

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Regulátor dobíjení olověných akumulátorů pro
synchronní generátory malých výkonů
buzených permanentními magnety

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

**Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek STEJSKAL**
Osobní číslo: **E08B0112P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Regulátor dobíjení olověných akumulátorů pro synchronní generátory malých výkonů buzených permanentními magnety**
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. Zhodnoťte problematiku a možnosti použití synchronních generátorů a motorů malých výkonů s permanentními magnety.
2. Navrhněte vhodný regulátor dobíjení olověných akumulátorů, kde jako zdroj bude použit synchronní generátor s permanentními magnety. Regulátor bude obsahovat regulaci nabíjecího proudu, ochrany proti přetížení, přehřátí, přepólování akumulátoru a ochranu proti přepětí.
3. Sestavte funkční model regulátoru (konstrukční návrh, dimenzování součástí, sestavení + oživení zařízení, laboratorní ověření činnosti na skutečném stroji a otestování dosažených vlastností).
4. Zhodnoťte navržené zařízení, možnosti jeho využití, uveďte možnosti dalšího vylepšení či rozšíření.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Vondrášek, F.: Výkonová elektronika, Skripta ZČU Plzeň 2003
2. přednášky či skripta z doporučených předmětů, elektronické informační zdroje, katalogy
3. další dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Fořt, Ph.D.**

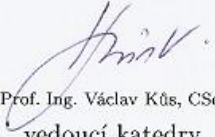
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **18. října 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Cílem této bakalářské práce je navrhnout regulátor dobíjení olověných akumulátorů, který bude napájen synchronním strojem buzeným permanentními magnety. Dále je zde zmíněno využití, rozdělení a vlastnosti těchto strojů, způsoby nabíjení olověných akumulátorů a možné způsoby regulace nabíjení.

Klíčová slova

Olověný akumulátor, regulátor dobíjení, paralelní regulátor, sériový regulátor, dvouhodnotová regulace, komparátor s hysterezí, generátor, synchronní motor

Annotation

Charging regulator for lead-acid batteries powered by low power synchronous generators excited by permanent magnets

Design of charging regulator for lead-acid accumulators powered by synchronous generators excited by permanent magnets is the objective of this thesis. Usage, categorisation and features of these motors/generators, ways of charging lead-acid accumulators and ways of charging regulation are mentioned.

Key words

Lead acid battery, charging regulator, parallel regulator, serial regulator, two valve regulator, comparator with hysteresis, generator, synchronous motor

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 2.6.2012

Marek Stejskal

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Fořtovi, Ph.D. za profesionální rady, věcné připomínky, tipy a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 SYNCHRONNÍ STROJE MALÝCH VÝKONŮ BUZENÉ PERMANENTNÍMI MAGNETY	11
1.1 STROJE S VNITŘNÍM ROTOREM	12
1.2 SYNCHRONNÍ STROJE S VNĚJŠÍM ROTOREM	13
1.3 DISKOVÉ SYNCHRONNÍ STROJE	15
2 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY	17
2.1 VLASTNOSTI A KONSTRUKCE	17
2.2 NABÍJENÍ	19
3 MOŽNOSTI KONSTRUKCE REGULÁTORU	21
3.1 PARALELNÍ REGULÁTOR	21
3.2 SÉRIOVÝ REGULÁTOR	22
3.3 ZVOLENÉ ŘEŠENÍ	23
4 NÁVRH	24
4.1 USMĚRŇOVAČ	25
4.2 PARALELNÍ REGULÁTOR MAXIMÁLNÍHO NAPĚTÍ	25
4.3 SÉRIOVÝ REGULÁTOR NABÍJECÍHO PROUDU	28
ZÁVĚR	35
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36
PŘÍLOHY	1

Úvod

V této bakalářské práci je nejprve zmíněna problematika a rozdělení synchronních strojů malých výkonů buzených permanentními magnety, jejich vlastnosti a použití. Dále jsou zde zmíněny vlastnosti olověných akumulátorů a způsoby jejich nabíjení. Následuje rozbor možností realizace regulátoru dobíjení, který by nejlépe vyhovoval pro napájení synchronními generátory.

V současnosti probíhá bouřlivý rozvoj v aplikacích synchronních strojů buzených permanentními magnety, díky čemuž klesá jejich cena a stávají se dostupnými i pro amatérská využití. Jedno z jejich použití jsou aplikace v generátorickém režimu, vzhledem k tomu, že odpadají problémy s regulací buzení a údržby komutátoru na rozdíl od stejnosměrných strojů nebo strojů s cizím buzením.

Právě z těchto důvodů je hlavním cílem návrh regulátoru dobíjení olověných akumulátorů, kde jako zdroj budou použity běžné levné synchronní stroje, které se používají zejména v modelářství.

Takovýto regulátor by měl vykazovat některé vlastnosti:

- Obsahovat ochrany proti přetížení, přehřátí přepětí a přepólování akumulátoru
- Nastavitelné maximální napětí na akumulátoru
- Nastavitelný nabíjecí proud
- Bezúdržbový automatický chod

V práci je uvedeno měření na reálném stroji, zhodnocení konstrukce a návrhy pro další zdokonalení konstrukce.

Seznam symbolů a zkratk

Kv	rychlostní konstanta motoru [ot.min ⁻¹ /U]
AGM	absorbed glass mat
PWM	pulse width modulation –pulzně šířková modulace
MOSFET	metal oxide semiconductor field effect transistor
OZ	operační zesilovač
Pb akumulátor	olověný akumulátor

1 Synchronní stroje malých výkonů buzené permanentními magnety

Synchronní stroje malých výkonů můžeme rozdělit dle konstrukce do několika kategorií:

- Stroje s vnějším rotorem –outrunner
- Stroje s vnitřním rotorem –inrunner
- Stroje s diskovým statorem

Společnými vlastnostmi jsou vysoká efektivita, poměr výkon/hmotnost, výkon/objem a jednoduchá konstrukce. Jako permanentní magnety se používají zejména neodymové magnety a samarium-kobaltové magnety. První z nich mají výhodu ve vysoké remanentní indukci a vysoké koerzivní síle, díky čemuž odolávají demagnetizaci. Jejich výroba je levnější než výroba samarium-kobaltových. Mezi nevýhody neodymových magnetů patří zejména nízká teplotní odolnost –Currieova teplota se pohybuje okolo 80 °C a náchylnost ke korozi. Z tohoto důvodu se neodymové magnety musejí pokovovat.

Samarium-kobaltové magnety jsou naproti tomu chemicky stálé, odolávají vyšším teplotám 250-350°C, avšak nemají tak vysokou remanentní indukci jako neodymové, navíc jsou dražší. Nevýhodou magnetů vyrobených ze vzácných zemin je také geopolitické rozmístění zdrojů. Cca 95% v současné době využitelných nalezišť se nachází v Číně, která na vývoz těchto surovin uvalila limity, což zvyšuje jejich cenu.

Nevýhodou permanentně buzených synchronních strojů je také to, že se chovají jako by měly velkou vzduchovou mezeru, vzhledem k tomu, že jejich μ_r se blíží nule. To způsobuje změkčení jejich VA charakteristiky.

Synchronní stroje malých výkonů neobsahují tlumicí vinutí, na rozdíl od velkých strojů. Jsou chlazeny vzduchem a jejich statorové vinutí je tvořeno lakovaným vodičem, případně jejich svazkem v magnetickém obvodu tvořeném dynamoplechy.

Synchronní stroje jsou v motorickém režimu napájeny pomocí frekvenčních měničů. Tyto měniče mohou motor ovládat skalárním, vektorovým nebo tzv. BLDC řízením.

U malých levných pohonů se nejčastěji používá BLDC řízení. Pokud není požadován točivý moment od nulových otáček, obejdou se tyto regulátory bez senzorů. BLDC řízení

však neumožňuje odbuzení pro dosažení vyšších otáček. Avšak probíhají experimenty s mechanickým odbuzováním pomocí vysouvání rotoru ze statoru viz. Solární vozidlo TIGA.

1.1 Stroje s vnitřním rotorem

Malé stroje s vnitřním rotorem mají z malých synchronních strojů nejvyšší efektivitu a poměr výkon/objem, což je předurčuje do aplikací, kde není dostatek volného místa.

Typickým použitím jsou gravírovací frézky a zubní mikromotorové vrtačky, kde synchronní stroje nahradily stejnosměrné motory. Typická mikromotorová zubní vrtačka má regulovatelné otáčky od 60-40000 ot/min, má vysoký krouticí moment a její otáčky jsou stálé. Její rozměry jsou srovnatelné s klasickou zubní vrtačkou-turbínkou, kterou, při použití vhodně zpřevodovaného nastavce (1:5), dokáže nahradit.



1-1 Zubní mikromotor zdroj: vlastní tvorba

Dále se tyto stroje používají k pohonu modelů automobilů, letadel a vrtulníků, kde poskytují násobný výkon oproti stejnosměrným motorům. Špičkový výkon motoru velikosti krabičky od filmu se pohybuje v řádu stovek wattů.



1-2 Inrunner zdroj: [5]

Výše vyobrazený motor má uveden špičkový příkon výkon 555W při hmotnosti 118g.

Tyto motory se však příliš nehodí pro generátorický režim pro běžné aplikace, jelikož mají vysoké KV-5000+. Jako generátory se využívají v plynových mikroturbínách, avšak toto použití je v současné době stále ještě experimentální.

Co se týká konstrukce těchto strojů, rotor je buď tvořen jednotným dílem, který je přímo zmagnetován, nebo jsou na něm nalepeny magnety. Stator tvoří buď listěný nebo ve speciálních případech feritový magnetický obvod, na kterém je navinuto vinutí. Tyto stroje se vyrábějí zejména v dvojpólovém nebo čtyřpólovém provedení.

1.2 Synchronní stroje s vnějším rotorem

Tyto synchronní stroje se používají k pohonu větších modelů letadel, lodí a vrtulníků, kde dokáží podávat vysoké výkony po relativně dlouhou dobu, díky tomu, že vzduch prochází rotorem přímo na statorové vinutí.



1-3 Outrunner zdroj:[5]

V posledních několika letech zažívají rozmach ve sportovním letectví, kde se začínají používat pro pohon kluzáků, motorových padákových kluzáků (powered paragliding) a ultralehkých letadel. Typickým příkladem je kluzák Pipistrel Taurus electro G2 s motorem o výkonu 30kw.



Obrázek 1-4 Pipistrel taurus electro G2 zdroj:[6]

Dále se používají jako přídavné motory pro elektrokola a pro pohon elektroskútrů, kde stator tvoří náboj kola a je zcela zapouzdřen v rotoru, na který je připevněn pomocí výpletu ráfek. Při použití v elektrických skútrech tvoří rotor z vnější strany přímo ráfek pro pneumatiku.



1-5 Motor přímo v ráfku zdroj:[7]

Na výše uvedeném obrázku je motor o výkonu 5kW.

U elektrokol mají tyto stroje nevýhodu v tom, že při rozjíždění a jízdě bez pomoci motoru způsobují jistý odpor a vibrace díky magnetostrikčnímu momentu.

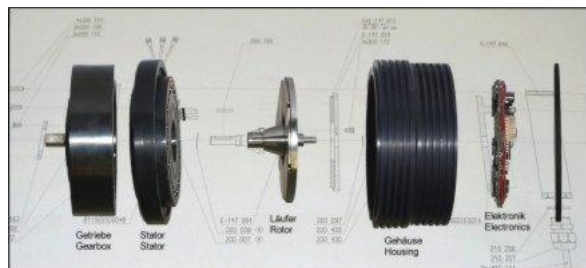
Malé synchronní stroje s vnějším rotorem jsou vhodné pro generátorický režim díky nižšímu KV-80-3000 –dle počtu pólů. Používají se jako generátory v malých větrných

elektrárnách, jako zdroje energie v závodních automobilech, některých motocyklech a leteckých motorech (Rotax 912).

Co se týká konstrukce, stator je tvořen izolovanými dynamoplechy, na kterých je navinuto vinutí. Ve středu statoru jsou umístěna ložiska, často jsou pouze vlisována do plechů. Na hřídeli je pomocí jedné nebo dvou uzavřených nebo otevřených bočnic připevněn rotor, který obíhá vně statoru. Rotor je tvořen magneticky vodivým materiálem, na kterém jsou zevnitř nalepeny permanentní magnety. Tyto stroje se zpravidla vyrábějí s vyšším počtem pólů.

1.3 Diskové synchronní stroje

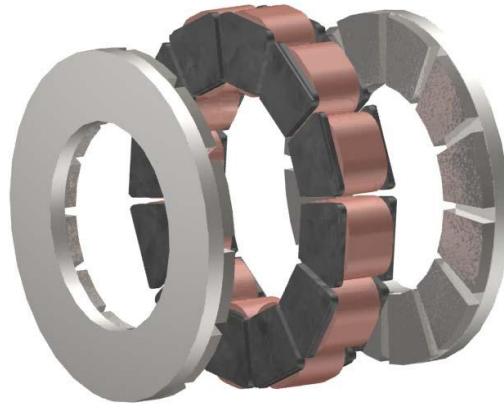
Diskové synchronní stroje mohou být ve dvou základních provedeních. Buď mohou být magnety umístěny na rotoru, který se nachází mezi pólovými nástavci statoru, přičemž jejich magnetický tok je orientován osově s hřídelí a vinutím umístěným na magnetickém obvodu ve statoru. Tyto motory mají nízký moment setrvačnosti, a proto se hodí pro aplikace, kde jsou nutné rychlé změny otáček.



1-6 Diskový motor s lehkým rotorem zdroj:[8]

Nebo jsou magnety umístěny v magnetickém obvodu v rotoru, který je tvořen dvěma disky z magneticky vodivého materiálu, mezi kterými je umístěno statorové vinutí zpravidla bez magnetického obvodu.

Diskové synchronní stroje jsou často stavěny amatéry, jelikož jejich konstrukce je velmi jednoduchá. Je možno například použít dva staré brzdové kotouče a pomocí epoxidové pryskyřice na ně nalepit magnety. Mezi kotouče se umístí statorové cívky zalité v pryskyřici.



1-7 Diskový motor bez mag. obvodu ve statoru zdroj: [9]

Takto zhotovené stroje se používají jako generátory pro amatérsky postavené větrné elektrárny, vodní elektrárny a jako generátory pro stabilní motory. Jejich výhodou je možnost velmi nízkého KV, díky čemuž není potřeba převodovky. Jejich výhodou je též nulový magnetostrikční moment díky absenci magnetického obvodu ve statoru.

2 Olověné akumulátory

2.1 Vlastnosti a konstrukce

Olověné akumulátory jsou již dlouhou dobu známým a spolehlivým zdrojem energie, který je využíván zejména ve staničních akumulátorech, záložních zdrojích a automobilech. Pb akumulátory můžeme označit jako ekologický zdroj energie díky snadné recyklaci s vysokou úspěšností (97% olověných akumulátorů je recyklováno).

Životnost a vlastnosti olověných akumulátorů ovlivňují zejména stav elektrolytu a míra sulfatace. Sulfatace je děj, při kterém dochází k tvorbě v elektrolytu nerozpustných látek, které zakrývají a znehodnocují elektrody článků. Tyto krystaly zvyšují vnitřní odpor článků, mají též větší objem, což může vést ke zkratu elektrod a tím k destrukci článku.

Sulfatace vzniká zejména při hlubokém vybití a přebíjení. Sulfataci lze odstranit pulzujícím nabíjecím proudem, nejlépe kdy se mezi nabíjecími pulzy z akumulátoru proud odebírá.

Z obecných vlastností je důležité maximální nabíjecí napětí, na které je možno akumulátor nechat trvale připojený. Pohybuje se mezi 13,4-14,4V u šestičláňového akumulátoru v závislosti na konstrukci. Maximální napětí, na které se akumulátor může nechat krátkodobě připojený, je 14,8V. Ideální nabíjecí proud by měl odpovídat desetině jmenovité kapacity v Ah. Pro nabíjení je též důležité, že při plném nabití, při maximálním nabíjecím napětí neteče do akumulátoru téměř žádný proud. Po odpojení nabíjecího zdroje klesá napětí akumulátoru rychle (v řádu desítek sekund) na hodnotu 13,2V a poté pomalu (v řádu minut) na 12,6V. Stav nabití akumulátoru je možno určit přesně dle hustoty elektrolytu nebo přibližně dle napětí naprázdno.

1 Stav nabití akumulátoru vs. napětí naprázdno zdroj:[10]

Stav nabití [%]	Napětí[V]
100	>12,6
70	12,4-12,54
50	12,24-12,18
25	11,88-12,18
0	<11,88

Olověné akumulátory můžeme dělit z několika hledisek, od kterých se odvíjí jejich vlastnosti.

Z hlediska údržby na údržbové a bezúdržbové.

Údržbové akumulátory se vyznačují inspekčními zátkami, kterými je možno doplňovat elektrolyt. V průběhu nabíjení/vybíjení vysokými proudy může baterie začít plynovat. Z elektrolytu se uvolňuje elektrolýzou kyslík a vodík. Tyto plyny jsou upouštěny přes zátky pryč z baterie. Díky unikajícím plynům v elektrolytu ubývá vody, kterou je třeba doplňovat.

Bezúdržbové akumulátory, na rozdíl od údržbových, nemají přístupné inspekční otvory. Každý článek baterie obsahuje ve víčku katalyzátor, který vzniklý vodík a kyslík rekombinuje opět na vodu. Článek je hermeticky uzavřený a nedochází k úbytku elektrolytu, pokud je akumulátor provozován v rámci výrobcem stanovených hranic. Pokud však dochází k přebíjení nebo zatěžování vysokými proudy, katalyzátor již nestíhá rekombinovat vzniklé plyny, které jsou následně vypuštěny pojistným ventilem mimo článek. Pokud dojde u bezúdržbových článků k úbytku elektrolytu, není možné jej doplnit. Proto jsou bezúdržbové akumulátory choulostivější než údržbové.

Z hlediska typu elektrolytu na zaplavené, AGM a gelové.

Zaplavené akumulátory jsou nejstarším typem konstrukce. Elektrolyt je v tekutém stavu mezi elektrodami. Tento typ má obecně nejhorší vlastnosti z olověných akumulátorů. Je závislý na poloze, při poškození elektrod může snadno dojít ke zkratu článku vzniklými usazeninami. Při nabíjení dochází k stratifikaci, což urychluje sulfataci článků. Díky rozvrstvení elektrolytu dle hustoty dohází k přebíjení/nadměrnému vybíjení spodních/horních částí elektrod. Pb akumulátory se zaplavenými elektrodami se vyskytují jak v provedení údržbovém tak bezúdržbovém. Používají se zejména v aplikacích, kde je rozhodující cena.

AGM (absorbed glass mat) akumulátory obsahují elektrolyt nasáklý ve tkanině ze skelných vláken. Každý článek je tvořen mnoha elektrodami oddělenými separátorem-skelnou tkaninou, ve kterém je nasáklý elektrolyt. Tyto články jsou bezúdržbové, mohou pracovat v jakékoli poloze, mají vyšší kapacitu při zachování hmotnosti než akumulátory se zaplavenými elektrodami. Nedochází u nich ke zkratu elektrod, jelikož elektrody jsou odděleny separátorem. Trpí méně sulfatací, jelikož nedochází ke stratifikaci elektrolytu. Pro elektrody se používá olovo s dotací antimonu nebo s dotací vápníku, kvůli zvýšení pevnosti elektrod. Akumulátory s elektrodami dotovanými antimonem mají maximální nabíjecí napětí 13,8V a obecně horší vlastnosti a vyšší samovybíjení. Akumulátory s anodou nebo anodou i

katodou dotovanou vápníkem mají malé samovybíjení, vyšší životnost a vyšší maximální nabíjecí napětí až 14,4V. Tyto akumulátory se využívají zejména v letectví a dalších aplikacích, kde je důležitá co nejmenší hmotnost, spolehlivost a dlouhá životnost.

Gelové akumulátory mají elektrolyt ve formě gelu tvořeném běžným elektrolytem a SiO₂. Tyto akumulátory mají podobné vlastnosti jako AGM akumulátory, avšak dosahují ještě lepších parametrů. Jejich velká výhoda spočívá v malém vnitřním odporu a vysokém maximálním vybíjecím proudu, proto se hodí pro použití v letectví, pomocných startovacích zdrojích a dalších aplikacích, kde je důležitý vysoký vybíjecí proud a malé rozměry a hmotnost akumulátoru. Jejich nevýhodou je malá odolnost proti přebití a špatně snášejí vysoký nabíjecí proud. Při šestičlankové baterii mají obvyklé maximální nabíjecí napětí 13,8-14,4V dle konstrukce.

Z hlediska použití na startovací, trakční a záložní.

Startovací akumulátory jsou konstruovány zejména pro poskytování vysokého proudu (10-20x vyššího než je kapacita akumulátoru) po krátkou dobu. Tyto akumulátory se nehodí pro cyklické a hluboké vybíjení. Mají obvykle při stejné hmotnosti menší kapacitu než trakční nebo záložní akumulátory díky robustnější konstrukci elektrod.

Trakční akumulátory jsou konstruovány s ohledem na cyklické a hluboké vybíjení. Mohou být však snadno poškozeny vysokým vybíjecím/nabíjecím proudem kvůli agilnějším elektrodám, které se v důsledku zahřátí zkroutí.

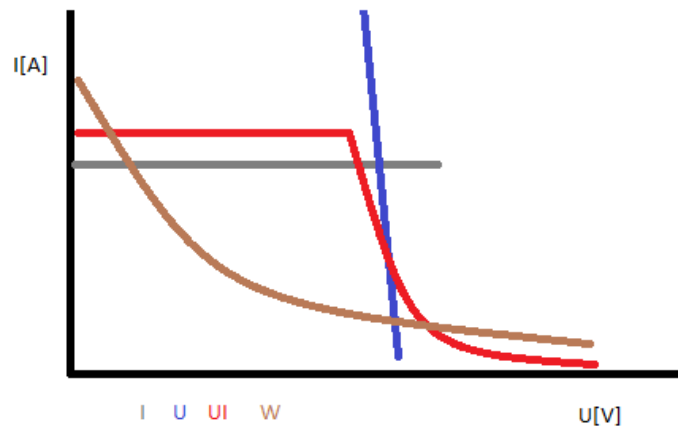
Záložní akumulátory jsou konstruovány s ohledem na maximální životnost a bezúdržbovost v nabitém stavu.

2.2 Nabíjení

Z výše uvedených vlastností vyplývá, že regulátor nabíjení musí obsahovat nastavitelné omezení maximálního napětí akumulátoru na 13,4-14,8V a regulaci nabíjecího proudu.

Existuje několik základních charakteristik nabíjení olověných akumulátorů:

- U-konstantním napětím
- I-konstantním proudem
- UI-zpočátku konstantním proudem, které přejde v nabíjení konstantním napětím
- W- měkká charakteristika



2-1 Charakteristiky nabíjení zdroj:vlastní tvorba

Při použití charakteristiky U se akumulátor nabíjí tvrdým zdrojem napětí. Toto má za následek vysoký počáteční nabíjecí proud, který by mohl zkrátit životnost akumulátoru. Při správné velikosti zvoleného napětí se akumulátor nemůže přebít a tak se může k nabíječce nechat nepřetržitě dlouho připojený.

Při použití charakteristiky I se akumulátor nabíjí tvrdým zdrojem proudu. Při správně zvoleném proudu nemůže dojít k poškození nebo zkrácení životnosti akumulátoru vlivem nadměrného nabíjecího proudu, avšak je nutné po určitém čase/dosažení určitého napětí akumulátor odpojit, jinak by mohlo dojít k jeho poškození přebíjením.

Při použití charakteristiky UI dochází k nabíjení nejprve konstantním proudem s omezením maximálního napětí akumulátoru, což má za následek snížení nabíjecího proudu až k nule. Akumulátor tak nemůže být poškozen nadměrným nabíjecím proudem nebo přebitím.

Při použití charakteristiky W dochází k nabíjení měkkým zdrojem napětí, konkrétní vlastnosti jsou závislé na způsobu provedení.

Dále je možné akumulátor nabíjet různými dalšími kombinacemi výše uvedených charakteristik, nebo použít různě modulovaného nabíjecího proudu.

Z výše uvedených možností se mi jeví nejideálnější nabíjení charakteristikou UI vzhledem k tomu, že je šetrná k akumulátoru a zároveň je možno nechat akumulátor připojený k nabíječce nepřetržitě dlouhou dobu.

3 Možnosti konstrukce regulátoru

Regulátor dobíjení je možno realizovat několika způsoby – jako paralelní regulátor, sériový regulátor, přičemž obě možnosti lze realizovat jak pulzně, tak lineárně. Je možné regulátor postavit pouze za pomoci diskrétních součástek, nebo použít speciální integrované obvody, případně použít pro řízení mikroprocesor.

3.1 Paralelní regulátor

Paralelní regulátor se zapojuje paralelně ke zdroji, přičemž pokud zdroj dodává více regulované veličiny, regulátor začne mařit dodávanou energii na výkonovém odporu, přímo na vnitřním odporu zdroje, nebo u malých výkonů přímo na výkonovém prvku – tranzistoru nebo zenerově diodě. Z výše uvedeného vyplývá, že tato regulace je značně ztrátová.

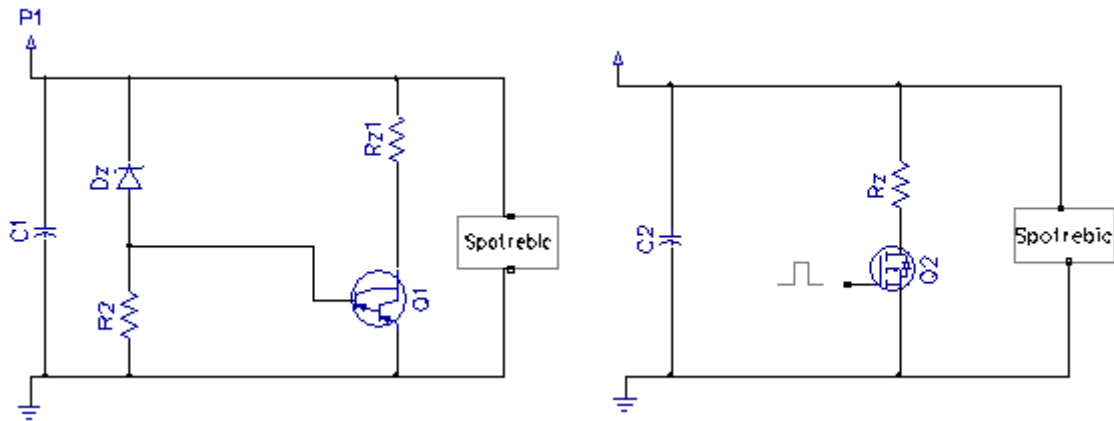
Paralelní regulátor je možno realizovat lineárně. Zejména u malých výkonů se jedná o tranzistor, který může být doplněn v sérii s odporem, případně zenerovu diodu s předřadným rezistorem. U lineárního regulátoru dochází vždy k maření značné části energie na aktivním prvku (tranzistoru). Takovýto regulátor je značně limitován maximálním ztrátovým výkonem polovodiče.

V případě pulzně řízeného regulátoru je v sérii s aktivním prvkem zařazen vždy rezistor, na kterém se energie ze zdroje maří. Aktivní prvek přitom spíná proud do rezistoru vždy, když regulovaná veličina přesáhne stanovenou mez. Spínání aktivního prvku můžeme realizovat buď dvouhodnotovým regulátorem (komparátor s hysterezí) nebo pomocí PWM modulace.

Na spínacím prvku vznikají pouze spínací ztráty a ztráty na vnitřním odporu spínacího prvku, který však bývá velmi malý, a tak ztráty v zapnutém stavu bývají v porovnání se spínacími ztrátami mnohem menší. Tento způsob regulace umožňuje využití mařené energie například pro ohřev teplé užitkové vody, pokud je jako mařící rezistor využita topná spirála.

Paralelní regulátory se využívají zejména pro malé výkony, kde se příliš nehledí na ztráty, například pro napájení nízkoodběrových zařízení, jako zdroje referenčních napětí apod.

Paralelní regulátory vyšších výkonů se využívají zejména na regulaci napětí měkkých zdrojů, například magnet a alternátorů motocyklových motorů buzených permanentními magnety, kde se hledí zejména na robustnost, spolehlivost a nízké výrobní náklady. Další možné využití je pro maření přebytečné energie například v elektrické trakci, kde se používají k omezení maximálního napětí při rekuperačním brzdění když na troleji není souprava, která by rekuperovanou energii odebrala.



3-1 Lineární a pulzní paralelní regulátor

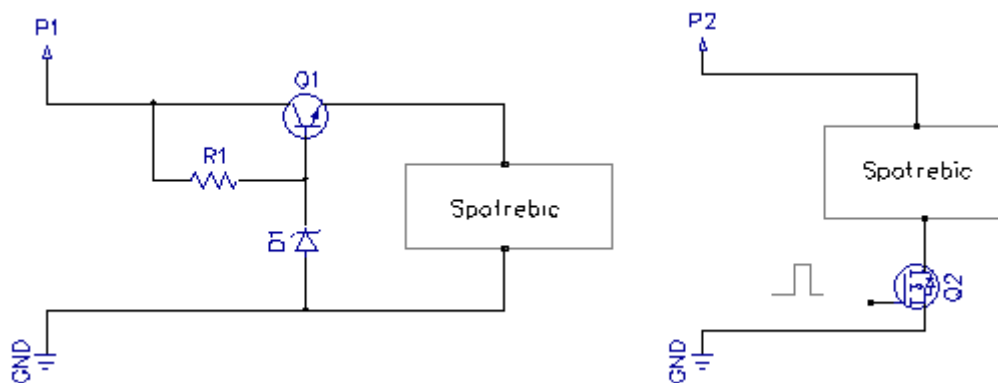
3.2 Sériový regulátor

Sériový regulátor je zapojen v sérii se zdrojem. Může být realizován lineárně nebo pulzně. V případě, kdy je zdroj energie střídavý, je možno regulátor realizovat s fázovým řízením nebo jako pulzní usměrňovač.

V případě lineárního stabilizátoru dochází k vysokým ztrátám na aktivním prvku, obzvlášť pokud je napětí zdroje znatelně vyšší než požadované, proto se lineární stabilizátor hodí spíše pro aplikace, kde účinnost stabilizace není rozhodujícím kritériem.

Pulzní regulátory je možné realizovat několika různými způsoby pomocí různých topologií. Zmínil bych zde zejména blokující pulzní měnič kvůli jeho jednoduché konstrukci a možnosti řízení jak dvouhodnotově, tak pomocí PWM. Jeho výhoda tkví zejména ve vysoké účinnosti a absenci transformátoru.

Dále je možno regulaci realizovat pomocí řízeného můstkového usměrňovače s tyristory nebo pulzního můstkového usměrňovače s MOSFET nebo IGBT tranzistory, kdy se tyristory řídí fázovým řízením a tranzistory se řídí pomocí PWM.



3-2 Lineární a blokující sériový stabilizátor

3.3 Zvolené řešení

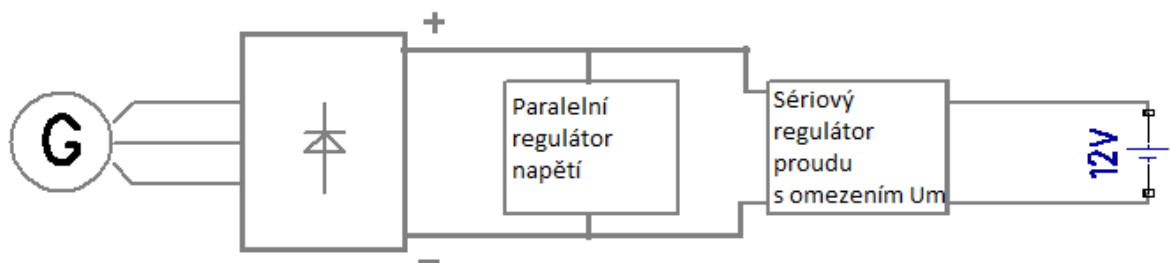
Co se týká požadavků na regulaci, je nutné zajistit, aby se maximální napětí na akumulátoru pohybovalo v řádu desetin voltů okolo nastavené hodnoty. Regulace dobíjecího proudu by měla zajistit omezení nabíjecího proudu do akumulátoru, aby nedocházelo k jeho nadměrnému opotřebení, a zajistit ochranu regulátoru před přetížením.

Vzhledem k tomu, že jako zdroj energie bude použit malý synchronní motor buzený permanentními magnety, díky čemuž se nebude chovat jako ideálně tvrdý zdroj napětí, který nebude pracovat v konstantních otáčkách, je nutno zajistit ochranu proti vysokému napětí.

Z tohoto důvodu jsem se rozhodl použít kombinaci pulzního paralelního regulátoru napětí a sériového blokujícího regulátoru proudu. Paralelní regulátor bude sloužit k omezení maximálního napětí zdroje (synchronního stroje) a tím i umožní omezení jeho maximálních otáček. Sériový regulátor bude sloužit k regulaci proudu do akumulátoru, přičemž bude do něj vložena regulační smyčka pro omezení maximálního napětí akumulátoru.

Oba regulátory hodlám řídit pomocí dvouhodnotové regulace.

Regulátor dobíjení hodlám realizovat bez použití mikroprocesoru a speciálních integrovaných obvodů pro nabíjení.



3-3 Blokové schéma regulátoru dobíjení

4 Návrh

Regulátor bude napájen osmipólovým motorem Turnigy SK3374 170, který je použit jako generátor poháněný upraveným jízdním kolem na rotoped recumbentového typu (lehokolo).

Tento motor má dle informací výrobce maximální proud 100A při napětí 48V. I přes relativně nízké $KV=170$, bylo nutné pohon motoru převodovat do rychla. Rozeta na náboji má 48 zubů, pastorek na náboji zadního kola 14 zubů, rozeta na náboji zadního kola 78 zubů a pastorek na motoru 6 zubů. Celkový převodový poměr je 1:41,6.



4-1 Připojení motoru k rotopedu



4-2 Detail připojeného motoru

Vzhledem k tomu, že dlouhodobý výkon člověka dle fyzické kondice nepřesahuje hodnotu 150W, regulátor nabíjení by měl být schopen zvládnout přenést výkon tento výkon po neomezenou dobu, a výkon 300W krátkodobě. Sice se udává, že výkon trénovaného člověka může dosáhnout krátkodobě až 1kW, to však v případě lehokola není možné, jelikož se nedá „postavit do pedálů“.

Jako akumulátor budou použity dvě starší 12V autobaterie o kapacitě 45 a 55 Ah spojené paralelně. Toto použití autobaterií není ideální proto, že jsou konstruovány na podávání krátkodobého špičkového výkonu, avšak nikoli pro cyklickou zátěž. Tyto baterie však byly v době testování jediné k dispozici.

Jako první hodlám zkonstruovat paralelní regulátor napětí, následně zjistit maximální hodnoty proudu a napětí, které je generátor schopen dodávat, a dle výše zmíněného navrhnout regulátor proudu, a poté do něj vložit smyčku pro regulaci max. napětí akumulátoru.

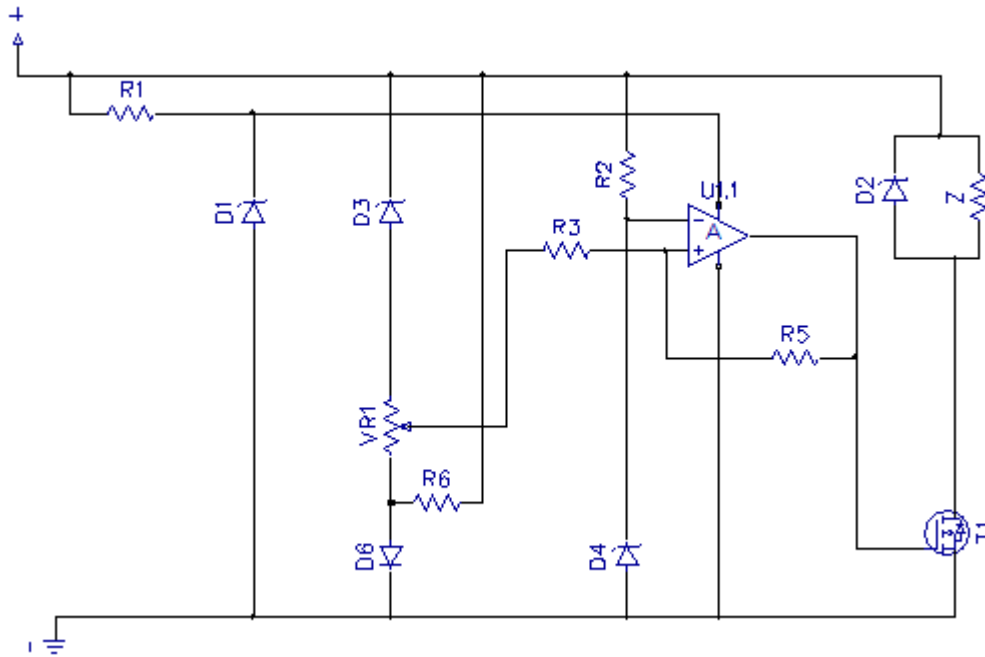
4.1 Usměrňovač

Pro usměrnění jsem zvolil třífázový můstkový usměrňovač sestavený ze schottkyho diod. Schottkyho diody jsem zvolil zejména kvůli nízkému úbytku napětí a také kvůli rychlosti, jelikož generátor bude produkovat proud o frekvenci až 400 Hz.

Pro usměrňovač jsem zvolil diody MBR1560 CT, jejichž maximální napětí je 60V a proud 30A, což je více než dostatečné. Pro omezení napěťových špiček vlivem rozpínání proudu je na výstup usměrňovače zařazen elektrolytický kondenzátor 470 μ F.

4.2 Paralelní regulátor maximálního napětí

Paralelní regulátor napětí hodlám realizovat pulzně, pomocí N-MOSFET tranzistoru, který bude spínat proud do mařící zátěže Z. Tranzistor bude řízen komparátorem s hysterezí. Velikost hystereze, a tím i zvlnění, hodlám upravit dle měření tak, aby nevznikaly zbytečné ztráty na výkonovém tranzistoru a aby generátor neprodukoval zbytečný hluk.



4-3 Schéma paralelního regulátoru

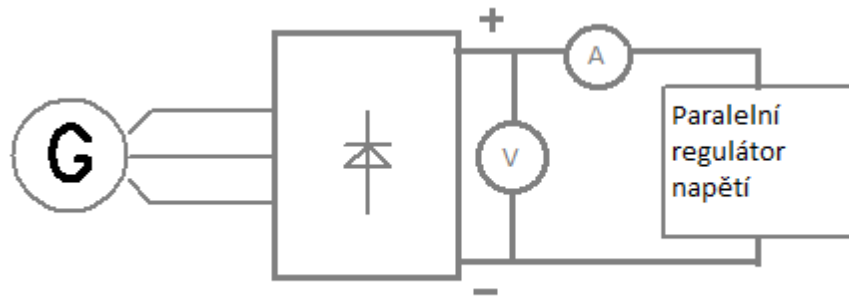
Na výše uvedeném schématu je zobrazen návrh.

Rezistor R1 100 Ω tvoří se zenerovou diodou D1 stabilizátor napětí na 10V pro OZ. Jako operační zesilovač jsem použil TL082 CN kvůli jeho vysoké rychlosti přeběhu (13V/ μ s) a současně nízké ceně. OZ společně s rezistory R3 a R5 tvoří neinvertující komparátor s hysterezí. Velikost R5 jsem zvolil 21k Ω – velikost v řádu desítek kiloohmů kvůli nízkému odběru proudu na vstupu komparátoru (R3). R3 jsem zvolil 3,9k Ω – viz dále. R2 -1k Ω společně se zenerovou diodou D4 tvoří napěťovou referenci 3,6V.

Zenerova dioda D3 slouží k posunutí hladiny snímaného napětí o 8,2V níže. Pomocí potenciometru VR1 se nastavuje velikost regulovaného napětí, jeho velikost jsem zvolil 5k Ω . Dioda D6 omezuje minimální nastavené napětí na 0,7 V, kvůli tomu, že OZ není rail-to-rail. Odpor R6 1k Ω zajišťuje, že i při nízkém napájecím napětí, kdy přes D3 a VR1 neteče proud, je napětí na D6 0,7V

Tranzistor T1 je N-MOSFET IRF 3205, který je zvolen kvůli nízkému Ron.

Z je zátěž, na které se maří přebytečná energie, její velikost-viz. dále. Schottkyho dioda D2 MBR1560 CT slouží k zamezení napěťových špiček kvůli indukčnosti zátěže.



4-4 blokové schéma měření

Po sestavení obvodu regulátoru jsem jej nejprve bez zátěže připojil k stabilizovanému zdroji napětí, kde jsem na regulátoru pomocí VR1 nastavil maximální hodnotu napětí 13V.

Následně jsem jej připojil k 3f můstkovému usměrňovači, který byl připojen ke generátoru.

Zátěž by měla mít takovou velikost, aby při minimálním nastaveném napětí byla schopna vést proud vyšší než je maximální proud dodávaný generátorem a současně byla schopna zmařit maximální výkon generátoru bez přehřátí.

Jako zátěž jsem používal 12V autožárovky 55W. Jako optimální se jevilo použití pěti těchto žárovek, jelikož při jakékoli intenzitě šlapání nedocházelo k plnému svitu, a regulátor byl schopen udržet nastavené napětí, což značí rezervu ve výkonu zátěže.

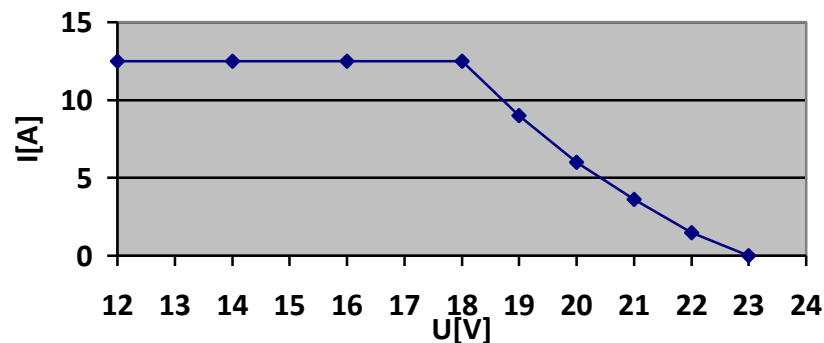
Následně jsem volil velikost rezistoru R3 tak, aby nedocházelo ke zvýšenému hluku generátoru a současně k zvýšenému zahřívání výkonového tranzistoru. Jako optimální se jeví odpor 3,9kΩ. Potom velikost hystereze odpovídá 1,55V, což je též hodnota zvlnění napětí.

Poté jsem změřil VA charakteristiku generátoru, přičemž generátor jsem poháněl vlastní největší silou, kterou jsem dokázal vyvinout. Na regulátoru napětí jsem nastavoval napětí od 12V.

2 VA charakteristika generátoru

VA charakteristika generátoru									
U[V]	12	14	16	18	19	20	21	22	23
I[A]	12,5	12,5	12,5	12,5	9	6	3,6	1,5	0

VA charakteristika



4-5 Graf VA charakteristiky generátoru

I při nejvyšší intenzitě šlapání byl změřený maximální proud, který generátor produkoval, 12,5A. Jelikož při šlapání docházelo ke kolísání proudu během jedné otáčky šlapek vlivem působení různé síly (toč. momentu) v různých částech otáčky šlapek, nebylo možné odečíst konkrétní přesnou hodnotu proudu z A-metru. Proto jsou hodnoty v tabulce odhadnuté střední hodnoty. Například pro napětí 12-18V kolísal proud v různých částech otáčky šlapek mezi 12 a 13A, proto je uvedena hodnota 12,5A. Maximální proud je dán zejména převodováním do rychla-nebyl jsem schopen vyvinout vyšší točivý moment.

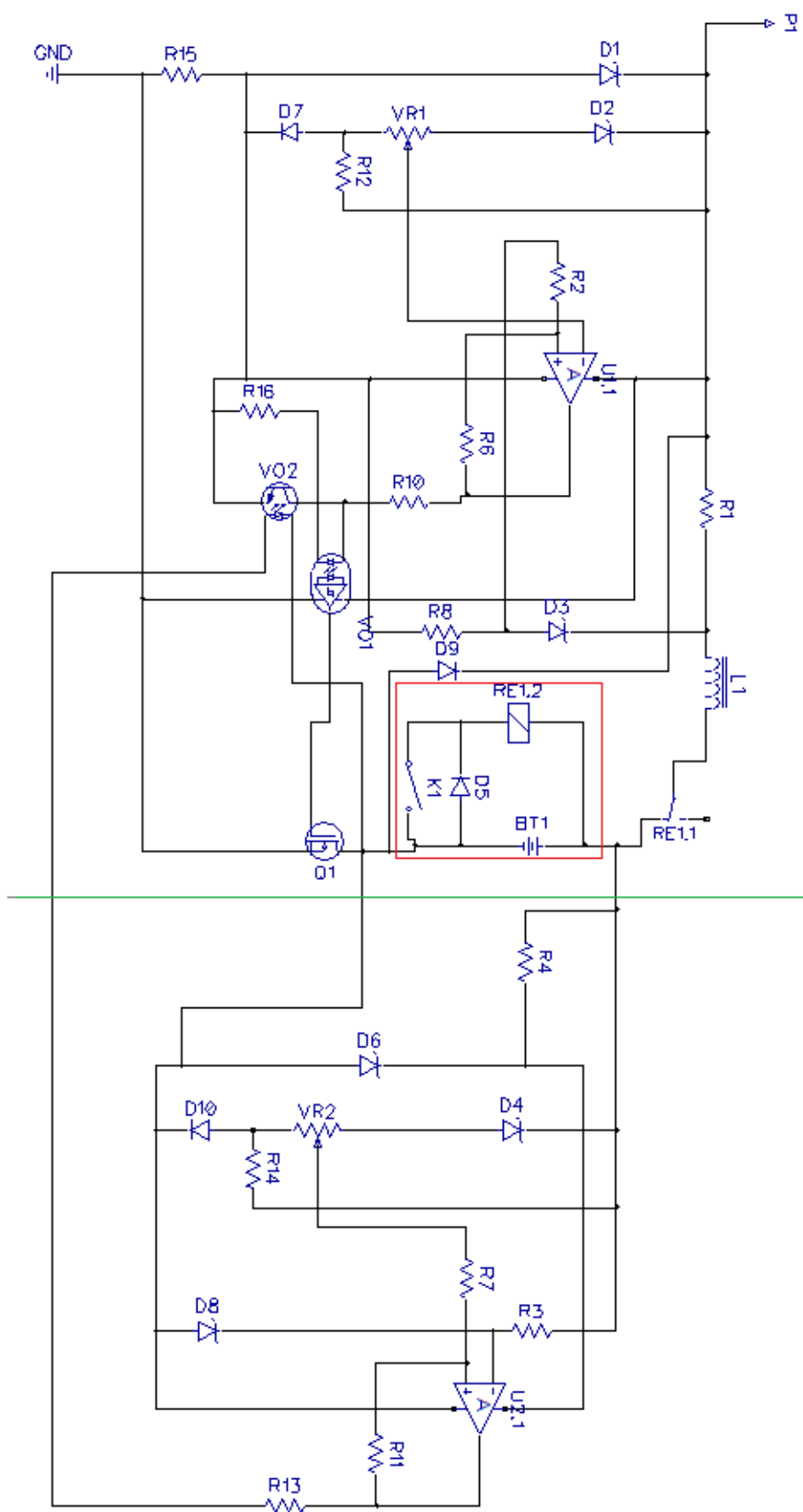
Poté jsem změřil napětí naprázdno za usměrňovačem při co nejrychlejším šlapání, které mělo hodnotu 23V. Z výše naměřených hodnot vychází, že regulátor proudu musí být schopen dlouhodobě přenést proud o velikosti 12,5A a snést maximální vstupní napětí 23V.

Subjektivně, z výše uvedeného měření, se tento regulátor maximálního napětí chová též jako vhodný regulátor otáček. Při nastaveném určitém napětí jsou otáčky nezávislé na síle šlapání, takže je možné při dané rychlosti šlapání používat jakoukoli sílu a o rychlost se nestarat. Z výše uvedeného vyplývá, že se tento regulátor chová současně jako ochrana proti přepětí způsobeného vysokými otáčkami generátoru.

4.3 Sériový regulátor nabíjecího proudu

Sériový regulátor jsem se rozhodl realizovat pomocí OZ zapojeného jako komparátor s hysterezí. Vzhledem k snadnější dostupnosti a nízkému R_{on} jsem se jako spínací prvek rozhodl použít N-MOSFET IRF3205 tranzistor. Dále jsem chtěl regulátor zkonstruovat tak, aby nebylo zapotřebí souměrného napájení OZ, a tím i nutnosti použití měniče napětí pro OZ.

Regulátor proudu by měl též obsahovat omezení maximálního napětí akumulátoru a to v rozmezí 13,8-14,8V dle konstrukce akumulátoru a obsahovat ochranu proti přepólování akumulátoru, přetížení, přehřátí a zkratu.



4-6 Schéma sériového regulátoru proudu s omezením maximálního napětí baterie

Výše uvedené schéma zobrazuje regulátor proudu v levé (horní) části, omezení maximálního napětí akumulátoru v pravé (spodní) části. Červeně je označena baterie s ochranou proti přepólování a tepelnou ochranou výkonových prvků.

Regulátor proudu je řešen komparátorem s hysterezí, který je tvořen operačním zesilovačem TL082CN a rezistory R6 150Ω-viz. dále a R2 21kΩ. R2 jsem volil v řádu desítek kiloohmů, aby nebyl příliš zatěžován vstup komparátoru (na R6) Regulátor je napájen přes zenerovu diodu D1 10V a rezistor R15 100Ω, které tvoří stabilizátor v záporné větvi. Zenerova dioda D2 3,6V tvoří společně s potenciometrem VR1 5kΩ nastavitelný zdroj referenčního napětí. Dioda D7 společně s R12 zajišťuje, aby v každém případě bylo napětí na invertujícím vstupu OZ alespoň o 0,7V vyšší než jeho záporné napájení, jelikož OZ TL082CN není typu rail-to-rail.

Rezistor R1 50mΩ je použit k snímání proudu vedoucího do akumulátoru. Zenerova dioda D3 3,6V spolu s R8 1kΩ slouží k posunutí hladiny snímaného napětí za rezistorem R1 o 3,6V níže, které je připojeno na vstup komparátoru- R2. Na výstup OZ je připojen integrovaný budič MOSFETů VO1, který je tvořen optočlenem. Jedná se o typ TLP250, který jsem zvolil z důvodu dostupnosti. LED optočlenu je připojena přes R10 na výstup OZ a přes R16 na stabilizované záporné napájecí napětí. Paralelně k LED VO1 a rezistoru R16 je připojen fototranzistor optočlenu VO2, který v případě sepnutí svede proud z výstupu OZ a tím zamezí sepnutí VO1.

Napájení VO1 je připojeno přímo na kladný a záporný pól napájecího napětí. Výstup VO1 je zapojen přímo na gate spínacího MOSFETu Q1 IRF 3205.

V sérii s rezistorem R1 je zapojena cívka L1 100μH, rozpínací kontakt relé RE1 a nabíjená baterie. Dioda D9- schottkyho dioda MBR1560 CT slouží pro uzavření proudu naindukovaného v L1 při rozepnutí tranzistoru Q1.

Indukčnost L1 jsem zvolil 100μH DPU100A10. Tuto indukčnost jsem zvolil, jelikož je běžně dostupná v prodejnách GES a je schopná vést proud 10A. Následně jsem hledal přibližnou velikost hystereze tak, aby za nejhorších okolností, tj. nastavený nabíjecí proud o velikosti 12,5A a napájecí napětí 19V a akumulátor vybitý na 10V, byla spínací frekvence okolo 10kHz. Tuto frekvenci jsem zvolil proto, jelikož dle datasheetu je maximální frekvence budiče TLP250 25kHz. Pomocí simulace v LTspice jsem zjistil, že zvlnění proudu je při této frekvenci cca 3,5A.

Parametry simulace: L1 100 μ H sériový odpor 45m Ω –ohmický odpor cívky

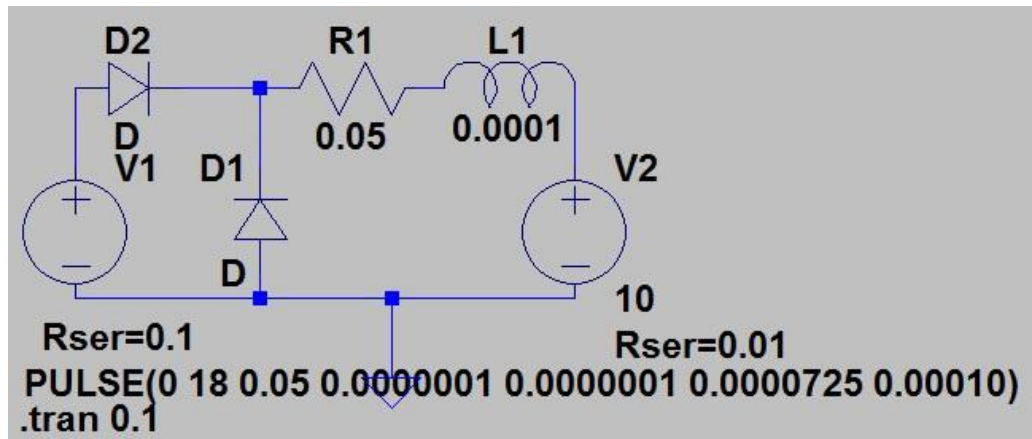
R1-snímací rezistor 50m Ω

V2-zdroj napětí zastupující vybitý akumulátor 10V sériový odpor 10m

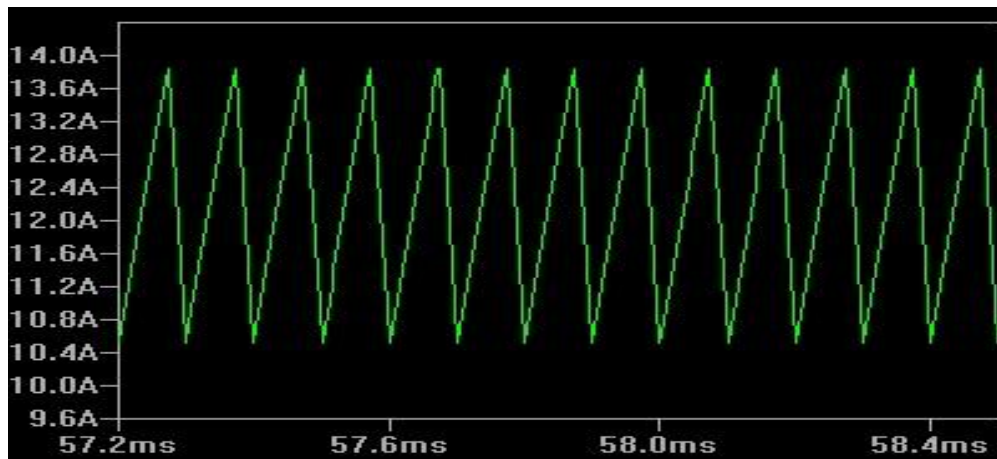
V1- zdroj napětí zastupující generátor s usměrňovačem 18V sériový odpor 0,1 perioda 0,1ms Ton0,0725 ms.

D-zpětná dioda

D1- dioda slouží pouze pro účely simulace



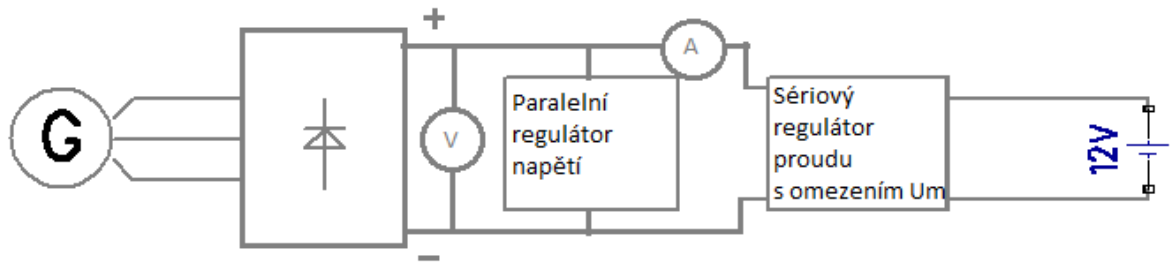
4-7 Schéma simulace



4-8 Průběh proudu R1

Sériový (vniřní) odpor zdroje V1 jsem zvolil 0,1 Ω . Tato hodnota by měla respektovat celkový vnitřní odpor generátoru, usměrňovače, regulátoru proudu a též transformaci mechanické části pohonu včetně šlapající osoby. Získat tuto hodnotu exaktně není reálné.

Při zvlnění proudu 3,5A hystereze odpovídala úbytku napětí na R1, což bylo 0,175V. Pro tuto hysterezi je potřebný R2 370 Ω .



4-9Blokové schéma měření

Následně jsem sestavil regulátor nabíjecího proudu bez omezení max. napětí. Poté jsem připojil vybitý akumulátor k regulátoru proudu a regulátor připojil ke generátoru s usměrňovačem. Poté jsem začal pohánět regulátor různou intenzitou šlapání, při nastavení různého nabíjecího proudu a sledoval jsem, jestli se spínací tranzistor nadměrně nezahřívá. Poté jsem měnil R_2 v rozmezí 50 až 500 ohmů. Jako ideální se jevila hodnota 200Ω , při které vydával generátor nejmenší hluk a výkonový tranzistor se pouze lehce zahříval na malém chladiči. Hystereze potom byla 0,094V a zvlnění proudu 1,8A.

Regulátor proudu byl během zkoušení schopen spolehlivě regulovat proud od 2A do maximálního proudu, který byl generátor chopen dodat -12,5A.

Pro omezení maximálního nabíjecího napětí baterie slouží regulátor zobrazený v pravé části schématu. Tento regulátor je tvořen OZ TL082CN zapojeným jako komparátor s rezistory R_7 250R a R_{11} 21K. Hodnotu R_{11} jsem volil v řádu desítek kiloohmů tak, aby byl proud na vstupu komparátoru s hysterezí (R_7) malý. Rezistor R_7 jsem zvolil tak, aby hystereze byla přibližně 0,12V, což zajistí, že omezení napětí bude jen minimálně ovlivněno zvlněním nabíjecího proudu a tím i zvlněním napětí akumulátoru. Vzhledem k chování akumulátoru po odpojení nabíjecího napětí –viz kapitola 3.1. hystereze omezovače napětí není na škodu. Pokud bychom chtěli desulfanovat nabíjený akumulátor, můžeme paralelně k němu připojit např. 12V 5W žárovku.

Přestože TL082CN obsahuje dva OZ, bylo nutné použít pro omezení maximálního nabíjecího napětí baterie samostatný OZ napájený přímo z nabíjeného akumulátoru, jelikož dle spínání Q_1 kladný i záporný pól akumulátoru mění svůj potenciál oproti kladnému i zápornému pólu usměrňovače. Rezistor R_3 1K spolu se zenerovou diodou D_8 3,6V slouží jako zdroj referenčního napětí pro neinvertující vstup OZ.

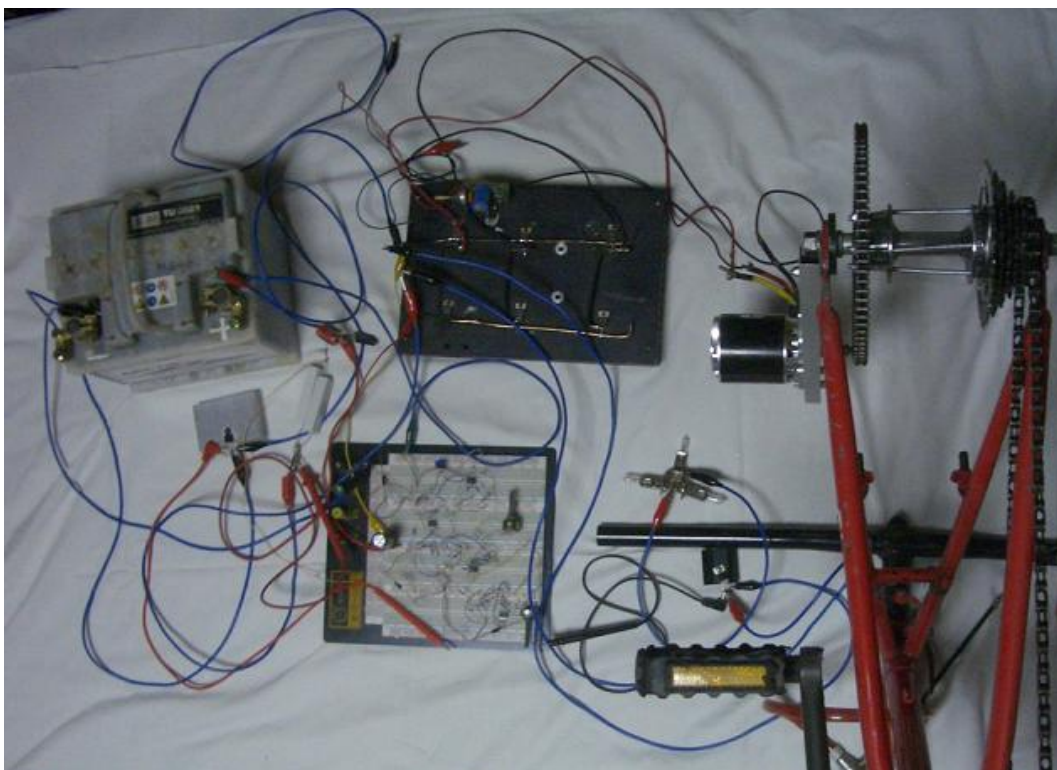
Rezistor R_4 20Ω spolu se zenerovou diodou D_6 10V slouží ke stabilizaci napájecího napětí. Snímané napětí baterie je přivedeno na potenciometr VR_2 $1k\Omega$ přes zenerovu diodu D_4 9,1V, která snižuje jeho hladinu o 9,1V. Potenciometr je dále připojen přes diodu D_{10}

na záporný pól akumulátoru. D10 spolu s R14 $1k\Omega$ zajišťuje, že minimální napětí na vstupu komparátoru bude alespoň o 0,7V vyšší než záporné napájecí napětí OZ, což je nutné vzhledem k tomu, že se nejedná o rail-to-rail operační zesilovač. Rezistor R13 500Ω slouží k omezení proudu pro LED optočlenu VO2.

Po sestavení omezovače maximálního napětí baterie jsem jej nejprve připojil na laboratorní zdroj napětí 13,8V a pomocí potenciometru VR2 jsem nastavil hranici sepnutí optočlenu právě na 13,8V. Následně jsem jej připojil do obvodu regulátoru nabíjecího proudu, na kterém byl nastaven nabíjecí proud 10A, spolu s nabitým akumulátorem. Poté jsem začal šlapat. Když napětí baterie dosáhlo hodnoty 13,8V, nabíjení bylo ukončeno. Po 9 sekundách pokleslo napětí akumulátoru na 13,65V a nabíjení bylo opět spuštěno. Po 7mii sekundách nabíjení napětí baterie opět dosáhlo 13,8V a nabíjení bylo opět ukončeno. Obdobně omezovač napětí pracoval pro hodnoty 13,4-14,8V a pro jiné nabíjecí proudy, přičemž s nižšími nabíjecími proudy bylo sepnuté nabíjení déle- pro 5A 31s.

Ochrana proti přepólování je řešena pomocí automobilového relé RE1, které je zapojeno přes závěrně polarizovanou diodu D5. Pokud dojde k přepólování baterie, relé rozezne obvod, nabíjená baterie se odpojí. Díky indukčnosti L1, snímacímu odporu R1 nedojde k tvrdému zkratu, avšak kontakty relé jsou namáhány vysokým proudem. Vzhledem k tomu, že tato ochrana je pouze bezpečnostní, eventuální snížení životnosti relé není vážným problémem.

Tepelná ochrana regulátoru proudu je řešena pomocí tepelného spínače K1, který je umístěn na chladič s výkonovými součástkami. V případě přehřátí dojde k sepnutí proudu do relé, které odpojí baterii. Co se týká ochrany proti zkratu, při zkratovaných svorkách výstupu regulátoru dojde po započetí šlapání ke zvýšenému zahřívání spínacího tranzistoru, po chvíli sepne tepelná pojistka a relé rozpojí zkratovaný obvod.



4-10 Testování regulátoru dobíjení

Následně jsem ke generátoru s usměrňovačem zapojil paralelní regulátor napětí, regulátor nabíjecího proudu s omezením max. napětí akumulátoru a vybitý akumulátor, abych ověřil funkci obou regulátorů zároveň. Při testování jsem se zaměřil zejména o kolik musí být nastavené napětí na paralelním regulátoru vyšší než napětí baterie, aby bylo možno dobíjet nastaveným nabíjecím proudem. Pro spolehlivou funkci bylo nutné, aby bylo napětí paralelního regulátoru o 1,5V vyšší než aktuální napětí akumulátoru. Toto si vysvětluji zejména zvlněním napětí kvůli paralelnímu regulátoru a měkkostí generátoru a jeho pohonu.

Pokud bylo nastaveno napětí o méně než 1,5 V vyšší než aktuální napětí baterie, docházelo

k poklesu nabíjecího proudu, zvýšení vibrací a znatelně rozdílnému odporu šlapání v různé části otáčky šlapek. Toto si vysvětluji kolísáním rychlosti otáčení generátoru kvůli kolísání síly působící na šlapky v různé fázi otáčky.

Ze subjektivního hlediska bylo nejlepší nastavení nabíjecího proudu na 5A, a napětí 17V. Při tomto nastavení při šlapání při nízkých otáčkách nekladl generátor téměř žádný odpor. Po dosažení takových otáček, kdy bylo napětí generátoru za usměrňovačem v intervalu $\langle U_{bat}; U_{bat}+1V \rangle$ došlo k výraznému zvýšení točivého momentu potřebného k udržení otáček a nabíjecí proud stoupl na nastavených 5A. Následně, se zvyšujícími s otáčkám, vnímaný odpor pedálů mírně klesal. Při dosažení otáček odpovídajícím napětí 17V docházelo k rychlému nárůstu odporu pedálů a tak se ani za použití plné síly nedalo šlapat rychleji.

Závěr

Navržené zařízení splnilo mé očekávání pro dané použití. Paralelní regulátor se výborně hodí pro regulaci maximálních otáček generátoru a tím i nastavení rychlosti šlapání, což je pro trénink výhodné. Z hlediska ochrany proti přepětí (vysokým otáčkám generátoru) při použití s testovaným rotopedem nemá opodstatnění, jelikož maximální napětí, které bylo možné šlapáním dosáhnout bylo 23V. Regulátor dobíjecího proudu pracoval správně, bylo možné regulovat nabíjecí proud od 2A do maximálního proudu generátoru 12,5A, což umožňuje šetrné nabíjení olověných akumulátorů o kapacitách 20-125 Ah. Případně zrychlené nabíjení akumulátorů menších kapacit. Omezení napětí akumulátoru umožňuje rozpoznat ukončení nabíjení, přičemž je možné nechat akumulátor k regulátoru nabíjení připojen i nadále. Navržené zařízení se hodí zejména pro použití, v kterém bylo testováno- rotoped s možností nabíjení akumulátorů. Další využití je u malých větrných elektráren, zejména proto, že je možné nastavit maximální otáčky pomocí paralelního regulátoru, a tím pádem je možné omezit poškození mechanické části vysokými otáčkami. Dále je možné navržené zařízení použít pro regulátor dobíjení v motocyklech s alternátorem s permanentními magnety. Regulace dobíjecího proudu by zde plnila funkci proudové ochrany při zkratu, paralelní regulátor by sloužil pro omezení maximálního napětí při vysokých otáčkách motoru a omezovač maximálního napětí baterie by zde plnil funkci regulátoru napětí.

Co se týká možností dalšího vylepšení, bylo by dobré zdokonalit nastavování parametrů tak, aby bylo možné nastavovat jejich hodnoty po celé dráze potenciometrů a nebylo možné nastavit hodnotu, při které zařízení správně nefunguje—zejména nižší napětí paralelního regulátoru, než je napětí akumulátoru + 1V. Dále by bylo dobré k potenciometrům doplnit ocejchovanou stupnici.

Své opodstatnění by mělo doplnění o funkci omezení nabíjení pro napětí, které je menší než nastavená úroveň. Tato funkce by mohla být využita např. u větrných elektráren, kdy při nízkých otáčkách vrtule by mohlo docházet k odtržení proudnic od profilu listů a tím i snížení účinnosti.

Navržené zařízení splnilo mé očekávání a pomohlo mi zjistit, jaká fyzická práce se skrývá za výrobou elektrické energie. Za hodinu šlapání, při nastaveném nabíjecím proudu 5A vyrobím přibližně 60-70Wh použitelné energie, což stačí například pro 4h provozu notebooku nebo 3h svícení 20W úspornou zářivkou.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 2. vyd. Plzeň: Vydavatelství západočeské univerzity, duben 1998. 181 s.
- [2] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku IV*. 1. Vyd. Č. Budějovice: KOPP, 1999. 220 s.
- [3] VLASÁK, Zdeněk. *Olověné automobilové akumulátory konstrukce*. [online], Poslední změna 29.9. 2002. 22 s. Dostupné 31.5.2012 z: http://www.zvlasak.net/baterie_s.pdf
- [4] K1400, spol. autorů. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů*. [online], 20.12. 2008. 61 s. Dostupné 31.5.2012 z: <http://elektro.g6.cz/soubory/akumulatory.pdf>
- [5] <http://www.hobbyking.com> (31.5.2012)
- [6] www.pipistrel.si/plane/taurus-electro/gallery (31.5.2012)
- [7] <http://eskuotr.cz/cs/motory-12/107-5000w-12-brushless-hub-motor.html> (31.5.2012)
- [8] <http://www.discmotor.com/products.htm> (31.5.2012)
- [9] <http://bioage.typepad.com/.a/6a00d8341c4fbe53ef0133f4ac4faf970b-800wi>
(31.5.2012)
- [10] <http://www.autobaterie.com/rady-a-tipy> (31.5.2012)
- [11] VONDRÁŠEK, F.: *Výkonová elektronika*, Skripta ZČU Plzeň 2003

Příloha

Seznam součástek usměrňovače a paralelního regulátoru maximálního napětí

Polovodiče

Můstek, D2	MBR 1560CT
D6	1N4001
D1	1N5347B 10V 5W
D3	BZX55C8V2 8,2V, 5W
D4	BZX55C3V6 3,6V, 0,5W
U1	TL082CN
T1	IRF3205

Rezistory

R1	100 Ω 5W
R2,R6	1k Ω
R3	3,9k Ω
R5	21k Ω

Potenciometr

VR1	5k Ω lineární
-----	----------------------

Kondenzátor

570 μ F nízký ESR

Seznam součástek sériového regulátoru proudu s omezením napětí akumulátoru

Polovodiče

D5,D7,D10	1N4001
D9	MBR1560CT
D1,D6	1N5347B 10V 5W
D2,D3,D8	BZX55C3V6 3,6V, 0,5W
D4	BZX55C9V1 9,1V, 0,5W
U1,U2	TL082CN
VO1	TLP250
VO2	KB815L
Q1	IRF3205

Rezistory

R1	50m Ω 20W
R2	200 Ω
R4	20 Ω 2W
R6 ,R11	21k Ω
R7	250 Ω (150+100 Ω)
R10,R16 ,R13	500 Ω
R3,R8,R12,R14	1k Ω
R15	100 Ω 5W

Potenciometry

VR1	5k Ω lineární
VR2	1k Ω lineární

Ostatní

Relé	12V 30A
L1	100 μ H DPU 100A10
Tepelná pojistka	100 $^{\circ}$ C spínací SM6 CPA100 S