíli polarizována závěrně. Cívka drží směr proudu, obrátí se na ní napětí a stává se zdrojem proudu. Vybíjí se do zátěže a proud se nyní uzavírá přes diodu D2. Výstupní napětí můžeme regulovat vhodným řízením spínání a díky transformátoru může být toto napětí vyšší i nižší, než napětí vstupní. Jelikož se v jádře hromadí magnetická energie, došlo by k jeho přesycení a pro její odčerpání se používá demagnetizační vinutí. To má shodný počet závitů jako primární vinutí, ale opačnou polaritu. Při rozepnutí tranzistoru T se pak v tomto vinutí indukuje napětí, dioda je v propustném směru a energie se přes ni vrací zpět do zdroje. Používá se pro výkony přibližně do 100W. [1] [2] [41]

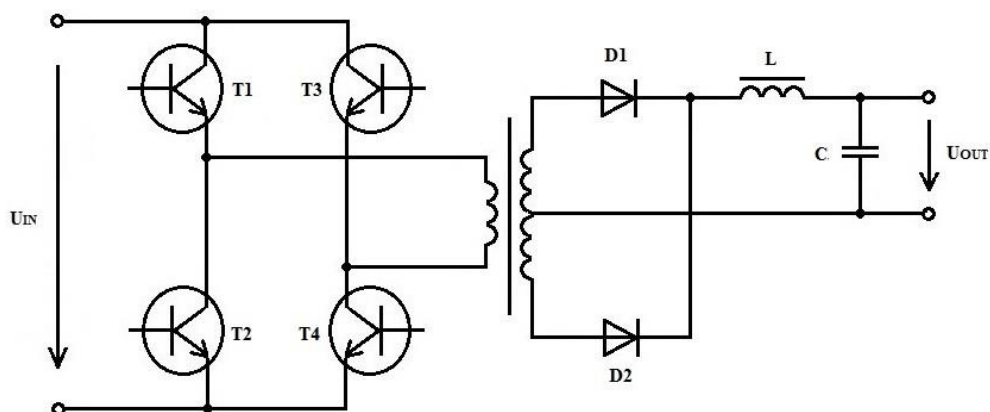
### 3.2.2.3 Půlmůstek



Obr. 3.10 Základní zapojení půlmůstkového měniče [1]

Polovina můstku je tvořena dvěma spínacími tranzistory a druhá polovina dvěma kondenzátory. V jejich diagonále je zapojeno primární vinutí transformátoru. Vstupní napětí se rovnoměrně rozdělí na primární vinutí transformátoru a kondenzátor C1 nebo C2 podle toho, který tranzistor je sepnut. Kondenzátory slouží jako zásobník energie. Do jejich středu je připojen jeden konec primárního vinutí a druhý přes tranzistory buď na kladné nebo záporné napájecí napětí. Tranzistory tak střídavě připojují primární vinutí na kladné nebo záporné napájecí napětí a toto napětí se přímo transformuje na sekundární vinutí. Podle okamžité polaroty primárního vinutí teče proud buď diodou D1 nebo D2. Na jejich katodách pak dostáváme pulzující stejnosměrné napětí. Používá se pro výkony přibližně do 500W. [1][24]

### 3.2.2.4 Plný můstek



Obr. 3.11 Základní zapojení měniče s plným můstkem [1]





## 4.1 Návrh prototypu

Pro návrh a sestavení jsem vycházel z výše uvedeného schématu [Obr. 4.1]. Výhodou tohoto zapojení je, že je splněna podmínka galvanického oddělení obvodu, jelikož je oddělen výstup od vstupu transformátorem a zpětná vazba je realizována optickým členem. Jako řídicí obvod jsem použil integrovaný obvod UC3842N.

Hlavními komponenty jsou vysokofrekvenční transformátor a vysokofrekvenční spínač, kterým je MOSFET tranzistor. Transformátor, jakožto nejproblematictější součástka z hlediska navrhování, musel být použit jiný. Tranzistor mohl zůstat stejný, ale zvolil jsem tranzistor K3562, který má vyšší průrazné napětí. Dále jsou využity vstupní a výstupní odrušovací filtry, které jsou vyhovující.

Při sestavování prototypu jsem bohužel zvolil špatný postup pro výběr transformátoru, kvůli snaze vyhnout se jeho problematickému návrhu. První chybou bylo špatné navržení napěťových poměrů. Pro terciální vinutí, které slouží k napájení integrovaného obvodu UC3842N jsem zvolil napětí 5V, jelikož jsem špatně pochopil funkci zmíněného integrovaného obvodu. Napětí 5V sice v tomto obvodu je, ale obvod si jej generuje sám jako referenční a není to napájecí napětí, jak jsem se chybně domníval. Toto napětí musí být minimálně 16V. Použil jsem transformátor vymontovaný ze staršího obvodu, který jsem se domníval, že bude vyhovovat. Transformátor nevyhovoval z důvodu špatného jádra, které by nezvládlo potřebnou frekvenci ani přenášený výkon a nemělo potřebnou vzduchovou mezeru v magnetickém obvodu. Návrh a výpočet nového transformátoru je v příloze B, výsledné parametry transformátoru z tohoto výpočtu jsou v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Výsledné parametry transformátoru

Vinutí	Počet závitů N	Průměr vodiče d
Primární	468	0,3 mm
Sekundární	8	2,17 mm
Terciální	49	0,305 mm

V obvodu řízení MOSFET tranzistoru bylo potřebné určit hodnotu kondenzátoru a rezistoru, jež určují frekvenci spínání tranzistoru. Tu jsem zvolil 50kHz. Odpor rezistoru jsem zvolil 1,5 k $\Omega$  a kapacitu kondenzátoru dopočetl dle rovnice (1.1) na 22nF.

Důležitou změnou bylo upravení obvodu s napět'ovou referencí, který udává, na jakou hodnotu bude regulováno výstupní napětí. Požadované výstupní napětí získáme z následující rovnice:

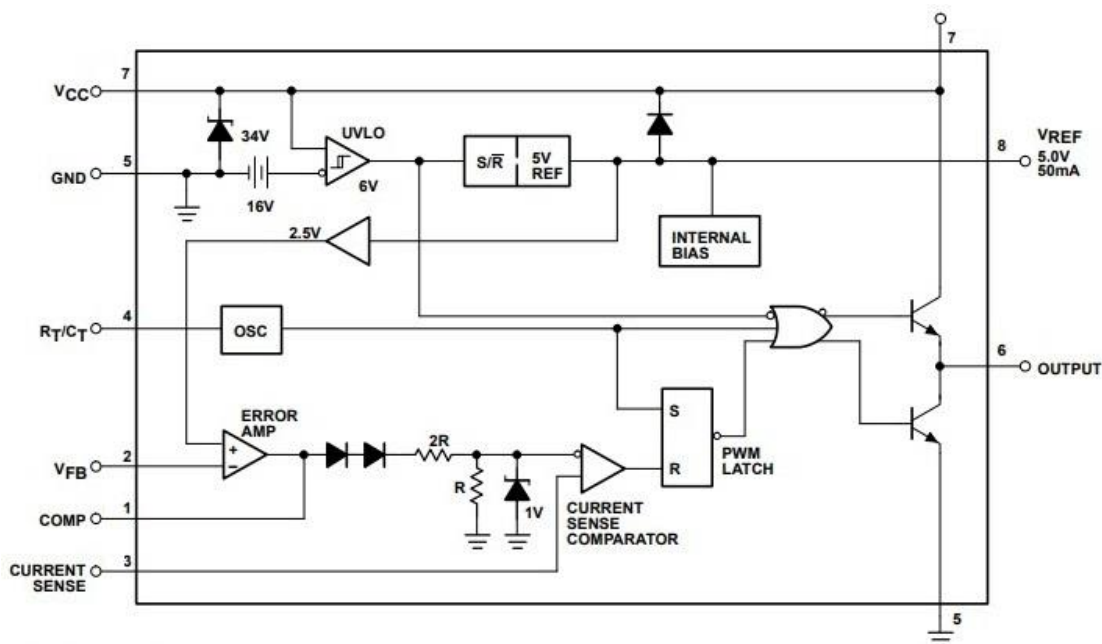
$$U_{OUT} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) U_{ref} \quad (1.1)$$

V této rovnici je  $U_{ref} = 2,5V$  konstanta (dáno součástkou napět'ové reference TL431).  $U_{OUT}$  je požadované výstupní napětí. Jeden rezistor jsem zvolil  $33\text{ k}\Omega$  a na místo druhého jsem dal potenciometr  $100\text{ k}\Omega$ , aby bylo možné výstupní napětí pohodlně nastavit. Pro výstupní napětí  $4,2V$  by byl  $R_1 = 33\text{ k}\Omega$  a  $R_2 = 48,5\text{ k}\Omega$ .

Obvod je chráněn proti zkratu pojistkou v přívodu zdroje. Dále je také chráněn tak, že při zkratu na výstupu nedokáže transformátor vybudit dostatečné napětí na terciálním vinutí, řízení přestane být napájeno a zdroj se celý zastaví. Proti přetížení je ochrana realizována snímacím rezistorem R9, který snímá proud procházející tranzistorem. Pokud je zdroj přetížen, proud přes tranzistor začne narůstat a při překročení napětí  $1V$  na snímacím rezistoru se ihned ukončí spínání tranzistoru. [38]

## 4.2 Funkce řídicího obvodu UC3842N

Tento obvod je běžně využíván pro konstrukci spínaných zdrojů, jde o PWM kontrolér. Blokové schéma vnitřní konstrukce tohoto obvodu je na následujícím obrázku:



Obr. 4.2 Blokové schéma integrovaného obvodu UC3842N [37]

Jedním z bloků tohoto schématu je vlastní oscilátor, který generuje obdélníkové pulzy. Jeho frekvence je frekvence spínání externího spínače (zpravidla MOSFET tranzistoru). Tato frekvence se nastavuje externě připojenými součástkami na vývodu č.4, rezistorem  $R_T$  a kondenzátorem  $C_T$ . Frekvence se pak vypočítá ze vztahu:

$$f = \frac{1,72}{R_T C_T} \quad (1.2)$$

Dalšími bloky jsou obvody k řízení impulsů pro spínání externího spínače. Je to komparátor proudu (current sense comparator), porovnávající napětí snímané na rezistoru, připojenému k vývodu č.3. Toto napětí je porovnáváno s napětím 1V, znázorněného ve schématu zenerovou diodou. Dalšími obvody jsou budič výkonového spínače, napěťová reference, která se vypíná při podpětí a obvod pro jeho detekci s hysterezí. [38]

Obvod funguje na principu řízení maximálního proudu primárního vinutí impulsního transformátoru podle odchylky výstupního napětí. Indukčnost primárního vinutí ukládá definované množství energie, určené nastavenou úrovní proudu. Tato energie je po vypnutí spínače dodávána do výstupu zdroje. Proud který teče primárním vinutím je detekován na rezistoru, připojeným na vývodu č.3. Je porovnáván v komparátoru proudu. Proud, který vyvolá na snímacím rezistoru napětí 1V, určuje maximální proud, protékající primárním vinutím v čase, kdy ještě není dosaženo stanovené hodnoty výstupního napětí a zabraňuje přesycení. Činností celého obvodu je řízení doby sepnutí výstupního spínače, tedy PWM, během cyklu oscilátoru podle výchylky výstupního napětí. Omezení maximálního proudu zajistí, že nedochází k přesycování indukčnosti ani při proměnném vstupním napětí. [38]

Spuštění výstupního budiče pro spínač zajišťuje po startu podpěťová ochrana až do okamžiku, kdy napájecí napětí dosáhne úrovně 16V. Po dosažení tohoto napětí je obvod v činnosti až do okamžiku poklesu jeho napájecího napětí pod hranici 10V. Napětí pro napájení obvodu je možné získat přivedením na vývod č.7 přes člen s rezistorem a kondenzátorem. Ve vypnutém stavu je odběr obvodu maximálně 0,5mA, proto může být hodnota tohoto rezistoru velká. Obvod je spuštěn po dosažení výše zmíněné úrovně, ke startu je využita energie uložené v kondenzátoru. Integrovaný obvod může být pro svoji trvalou činnost napájen z externího zdroje napětí, realizovaného například pomocným vinutím na transformátoru. [38]

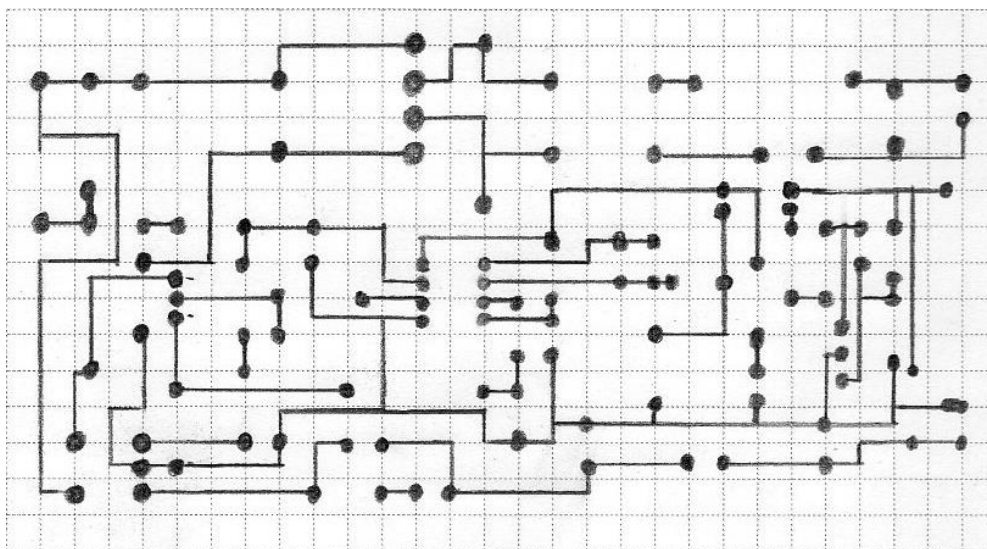


v napájecím vinutí pro řídicí obvod, který dosud napájel kondenzátor C7, který je však schopný napájení jen při startu a ne při trvalém chodu. Z tohoto vinutí je napětí usměrněno diodou D6 a přes rezistor R17 opět přivedeno na napájecí vývod č.7 obvodu UC3842N. Zároveň se indukují napětí také v sekundárním výstupním vinutí. Zde je usměrněno diodou D7, která musí být schopná usměrňovat vysoké frekvence a musí být chráněna proti napěťovým překmitům pomocí R11 a C8, vznikajícím jako na primárním vinutí. Dále pokračuje k vyhlazení v kondenzátorech C9, C10 a cívce L3. Napětí na těchto kondenzátorech vzrůstá, až se aktivuje referenční součástka TL431, začne protékat proud a tím dojde k rozsvícení diody v optickém vazebním členu. V něm osvítí fototranzistor, který se otevře a připojí stabilizované referenční napětí řídicího obvodu 5V přes rezistor R5 na vývod č.2. Jakmile vzroste napětí na tomto vstupu, tedy na vnitřním zesilovači, na 2,5V, začne řídicí obvod upravovat šířku řídicích pulzů pro tranzistor, což začne regulovat výstupní napětí. Součástky R4 a C4 představují zpětnou vazbu tohoto vnitřního zesilovače odchylky. Vlivem upravování řídicích pulzů se tedy mění spínání tranzistoru a tím i proud přes něj tekoucí. Ten se ještě kontroluje rezistorem R9. Pokud procházející proud vyvolá na tomto rezistoru úbytek napětí 1V a vyšší (tedy na vstupu č.3 integrovaného obvodu), ihned se překlápí vnitřní klopný obvod a ukončí se pulzy pro řízení tranzistoru. R7 a C6 odstraňují překmit, který vzniká ve vinutí transformátoru v důsledku nabíjení parazitních kapacit při spínání tranzistoru. Je tedy zřejmé, že toto snímání není důležité jen pro regulaci šířky pulzů pro tranzistor, ale i jako ochrana celého zařízení při případném zkratu nebo přetížení na výstupu. Při VF spínání tranzistoru vzniká rušení, které by mohlo být přenášeno zpět do sítě. Proto je na vstupu obvodu odrušovací filtr, složený ze součástek L1, L2 a C1. [36][38]

#### 4.4 Výroba a sestavení prototypu

Prototyp by bylo vhodné sestavit na zkušební desce nepájivého kontaktního pole, tzv. “prototypovači“. Ale jelikož jsem měl k dispozici jen jeden menších rozměrů, kde by bylo z prostorových důvodů obtížné prototyp sestavit, rozhodl jsem se rovnou navrhnout a vyrobit plošný spoj. Tento spoj jsem vyráběl v domácích podmínkách. Ačkoli to není nejlepší způsob, jelikož při softwarovém kreslení lze efektivněji využít prostor, rychleji schéma navrhnout a při následném přenášení na desku osvitem výsledného obrazce pomocí fotocitlivé vrstvy kvalitněji přenést, čímž se sníží riziko při následném leptání, zvolil jsem cestu ručního kreslení na papír a následného přenesení na desku také ručně. Tato cesta byla

dostupnější a pro výrobu jedné desky pro prototyp dostačující. Abych mohl přistoupit k navrhování, musel jsem nejdříve ze všeho sehnat všechny součástky, abych z jejich rozměrů mohl vycházet při návrhu. Následně jsem začal obvod navrhovat na čtverečkový papír s 5mm sítí, který se mi osvědčil již dříve. Po několika pokusech jsem došel k použitelnému spoji. Pokud se kreslí obvod ze strany součástek, musí se ještě zrcadlově převrátit. Hotový návrh plošného spoje již převrácený je na *Obr. 4.4*.



*Obr. 4.4 Výsledný návrh plošného spoje prototypu*

Tento návrh je přesně ve velikosti 1:1, takže jsem podle něho uřízl potřebný kus desky plošného spoje. Na ní jsem papír s návrhem přilepil a přes něj ve všech místech, kde budou vývody součástek, a tedy se tam pro ně budou vrtat díry, tyto místa naznačil vyťukáním. Pak jsem díry vyvrtal a nesmazatelným fixem všechny otvory propojil dle návrhu. Je to výhodnější, protože bych jinak musel obvod nejdříve celý překreslit na destičku a pak vrtat otvory, jednodušší je mít už místa součástek naznačená a pak je fixem jen propojit. Takto připravenou desku jsem vložil do nádoby s leptacím roztokem. Při přenesení obrazce na desku fixem vzniká riziko, že se někde spoj při leptání přeruší z důvodu nedokonalého spojení cest a dalším rizikem je, že se při vnoření desky do roztoku vytvoří na desce vzduchová bublina a tak zůstane celé místo pod bublinou nevyleptané. Proto jsem proces leptání pečlivě sledoval a občas štětcem kapalinu po desce rozetřel. Leptání trvalo při pokojové teplotě asi 15 - 20 minut. V příloze C se nacházejí fotografie z této výroby.

Všechny spoje jsem později ještě pocínoval, pokud by se někde vodivá cesta porušila při leptání a také abych odstranil riziko následného popraskání mědi.

#### 4.5 Oživení a detekce chyb, funkce prototypu

Při prvním zkoušení funkce obvodu jsem postupoval následovně:

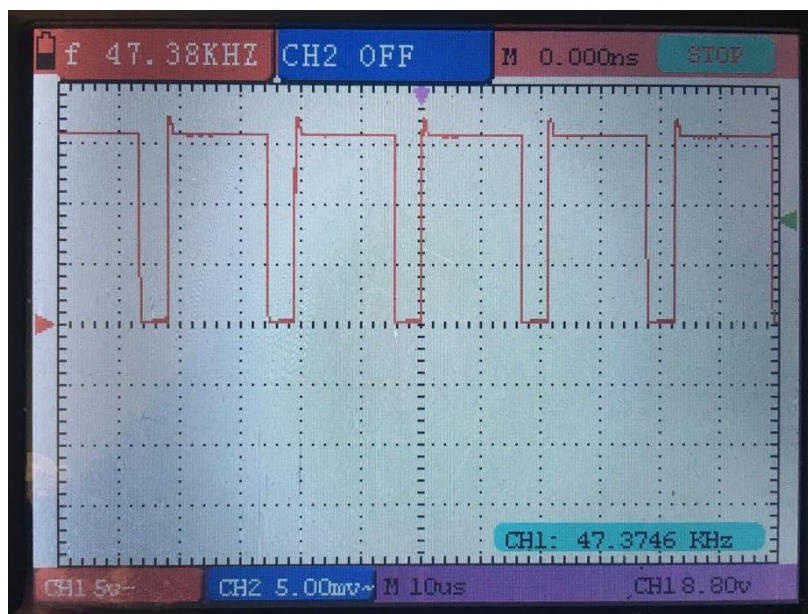
Nejprve jsem zkoušel, zda-li funguje řídicí část obvodu. Na vstupní svorky obvodu nebylo připojeno žádné napětí. Aby byl řídicí obvod osamostatněn, nebyl zatím zapojen transformátor a rezistor R18. Zkouška probíhala tak, že jsem přivedl napájecí napětí na integrovaný obvod UC3842N. Napájecí vývod (kladný pól) je vývod číslo 7 a zem (záporný pól) vývod č.5. Toto napětí jsem dostal sériovým spojením čtyřech baterií AA, tedy 6V. Na to obvod ale nereagoval. Při hledání chyby jsem zjistil, že obvod nepotřebuje napájecí napětí 5V jak jsem se domníval, ale 16V. Zároveň jsem si tedy uvědomil chybu při navrhování transformátoru. Pak jsem řídicí obvod vyzkoušel s napětím 18V. Rozsvítila se LED dioda, signalizující probuzení obvodu. Voltmetrem jsem se nejdříve měřil na vývodu č.8, kde se správně objevilo referenční napětí 5V.



Obr. 4.5 Svítící dioda při napájení řízení z baterií

Na vývodu číslo 6 se tedy měli objevit řídicí pulzy pro řízení tranzistoru s nastavenou frekvencí podle rovnice (1.2) přibližně 50kHz. Po připojení osciloskopu na tento vývod jsem zjistil správnou funkci.





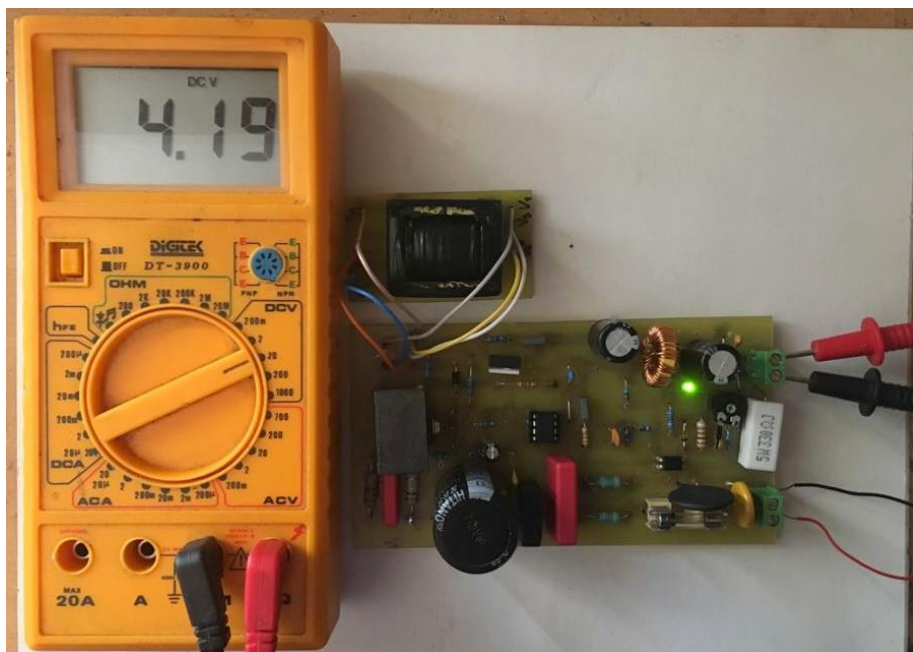
Obr. 4.6 Průběh signálu na řídicí elektrodě tranzistoru

V dalším kroku jsem připojil rezistor R18, čímž jsem připojil vstupní část obvodu k řídicí části. Nyní bez připojené baterie jsem na vstup připojil síťové napětí, ovšem kvůli omezení proudu při případné chybě v zapojení zatím přes do série připojenou žárovku. Kromě omezení proudu by při zkratu také začala z důvodu vyššího proudu svítit, což by případnou chybu dobře indikovalo. V této části se nabije hlavní elektrolytický kondenzátor C2 a z něho se nabíjí kondenzátor C7. Z toho se napájí řídicí obvod, ovšem pouze při startu. Při trvalé činnosti by se napájel z terciálního vinutí transformátoru, ale to je zatím odpojeno. Při dosažení napětí 16V na C7 se rozběhne řídicí integrovaný obvod. Ovšem toto zapojení nedokáže napájet řídicí obvod trvale, proto se pouze pokouší o rozběhnutí, což indikuje blikající LED dioda. Tento stav byl funkční. Po odpojení napájení zůstal nabitý kondenzátor C2 a LED dioda blikala ve stále se prodlužujících intervalech ještě asi 1 minutu. Takže bylo nutné před další manipulací počkat, až dioda přestane blikat a kondenzátor C2 bude bezpečně vybit. V dalších pokusech jsem kondenzátor vybíjel rezistorem 10 k $\Omega$ .

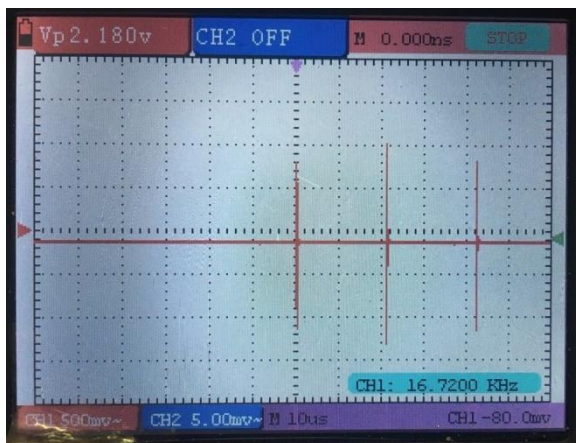
Při dalších pokusech jsem zjistil, že původní transformátor není vyhovující a že bude nutné vyrobit nový. To mě velmi zdrželo, musel jsem navrhnout a vyrobit nový a neměl jsem už čas shánět nové jádro, tak jsem použil starší jádro, u kterého jsem však neznal všechny jeho vlastnosti. Musel jsem také upravit plošný spoj, protože původní transformátor měl společný konec vinutí pro druhé a třetí vinutí, což byla další chyba a

musel jsem na spoji oddělit záporný pól výstupního a řídicího obvodu.

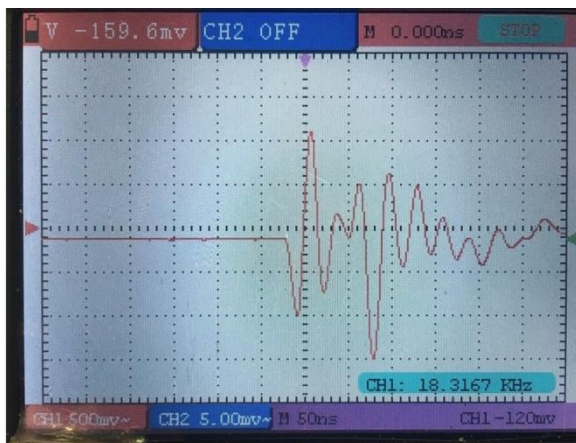
První pokus byl neúspěšný a prorazil jsem původně použitý tranzistor IRF840, což ihned ohlašovala svítící žárovka připojená na vstupu. Musel jsem celý návrh transformátoru a výrobu provést opakovaně, než jsem došel k funkčnímu kusu. Další chyba byla v orientaci vinutí, kdy jsem špatně určil začátek a konec vinutí a tak byla primární a sekundární vinutí orientována souhlasně. Nicméně obvod stále nereguloval výstupní napětí. Po další pomoci od vedoucího práce jsem snížil hodnotu rezistoru R14, protože se nedostával potřebný proud pro funkci obvodu referenčního napětí a tudíž nebyla aktivní zpětná vazba, výstupní napětí stále rostlo a žárovka v přívodu stále svítila. Po snížení na  $100\Omega$  se na výstupu již objevilo stabilizované napětí, ale zatím jen s napájením řídicího obvodu z baterie. Výstupní napětí bylo možné regulovat potenciometrem R13 přibližně mezi 3,5 - 4,5V. Po připojení třetího vinutí se obvod jen pokoušel o start, což indikovala blikající LED dioda. Musel jsem tedy ještě zvýšit počet závitů tohoto vinutí, protože se nedostávalo dostatečné napájecí napětí na integrovaný obvod. Pak již obvod na výstupu vykazoval stabilizované napětí. Žárovka v přívodu již jen při spuštění problikla, než se nabil hlavní kondenzátor C2 a tak jsem žárovku již mohl ze zapojení odebrat.



Obr. 4.7 Obvod s novým transformátorem při funkci bez zatížení



Obr. 4.8 Výstupní napětí nezatíženého obvodu



Obr. 4.9 detail jednoho kmitu

Měření osciloskopem ukázalo, že na výstupu jsou velké napěťové špičky. Ty mohou být způsobeny parazitními kapacitami a indukčnostmi v obvodu, nevhodným návrhem transformátoru, neuzpůsobenou deskou plošného spoje pro vyšší frekvenci nebo strmými hranami při spínání tranzistoru. Zvlnění jednoho kmitu z průběhu na Obr. 4.14 dosahuje až 2,6V, tato hodnota je příliš vysoká a bylo by potřebné rušení omezit.

Nyní jsem chtěl vyzkoušet funkci při připojení nabíjeného článku. Ten jsem získal z baterie notebooku. Článek LGABC21865 má jmenovité napětí 3,7V, nabíjecí napětí maximálně 4,3V a maximální nabíjecí proud 2,7A [44].

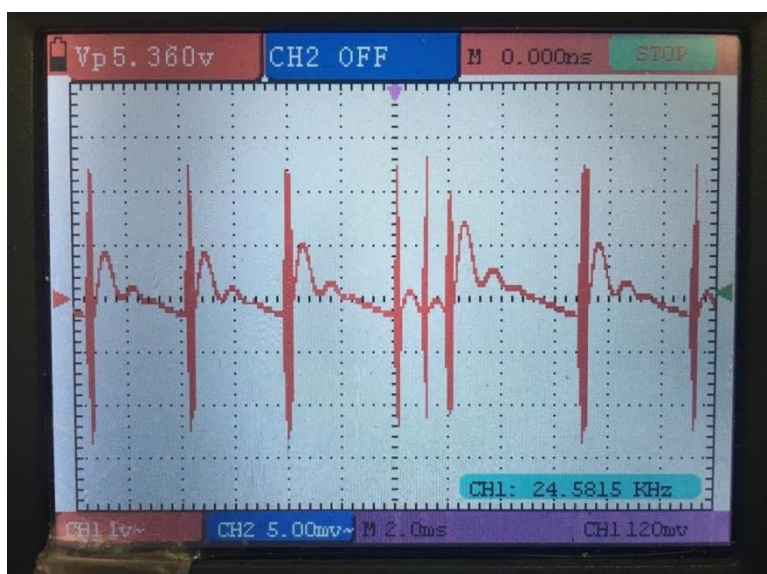


Obr. 4.10 Li-ion článek LGABC21865

V tuto chvíli jsem si uvědomil, že by byl nabíječ potřebný doplnit obvodem pro omezování výstupního proudu.

Při připojení na výstup bohužel došlo k enormnímu zvýšení proudu, což zapříčinilo shoření řídicího obvodu, proražení spínacího tranzistoru a následné shoření pojistky v přívodu. Příčinu jsem již nestihl s jistotou zjistit, příčinou shoření součástek je zřejmě nefunkční omezování proudu, snímaného na rezistoru R9, kdy měl automaticky řídicí obvod ihned ukončit spínání tranzistoru. Po výměně součástek jsem opět připojil do přívodu žárovku a zkusil připojit článek. Výstupní napětí nedokázalo udržet svoji hodnotu a pokleslo, proud v přívodu dosahoval až 2A. Příčinou enormního odběru mohl být vadný článek, který byl starší a delší dobu nepoužívaný. Byl již vybit pod spodní hranici 2,5V a mohl tedy být již nenávratně zničen.

Zkusil jsem ještě zatížit výstup rezistory o hodnotě 5 a 22 $\Omega$ , napětí sice dokázal zdroj regulovat, ale špičkové zvlnění dosahovalo asi 2,2V, s rezistorem 22 $\Omega$  jsem v jednom měření změřil dokonce více než 5V, což je naprosto nevyhovující. Také spínací tranzistor se i přes větší pasivní chladič velmi zahříval.



Obr. 4.11 Výstupní napětí při zatížení rezistorem 22 $\Omega$

Pokusil jsem se to vylepšit zvýšením kapacity výstupních filtračních kondenzátorů, ale opět začala svítit ochranná žárovka, ohlašující enormní odběr obvodu.

Při zatížení rezistorem o hodnotě 22 $\Omega$  jsem chtěl změřit účinnost zdroje. V přívodních svorkách jsem pomocí měřícího přístroje s funkcí true RMS, který dokáže změřit efektivní



hodnotu průběhů sinusových i jiných, změřil napětí 235V a proud 160mA. Při měření na výstupních svorkách pak napětí 4,2V a proud 180mA. Po vynásobení těchto hodnot jsem získal vstupní výkon 37,6W a výstupní pouhých 0,76W. Rozdíl těchto výkonů si neumím vysvětlit. Mohl jsem nějakou hodnotu změřit špatně, i když jsem měření opakoval vícekrát, nebo nepřesně navržený transformátor nefungoval správně.

#### 4.6 Shrnutí funkce

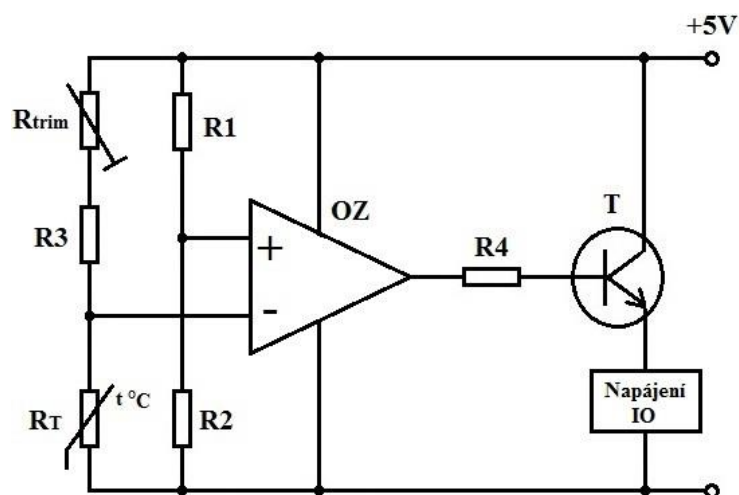
Výstupní napětí nezátíženého i zatíženého obvodu dokáže udržovat nastavenou hodnotu. Lze regulovat od 3,5V do 4,5V, což vyhovuje univerzálnímu použití všech lithiových článků, kde se používají napětí od 3,6V do 4,3V (kromě speciálních článků). Ovšem vznikají na něm velké překmity napětí. Ty vznikají spojením několika negativních vlivů, parazitními kapacitami a indukčnostmi v obvodu, nepřesně navrženým a vyrobeným transformátorem, stejně tak deskou plošného spoje, velkou strmostí při spínání tranzistoru a dalšími rušícími vlivy. Bylo by potřebné tyto kmity omezit.

Použití pro nabíjení článku jsem bohužel nevyzkoušel. Článek, který jsem měl, byl dlouhodobě podvybit a zřejmě byl již nenávratně zničen a tak nepovažuji pokus s tímto článkem za použitelný. Jiný článek jsem nestihl sehnat a nemůžu zhodnotit funkci při nabíjení.

Rychle vyráběný transformátor nemohl být navrhnout přesně, protože jsem použil jádro, u kterého jsem neznal jeho vlastnosti a z toho zřejmě pramení chyby při fungování obvodu. Tento transformátor při zapnutém zdroji vydává bzučivý zvuk.

#### 4.7 Ochrana proti přehřátí

Tuto ochranu jsem již nestihl do obvodu implementovat, realizoval bych ji termistorem, jehož odpor závisí na teplotě. Tento termistor by musel být vyveden nejlépe přímo na nabíjený článek.



Obr. 4.12 obvod pro snímání teploty - upraveno z [45]

Operační zesilovač je zapojen ve funkci komparátoru. Ten porovnává referenční napětí nastavené děličem složeným z rezistorů R1 a R2 s napětím z děliče druhého, tvořeným rezistore R<sub>trim</sub>, R3 a termistorem R<sub>T</sub>. Toto napětí je vlivem termistoru závislé na teplotě. Dokud je napětí na vstupu + OZ vyšší než na vstupu -, je tranzistor sepnut. Při zvýšení teploty se zvyšuje napětí na vstupu - a v okamžiku, kdy je toto napětí vyšší než na +, tranzistor vypne. R<sub>trim</sub> slouží k přesnému nastavení teploty, při které má tranzistor spínat. V obvodu celého zdroje by muselo přibýt ještě napájení pro tento obvod. Tranzistor bych zapojil tak, aby při překročení teploty odpojil terciální vinutí, čímž by došlo k přerušení napájení řídicí části, celý zdroj by se zastavil a jen se pokoušel o start. Tento stav by indikovala LED dioda periodickým blikáním. Teplotu pro vypnutí obvodu bych nastavil 60°C (viz kapitola 2.6).

#### 4.8 Možnosti dalšího vylepšení

Při správné funkci by bylo nutné ještě dovybavit zařízení obvodem pro omezení maximálního proudu, jelikož články mají maximální nabíjecí proud stanovený výrobcem a ten by neměl být překročen.

Zásadním vylepšením by bylo zadání výroby impulsního transformátoru firmě specializované na jejich zakázkovou výrobu. Transformátor mnou navržený a sestavený víceméně experimentálně byl špatnou cestou a zdrojem problémů stejně jako deska plošného spoje, která by byla lepší navrhnout softwarově s ohledem na EMC a vyrobit

profesionálnější cestou.

Nejlepším vylepšením by bylo použití některého z integrovaných obvodů, určených přímo k nabíjení lithiových článků a zdroj sestavit na jeho základě. Tyto obvody přesně řídí celý cyklus nabíjení. Dokážou hlídat průběh nabíjení a přerušit ho v případě vadného článku.

## Závěr

Lithiové akumulátory jsou pro dnešní aplikace vhodným přenosným zdrojem energie, což pramení z jejich vysoké hustoty energie v nich uložené, oproti dříve používaným článkům starších technologií. Díky tomu mohou být menší. Výhodou je také vyšší jmenovité napětí. Jejich konstrukce je relativně mladá, stále se rychle vyvíjí a na trhu se objevují články stále vyšších kapacit. V elektronice je použití naprosto běžné, používají se už i v elektromobilech a tyto baterie se začínají vyrábět i pro startování běžných spalovacích motorů na místo olověných akumulátorů. Neobsahují kyseliny ani těžké kovy, jakým je olovo a jsou tak mnohem šetrnější k životnímu prostředí.

Při konstrukci nabíječe, který je výše popsán, jsem bohužel nedospěl k zařízení, které bych mohl bezpečně používat k nabíjení. Nabíjení článku není vyzkoušeno, nicméně zvlnění, jaké vykazoval zdroj bez zatížení a se zkušebním zatěžováním rezistory bylo nevyhovující. Začátkem pro zlepšení funkce by bylo nutné vyrobit nový impulsní transformátor, u kterého by byly známy všechny jeho vlastnosti. Dalším krokem ke zlepšení by byla výroba nové desky plošného spoje pro omezení parazitních vlastností. Do obvodu bych implementoval tepelnou ochranu, která zůstala zatím jen u návrhu a pak chybějící proudové omezení pro nastavování povoleného maximálního proudu pro konkrétní nabíjený článek.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. 181 s. ISBN 80-7082-411-5.
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1998. 351 s. ISBN 80-86056-02-3.
- [3] Historie, výhody a nevýhody Li-on baterií - SCIENCEMAG. *SCIENCEMAG* [online]. Poslední změna 23.4.2016 [Cit. 18.4.2017]. Dostupné z: <http://sciencemag.cz/historie-vyhody-a-nevyhody-li-on-baterii/>
- [4] Jak se nabíjejí Lithiové akumulátory ? | Vývoj.HW.cz. *Vývoj.HW.cz | Vše o elektronice a programování* [online]. Poslední změna 20.5.2008 [Cit. 26.4.2017]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/jak-se-nabijeji-lithiove-akumulatory.html>
- [5] Lithiové akumulátory - TZB-info. *tzbinfo* [online]. Poslední změna 21.12.2015 [Cit. 8.5.2017]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [6] Historie | Li - akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů. *Články, baterie a akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. 2009 [Cit. 12.4.2017]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/historie>
- [7] Základní charakteristiky | Li - akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů. *Články, baterie a akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. 2009 [Cit. 12.4.2017]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/zakladni-charakteristiky>
- [8] Nabíjení lithiových akumulátorů | Nabíjení hermetických akumulátorů | Abeceda baterií a akumulátorů. *Články, baterie a akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. 2009 [Cit. 12.4.2017]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-lithiovych-akumulatoru>



- [9] Nabíjení hermetických akumulátorů | Hermetické akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů. *Články, baterie a akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. 2009 [Cit. 12.4.2017]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru>
- [10] Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení. *Elektronika Jaroslav Belza* [online]. Poslední změna 2.4.2001 [Cit. 24.4.2017]. Dostupné z: <http://www.belza.cz/charge/liion1.htm>
- [11] Li-ion baterie | 3 pól - Magazín plný pozitivní energie. *Úvod / 3 pól - Magazín plný pozitivní energie* [online]. Poslední změna 25.4.2015 [Cit. 29.4.2017]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/practicke-informace/1677-li-ion-baterie>
- [12] HAMMERBAUER, Jiří. Materiály k předmětu ENZ. *Courseware ZČU: Soubor ve formátu ZIP* [online]. Poslední změna 31.3.2013 [Cit. 17.4.2017]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=118746>
- [13] Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část) - Cnews.cz. *Cnews.cz | Od tranzistorů až po PC sestavy* [online]. Poslední změna 15.4.2011 [Cit. 30.4.2017]. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>
- [14] Nabíjení Li-pol, Li-ion a LiFe akumulátorů (1) « RoboDoupě - web nejen o robotice. *RoboDoupě - web nejen o robotice* [online]. Poslední změna 21.4.2014 [Cit. 2.5.2017]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2014/nabijeni-li-pol-li-ion-a-life-akumulatoru-1/>
- [15] Jednoduchá nabíječka Li-ion / Simple Li-ion charger. *Elektronika Jaroslav Belza* [online]. Poslední změna 19.11.2003 [Cit. 28.4.2017]. Dostupné z: <http://www.belza.cz/charge/liion2.htm>
- [16] Jednoduchý nabíječ Li-Ion. *Miloš Zajíc elektronické stavebnice a moduly* [online]. Poslední změna 1.1.2007 [Cit. 25.4.2017]. Dostupné z: <http://www.zajic.cz/nablion/nablion.htm>
- [17] Často kladené otázky o LiIon člancích. *Miloš Zajíc elektronické stavebnice a moduly* [online]. [Cit. 25.4.2017]. Dostupné z: <http://www.zajic.cz/nablion/lionfaq.htm>

- [18] Charging Lithium-Ion Batteries - Battery University. *Basic to Advanced Battery Information from Battery University* [online]. Poslední změna 9.5.2017 [Cit. 9.5.2017]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_lithium\\_ion\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries)
- [19] Lithiové akumulátory velkých výkonů acjejich použití - Časopis Elektro - Odborné časopisy. *Odborné časopisy* [online]. [Cit. 22.4.2017]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/lithiove-akumulatory-velkych-vykonu-a-jejich-pouziti--13384>
- [20] Lithium-železo-fosfátový akumulátor. *Wikipedie* [online]. Poslední změna 19.2.2017 [Cit. 7.5.2017]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-%C5%BEelezo-fosf%C3%A1tov%C3%BD\\_akumul%C3%A1tor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-%C5%BEelezo-fosf%C3%A1tov%C3%BD_akumul%C3%A1tor)
- [21] lifepo lifeypo lifepo4 články baterie 40Ah 20Ah. *Elektrické skútry* [online]. [Cit. 7.5.2017]. Dostupné z: <http://eskuetr.cz/cs/baterie/13-lifepo-akumulator-32-v-40-ah-lifepo4.html>
- [22] Type sof Lithium-ion Batteries - Battery University. *Basic to Advanced Battery Information from Battery University* [online]. Poslední změna 9.5.2017 [Cit. 7.5.2017]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)
- [23] Jak nabíjet lipol baterie. *Lipol baterie - Tuningy, Zippy, Traxxas* [online]. [Cit. 8.5.2017]. Dostupné z: <http://www.lipolbaterie.cz/navody/jak-nabijet-lipol-baterie/>
- [24] HANTL, Josef. Bakalářská práce Spínané zdroje pro elektronické obvody. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Poslední změna 2009 [Cit. 13.5.2017]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=18765](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18765)
- [25] Lithium-polymerový akumulátor. *Wikipedie* [online]. Poslední změna 19.4.2017 [Cit. 7.5.2017]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerov%C3%BD\\_akumul%C3%A1tor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerov%C3%BD_akumul%C3%A1tor)
- [26] Aspire ICR 18650 1800mAh Li-ion Baterie - 40A | VašeCigareta.cz. *VašeCigareta.cz - elektronické cigarety, náplně a příslušenství | VašeCigareta.cz* [online]. [Cit. 8.5.2017]. Dostupné z: <https://www.vasecigareta.cz/produkt-1114->

- aspire-icr-18650-1800mah-li-ion-baterie-40a.html
- [27] HAMMERBAUER, Jiří. Akumulátory NiFe a NiCd. *MVE jako ostrovní systém* [online]. [Cit. 7.5.2017]. Dostupné z: [http://www.malavoda.cz/akum\\_nife\\_nicd.pdf](http://www.malavoda.cz/akum_nife_nicd.pdf)
- [28] Nabíjení Li-pol, Li-ion a LiFe akumulátorů (2) « RoboDoupě - web nejen o robotice. *RoboDoupě - web nejen o robotice* [online]. Poslední změna 28.4.2014 [Cit. 9.5.2017]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2014/nabijeni-li-pol-li-ion-a-life-akumulatoru-2/>
- [29] VALDA, Lukáš. autoreferát disertační práce. *Fakulta elektrotechnická* [online]. [Cit. 9.5.2017]. Dostupné z: [http://fel.zcu.cz/export/sites/fel/uredni-desky/UD\\_PhD/Probihajici\\_SDZ\\_a\\_obhajoby/Autoreferaty/160930\\_autoreferat\\_Valda\\_Lukas.pdf](http://fel.zcu.cz/export/sites/fel/uredni-desky/UD_PhD/Probihajici_SDZ_a_obhajoby/Autoreferaty/160930_autoreferat_Valda_Lukas.pdf)
- [30] Maturitní zkouška - Lithiové články. *SPŠ sdělovací techniky | Panská 3, Praha 1* [online]. [Cit. 9.5.2017]. Dostupné z: <http://www.panska.cz/files/ukazky-praci/dgt-gst/lithiove-clanky.pdf>
- [31] DVOŘÁK, Jaroslav. Bakalářská práce, spínaný zdroj. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. [Cit. 15.5.2017]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=8575](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8575)
- [32] BLCR - 4. *RC SHOP - obchod s rc modely* [online]. [Cit. 9.5.2017]. Dostupné z: <https://www.rcshop.eu/cs/balancery/2845-bldr-4.html>
- [33] Síťové napájecí zdroje. [online]. Poslední změna 23.9.2004 [Cit. 13.5.2017]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~sla10/elektronika/elektronika1.pdf>
- [34] Napájecí zdroje. *SŠ - COPT Kroměříž* [online]. Poslední změna 7.5.2011 [Cit. 14.5.2017]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/?action=2&doc=21818&docGroup=4921&cmd=0&instance=2>
- [35] PATÁK, Michal. Bakalářská práce, návrh nabíjecího ústrojí baterií s balancerem. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. [Cit. 30.4.2017]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5818/Michal%20Pat%C3%A1k.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

- [36] Zdroje PC. *Elektronika Jaroslav Belza* [online]. Poslední změna 10.01.2002 [Cit. 6.5.2018]. Dostupné z: <http://www.belza.cz/swmodeps/compow2.htm>
- [37] GM electronic, spol. s.r.o. [online]. [Cit. 12.5.2018]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.390-009.1.pdf>
- [38] JANDA, Petr. Bakalářská práce, Spínaný zdroj 24V/2,5A. *České vysoké učení technické v Praze* [online]. [Cit. 10.5.2018]. Dostupné z: [https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/a/a8/Bp\\_2003\\_janda\\_petr.pdf](https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/a/a8/Bp_2003_janda_petr.pdf)
- [39] Stejnoseměrné zdroje napětí | Vývoj.HW.cz. *Vývoj.HW.cz | Vše o elektronice a programování* [online]. Poslední změna 9.4.2007 [Cit. 23.5.2018]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/stejnosemerne-zdroje-napeti.html>
- [40] Spínané zdroje napětí | Vývoj.HW.cz. *Vývoj.HW.cz | Vše o elektronice a programování* [online]. Poslední změna 9.4.2007 [Cit. 2.5.2018]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/spinane-zdroje.html>
- [41] GONCHAROV, Mikhail. Diplomová práce, Návrh spínaného napájecího zdroje pro průmyslové aplikace. *České vysoké učení technické v Praze* [online]. [Cit. 25.5.2018] Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61816/F3-DP-2015-Goncharov-Mikhail-Navrh\\_spinaneho\\_napajeciho\\_zdroje\\_pro\\_prumyslove\\_aplikace.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61816/F3-DP-2015-Goncharov-Mikhail-Navrh_spinaneho_napajeciho_zdroje_pro_prumyslove_aplikace.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [42] Univerzita obrany, fakulta vojenských technologií. Prof. Ing. Karel Zaplatílek, Ph.D [online]. [Cit. 25.5.2018] Dostupné z: [https://user.unob.cz/zaplatilek/Obecne/Skripta\\_napajeci%20zdroje/Část4.doc](https://user.unob.cz/zaplatilek/Obecne/Skripta_napajeci%20zdroje/Část4.doc)
- [43] Elektronika [online]. [Cit. 3.6.2018] Dostupné z: <http://www.elektronikapc.wz.cz/en/info/stabl.htm>
- [44] LG LGABC21865 Cell Specifications. *Second Life Storage - Building Better Batteries* [online]. Copyright © 2002 [cit. 05.06.2018]. Dostupné z: <https://secondlifestorage.com/t-LG-LGABC21865-Cell-Specifications>
- [45] Elweb [online] *elektronické aplikace*. [Cit. 5.6.2018] Dostupné z: <http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=48>

## Přílohy

### Příloha A - Seznam součástek

Součástka	Označení	Typ	Hodnota
Rezistor	R1	Metaloxidový	100 k $\Omega$
Rezistor	R2	Metaloxidový	12 k $\Omega$
Rezistor	R3	Metalizovaný	1,5 k $\Omega$
Rezistor	R4	Metalizovaný	3,9 k $\Omega$
Rezistor	R5	Metalizovaný	3,9 k $\Omega$
Rezistor	R6	Metalizovaný	470 $\Omega$
Rezistor	R7	Metalizovaný	270 $\Omega$
Rezistor	R8	Metalizovaný	22 $\Omega$
Rezistor	R9	Metalizovaný	1 $\Omega$
Rezistor	R10	Metalizovaný	3,3 k $\Omega$
Rezistor	R11	Metalizovaný	270 $\Omega$
Rezistor	R12	Metalizovaný	33 k $\Omega$
Potenciometr	R13	Uhlíkový	100 k $\Omega$
Rezistor	R14	Metalizovaný	100 $\Omega$
Rezistor	R15	Metalizovaný	1,2 k $\Omega$
Rezistor	R16	Metaloxidový	330 $\Omega$
Rezistor	R17	Metalizovaný	1 $\Omega$
Rezistor	R18	Metalizovaný	100 k $\Omega$
Kondenzátor	C1	Fóliový	100 nF / 1000V
Kondenzátor	C2	Elektrolytický	220 uF / 400V
Kondenzátor	C3	Fóliový	10 nF / 1500V
Kondenzátor	C4	Keramický	2,7 nF / 500V
Kondenzátor	C5	Fóliový	22 nF / 100V
Kondenzátor	C6	Keramický	10 nF / 100V
Kondenzátor	C7	Elektrolytický	47 uF / 50V
Kondenzátor	C8	Fóliový	2,2 nF / 100V
Kondenzátor	C9	Elektrolytický	470 uF / 63V
Kondenzátor	C10	Elektrolytický	470 uF / 63V
Kondenzátor	C11	Keramický	100 nF / 63V
Kondenzátor	C12	Keramický	100 nF / 63V
Cívka	L1		3,3 mH
Cívka	L2		3,3 mH
Cívka	L3	SFT 1240A	64 uH
Dioda	D1-D4	Můstek, 600V / 4A	B250C4000
Dioda	D5	Rychlá, 800V / 3A	BY399 ARK
Dioda	D6	Rychlá, 1000V / 1A	BA159

Dioda	D7	Velmi rychlá 200V / 8A	BYW29-200
Dioda	D8	LED	Zelená
Termistor	RT1	NTC	B57364S0100M000
Varistor	RV1	250V/390V	ERZC14DK391
Tranzistor	T1	Unipolární typ N	K3562
Transformátor	TR	Třívinuťový	
Integrovaný obvod	IO1	Řídicí modul PWM	UC3842N
Integrovaný obvod	IO2	Napět'ová reference	TL431
Integrovaný obvod	IO3	Optočlen	PC817B
Pojistka	P1	Trubičková	2A

### Příloha B - Návrh a výpočet transformátoru [38]

#### Požadované parametry:

Spínací frekvence  $f = 50\text{kHz}$ , maximální střída  $\delta_{\max} = 0,5$

Vstupní napětí sítě  $U_1 = 230\text{V}$ , tolerance 10%

Výstupní sekundární vinutí:  $U_2 = 5\text{V}$ ,  $I_2 = 5\text{A}$

Pomocné terciální vinutí:  $U_3 = 19\text{V}$ ,  $I_3 = 50\text{mA}$

#### Výpočet sekundárního vinutí:

Minimální hodnota napětí na primárním vinutí:

$$U_{1\min} = \sqrt{2} \times 230 \times 0,9 = 292,75 \text{ V}$$

Maximální hodnota:

$$U_{1\max} = \sqrt{2} \times 230 \times 1,1 = 357,8 \text{ V}$$

Převod  $n_1$ :

$$n_1 = \frac{U_{1\min} \times \delta_{\max}}{U_2 \times (1 - \delta_{\max})} = \frac{292,75 \times 0,5}{5 \times (1 - 0,5)} = 58,55$$

Minimální střída  $\delta_{\min}$ :

$$\delta_{\min} = \frac{U_2 \times n_1}{U_{1\max} + U_2 \times n_1} = \frac{5 \times 58,55}{357,8 + 5 \times 58,55} = 0,45$$

Výpočet efektivního výstupního proudu pro  $\delta_{min}$ :

Maximální sekundární proud  $I_{2max}$ :

$$I_{2max} = \frac{2 \times I_2}{1 - \delta_{min}} = \frac{2 \times 5}{1 - 0,45} = 18,18 \text{ A}$$

Změna sekundárního proudu  $\Delta I_2$ :

$$\Delta I_2 = I_{2max} = 18,18 \text{ A}$$

Změna primárního proudu  $\Delta I_1$ :

$$\Delta I_1 = \frac{\Delta I_2}{n_1} = \frac{18,18}{58,55} = 0,31 \text{ A}$$

Indukčnost primárního vinutí  $L_1$ :

$$L_1 = \frac{U_{1max} \times \delta_{min}}{f \times \Delta I_1} = \frac{357,8 \times 0,45}{50000 \times 0,31} = 10,39 \text{ mH}$$

Indukčnost sekundárního vinutí  $L_2$ :

$$L_2 = \frac{L_1}{n_1^2} = \frac{10,39 \times 10^{-3}}{58,55^2} = 3,03 \text{ } \mu\text{H}$$

Z následujících rovnic výpočet maximálního a minimálního sekundárního proudu:

$$I_2 = (I_{2max} + I_{2min}) \times \frac{1 - \delta_{min}}{2}$$

$$\Delta I_2 = I_{2max} - I_{2min}$$

Dostáváme:  $I_{2max} = 18,18 \text{ A}$  ;  $I_{2min} = 0 \text{ A}$

Efektivní hodnota sekundárního proudu  $I_{2ef}$ :

$$I_{2ef} = \sqrt{I_{2max} \times \frac{1}{3}} = \sqrt{18,18 \times \frac{1}{3}} = 2,46 \text{ A}$$

Výpočet efektivního výstupního proudu pro  $\delta_{max}$ :

Změna primárního proudu  $\Delta I_1$ :

$$\Delta I_1 = \frac{U_{1min} \times \delta_{max}}{f \times L_1} = \frac{292,75 \times 0,5}{50000 \times 10,39 \times 10^{-3}} = 0,282 \text{ A}$$

Změna sekundárního proudu  $\Delta I_2$ :

$$\Delta I_2 = \Delta I_1 \times n_1 = 0,282 \times 58,55 = 16,51 \text{ A}$$

Z následujících rovnic výpočet maximálního a minimálního sekundárního proudu:

$$I_2 = (I_{2max} + I_{2min}) \times \frac{1 - \delta_{max}}{2}$$

$$\Delta I_2 = I_{2max} - I_{2min}$$

Dostáváme:  $I_{2max} = 18,255 \text{ A}$  ;  $I_{2min} = 1,745 \text{ A}$

Efektivní hodnota sekundárního proudu  $I_{2ef}$ :

$$I_{2ef} = \sqrt{\frac{\Delta I_2^2}{3} - \Delta I_2 \times I_{2max} + I_{2max}^2} = \sqrt{\frac{16,51^2}{3} - 16,51 \times 18,255 + 18,255^2} = 11,08 \text{ A}$$

Výpočet vodiče sekundárního vinutí:

Proudová hustota  $\sigma = 3 \text{ A/mm}^2$  ,  $I_{2ef} = 11,08 \text{ A}$  (vyšší hodnota z předchozích výpočtů)

Průřez vodiče sekundárního vinutí  $S_2$ :

$$S_2 = \frac{I_{2ef}}{\sigma} = \frac{11,08}{3} = 3,69 \text{ mm}^2$$

Průměr vodiče sekundárního vinutí  $d_2$ :

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \times S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 3,69}{\pi}} = 2,17 \text{ mm}$$

Činitel vinutí  $a_v = 0,83$

Výpočet jádra:

Efektivní průřez jádra  $S_e$ :

$$\frac{B_S}{2} > \frac{L_2 \times I_{2max} \times d_2^2 \times 2}{a_v \times S_e^2}$$

$$0,125 > \frac{3,03 \times 10^{-6} \times 18,255 \times (2,17 \times 10^{-3})^2 \times 2}{0,83 \times S_e^2}$$



$$\rightarrow S_e > 70,9 \text{ mm}^2$$

Feritové jádro jsem získal ze staršího zařízení, jeho průřez je  $76 \text{ mm}^2$  - ten je vyhovující. Rozměrově odpovídá jádru ETD29, z jehož datasheetu jsem získal údaj o efektivní délce  $l_e = 72 \text{ mm}$ . Jelikož je transformátor složen ze dvou těchto jader, délka  $l_e$  bude tedy  $144 \text{ mm}$ . Vzduchová mezera mezi těmito jádry je  $0,4 \text{ mm}$ , tu jsem ještě experimentálně zvětšil na  $0,9 \text{ mm}$ .

Počet závitů sekundárního vinutí  $N_2$ :

$$N_2 = \sqrt{\frac{L_2 \times l_e}{S_e \times \mu_0 \times \mu_e}} = \sqrt{\frac{3,03 \times 10^{-6} \times 144 \times 10^{-3}}{76 \times 10^{-6} \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 68}} = 8,2 \rightarrow 8 \text{ závitů}$$

Výpočet terciálního vinutí:

Minimální a maximální hodnota napětí na primárním vinutí  $U_{1\min} = 292,75\text{V}$ ,  $U_{1\max} = 357,8\text{V}$  (výpočet viz. kapitola 4.4.1).

Převod n:

$$n_2 = \frac{U_{1\min} \times \delta_{\max}}{U_3 \times (1 - \delta_{\max})} = \frac{292,75 \times 0,5}{19 \times (1 - 0,5)} = 9,48$$

Minimální střída  $\delta_{\min}$ :

$$\delta_{\min} = \frac{U_3 \times n_2}{U_{1\max} + U_3 \times n_2} = \frac{19 \times 9,48}{357,8 + 19 \times 9,48} = 0,33$$

Výpočet efektivního výstupního proudu pro  $\delta_{\min}$ :

Maximální terciální proud  $I_{3\max}$ :

$$I_{3\max} = \frac{2 \times I_3}{1 - \delta_{\min}} = \frac{2 \times 50 \times 10^{-3}}{1 - 0,33} = 0,15 \text{ A}$$

Změna terciálního proudu  $\Delta I_3$ :

$$\Delta I_3 = I_{3\max} = 0,15 \text{ A}$$

Změna primárního proudu  $\Delta I_1$ :

$$\Delta I_1 = \frac{\Delta I_3}{n} = \frac{0,15}{9,48} = 0,016 \text{ A}$$

Indukčnost primárního vinutí  $L_1$ :

$$L_1 = \frac{U_{1max} \times \delta_{min}}{f \times \Delta I_1} = \frac{357,8 \times 0,33}{50000 \times 0,016} = 148 \text{ mH}$$

Indukčnost terciálního vinutí  $L_3$ :

$$L_3 = \frac{L_1}{n_2^2} = \frac{148 \times 10^{-3}}{9,48^2} = 1,65 \text{ mH}$$

Z následujících rovnic výpočet maximálního a minimálního terciálního proudu:

$$I_3 = (I_{3max} + I_{3min}) \times \frac{1 - \delta_{min}}{2}$$

$$\Delta I_3 = I_{3max} - I_{3min}$$

Dostáváme:  $I_{3max} = 0,15 \text{ A}$  ;  $I_{3min} = 0 \text{ A}$

Efektivní hodnota terciálního proudu  $I_{3ef}$ :

$$I_{3ef} = \sqrt{I_{3max} \times \frac{1}{3}} = \sqrt{0,15 \times \frac{1}{3}} = 0,22 \text{ A}$$

Výpočet efektivního výstupního proudu pro  $\delta_{max}$ :

Změna primárního proudu  $\Delta I_1$ :

$$\Delta I_1 = \frac{U_{1min} \times \delta_{max}}{f \times L_1} = \frac{292,75 \times 0,5}{50000 \times 148 \times 10^{-3}} = 0,0198 \text{ A}$$

Změna terciálního proudu  $\Delta I_3$ :

$$\Delta I_3 = \Delta I_1 \times n_2 = 0,0198 \times 9,48 = 0,188 \text{ A}$$

Z následujících rovnic výpočet maximálního a minimálního terciálního proudu:

$$I_3 = (I_{3max} + I_{3min}) \times \frac{1 - \delta_{max}}{2}$$

$$\Delta I_3 = I_{3max} - I_{3min}$$

Dostáváme:  $I_{3max} = 194 \text{ mA}$  ;  $I_{3min} = 6 \text{ mA}$

Efektivní hodnota terciálního proudu  $I_{3ef}$ :

$$I_{3ef} = \sqrt{\frac{\Delta I_3^2}{3} - \Delta I_3 \times I_{3max} + I_{3max}^2} = \sqrt{\frac{0,188^2}{3} - 0,188 \times 0,194 + 0,194^2} = 0,114 \text{ A}$$

Výpočet vodiče terciálního vinutí:

Proudová hustota  $\sigma = 3 \text{ A/mm}^2$ ,  $I_{3ef} = 0,22 \text{ A}$  (vyšší hodnota z předchozích výpočtů)

Průřez vodiče terciálního vinutí  $S_3$ :

$$S_3 = \frac{I_{3ef}}{\sigma} = \frac{0,22}{3} = 0,073 \text{ mm}^2$$

Průměr vodiče terciálního vinutí  $d_3$ :

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \times S_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,073}{\pi}} = 0,305 \text{ mm}$$

Počet závitů primárního vinutí  $N_1$ :

$$N_1 = n_1 \times N_2 = 58,55 \times 8 = 468,4 \rightarrow 468 \text{ závitů}$$

Počet závitů terciálního vinutí  $N_3$ :

$$N_3 = \frac{N_1}{n_2} = \frac{468}{9,48} = 49,37 \rightarrow 49 \text{ závitů}$$

Výpočet primárního vinutí:

Výpočet vodiče primárního vinutí:

Efektivní hodnota primárního proudu pro sekundární vinutí  $I_{1ef2}$ :

$$I_{1ef2} = \frac{I_{2ef}}{n_1} = \frac{11,08}{58,55} = 0,19 \text{ A}$$

Efektivní hodnota primárního proudu pro terciální vinutí  $I_{1ef3}$ :

$$I_{1ef3} = \frac{I_{3ef}}{n_2} = \frac{0,22}{9,48} = 0,023 \text{ A}$$

Celková hodnota efektivního primárního proudu  $I_{1ef}$ :

$$I_{1ef} = I_{1ef2} + I_{1ef3} = 0,19 + 0,023 = 0,213 \text{ A}$$

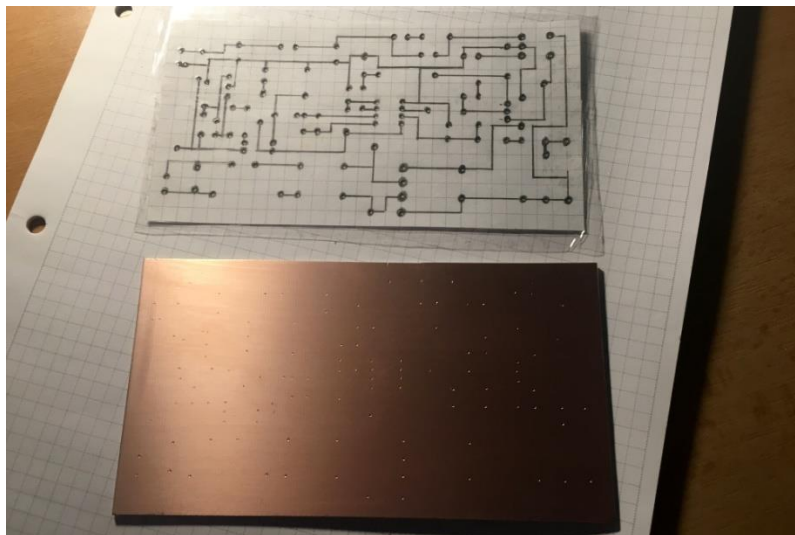
Průřez vodiče primárního vinutí  $S_1$ :

$$S_1 = \frac{I_{1ef}}{\sigma} = \frac{0,213}{3} = 0,071 \text{ mm}^2$$

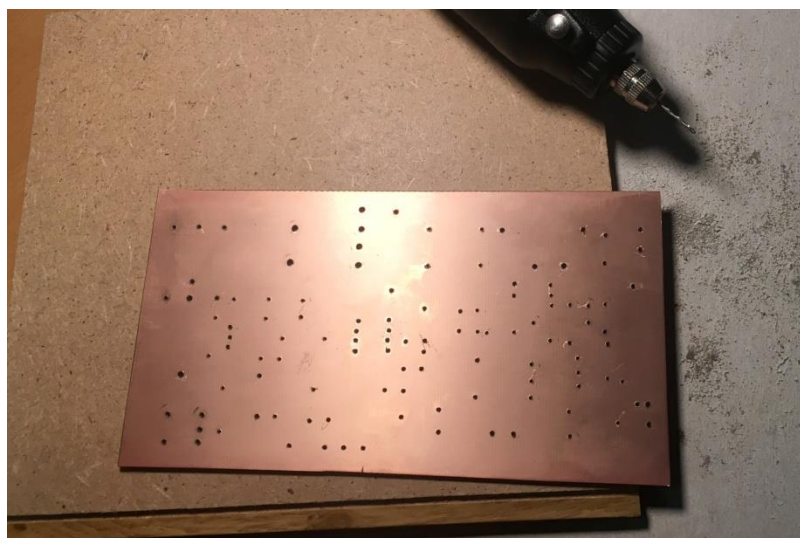
Průměr vodiče primárního vinutí  $d_1$ :

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \times S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,071}{\pi}} = 0,3 \text{ mm}$$

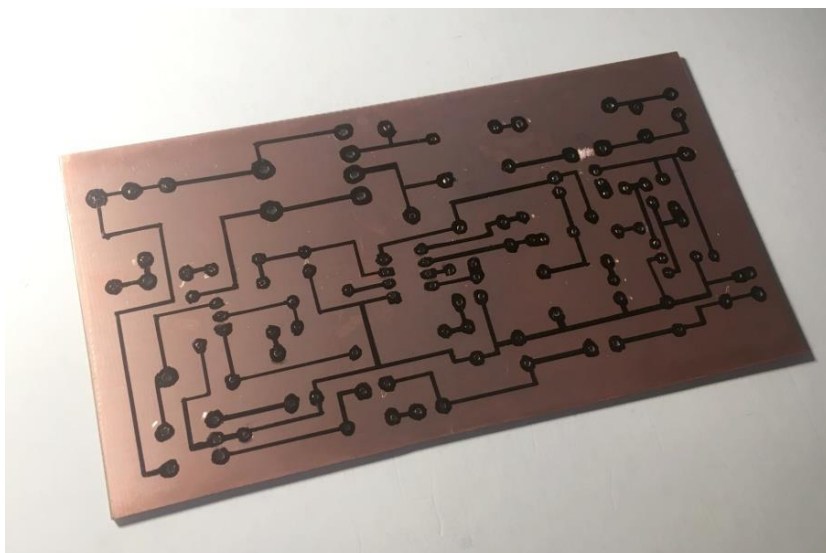
### Příloha C - fotografie výroby plošného spoje



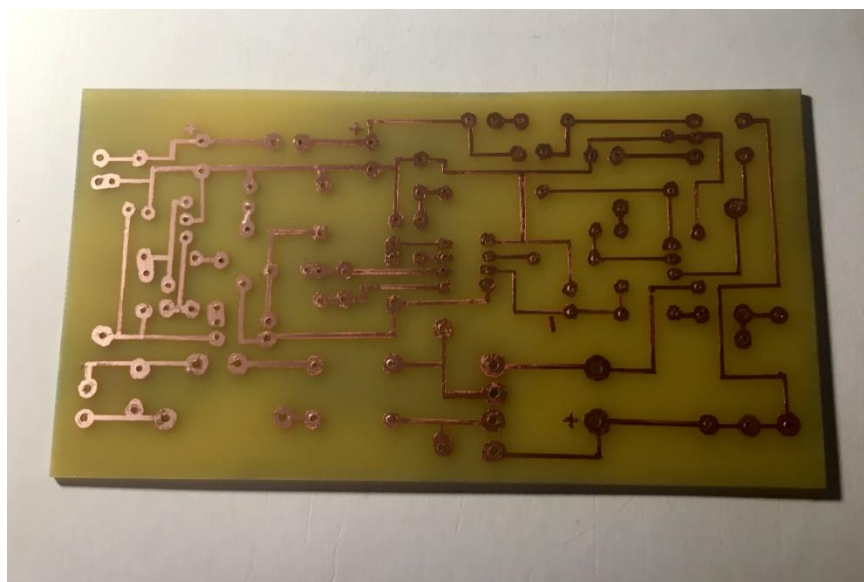
*DPS připravená k vyvrtání*



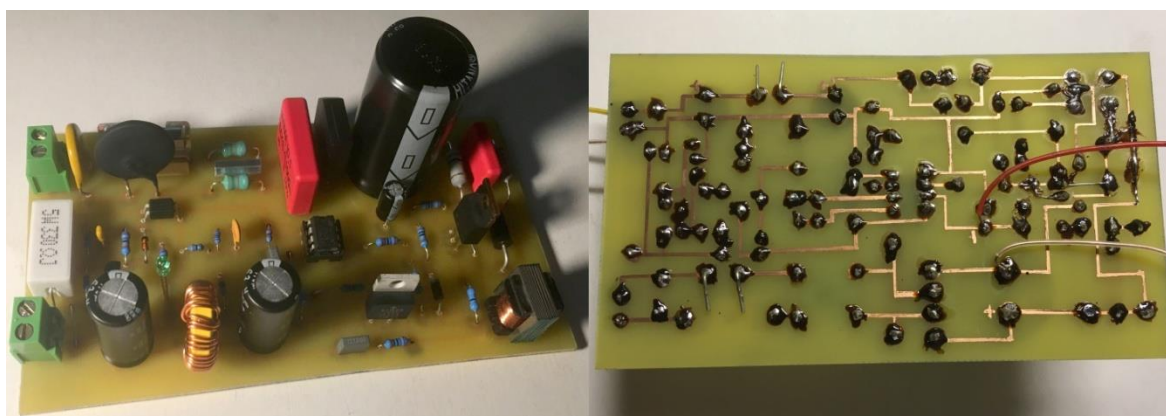
*DPS s vyvrtanými otvory pro součástky*



*DPS s přeneseným celým spojem připravená k vyleptání*



*Vyleptaná DPS*



*Hotový obvod z obou stran*