

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Přenosný zdroj elektrické energie poháněný spalovacím
motorem**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek STEJSKAL**
Osobní číslo: **E12N0093P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Přenosný zdroj elektrické energie poháněný spalovacím motorem**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Navrhňte přenosný zdroj elektrické energie (DC 12V, popř. AC 1f/230V/50Hz, s výstupním výkonem cca 300W) poháněný spalovacím motorem. Při návrhu berte ohled zejména na hmotnost, rozměry, cenu a dostupnost součástek.
2. Navržené zařízení bude obsahovat regulátor otáček spalovacího motoru, regulátor výstupního napětí, ochrany proti přetížení a signalizaci poruchových stavů.
3. Dle možností laboratoře sestavte funkční model navrženého zařízení a ověřte jeho parametry.
4. Porovnejte navržené zařízení s komerčně dostupnými přenosnými zdroji elektrické energie.
5. Zhodnoťte navržené zařízení (případě uveďte možnosti dalšího vylepšení či rozšíření).

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

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

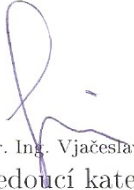
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

V diplomové práci je řešen návrh přenosného zdroje elektrické energie poháněného spalovacím motorem, který by byl vhodný pro turistiku a expedice. Návrh je proveden s ohledem na co nejnižší hmotnost, rozměry, cenu a snadnou výrobu zdroje. Návrh se opírá o experimentální ověření vhodnosti použitých řešení. Dále je provedeno sestavení funkčního modelu, jeho testování a diskuze výsledků. Navržený přenosný zdroj elektrické energie poháněný spalovacím motorem je též porovnán s ostatními komerčně dostupnými přenosnými zdroji elektrické energie. Následně je zmíněno zhodnocení a možnosti dalšího vylepšení.

Klíčová slova

Přenosný zdroj elektrické energie, generátor, BLDC motor, servo, regulátor napětí, regulátor otáček, step-down, step-up měnič, Arduino , Li-pol akumulátor

Abstract

Portable power supply unit powered by combustion engine

Desing of lightweight, small, inexpensive and easy to assembled power supply unit powered by combustion engine suitable for tourism and expedition is the objective of this master theses. The desing relies on experimental proving used solutions. Functional model is assembled, tested and results are discussed. The desinged portable power supply unit is compared to other commercially available portable power supply units. Evaluation and possible improvements of the desing are mented.

Key words

Portable power supply unit, generator, BLDC motor, servo, voltage regulator, speed governor, step-down converter, step-up converter, Arduino, Li-pol accumulator

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 5.5.2014

Marek Stejskal

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 NÁVRH	11
1.1 SPALOVACÍ MOTOR.....	11
1.2 GENERÁTOR.....	16
1.3 MECHANICKÁ KONSTRUKCE.....	18
1.4 ELEKTRONIKA	25
1.5 ŘÍZENÍ.....	38
2 MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ	46
2.1 MĚŘENÍ BLDC MOTORU.....	46
2.2 MĚŘENÍ MĚNIČE.....	52
2.3 MĚŘENÍ VÝKONŮ	54
2.4 MĚŘENÍ SPOTŘEBY.....	58
2.5 OŽIVOVÁNÍ A DALŠÍ MĚŘENÍ.....	60
2.6 OVLÁDÁNÍ.....	62
3 POROVNÁNÍ S KOMERČNĚ DOSTUPNÝMI ZDROJI	63
ZÁVĚR	67
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	70
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A - TABULKY.....	1
PŘÍLOHA B- ZDROJOVÝ KÓD.....	8

Seznam symbolů a zkratk

C	kapacita	[F]
f	frekvence	[Hz]
I	proud	[A]
K_{ad}	konstanta A/D převodníku	[V/bit]
K_d	konstanta nap. děliče	[-]
K_{dt}	konstanta nap. děliče teploty	[-]
K	konstanta snímání napětí	[V/bit]
K_v	napěťová konstanta motoru	[ot/min/V]
L	indukčnost	[H]
n	otáčky	[ot/min]
m	hmotnost	[kg]
mp	měrná spotřeba paliva	[kg/kWh]
M	točivý moment	[N/m]
pp	počet pólů	[-]
P	výkon	[W]
Q	náboj	[C]
R_{DSon}	odpor D-S MOSFET tranzistoru	[Ω]
t	teplota	[$^{\circ}$ C]
T	čas	[s]
T_{pulz}	čas pulzu	[s]
U	napětí	[V]
V	spotřeba paliva	[l/h]
V_p	měrná objemová spotřeba paliva	[l/kWh]
W_{ug}	požadované napětí generátoru	[V]
ΔI	zvlnění proudu	[A]
ΔU	zvlnění napětí	[V]
ΔP	ztrátový výkon	[W]
ρ	hustota	[kg/m ³]
τ	časová konstanta	[s]
η	účinnost	[%]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
NPU	napěťový pulzní usměrňovač	

Úvod

V této diplomové práci je nejprve zmíněna problematika komerčně dostupných spalovacích motorů a elektrických strojů vhodných pro použití v přenosném zdroji elektrické energie. Následně je proveden návrh přenosného zdroje elektrické energie a realizace jeho modelu. Poté je realizovaný model otestován, zhodnocen a porovnán s komerčně dostupnými přenosnými zdroji elektrické energie.

Hlavní motivací této diplomové práce je ověřit, zda je možné navrhnout a sestavit přenosný zdroj elektrické energie o výkonu cca 300W použitelný pro napájení a dobíjení spotřební elektroniky (vysílačky, mobilní telefony, notebooky) při výletech, expedicích či turistických akcích, kde není dostupná elektrická energie z distribuční sítě, z běžně dostupných sériově vyráběných součástí. Poté ověřit, nakolik je přenosný zdroj elektrické energie funkční a využitelný pro zamýšlený účel. Vzhledem k typu napájených zařízení byl zvolen požadovaný výstupní výkon cca 300W 12V DC. Skutečné napětí by se mělo pohybovat v rozmezí 13,8-14,8V, aby bylo možné eventuálně nabíjet 12V olověný akumulátor, a rozsah napětí by se měl pohybovat v rozmezí 10,8-15V -dle ČSN 30 4002 Elektrická zařízení motorových vozidel. Tuto normu jsem vybral z důvodu pravděpodobného použití nabíječek a napáječů spotřební elektroniky určených do automobilů. Důležitým požadavkem je co nejnižší hmotnost- ideálně do 3kg, co nejmenší rozměry a cena maximálně 5000 Kč za materiál. Vzhledem k nedostupnosti zdroje elektrické energie obdobných parametrů je při návrhu kladen důraz na cenu a dostupnost součástí v ČR, jednoduchost a nenáročnost na strojní vybavení při stavbě tak, aby jej bylo možné sestavit pomocí běžného nářadí a dostupných dílů. Vzhledem k nedostatku informací od výrobců a prodejců dostupných a vhodných spalovacích motorů a generátorů, se návrh opírá o experimentální zjišťování vhodnosti použitých řešení.

1 Návrh

Postup návrhu spočívá nejprve v nalezení vhodného spalovacího motoru, následně generátoru. Poté je zvolen koncept výkonové elektroniky. Následně je sestaven model, při jehož testování je vyvíjeno a upravováno řízení.

Pro pohon přenosného zdroje elektrické energie je možné použít dvoudobý či čtyřdobý spalovací motor v zážehové variantě-spalující automobilový benzín, methanol či směs metanolu s nitrometanem, i vznětové variantě-spalující automobilovou naftu. U zmíněných typů motorů uvažujeme pouze atmosférické plnění, jelikož vzhledem k zamýšlenému výstupnímu výkonu a co nejnižší ceně není přeplňování dostupné a také nutné. Použití Wankelova, či jiných typů motoru, není reálné v důsledku jejich nedostupnosti stejně tak jako použití plynného paliva -LPG, či CNG.

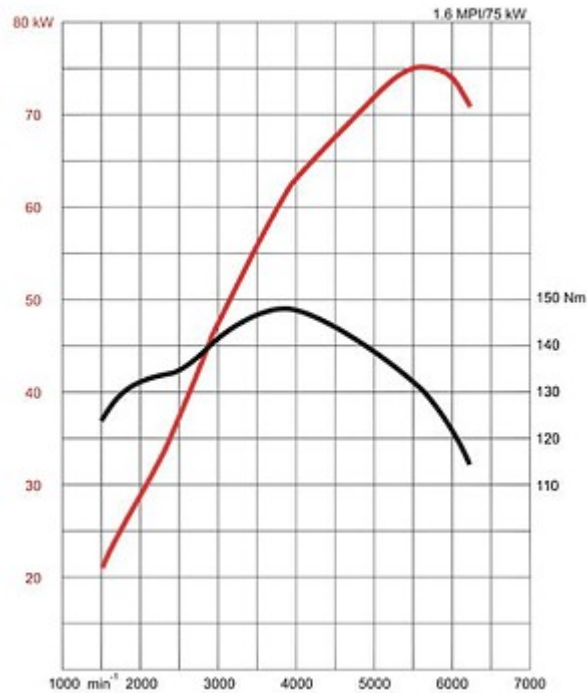
Pro generování elektrické energie je možno zvolit synchronní/BLDC stroj s cizím buzením či permanentními magnety nebo stejnosměrný stroj taktéž s cizím buzením či permanentními magnety.

Pro řízení může být použit mikropočítač, analogové řízení nebo kombinaci obojího. Řízení bude pomocí servomotoru ovládat šoupátko/škrťací klapku karburátoru v závislosti na provozních stavech.

1.1 Spalovací motor

Co se týká požadavků na spalovací motor, musí mít schopnost dodávat vyšší točivý moment v každém okamžiku než jakým jej zatěžuje zátěž, vyjma krátkých přechodových stavů, kdy jej pokrývá energie akumulovaná v setrvačných hmotách či filtračních kondenzátorech. Obecně nejsou spalovací motory konstruovány k poskytování maximálního možného výkonu trvale a tak je nutné, pokud výrobce neudává trvalý výkon, volit maximální výkon vyšší než požadovaný. Pro účely navrhovaného zdroje jsem vybíral spalovací motor s udávaným maximálním výkonem alespoň 860W. Jedná se o hrubý odhad, kdy při předpokladu účinnosti elektrické části 70% včetně generátoru se jedná o dvojnásobek požadovaného výkonu. Vzhledem k tomu, že spalovací motory pracují optimálně s plně otevřenou škrťací klapkou, není vhodné volit příliš silný spalovací motor. Optimální účinnost

mají spalovací motry obvykle v okolí otáček, kdy je k dispozici maximum kroutícího momentu [2]. Obecně mají atmosféricky plněné, zejména zážehové, spalovací motory nezávisle na konstrukci podobný průběh výkonu a kroutícího momentu viz. Obr.1.1-1 , ze kterého vyplývá, že maximální výkon se nachází poblíž maximálních otáček a maximum kroutícího momentu se nachází ve cca 2/3 rozsahu použitelných otáček.



Obr.1.1-1: Charakteristika motoru 1,6MPI 75KW, zdroj:[7]

Pro výběr spalovacího motoru a následnou realizaci elektrické části a řízení by bylo ideální znát průběh výkonu a momentu motoru, grafy spotřeby při různém zatížení, požadavky na chlazení, montáž atp. Tato data však často nejsou dostupná a tak není možné s jistotou určit, který spalovací motor by byl ideální pro dané použití. Co se týká volby paliva, jako ideální se jeví použití vznětového motoru spalujícího naftu či zážehového motoru spalujícího benzín z důvodů ceny a dostupnosti paliva. Dále je možné použít modelářské spalovací motory se žhavicí svíčkou v dvoutaktním či čtyřtaktním provedení spalující směs metanolu, oleje a nitrometanu v různých poměrech, avšak cena paliva je vysoká a závisí na množství nitrometanu ve směsi.

Z výběru typů motoru jsem vyřadil naftové motory, jelikož se vyrábějí pro vyšší výkony a jejich hmotnost nevyhovuje. Obdobně jsou na tom standardně dostupné benzínové spalovací motory, které mají také příliš vysokou hmotnost. Částečně by mohl vyhovovat čtyřtákní motor HONDA GX25 o maximálním výkonu 700W, avšak vzhledem k příliš vysoké ceně 6433Kč a hmotnosti 2,78kg [8], jsem jej zavrhl. Dále by bylo možné využít spalovací motory z levných motorových pil a křovinořezů. Jako ideálního zástupce jsem vybral motorovou pilu HECHT 927 R se spalovacím dvoutákním motorem se zdvihovým objemem 25,4 ccm, výkonem 900W, hmotností těla 3,7 kg a cenou 2000Kč [9]. Vzhledem k hmotnosti, rozměrům a neznámé mechanické konstrukci jsem možnost použití motorů z obdobných výrobků zavrhl.



Obr. 1.1-2: Honda GX25, zdroj:[8]



Obr. 1.1-3: Pila HECHT 927R, zdroj:[9]

Jako další možnost se jeví benzínové letecké modelářské motory o obsahu 9-15ccm, jako ideálního zástupce jsem vybral letecký motor Evolution 10GX s výkonem 1,35kW při 11000 ot/min a hmotností 627g, který patří též mezi nejlevnější s cenou cca 4500 Kč. Jeho nevýhodou je, že se jedná o letecké provedení- je uzpůsoben pro chlazení vrtulí, kterou pohání, a tak by pravděpodobně nestačilo chlazení klasickým ventilátorem. Ačkoli se jedná o jeden z nejlevnějších modelářských benzínových motorů dostupných na trhu v ČR, je jeho cena příliš vysoká.



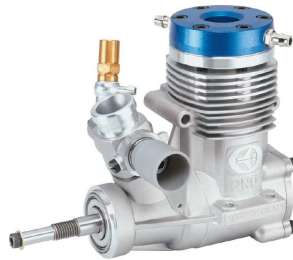
*Obr. 1.1-4: Evolution
10GX, zdroj:[10]*

Dále je možné použít modelářské motory se žhavicí svíčkou, které se vyrábějí v leteckém, lodním, heli a automobilovém provedení. Tyto motory na rozdíl od benzinových vyžadují během startu žhacení žhavicí svíčkou o příkonu cca 1-3W při cca 1,5V a 1,5A dle typu. Dále se tyto motory obtížně startují pod cca 10-15 °C v závislosti na nastavení karburátoru a opotřebení. Proto mohou pro start vyžadovat předehřev. Modelářské žhavicí motory jsou na rozdíl od benzinových motorů velmi citlivé na změnu tlaku vzduchu, jeho teplotu, vlhkost a teplotu paliva. Vzhledem k vysokému kompresnímu poměru a typu paliva (stechiometrický poměr se pohybuje okolo 6:1) jsou též náchylnivé na zablokování v důsledku nasátí většího množství paliva, než je velikost spalovacího prostoru v horní úvratí pístu. Letecké provedení jsem zavrhl kvůli pravděpodobným problémům s chlazením- tyto motory vyžadují silný proud chladícího vzduchu od vrtule, což by chladící ventilátor pravděpodobně nebyl schopen zajistit. Obdobně jsou na tom i heli motory, které mají mírně zvětšená chladicí žebra na hlavě oproti leteckému provedení. Lodní motory jsou nevhodné kvůli chlazení vodou. Jako ideální se jeví motory určené do modelů automobilů, které mají oproti leteckým a heli motorům velký chladič hlavy válce vhodný pro chlazení pomalu proudícím vzduchem. Motory v automobilovém provedení se standardně vyrábí se zdvihovým objemem 2,5-5,9 ccm, kdy se maximální výkon udávaný výrobcem pohybuje v rozmezí 0,8-3,7 kW. Rozsah otáček se pohybuje v rozmezí 3000 až 50000 ot/min dle provedení. Pro zamýšlené použití se hodí motor se zabudovaným tahovým startérem, což bývá standard. Jako vhodného zástupce jsem vybral motor Graupner GM-RACING Nitro Bull 15-Obr.1.1-8 se zdvihovým objemem 2,5ccm, uvedeným maximálním výkonem 960W (1,3 PS) při 28000ot/min, hmotností 270g, rozsahem otáček 4000-30000 ot/min, tahovým startérem a SG hřídelí o průměru 5mm [11]. V hřídeli je umístěn závit M3. Motor stojí 1353

Kč. Tento spalovací motor jsem se rozhodl použít pro návrh vzhledem k nejlepšímu poměru cena/výkon /hmotnost, tahovému startéru a vhodné hřídeli.



Obr. 1.1-5: Letecké provedení motoru, zdroj: [11]



Obr. 1.1-6: Lodní provedení motoru, zdroj:[11]



Obr. 1.1-7: Vrtulníkové provedení motoru, zdroj: [11]



Obr. 1.1-8: Automobilové provedení motoru GM-RACING NITRO BULL15, zdroj:[11]

Vzhledem k nedostupnosti grafu výkonu a točivého momentu je nutné z údaje maximálního výkonu alespoň hrubě odhadnout výkon spalovacího motoru v zamýšleném pracovním bodě, tj. cca 2/3 maximálních otáček. Z údajů výrobce vyplývá, že kroutící moment při maximálním výkonu bude:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P \cdot 30}{n \cdot \pi} = \frac{960 \cdot 30}{28000 \cdot \pi} = 0,33 [Nm]$$

(1.1-1)

Výkon při dvou třetinách maximálních otáček 20000 ot/min a při předpokládaném točivém momentu stejném, nebo vyšším, než při maximálním výkonu, bude odhadovaný výkon motoru alespoň:

$$P = M \cdot \omega = \frac{M \cdot n \cdot \pi}{30} = \frac{0,33 \cdot 20000 \cdot \pi}{30} = 620 [W]$$

(1.1-2)

Z výše uvedeného vyplývá, že spalovací motor by měl vyhovovat.

1.2 Generátor

Co se týče požadavků na generátor, tak je nutné, aby byl schopen dodávat do zátěže napětí cca 15V, proud 22A, tj. výkon cca 330W. pro výstupní napětí 13,8V -kvůli úbytkům na odporech a usměrňovači. Dalším požadavkem jsou pracovní otáčky cca 20000 ot/min při požadavku na maximální proud a napětí a 5mm hřídel. -viz. odstavec mechanická konstrukce.

Jako generátor je možné použít synchronní či stejnosměrné stroje jak s cizím buzením tak s permanentními magnety, avšak vzhledem k nedostupnosti strojů s cizím buzením pro zamýšlený výkon a otáčky, ztrátám v budícím vinutí, mechanickým a elektrickým ztrátám na kroužkách jsem se je rozhodl zavrhnout. Vhodné stejnosměrné motory s permanentními magnety nejsou dostupné- modelářské motory se vyrábí do výkonu cca 200W [2], což je málo, dále by bylo možné použít stejnosměrné motory pro elektrokola, avšak ty nejsou konstruovány na tak vysoké pracovní otáčky.

Co se týče synchronních (BLDC) motorů s permanentními magnety, nabízejí se jejich modelářské varianty a to v provedení s vnějším rotorem tzv. outrunnery a s vnitřním rotorem- tzv. inrunnery a dále motory s diskovým rotorem. Dosahují vysokých výkonů při malých rozměrech a hmotnosti.



Obr. 1.2-1: Motor s vnitřním rotorem, zdroj:[11]



Obr. 1.2-2: Motor s vnitřním rotorem, zdroj:[11]

Vzhledem k tomu, že vybraný spalovací motor potřebuje pro správný chod setrvačnick s dostatečným momentem setrvačnosti, který nemá, bylo by vhodné použít synchronní stroj s masivním diskovým rotorem nebo s vnějším rotorem, jelikož u obou provedení se nachází hlavní část magnetického obvodu na rotujících částech dále od osy, což implikuje větší moment setrvačnosti, než u strojů s vnitřním rotorem obdobných výkonů. Moment setrvačnosti rotoru by potom mohl nahradit setrvačnick spalovacího motoru. Jelikož stroje s diskovým rotorem jsou nedostupné, rozhodl jsem se použít stroj s vnějším rotorem. Stroje s vnějším rotorem mají též lepší chlazení, jelikož chladicí vzduch prochází přímo přes vinutí. Motor jsem vybíral dle kusých parametrů udávaných výrobcem, tj. napěťová konstanta motoru K_v [ot/min/V], maximální napětí, resp. počet článků LI-ion, maximální špičkový proud a špičkový výkon.

Požadované K_v :

$$K_v = \frac{n}{U} = \frac{20000}{15} = 1333 [\text{ot./V}]$$

(1.2-1)

Požadovaný proud:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{300}{13,8} = 22 [A]$$

(1.2-2)

Dle těchto požadavků byl vybrán motor s vnějším rotorem RAY C3536/05 (Obr.:1.2-2)

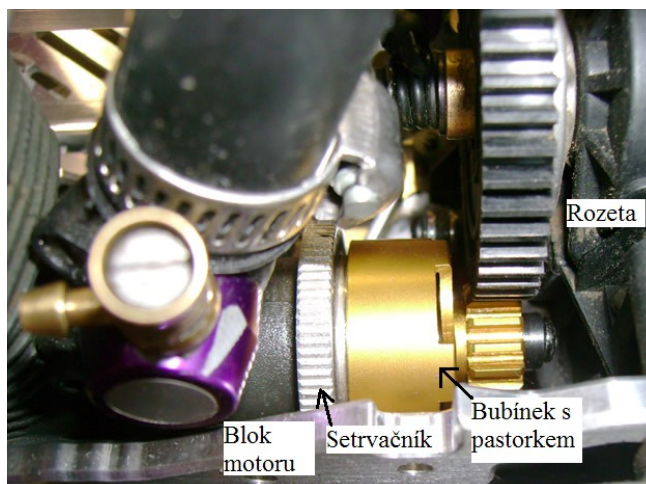
Parametry [11]:

Průměr	35 [mm]
Délka	36 [mm]
Hmotnost	110 [g]
Průměr hřídele	5 [mm]
Napájení	7.4 – 11.1 [V]
Otáčky na Volt	1450 [ot. /min/V]
Výkon špičkový	0.4 [kW]
Proud naprázdno	2.8 [A]
Max. špičkový proud	30 [A]
Vnitřní odpor	32 [mOhm]
Počet pólů	7
Cena	519Kč

1.3 Mechanická konstrukce

Provedení mechanické konstrukce vychází zejména ze způsobu mechanického spojení hřídele spalovacího motoru a hřídele generátoru. Toto spojení je možné zrealizovat buď napřímo nebo převodovkou nebo řemenovým či řetězovým převodem.

Při použití spojení pomocí převodů do pomala by se naskytly větší možnosti pro výběr generátoru, jelikož by bylo možné upravovat otáčky generátoru převodovým poměrem a také možnost nesouosého spojení spalovacího motoru a generátoru, což by mohla být výhoda z hlediska optimalizace celkové velikosti zařízení. Z hlediska běžné dostupnosti a relativně bezproblémového sestavení vyhovuje použití jednostupňové převodovky pro modely automobilů se spalovacím motorem, které se skládají ze setrvačnicku, odstředivé spojky a bubínku s pastorkem, což je umístěno na hřídeli spalovacího motoru a rozety, na kterou je již umístěna hnací hřídel viz. Obr.1.3-1. Nevýhodou tohoto řešení je cena -od cca 1200 Kč, možné problémy s hlučností a vibracemi, nároky na přesnost sestavení a ztráty na převodu .



Obr. 1.3-1: Převod motoru v RC modelu automobilu, zdroj:[12]

Další možností je spojení spalovacího motoru s generátorem napřímo a to za pomoci kardanova závěsu, pružné či pevné spojky, nebo umístěním rotoru generátoru přímo na klikovou hřídel spalovacího motoru. Spojky musí zvládat kromě momentu zátěže také pulzační momenty, jelikož je chod modelářského spalovacího motoru silně nerovnoměrný. Dále by narostla délka soustrojí motor -generátor o délku spojky, což je nevhodné kvůli požadavku na co nejmenší rozměry a také z hlediska nebezpečí mechanické rezonance. Jako použitelná se dle [3] jeví miniaturní vlnovcová spojka BKL003 ECOFLEX s cenou cca 900Kč a obtížnou dostupností v ČR. Přestože se jedná o pružnou spojku, tak při jejím použití by mohl nastat problém s realizací mechaniky, jelikož umožňuje vyosení pouhých 0,1mm. Použitím kardanova závěsu pro spojení spalovacího motoru s generátorem by se dala eliminovat jakákoli nepřesnost při sestavování mechanických částí, avšak běžně dostupné kardany pro zamýšlené využití se vyrábějí buď v plastovém provedení za relativně přijatelnou cenu (cca 200kč), avšak s problematickou kvalitou a bez jakýchkoli údajů o maximálním možném momentu a otáčkách nebo celokovovém provedení avšak s problematickou dostupností a cenou.

Běžně dostupné pevné spojky mají příznivou cenu -cca 100Kč, avšak v době práce na mechanické konstrukci nebyl vhodný rozměr k dispozici, což by vyžadovalo úpravy otvorů zakoupených spojek nebo jejich vlastní výrobu, což by vyžadovalo soustružení.



Obr. 1.3-2: Pevná spojka, zdroj:[11]

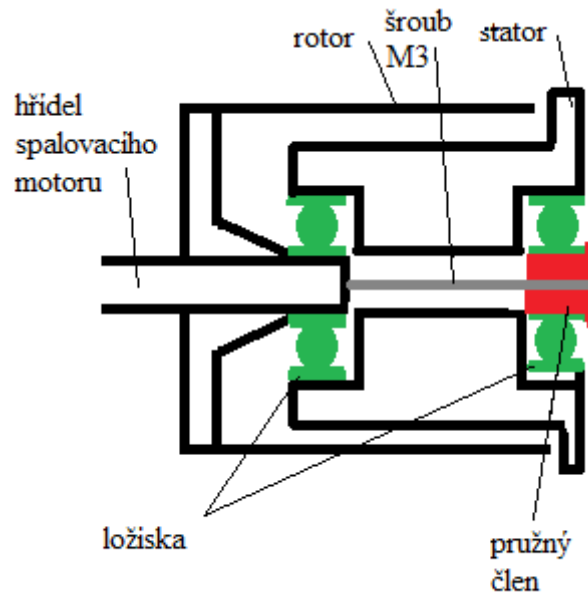


Obr. 1.3-3: Spojka ECOFLEX, zdroj:[13]



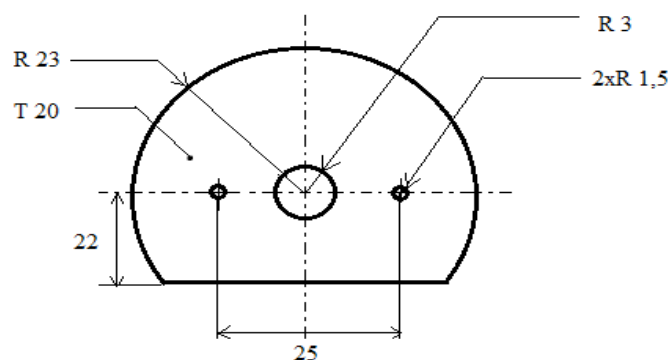
Obr. 1.3-4: Kardan, zdroj:[11]

Z výše uvedených důvodů jsem se rozhodl realizovat spojení spalovacího motoru s generátorem umístěním rotoru generátoru přímo na hřídel spalovacího motoru. Rotor je zajištěn pomocí šroubu opírajícího se do vybroušené drážky v hřídeli spalovacího motoru. Z toho plyne požadavek na průměr osy generátoru a typu osy spalovacího motoru v provedení „SG“, které má část osy bez závitu. Stator je nasunut jedním ložiskem na hřídel spalovacího motoru, které zamezuje radiálnímu pohybu. Ložisko se též opírá o úchyt rotoru na hřídeli. Axiální pohyb je zamezen stažením šroubem, který přitahuje druhé ložisko přes pružný člen k hřídeli spalovacího motoru viz Obr.1.3-5.

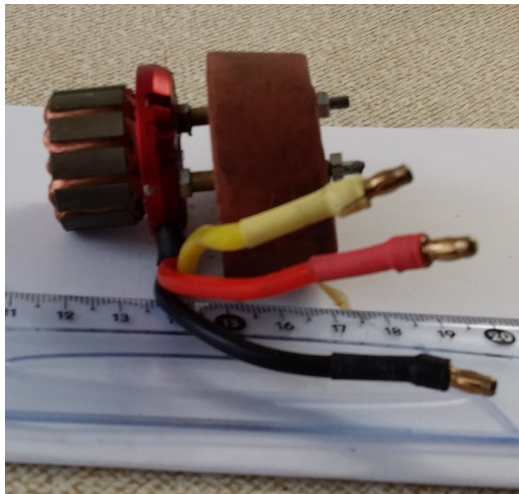


Obr. 1.3-5: Spojení BLDC a spalovacího motoru, zdroj: vlastní tvorba

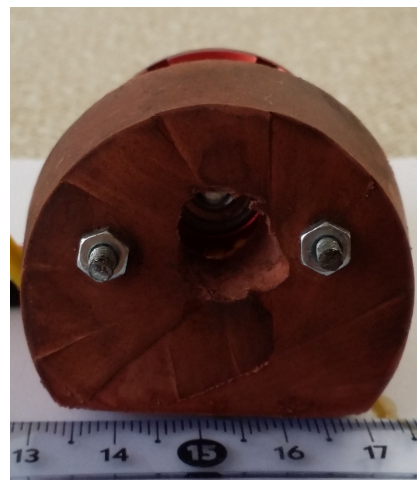
Dále bylo nutné vyřešit uchycení statoru generátoru k rámu. Uchycení generátoru lze řešit pružným či pevným spojem. Jelikož při použití pevného spoje jsou větší nároky na přesnost výroby a možné problémy s vibracemi, rozhodl jsem se použít pružné spojení pomocí silentbloku zhotoveného z pryžové zátky viz. Obr 1.3-6, 1.3-7, 1.3-8. Pryžový silentblok je ke statoru uchycen šrouby M3, které jsou umístěny v silentbloku nalisovaných mosazných trubičkách 4x0,5mm.



Obr. 1.3-6: Silentblok, zdroj: vlastní tvorba



Obr. 1.3-7 Silentblok se statorem,
zdroj: vlastní tvorba



Obr. 1.3-8 Silentblok se
statorem, zdroj: vlastní tvorba

Modélařské servo pro ovládání šoupátka karburátoru jsem zvolil servo standardní velikosti HS-422 s otáčivým pohybem. Pro zvolené použití by se více hodilo linární servo s rozpětím krajních poloh cca 1,1cm, avšak tato serva nejsou snadno dostupná v ČR (v době nákupu dílů nebyla skladem), cena oproti klasickým sevům je cca dvojnásobná. Navíc tato serva nebývají zakrytovaná, takže by bylo nutné řešit ochranu proti prachu či oleji. Mechanické spojení serva a šoupátka karburátoru je znázorněno na Obr. 1.3-9. Propojení je realizováno ramenem ze standardního příslušenství a mosazným plechem do L tloušťky 1mm, který je přiletovaným šroubem M2,5 zašroubován do táhla od šoupátka karburátoru, které je s ním spojeno kulovým kloubem. Spojení s ramenem serva je realizováno šroubem M2,5 vedoucím skrz rameno serva zašroubovaným do přiletované matky na L plechu. Spojení je nutné realizovat pokud možno pevně a bez vůlí.

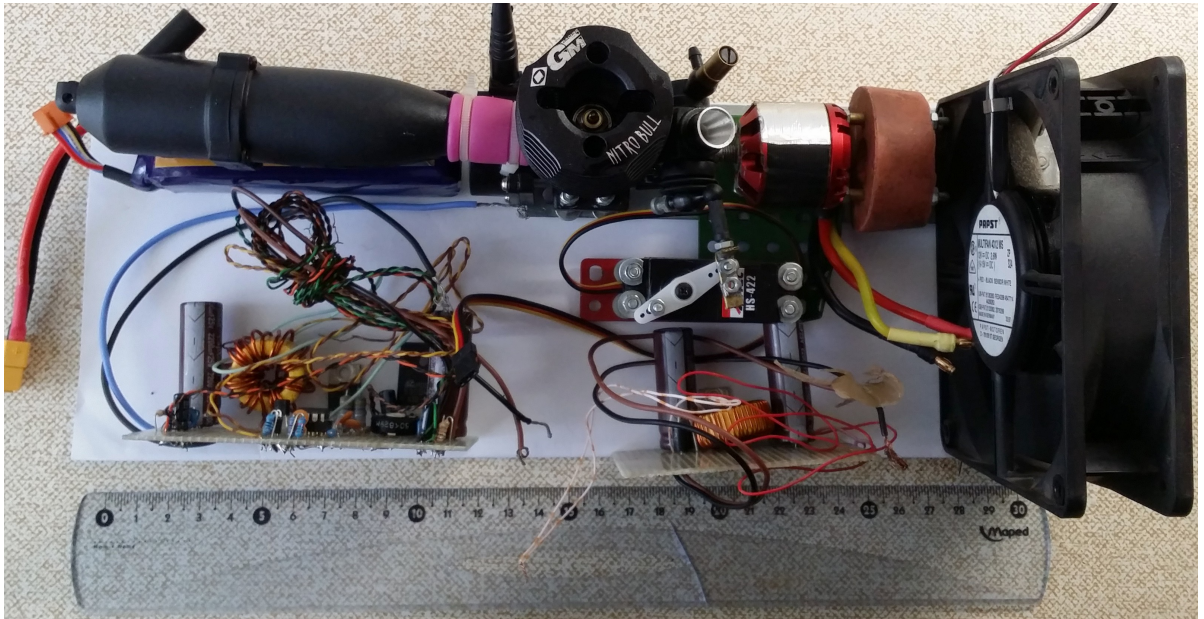


Obr. 1.3-9: Připojení serva k šoupátku, zdroj: vlastní tvorba

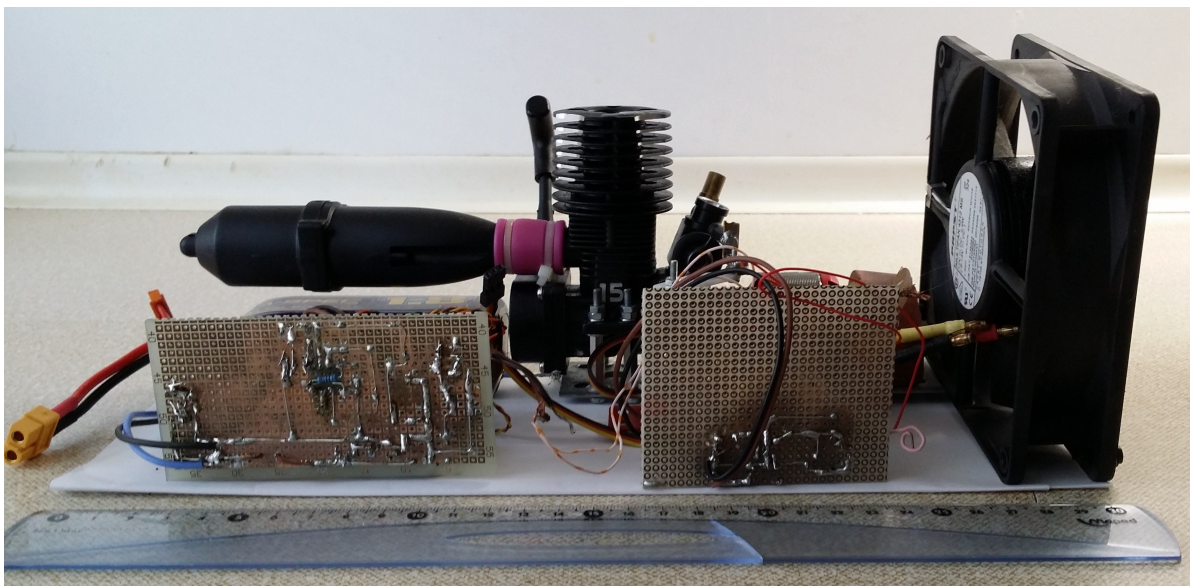


Obr. 1.3-10: Lineární servo, zdroj: [22]

Rám je tvořen 3mm duralovým plechem s otvory pro montáž spalovacího motoru, generátoru a modelářského serva určeného k řízení otáček (posouváním šoupátka karburátoru). Pro účely testování byl plech nahrazen svorníkem standardně dostupným v hobby marketech s rozměry 31x120x3mm. Dural tloušťky 3mm byl zvolen jelikož šasi modelů automobilů poháněných spalovacím motorem se vyrábí ze stejného materiálu stejné tloušťky, z čehož lze usuzovat vhodnost pro zamýšlené použití. Základna má rozměry 31x12cm. Délka byla určena z délky soustrojí spalovacího motoru a generátoru, výfuku a tloušťky ventilátoru. Šířka desky byla zvolena 12cm- jedná se o rozměr použitého ventilátoru. Spalovací motor je přišroubován šrouby M3 k rámu, jako distanční prvek jsou zvoleny matky M3x20 mm. Silentblok je k rámu připevněn pomocí vrtů. Ačkoli se nejedná o ideální řešení (závit vrtu drží přímo za pružný materiál silentbloku), je tento způsob uchycení vzhledem k malému točivému momentu motoru zcela dostačující a během provozu nenastaly s uchycením problémy. Výhodou duralového rámu je dobrá tepelná vodivost-bude využit jako chladič pro výkonové součástky. Kryt je tvořen ohýbaným hliníkovým/duralovým plechem tloušťky 1mm. Vzhledem k tomu, že ani plechový kryt ani podstava nebyla vyrobena, na Obr. 1.3-9 a 1.3-10 je ilustrováno rozložení nejrozměrnějších dílů (motor, generátor, akumulátor, ventilátor, měnič a měnič pro žhavení) v zamýšleném prostoru 31x12x12 cm. Samotný přenosný zdroj elektrické energie z důvodů požadavku na minimální rozměry neobsahuje nádrž na palivo. Palivo bude uloženo v originálním obalu, ze kterého bude nasáváno.



Obr. 1.3-11: Ilustrace rozmístění dílů, zdroj :vlastní tvorba



Obr. 1.3-12: Ilustrace rozmístění dílů, zdroj: vlastní tvorba

Hmotnost podstavy a pláště bude (přibližně, bez započítání děr a úchyťů):

$$m = \rho \cdot v = 2,800 \cdot (0,31 \cdot 0,12 \cdot 0,003 + 0,31 \cdot 0,36 \cdot 0,1) = 0,625 \text{ [kg]} \quad (1.3-1)$$

Celková hmotnost bude přibližně 1,91 kg bez započtení hmotnosti vodičů a zásuvky, avšak včetně nutného příslušenství viz. Tab.9.

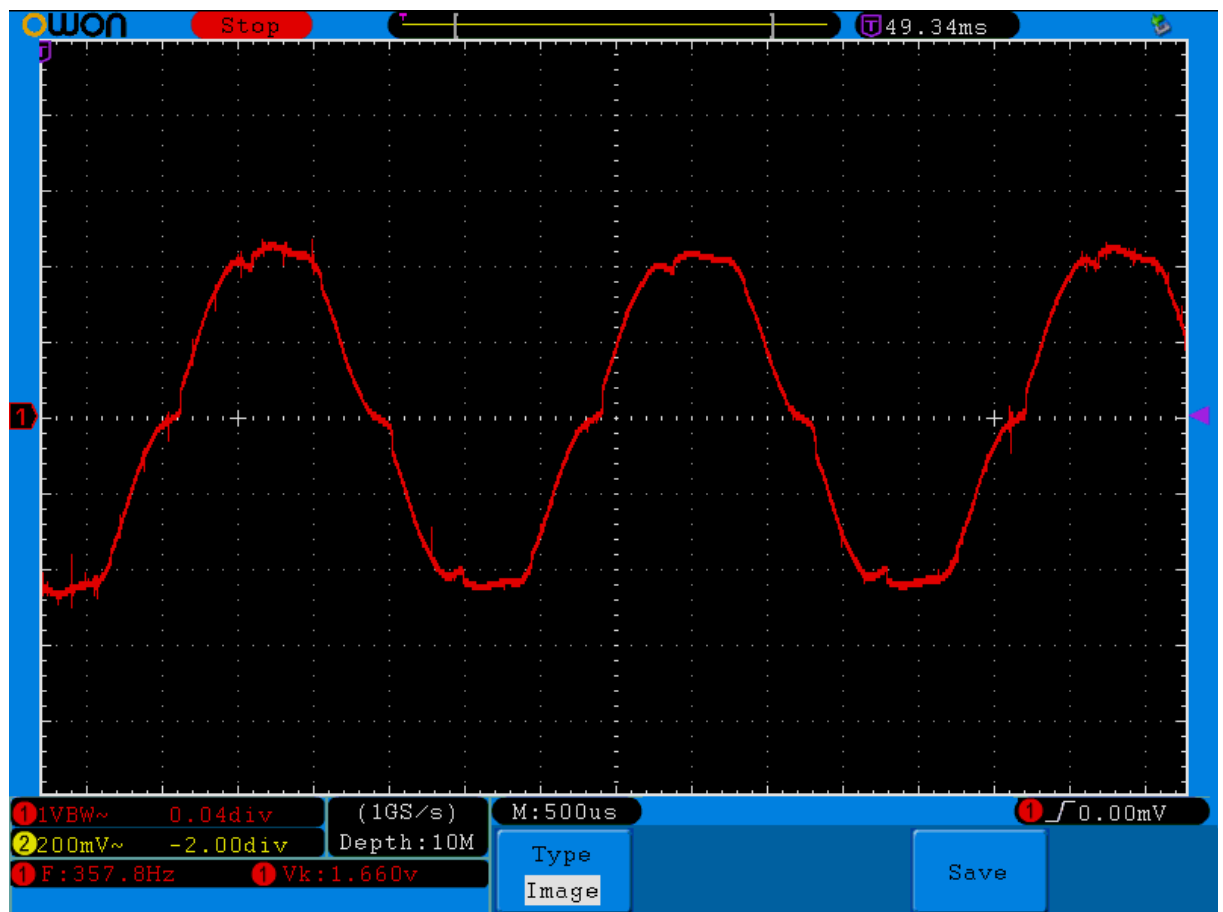
1.4 Elektronika

Nejprve bylo nutné zvolit koncepci realizace elektroniky zdroje elektrické energie od které se bude odvíjet návrh elektroniky a řízení. Pro generování stejnosměrného napětí je nutné napětí z generátoru usměrnit a regulovat na potřebnou úroveň. Obecně by bylo možné použít pouze regulaci výstupního napětí otáčkami spalovacího motoru resp. polohou šoupátka karburátoru spalovacího motoru. Nebo regulovat výstupní napětí nezávisle na otáčkách spalovacího motoru, tj. při malé, či žádné zátěži snížit otáčky spalovacího motoru při zachování stejného výstupního napětí. Řízení výstupního napětí pouze pomocí otáček spalovacího motoru by znamenalo nutnost běhu spalovacího motoru na vysoké otáčky (odpovídající požadovanému výstupnímu napětí) i při malé či odpojené zátěži, což by znamenalo zvýšené mechanické opotřebení, hlučnost, zvýšené ztráty při částečném zatížení (mechanické ztráty spalovacího motoru a jak mechanické, tak ztráty v železe generátoru a práci spalovacího motoru v oblasti s nižší účinností. Proto jsem se rozhodl použít variantu řízení výstupního napětí nezávisle na otáčkách spalovacího motoru.

Toho je možné docílit použitím napěťového pulzního usměrňovače, řízeného usměrňovače s tyristory, kombinací neřízeného usměrňovače a měniče. Neřízený usměrňovač je možné realizovat použitím polovodičových diod nebo vhodně ovládaných mosfet tranzistorů. Amplituda napětí generátoru by neměla přesahovat 16V, proud na stejnosměrné straně 25A při frekvenci až 2975KHz (při 25000 ot/min, vztah 1.4-1) s harmonicky zkresleným napětím a proudem, nepůkazným okamžikem průchodu napětí nulou viz. průběh napětí při 3080 ot/min a ohmické zátěži 0,5 Ω .

$$f = \frac{n}{60} \cdot pp [Hz]$$

(1.4-1)



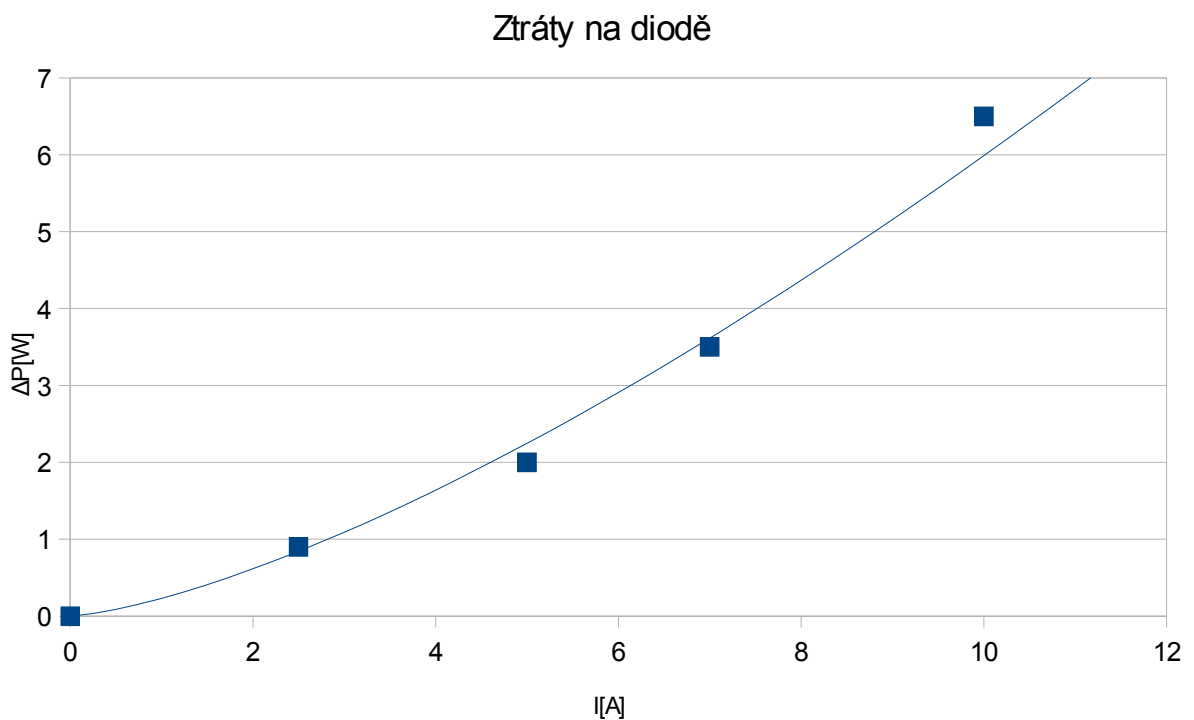
Obr. 1.4.1: Průběh napětí na odporu, zdroj: vlastní tvorba

Použití NPU by mohlo být výhodné z hlediska nízkých ztrát- kromě ztrát na spínacích prvcích by se nevyskytovaly ztráty na měniči, jelikož při použití NPU by nebyl měnič třeba. NPU je však náročný na vlastní implementaci z hlediska řízení, snímání napětí a buzení výkonových součástek. Obdobné problémy s implementací by měl i řízený tyristorový můstkový usměrňovač.

Použití klasického můstkového diodového usměrňovače má značnou výhodu v jednoduchosti a robustnosti, avšak díky úbytkům napětí na diodách má relativně malou účinnost 84-93% viz. dále. Použitím vhodně řízených MOSFETů místo diodového můstkového usměrňovače by znamenalo snížení ztrát díky nízkým úbytkům napětí na součástkách. Řízení je možno buď navrhnout vlastní, nebo použít k tomuto účelu určených integrovaných obvodů. Co se týče speciálních integrovaných obvodů, jejich nabídka vhodná

pro zamýšlený účel je značně limitovaná, nejbližší parametry má obvod LT4320, který je však specifikován pouze do 600Hz, přičemž dle datasheetu by měl být schopen pracovat i při vyšších frekvencích, avšak bez záruky. Dalším limitujícím faktorem je cena a dostupnost v ČR. Dalšími možnými obvody jsou IR1167 nebo LTC4359.

Po posouzení výše uvedených parametrů jsem se rozhodl použít pro usměrnění napětí diodový usměrňovač s použitím Schottkyho diod kvůli nižšímu úbytku napětí na diodě než v případě klasických diod. Diody jsem použil MBR2545, jedná se o dvojitou Schottky diodu se závěrným napětím 45V a maximálním středním proudem pro diodu 15A. Obě diody v pouzdře jsou v usměrňovači zapojeny paralelně. Následně byl proveden odhad tepelných ztrát na usměrňovači, který vychází z datasheetu MBR2545 [14] Fig.6 průběh $D=0,33$ - Duty factor 0,33. Body reprezentují hodnoty odečtené z grafu, které následně byly proloženy křivkou pro určení jejího průběhu kvůli dalším výpočtům. Graf vychází z Tab.1.



Graf 1.4-1 :Ztráty na diodě, zdroj [14]

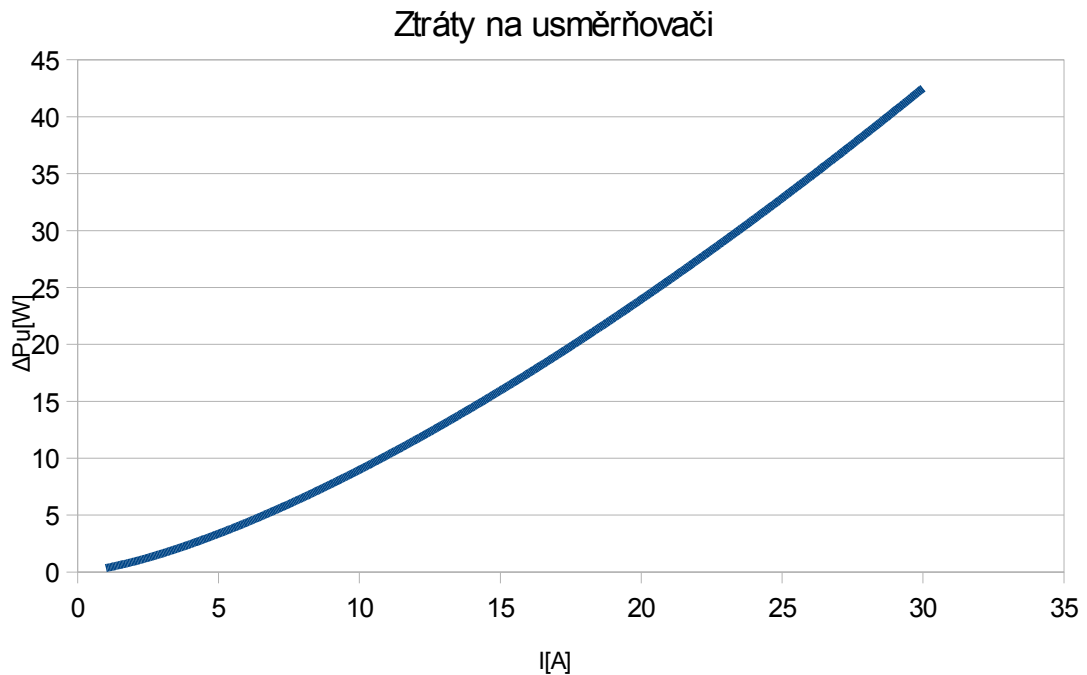
$$\Delta P_D = 0,230363284 \cdot I^{1,4148842515} [W]$$

(1.4-1)

Ztráty na usměrňovači potom budou:

$$\Delta P_U = 0,230363284 \cdot \left(\frac{I}{2}\right)^{1,4148842515} \cdot 4 [W]$$

(1.4-2)

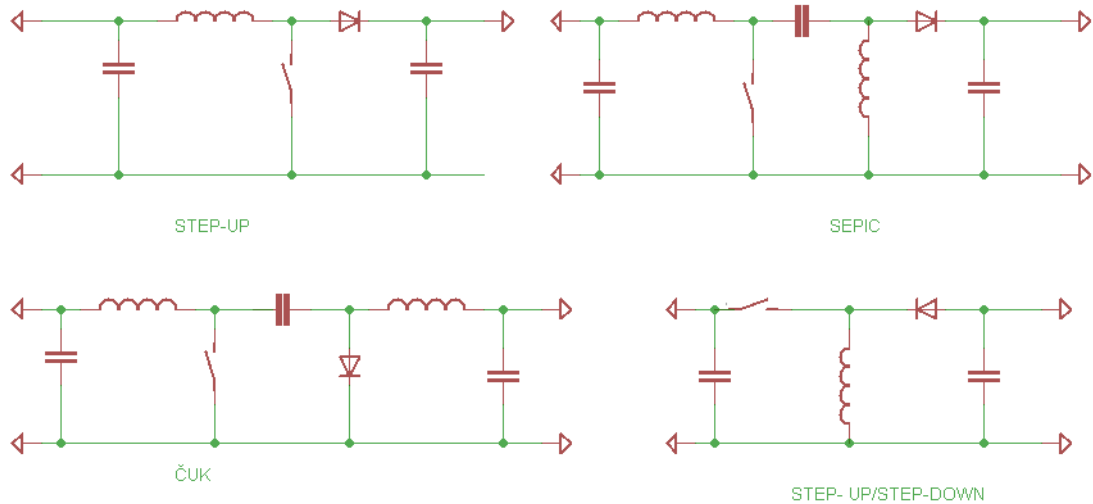


Graf 1.4-2: Ztráty na usměrňovači, zdroj: vlastní tvorba

Měnič je možné realizovat různými topologiemi zejména buck, boost, buck-boost, Čuk či SEPIC. Vzhledem k dostupnosti resp. vybranému BLDC motoru, který je navržen pro napětí do cca 16V, je použití čistě snižujícího měniče (buck) nevhodné. Použití zvyšujícího měniče se jeví pro zamýšlený účel jako vhodné, jelikož umožňuje regulaci výstupního napětí při napětí generátoru nižším, než je výstupní napětí měniče a po dosažení vstupního napětí úrovně požadovaného výstupního napětí je možné step-up měnič vypnout a výstupní napětí regulovat přímo otáčkami generátoru. Tím je možné zvýšit účinnost zdroje odstraněním ztrát na měniči při velkém zatížení.

Při použití snižujícího/zvyšujícího měniče- (topologie SEPIC, buck-boost, Čuk) je možná kvalitní stabilizace výstupního napětí i při napětí (otáčkách) generátoru stejném či vyšším, než je požadované výstupní napětí, avšak měnič musí pracovat neustále, což

znamená snížení účinnosti. Topologie SEPIC a Čuk vyžaduje též více součástek- vyžaduje indukčnost a kondenzátor navíc, což zvyšuje cenu. Teoreticky by bylo možné použít měnič se spínanými kondenzátory, avšak jeho použití pro zamýšlený výkon se mi jeví nevhodné. Měniče s transformátorem se jeví nevhodné, jelikož je nutné navrhnout a sestavit transformátor na rozdíl od koupě dostupné indukčnosti pro uvedené měniče. Z výše uvedených důvodů jsem měnič realizoval jako zvyšující.



Obr. 1.4-2: Schéma topologie měničů step-up, SEPIC, Čuk a step-down/step-up, zdroj: vlastní tvorba

Řízení je možné realizovat analogově, pomocí mikropročítače či kombinací obojího. Samotné analogové řízení se jeví dosti nevhodné, vzhledem k náchylnivosti k rušení, nmodernosti a problematické modifikovatelnosti, což by mohl být problém zejména při vývoji, návrhu a testování.

Realizace pomocí pouze mikroprocesorového řízení se jeví jako velmi vhodná, avšak při řízení měniče by bylo nutné ovládat spínací prvek měniče s frekvencí v řádu desítek kHz, což by znamenalo vzhledem k nutnosti realizovat i další funkce značné nároky na mikropročítač samotný i na implementaci kódu. Realizace ovládání spínacího prvku pouze pomocí mikropročítače by znamenala značné riziko v případě chybné funkce- trvalé sepnutí spínacího prvku měniče, což by vyvolalo zkrat ve výkonovém obvodu a pravděpodobné zničení usměrňovače a možná mechanická poškození. Toto riziko hrozí zejména při vývoji zařízení, avšak i v provozu kvůli rušení. Další možností je řízení zvyšujícího měniče speciálním

integrováním obvodem s náležitými ochranami a zbylé funkce řídit mikroprocesorem. To zvýší bezpečnost zařízení v případě chyby funkce mikropočítače a sníží nároky na mikropočítač i náročnost implementace kódu.

Z výše uvedených důvodů jsem se rozhodl realizovat řízení pomocí mikroprocesoru a měnič řídit speciálním integrovaným obvodem UC3843-viz. návrh měniče.

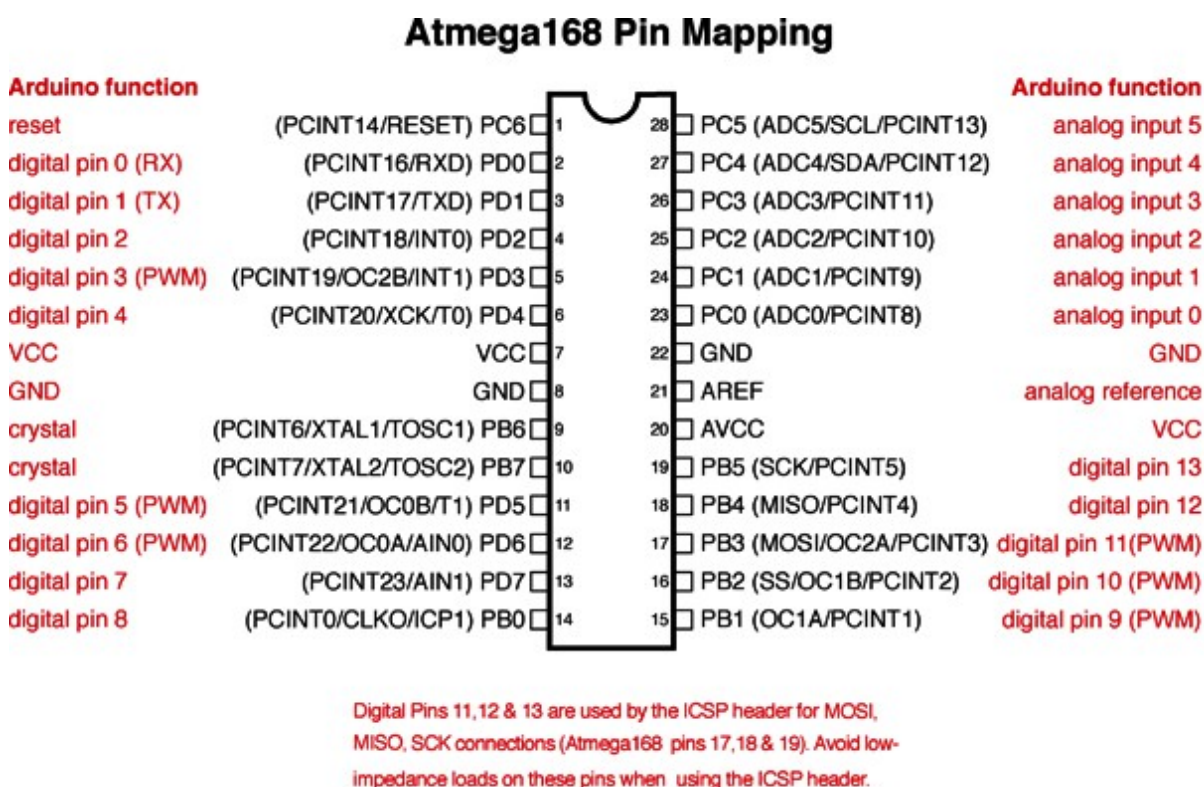
Mikropočítač bude tedy ovládat modelářské servo, měřit napětí na generátoru, měřit napětí za měničem, popřípadě měřit napětí baterie a ovládat její dobíjení, snímat pomocí tepelného čidla teplotu spalovacího motoru, ovládat ventilátor, vypínat/zapínat měnič, řídit žhavení a přehřívání motoru a ovládat signalizační diody.

Mikropočítač musí mít tři A/D převodníky a alespoň 9 digitálních výstupů – vypínání měniče, přemostění měniče, červená signalizační dioda, zelená signalizační dioda, odpojení zátěže, ovládání ventilátoru, žhavení a přehřevu a ovládání polohy serva. Je nutný jeden digitální vstup pro tlačítko.

Na trhu se nachází mnoho vhodných mikropočítačů pro zamýšlené využití, avšak rozhodl jsem se výběr zúžit na mikropočítače, které jsou standardně podporovány vývojovou platformou Arduino. Platforma Arduino je založená na mikroprocesorech Atmel na vývojové desce s převodníkem USB-RS232, což umožňuje snadné programování mikroprocesoru bez potřebných dalších HW nástrojů. Do mikroprocesoru je nahrán bootloader, který kromě základního nastavení mikroprocesoru umožňuje komunikaci s vývojovým prostředím. Vývojové prostředí využívá vlastní programovací jazyk vycházející z C. Vývojové prostředí obsahuje řadu předdefinovaných funkcí a knihoven, díky kterým není potřeba manuálně konfigurovat procesor dle jeho datasheetu, což velmi zjednodušuje a urychluje vývoj programu. Daní za to jsou, do jisté míry omezené možnosti a omezená míra optimalizace oproti psaní kódu v assembleru či přímo v C bez využívání předdefinovaných funkcí. Výhodou je též knihovna Servo.h, díky které je možné přímo ovládat polohu serva v jednotkách stupňů nebo zadat délku pulzu v mikrosekundách-viz. ovládání serva.

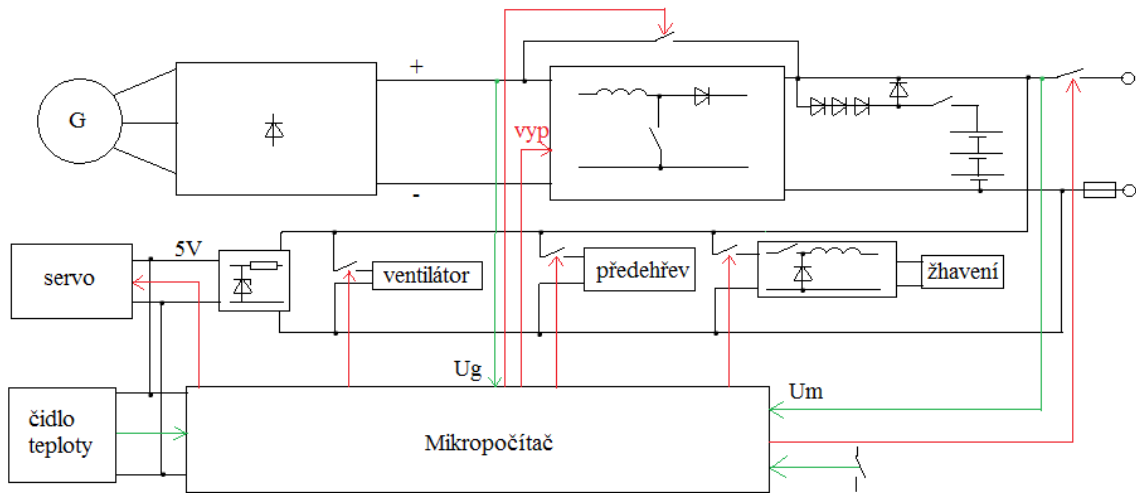
Platformu Arduino jsem se rozhodl využít zejména kvůli široké uživatelské základně a dále kvůli rychlosti vývoje- množství knihoven a předdefinovaných funkcí, absenci dalšího nutného nástroje k programování mikropočítače, vývojovému prostředí zdarma a také

vzhledem k tomu, že se jedná o Open Source hardware. Platforma Arduino zahrnuje několik různých provedení desek s několika typy mikročítačů. Pro vývoj jsem využil verzi Arduino Nano s cenou cca 120 Kč, což je deska s mikroprocesorem ATMEGA 328P v SMD provedení vybavená komunikačním rozhraním USB. Provedení je ideální pro použití v nepájivém kontaktním poli. Arduino má 14 digitálních vstupů/výstupů a 6 resp 8 10-bit A/D převodníků. Je možné použít vnitřní napěťovou referenci 1,1V. Ve finálním výrobku bude použit samostatný mikročítač ATMEGA 328P v PDIP pouzdře, kdy jeho zapojení odpovídá verzi Arduino Uno. Mapování pinů mikroprocesoru a pinů Arduina je na Obr.1.4-3. Další informace viz. [15].



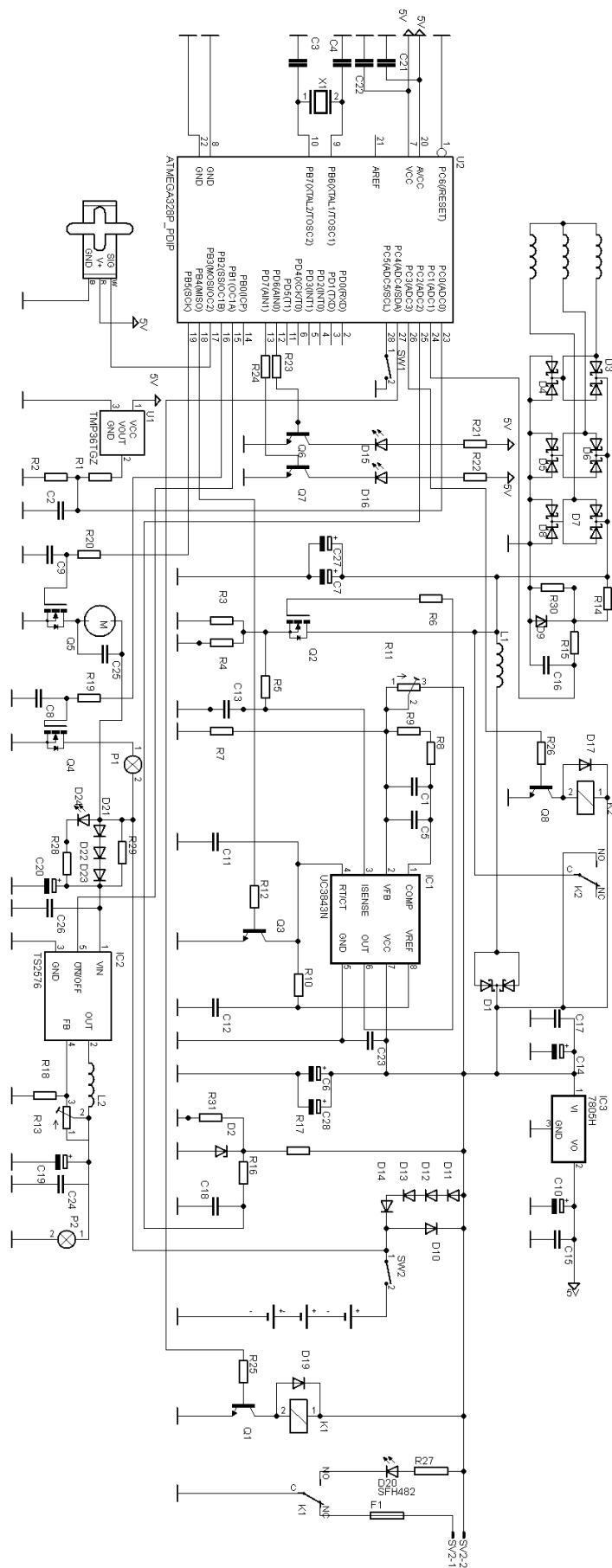
Obr. 1.4-3: Mapování pinů arduina a pinů mikročítače, zdroj:[15]

Elektronika a řízení se tedy bude skládat z mikročítače ATMEGA 328P, diodového usměrňovače, step-up měniče pro výstupní napětí, step down měniče pro žhavení, 5V stabilizátoru napětí pro mikročítač, servo a teplotní čidlo, dále spínačů pro ventilátor a předehřev a Li-pol akumulátoru viz. blokové schéma OBR 1.4-4.



Obr. 1.4-4: Blokové schéma zapojení, zdroj: vlastní tvorba

Hlavní měnič je založen na integrovaném obvodu pro řízení spínaných měničů UC3843. Zapojení a volba součástek vychází z datasheetu [16] a aplikačních poznámek [17] k obvodu. Jedná se o PWM step up měnič s frekvencí 50kHz naladěnou pomocí R10 10k Ω a C11 2,2nF. UC3843 ovládá přes R6 10 Ω výkonový tranzistor Q2 IRF3205, který byl zvolen zejména kvůli nízkému RDSon 8m Ω , dostatečně velkým Idss=110A a Uds=55Va v neposlední řadě nízké ceně (26Kč) a snadné dostupnosti. Zpětná vazba napětí je snímána pomocí odporového děliče- trimru R11 50k Ω a R7 4,7k Ω . Napětí výstupu měniče bylo zvoleno 14,5V vzhledem k napětí nabitě baterie a úbytku na nabíjecích diodách tak, aby při nabitě baterii a měničím pracujícím naprázdno netekl do baterie proud. Napětí na R7 je přivedeno na pin 2 VFB napěťové zpětné vazby, jehož velikost je porovnána s polovinou referenčního napětí 5V, tj. 2,5V. RC člunek R8 15k Ω , R9 120k Ω , C1 150pF a C5 330pF slouží k zamezení kmitání spínaného zdroje. Parametry RC člunku byly určeny experimentálně během testování. Proudovou zpětnou vazbu sloužící k ochraně spínacího prvku potažmo nastavení maximálního proudu odebíraného měničem tvoří proudový bočník R3 0,47 Ω 1W a R4 0,33 Ω 1W. Velikost napětí na bočníku je vyfiltrováno RC filtrem tvořeným R5 47 Ω a C13 100nF a přivedeno na pin 3 Isense kdy při překročení 1V dojde k vypnutí spínacího tranzistoru. Parametry RC člunku byly určeny experimentálně během testování. Jeho účel je vyfiltrovat kmity při zapínání tranzistoru. Hodnota proudového omezení byla nastavena na cca 6A.



Obr. 1.4-5: Schéma zapojení, zdroj: vlastní tvorba

Tato hodnota vychází z testování- jedná se o nejvyšší hodnotu skoku proudu, při které je regulátor ještě schopen uregulovat otáčky při výchozích volnoběžných (nejhorší případ)- při vyšším proudovém skoku již docházelo k zastavení spalovacího motoru. Indukčnost L1 byla zvolena 68μH pro max. proud 10A DPU 068A10. Hodnota maximálního proudu byla zvolena s ohledem na maximální proud, který je dodáván generátorem při blízkých volnoběžným, tj. při napětí generátoru 5V -viz měření výkonu. Hodnota indukčnosti není kritická, byla volena s ohledem na zvlnění proudu indukčností, který bude v teoretickém nejhorším případě, tj. napětí na indukčnosti 13V a nulovém odporu a stříde → 100% :

$$\Delta I = \frac{U \cdot T}{L} = \frac{13 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{68 \cdot 10^{-6}} = 3,8 [A]$$

(1.4-3)

Velikost filtračních kondenzátorů C7,C27,C6,C28 2200uF Low ESR byla volena s ohledem na zvlnění napětí při vyřazeném přemostěném měniči tak, aby při předpokádaných otáčkách 20000ot/min nepřesáhlo zvlnění napětí při výpadku jednoho pulzu (např. vlivem nerovnoměrné úhlové rychlosti rotoru během otáčky nebo nesouměrnému vinutí) 0,2V.

$$T_{pulz} = \frac{60}{n \cdot pp \cdot p} = \frac{60}{20000 \cdot 7 \cdot 6} = 71,4 [\mu s]$$

(1.4-4)

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{I \cdot T}{U} = \frac{25 \cdot 71,4 \mu s}{0,2} = 8875 [\mu F]$$

(1.4-5)

Měnič je možné vypnout pomocí tranzistoru Q3 BC547C, který je ovládán přes rezistor R12 10kΩ.

Stabilizátor 5V pro mikropočítač, servo a teplotní čidlo je realizován pomocí stabilizátoru 7805, filtračními kondenzátory C10, C14 1000uF 25V a blokovacími kondenzátory C15 a C17 100nF vzhledem k nízkému proudovému odběru- max. 500 mA, průměrně 200mA je zdroj 5V řešen lineárním stabilizátorem.

Step down měnič pro žhavení je tvořen obvodem TS2576. Zapojení vychází z katalogového zapojení obvodu [18]. Cívka L2 DPU100A3, její hodnota vychází z katalogového zapojení, maximální proud byl zvolen 3A, jelikož požadovaný proud na výstupu zdroje bude 1,5-2A. Velikost výstupního napětí je dána odporovým děličem z trimru R13 500Ω a rezistoru R18 500Ω, výstupní napětí lze nastavit v rozsahu 1,2-2,5V. Spínaný zdroj byl zvolen z hlediska vysokého požadovaného proudu při nízkém napětí. Diody D21,22,23 1N4007 slouží k vytvoření úbytku napětí pro červenou LED D24 – kontrolka žhavení, která slouží k signalizaci funkce žhavení. D 24 se rozsvítí pouze pokud měnič odebírá dostatečný proud- není přerušena žhavicí svíčka. TS2576 má odběr naprázdno 10mA, proto je paralelně k diodám D21,22,23 zařazen rezistor R29 67Ω, aby nedošlo k částečnému rozsvícení LED při chodu měniče bez připojené žhavicí svíčky. Rezistor R28 22Ω omezuje proud LED D24. Měnič je ovládán mikropočítačem. Kondenzátory C19 a C20 1000μF slouží k filtraci napětí.

Hlavní měnič je možné přemostit pomocí 30A přepínacího automobilového relé K2 4120 C030 DC12V1.6 EURO. Relé K1 stejného typu slouží k odpojení výstupu. Pro ovládání těchto relé je řešeno pomocí tranzistorů Q1 a Q8 BC517 ovládaných mikropočítačem přes rezistory R25 a R26 10kΩ. Spínání předehevů a ventilátoru je řešeno pomocí tranzistoru Q4 a Q5 IRF3205. Ačkoli se nejedná o logic level mosfet, při ovládání mikropočítačem jsou tranzistory dostatečně otevřené. Tranzistory jsou otevírány přes RC členy C8, C9 100nF a R19 a R20 1MΩ kvůli zpomalení otevírání- omezení rušení.

Snímání teploty hlavy spalovacího motoru je řešeno tepelným čidlem TMP36TGZ, které funguje jako převodník teplota napětí s převodní funkcí:

$$U = 0,01 \cdot t + 0,5 [V]$$

(1.4-6)

Teplotní čidlo je specifikováno pro teploty -50-125 °C s možností krátkodobé činnosti do 150°C. Provozní teploty hlavy mohou dosahovat až 150 °C, avšak čidlo je umístěno mezi chladícími žebry, kde je teplota nižší, z důvodu tepelného odporu mezi hlavou motoru a místem umístění čidla, nedosahující 125°C. Toto čidlo bylo zvoleno z důvodu kalibrovaného výstupu, rychlosti a jednoduchosti čtení teploty mikroprocesorem narozdíl od digitálních čidel- např. DS18B20 nebo nutnosti úpravy signálu a či linearizace při použití

termistoru, PN přechodu či termočlátku. Přesnost čidla je $\pm 2^\circ\text{C}$ po celém rozsahu, což je více než dostačující.

Snímání napětí generátoru pro mikroprocesor je realizováno pomocí děliče napětí R14 $5,6\text{k}\Omega$ a R30 330Ω , poměr děliče byl zvolen s ohledem na referenční napětí A/D převodníku mikropočítače $1,1\text{V}$ a maximální snímatelné napětí 20V . Zenerova dioda D9 $4,7\text{V}$ slouží k ochraně před případným přepětím/napěťovými špičkami. K Děliči je připojen RC článek R15 $680\text{k}\Omega$ C16 100nF a časovou konstantou $0,068\text{s}$. Časovou konstantu jsem zvolil tak, aby byla přibližně stejně dlouhá jako doba pěti otáček motoru při volnoběhu 4000 ot/min . Pět otáček jsem zvolil z důvodu nerovnoměrnosti chodu spalovacího motoru.

$$T = \frac{60}{n} \cdot 5 = \frac{60}{4000} \cdot 5 = 75[\text{ms}]$$

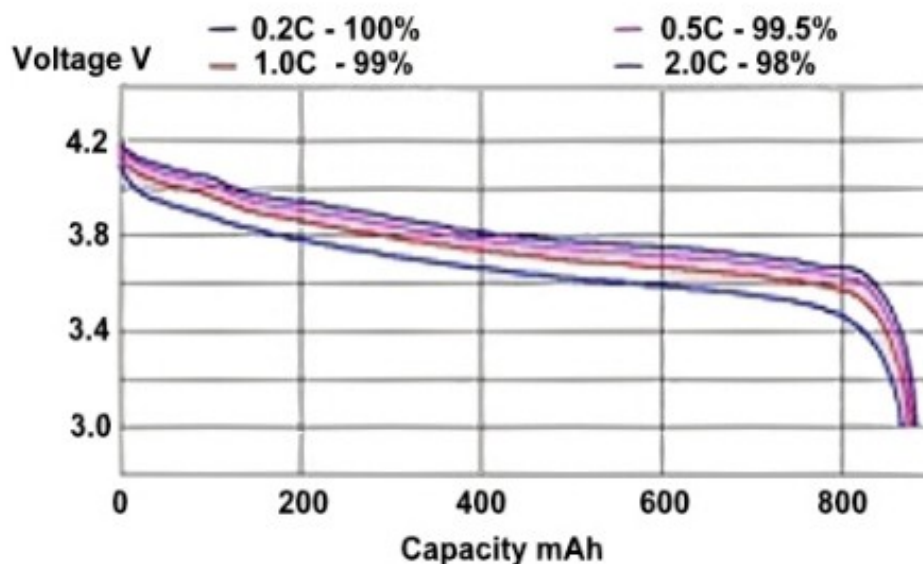
(1.4-7)

Stejně je řešeno snímání napětí měniče pomocí děliče R17, R31, zenerovy diody D2 a RC článek R16, C18. Součástky mají stejné hodnoty jako pro snímání napětí generátoru.

Snímání signálu čidla je řešeno odporovým děličem R1 $50\text{k}\Omega$ a R2 $50\text{k}\Omega$. Odporový dělič byl volen z hlediska maximálního napětí signálu 2V (pro 150°C) napěťovou referenci mikropočítače a maximálního proudu signálu $50\mu\text{A}$.

Akumulátor je nutný několika důvodů- nutnosti zhavení, předeřevu při nízkých teplotách a z důvodů regulačních- při připojení zátěže o vysokém příkonu by došlo vlivem velkého dopravního zpoždění malé energie naakumulované v rotačních hmotách a filtračních kondenzátorech k poklesu napětí popřípadě k zastavení spalovacího motoru, zejména v oblasti volnoběžných otáček. Akumulátor byl zvolen zejména s ohledem na napětí – blízké $14,4\text{V}$, kapacitu, maximální nabíjecí proud odpovídající maximálnímu proudu generátoru tj. 22A a maximálnímu vybíjecímu proudu – odpovídajícímu proudu zátěže, tj. 22A a dále nízké hmotnosti. Zvolen byl tříčlánekový akumulátor Li-pol Turnigy A-spec $1,8\text{Ah}$ s hmotností 159g , rozměry $102 \times 31 \times 25\text{mm}$, trvalým vyvíjecím proudem 65C , tj. 117A a krátkodobým vybíjecím proudem 130C tj. 234A , trvalým nabíjecím proudem 8C , tj. $14,4\text{A}$ a krátkodobým nabíjecím proudem 15C , tj. 27A a cenou 580Kč [20]. Akumulátor je složen z článků s odpovídajícím vnitřním odporem, středním napětí na článek $3,7\text{V}$ a maximálním nabíjecím napětí $4,2\text{V}$. Jmenovité napětí je $11,1\text{V}$. Připojení akumulátoru do obvodu je řešeno přes

diodu D10 BYV42-200 pro vybíjení a přes diody D11-D13 BYV42-200 a D14 MBR2545 pro nabíjení. Akumulátor není připojen k výstupu měniče zejména z důvodu nutnosti přesné regulace napětí a z důvodu zvlněného napětí při chodu s vypnutým přemostěným měničem- docházelo by k opotřebování akumulátoru z důvodu neustálého střídavého nabíjení/vybíjení vlivem nedokonalé regulace. Rozdíl napětí mezi nabíjením a vybíjením akumulátoru je tedy napětí akumulátoru $-0,7\text{V}$ resp $+2,5\text{V}$. Při cílovém nabíjecím napětí akumulátoru 4V (akumulátor je nabit na cca 80%) na článek bude tedy ke konci nabíjení akumulátoru při napětí měniče $14,5\text{V}$ a k počátku vybíjení při $11,3\text{V}$. Takto připojený nabitý akumulátor udrží napětí výstupu měniče v intervalu $11,3\text{-}14,5\text{V}$, což odpovídá požadovanému rozmezí výstupního napětí. Takto provedené připojení akumulátoru není zcela ideální-interval je ovlivněn změnou úbytku napětí na diodách v důsledku změny a stupněm nabití akumulátoru. Za chodu zdroje bude akumulátor udržován nabit na $50\text{-}90\%$ (viz. graf 1.4-3) své kapacity. Kapacita akumulátoru není zcela využita. Avšak výhoda použití diod spočívá v jednoduchém a robustním řešení oproti aktivnímu připojování/ odpojování akumulátoru. Využívání 100% kapacity akumulátoru není vhodné, jelikož by akumulátor nebyl schopen pohlit výkon např. při skoku zátěže z maximální na nulovou a docházelo by k jeho přebíjení popřípadě k jeho destrukci. Li-pol akumulátor má též nejvyšší životnost při stavu nabití okolo 60% . Z výše uvedených důvodů bylo zvoleno připojení akumulátoru do obvodu pomocí diod.



Graf 1.4-3: Vybíjecí charakteristika 800mAh Li-pol článku, zdroj:[19]

Pro předeřev je použita automobilová žárovka, která se vkládá do kanálu mezi chladičími žebry na hlavě motoru, H3 12V 55W, která ohřeje spalovací motor o 40 °C za cca 6 min, tj. spotřebuje cca 5 Wh energie což znamená, baterie je schopná 2x motor předeřát při nabití na 50%.

Jako chladičí ventilátor byl zvolen PAPST MULTIFAN 4312 SW s rozměry 120x120x32mm výkonem 2,8W a rozsahem pracovních napětí 6-15V. Je možno použít i jiné ventilátory stejných podobných rozměrů a srovnatelných výkonů. Rozměry ventilátoru byly zvoleny 120x120mm, jelikož ventilátor vude tvořit boční stranu přenosného zdroje. Výkon byl zvolen experimentálně.

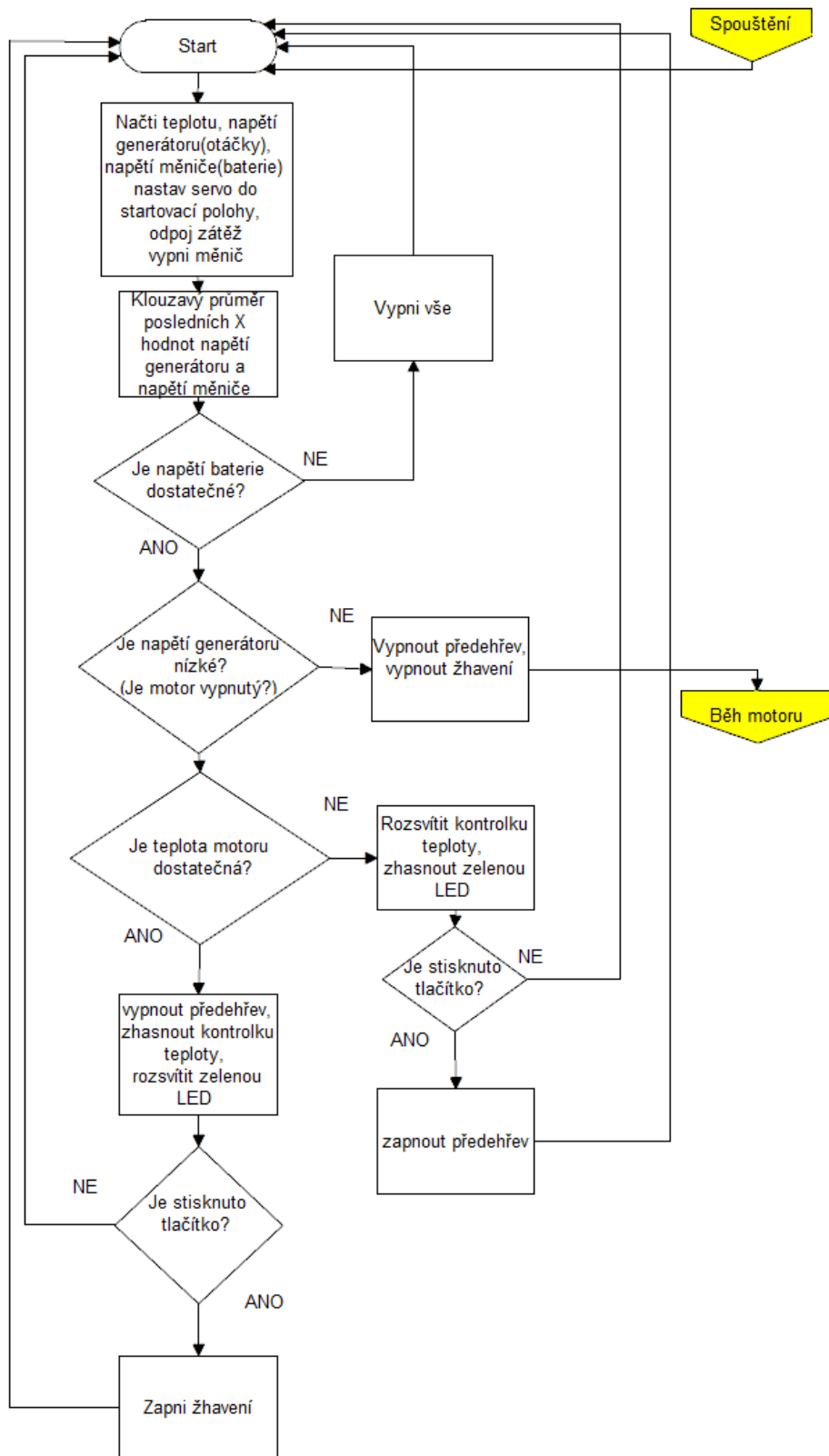
Signalizační LED D15-zelená kontrolka je ovládána mikropočítačem přes rezistor R23 10 k Ω a tranzistor Q6 BC547C. Proud LED je omezen R21 10 k Ω . Obdobně je řešena i kontrolka teploty- červená LED D16, kdy hodnoty ostatních součástí mají stejné parametry jako pro zelenou LED.

Jako hlavní spínač SW2 je použit automobilový spínač R13-133 12V, 30A, tlačítko SW1 je použito B 1383 vzhledem ke své mechanické konstrukci. Pojistka je použita automobilová 30A, která slouží jako jištění proti zkratu. Seznam součástí je v Tab.8.

Signalizační LED D20 slouží k signalizaci odpojené zátěže a je ovládána pomocí relé K1.

1.5 Řízení

Program je rozdělen na 2 části, a to na část pro start spalovacího motoru motoru a část pro běh spalovacího motoru viz zjednodušené vývojové diagramy. Veškeré konstanty jsou uvedeny na začátku zdrojového kódu v příloze.



Obr. 1.5-1 : Zjednodušený vývojový diagram spouštění, zdroj: vlastní tvorba

Při startu je nejprve nastaveno servo do polohy pro start, vypnuto přemostění měniče a měnič, dále je načteno napětí generátoru a napětí měniče. Napětí měniče se při vypnutém motoru rovná napětí akumulátoru minus úbytek napětí na D10. Pokud je toto napětí dostatečné (akumulátor není vybitý), je možné pokračovat ve startu, což je signalizováno zelenou LED. Následně zjištěno jestli je teplota motoru dostatečná pro start. Pokud je teplota motoru pro start dostatečná -je možno stiskem a držením tlačítka aktivovat žhavení a motor nastartovat. Pokud teplota motoru dostatečná není, je rozsvícena červená LED, a po stisku tlačítka je zapnut přehřev, dokud teplota motoru nedosáhne požadované úrovně. Následně je možné pokračovat ve startování. Zapnutí/vypnutí přehřevu je řešeno komparátorem s hysterezí, s tím že pro start přehřevu je nutné stisknout tlačítko. Nastartovaný motor je detekován překročením nastavené úrovně napětí generátoru. Při detekci nastartovaného motoru program skočí do smyčky pro běh spalovacího motoru.

Ve smyčce pro běh spalovacího motoru je nejprve načtena teplota a napětí motoru a generátoru, následně je proveden jejich klouzavý průměr (2 hodnoty napětí generátoru, 35 hodnot napětí měniče), následuje provedení regulace U_g a U_m , následně jsou testovány podmínky regulace ventilátoru a ochran.

Šimání napětí měniče a generátoru bylo vždy řešeno pomocí odporového děliče s rezistory 5600Ω a 330Ω , jehož výstup je přiveden na vstup 10 bit A/D převodníku s referenčním napětím $1,1V$. Konstanty převodu děliče a A/D převodníku potom budou:

$$K_D = \frac{R_{30}}{R_{30} + R_{15}} = \frac{330}{330 + 5600} = 0,055649241 [-]$$

(1.5-1)

$$K_{A/D} = \frac{U_{ref}}{2^{10}} = \frac{1,1}{1024} = 0,00107421875 [V/bit]$$

(1.5-2)

$$proměnná = \frac{U_x \cdot K_D}{K_{A/D}}$$

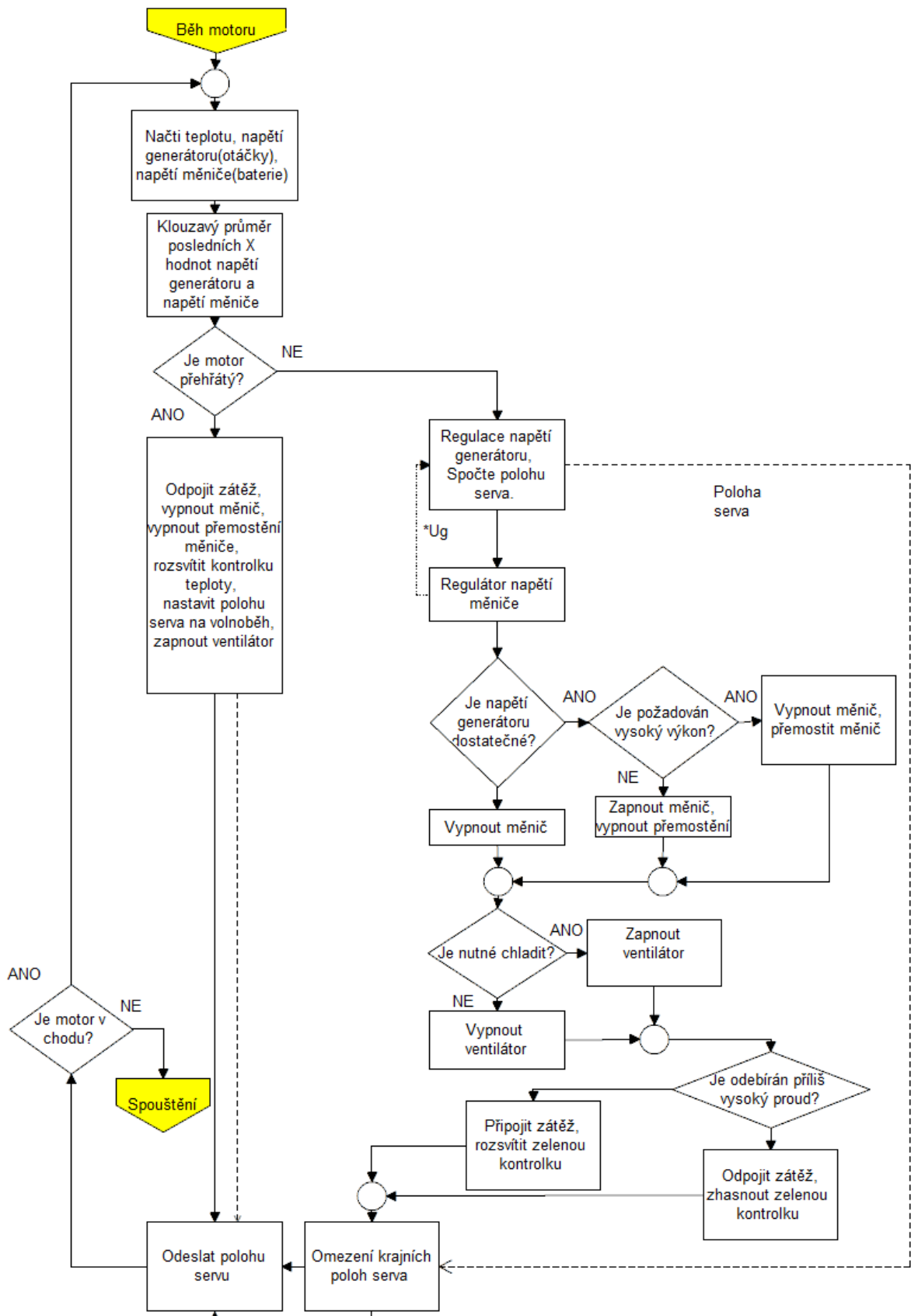
(1.5-3)

$$U_x = \frac{proměnná \cdot K_{A/D}}{K_D}$$

(1.5-4)

$$K = \frac{K_{A/D}}{K_D} = 0,0193 [V/bit]$$

(1.5-5)

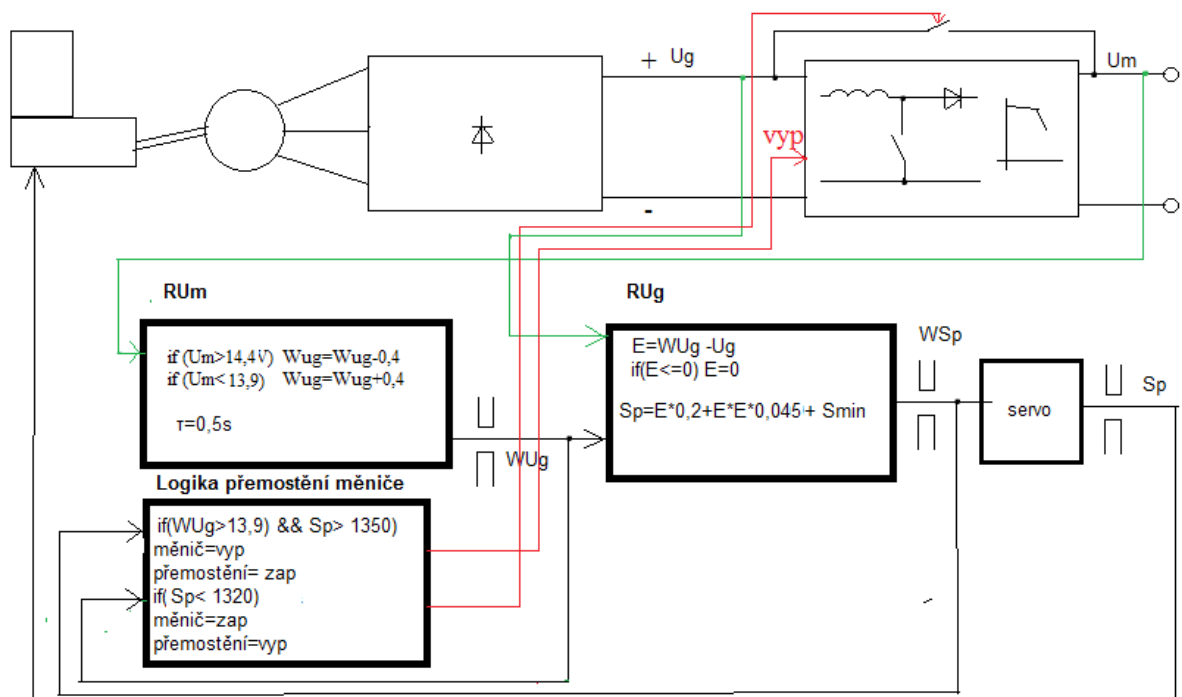


Obr. 1.5-2: Zjednodušený vývojový diagram běhu motoru, zdroj: vlastní tvorba

Regulace výstupního napětí (napětí za měničem) se opírá o step up měnič napětí, na který je hleděno jako na „black box“, který je v ideálním případě tvrdým zdrojem napětí do okamžiku omezení doby sepnutí spínacího prvku vlivem proudové zpětné vazby. Poté napětí měniče klesá se zvyšujícím se odběrem zátěže v ideálním případě $-I_{in} = \text{konst}$, $U_{in} = \text{konst}$.

$$U_{in} \cdot I_{in} = U_{out} \cdot I_{out} \quad (1.5-6)$$

$$U_{out} = \frac{U_{in} \cdot I_{in}}{I_{out}} \quad (1.5-7)$$



Obr. 1.5-3: Blokové schéma regulace, zdroj: vlastní tvorba

Výstupem regulátoru napětí měniče je požadované napětí generátoru. Požadované napětí měniče je nastaveno nižší, než je napětí měniče naprázdno. Regulátor napětí měniče v případě vysokého napětí měniče (codu naprázdno) tedy snižuje požadované napětí generátoru do okamžiku dosažení minimálního nastaveného požadovaného napětí generátoru (volnoběžných otáček) v případě malé zátěže, nebo do poklesu výstupního napětí

způsobeného aktivací proudového omezení proudu spínacím prvkem v případě vysoké zátěže, kdy dle výše zmíněného vztahu klesne výstupní napětí měniče pod nastavené napětí regulátoru výstupního napětí měniče a regulátor přidá požadované napětí generátoru, čímž stoupne i výstupní napětí měniče dle výše uvedeného vztahu.

Regulátor napětí měniče je řešen jako okénkový komparátor s časovou konstantou. Při překročení horní nastavené úrovně sníží požadované napětí generátoru o nastavenou konstantní hodnotu. Při podkročení dolní nastavené úrovně zvýší požadované napětí generátoru o nastavenou konstantní hodnotu. Při napětí měniče mezi horní a dolní úrovní napětí regulátor nemění požadované napětí generátoru. Zvýšení/snížení hodnoty požadovaného napětí je možné pouze jednou za nastavenou časovou konstantu. Časová konstanta je nutná vzhledem k dopravnímu zpoždění serva, filtrů a spalovacího motoru. Chování je tedy podobné integračnímu regulátoru, s tím rozdílem, že při malých regulačních odchylkách (citlivost lze nastavit šířkou intervalu maximální úrovně a minimální úrovně napětí) nemění výstup a tak filtruje malé změny napětí. Dále výstupní veličinu vždy mění o konstantní krok.

Regulátor napětí generátoru je řešen jako proporcionalní, s kvadratickým průběhem, vzhledem k tomu, že na výstup je připojen měnič který v případě připojení konstantní zátěže a v případě neaktivovaného proudového omezení, kdy v případě poklesu napětí generátoru odebírá o to větší proud-vnáší tedy do systému kladnou zpětnou vazbu viz. vztah:

$$I_{in}(U_{in}) = \frac{U_{out} \cdot I_{out}}{U_{in}} \quad (1.5-8)$$

Výstupem regulátoru je poloha serva, která ovládá šoupátko karburátoru, jehož poloha je úměrná momentu spalovacího motoru. V případě záporné chyby je považována chyba za nulovou. Vztah polohy serva a napětí generátoru je:

$$S_p = 0,2 \cdot (WUg - Ug) + (Wug - Ug)^2 \cdot 0,045 + S_{min} \quad (WUg - Ug) > 0 \quad (1.5-9) \quad (1.5-10)$$

Konstanty byly určeny experimentálně, minimální poloha serva taktěž. Konstanty byly voleny tak, aby nedocházelo k dlouhým kmitavým přechodovým jevům a zároveň byl zásah regulátoru dostatečně razantní při náhlém skoku zátěže či chybě (např. bublinka v palivu), což je důležité zejména v oblasti volnoběžných otáček, vzhledem k tomu, že spalovací motor generátorem mají velmi malý moment setrvačnosti.

Snímání teploty je řešeno obdobně jako snímání napětí měniče a generátoru, s tím že dělič je tvořen hodnotami R_1 10k Ω a R_2 10k Ω a závislost výstupního napětí čidla na teplotě má průběh:

$$K_{D_t} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10000}{10000 + 10000} = 0,5[-]$$

(1.5-11)

$$U(t) = 0,01 \cdot t + 0,5[V]$$

(1.5-12)

rozlišení převodníku a tedy teploty je:

$$K_t = K_{D_t} \cdot K_{D_A} = 0,5 \cdot 0,0010742185 = 0,00215[V/bit] \Rightarrow 0,215[^\circ C/bit]$$

(1.5-13)

Přesnost snímání teploty čidlem i přesnost zpracování signálu jsou více než dostatečné, vzhledem k tomu, že je čidlo umístěno mezi chladicími žebry, kde je teplota nižší než teplota hlavy vlivem chlazení okolním prostředím a tepelného odporu hlava motoru- umístění čidla- okolní prostředí což funguje obdobně jako odporový dělič teploty. Regulátor teploty je řešen komparátorem s hysterezí, kdy horní hranici pro zapnutí ventilátoru jsem stanovil na reálných 105 °C, což odpovídá teplotě čidla 89 °C. Hranici vypnutí ventilátoru jsem stanovil na 100 °C, což odpovídá teplotě čidla 79 °C. Komparátorem s hysterezí je řešena i ochrana proti přehřátí, kdy hranici přehřátí jsem stanovil na 145 °C což odpovídá teplotě čidla 110 °C, kdy dojde k odpojení zátěže, vypnutí měniče, popřípadě jeho přemostění, nastavení volnoběžných otáček a signalizaci přehřátí LED. Opětovné připojení zátěže a je nastaveno na 140 °C, což odpovídá 100 °C na čidle. Teploty čidla odpovídající požadovaným teplotám byly stanoveny

experimentálně při teplotě okolí 22 °C. Do měření teploty motoru vnáší chybu rozdílná teplota okolí, než při zjišťování, avšak nastavené hodnoty nejsou kritické.

Ochrana proti nadproudu je řešena snímáním napětí měniče, které při nadměrném proudu poklesne na úroveň napětí baterie- 0,7V- úbytek na diodě D10. Pokud napětí klesne pod požadovanou úroveň, jelikož generátor není schopen dodávat dostatečný proud, dojde po určitém čase kdy je detekován nadproud, nastaveno je cca 30s, k odpojení zátěže. Časové zpoždění odpojení zátěže je nastaveno, jelikož může dojít k krátkodobým poklesům napětí vlivem nedokonalé regulace zejména při skokovém zvýšení zátěže. Stejně časové zpoždění je nastaveno pro opětovné připojení zátěže.

Při požadavku vysokého výkonu, tj. pokud je zátěž odebírá větší proud, než je nastavené omezení proudu spínacím prvkem měniče, je měnič vypnut a přemostěn, což sníží ztráty způsobené ohmickým odporem cívkou L1 a úbytkem napětí na diodě D1. Požadavek na vysoký výkon je detekován pomocí podmínky vyššího požadovaného napětí generátoru než je stanovená hodnota a současně polohy serva, která je vyšší než nastavená hodnota. Malý odebíraný výkon je potom detekován polohou serva která je menší než nastavená hodnota. Při opětovném zapnutí měniče je nutné nejprve vypnout relé a vyčkat čas do opadnutí kontaktů a až poté zapnout měnič, jinak by došlo k propojení vstupu a výstupu měniče. Při vypínání měniče zpoždění zařídí zpoždění přitahu kontaktů relé.

Poloha serva je ovládána signálem, kde nositel informace je délka pulzu 1000-2000 μ s pro polohu 0-180°. O tvorbu signálu pro servo se kompletně stará funce `writeMicroseconds`(proměnná), kde proměnná je přímo délka pulzu v μ s. Perioda odesílání signálu by měla být cca 20 μ s avšak její hodnota není kritická. Činnost smyčky chodu motoru trvá přibližně 420 μ s s drobnými odchylkami v závislosti na ne/splnění různých podmínek pro ochrany atp. V případě zapnutí měniče po přemostění je smyčka delší o 5ms kvůli zpoždění v důsledku opadnutí kontaktů. Vzhledem k požadavkům serva, je nutné odesílat impulzy servu každých cca 20ms. Proto je ve smyčce pro chod zařazeno zpoždění 19ms, celkem smyčka tedy trvá přibližně 19,42ms kromě případu zapnutí měniče po přemostění -24,42ms. Délka smyčky není kritická, avšak odvozují se od ní další časové konstanty.

2 Měření a testování

Nejprve jsem změřil odběr ventilátoru, který při napětí 14V odebíral 193mA, tedy výkon 2,7W. Proudový odběr stabilizátoru 5V a připojeným servem a řízením kolísal dle pohybu serva od 100-250 mA s odhadovanou střední hodnotou odběru 200mA. Odebíraný výkon při 14V je tedy přibližně 2,8W. Relé přemostění měniče odebíralo při 14V 136mA, tedy 1,9W. Řízení tedy odebírá při odběru vysokého výkonu (přemostěném měniči a zapnutém ventilátoru) 7,4W. Při nepřemostěném měniči 5,5W.

2.1 Měření bldc motoru

Měření na BLDC motoru jsem prováděl v generátorickém režimu naprázdno, nakrátko a v motorickém režimu jsem provedl odhad mechanických ztrát a ztrát v železe. Odhad ztrát v železe a mechanických ztrát je nutný k určení charakteristiky spalovacího motoru.

Ideální by bylo znát charakteristiku spalovacího motoru tj. graf momentu resp. výkonu na otáčkách pro rozhodnutí, zda spalovací motor výkonově vyhovuje pro zamýšlené použití, nebo si tuto charakteristiku změřit na testovací stolici, kdy je nutné měřit, jak otáčky spalovacího motoru, tak jeho točivý moment. Vzhledem k tomu, že testovací stolice na spalovací motory, ani vhodný měřič točivého momentu nebyl k dispozici, je nutné určit účinnost použitého BLDC motoru poté určit výkon spalovacího motoru z generovaného elektrického výkonu.

Měření nakrátko jsem prováděl dle schématu Obr. 2.1-1, kdy pomocí osciloskopu byla měřena frekvence sdruženého napětí. Pro pohon byla použita ruční vrtačka s regulací otáček 0-3000 ot/min. Sdružené napětí se vlivem přechodových odporů na kontaktech a odporů vodičů pohybovalo v řádu jednotek milivoltů. Proud byl měřen klešťovým ampérmetrem v každé fázi. Vyjádřený proud bude aritmetickým průměrem proudů jednotlivými fázemi. Na grafu 2.1-1 je znázorněn naměřený proud a spočtený střední proud za ideálním usměrňovačem určený dle vztahu (2.1-1) [21]. je určen pouze přibližně jelikož měřený proud je harmonicky zkreslen a vztah má platnost pouze pro nezkreslený proud s odporovou zátěží, Změřené hodnoty viz. Tab.2.

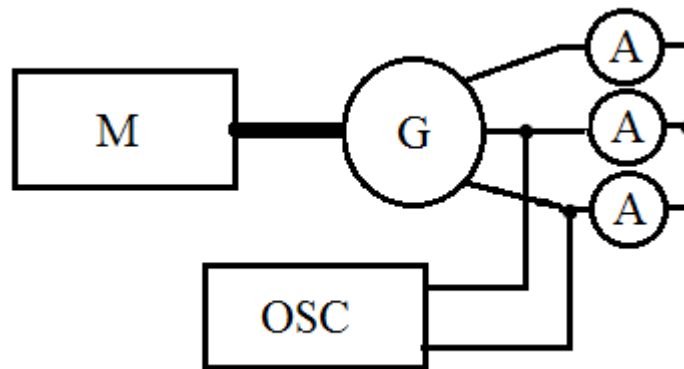
$$I_{Ustr} = 1,35 \cdot I_{ef} [A]$$

(2.1-1)

Počet otáček bude:

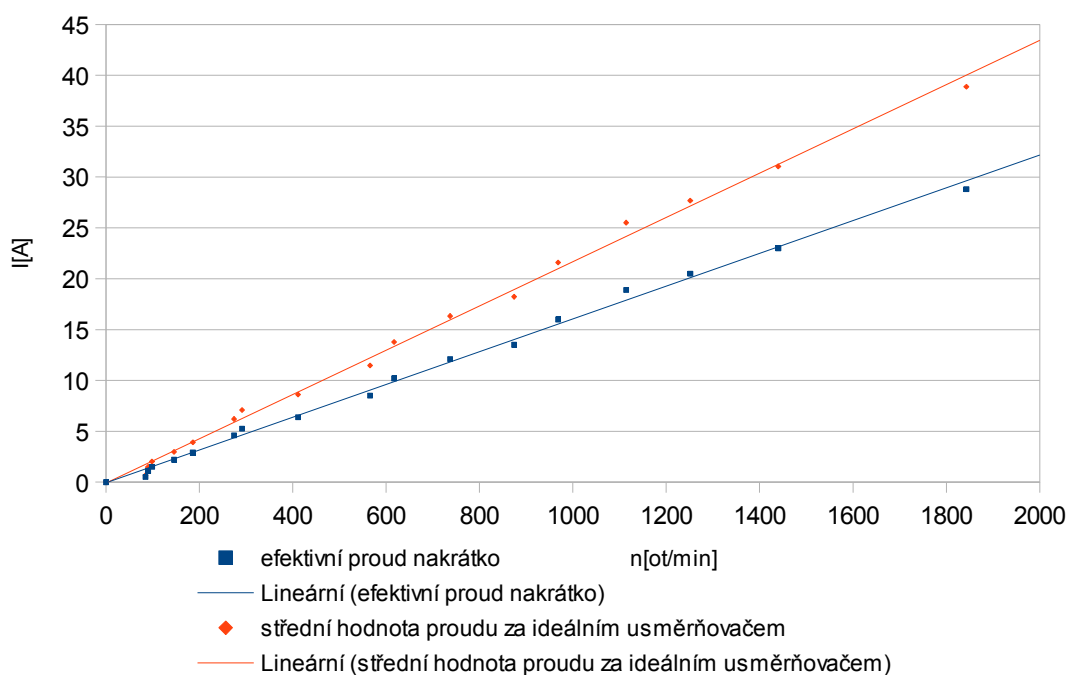
$$n = \frac{f \cdot 60}{pp} = \frac{f \cdot 60}{7} [ot/min]$$

(2.1-2)



Obr. 2.1-1: Schéma měření nakrátko, zdroj:vlastní tvorba

Měření nakrátko



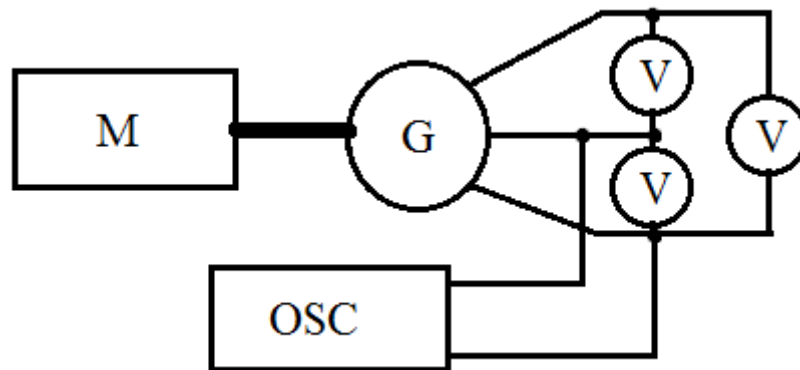
Graf 2.1-1: Měření nakrátko, zdroj: vlastní tvorba

Z měření vyplývá, že zvolený BLDC motor je schopen dodat v generátorickém režimu proud fázemi 28,8A, odpovídající střednímu usměrněnému proudu 38,88A, čili dostačuje pro zamýšlené použití – závislost proudu na otáčkách je lineární, čili nedochází k odbuzování vlivem slábnutí či vytlačování magnetického pole permanentních magnetů v důsledku generovaného proudu.

Měření naprázdno jsem prováděl dle schématu Obr. 2.1-2, kdy pomocí osciloskopu byla měřena frekvence sdruženého napětí pro určení otáček a též efektivní hodnota změřeného napětí. Pro pohon byla použita ruční vrtačka s regulací otáček 0-3000 ot/min. a následně spalovací motor. Vyjádřené napětí je aritmetickým průměrem napětí jednotlivými fázemi. Graf znázorňuje napětí naprázdno a spočtené střední napětí za ideálním usměrňovačem. Spočtené napětí za usměrňovačem určené dle vztahu (2.1-3)[21] je určeno pouze přibližně, jelikož měřené napětí je harmonicky zkresleno a vztah má platnost pouze pro nezkreslený průběh. U je efektivní sdružené napětí Graf vychází z Tab. 3.

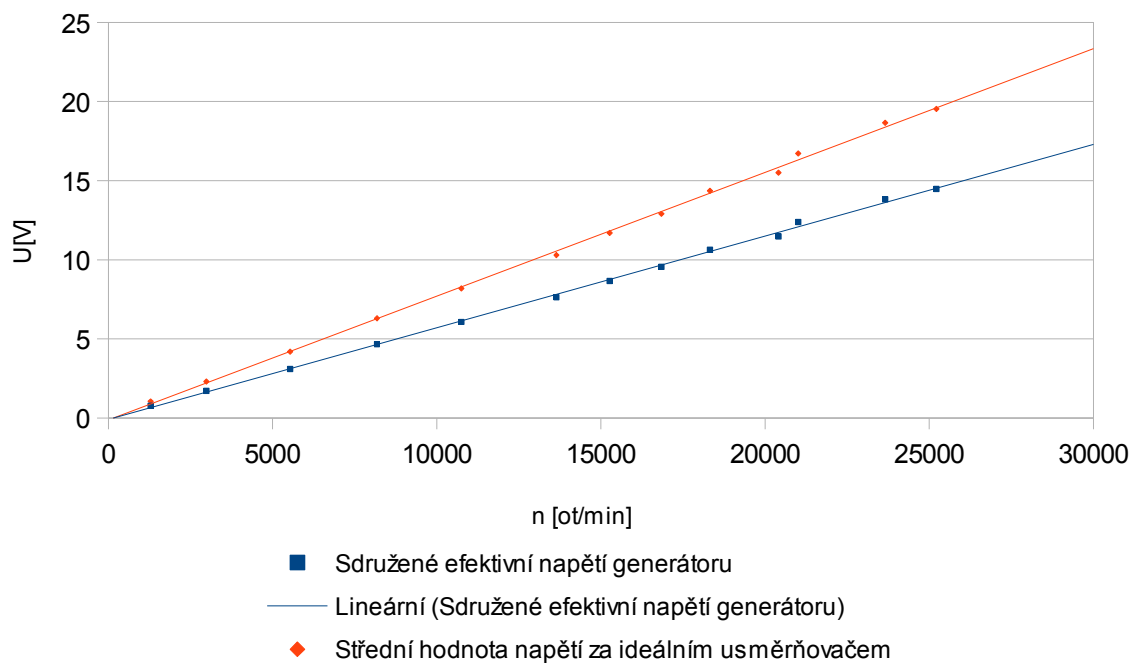
$$U_{usm} = 1,35 \cdot U [V]$$

(2.1-3)



Obr. 2.1-2 : Schéma měření naprázdno

Měření naprázdno



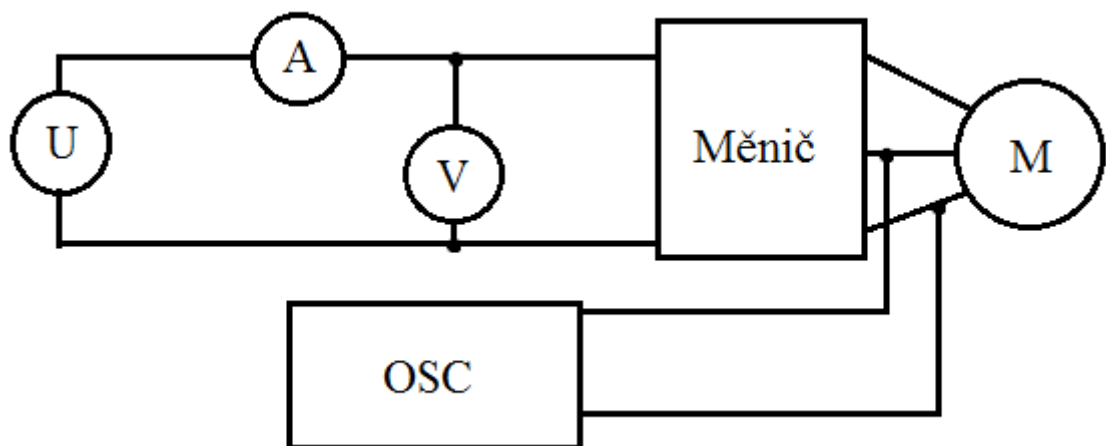
Graf 2.1-2: Měření naprázdno, zdroj: vlastní tvorba

$$K_v = \frac{n}{U} = \frac{25217}{19,5} = 1293 [ot/min/V]$$

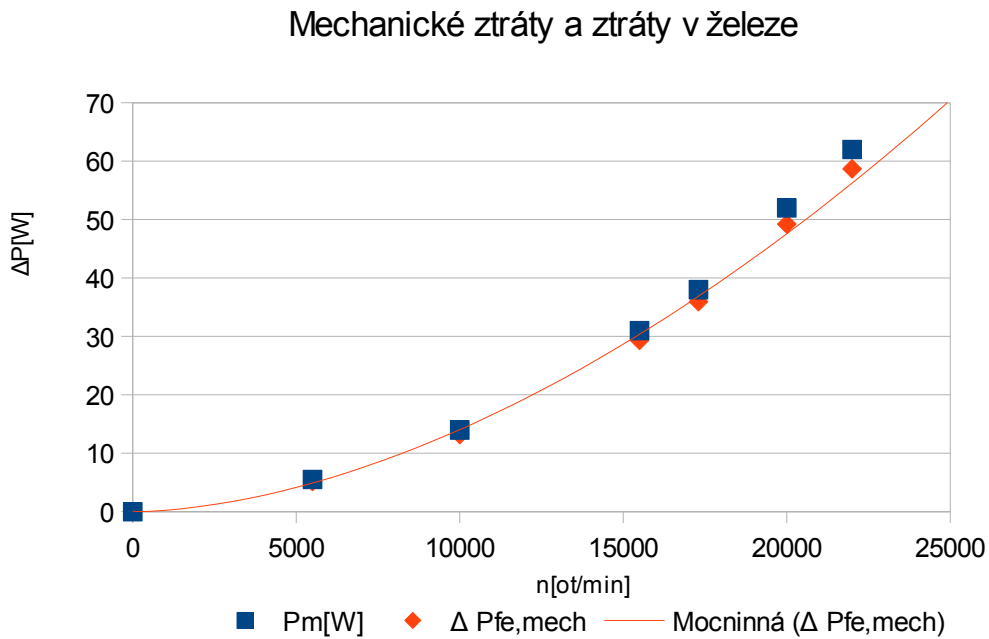
(2.1-4)

Z měření vyplynula lineární závislost napětí na otáčkách, kdy Napěťová konstanta vyšla 1293ot/min/V.

Odhad ztrát v železe a mechanických ztrát je nutné provést pro určení účinnosti BLDC motoru, jelikož výrobce tato data neposkytuje. Velikost mechanických ztrát a ztrát v železe jsem určoval v motorickém režimu, kdy byl BLDC motor řízen měničem HobbyKing HK-200 a bylo měřeno napětí a proud, kterým byl napájen měnič a frekvence střídavého napětí za měničem pomocí osciloskopu pro zjištění otáček viz. Obr. 2.1-3 Předpokládanou účinnost měniče jsem zvolil 95%, joulovy ztráty ve vinutí motoru jsem vzhledem k nízkému proudu zanedbal. Výrobce měniče účinnost neuvádí. Naměřené hodnoty byly proloženy křivkou. Mechanické ztráty jsou závislé pouze na otáčkách, avšak ztráty v železe jsou kromě frekvence (otáček) závislé též na sycení mag. obvodu, které se může s odebíraným výkonem měnit, proto odhad mechanických ztrát a ztrát v železe není příliš přesný. Ideální by pro přesné určení ztrát bylo mít matematický model motoru od výrobce, nebo mít možnost měřit mechanický výkon motoru, popřípadě při znalosti materiálů provést simulaci. Ani jedna z těchto možností však nebyla realizovatelná. Graf vychází z Tab. 4.



Obr. 2.1-3: Schéma měření mechanických ztrát a ztrát v železe, zdroj: vlastní tvorba



Graf 2.1-3: Měření mechanických ztrát a ztrát v železe, zdroj: vlastní tvorba

Rovnice křivky je :

$$\Delta P_{Fe,m} = 1,28365149544102 \cdot 10^{-6} \cdot n^{1,7597656675}$$

(2.1-5)

Průběh naměřených ztrát odpovídá realitě, jelikož ztráty v železe a mechanické ztráty jsou úměrné otáčkám umocněných 1,76 což je možné považovat za správnou hodnotu vzhledem k úměře ztrát na frekvenci:

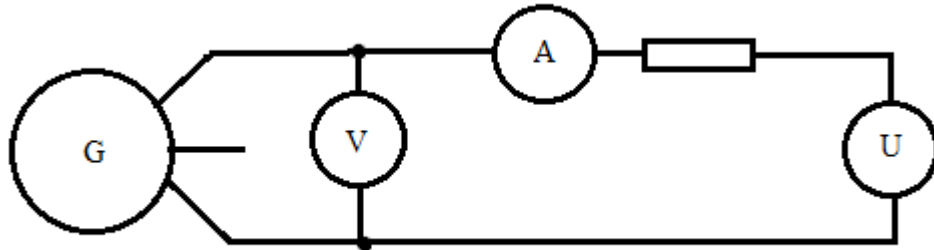
$$\Delta P_{\text{hyst}} \sim f$$

$$\Delta P_{\text{Fe}} \sim f^2$$

$$\Delta P_{\text{mech}} \sim f^{1,5}$$

$$f \sim n$$

Měření vnitřního odporu vinutí motoru a určení Joulových ztrát ve vinutí jsem prováděl dle schématu viz Obr 2.1-4 kde jsem zjišťoval odpor mezi dvěma fázemi Ohmovou metodou. Měření jsem prováděl mezi všemi fázemi, výsledná hodnota je aritmetickým průměrem.



Obr. 2.1.4: Schéma měření odporu vinutí, zdroj: vlastní tvorba

Odpor vinutí byl 35,1 mΩ viz Tab. 10.

Joulovy ztráty potom budou:

$$\Delta P_J = R \cdot I^2$$

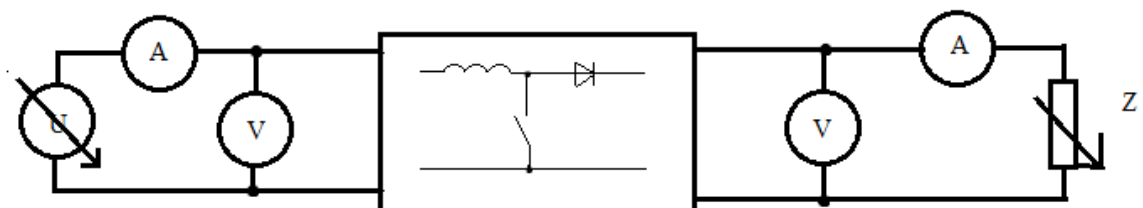
(2.1-6)

2.2 Měření měniče

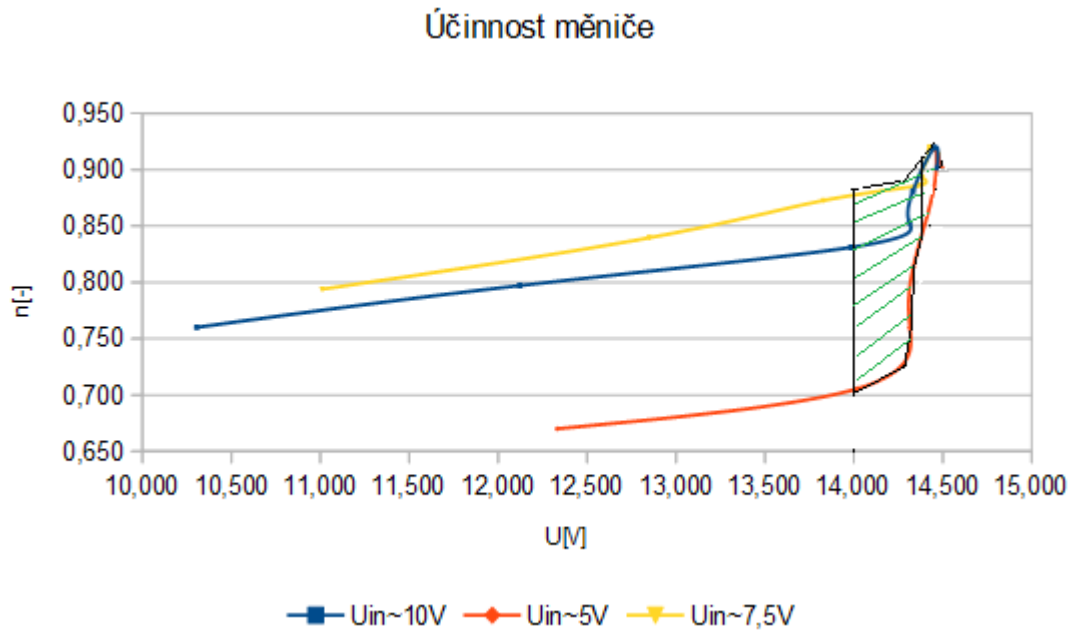
Měření výstupní charakteristiky a účinnosti měniče jsem prováděl dle schématu viz Obr.2.2-1. Měnič byl nastaven na 14,5V, a byl měřen pro vstupní napětí 5, 7,5 a 10V. Účinnost potom bude:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{U_{out} \cdot I_{out}}{U_{in} \cdot I_{in}}$$

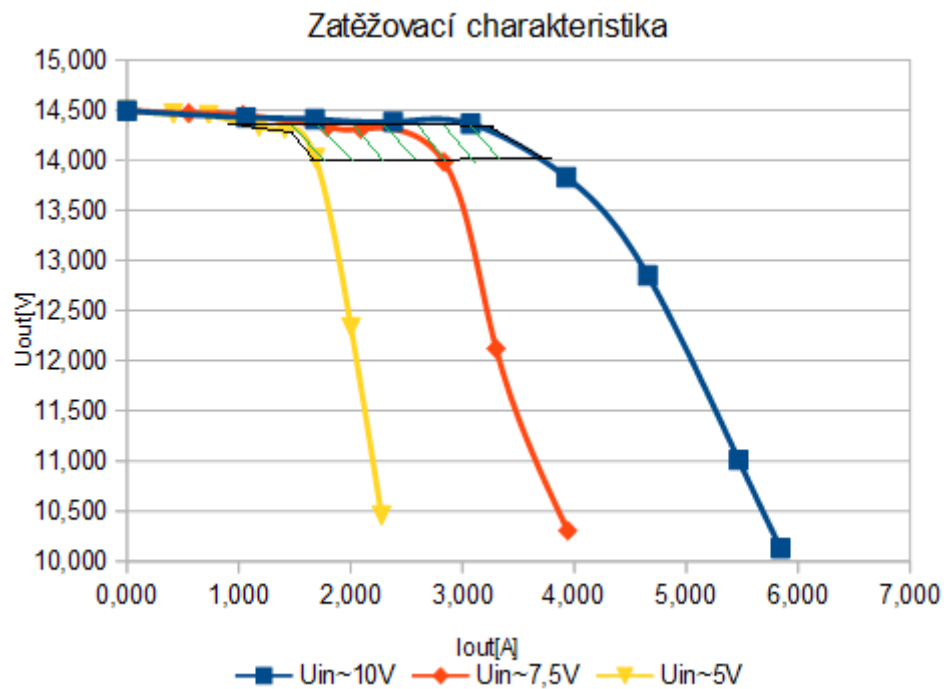
(2.2-1)



Obr. 2.2-1: Schéma měření měniče, zdroj: vlastní tvorba



Graf 2.2-1: Účinnost měniče, zdroj: vlastní tvorba

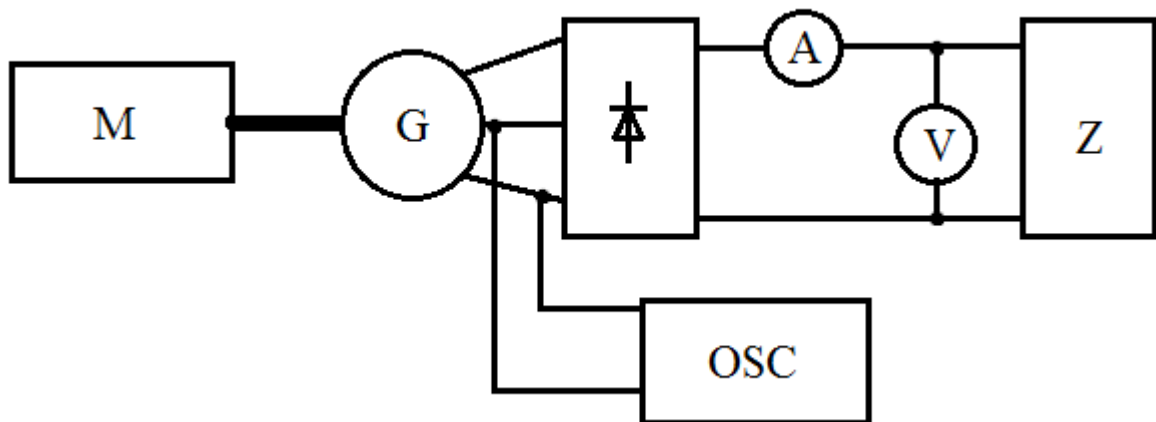


Graf 2.2-2: Zatěžovací charakteristika měniče, zdroj: vlastní tvorba

Z měření vyplynulo, že účinnost měniče se bude v ustálené stavu regulace napětí měniče pohybovat v rozmezí 72-90% dle zátěže a napětí generátoru, při rozpětí regulace napětí měniče mezi 13,9 a 14,4V. Grafy vychází z Tab. 5.

2.3 Měření výkonů

Měření výkonu spalovacího motoru a elektrické části jsem prováděl dle schématu na Obr.2.3-1 kde Z představuje elektronickou zátěž ITECH IT8512C která byla nastavena na funkci udržování konstantního napětí-fungovala jako paralelní regulátor napětí. Proud a napětí byl měřen přímo integrovaným voltmetrem a ampérmetrem elektronické zátěže. Osciloskop sloužil k měření frekvence sruženého napětí pro zjištění otáček. Měření jsem prováděl pro plný výkon spalovacího motoru pro nastavená napětí na stejnosměrné straně od 4V do 16V. Jako palivo bylo použito Rapicol 30% , což je směs methanolu s 30% nitromethanu a 12% syntetický olej. Jedná se o nejvýkonnější směs běžně dostupného paliva pro modelářské automobilové motory.



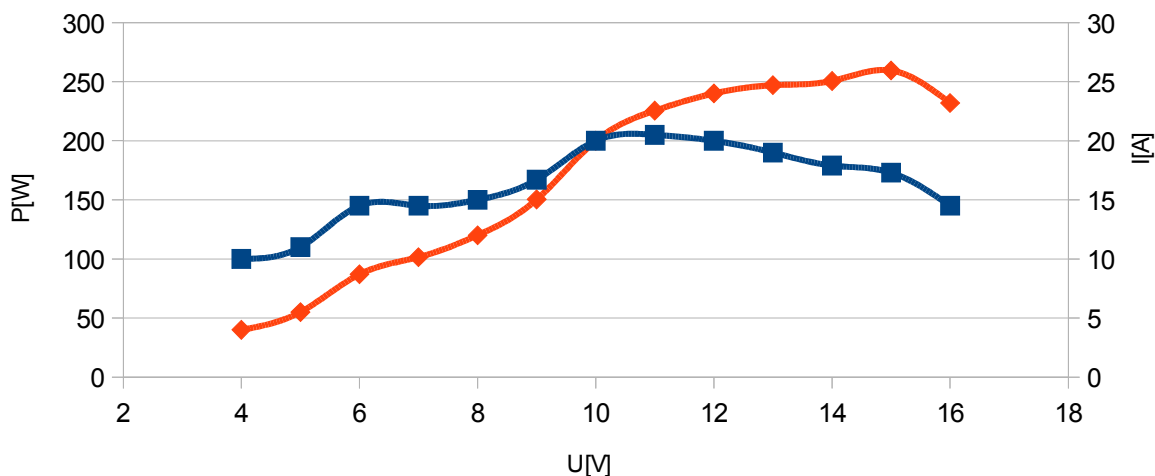
Obr. 2.3-1: Schéma měření výkonů, zdroj: vlastní tvorba

Výkon spalovacího motoru potom bude:

$$P_M = P + \Delta P_j + \Delta P_{Fe,m} + \Delta P_U$$

(2.3-1)

Proud a výkon za usměrňovačem

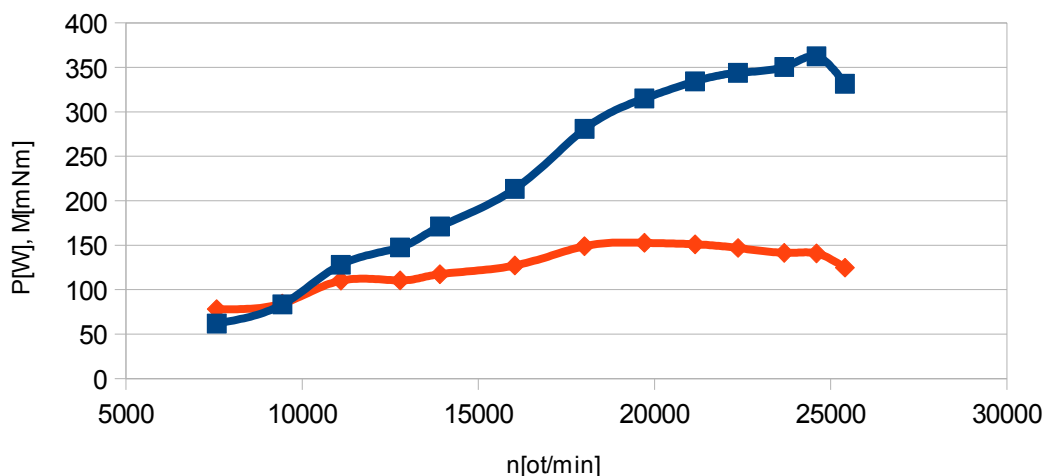


Graf 2.3-1: Proud a výkon za usměrňovačem, zdroj: vlastní tvorba

Z měření vyplynulo, že přenosný zdroj elektrické energie je schopen dodat maximální elektrický výkon cca 259W při napětí 15V. Spalovací motor však velice citlivě reaguje na atmosférické podmínky, teplotu paliva, nastavení karburátoru, typ žhavicí svíčky a teplotu motoru. Výkon 259W bylo relativně obtížné dosáhnout z důvodu nutnosti přesného nastavení karburátoru. Z testování vyplynulo, že přenosný zdroj elektrické energie je schopen bez zdlouhavého nastavování dodat elektrický výkon 230W.

Z výkonu za usměrňovačem, byl následně zjištěn výkon spalovacího motoru, kdy výkon spalovacího motoru byl spočten dle vztahu (2.3-1).

Výkon a moment spalovacího motoru



Graf 2.3-2: Výkon a moment spalovacího motoru, zdroj: vlastní tvorba

Z odhadu výkonu vyplynulo, že spalovací motor dosahuje výkonu 362W při 24600 ot/min., maximální točivý moment dosahuje 0,152 Nm při 19715 ot/min. Tento odhad je však pouze přibližný, jeho přesnost se ovíjí od přesnosti určení ztrát usměrňovače a generátoru. Určený výkon neodpovídá výkonu motoru udávaného výrobcem 1,3PS (960W) při 28000 ot/min, kterých spalovací motor s připojeným generátorem naprázdno nebyl schopen dosáhnout. Toto může být způsobeno nesprávným zaběhnutím motoru, nevhodným výfukem, špatně vyrobeným spalovacím motorem, použitím nestandardního paliva při měření charakteristiky motoru výrobcem či záměrným nadhodnocením výkonu motoru výrobcem. Rozbor těchto příčin a možností jejich odstranění však přesahuje rámec této práce.

Následně byl proveden výpočet účinnosti usměrňovače, generátoru, účinnosti výkonové části a celkové účinnosti- účinnosti, do které je započítán odběr řízení- 5,5 resp 7,4W. Do celkové účinnosti není započítána účinnost měniče, jelikož měření probíhalo na maximální výkon spalovacího motoru při daném výstupním napětí a měnič není schopen vzhledem k nastavenému proudovému omezení tento výkon využít.

$$P_G = P + \Delta P_U [W]$$

(2.3-2)

$$\eta_U = \frac{P}{P_G} \cdot 100 [\%]$$

(2.3-3)

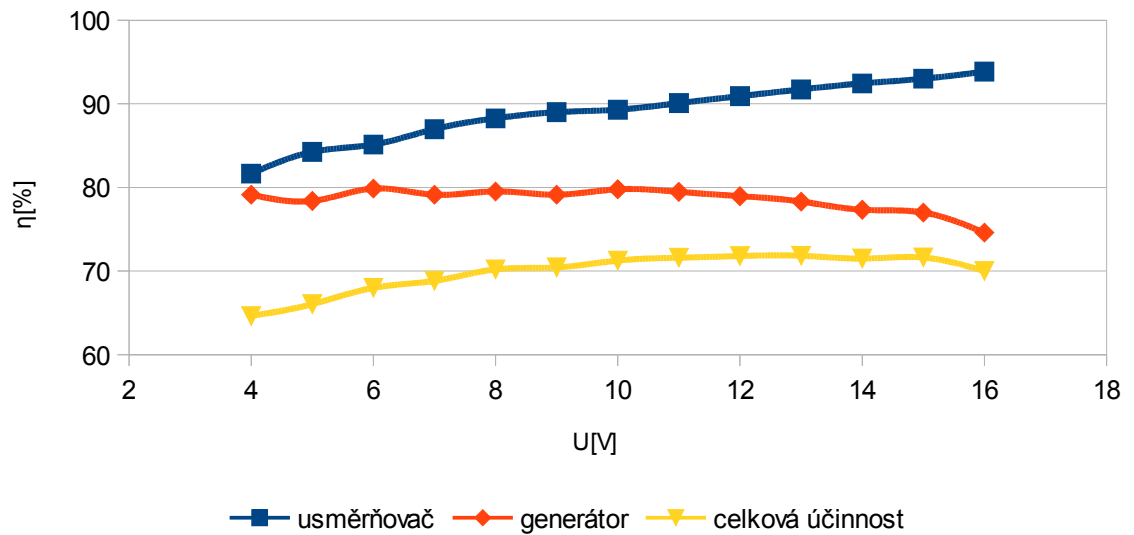
$$\eta_G = \frac{P_G}{P_M} \cdot 100 [\%]$$

(2.3-4)

$$\eta = \frac{P - \Delta P_R}{P_M} [\%]$$

(2.3-5)

Účinnost

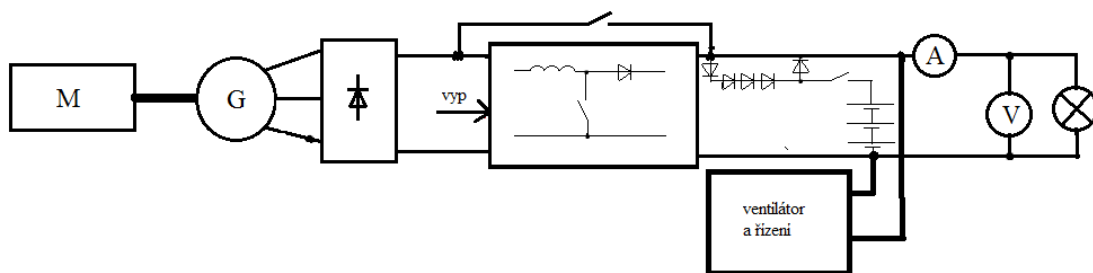


Graf 2.3-3: Účinnost elektrické části, zdroj: vlastní tvorba

Z grafů je zřejmé, že pro maximální požadovaný výkon se nachází okolí pracovního bodu (13,8V-14,8V) v okolí maximální účinnosti (71%) a taktéž v okolí maximálního výkonu spalovacího motoru. Z tohoto důvodu považují volbu generátoru ke spalovacímu motoru za vhodnou. Grafy 2.3-1 -2.3-3 vychází z Tab. 6.

2.4 Měření spotřeby

Měření spotřeby probíhalo obdobně jako na schématu Obr. 2.4-1, kdy byl měřen čas spotřeby 1 mL paliva. Jako zátěž byly použity různé kombinace automobilových žárovek. Měření jsem provedl s aktivní regulací napětí měniče a napětí generátoru. Zátěž jsem postupně zvyšoval, při zvyšování byl připojen akumulátor, kvůli omezení poklesu napětí. Po ustálení napětí měniče (výstupního napětí) jsem akumulátor odpojil a měřil spotřebu. Spotřeba byla měřena jak s vypnutým přemostěným měničem, tak se zapnutým měničem při nízkých výkonech.



Obr. 2.4-1: Schéma měření spotřeby, zdroj: vlastní tvorba

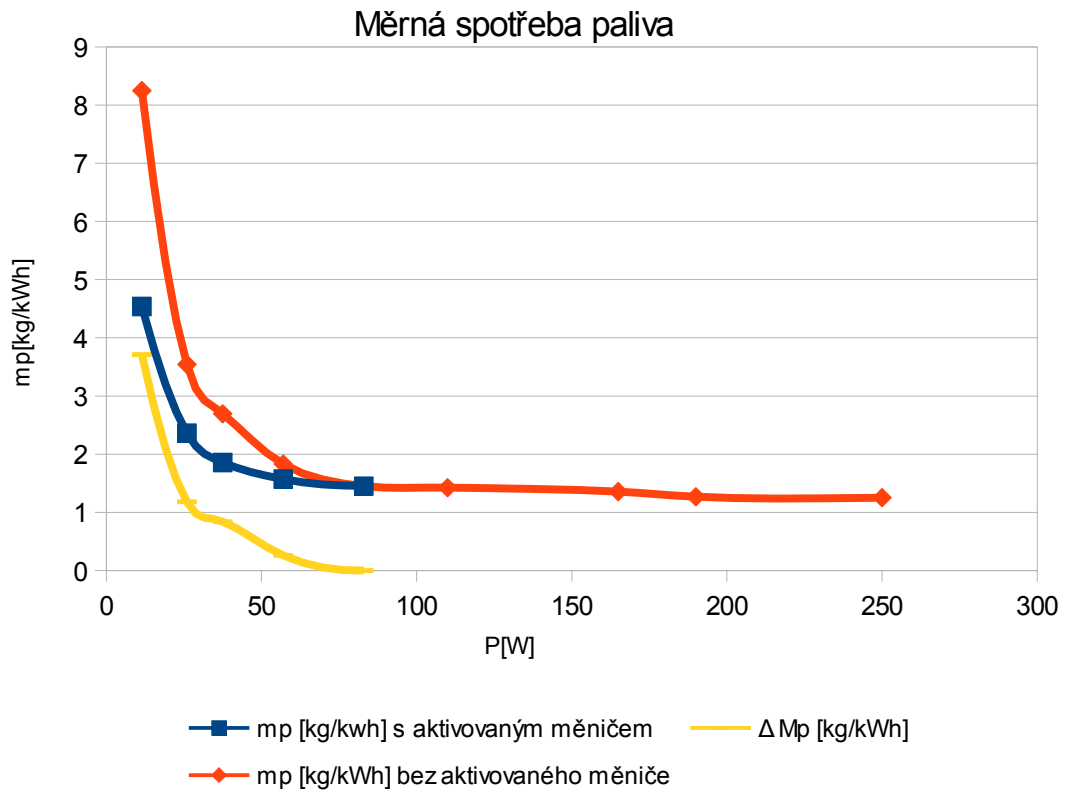
Vztahy pro výpočet spotřeb:

$$V = \frac{3600}{1 \cdot t} = \frac{3600}{1 \cdot 65} = 55,4 [ml/h] \quad (2.4-1)$$

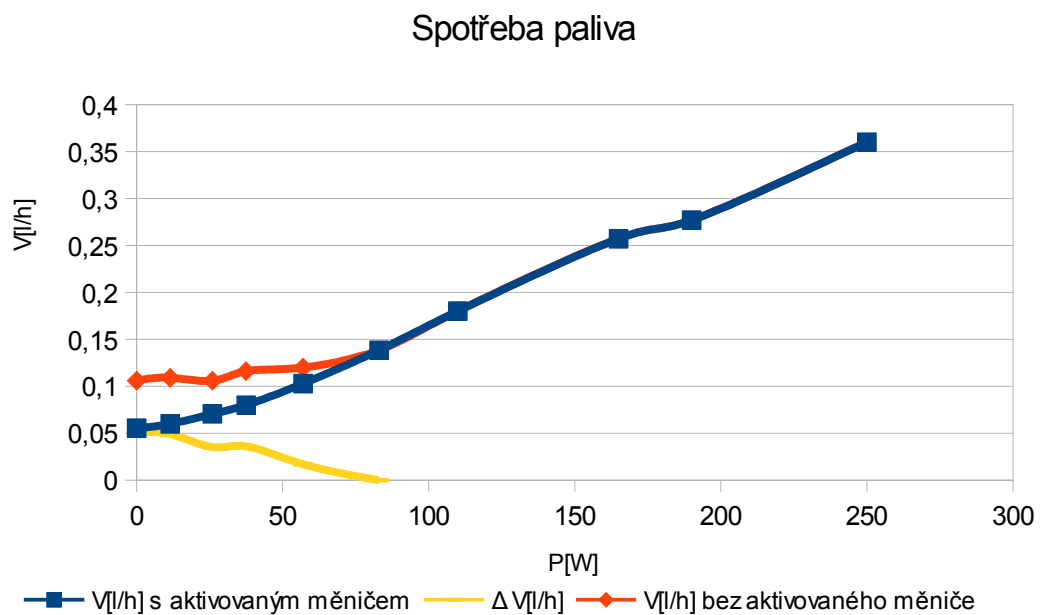
$$V_p = \frac{E \cdot 3600}{P \cdot t \cdot 1 \cdot 1000} = \frac{1000 \cdot 3600}{250 \cdot 10 \cdot 1000} = 1,44 [l/kWh] \quad (2.4-2)$$

Hmotnost jednoho litru paliva je 0,87kg, tj. hustota paliva je 0,87kg/dm³. Hmotnost paliva spotřebovaného na 1kWh je:

$$m_p = \rho \cdot V_p = 0,87 \cdot 1,44 = 1,25 [kg/kWh] \quad (2.4-3)$$



Graf 2.4-1: Měrná spotřeba paliva, zdroj: vlastní tvorba



Graf 2.4-2: Spotřeba paliva, zdroj: vlastní tvorba

Bez zátěže spotřeboval motor při cca 5300 ot/min ~ 4V 1ml paliva za 65s, na plný výkon při odporové zátěži 250W motor spotřeboval 1ml paliva za 10s. Na hodinu chodu na naprázdno tudíž spalovací motor spotřebuje cca 55,4 ml paliva. Z měření grafu měrné spotřeby paliva je patrné, že přenosný napájecí zdroj je vhodné provozovat se zátěží blízké jejímu maximálnímu výkonu, tj. 200-250W. Dále je patrné snížení měrné spotřeby paliva v oblasti aktivního měniče, tj. snižování otáček spalovacího motoru oproti otáčkám odpovídající výstupnímu napětí. Spotřeba paliva na bez připojené zátěže je téměř o polovinu nižší při volnoběžných otáčkách s měničem, oproti volnoběhu při otáčkách odpovídajících výstupnímu napětí. Grafy 2.4-1 a 2.4-2 vycházejí z Tab.7.

2.5 Oživování a další měření

Testoval jsem výstupní napětí měniče s připojeným akumulátorem nabitým na 12V (4V na článek) zda výstupní napětí odpovídá stanoveným hodnotám. Spalovací motor byl nastaven na plný výkon bez připojené zátěže s přemostěným měničem a bylo měřeno výstupní napětí. Při proudu 17,1A do akumulátoru bylo výstupní napětí 15,12V. Dále bylo měřeno výstupní napětí při zátěži odebírající proud cca 30A (automobilové žárovky 190W a 100W) a s vypnutým motorem, tj. veškerý výkon poskytoval akumulátor. Při proudu 29,5A bylo změřeno napětí 11,07V. Spodní hranice napětí splňuje tedy požadované kritérium 10,5V, horní hranice napětí překračuje požadované kritérium 15V o 0,12V. Jednalo se o nepříznivý stav pro horní hranici napětí- akumulátor byl nabit na 4V/článek a veškerý výkon odebíral právě on. Vzhledem k malému překročení horní hranice napětí není toto překročení překážkou v provozu. Dále bylo měřeno zvlnění napětí při zátěži 246W (190W a 55W autožárovka), kdy při výstupním napětí 14,3V a proudu 17,2A bylo zvlnění 0,25V, což považuji za dobrý výsledek. Výstupní napětí při různě volených odporových zátěžích v ustálených stavech kolísalo mezi 13,7- 14,5V. Nabíjecí proud akumulátoru při chodu naprázdno, tj napětí měniče byl 20mA, to odpovídá požadavku na ukončení nabíjení pro toto napětí (14,5V).

Pro oživení bylo nejprve nutné sestavit soustrojí spalovací motor- generátor a následně spalovací motor zaběhnout. Záběh trval cca 3 hodiny provozu v různých otáčkách a s různou zátěží s karburátorem seřízeným na bohatou směs. Po záběhu byl spalovací motor seřízen na co nejvyšší výkon při plné zátěži, viz. schéma měření výkonu motoru Obr. 2.3-1. Seřízení spočívalo v nastavení bohatosti směsi jehlou pro plný výkon a jehlou pro částečné zatížení a volnoběhu jehlou volnoběžných otáček. Konkrétní nastavení není možné exaktně popsat,

jelikož na jehlách, ani v okolí nejsou značky od kterých by bylo možné odečíst polohu. Žhavicí svíčka byla použita R5, jelikož s touto svíčkou motor běžel nejrovnoměrněji. Následně byl změřen výkon výstupní elektrický výkon a výkon spalovacího motoru.

Následně byl sestaven a otestován měnič, jehož oživování spočívalo ve volbě RC článků R8,R9,C1,C5 a R5,C13 tak aby měnič pracoval rovnoměrně při různých zátěžích a necykloval. Měnič byl následně otestován.

Měnič pro žhavení testován nebyl, jelikož nároky na výstupní napětí nejsou velké, jelikož je na něj připojena pouze žhavicí svíčka, jeho účinnost není kritická, protože je v chodu pouze krátkodobě při žhavení.

Následovalo nastavení regulátoru napětí generátoru (otáček), kde hlavní kritéria byla rychlá reakce při skoku zátěže ve volnoběžných otáčkách a zabránění rozkmitání regulátoru. Krátký přechodový děj (do 2-3s) nevadí, jelikož při nízkých výkonech je napětí vyfiltrováno měničem a při vysokých výkonech, při přemostěném měniči jsou překmity utlumeny připojeným akumulátorem. Následně byl nastaven regulátor napětí měniče, který byl nastaven s ohledem na odolnost proti malým změnám napětí.

Následovalo měření spotřeby s různou zátěží. Provoz s měničem/s přemostěným měničem byl ovládán manuálně. Měření bylo prováděno s odpojeným akumulátorem aby nedocházelo k případnému zkreslení výsledků. Posléze bylo měřeno výstupní napětí v různých provozních stavech.

Poté bylo nastavováno ovládání přemostění měniče. Během jeho nastavování však došlo ke zničení spalovacího motoru vlivem oddělení čidla teploty od hlavy spalovacího motoru. Tím pádem došlo k vypnutí ventilátoru a přehřátí spalovacího motoru. Proto nebylo přemostění měniče důkladně otestováno v provozu, stejně tak jako smyčka pro start spalovacího motoru a dlouhodobé chování navrženého zdroje. Provedení těchto, a dalších, testů, včetně záznamu oscilogramů napětí generátoru a výstupního napětí by vyžadovalo nákup nového spalovacího motoru a jeho záběh, nebylo možné realizovat z důvodu nedostatku finančních prostředků. Ze stejného důvodu nebyla vyrobena podstava a kryt zdroje. Spalovací motor byl celkově v chodu 21,5h. Testování probíhalo za teplot 5-24°C, teplota generátoru po 5 min provozu na maximální výkon byla 83°C.

2.6 Ovládání

Pro start je nejprve nutné připojit palivové hadičky a hadičky tlakování paliva a načerpat palivo do karburátoru ucpáním výfuku a startováním motoru startovacím táhlem, dokud se nedostane palivo do motoru. Pokud nastane zablokování spalovacího motoru v důsledku zaplavení spalovacího motoru palivem, je nutné vyšroubovat žhavicí svíčku a motor startovacím táhlem protočit naprázdno.

Následně je nutné zapnout hlavní vypínač. Pokud je teplota motoru příliš nízká, je nutné motor předehrát, což je signalizováno červené LED-kontrolka teploty. Je tedy nutné vložit ohřívač do hlavy motoru a stisknout tlačítko. Po stisku započne přehřev, který trvá do ohřátí motoru na dostatečnou teplotu. Po dosažení dostatečné teploty začne svítit zelená LED, což signalizuje dostatečnou teplotu motoru a je možné motor nastartovat. Je nutné vyndat ohřívač. Následně je nutné stisknout tlačítko pro žhavení a tahovým startérem motor nastartovat. Během žhavení svítí kontrolka žhavení. Pokud je stisknuté tlačítko žhavení a kontrolka žhavení nesvítí, je přerušena žhavicí svíčka. Po startu je nutné vyčkat cca 30s než se spalovací motor zahřeje a následně je možné připojit zátěž. Pokud po zapnutí vypínače nesvítí ani jedna LED, je vybitá baterie a není možné generátor nastartovat.

Během chodu bez poruchových stavů svítí zelená LED. Pokud bude zátěž odebírat výkon větší než je schopen generátor dodat po dobu delší jak cca 30s, dojde k odpojení zátěže, což je signalizováno červené LED „odpojení zátěže“ a zhasnutím zelení LED. Po cca 30s je proveden pokus o opětovné připojení zátěže.

Pokud během chodu dojde k překročení maximální teploty spalovacího motoru, dojde k odpojení zátěže, což je signalizováno svitem LED „teplota“. Po ochlazení dojde k opětovnému připojení zátěže.

Pro vypnutí přenosného zdroje elektrické energie je nutné nejprve odpojit zátěž a poté odpojit palivo a vyčkat dokud se palivo obsažené v karburátoru a přívodních hadičkách nespotřebuje a motor se nezastaví. Následně je možné vypnout hlavní vypínač. Poté je nutné, odšroubovat žhavicí svíčku a do karburátoru a válce nakapat 3 kapky after run oleje a motor protočit. Tento postup je nutné opakovat 3x.

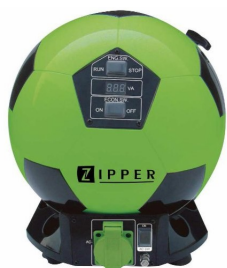
3 Porovnání s komerčně dostupnými zdroji

Navržený zdroj elektrické energie můžeme porovnávat vzhledem k zamýšlenému použití pro turistiku a expedice s ostatními zdroji energie zejména z hlediska hmotnosti, rozměrů energetické hustoty, ceny a praktičnosti.

Benzinové elektrocentrály mají výhodu ve snadnější dostupnosti paliva a benzínu zejména díky jeho nižší ceně -36Kč/L, oproti modelářskému palivu s cenou cca 190Kč/l a jeho nižší spotřebě okolo 0,7L/kWh (540 g/kWh)- hodnoty vycházejí z tvrzení výrobců, obvykle při zatížení 75%. Jejich provoz je tudíž ekonomičtější a benzín je v porovnání s modelářským palivem mnohem dostupnější. Velkou výhodou komerčně dostupných benzinových elektrocentrál je jejich snadná údržba a obsluha.

Ideální zástupce jsem vybral z hlediska hmotnosti- Zipper ZI-STE900IV a HONDA EX 7. Elektrocentrála Zipper ZI-STE900IV má dle[23] trvalý výkon 0,9kVA, rozměry 33,5x33,5x34 cm, hmotnost 8kg s cenou cca 5000 Kč. Je poháněna dvoutaktním spalovacím benzinovým motorem. Jedná se o jednu z nelehčích elektrocentrál na českém trhu, přesto je čtyřikrát těžší než navržený přenosný zdroj elektrické energie.

Elektrocentrála HONDA EX 7 s provozním výstupním výkonem 600W, hmotností 12kg, rozměry 45X24x38cm a cenou cca 26000Kč. Porovnání s běžně dostupnými levnými hobby elektrocentrálami, jako Garden King GG950, nemá smysl, jelikož jejich hmotnost se pohybuje okolo 20kg, což je pro daný účel nevhodné.



Obr. 3-1: Zipper ZI-STE900IV, zdroj: [23]



Obr.3-2: Honda EX7, zdroj: [24]



Obr. 3-3: Garden King GG950, zdroj: [25]

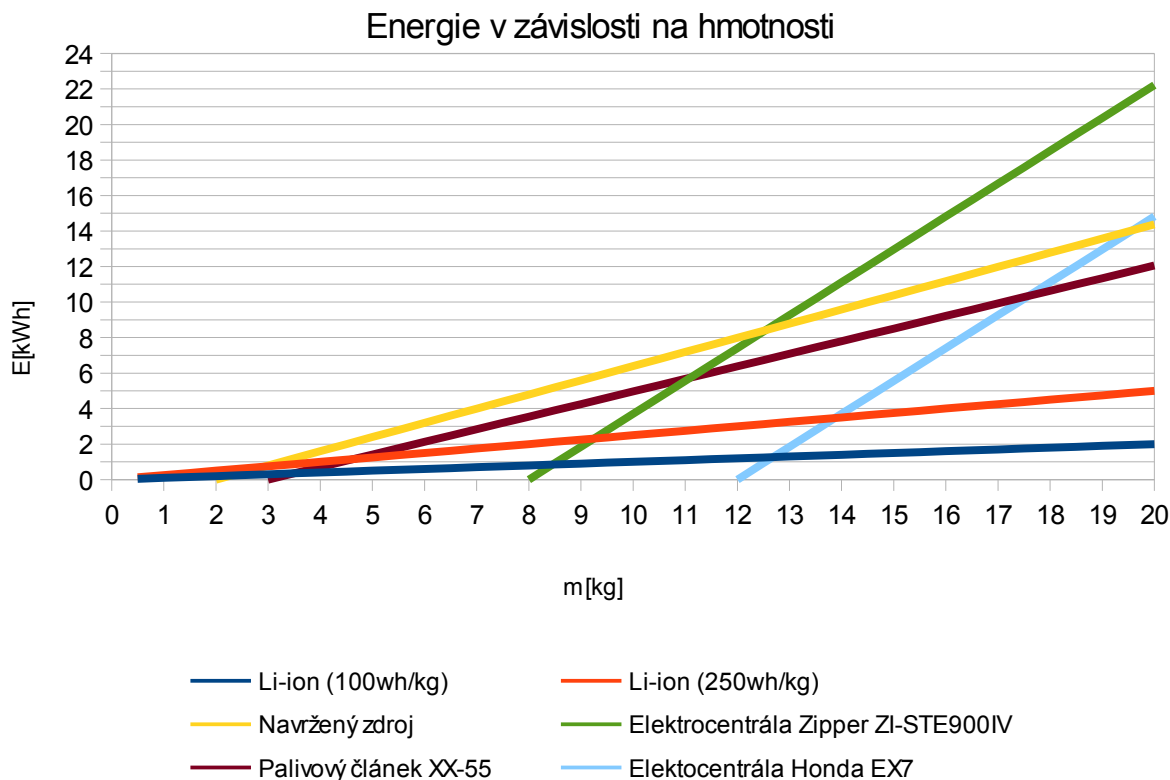
Přenosný zdroj elektrické energie je též možné porovnat s akumulátory. Porovnával jsem jej s Li-ion akumulátory kvůli jejich vysoké energetické hustotě -okolo 100-250 Wh/kg dle [26]. Výhoda akumulátorů spočívá zejména v bezhlučném provozu bez emisí, spolehlivosti, možnosti jejich opětovného využití a velmi snadnou obsluhou a údržbou. Nevýhodou akumulátorů je jejich stále stejná hmotnost i ve vybitém stavu, na rozdíl od elektrocentrál, kdy se hmotnost neseného nákladu snižuje o hmotnost spotřebovaného paliva. Li-ion baterie jsou dobře dostupné na trhu.

Další možností je využít palivový článek na různé druhy paliv, zejména na metanol. Jejich výhodou je obdobně jako u baterií bezhlučnost spolehlivost prakticky nulové emise (vodní pára a CO₂), spolehlivost. Nevýhodou je zejména cena a dostupnost. Jako zástupce jsem vybral článek XX-55. S cenou 10000\$ hmotností 3kg výkonem 50W, spotřebou methanolu 1,4kg/kWh, rozměry 27,2 x 20,6 x 9,9 cm a hmotností 3kg. Velkou výhodou tohoto palivového článku je jeho robustnost, odolnost, jednoduchá obsluha a údržba.



Obr. 3-4: Palivový článek XX-55, zdroj: [27]

Provedl jsem srovnání výše uvedených zdrojů z hlediska vhodného použití s ohledem na nesenou hmotnost nákladu a množství dodané energie (samotného zdroje a paliva).



Graf 3-1: Energie v závislosti na hmotnosti, zdroj: vlastní tvorba

Průběhy odpovídají vztahu:

$$E = (m - m_{zdr}) \cdot m_p [kWh] \quad (3-1)$$

Z grafu vyplývá, že při potřebném množství energie do 0,25 -0,6 kWh dle energetické hustoty Li-ion baterií je vhodné jako zdroj použít z hlediska hmotnosti právě tyto baterie. Palivový článěk Ultracell XX50 je výhodnější použít než baterie při potřebném množství energie od 0,35 resp 1,2 kWh do 5,8 kWh, kdy je již výhodnější použití klasické elektrotrály. Nad 9kWh je již výhodné použití elektrocentrály Zipper ZI-STE900IV.

Pokud by byla vyžadována kvalitní elektrocentrála Honda tak se její využití zdá být vhodným od 13kWh. Při potřebném množství spotřebované energie 0,3-0,8 kWh až 8,5 kWh- při použití elektrocentrály Zipper, resp. 13kWh při použití elektrocentrály HONDA, je

výhodné použití navrženého přenosného zdroje elektrické energie, kdy již potřebném množství 4kWh bude hmotnost navrženého přenosného zdroje energie i s palivem 6,5kg, kdežto nejlepších Li-ion baterií 20kg, elektrocentrály Zipper s palivem 10,2kg, elektrocentrály Honda s palivem 14kg, a palivového článku XX-55 s palivem 8,5kg. Z tohoto důvodu považuji návrh za úspěšný, jelikož v uvedeném množství nutné energie se jeví být nejvodnějším zdrojem i v porovnání s palivovým článkem s mnohonásobně vyšší cenou.

Dále je možné porovnat zdroje z hlediska nákladů na palivo na vyrobenou kWh. Při ceně paliva 190Kč/L a nejnižší měrné spotřebě 1,44 l/kWh, je cena jedné kWh 373Kč oproti 26Kč při použití benzínové elektrocentrály se spotřebou 0,7l l/kWh a cenou benzínu 36Kč. 1 kWh z palivového článku stojí 98Kč, při spotřebě 1,4l/kWh a ceně methanolu 70Kč/l. Z výše uvedeného vyplývá, že navržený zdroj je značně neekonomický, co se týká ceny za vyrobenou kWh.

V současné době se začínají objevovat návrhy zdrojů používající mikroturbíny popřípadě pístové motory s volnými písty spalující různá paliva, s výkony 1-1000W, které by mohly parametry navrženého zdroje elektrické energie z hlediska nízké hmotnosti respektive energetické hustoty předčít. Tyto zdroje však dosud nejsou komerčně dostupné a jsou zatím ve fázi výzkumu a vývoje. Ve stádiu prototypu je mikroturbína firmy IHI, která váží i s generátorem 1,2kg a má výkon 400W, kompletní zdroj však váží 13kg.



Obr. 3-5: Těleso mikroturbíny a generátoru, zdroj: [28]



Obr. 3-6: Zdroj s mikroturbínou, zdroj: [28]

Závěr

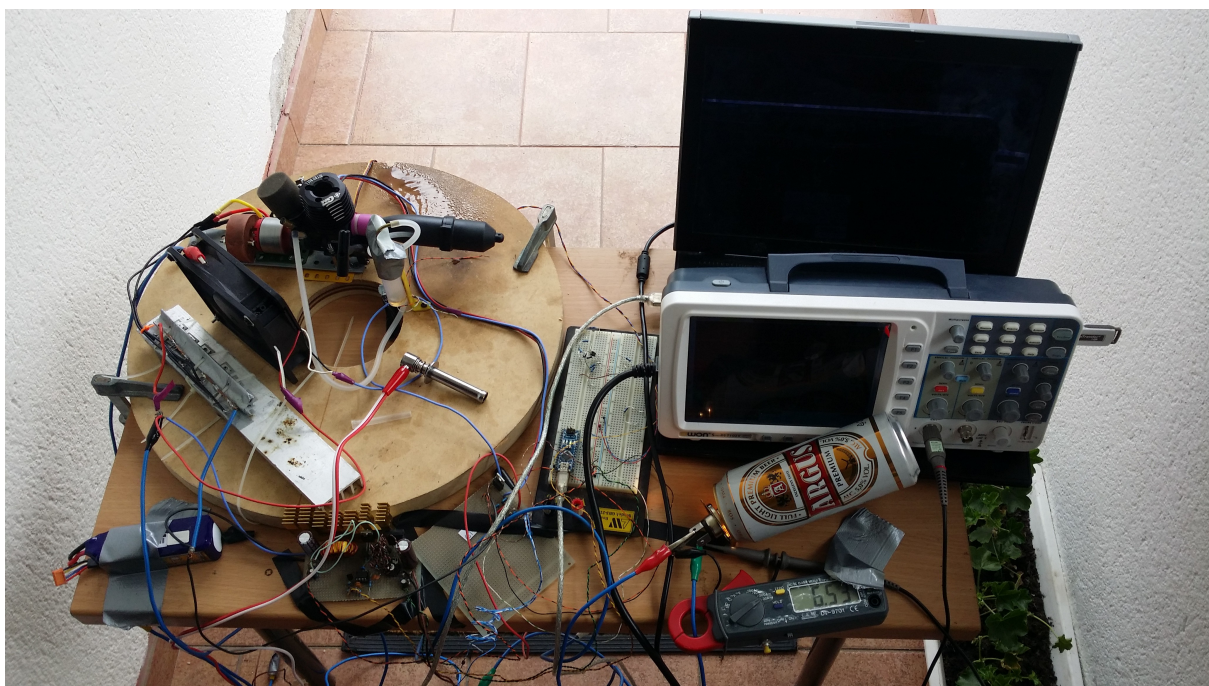
Při realizaci této diplomové práce jsem ověřil, že lze navrhnout a sestavit funkční přenosný zdroj elektrické energie poháněný spalovacím motorem ze součástek na trhu běžně dostupných. Dále jsem ověřil, že lze takovýto zdroj postavit se základním vybavením, tj. vrtačka, mikrovrtáčka a páječka. Zdroj, ačkoli byl navrhován na výkon 300W, měl maximální výkon pouze 250W, přičemž tento vyžadoval pečlivé nastavení spalovacího motoru. Tento nižší výkon byl způsoben nízkým výkonem spalovacího motoru, který dosahoval cca 362W, ačkoli výrobce udával výkon 960W. Dále byl navržen a sestaven měnič napětí umožňující provoz při nízkém odebíraném výkonu na nízké otáčky spalovacího motoru, což šetří palivo, snižuje opotřebení a hluchnost. Při částečném zatížení a zejména při volnoběhu docházelo ke snížení spotřeby paliva téměř o polovinu. Výstupní napětí zdroje prakticky odpovídá požadovaným hodnotám, i když horní hranice výstupního napětí (15V) byla překročena o 0,12V. K tomuto překročení však může dojít pouze v přechodovém ději při odpojení zátěže využívající plný výkon generátoru, a navíc nabitým akumulátorem, proto jej lze zanedbat. Akumulátor, ačkoli je připojen do obvodu pouze přes diody, je udržován nabitý na 50-90%, což je optimální. Požadavek na maximální hmotnost (3kg) se též podařilo splnit- hmotnost dokončeného navrženého zdroje včetně příslušenství by nepřekročila 2kg. Nejlehčí komerčně dostupná elektrocentrála měla hmotnost 8kg. Kritérium co nejmenších rozměrů považuji za splněné. Rozměry zdroje jsou 31x12x12cm, rozměry běžně dostupných elektrocentrál začínají na 30x30x30 cm. Rozměry by bylo možné pravděpodobně dále zmenšit, avšak za cenu složitějšího mechanického řešení. Maximální cenu zdroje (5000Kč) se dodržet nepodařilo, ačkoli cena byla jedním z hlavních faktorů při výběru komponent, zejména těch nejdražších- spalovacího motoru, serva a generátoru. Cena bez zhotovení podstavy a pláště je 5134Kč za materiál zdroje. Cenu by pravděpodobně nešlo výrazněji snížit lepším výběrem komponent. Celkový náklad na vývoj tohoto zdroje však odhaduji na cca 8000Kč. Porovnáním s komerčně dostupnými přenosnými zdroji elektrické energi alespoň částečně srovnatelných výkonů jsem zjistil, že použití navrženého zdroje je výhodné z hlediska hmotnosti, pokud je množství požadované energie mezi 0,3-8,5 kWh. To odpovídá zamýšlenému určení- dobíjení spotřební elektroniky na výletech, turistických akcích a expedicích. Dále je z hlediska hmotnosti navržený zdroj výhodnější než komerčně dostupný methanolový palivový článek s cenou cca 10000\$, což považuji za úspěch. Z hlediska ceny za vyrobenou energii je však navržený zdroj nevýhodný- s cenou 373 Kč/kWh oproti 26Kč/kWh u benzínové

elektrocentrály. Výhodnost použití navrhovaného zdroje však může pozitivně ovlivňovat optimálnější využití zdroje z hlediska výkonu- vzhledem k menšímu výkonu bude optimálněji využít než silnější benzínová elektrocentrála.

Navržený zdroj nebyl dokončen do plně použitelného řešení vzhledem k nedostatku finančních prostředků a zničení spalovacího motoru vlivem oddělení teplotního čidla a následnému přehřátí motoru. K celkovému dokončení by bylo nutné dokončit podstavu a kryt, následně otestovat ovládání přemostění měniče a ověřit za provozu některé další funkce. Zdroj by však byl funkční i bez přemostění měniče, jen s vyššími ztrátami. Elektronika byla řešena na univerzální desce plošného spoje, avšak v současném stavu, po doletování mikroprocesoru a natření ochranným lakem by byla použitelná ve finálním prototypu.

Co se týká možného vylepšení, nabízí se zejména odstranění ztrát usměrňovače a ztrát na diodě v step-up měniči použitím zapojení tzv. ideálních diod s MOSFET tranzistorem. Potom by při dostatečně proudově dimenzované cívce měniče bylo možné vypustit přemostění měniče. Dále by bylo možné optimalizovat účinnost lepším nastavením regulátorů a proudového omezení měniče. Potom by mohl spalovací motor pracovat v režimu s lepší účinností. Zlepšení regulace by však pravděpodobně vyžadovalo použití dražších rychlejších serv a použití setrvačnicku ke zrovnoměrnění chodu a zvýšení energie akumulované v rotačních částech a tím dovolit ostřejší nastavení regulátorů a proudového omezení měniče. Pro dlouhodobý provoz by bylo vhodné doplnit k akumulátoru balancér (fungující obdobně jako výkonová Zenerova dioda) omezující napětí na článek na stanovenou hodnotu (4V), čímž by se zabránilo přebíjení. Pro jeho realizaci by bylo možné využití buď speciálních obvodů k tomu určených nebo zapojení s napěťovou referencí posílenou výkonovým tranzistorem. Lákavé by bylo realizovat automatický start spalovacího motoru v případě připojení zátěže či vybitého akumulátoru. Toto je však prakticky nerealizovatelné, z důvodů vlastností spalovacího motoru-do karburátoru je nutné načerpat optimální množství paliva, motor se může palivem zablokovat, a dalších problémů.

Vzhledem k dosaženým parametrům, nedostatku exaktních informací o klíčových komponentech -spalovacím motoru a generátoru a nemožnost provést přesné měření momentu a výkonu v rozsahu 0-30000 ot/min, komplexnosti úkolu a „polním podmínkám“ při měření považuji návrh za vydařený.



Obr. Závěr: Ukázka z měření spotřeby

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] STEJSKAL, Marek. Regulátor dobíjení olověných akumulátorů pro synchronní generátory malých výkonů buzených permanentními magnety. Plzeň, 2012. bakalářská práce (Bc.). ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta elektrotechnická
- [2] C. FRITZSCHE AND H.-P. DEUNOW (2008). *ADVANCED TORQUE CONTROL, NEW APPROACHES IN AUTOMATION AND Robotics*, Harald Aschemann (Ed.), ISBN: 978-3-902613-26-4, InTech, Dostupné 4.4.2014 z: http://www.intechopen.com/books/new_approaches_in_automation_and_robotics/advanced_torque_control
- [3] HEWTON, Lewis. MILLER, Heath. Steady state RC engine dynamometer. Adelaide, 2007. Final Report, The University of Adelaide, Australia. Dostupné 4.4.2014 z: http://data.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/projects/2005/RCDyno/RC_Dyno_final_report.pdf
- [4] Hrabovcová, V. Janoušek, L. Rafajdus, P. Ličko, M. *Moderné elektrické stroje* 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. . ISBN 80-7100-809-5.
- [5] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 2. vyd. Plzeň: Vydavatelství západočeské univerzity, duben 1998 . 181 s.
- [6] VONDRÁŠEK, F.: Výkonová elektronika, Skripta ZČU Plzeň 2003
- [7] http://forum.octaviaclub.cz/index.php?s=aef123124637ceea80c14704eb28b0de&app=core&module=attach§ion=attach&attach_rel_module=post&attach_id=9527 (4.4.2014)
- [8] <http://www.hondastroje.cz/katalog-produktu/industry-program/elektrocentraly/tiche-elektrocentraly-generatory.htm> (4.4.2014)
- [9] <http://pily.heureka.cz/hecht-927-r/> (4.4.2014)
- [10] <http://www.astramodel.cz/cz/katalog/evolution/evolution-10gx-10ccm-benzin-p28238.html> (4.4.2014)
- [11] <http://www.zmodel.com/> (4.4.2014)
- [12] <http://www.rccoh.com/rc.how-to/set.spur.mesh.html> (4.4.2014)
- [13] http://img.directindustry.it/images_di/photo-m/giunti-flessibili-giunti-soffietti-54690-6947773.jpg (4.4.2014)
- [14] <http://www.gme.cz/img/cache/doc/223/046/mbr2545ct-datasheet-2.pdfwefw> (4.4.2014)
- [15] <http://www.arduino.cc/> (4.4.2014)
- [16] http://www.sm0vpo.com/_pdf/UC/UC3842.pdf (4.4.2014)
- [17] <http://www.ti.com/lit/an/slva143/slva143.pdf> (4.4.2014)
- [18] <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/166/ts2576cz550-datasheet-1.pdf> (4.4.2014)
- [19] http://www.ibt-power.com/Battery_packs/Li_Polymer/Lithium_polymer_tech.html (4.4.2014)
- [20] <http://www.hobbyking.com/> (4.4.2014)
- [21] PAVELKA, Jiří; ČEŘOVSKÝ, Zdeněk; LETTL, Jiří. *Výkonová elektronika*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [22] <http://www.astramodel.cz/cz/katalog/spektrum/spektrum-servo-ultra-micro-linear-1.9g-long-bb-p19802.html> (4.4.2014)
- [23] <http://www.elektrocr.cz/product/elektrocentrala-zipper-ziste900iv> (4.4.2014)
- [24] <http://www.hondastroje.cz/katalog-produktu/industry-program/elektrocentraly/tiche-elektrocentraly-generatory.html> (4.4.2014)

- [25] <http://elektrocentraly.heureka.cz/garden-king-gg950/galerie/> (4.4.2014)
- [26] <http://en.wikipedia.org/wiki/Li-ion> (4.4.2014)
- [27] http://www.ultracell-llc.com/assets/XX55_Data_Sheet_26-Jun-2013.pdf (4.4.2014)
- [28] <http://jqrmag.com/en/technology/takumi-eng/a-promising-technology-for-powering-humanoid-robots-development-of-an-ultra-compact-gas-turbine-capable-of-generating-large-amounts-of-power-anywhere/>(4.4.2014)
- [29] <http://www.linear.com/product/LT4320> (4.4.2014)
- [30] <http://www.gme.cz/img/cache/doc/530/093/tmp36gt9z-datasheet-1.pdf>

Přílohy

Příloha A - Tabulky

Ztráty na diodě					
$\Delta P[W]$	0	2,5	5	7	10
$I[A]$	0	0,9	2	3,5	6,5

Tab. 1: Ztráty na diodě, zdroj: [14]

Měření nakrátko					
$f[Hz]$	0,00	9,88	10,50	11,50	17,00
$n[ot/min]$	0,00	84,69	90,00	98,57	145,71
$I_{ef12}[A]$	0,00	0,50	1,12	1,55	2,28
$I_{ef13}[A]$	0,00	0,51	1,13	1,53	2,22
$I_{ef23}[A]$	0,00	0,49	1,05	1,42	2,10
$I_{ef}[A]$	0,00	0,50	1,10	1,50	2,20
$I_{střUsm}$	0,00	0,68	1,49	2,03	2,97
$f[Hz]$	21,70	32,00	34,00	48,00	66,00
$n[ot/min]$	186,00	274,29	291,43	411,43	565,71
$I_{ef12}[A]$	2,85	4,63	5,18	6,55	8,73
$I_{ef13}[A]$	2,98	4,63	5,39	6,38	8,46
$I_{ef23}[A]$	2,87	4,54	5,18	6,21	8,31
$I_{ef}[A]$	2,90	4,60	5,25	6,38	8,50
$I_{střUsm}$	3,92	6,21	7,09	8,61	11,48
$f[Hz]$	72,00	86,00	102,00	113,00	130,00
$n[ot/min]$	617,14	737,14	874,29	968,57	1114,29
$I_{ef12}[A]$	10,62	12,48	13,98	16,60	19,60
$I_{ef13}[A]$	10,11	11,98	13,42	15,89	18,75
$I_{ef23}[A]$	9,87	11,96	13,13	15,78	18,53
$I_{ef}[A]$	10,20	12,14	13,51	16,09	18,96
$I_{střUsm}$	13,77	16,39	18,24	21,72	25,60
$f[Hz]$	146,00	168,00			
$n[ot/min]$	1251,43	1440,00			
$I_{ef12}[A]$	21,59	23,92			
$I_{ef13}[A]$	20,00	22,97			
$I_{ef23}[A]$	19,91	22,50			
$I_{ef}[A]$	20,50	23,13			
$I_{střUsm}$	27,68	31,23			

Tab. 2. Měření nakrátko

Měření naprázdno					
F[Hz]	0,00	150,00	348,00	646,00	954,00
n[ot/min]	0,00	1285,71	2982,86	5537,14	8177,14
U_{ef12} [V]	0,00	0,80	1,77	3,16	4,77
U_{ef13} [V]	0,00	0,77	1,70	3,09	4,63
U_{ef23} [V]	0,00	0,77	1,66	3,05	4,59
U_{ef} [V]	0,00	0,78	1,71	3,10	4,67
U_{idusm} [V]	0,00	1,05	2,31	4,19	6,30
F[Hz]	1254,00	1592,00	1781,00	1965,00	2137,00
n[ot/min]	10748,57	13645,71	15265,71	16842,86	18317,14
U_{ef12} [V]	6,25	7,83	8,84	9,79	10,88
U_{ef13} [V]	6,00	7,54	8,60	9,50	10,58
U_{ef23} [V]	5,97	7,51	8,55	9,38	10,43
U_{ef} [V]	6,07	7,63	8,66	9,56	10,63
U_{idusm} [V]	8,19	10,30	11,70	12,90	14,35
F[Hz]	2381,00	2451,00	2760,00	2942,00	
n[ot/min]	20408,57	21008,57	23657,14	25217,14	
U_{ef12} [V]	11,85	12,74	14,33	15,04	
U_{ef13} [V]	11,40	12,35	13,56	14,36	
U_{ef23} [V]	11,19	12,05	13,57	14,01	
U_{ef} [V]	11,48	12,38	13,82	14,47	
U_{idusm} [V]	15,50	16,71	18,66	19,53	

Tab 3: Měření naprázdno, zdroj: vlastní tvorba

Měření mechanických ztrát a a ztrát v železe							
N[ot/min]	0,00	5500,00	10000,00	15500,00	17300,00	20000,00	22000,00
U [V]	0,00	20,00	20,12	19,95	19,73	19,53	19,39
I[A]	0,00	0,27	0,69	1,55	1,91	2,65	3,19
P_m [W]	0,00	5,40	13,89	30,84	37,68	51,80	61,76
$\Delta P_{fe,mech}$	0,00	5,13	13,20	29,30	35,80	49,21	58,67

Tab. 4: Měření mechanických ztrát a ztrát v železe, zdroj: vlastní tvorba

Měření měniče							
U_{in} [V]	I_{in} [A]	U_{out} [V]	I_{out} [A]	P_{in} [W]	P_{out} [W]	η [-]	
10,300	0,021	14,492	0,000	0,000	0,216	0,000	0,000
10,295	1,636	14,426	1,065	16,843	15,364	0,912	
10,281	2,559	14,409	1,680	26,309	24,207	0,920	
10,273	3,666	14,381	2,379	37,661	34,212	0,908	
10,260	4,810	14,362	3,073	49,351	44,134	0,894	
10,257	5,979	13,829	3,929	61,327	54,334	0,886	
10,250	6,688	12,849	4,656	68,552	59,825	0,873	
10,242	7,001	11,010	5,468	71,704	60,203	0,840	
10,239	7,281	10,13	5,843	74,550	59,190	0,794	$U_{in} \sim 10V$
7,513	0,029	14,495	0	0,218	0,000	0,000	
7,508	1,180	14,469	0,552	8,859	7,987	0,902	
7,503	2,172	14,451	1,037	16,299	14,986	0,919	
7,499	3,883	14,332	1,79	29,119	25,654	0,881	
7,494	4,679	14,312	2,09	35,064	29,912	0,853	
7,481	6,373	13,982	2,834	47,676	39,625	0,831	
7,478	6,71	12,121	3,3	50,177	39,999	0,797	
7,476	7,145	10,305	3,94	53,416	40,602	0,760	$U_{in} \sim 7,5V$
5,122	0,045	14,495	0,000	0,230	0,000	0,000	
5,118	1,301	14,463	0,415	6,659	6,002	0,901	
5,105	2,253	14,448	0,730	11,502	10,547	0,917	
5,093	3,763	14,333	1,180	19,165	16,913	0,882	
5,088	4,879	14,315	1,41	24,824	20,184	0,813	
5,07	6,131	14,02	1,684	31,084	23,610	0,760	
5,065	6,91	12,331	2,003	34,999	24,699	0,706	
5,063	7,014	10,455	2,276	35,512	23,796	0,670	$U_{in} \sim 5V$

Tab. 5: Měření měniče, zdroj: vlastní tvorba

Měření výkonu					
f [Hz]	884,00	1101,00	1295,00	1491,00	1623,00
n [ot/min]	7577,14	9437,14	11100,00	12780,00	13911,43
U [V]	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00
I [A]	10,00	11,00	14,50	14,50	15,00
P_u [W]	40,00	55,00	87,00	101,50	120,00
ΔP_u [W]	8,98	10,28	15,20	15,20	15,94
P_g [W]	48,98	65,28	102,20	116,70	135,94
ΔP_j [W]	3,60	4,36	7,57	7,57	8,10
$\Delta P_{Fe, mech}$ [W]	9,19	13,49	17,92	22,94	26,61
P [W]	61,77	83,13	127,69	147,20	170,65
η_u [-]	81,66	84,25	85,13	86,98	88,27
η_g [-]	79,30	78,53	80,04	79,28	79,66
η [-]	55,85	59,55	63,83	65,22	67,10
f [Hz]	1871,00	2102,00	2300,00	2468,00	2610,00
n [ot/min]	16037,14	18017,14	19714,29	21154,29	22371,43
U [V]	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00
I [A]	16,70	20,00	20,50	20,00	19,00
P_u [W]	150,30	200,00	225,50	240,00	247,00
ΔP_u [W]	18,56	23,95	24,80	23,95	22,28
P_g [W]	168,86	223,95	250,30	263,95	269,28
ΔP_j [W]	10,04	14,40	15,13	14,40	13,00
$\Delta P_{Fe, mech}$ [W]	34,13	41,84	48,98	55,42	61,12
P [W]	213,03	280,19	314,42	333,77	343,39
η_u [%]	89,01	89,30	90,09	90,93	91,73
η_g [%]	79,27	79,93	79,61	79,08	78,42
η [%]	67,97	69,42	69,97	70,26	70,33
f [Hz]	2763,00	2870,00	2964,00		
n [ot/min]	23682,86	24600,00	25405,71		
U [V]	14,00	15,00	16,00		
I [A]	17,90	17,30	14,50		
P_u [W]	250,60	259,50	232,00		
ΔP_u [W]	20,47	19,51	15,20		
P_g [W]	271,07	279,01	247,20		
ΔP_j [W]	11,53	10,77	7,57		
$\Delta P_{Fe, mech}$ [W]	67,52	72,17	76,36		
P [W]	350,13	361,95	331,12		
η_u [%]	92,45	93,01	93,85		
η_g [%]	77,42	77,08	74,65		
η [%]	69,43	69,62	67,80		

Tab. 6: Měření výkonů, zdroj: vlastní tvorba

Měření spotřeby					
Zapnutý měnič					
P_{out} [W]	0,00	11,50	26,00	37,50	57,00
V_m [s/ml]	65,00	60,00	51,00	45,00	35,00
V [l/h]	0,06	0,06	0,07	0,08	0,10
V_p [L/kw/h]	-	5,22	2,71	2,13	1,80
M_p [g/kw/h]	-	4,54	2,36	1,85	1,57
P_{out} [W]	83,00	110,00	165,00	190,00	250,00
V_m [s/ml]	26,00	20,00	14,00	13,00	10,00
V [l/h]	0,14	0,18	0,26	0,28	0,36
V_p [L/kw/h]	1,67	1,64	1,56	1,46	1,44
M_p [g/kw/h]	1,45	1,42	1,36	1,27	1,25
Přemostěný měnič					
P_{out} [W]	0,00	11,50	26,00	37,50	57,00
V_m [s/ml]	34,00	33,00	34,00	31,00	30,00
V [l/h]	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12
V_p [L/kwh]	-	9,49	4,07	3,10	2,11
M_p [g/kwh]	-	8,25	3,54	2,69	1,83
P_{out} [W]	83,00	110,00	165,00	190,00	250,00
V_m [s/ml]	26,00	20,00	14,00	13,00	10,00
V [l/h]	0,14	0,18	0,26	0,28	0,36
V_p [L/kwh]	1,67	1,64	1,56	1,46	1,44
M_p [g/kwh]	1,45	1,42	1,36	1,27	1,25

Tab. 7: Měření spotřeby, zdroj: vlastní tvorba

Seznam součástek			
Součástka	Typ	Součástka	Typ
C1	150pF	D1	MBR2545
C2	100nF	D2	Zenerka 4,7V, 0,5W
C3	10pF	D3	MBR2545
C4	10pF	D4	MBR2545
C5	330pF	D5	MBR2545
C6	2200µF 25V Low ESR	D6	MBR2545
C7	2200µF 25V Low ESR	D7	MBR2545
C8	100nF	D8	MBR2545
C9	100nF	D9	Zenerka 4,7V, 0,5W
C10	1000µF 25V	D10	MBR2545
C11	2,2nF	D11	BYV42-200
C12	100nF	D12	BYV42-200
C13	100nF	D13	BYV42-200
C14	1000µF 25V	D14	MBR2545
C15	100nF	D15	Zelená LED
C16	100nF	D16	Červená LED
C17	100nF	D17	1N4007
C18	100nF	D19	1N4007
C19	1000µF 6V	D20	Červená LED
C20	1000µF 25V	D21	1N4007
C21	100nF	D22	1N4007
C22	100nF	D23	1N4007
C23	100nF	D24	Červená LED
C24	100nF	F1	Automobilová pojistka 30A
C25	100nF	IC1	UC3843N
C26	100nF	IC2	TS2576
C27	2200µF 25V Low ESR	IC3	7805
C28	2200µF 25V Low ESR	K1	Relé 4120 C030 DC12V1.6
SW1	Tlačítko B1383	K2	Relé 4120 C030 DC12V1.6
SW2	Spínač R13-133	U1	TMP36TGZ
L1	DPU068A10	U2	Atmega328p DIP
L2	DPU0100A3	X1	Krystal 16 Mhz
R1	50kΩ	Q1	BC517
R2	50kΩ	Q2	IRF3205
R3	0,47Ω, 1W	Q3	BC547C
R4	0,33Ω 1W	Q4	IRF3205
R5	47Ω	Q5	IRF3205
R6	10Ω	Q6	BC547C
R7	4,7kΩ	Q7	BC447C
R8	15kΩ	Q8	BC517
R9	120kΩ		
R10	10kΩ		
R11	trimr 50kΩ		
R12	10kΩ		
R13	trimr 500Ω		
R14	5,6kΩ		
R15	680kΩ		
R16	680kΩ		
R17	5,6kΩ		
R18	500Ω		
R19	1MΩ		
R20	1MΩ		
R21	10kΩ		
R22	10kΩ		
R23	10kΩ		
R24	10kΩ		
R25	10kΩ		
R26	10kΩ		
R27	10kΩ		
R28	22Ω		
R29	67Ω		
R30	330Ω		
R31	330Ω		

Tab. 8: Seznam součástek, zdroj: vlastní tvorba

Seznam dílů		
díl	hmotnost [g]	Cena [Kč]
Spalovací motor	270	1362
Žhavicí svíčka R5	3	130
BLDC motor	105	519
Servo	42	180
Ventilátor	227	185
Tlumič výfuku	42	111
Silikonová spojka výfuku	5	95
Silentblok	42	25
vzduchový filtr	6	140
Spojovací materiál	30	80
Podstava-rám	312,5-	
Kryt	312,5-	
Mřížka ventilátoru	-	33
Elektronika	230	1450
Akumulátor	155	520
Nástavec pro žhvení	5	80
Silikonová hadička 5/2mm	12	90
Klíč na žhavicí svíčku	77	84
Zátka pro nasávání paliva	42	50
Celkem	1918	5134

Tab. 9: Seznam dílů, zdroj: vlastní tvorba

Měření odporu vinutí			
	U[mV]	I[A]	R[mΩ]
Fáze 1-2	34,90	1,01	35,25
Fáze 1-3	28,74	1,22	35,06
Fáze 2-3	30,69	1,14	34,99
Průměr			35,10

Tab. 10: Měření odporu vinutí

Příloha B- Zdrojový kód

```
#include <Servo.h> //pripojeni knihovny serva

#define pocHodnG 2 //pocet hodnot klouzaveho prumeru napeti generatoru
#define pocHodnM 35 //pocet hodnot klouzaveho prumeru napeti menice

#define teplp A0 //pin cidla teploty
#define Gp A1 //pin snimani napeti generatoru
#define Mp A2 //pin snimani nap menice
#define vetrp 13 //pin ovladani vetraku
#define Mvyp 12 //pin vypnuti menice
#define premost A3 //pin přemosteni menice
#define predehrevp 10 //pin predehrevu
#define zhaveni 9 //pin zhaveni
#define zled 6 //pin zelene led
#define cled 7 //pin cervene led
#define odpojzeni A4 //pin odpojzeni vystupu
#define servopin 11 //pin ovladani serva
#define tlacitka A5 //pin tlacitka

//parametry serva
#define Smin 1095 //minimalni poloha serva - volnobeh
#define Smax 1400 //maximalni poloha serva - plny plyn
#define Sstart 1200 //poloha serva pro startovani

//parametry startovani
#define UBminstart 520 //minimalni napeti baterie pro start 10,05V
#define UG0 150 //napeti generatoru nad ktere je uvazovan nastartovany motor 2,9
#define TPzap 325 //minimalni teplota pro start bez predehrevu 20 C
#define TPvyp 350 //teplota vypnuti predehrevu 27 C

//regulator napeti menice
#define Mmin 719 //minimalni napeti menice 13,9V
#define Mmax 746 //maximalni napeti menice 14,4V
#define DGU 21 //Zmena pozadovaneho napeti generatoru 0,4V
#define Gpmin 209 //minimalni pozadovane napeti ggeneratoru 4V
#define Gpmax 833 //maximalni pozadovane napeti generatoru 16V
#define GminH 200 //minimalni horni hranice napeti generatoru 3,8V
#define GminL 140 //minimalni spodni hranice napeti generatoru 2,7V
#define tau 25 //casova konstanta 0,5 s
//regulator napeti generatoru
#define Emax 100 //maximalni velikost chyby
#define KL 0.2 //Konstanta linearniho clenu
#define KK 0.045 //konstanta kvadratickeho clen
//Ovladani menice
#define UG0vyp 70 //napeti generatoru pod ktere se je uvarovanvypnuty motor 1,35V
#define pozadGp 720 //hranice pozadovanehonapeti menice pro detekci vysokeho vykonu 13,9V
#define SpmaxH 1350 //horni hranice polohy serva max.vykonu
#define SpmaxL 1300 //dolni hranice polohy serva pro detekci max. vykonu

//chlazeni
```

```
#define TVzap 650 //teplota zapnutí vetraku 89,7 C
#define TVvyp 600 //teplota vypnutí vetraku 79 C
#define TprehrH 750 //horní teplotní hranice prehrati 111 C
#define TprehrL 730 //dolní teplotní hranice prehrati 106

//nadproud
#define UImax 570 //napeti při nadproudu 11V
#define tnapd 1500 //cas zpozdení nadproudu 30s

unsigned int teplota=10, napetiG=0, napetiM=0, polohaserva=Smin;
unsigned int hodnotyG [pocHodnG], hodnotyM [pocHodnM], soucetG=0, soucetM=0, prumerG=0, prumerM=0,
pozadG=Gpmin;
unsigned int chybaG=0,i=0,j=0;
boolean menic=0,premosteni=0, menicpuv=0,premostenipuv=0, chod=0, predehrev=0, prehrati=0;

byte indexG=0, indexM=0;
Servo servo; //objekt pro kontrolu serva

//konfigurace Arduina po startu
void setup() {
  //nastavení pinu jako vstupy vystupy
  servo.attach(servopin); //pin pro ovladání serva
  pinMode(teplp,INPUT);
  pinMode(Gp,INPUT);
  pinMode(Mp,INPUT);
  pinMode(vetrp,OUTPUT);
  pinMode(Mvyp,OUTPUT);
  pinMode(servopin,OUTPUT);
  pinMode(premost,OUTPUT);
  pinMode(predehrevp,OUTPUT);
  pinMode(zhaveni,OUTPUT);
  pinMode(cled,OUTPUT);
  pinMode(zled,OUTPUT);
  pinMode(odpojeni,OUTPUT);
  pinMode(tlacidko,INPUT);
  digitalWrite(tlacidko,HIGH); //aktivace pull-up rezistoru

  analogReference(INTERNAL); //nastavení analogové reference na vlastní referenci 1,1V

  //vynulování proměnných pro klouzavý průměr
  for( int z=0; z<pocHodnG; z++)
    hodnotyG [pocHodnM]=0;
  for( int z=0; z<pocHodnM; z++)
    hodnotyG [pocHodnM]=0;
}

//hlavní smyčka
void loop() {
  //čtení analogových vstupu -teploty, napeti generatoru a napeti menice
  servo.writeMicroseconds(Sstart);
  digitalWrite(Mvyp,1); // vypnutí menice
  digitalWrite(odpojeni,1); // odpojění zateze
  teplota=analogRead(teplp);
  napetiG=analogRead(Gp);
  napetiM=analogRead(Mp);
```



```

//klouzavy prumer napeti generatoru
soucetG= soucetG- hodnotyG[indexG];
hodnotyG [indexG]= napetiG;
soucetG=soucetG+ hodnotyG[indexG];
indexG++;
if (indexG >=pocHodnG)
  indexG = 0;
prumerG=soucetG/pocHodnG;

//klouzavy prumer napeti menice
soucetM= soucetM- hodnotyM[indexM];
hodnotyM [indexM]= napetiM;
soucetM=soucetG+ hodnotyM[indexM];
indexM++;
if (indexM >=pocHodnM)
  indexM = 0;
prumerM=soucetM/pocHodnM;

if (prumerG<UG0 && prumerM>UBminstart) //
{
  polohaserva=Sstart;          //poloha pro startovani
  chod=0;
  if (teplota<TPzap)predehrev=1; //pokud je teplota mensi nez nastavena je nutne predehrivat
  if (teplota>TPvyp)predehrev=0; //pokud je teplota dostatecna je mozne predehrev vypnout

  if (predehrev==1)
  {
    digitalWrite(zled,0);      //pokud je vyžadovan predehrev zhasne se zelena LED a rozsviti se cervena LED
    digitalWrite(cled,1);
    if(digitalRead(tlacitko)==0) //po stisku tlacitka je zahajen predehrev
    {
      digitalWrite(predehrevp,1);

    }
  }
  ////////////////////////////////////////////////////
  if (predehrev==0)          //pokud neni traba predehrev....
  {
    digitalWrite(predehrevp,0);
    digitalWrite(zled,1);

    if(digitalRead(tlacitko)==0) //pokud je stisknuto tlacitko zacne zhaveni
    {
      digitalWrite(zhaveni,1);

    }
    else          //pokud neni stisknuto tlacitko je zhaveni vypnuto
    {
      digitalWrite(cled,0);

    }
  }
}
}
}

```

```
if (napetiG>UG0) //pokud je napeti na generatoru (otacky) dostatecne, je mozne prejt do rezimu
"nastartovany motor"
{
  digitalWrite(predehrevp,0);
  digitalWrite(zhaveni,0);
  digitalWrite(cled,0);
  digitalWrite(zled,0);
  chod=1;

}
if (napetiM<UBminstart) //v pripade ze je vybita baterie dojde k zhasnuti a vypnuti vseho
{
  digitalWrite(predehrevp,0);
  digitalWrite(zhaveni,0);
  digitalWrite(cled,0);
  digitalWrite(zled,0);
}

delay(50);

//smycka pro nastartovany motor
while (chod)
{
  teplota=analogRead(teplp);
  napetiG=analogRead(Gp);
  napetiM=analogRead(Mp);

  //klouzavy prumer napeti generatoru
  soucetG= soucetG- hodnotyG[indexG];
  hodnotyG [indexG]= napetiG;
  soucetG=soucetG+ hodnotyG[indexG];
  indexG++;
  if (indexG >=pocHodnG)
    indexG = 0;
  prumerG=soucetG/pocHodnG;

  //klouzavy prumer napeti menice
  soucetM= soucetM- hodnotyM[indexM];
  hodnotyM [indexM]= napetiM;
  soucetM=soucetG+ hodnotyM[indexM];
  indexM++;
  if (indexM >=pocHodnM)
    indexM = 0;
  prumerM=soucetM/pocHodnM;

  if(prehrati==0)
  {
    if (j>tau)
    {////Regulator napeti Menice///
      if (prumerM<Mmin) pozadG=pozadG+DGU; //pokud je pozadovane napeti menice nizsi nez nastavena
      hodnota , zvysi se pozadovane naperi generatoru
      if (prumerM>Mmax) pozadG=pozadG-DGU; //pokud je pozadovane napeti menice vyssi nez nastavena
```

```

hodnota , snizi se pozadovane napeti generatoru
  if (pozadG>Gpmax) pozadG=Gpmax; //omezeni maximalniho pozadovaneho napeti generatoru
  if (pozadG<Gpmin) pozadG=Gpmin; //omezeni minimalniho pozadovaneho napeti generatoru
  j=0;
  }//////////
  j++;
  ///Regulator napeti generatoru//
  if ((pozadG-chybaG)>0) chybaG=pozadG- prumerG; //vypocet chyby pouze kladna hodnota
  else
    chybaG=0;

  if (chybaG>Emax) chybaG=Emax; //omezeni velikosti chyby -ochrana pretečení pro vypocet
  pozadovane polohy serva

  polohaserva=chybaG*KL+chybaG*chybaG*KK+Smin; //vypocet polohy serva

  // if (polohaserva>1220 && prumerG<310) polohaserva=1220; //omezeni otevreni karburatoru pri nizkych
  otackach (napeti generatoru)
  //if (polohaserva>1320 && prumerG<388) polohaserva=1300; //omezeni otevreni karburatoru pri nickych
  otackach (napeti generatoru)
  if (polohaserva>Smax) polohaserva=Smax; //omezeni maximalni polohy serva
  if (polohaserva<Smin) polohaserva=Smin; //omezeni minimalni polohy serva
  if (napetiG<UG0vyp) //detekce vypnutého motoru
  {
    polohaserva=Sstart; //poloha pro startovani
    chod=0;
  }
  else
    chod=1;

  if (prumerG>GminH) //pokud je dostatecne napeti
  {
    menic=1; //zapne se menic
    if (pozadG>pozadGp && polohaserva>SpmxH) premosteni=1; //vypnutí a přemostění menice při
    vysokem vykonu
    {
      premosteni=1;
      menic=0;
    }
    if (polohaserva<SpmxL) premosteni=0; //opetovne zapnutí a odpojení přemostění menice při
    nizkem vykonu

    if (premosteni==1 && premostenipuv==0) //podminka pro zapnutí přemostweni
    {
      if(menicpuv!=menic) digitalWrite (Mvyp,!menic);
      digitalWrite (premost,premosteni);
    }
    if (premosteni==0 && premostenipuv==1) // podminka pro vypnutí přemosteni
    {
      digitalWrite (premost,premosteni);
      delay(10); //cekani nez odpadne kontakt
    }
  }

```

```

    digitalWrite (Mvyp,!menic);
  }
}

if (prumerG<GminL )           //vypnuti menice  pri nizkem napeti generatoru (otackach)
{
  menic=0;
  premosteni=0;
  digitalWrite(Mvyp,!menic);
  digitalWrite(premost,premosteni);
}
premostenipuv=premosteni;
menicpuv=menic;
////////////////////

if(teplota>TVzap) digitalWrite(vetrp,1); //zapnuti ventilatoru
if(teplota<TVvyp) digitalWrite(vetrp,0); //vypnuti ventilatoru

// ochrana proti nadproudu + zajisteni casoveho zpozdeni
if (prumerM<UImax && i<tnadp ) i++;
if (prumerM>UImax && i>0 )i--;
if (i>tnadp)
{
  digitalWrite(zled,0);
  digitalWrite(odpojeni,1);
  digitalWrite(premost,0);
}

if(i<1)
{
  digitalWrite(odpojeni,0);
  digitalWrite(zled,1);
}
}

if(teplota>TprehrH) //ochrana proti prehrati
{
  pozadG=Gpmin; //bude udrzovat minimalni napeti
  digitalWrite(odpojeni,1);//odpojeni zateze
  digitalWrite(cled,1); //rozsviceni cervene led
  digitalWrite(Mvyp,1);
  digitalWrite(vetrp,1);
  polohaserva=Smin;
  prehrati=1;
}

if(teplota<TprehrL)
{
  digitalWrite(cled,0);
  prehrati=0;
}
}

```

```
servo.writeMicroseconds(polohaserva); //nastavení hodnoty serva
//digitalWrite(1,1); // pomocný pulz pro měření délky cyklu osciloskopem
delay(19); //doba nečinnosti v ms
//digitalWrite(1,0); // pomocný pulz pro měření délky cyklu osciloskopem

}
delay;
(20);
}
```