

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ROTOPED PRO NABÍJENÍ AKUMULÁTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

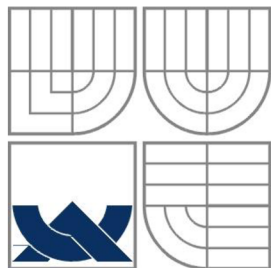
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

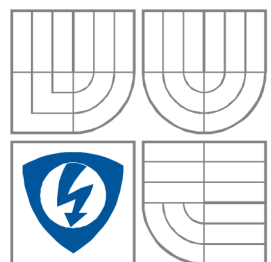
AUTHOR

Jan Nekvapil

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ROTOPED PRO NABÍJENÍ AKUMULÁTORU

EXERCISE BICYCLE FOR ACCUMULATOR CHARGING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

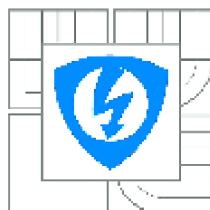
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jan Nekvapil

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jan Knobloch

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jan Nekvapil

ID: 133365

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Rotoped pro nabíjení akumulátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte vhodný algoritmus řízení nabíjení
2. Navrhněte desky plošných spojů pro řídicí a silové obvody
3. Zpracujte výrobní dokumentaci zařízení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.

[2] PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky - svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru. Brno, 2005.

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 25.8.2014

Vedoucí práce: Ing. Jan Knobloch

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace

NEKVAPIL, J. *Rotoped pro nabíjení akumulátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 44s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Knobloch.

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Janu Knoblochovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Rotoped pro nabíjení akumulátoru* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Abstrakt

Bakalářská práce nastiňuje možné řešení rotopedu jako zdroje elektrické energie. První část pojednává obecně, o olověném akumulátoru, nabíjení, EC motoru a měniči elektrických veličin. Další částí je návrh řešení s výběrem vhodných součástí. EC motor je propojen s rotopedem řetězovým převodem. Přenos elektrické energie probíhá skrze diodový usměrňovač, stejnosměrný meziobvod a dále přes zvyšující měnič do dvou olověných akumulátorů v sérii. Dokument ukazuje možné řešení schématu a desky plošných spojů s vhodnými součástkami. Nakonec jsou porovnány výrobky podobných vlastností dostupné na trhu.

Abstract

Bachelor thesis is about possible solution construction of exercise bicycle with electric part working as a electric source. The first part of document introduces readers to issues about lead acid accumulators and charging, electronically commutated motors and electric converters. The second part shows potential solving constitution of exercise bicycle and we choose components and devices. EC motor will be connected with exercise bicycle by chain transmission. Transfer energy is realized through diodes rectifier to DC-circuit and then by boost converter to two lead-acid accumulators in series. Document show possible solutions of electric schema and circuit board with suitable electronic components. At the end of the document is compared existing similar products.

Obsah

ÚVOD	16
1 AKUMULÁTOR	17
1.1 PARAMETRY AKUMULÁTORU	18
1.2 NABÍJENÍ AKUMULÁTORU	19
2 MOTORY.....	20
2.1 MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY.....	20
3 MĚNIČE ELEKTRICKÝCH VELIČIN	23
3.1 NEŘÍZENÝ USMĚRŇOVAČ.....	24
3.2 AKTIVNÍ USMĚRŇOVAČ.....	24
3.3 ZVYŠUJÍCÍ (STEP-UP) MĚNIČ NAPĚTÍ	25
4 POPIS ŘÍZENÍ ROTOPEDU	25
4.1 CHARAKTERISTIKA CYKLISTY	25
5 ŘÍDÍCÍ OBVODY	32
6 SILOVÉ OBVODY	35
7 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	39
8 SROVNÁNÍ S PODOBNÝMI ZAŘÍZENÍMI	41
9 ZÁVĚR.....	42
LITERATURA	43
OBRÁZKY	44
OBRAZOVÁ PŘÍLOHA	44

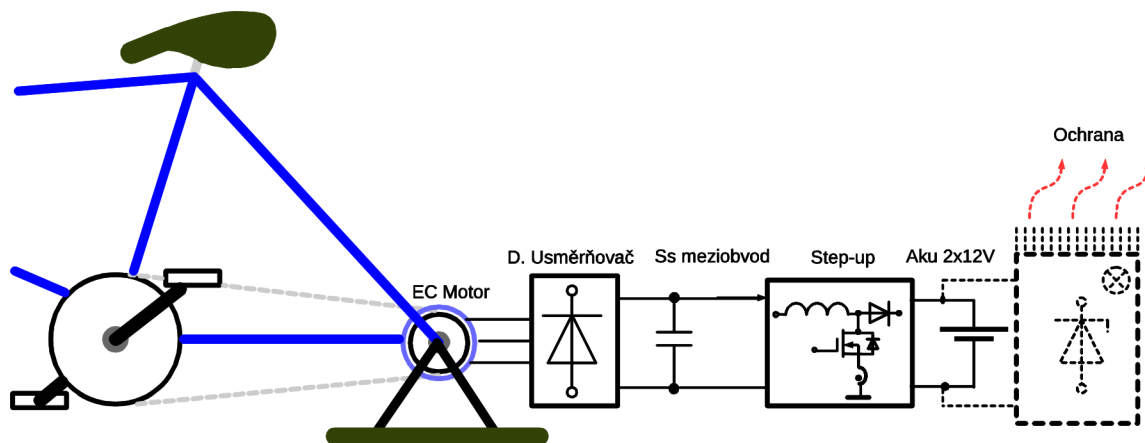
ÚVOD

V bakalářské práci je navržena elektrická část zařízení, rotopedu pro výrobu elektrické energie. Jednotlivé elektrické části jsou rozebrány v následujících kapitolách a postup návrhu je rozepsán v praktické části.

Zdrojem mechanické energie pro přeměnu je člověk. Prvním krokem je předpoklad maximálního mechanického výkonu, kterého je cvičenec schopen, a podmínek, při nichž se tak stane. Dle takových předpokladů je vybrán zdroj elektrické energie o vhodném výkonu a rozsahu otáček. Podle štitkových parametrů elektrického stroje dále navrhujeme zařízení, které přitékající elektrický výkon zpracovat a připravit pro uložení do olověných akumulátorů. Návrh je doveden až k finální podobě ve formě výrobní dokumentace DPS a seznamu potřebných součástek.

Motivací pro zkonstruování takového přípravku je více. Za prvé je to jiný zdroj pro ostrovní síť v rámci chaty apod., kde sice dnes existuje mnoho možností, jak elektrickou energii vyrobit (elektrocentrály, fotovoltaika), na druhou stranu rotoped může být tou nejlevnější a velmi pružnou variantou, pokud nepotřebujeme velké množství energie. Za druhé je škoda energii při cvičení zbytečně mařit na teplo, pokud existuje dostupný způsob její přeměny a uložení. Následně ji využít například pro přístroje, které jí sice mnoho nespotřebují, ale jejich provozem získá využitá energie velkou přidanou hodnotu. Například nabíjením drobné elektroniky a popř. i provozem notebooku. Dalším přínosem bude určitý vývoj změny pohledu a představ cvičence o množství elektrické energie, které při běžných činnostech spotřebovává. A tudíž si jí třeba začne více vážit a uvážlivěji používat.

Jednotlivé kapitoly pojednávají o samostatných elektrických částech zařízení. V textu práce si čtenář může povšimnout prolnutí teoretické části s praktickou.



Obr. 1.0: Blokové schéma zařízení

1 AKUMULÁTOR

Olověný akumulátor je elektrochemický zdroj energie. Jeho základní součástí jsou dvě olověné elektrody (desky) ponořené v elektrolytu. Ten je tvořen kyselinou sírovou, která je zředěná destilovanou vodou v určitém poměru. Olověné desky tvoří póly článku. Po ponoření elektrod do elektrolytu se na jejich povrchu vytvoří vrstva síranu olovnatého. Připojením svorek na zdroj elektrického napětí začneme akumulátor nabíjet a probíhá nyní chemická reakce. Na katodě se PbSO_4 začne rozpouštět a na anodě hromadit. Na anodě dojde k přeměně PbSO_4 na PbO_2 . Je-li akumulátor plně nabitý, pak aktivní hmotou na jedné z elektrod je olovo a na druhé oxid olovičitý. (Pozn. Názvy elektrod katoda a anoda používáme pouze se současným uvedením směru protékajícího proudu. Při nabíjení dochází k oxidaci (anodické reakci) na kladném pólu a k redukci (reakci na katodě) na pólu záporném. Při vybíjení si chemická reakce vymění působiště. Při nabíjení je anodou kladný pól, při vybíjení akumulátoru pól záporný. [1])

Je to historicky velmi často používaný akumulátor, který je ale dnes v mnoha aplikacích poněkud nepraktický a je nahrazován jinými typy akumulátorů. Setkáme se s ním v podobě autobaterie, uvnitř malé UPS pro jeden počítač, či záložní zdroje pro alarmy a v neposlední řadě také jako zdroj pro dětské samohyby. Jeho předností je nepochybně cena a jednoduchost provedení a obsluhy. Zápornou stránkou věci je jeho hmotnost a kvůli ní také nejnižší hmotnostní hustota energie. Ta činí pouze 0,03 kWh/kg. Olověné akumulátory dělíme podle jejich provedení i podle účelu, ke kterým jsou určeny. Některé z nich vyžadují údržbu spočívající v udržování čistoty připojovacích svorek a výšky hladiny elektrolytu snižující se v důsledku odparu a elektrolýzy vody.

Nejčastěji se setkáme s akumulátorem se zaplavenými elektrodami, autobateriemi. Elektrody takových akumulátorů jsou ve formě mřížek, na nichž je nanášena aktivní hmota. Konstrukce a materiál složení mřížek jsou v neustálém vývoji a ovlivňuje jak velikost akumulátoru, tak jeho maximální startovací proud. Složení materiálu mřížek pak jejich pevnost a odolnost proti otřesům a zejména velikost samovybíjení. Modifikací těchto je nasáknutí elektrolytu do separátoru, který zároveň brání oddolení aktivní hmoty a umožňuje libovolnou pracovní polohu akumulátoru. Nebo se elektrolyt v akumulátoru nachází ve formě gelu tvořeného SiO_2 s příměsmi. Takový VRLA akumulátor je hermeticky uzavřen a potřebuje vnitřní přetlak pro zpětnou rekombinaci H_2 a O_2 na vodu za účasti katalyzátoru. Nevýhodou je vhodný, cca poloviční (0,05 C), dobíjecí proud oproti výše zmíněným typům.

Výběr vhodného akumulátoru odpovídá požadovanému účelu, tedy akumulátory startovací a trakční.

První z nich jsou konstruovány tak, aby i při nízkých teplotách dokázaly ze sebe po krátký čas vydat co nejvíce energie. Tomu je přizpůsobená i vnitřní konstrukce akumulátoru, s co největší možnou plochou elektrod. Větší četnost tenkých mřížek s aktivní hmotou. Akumulátor tudíž dobře snáší cykly přizpůsobené dnešní dopravě na krátké vzdálenosti. Velké krátkodobé vybíjecí proudy a krátká intenzivní nabíjení z alternátoru s udržováním akumulátoru v nabitěm stavu. Odvrácenou stranou větší hustoty mřížek v článku akumulátoru je vyšší hodnota samovybíjení oproti trakčnímu akumulátoru. Ve startovací baterii dojde k nevratnému poškození elektrod jejich zkroucením v důsledku hlubokého vybití již v řádu několika dní a sulfatací, neboli vznikem síranu olovnatého, který obalí aktivní plochu

elektrody. Baterie není určena pro dlouhodobé napájení nízkoodběrových zařízení. Z důvodu velké citlivosti na hloubku vybití. Pro náš případ je však autobaterie vhodným řešením a to především kvůli konstrukci akumulátoru přizpůsobené pro vysoké a krátkodobé nabíjecí proudy.

Kdežto akumulátory trakční, cyklické, jsou naopak určeny pro dlouhodobé zatížení spotřebičem. Cyklus nabití a vybití snášejí cca 1500x, podle hloubky vybití. Baterii je možné odebrat až do 80% uložené energie bez trvalých následků, což u baterie startovací nelze. Tyto baterie rovněž nejsou konstruovány pro intenzivní nabíjení, potřebují kontrolovaný a regulovaný nabíjecí proces.

1.1 Parametry akumulátoru

Jmenovitá kapacita akumulátoru je udávána v Ah a označujeme ji C. V dolním indexu C je počet hodin zatížení akumulátoru, pro které je kapacita udávána. Většinou se udává pro zatížení akumulátoru po dobu 20 nebo 10 hodin. Různé metody zjišťování kapacity popisují normy. Podle norem EN je teplota akumulátoru při měření 25°C a měření probíhá do doby, kdy klesne napětí na jednom článku na hranici 1,5V. Dále je možné setkat se s označením rezervní kapacita RC, která se počítá v minutách. Udává dobu trvání, kterou je akumulátor schopen snést zatížení proudem 25A. Napětí na článku klesá pouze do 1,75V. Reálná využitelná kapacita je závislá nejen na stavu akumulátoru a teplotě, ale hlavně na velikosti připojené zátěže a hloubce vybití. Proto při růstu zatěžovacího proudu klesá využitelná kapacita baterie.

Vnitřní odpor je u nových akumulátorů velmi malý. A můžeme jej tudíž považovat za relativně tvrdý zdroj. Velikost vnitřního odporu závisí na stáří akumulátoru, počtu cyklů, které již absolvoval. Dále pak na stavu nabití. Při nabíjení se odpor zmenšuje a při vybíjení se zvětšuje. Nabíjený akumulátor má přibližně poloviční odpor vybitého. Vnitřní odpor je závislý na teplotě elektrolytu. Mění se o 4‰°C⁻¹. [1]

Samovybíjením jsou zatíženy všechny olověné akumulátory, avšak jeho velikost můžeme do značné míry ovlivnit konstrukcí a použitými materiály. Akumulátor je termodynamicky nestálou soustavou, jejíž elektrody mohou volně reagovat s roztokem za současného vyvíjení plynů. Dále může oxid olovičitý reagovat s olověnou mřížkou. Velikost samovybíjení ovlivňují také vnější vlivy. Mezi ně patří teplota, neboť nárůstem teploty se zvyšuje hodnota samovybíjení, a také velikost koncentrace kyseliny sírové, s níž roste samovybíjení. Čistotu elektrolytu ovlivní výrobce odstraněním stopových množství solí a volbou složení materiálu mřížek, na nichž je aktivní hmota. Obsahují-li mřížky příměsi antimonu, ten se korozi kladné elektrody rozpouští do elektrolytu a usazuje se na aktivní hmotě záporné elektrody. Tato úsada pak zjednodušuje vývin vodíku. Akumulátory starší konstrukce trpěly samovybíjením velikosti 1% své kapacity denně. Dnešní akumulátory, které obsahují ve svých mřížkách vápník, dosahují pouze třetinové velikosti samovybíjení.

Při skladování akumulátoru ve vybitém stavu, či při systematickém nedostatečném dobíjení, dochází k sulfataci elektrod. Je to tvorba síranu olovnatého při vybíjení akumulátoru. Na mřížkách se usazuje ve formě jemných krystalek, které se později přeměňují, zvětšují, až vytvoří tvrdou hrubou vrstvu síranu na aktivní hmotě elektrody. To z důvodu přednostní vazby dalšího síranu olovnatého na již vzniklá krystalizační jádra. Síran, jinak také sulfát, zmenšují účinnou plochu elektrod. Tyto plochy se pak nemohou zúčastnit elektrochemické

reakce. Dochází tudíž ke snížení kapacity za současného zvýšení vnitřního odporu. K sulfataci dochází při hlubokém vybití, tzn. pod napětí 10,5V.

K vnitřnímu zkratu, v mezimřížkovém prostoru, může dojít nevhodným nabíjením příliš vysokým proudem za současného bouřlivého vývinu plynů, či nerovnoměrným nárůstem aktivní hmoty na mřížce, přičemž může dojít k dotyku mezi elektrodami.

1.2 Nabíjení akumulátoru

Při nabíjení zcela vybitého olověného akumulátoru složeného z šesti článků vzrůstá jeho napětí ve třech pásmech. V prvním pásmu dochází k tvorbě kyseliny sírové v pórech olověných desek a napětí v této chvíli stoupá až na 13,2V, hustota elektrolytu dosahuje $1,15\text{gcm}^{-3}$. Při přechodu do druhého pásma začne probíhat přeměna síranu olovnatého až do napětí 14,7V a současného zvýšení hustoty elektrolytu na $1,25\text{gcm}^{-3}$. Po překročení hraničního napětí ve druhém pásmu pokračujeme c nabíjení v pásmu třetím. Zde se kromě síranu olovnatého začne rozkládat i voda na vodík a kyslík, baterie plynuje. Hustota elektrolytu dosáhne na $1,28\text{gcm}^{-3}$. Při dalším dobíjení se již velikost napětí na akumulátoru nezvyšuje a veškerý výkon přivedený na baterii je spotřebován na elektrolyzu vody. Pokud začíná plynování akumulátoru při nižším napětí, než činí 14,4V, pak je akumulátor zasažen počínající sulfatací. [1]

Při vybití nabitého akumulátoru zprvu ihned poklesne napětí na cca 12,6 – 12,8V. Hustota elektrolytu se začne snižovat a na povrchu elektrod vzniká síran olovnatý. Vybitím se snižuje napětí až na hodnotu 10,5V, kterou považujeme za přípustnou dolní hranici napětí bez poškození akumulátoru. V tuto chvíli má elektrolyt hustotu pouze $0,95\text{gcm}^{-3}$, což může lehko vést v zimě k jeho zamrznutí a zničení baterie. [2] Teplotní kompenzace upravuje velikost napětí nabíječky při různé teplotě prostředí nabíjení. Z důvodu závislosti rychlosti chemické reakce na teplotě je třeba na každé ochlazení o 10°C vůči referenční teplotě (nejčastěji 25°C) zvýšit napětí o cca 0,3V, aby nedošlo k neúplnému nabití. [2]

Nabíjení může být realizováno několika způsoby – U, I a W charakteristika.

Nabíjení akumulátoru konstantním napětím s omezením proudu

Velikost napětí se volí blízko k hodnotě plynovacího napětí, které se pohybuje v rozmezí 14,4 – 14,8 V. Vhodné je určité proudové omezení, protože při začátku nabíjení dosahuje procházející proud velikosti cca 0,5 – 1 násobku jmenovité kapacity akumulátoru. Ovšem tento proud velmi rychle poklesne na hodnotu, u níž již nehrozí, že by svým působením poškodila akumulátor (~0,1 násobek kapacity baterie). Se zvyšujícím se napětím akumulátoru klesá nabíjecí proud. Konečným nabíjecím proudem jsou jednotky ‰ kapacity akumulátoru. Je dobré kontrolovat, když už ne teplotu elektrolytu, tak alespoň teplotu vnějšího obalu baterie. Je doporučeno nepřekročit teplotu 40°C . Klady nabíjení konstantním napětím jsou rychlost nabíjení, samoregulace nabíjecího proudu a tedy samostatné ukončení nabíjení akumulátoru. [4]

K nabíjení konstantním proudem nejsou doporučena zařízení, u nichž těžko zjišťujeme hloubku vybití akumulátorů. Proud nastavujeme do jedné desetiny násobku jmenovité kapacity akumulátoru. Výhodou je snadný výpočet, popř. odhad, dodaného náboje do akumulátoru v závislosti na čase. Nevýhodou tohoto nabíjení možnost přebíjení akumulátoru. [4]

Kombinací obou metod je W charakteristika přinášející zkrácení času potřebného k nabíjení. Zde se postupně zvyšuje napětí a snižuje dobíjecí proud. Tato nabíjecí charakteristika je označována jako „IU“ charakteristika. Modifikací W - charakteristiky je pulzní nabíjení. Toto také dokáže do určité míry zachránit zasulfátované akumulátory. [4]

Pro cyklistu a cvičení jsou důležité otáčky, resp. kadence šlapání. Dále mechanický moment odpovídající proudu z elektromotoru, který při zařazeném stupni cvičenci příjemný. Zařazený stupeň je zde realizovaný řízením měniče, ne tak mechanickou převodovkou. Pro jednotlivé stupně zatížení budeme regulovat odběr konstantního proudu z motoru. Tudiž nabíjení akumulátorů odpovídá I – charakteristice s určitým zjednodušením. Nabíjecí proud nebude konstantní pro celý cyklus nabíjení, protože cvičenec není konstantním zdrojem mechanické energie po dostatečně dlouhou dobu. Ochrana před přebíjením je realizována omezením maximálního napětí na akumulátorech. Toto není optimální způsob nabíjení akumulátoru, avšak autobaterie jsou odolné vůči krátkodobým vyšším proudům.

Budeme tedy regulovat na střední proud I_d tekoucí z motoru, jemuž odpovídá střední moment motoru M_z . Na výstupu zvyšujícího měniče je nastaveno konstantní napětí, tudíž se bude jednat do určité míry o přenos konstantního výkonu.

Při překročení maximálního napětí sepne mařič energie, který bude spalovat elektrickou energii, kterou již nelze uložit do plně nabitých akumulátorů, či v případě, že nejsou akumulátory připojeny. Tento přístroj uvažujeme navrhnout v navazující diplomové práci.

2 MOTORY

Jsou to točivé elektrické stroje. Konstrukce se dělí na pohyblivou část upevněnou mezi ložiskovými štíty, rotor. A netočivou část, stator.

Funkce motoru je podmíněna vytvořením točivého magnetického pole. Ke vzniku takového pole jsou nutné nejméně dvě cívky, jejichž hlavní osy nejsou rovnoběžné, napájené proudy, které nejsou ve fázi. Magnetické pole o magnetické indukci $B(t)$ indukuje ve vinutí rotoru napětí. To způsobí průchod proudu v rotorovém vinutí a vznik magnetického pole rotoru, je-li rotor vinutý anebo má-li klecové vinutí. Toto pole je v reakci se statorovým polem a motor začne plnit svoji funkci. Rotor však může být tvořen permanentními magnety a funkce je tatáž.

2.1 Motory s permanentními magnety

Pole permanentně magnetizovaného motoru se tvoří mezi dvěma nebo více trvalých magnetů. Použité materiály pro výrobu magnetů jsou ferit a v případě požadavků na kompaktnější velikost motoru, magnety s použitím prvků ze vzácných zemin. Rozšíření tohoto typu motoru je závislý právě na ceně a vývoji velmi silných magnetů (nyní nejčastěji SmCo, NdFeB), které jsou jeho nejdražší součástí. Naleziště vzácných prvků jsou omezená svou těžitelností a státy, v nichž se doly nachází, vědí o strategické hodnotě těchto kovů. Proto nyní probíhá intenzivní vývoj magnetů s nižším obsahem prvků vzácných zemin a pokusy o recyklaci těchto prvků z elektroodpadu.

Nyní je třeba zajistit točivé pole statoru, aby se motor rozběhnul. Máme několik možností. Buď použijeme komutátor, nebo komutaci cívek statoru zajistíme pomocí elektroniky, či napájíme statorové vinutí střídavým sinusovým napětím.

Komutátorové motory

Komutátor je historicky nejstarší a dnes již v rámci mezi této technologie dovedený k dokonalosti. Nejvýznamnější vlastností motoru s permanentními magnety je, že při konstantním napětí, jsou otáčky a proud úměrné momentu. Je tedy jednoduché provádět výpočty a navrhnout jak motor, tak i ostatní komponenty v zařízení. Ovšem i přes dlouholetý vývoj se nedokážeme zbavit jeho hlavních neduhů. Komutátor se díky mechanickému tření odírá a má pevně danou životnost zkracující se poruchovými stavy motoru, popř. při přetížení. Ke komutátoru přiléhají kartáče, které přitlakem zajišťují elektrické propojení vinutí rotoru s napájecím zdrojem. Kartáče se taktéž odírají a jejich materiál se drobí a znečišťuje vnitřek motoru. Kromě zjevné potřeby údržby motoru, zahrnující výměnu kartáčů a případné úpravy komutátoru na soustruhu, jsou kartáče zdrojem jiskření a tedy i frekvenčního rušení. Dalším neduhem je vývin tepla v rotoru, který se hůře chladí a taktéž ohřev komutátoru. Proto se při potřebě méně údržbového a čistého provozu prosazují motory s komutací zajištěnou elektronicky, či motory synchronní s PM na rotoru.

Synchronní motory s permanentními magnety na rotoru (PMSM)

Konstrukce statoru je stejná jako pro asynchronní motory. Motor je napájen sinusovým 3F střídavým napětím a jednotlivé fáze jsou vůči sobě pootočený o 120° el. Synchronní rotor má vyniklé póly permanentních magnetů. Běžný synchronní motor se sám neroztočí při připojení k síťovému napětí. Důvodem je setrvačnost rotoru a vysoká rychlost točivého magnetického pole. Rotor musíme rozběhnout z vnějšku tak, aby získal otáčky točivého magnetického pole. Synchronní motory s vlastním spouštěním jsou konstruovány pro pohon z frekvenčních měničů, které zajistí rozběh. Existují motory, které mohou být spouštěny pomocí startovacích vinutí. Při takovém rozběhu se motor chová jako asynchronní stroj a klecovou kotvou.

Elektronicky komutované motory (EC)

Jinak také BLDC (BrushLess Direct Current) motor. Navenek se jedná o motor uživatelsky identický, jako je stejnosměrný motor, komutaci zajišťuje měnič napájející motor obdélníkovými, či lichoběžníkovými pulsy. Vždy vedou proud pouze dvě ze tří fází. Každá z nich je sepnutá 120° el. a vypnutá 60° el. Motor můžeme řídit bipolárně, anebo unipolárně. Tím, že točivé elektrické pole nevzniká v rotoru, ale ve statoru, tak je EC motor vůči ss motoru postaven obráceně. Existují navíc dvě varianty, inrunner a outrunner. V prvním případě máme pevně přichycený stator a rotor hřídelí točí se zátěží. Naopak je tomu v případě druhém, kdy je zátěž poháněna vnějším rotorem a hřídel je v tomto případě statickou částí motoru.

Provoz BLDC motoru je závislý na přesném spínání vinutí statoru. Vždy v motoru pracují pouze dvě ze tří vinutí. Aby měnič dostal signál a mohl rozhodnout, které vinutí zapnout a které vypnout, je nutné mít informaci o poloze natočení rotoru. Tato informace se získává pomocí více metod. Nejjednodušší metodou je měření indukovaného napětí na

vypnutém vinutí. Tato metoda má však velkou nevýhodu, že neurčí počáteční natočení a nepříliš dobře funguje při malých otáčkách stroje. Jiným způsobem je rozmístění tří Hallových sond, které přesně určují natočení hřídele. Dalšími způsoby jsou použití resolverů a enkodérů. [6], [7], [8]

Zde však nebudu dále popisovat způsoby, které nebudeme používat.

EC motor může fungovat ve čtyřech různých pracovních režimech. Tyto pracovní stavy kreslíme pomocí čtyř kvadrantů V-A charakteristiky. Dvě z nich znázorňují motorický režim a druhé dvě generátorický režim. Pro rozhodnutí režimu motoru je důležitý směr proudu vzhledem ke svorkovému napětí na motoru. Odpovídá-li směr proudu, vůči svorkovému napětí, spotřebiči, jedná se o motorický režim, naopak se jedná o režim generátorický. Motorický chod je obvykle znázorněn I. a III. kvadrantem, generátorický II. a IV kvadrantem.

Motor je odporově-indukční zátěží. Do schématu jej zakreslujeme pomocí odporu, indukčnosti a zdroje vnitřního indukovaného napětí. [6]

Jelikož je naše pozornost soustředěna na generátorický režim, je vhodné zdůraznit, jak spolu souvisí veličiny popisující chod motoru. Otáčky hřídele jsou úměrné vnitřnímu indukovanému napětí. A proud do/z motoru je úměrný momentu na hřídeli. Otáčky motoru řídíme tedy velikostí střední hodnoty napětí.

Vybrané řešení

Pro náš případ jsme vybrali motor podle parametrů, které požadujeme pro danou aplikaci. Z dřívějšího zájmu o cyklistiku vím, že cvičenec je schopen dlouhodobě dodávat mechanický výkon cca 200 W. Ostatně je to potvrzeno i v níže diskutované zprávě. V případě zdatnějšího cyklisty je nutno předimenzovat výkon motoru, aby bylo dosaženo podobného chování, jaké známe u rotopedu. Zvolili jsme, s ohledem na cenově dostupný sortiment EC motorů, maximální mechanický výkon 500 W. Pro daný výkon je komplikací uvažovat napětí pouze 12 V a naopak 36 V je již nezvyklé napětí pro napájení dalších přístrojů. Proto byl vybrán motor na 24 V. Chceme nabíjet dva automobilové akumulátory v sérii, aby lépe pojaly nárazový a krátkodobý výkon cyklisty. Dalším požadavkem jsou pracovní otáčky motoru. Při potenciálním výběru modelářského motoru, jsou neúměrně vysoké otáčky pro daný mechanický výkon značnou překážkou konstrukce. Chceme se vyvarovat převodovky, a tudíž musí ležet pracovní otáčky motoru maximálně v jednotkových násobcích kadence šlapání cyklisty. V diskutovaném problému nám pomohla zpráva o biologickém experimentu. Těžištěm zkoumání bylo napětí, aktivační impulsy a vzájemná kooperace jednotlivých nožních svalů při různých pracovních podmínkách. Měnicími se parametry při experimentu byly rychlost akce nohy a podávaný mechanický výkon při co nejmenší námaze cvičícího. Dále výzkumníky zajímala schopnost organismu člověka zásobit při zátěži namáhané svalstvo živinami a kyslíkem. Pro nás je však důležitým závěrem při návrhu a výběru EC motoru křivka optimálního výkonu podávaného člověkem při vzrůstající kadenci šlapání. [3]



Obr. 2.1: Vybraný motor [A]

V poslední době stále více získávají na oblibě elektrokola, která usnadňují cyklistovi jeho námahu. Dokonce často svým výkonem zcela mohou nahradit jeho práci. Při snaze výrobců o co nejlepší využití poptávky na trhu se nedávno objevily komplety, pohonné jednotky s řídicími prvky a poháněcím akumulátorem, určené k přestavbě kola na elektrokolo svépomocí. Dokonce je možné koupit samostatné součásti pohonu. Pro nás je tato situace příhodná a vybrali jsme tedy z nabídky EC motor určený k vestavbě do náboje zadního kola s předpřipraveným místem pro uchycení přehazovačky. My bychom jej využili pouze uchycení jednoho kolečka, pro jeden převodový stupeň. Volbu výstupního výkonu, zátěže, si cvičenec nastaví ovládacím knoflíkem na měniči.

Tab.2.1: Motor 24V 500W pro montáž do zadního náboje jízdního kola

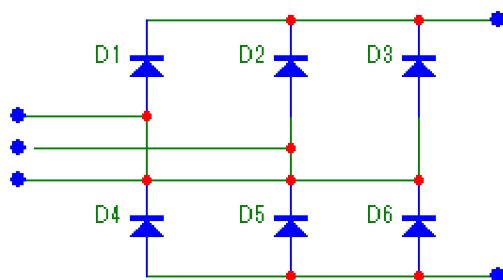
Popis	U_1	I	P_1	M	n	P_2	η
	[V]	[A]	[W]	[Nm]	[min ⁻¹]	[W]	[%]
Naprázdko	24,73	0,85	20,96	0,24	235,50	5,91	28,8
Max. účinnost	24,74	8,41	208,00	7,99	201,80	168,80	81,1
Max. výkon	24,74	21,23	525,30	21,82	149,30	341,00	64,9
Max. moment	24,69	20,06	495,40	23,69	125,50	311,20	62,8

3 MĚNIČE ELEKTRICKÝCH VELIČIN

Slouží k přeměně kvality elektrické energie a řízení množství průchozí energie. Můžeme je rozdělit podle druhu napětí na vstupu a výstupu. Dále dle součástek, z nichž je měnič složen, a způsobu jejich zapojení. Pro žádanou funkci zařízení je nutné v určitých případech řadit za sebe dva, i více měničů. Nazýváme to kaskádním řazením měničů. Je-li mezi nimi udržováno napětí (popř. proud) stejnosměrným (mezilehlým) meziobvodem, pak tyto měniče nazýváme nepřímé. V našem případě se bude jednat o měnič nepřímý, obsahující ss meziobvod. Budeme zde popisovat měniče, které se vztahují k našemu návrhu zařízení.

3.1 Neřízený usměrňovač

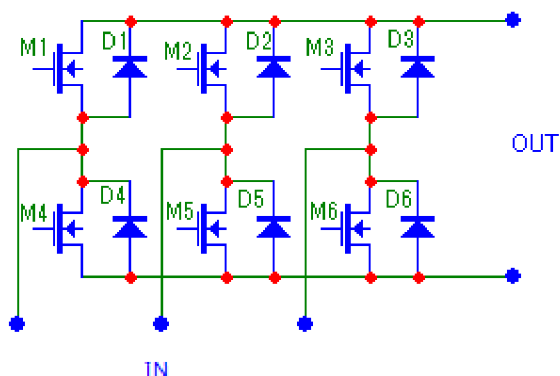
Je to nejjednodušší diodový usměrňovač. V našem případě by se jednalo o použití šestipulsního neřízeného můstkového usměrňovače. Výhodou je jednoduchost zapojení bez dalších řídicích obvodů. Naopak záporem je zatížení přenosu energie většími ztrátami a to úbytky na diodách. Přesto takové řešení preferujeme.



Obr. 3.1: Můstkový diodový usměrňovač

3.2 Aktivní usměrňovač

Jedná se o usměrňovač se stejným můstkovým zapojením. Avšak je složený z horních a dolních spínačů. Tranzistorů MOSFET s antiparalelními diodami. Výhodou takového řešení jsou menší ztráty vedením, protože odpor kanálu otevřeného tranzistoru je velmi nízký. Je možné řídit tento aktivní usměrňovač tak, aby zároveň plnil další funkci. A to zvyšujícího měniče (step-up) při využití indukčnosti jednotlivých fází motoru. Pro tuto funkci by aktivní usměrňovač musel znát polohu natočení rotoru pomocí Hallových sond, kterými námi vybraný motor disponuje. Takto fungující měnič je standardním měničem pro EC motor v režimu rekuperace. Bohužel ne všechny dostupné součástky určené pro řízení EC motorů mají tuto schopnost.



Obr. 3.2: Aktivní usměrňovač

Je nutné uvážit složitost nabízeného řešení a zhodnotit, zda výhody menších ztrát a regulovatelnost odběru vyváží komplikovanost provedení obvodu. A zda není možné tyto požadavky splnit jiným, schůdnějším způsobem. V nabízeném řešení se aktivní usměrňovač,

pro svou složitost a malý celkový přínos, neuplatní. Ale je to jeden z možných způsobů, jak zajistit zvýšení účinnosti celého zařízení.

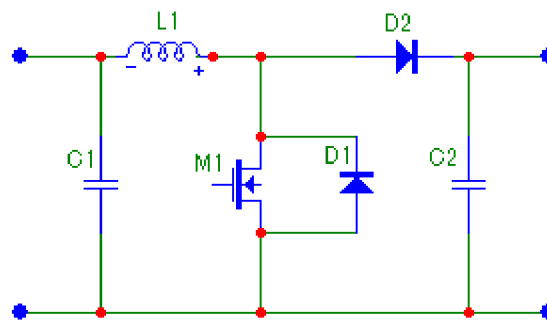
Existuje zde možnost řídit spínání tranzistorů kombinační logikou v závislosti na aktuálním signálu z Halloových sond. Takto vzniklý měnič by sice nebyl schopen zvyšovat napětí v meziobvodu, ale ztráty na usměrňovači by byly výrazně sníženy. Toto řešení si ponecháváme pro budoucí práci.

3.3 Zvyšující (step-up) měnič napětí

Protože napětí na motoru může značně kolísat v závislosti na kadenci šlapání, je zapotřebí toto napětí přizpůsobit tak, aby byl akumulátor nabíjen vhodným způsobem. Maximální napětí motoru je zvoleno nižší, než je nabíjecí napětí akumulátoru, proto zde použijeme měnič typu step-up.

Schéma zvyšujícího měniče je na obrázku 3.3. Tranzistor M_1 je sepnut a tlumivkou začíná procházet proud. Jakmile je tranzistor M_1 vypnut, tlumivka se brání prudké změně procházejícího proudu zvýšením napětí dle $U = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$, čímž dojde k otevření diody D_2 a proud tak teče do zátěže a výstupního kondenzátoru C_2 . Poté se cyklus opakuje.

Pro naši aplikaci vzhledem k pracovnímu napětí a proudu, s ohledem na minimální ztráty, je vhodné použít tranzistory typu MOS-FET a Schottkyho diody. Spínací frekvence takového měniče se volí s ohledem na použitý tranzistor a řídicí obvod. Je vždy kompromisem mezi přepínacími ztrátami na tranzistoru a diodě a velikostí tlumivky. V našem případě bylo zvoleno $f = 43$ kHz. Při správné kombinaci indukčnosti, kapacity a spínacího kmitočtu tranzistoru, získáme zdroj s požadovaným napětím a tvrdostí.



Obr. 3.3: Zvyšující měnič (step-up)

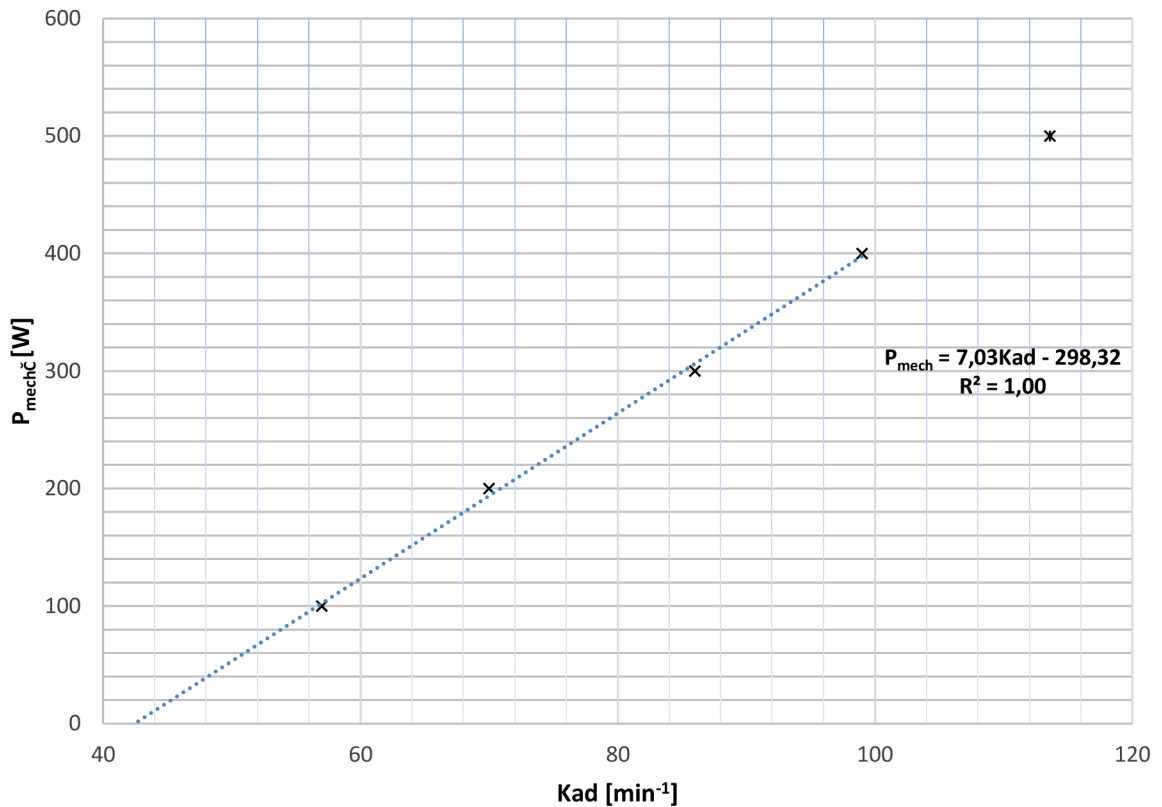
4 POPIS ŘÍZENÍ ROTOPEDU

4.1 Charakteristika cyklisty

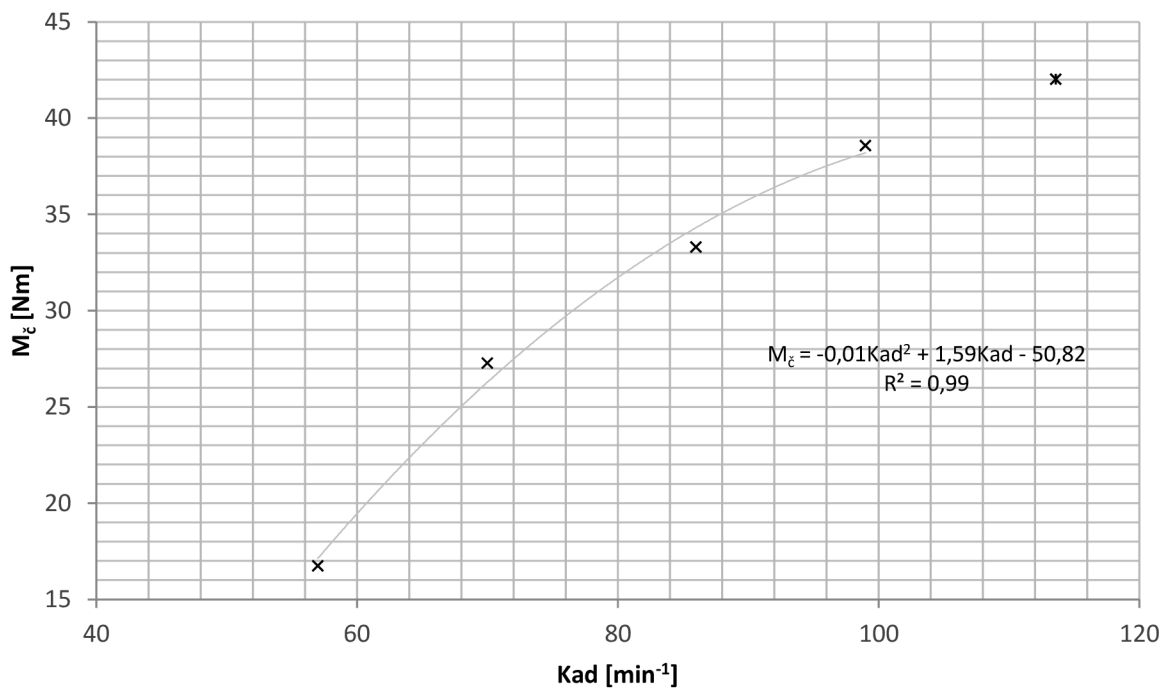
Abychom mohli začít s návrhem zařízení je nutné nejprve specifikovat, jaký budeme mít mechanický vstup. Je nutné charakterizovat cyklistu, který bude cvičit. Cyklista je nestálým zdrojem mechanické energie, to se promítá do způsobu nabíjení akumulátoru. Pro zdravého

člověka je typické, že dokáže po relativně dlouhou dobu podávat mechanický výkon cca 200 W, tento jediný údaj nám však nestačí.

Pro lepší popis cyklisty jsme využili experiment výzkumníků z University of Calgary. Důležitým a vypovídajícím výstupem je závislost optimální kadence šlapání cvičence při zvoleném podávaném mechanickém výkonu. Z toho vychází velikost momentu, kterým zabírá v dané situaci cvičenec. [3] V následujícím grafu je ukázána závislost šlapání a podávaného výkonu s doplněním posledního bodu (náležícího 500W) při extrapolaci lineární závislosti čtyř předešlých bodů pomocí rovnice regrese z níže uvedeného grafu 4.1.



Obr. 4.1: Závislost kadence cyklisty na požadovaném výkonu



Obr. 4.2: Závislost kadence a optimálního točivého momentu cyklisty

Při běžném provozu předpokládáme výkon cvičence max 300W. V tomto rozsahu má motor účinnost okolo 80%. Předpokládáme, že pro generátorický režim bude účinnost přibližně stejná jako u motorického. Tabulka 4.1 ukazuje předpokládané výkony v generátorickém režimu a účinnost. Data vychází z údajů výrobce, konkrétně obr. 4.3.

Tab. 4.1: Tabulka některých předpokládaných výkonů cvičícího (mech.) a motoru (el.)

Generátorický režim		
P _{mech} [W]	P _{elm} [W]	η [%]
83	50	60
100	70	70
173	140	81
259	210	81
359	280	78
467	350	75

V následujícím výpočtu je podle experimentu spočtena vhodná kadence šlapání při maximálním možném zatížení cvičence. Kadence, nebo-li počet otáček středu s rozetou za minutu.

$$P_{mech} = 7,03 \cdot Kad - 298,32$$

$$Kad = \frac{P_{mech} + 298,32}{7,03}$$

$$Kad = \frac{500 \text{ W} + 298,32}{7,03}$$

$$K_{ad} = 113,56 [\text{min}^{-1}]$$

Vybraný EC motor o max. příkonu 500 W má otáčky naprázdno $n_0 = 235,5 \text{ min}^{-1}$

Výpočet převodu motoru i [-]:

$$i = \frac{n_0}{K_{ad}}$$

$$i = \frac{235,5 \text{ min}^{-1}}{113,6 \text{ min}^{-1}}$$

$$i = 2,07$$

Je to tedy převod do rychla. Společně s vybraným motorem je výrobcem nabízena rozeta o 18 zubech.

$$z_1 = z_2 \cdot i$$

$$z_1 = 18 \cdot 2,07$$

$$z_1 = 37,31 \text{ zubu}$$

Pro rozetu při středu kola můžeme vybrat 36 nebo 38 zubů. Převod bude řetězový. Kvůli jednoduchosti provedení a vysoké účinnosti přenosu mechanické energie. Nevýhodou oproti řemeni je nutnost mazání. Převod a převod točivého momentu se velmi málo změní použitím rozety o 36 zubech ($i = 2$) nebo o 38 zubech ($i = 2,11$).

Tab. 4.2: Tabulka přepočtu hodnot pro řetězový převod

Člověk				EC motor	
$P_{\text{mech}\check{c}}$	K_{ad}	$M_{\check{c}}$	i	n_m	M_m
[W]	$[\text{min}^{-1}]$	[Nm]	[-]	$[\text{min}^{-1}]$	[Nm]
100	57,0	16,75	2,07	118,2	8,08
200	70,0	27,28	2,07	145,1	13,16
300	86,0	33,31	2,07	178,3	16,07
400	99,0	38,58	2,07	205,2	18,61
500	113,6	42,03	2,07	235,5	20,28

Výpočet momentu na klíce pedálu v tabulce 4.1. pro mechanický výkon cyklisty 500 W.

$$M_{\check{c}} = \frac{P_{\text{mech}\check{c}}}{\omega}$$

$$M_{\check{c}} = \frac{P_{\text{mech}\check{c}}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{K_{ad}}{60 \text{ s}}}$$

$$M_{\check{c}} = \frac{500 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{113,6 \text{ min}^{-1}}{60 \text{ s}}}$$

$$M_{\check{c}} = 42,03 \text{ Nm}$$

Výpočet otáček a momentu motoru

$$n_m = Kad \cdot i$$

$$n_m = 57,0 \text{ min}^{-1} \cdot 2,07$$

$$n_m = 118,2 \text{ min}^{-1}$$

$$M_m = \frac{M_{\check{c}}}{i}$$

$$M_m = \frac{16,75 \text{ Nm}}{2,07}$$

$$M_m = 8,08 \text{ Nm}$$

Důležité parametry určující výběr daného motoru jsou vyjma jmenovitého napětí, proudu, otáček a výkonu jeho konstanta $C\phi$ [Wb]. Jestliže se rotor motoru otáčí, pohyb permanentních magnetů zapříčiní indukci napětí ve statorových cívkách. Toto napětí je přímou úměrou závislé na rychlosti otáčení rotoru a platí pro něj následující rovnice

$$U_m = B \cdot N \cdot l \cdot r \cdot \omega,$$

Kde označení veličin:	U_m	[V]	indukované napětí
	B	[T]	magnetická indukce
	N	[-]	počet závitů cívky
	r	[m]	poloměr rotoru
	ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost otáčení rotoru

Indukované napětí lze také vyjádřit jako poměr úhlové rychlosti a napěťové konstanty

$$U_i = C\phi\omega$$

Konstanta $C\phi$ představuje poměr mezi otáčkami naprázdno a napětím na svorkách stroje. Druhá uvedená konstanta slouží pro určení průběhu momentu motoru v závislosti na proudu podle vztahu

$$M = C\phi I.$$

Moment je tedy přímo úměrný odebíranému proudu.

Tab.4.2: Předpokládané svorkové napětí EC motoru jako generátoru

EC motor			
n_m	M_m	U_m	$P_{\text{mech}\check{c}}$
[min ⁻¹]	[Nm]	[V]	[W]
118.16	8.08	12.45	100.0
145.11	13.16	15.24	200.0
178.28	16.07	18.72	300.0
205.23	18.61	21.55	400.0
235.49	20.28	24.73	500.0

Výpočty vztahující se k tabulce 4.2.

Výpočet konstanty motoru:

$$c\phi = \frac{U_{svorkové}}{\omega}$$

$$c\phi = \frac{U_{svorkové}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_0}{60 \text{ s}}}$$

$$c\phi = \frac{24,73 \text{ V}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{235,5 \text{ min}^{-1}}{60 \text{ s}}}$$

$$c\phi = 1,0028 \text{ V} \cdot \text{s}$$

Předpokládané přibližné napětí na svorkách motoru:

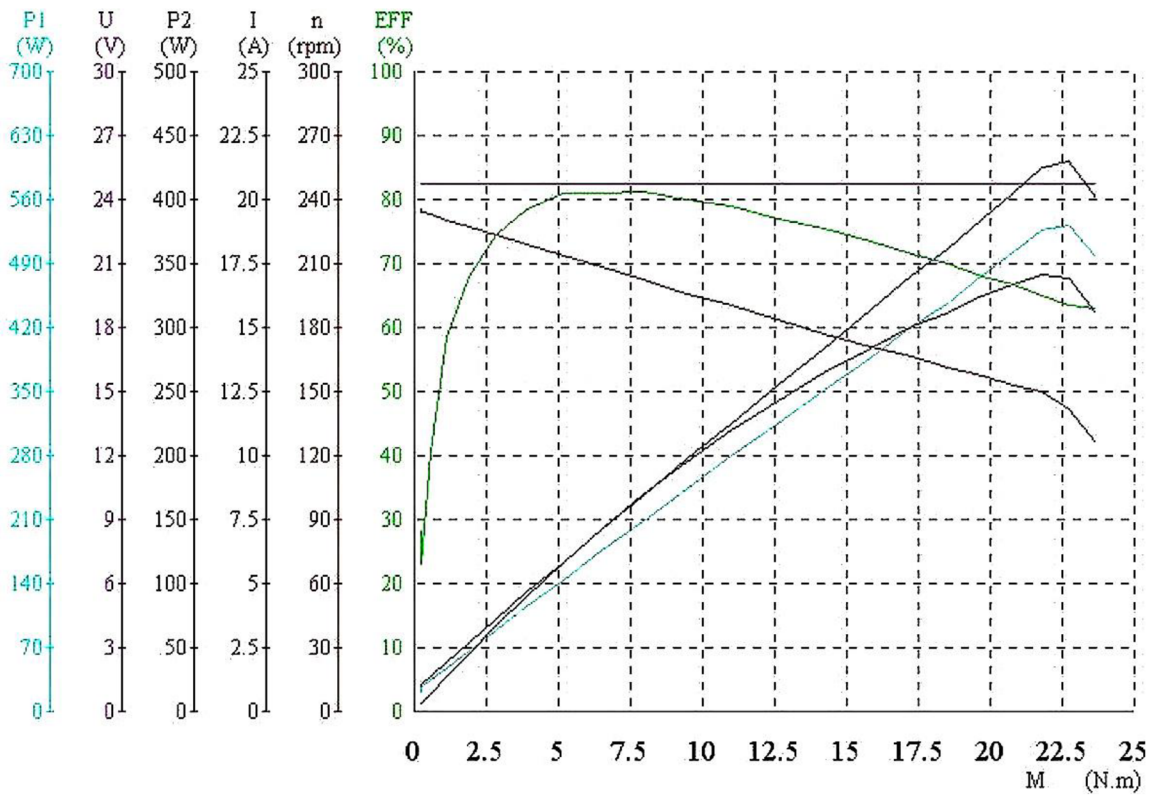
$$U_m = c\phi \cdot \omega_m$$

$$U_m = c\phi \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_m}{60 \text{ s}}$$

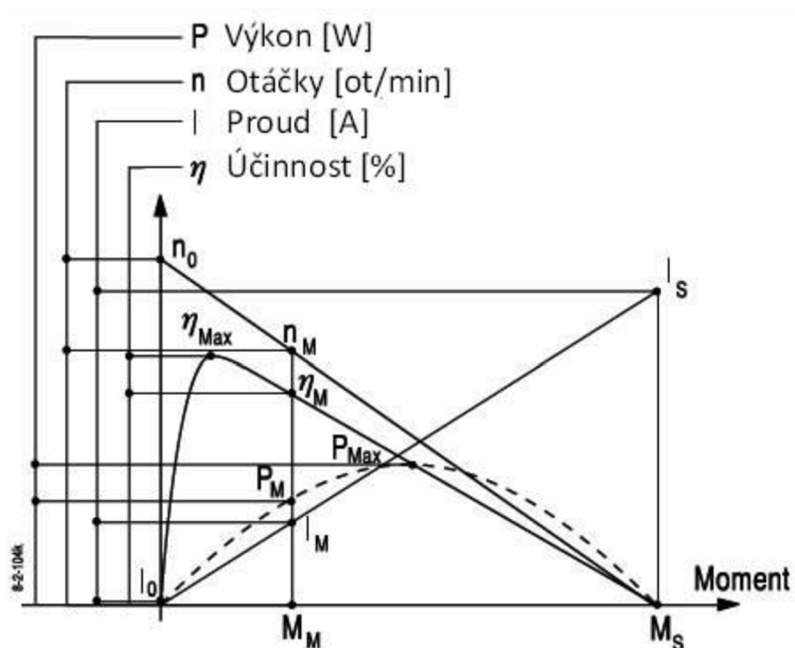
$$U_m = 1,0028 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 118,16 \text{ min}^{-1}}{60 \text{ s}}$$

$$U_m = 12,45 \text{ V}$$

Na následujícím obrázku je ukázána momentová charakteristika $n=f(M)$ zvoleného EC motoru. Parametry v obrázku 4.4. jsou určující pro výběr vhodného motoru pro danou aplikaci. [A]



Obr. 4.3: Charakteristiky vybraného EC motoru [A]



Obr. 4.4: Charakteristiky BLDC motoru [B]

Kde označení veličin:

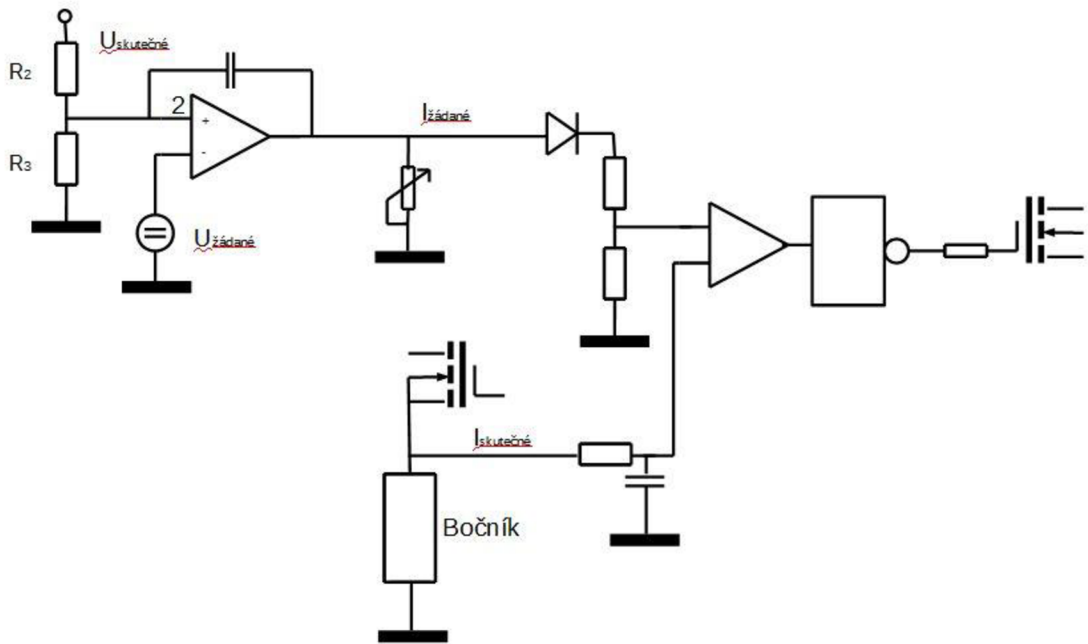
- M_S [Nm] počáteční moment
- M_M [Nm] jmenovitý moment
- n_0 [min^{-1}] otáčky naprázdno

I_0	[A]	proud naprázdno
I_M	[A]	jmenovitý proud
I_S	[A]	počáteční proud
P_M	[W]	jmenovitý výkon
P_{Max}	[W]	nejvyšší výkon
η_M	[%]	účinnost při jmenovitém zatížení
η_{Max}	[%]	nejvyšší účinnost

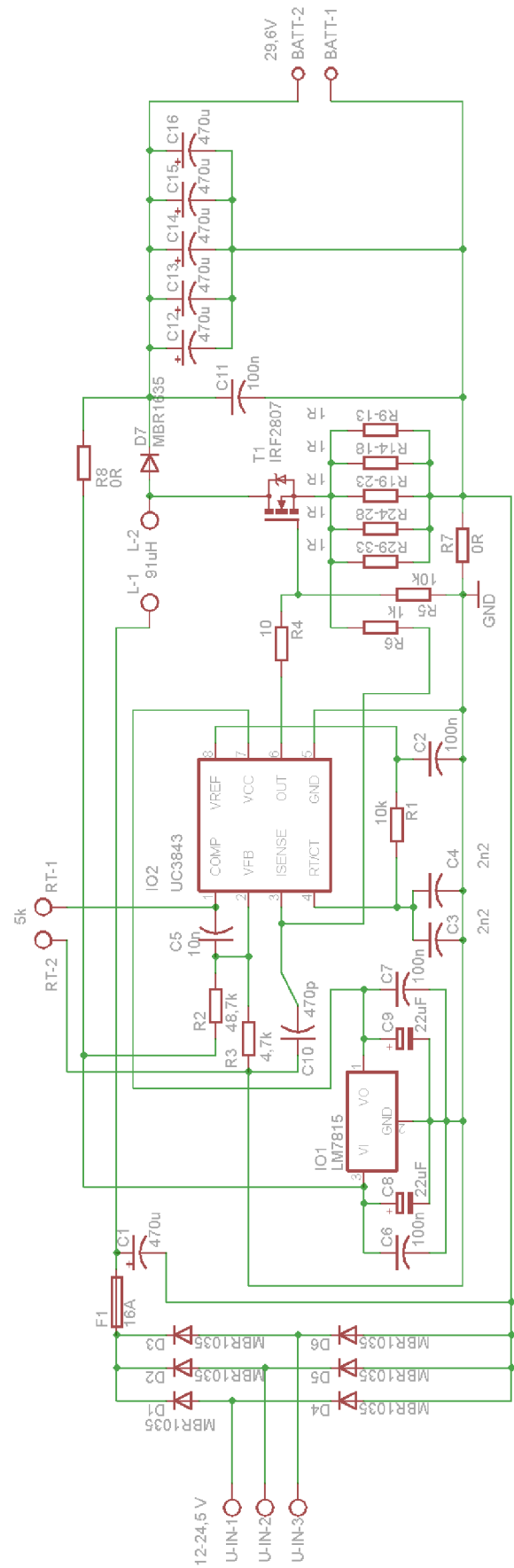
Volba momentu, zátěže, je pro cyklistu důležitá. Občasným jezdčům na kole častěji vyhovuje menší kadence šlapání s větším silovým záběrem. Naopak sportovní jezdci preferují vyšší kadenci s menším zatížením, což je navíc méně náročné i pro vazy a klouby. Proto je důležitou funkcí navrhovaného zařízení možnost nastavovat moment při šlapání. Pro EC motory je moment přímo úměrný proudu, který odebírá (a naopak při generátorovém režimu vytékajícímu proudu). Proto budeme měnič řídit přibližně na střední velikost proudu, který bude proudit z motoru.

5 ŘÍDÍCÍ OBVODY

Filosofie řízení rotopedu vychází z fyziologické charakteristiky cyklisty a z požadavku na nabíjení akumulátoru. Z výše uvedeného vyplývá, že první požadavek by byl splněn v případě řízení na konstantní proud odebíraný z motoru. Dále na výstupu musí být omezeno maximální nabíjecí napětí akumulátoru. Struktura řízení sestává z obvodu UC3843, který v sobě obsahuje tzv. chybový zesilovač. Ten je v našem případě zapojen jako integrační regulátor se vstupním údajem o velikosti $U_{skutečné}$ pomocí odporového děliče R_2 , R_3 . Výstupem tohoto regulátoru je žádaná hodnota proudu. Tuto hodnotu omezujeme potenciometrem, kterým nastavíme přibližně konstantní proud na vstupu step-up měniče (výstup z motoru). Jedná se o paralelní strukturu, kdy je dominantní nižší hodnota napětí, či-li žádaného proudu. Informaci o velikosti procházejícího proudu získává regulátor signálem z bočnicku, který je zapojen mezi silovou zem a MOS-FET tranzistor. Tento signál je RC – článkem filtrován.



Obr. 5.1: Blokové schéma řízení - regulátor



Obr. 5.2: Schéma zapojení

6 SILOVÉ OBVODY

Nejprve výpočet minimálního vstupního napětí z motoru do měniče.

Pro minimální funkci měniče jsem po vyzkoušení na rotopedu zvolil 57 min^{-1} . Je to optimální kadence šlapání pro generování výkonu 100 W. Nižší otáčky a tedy znatelně menší indukované napětí v motoru, už nebudeme při návrhu neuvažovat. Je to nepříjemně pomalé pro cvičícího a předpokládáme, že cyklista chce vydat alespoň nějaký rozumný malý výkon. Naopak nejvyšší vstupní napětí je při maximálním výkonu. A sice 24,73 V.

Při uvažované kadenci šlapání a mechanickém výkonu cvičence 100 W, je napětí přibližně:

$$U_{min} = 12,5 \text{ V}$$

$$P_{elm} = 70 \text{ W}$$

A při maximálním výkonu cyklisty 500 W je napětí:

$$U_{max} = 24,7 \text{ V}$$

$$P_{elm} = 330 \text{ W}$$

Pracovní střída tranzistoru se bude měnit právě podle vstupního napětí do měniče a přenášeného výkonu. Tato je definována rovnicí:

$$s = \frac{t_z}{T}$$

Kde označení veličin:	s	[-]	pracovní střída
	t_z	[s]	čas, po kterou je tranzistor zapnut
	T	[s ⁻¹]	je perioda spínání

Pro maximální střídu platí

$$s_{max} = \frac{t_{zmax}}{T} = \frac{t_{zmax}}{t_{zmax} + t_{dmax}} = \frac{1}{1 + \frac{U_{IN}}{U_{OUT}}} = 1 - \frac{U_{IN}}{U_{OUT}}$$

Kde označení veličiny:	s_{max}	[-]	maximální pracovní střída
	t_{dmax}	[s]	mezní doba demagnetizace cívky, která trvá právě do konce pracovní periody T
	t_{zmax}	[s]	mezní doba otevření tranzistoru
	U_{IN}	[V]	vstupní napětí do měniče
	U_{OUT}	[V]	požadované výstupní napětí z měniče
	U_{CEmax}	[V]	maximální pracovní napětí tranzistoru, které volíme

Spínací tranzistor je nutno volit podle výstupního napětí, kterým je namáhán. Je nutno též připočítat rezervu z důvodů napěťových překmitů způsobených parazitními vlivy.

Byl zvolen tranzistor MOSFET IRF2807, který má $U_{DSmax} = 55 V$.

Nyní výpočet cívky potřebné k vlastnímu zvyšujícímu měniči

Pro zvolený spínací kmitočet 43 kHz už nemůžeme využít jádra, které se skládá z transformátorových plechů. Potřebujeme jádro feritové.

Při napětí 12 V potřebujeme přenést výkon P_{elm} do cca 70 W. A při napětí 24,5 V výkon P_{elm} cca 330 W. Napětí na straně akumulátorů budeme udržovat na hladině 29,6 V.

Pro vypočtení pracovní střídy platí při zanedbání úbytku na diodě:

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{1}{1-s}$$

Když úbytek na diodě zahrneme, vztah se změní na:

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{1}{1-s} - U_{SD}$$

Kde označení veličiny: U_{SD} [V] úbytek napětí na Schottkyho diodě

$$s = 1 - \frac{U_{IN}}{U_{OUT} + U_{SD}}$$

$$s_A = 1 - \frac{12 V}{29,6 V + 0,5 V} = 0,6$$

$$s_B = 1 - \frac{24,5 V}{29,6 V + 0,5 V} = 0,19$$

Zvlnění proudu ΔI na indukčnosti L_1 bylo zvoleno 5 A.

$$\Delta I = \frac{U_{OUT} \cdot (1-s) \cdot T}{L_1}$$

Neboli

$$L_1 = \frac{U_{OUT} \cdot (1-s)}{\Delta I \cdot f}$$

$$L_{1A} = \frac{29,6 V \cdot (1-0,61)}{5 A \cdot 43 \cdot 10^3 Hz} = 2,08 \cdot 10^{-5} H$$

$$L_{1B} = \frac{29,6 V \cdot (1-0,19)}{5 A \cdot 43 \cdot 10^3 Hz} = 9,05 \cdot 10^{-5} H$$

Vybereme indukčnost větší, aby měnič fungoval za obou podmínek. V našem pokusném zařízení byla použita indukčnost $L_1 = 7,1 \cdot 10^{-5} H$, která byla dostupná na skladě.

Nyní spočteme nejmenší a největší ss proud do akumulátorů:

$$I_{akumax} = \frac{P_{elm} \cdot \eta_{m\acute{e}ni\acute{c}e}}{U_{OUT}}$$

Účinnost celého měniče $\eta_{m\acute{e}ni\acute{c}e}$ (usměrňovač a step-up) prozatím odhadujeme na cca 81%.

$$I_{akumin} = \frac{70 \text{ W} \cdot 0,81}{29,6 \text{ V}}$$

$$I_{akumin} = 1,9 \text{ A}$$

$$I_{akumax} = \frac{330,0 \text{ W} \cdot 0,81}{29,6 \text{ V}}$$

$$I_{akumax} = 9,0 \text{ A}$$

Pro nabíjení akumulátorů se uvádí doporučený nabíjecí proud velikosti 10 % Ah kapacity. Avšak nepředpokládáme vysokou četnost a délku trvání maximálního vypočteného dobíjecího proudu. Proto bychom zvolili jako vhodné akumulátory dva akumulátory zapojené v sérii s kapacitou 40 - 50 Ah.

Dimenzování tlumivky:

Z tabulky XYZ je zřejmé, že při předpokládaném maximálním výkonu cyklisty bude střední hodnota proudu tlumivkou 13,3 A. Zvlnění proudu bylo zvoleno 5A.

$$I_{Lmax} = 13,3 \text{ A} + 2,5 \text{ A} = 15,8 \text{ A}$$

$$I_{Lmin} = 13,3 \text{ A} - 2,5 \text{ A} = 10,8 \text{ A}$$

Proud cívkou bude v každém cyklu lineárně narůstat z velikosti I_{Lmin} , od počátku sepnutí tranzistoru, až do hodnoty I_{Lmax} , kdy tranzistor vypne, a proud bude opět klesat na počáteční velikost I_{Lmin} . Jedna perioda je převrácenou hodnotou spínacího kmitočtu 43 kHz. Předpokládáme režim spojitých proudů.

Nyní, když známe hodnoty max. a min. proud cívkou, můžeme spočítat její maximální efektivní proud.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt}$$

$$I_{ef} = 13,5 \text{ A}$$

Z něj pak průřez vodiče, když zvolíme proudovou hustotu $\sigma = 3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$.

$$S_{Cu} = \frac{I_{ef}}{\sigma}$$

$$S_{Cu} = \frac{13,5 \text{ A}}{3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}}$$

$$S_{Cu} = 4,5 \text{ mm}^2 \text{ a průměr vodiče } d_{Cu} = \sqrt{\frac{S_{Cu} \cdot 4}{\pi}} = 2,4 \text{ mm}$$

Mezi často používané magnetické materiály patří ferity. Jsou běžně k dispozici na výrobu magnetických jader. K saturaci dochází při nižších hodnotách indukce, typicky

do 0,4 T. V řešeném problému se nám jeví jako optimální vybrat feritové jádro z materiálu typu 26 a to v provedení toroidním, T 200-26.

Počáteční permeabilita materiálu č. 26 je 75 Hm^{-1} . Jedná se o mix hydrogenizovaného karbonylu s vysokou relativní permeabilitou.

Max. sycení pro hrubý výpočet jsme zvolili na 0,3 T.

Výpočet počtu závitů cívky

$$R_m = \frac{l_j}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S_j}$$

$$N = \sqrt{L_1 \cdot R_m}$$

Kde označení veličiny:	R_m	$[H^{-1}]$	magnetický odpor
	l_j	[m]	délka střední siločáry
	μ_r	[-]	relativní permabilita
	S_j	$[m^2]$	průřez feromagnetického jádra
	N	[-]	počet závitů na jádře

$$R_m = \frac{129,7 \cdot 10^{-3} m}{75 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 133 \cdot 10^{-6} m^2}$$

$$R_m = 1,035 \cdot 10^6 H^{-1}$$

$$N = \sqrt{91 \cdot 10^{-6} H \cdot 1,035 \cdot 10^6 H^{-1}}$$

$$N = 30,69 z \approx 31 z$$

Další výpočty byly realizovány programem „mini Ring Core Calculator 1.2“, který pracuje přímo s katalogovými údaji od výrobce AMIDON. Počet závitů mi potvrdil i výsledek z programu. Tudiž díky rozměrům feromagnetického jádra je délka vodiče v ideálním případě 146 cm. Tepelné ztráty v jádře jsou $132 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-3}$. Objem jádra V_j je z katalogu výrobce $17,25 \text{ cm}^3$, tedy 2,28 W. Takový výkon tepla způsobí ohřev jádra cca o 15°C oproti okolí.

Pro výpočet ztrát ve vinutí je odpor vodiče 6,04 m Ω . Tedy ztrátový výkon je 1,22 W.

Celkové vzniklé ztráty na tlumivce jsou tudíž pouze 3,5 W a ohřev jádra při velikosti jeho povrchu nebude nijak dramatický.

Dimenzování součástek

Proudové dimenzování diod trojfázového usměrňovače (D1 až D6):

Pro funkci EC motoru, který je zapojen do hvězdy, jsou vždy připojené dvě fáze. Maximální výkon elektromotoru s určitou rezervou je 350 W při jmenovitém napětí. To pro nás znamená že jednou usměrňovací diodou protéká maximálně cca 8 A a to pouze po $\frac{2}{3}$

celkového času. Maximální napětí na usměrňovacích diodách je dáno jmenovitým napětím motoru. S rezervou budeme uvažovat závěrné napětí velikosti 35 V a střední proud 10 A. Vybrány jsou diody MBR1035CT, pouzdro TO-220AC. V pokusném obvodu jsme napájeli měnič přímo bez usměrňovače z výkonného stabilizovaného laboratorního zdroje Statron s rozsahem napájení 0-32 V/0-24 A.

Dioda D7:

Pro diodu, která je součástí step-up měniče, vybíráme výkonnější, MBR1635. Která také má pouzdro TO-220AC. V pokusném zapojení na univerzální desce byla použita Schottkyho dioda MBR4045 se středním proudem 40 A a závěrným napětím 45 V.

Spínací tranzistor

Podle vypočteného maximálního proudu cívkou a velikosti napětí výstupu 29,6 V + 0,5 V úbytek na Schottkyho diodě, volíme tranzistor opět s rezervou a to pro proud 110 A a napětí 55 V, $R_D = 8 \text{ m}\Omega$. Tranzistor IRF3205 s pouzdem TO220. V pokusném zapojení byl použit tranzistor IRF2807, který má parametry $I_{max} = 82 \text{ A}$, $U_{DSmax} = 75 \text{ V}$, $R_D = 13 \text{ m}\Omega$, neboť byl k dispozici na skladě.

7 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

Návrh schématu a desky plošných spojů byl proveden v programu Eagle 6.5.0. Z nakresleného schématu jsme vytvořili obrázek desky plošných spojů s těmito parametry:

- tloušťka měděné fólie 70 μm
- minimální izolační vzdálenost vodivých cest je stanovena pro 60 V na 1 mm
- proudová zatížitelnost plošných spojů je cca 5 x vyšší, v závislosti na dovoleném oteplení vodivé cesty, oproti lakovaným měděným vodičům kruhového průřezu
- dle grafu proudové zatížitelnosti pro oteplení $\Delta T = 30 \text{ K}$ [15]
 - 0,2 mm ~ 1,4 A (trvale)
 - 2,5 mm ~ 10 A (trvale)

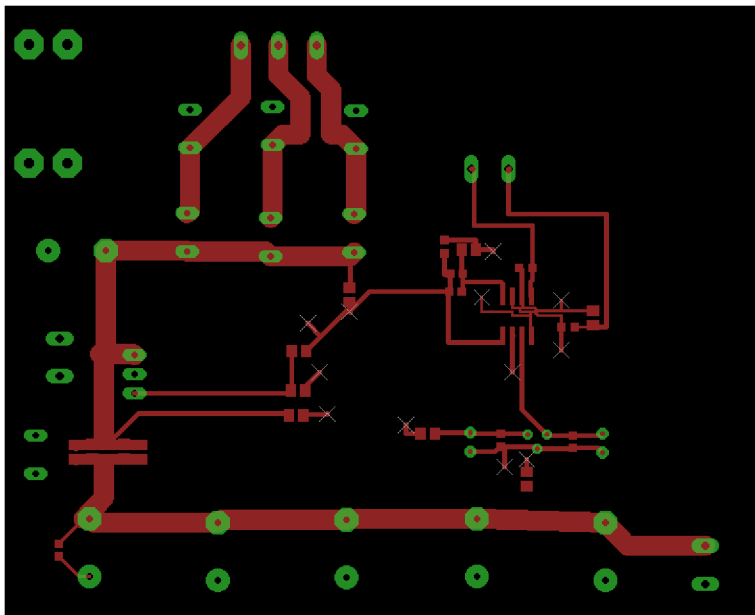
Tab. 7.1: Seznam použitých součástek

Seznam použitých součástek					
Druh součástky	Označení	Hodnota	Pouzdro	Poznámka	Výrobce
Rezistory	R ₁ , R ₅	10	k Ω	0805	Vishay
	R ₂	48,7	k Ω	0805	Vishay
	R ₃	4,7	k Ω	0805	Vishay
	R ₄	10	Ω	0805	Vishay
	R ₆	1	k Ω	0805	Vishay
	R ₇ , R ₈	0	Ω	0805	Spojka Vishay
	R _T	5	k Ω		Trimr Vishay
	R ₉ - R ₃₃	1	Ω	0805	Bočník Draloric

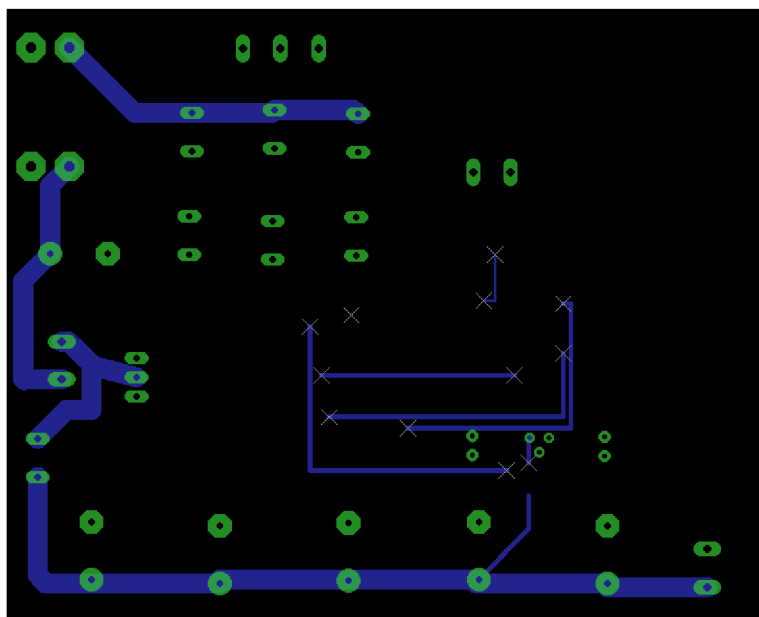
Kondenzátory	C ₁ , C ₁₂ - C ₁₆	470	μF	E7,5-16	elektrolyt	PANASONIC
	C ₂ , C ₆ , C ₇ , C ₁₁	100	nF	0603	keramický	
	C ₃ , C ₄	2,2	nF	0603	NPO	HITANO
	C ₅	10	nF	0603		
	C ₈ , C ₉	22	μF	E2,5-5		HITANO
	C ₁₀	470	pF	0603		YAGEO
Diody	D ₁ - D ₆	MBR1035		TO-220	standing	ON Semi
	D ₇	MBR1635		TO-220		ON Semi
Integr. obvody	IO ₁	LM7815		TO-92		
	IO ₂	UC3843		SO-8		
Tlumivka	L ₁	91	μH	T 200-26	31 závitů	
Pojistka	16A/250V				6x25 mm	GES AC F/16A Auto
Tranzistor	T ₁	IRF3205		TO-220		N-FET
Šroubkové svorky - 2 x dvě zdičky v řadě, 1 x tři zdičky v řadě						

Základní verze desky plošných spojů:

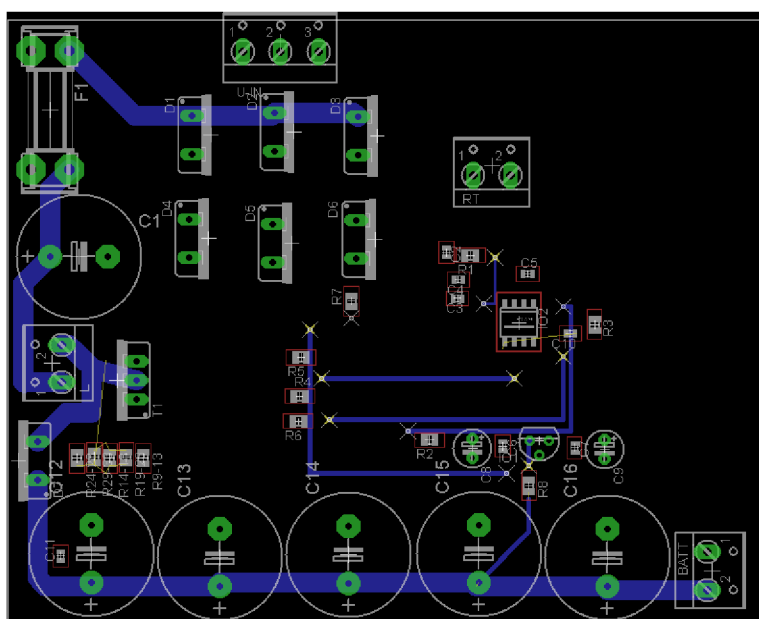
Horní strana:



Spodní strana:



Včetně součástek:



8 SROVNÁNÍ S PODOBNÝMI ZAŘÍZENÍMI

Při vyhledávání informací jsem narazil na výrobky, které fungují na stejném principu, ale jejich užitné hodnoty jsou značně rozdílné.

Výrobek německé firmy INNOVIT Eco Trainer Ergometer je plnohodnotný rotoped s nadstandartními funkcemi. Kromě údajů o ujeté vzdálenosti, tepu atd. lze na něm zvolit náhodný program, který trasu, zatížení, volí sám, či přímo zvolit terén, v němž by se cyklista pohyboval na kole. Technické parametry rotopedu jsou výrazně nižší oproti zde navrhované

variantě. Za hodinu jízdy je možné vyrobit až 100 Wh, které lze uložit do baterie, která není specifikovaná kromě kapacity 500 Wh, anebo ji přímo využít k nabíjení, napájení přístrojů napětím 230 V, či USB 5 V. Počet tréninkových programů je 15. Převod je řešen plochým drážkovaným řemenem. Velikost zátěže je závislá na otáčkách. Jedinou slabinou tohoto výrobku je jeho poměrně vysoká cena stanovená na 1200 €.

The power plus od firmy Cougar je malý generátor s bezúdržbovým olověným akumulátorem 12V/7Ah. Jedná se pouze o spodní část rotopedu bez řídítek a sedátka. Stroj položíte na zem a sedíte při šlapání na židli. Tento výrobek je vybaven střídačem na 230 V s max. výstupním výkonem 100 W a říditelným zdrojem malého napětí. Kromě toho obsahuje svítidlo a nabíječku, která akumulátor nabije ze sítě. Podle údaje doby nabití akumulátoru šlapáním (9 hod.) a použití bezúdržbového akumulátoru (VRLA) je výstupní elektrický výkon velmi malý. Nasvědčuje tomu i celoplastové provedení zařízení, vyjma klik šlapátek. Internetová cena dosahuje 101,6 £ (v přepočtu cca 3300 Kč).

Další výrobky podobného ražení zajišťují šlapáním pouze napájení sama sebe pro zobrazování údajů na displeji, což jsou odběry max. do jednotek Watt.

9 ZÁVĚR

V této práci je uveden návrh řešení elektrické části rotopedu. Práce začíná teoretickou částí, která postupně přechází ve vlastní praktický návrh zařízení.

Jako elektromechanický měnič byl zvolen EC motor používaný pro pohony elektrokol určený k montáži do náboje zadního kola. Jmenovité napětí elektromotoru je 24 V a jmenovitý výkon je 500 W. Rozsah pracovních otáček je vhodný pro jednoduchý řetězový převod od cyklisty. A to do rychla. Optimální převod, podle dodávané rozety k motoru a počtu zubů vybrané rozety ke šlapátkům, se pohybuje těsně nad dvěmi. Pro charakterizování cyklisty jsme použili zprávu o biologickém experimentu sledujícím mimo jiné i kadenci šlapání a podávaný výkon cvičence. Mechanický a potažmo elektrický výkon tekoucí z motoru bude kolísat v závislosti na kondici cvičícího a délky cvičení. Proto pro nabíjení dvou olověných automobilových akumulátorů v sérii je nutné použít zvyšující měnič pro docílení nabíjecí U-charakteristiky s omezením maximálního proudu. Měnič získává informace o velikosti průchozího proudu pomocí bočnicku spojeného se spínacím výkonovým tranzistorem MOS-FET. Konstantní napětí na výstupu udržuje napěťovým vstupem z odporového děliče. Žádané zatížení na klíce šlapátka, moment, si cyklista nastaví potenciometrem, který ovlivňuje velikost středního proudu odebíraného z motoru v generátorovém režimu.

Pro vytvoření výrobní dokumentace byl využit program EAGLE 6.5.0. Zpracování schématu bylo následováno návrhem desky plošných spojů.

Funkci měniče jsme měli možnost vyzkoušet v praxi. Na univerzální desce jsme jej spájeli ze součástek dostupných v laboratoři ústavu. A tento pak napájeli z výkonného regulovatelného laboratorního zdroje pro nabíjení svou autobaterií. V obrazové příloze jsou fotografie.

Pro pokračující práci uvažujeme o ochraně akumulátoru proti přebíjení s nastavením napěťového stropu. V případě dalšího dobíjení již přicházející výkon zmaříme, aby nedocházelo k zbytečnému přebíjení akumulátorů a jejich plynování.

LITERATURA

[1] ARENDÁŠ, Miroslav a Milan RUČKA. *Nabíječky a nabíjení*. 2., aktualizované vyd. Praha: Ingara, 1997, 101 s. ISBN 80-860-5629-5.

[2] MACINTOSH, Brian R., Richard R. NEPTUNE a John F. HORTON. *Cadence, power and muscle activation in cycle ergometry*. Calgary. 7 s. Experiment. University of Calgary. Human Performance Laboratory, Faculty of Kinesiology.

[3] JELEČEK, Ondřej. *Nabíječka olovených akumulátorů*. Brno, 2013. 48s, 24 příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ing. Pavel Tošer.

[4] ŠIMON. ATAS ELEKTROMOTORY NÁCHOD A.S. *Elektro: BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu*. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2011, roč. 21, č. 10. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/obsah-casopisu/46760.html>. Měsíčník. článkek str. 13-14.

[5] TOMÁŠEK, Zdeněk. *Konstrukce modelářského elektromotoru*. České Budějovice, 2007. 67 s. Dostupné z: http://theses.cz/id/38nuxj/downloadPraceContent_adipIdno_6618. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Michal Šerý.

[6] HLOUŠ, Jaroslav. *Řídicí jednotka pro malé DC motory s univerzálním softwarovým rozhraním*. Brno, 2008. 84 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Houška, Ph.D.

[7] BLAHA, Jan. *Návrh synchronního stroje s permanentními magnety*. Brno, 2013. 74 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

[8] NEVŘIVÝ, Tomáš. *Kompaktní měnič pro BLDC motor*. Brno, 2013. 62 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Petr Procházka, Ph.D.

[9] PATOČKA, Miroslav. *Výkonová elektronika: BVEL*. Brno, 2010. 140 s. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

[10] ŠKRLA, Milan. *Výkonové tlumivky*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT BRNO. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Miloslav Patočka.

[11] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.

[12] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 393 s. ISBN 80-860-5649-X.

[13] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spinané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 243 s. ISBN 80-860-5691-0.

[14] FIALA, Jan. *Návrh řídicí jednotky pro elektrokolo*. Praha, 2010. 98 s. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Ondřej Vysoký, CSc.

[15] FRIEDRISCHKOVÁ, Kristýna. *Projekt MOST-TECH: Technologie propojení součástek v systému, plošné spoje - materiály, konstrukce, výroba* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2014-08-25]. Projekt MOST-TECH. Dostupné z: mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne%20spoje.pdf. Přípravy výukových materiálů. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

OBRÁZKY

[A] Alibaba Group. ALIBABA GROUP HOLDING LIMITED. *AliExpress.com* [online]. © 2010-2014 [cit. 2014-08-19]. Dostupné z: <http://www.aliexpress.com/item/Free-Shipping-Brushless-Hub-Motor-24V-500W-for-Rear-Wheel/437945868.html>

[B] Princip - servo motor. *Pohonnatechnika.cz* [online]. © 2007-2014 [cit. 2014-08-20]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/servo-motor>

OBRAZOVÁ PŘÍLOHA

Vyrobený pokusný zvyšující měnič:

