



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

GENERÁTOR PRO MOBILNÍ ROBOTICKÉ APLIKACE

GASOLINE GENERATOR FOR MOBILE ROBOTIC APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ZBYNĚK HRBÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF VEJLUPEK

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Zbyněk Hrbáč

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Generátor pro mobilní robotické aplikace

v anglickém jazyce:

Gasoline generator for mobile robotic applications

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

U mobilních aplikací s vyšším příkonem může být jednak nákladné, jednak problematické (cena a hmotnost acu packu) zajištění dostatku energie pro provoz zařízení. Jedna z možností jak toto řešit je použití benzín-elektrického generátoru, který dobíjí přiměřeně velký acu pack a nemusí běžet po celou dobu, což může být výhodné například pro roboty pohybující se i uvnitř budov.

Cíle bakalářské práce:

1/ zpracování rešerše v oblasti mobilních generátorů malého výkonu (cca 0.5kW)

1.1/ rešerši cílit na využití benzínového motoru jehož primárním úkolem je pohon žacího ústrojí sekačky, předpokládaný výkon motoru 3-6kW

1.2/ posouzení možných elektrických strojů využitelných jako generátorů z hlediska ceny, účinnosti, hmotnosti, náročnosti regulace výstupu.

2/ Schématický návrh benzín-elektrického generátoru

3/ mechanická konstrukce testovacího zařízení

Seznam odborné literatury:

Patočka M., Vorel P.: Řídicí elektronika - pasivní obvody
Patočka M., Vorel P.: Řídicí elektronika - aktivní obvody
Patočka M., Vorel P., Kerlin T.: Řídicí elektronika - laboratorní cvičení
Kule L. a kolektiv: Technika elektrických pohonů.
Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.I.
Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.II.
Kraysa K.: Výkonová elektronika
Caha Z., Černý M.: Elektrické pohony
Mráz Z.: Řídicí členy elektrických pohonů.
Patočka M., Burian F.: Sbíрка řešených příkladů z řídicí elektroniky.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Vejlupek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 17.11.2011

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářské práce je zaměřena na konstrukci generátoru pro mobilní robotické aplikace. V první části je uveden průzkum dostupných elektrocentrál jak na tuzemském, tak na zahraničním trhu. Druhou část tvoří přehled elektrických strojů použitelných v generátorickém režimu. Je zde uveden popis a princip činnosti, specifika každého motoru a případná regulace výstupu. Třetí část pojednává o vlastní konstrukci zařízení. Jako generátor byl použit BLDC (bezkomutátorový stejnosměrný) motor o výkonu 660W.

Abstract

This bachelor's thesis is focused on the construction of generator for mobile robotic applications. The first part provides a survey of power generators available on both the domestic and international markets. In the second part is an overview of applicable electrical machines in the generator mode. There is a description, principle of operation and specifics of each motor and a possible regulation of an output. The third part deals with the actual construction of a testing model. The BLDC (brushless DC) motor with output power of 660W was used as a generator.

Bibliografická citace

HRBÁČ, Z. *Generátor pro mobilní robotické aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 31 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Vejlupek.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Generátor pro mobilní robotické aplikace“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, které tvoří přílohu této práce.

V Brně dne:

.....
Zbyněk Hrbáč

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Josefu Vejlupkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Dostupné mobilní generátory	11
2.1	Posouzení z hlediska užitého elektrického motoru	11
2.2	Posouzení z hlediska hnacího motoru	12
3	Elektromotory použitelné jako generátory	13
3.1	Asynchronní střídavý	13
3.1.1	Konstrukce a princip činnosti	13
3.1.2	Spouštění a brzdění.....	14
3.1.3	Generátorický režim	15
3.1.4	Použití a regulace výstupu	16
3.2	Synchronní střídavý	16
3.2.1	Konstrukce a princip činnosti	16
3.2.2	Generátorický režim	17
3.2.3	Nafázování na síť a práce do samostatné zátěže	18
3.2.4	Použití a regulace výstupu	18
3.3	Stejnoseměrný	18
3.3.1	Konstrukce a princip činnosti	18
3.3.2	Buzení	19
3.3.3	Generátorický režim	20
3.3.4	Použití a regulace výstupu	20
3.4	BLDC	20
3.4.1	Konstrukce a princip činnosti	20
3.4.2	Senzory polohy	21
3.4.3	Generátorický režim	21
3.4.4	Použití a regulace výstupu	22
4	Schematický návrh	23
5	Mechanická konstrukce testovacího zařízení	24
5.1	Přehled BLDC motorů	24
5.2	Model v programu Solidworks	24
5.3	Vlastní konstrukce	25
6	Závěr	28
7	Seznam literatury	29

8	Seznam symbolů a zkratk.....	30
9	Seznam příloh.....	31

1 Úvod

Generátory malých výkonů (pro mobilní robotické aplikace) se používají pro výrobu energie pro pohon nebo dobíjení baterií u malých elektrických vozidel.

Ceny pohonných hmot neustále rostou, proto je třeba se podívat po nějakém alternativním pohonu namísto klasického benzínového nebo vznětového. Jedna z možností je konstrukce s elektrickým motorem. Energie pro pohon se neuchovává v tekuté podobě v nádrži, ale v podobě elektrické energie v bateriích. Baterie je zatím poměrně nedokonalá součást, která podstatně limituje dojezd takového vozítka. Neustálé nabíjení z externího zdroje je značně nepraktické. Dojezd lze velmi výrazně a efektivně prodloužit instalací malého elektrického generátoru. Vozidlo se na energii z generátoru může bez problému dále pohybovat, přebytečná elektrická energie se dá využít pro opětovné dobíjení baterií na palubě.

V současné době nejpoužívanější Li-ion baterie mají měrnou kapacitu pouze 150Wh/kg. Měrná kapacita [Wh/kg] definuje, kolik energie dokáže baterie uchovat vzhledem ke své hmotnosti. Aby byla vozidla na elektřinu schopná konkurovat dojezdem vozidlům se spalovacím nebo vznětovým motorem, musela by se hodnota měrné kapacity nejméně ztrojnásobit. Této hodnoty lze dosáhnout užitím lithiium vzduchové baterie. Do toho typu je možné uložit až 10000 Wh/kg. Bohužel lithiium vzduchová baterie je stále ve stádiu vývoje.

Tato práce je rozdělena do tří hlavních částí. V první části jsem provedl průzkum trhu v oblasti mobilních generátorů malého výkonu (cca 0,5kW). Jsou zde popsány dostupné elektrocentrály jak na tuzemském, tak i na zahraničním trhu. Ve druhé části se zabývám elektrickými motory použitelnými v generátorickém režimu. Je zde zmíněná konstrukce a popis činnosti jednotlivých motorů, dále hlavní výhody a nevýhody a vhodnost použití pro nejrůznější aplikace. Ve třetí části je popis vlastní konstrukce testovacího zařízení.

2 Dostupné mobilní generátory

Mobilních generátorů (takzvaných elektrocentrál) dostupných na našem trhu je nepřeberné množství. Naprostá většina je však stavěna jako záložní nebo napájecí zdroj pro síťové napětí 230V. Popřípadě mají ještě vyvedený výstup na automobilovou zásuvku na 12V stejnosměrného napětí. Jeden z požadavků na naši centrálu však byl, aby produkovala výstupní napětí v rozmezí 24-48V DC.

2.1 Posouzení z hlediska užitého elektrického motoru

Nejčastěji používaným elektrickým motorem v mobilních generátorech je asynchronní střídavý motor v generátorickém režimu. Velkou výhodou těchto motorů je jejich jednoduchá konstrukce, vysoká spolehlivost a nízká pořizovací cena. Tyto motory se dají považovat za velmi bezproblémové, jelikož u nich nedochází k přímému kontaktu točícího se rotoru s částí statoru. Cena elektrocentrál s asynchronním motorem začíná na přibližně na 2200Kč.

Lze pořídit i centrály se synchronním nebo BLDC motorem. Tyto typy motorů se používají v dražších a více výkonných generátorech.

Dva generátory splňují námi zadané požadavky. První je typ Č-EB 0.5-S28,5-2Vod firmy VOP Šternberk s.p., s výstupním výkonem 0,5kW při napětí 28,5V. Firma uvádí, že tento přístroj lze použít buď na samostatné napájení nebo i v kombinaci s 24V baterií. Druhý od firmy Soleado Powernics s výstupním výkonem 0,9kW/24V. První z uvedených centrál byla postavena pro vojenské účely, druhá pro telekomunikační aplikace.



Obr. 1: Elektrocentrála –EB 0.5–S28,5–2Vod firmy VOP Šternberk [11]

2.2 Posouzení z hlediska hnacího motoru

Elektrocentrály se dají pořídit s benzínovým, LPG (propan-butan) nebo naftovým motorem. Na českém trhu je naprostá většina s benzínovým motorem, vynechám-li diesel generátory velkých výkonů, které se používají jako záložní zdroje pro továrny, nemocnice, atd.

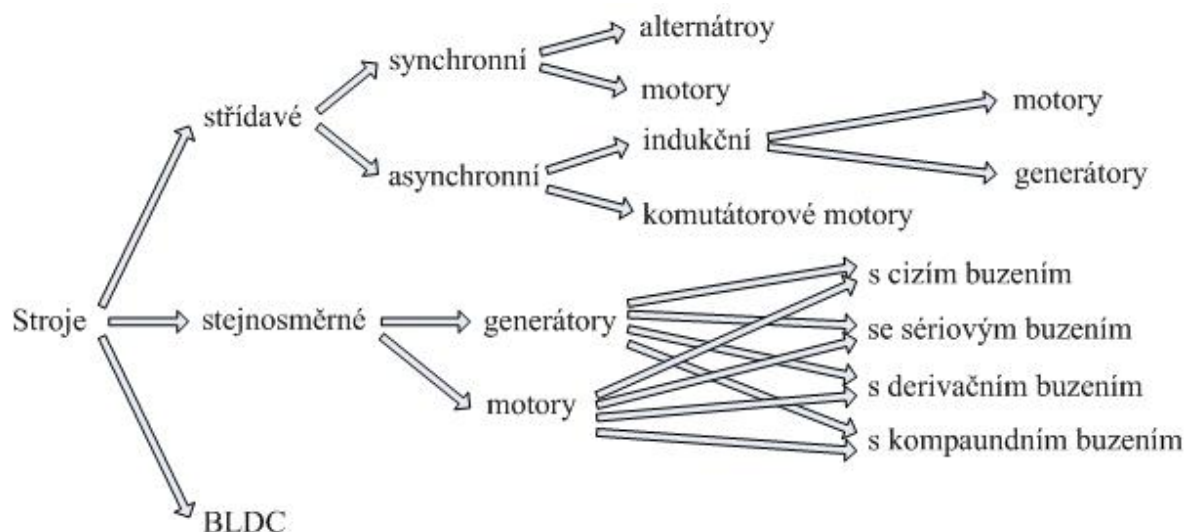
Benzínové generátory jsou nejdostupnější a zároveň nejlevnější. Dají se pořídit v nejrůznějších výkonových relacích, od 650W až po desítky kW. Ceny začínají přibližně na 2200Kč. Spotřeba se pohybuje mezi 0,5-0,7l/h, což při průměrné ceně benzínu 37Kč/l odpovídá 22Kč/h. Používá se 2 i 4 taktní motor. Celková hmotnost je přibližně 20kg. Výhody benzínové elektrocentrály jsou, jak už jsem zmiňoval, nízká cena a snadná dostupnost, dále pak nízké provozní náklady a nízká hmotnost.

LPG generátory začínají přibližně na 4500Kč (přepočet), v ČR od 13000Kč. Výkonově jsou však tyto centrály v jiných relacích. Nejslabší (a nejvíce se blížíci našim požadovaným 500W) jsem našel 2kW. Spotřeba je pohybuje od 0,75kg/h do 0,9kg/h. 1kg LPG lze pořídit v průměru za 32Kč/kg, takže spotřeba přepočítaná na koruny za hodinu vychází 26,4Kč/h. Výhoda při spalování LPG jsou nižší emise.

Diesel generátory takto malých výkonů jsou velmi těžko dostupné. Spotřeba je paradoxně větší než u benzínových a LPG generátorů, konkrétně 1,2-1,5 l/h (48Kč/h). Pořizovací cena 3,5kW centrály začíná v přepočtu na 14000Kč. Další nevýhoda naftových motorů je jejich vyšší hmotnost.

3 Elektromotory použitelné jako generátory

Elektromotor je točivý elektrický stroj, který převádí elektrickou energii na mechanickou (motorický režim) nebo naopak mechanickou na elektrickou (generátorický režim). Dělí se podle vstupního, případně výstupního, napětí na střídavé a stejnosměrné. Elektromotor se skládá ze dvou hlavních částí a to ze statoru a rotoru. Rotor je pohyblivá a stator pevná část stroje.

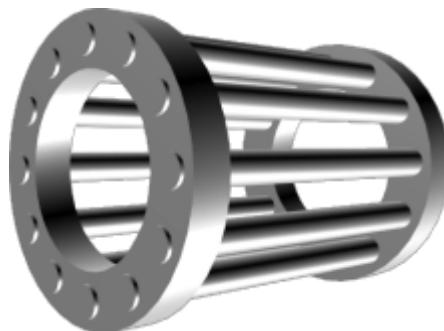


Obr. 2: Dělení elektrických strojů [2]

3.1 Asynchronní střídavý

3.1.1 Konstrukce a princip činnosti

Asynchronní motory jsou konstrukčně nejméně složité elektrické točivé stroje. Stator se skládá ze statorových plechů a statorového vinutí. Vinutí je uspořádáno do pólových dvojic. V nejjednodušším případě si lze u dvoupólového stroje ($2p=2$, $p=1$) představit statorové vinutí jako tři cívky, které jsou ve statorových drážkách rozdělené po 120° . Spojíme-li tyto tři cívky (do hvězdy nebo do trojúhelníku) a napájíme je trojfázovým napětím, vytvoří se v každé cívkce pulzující napětí, které je oproti ostatním posunuto o 120° . Amplitudy těchto tří pulzujících napětí po sobě následují vždy po jedné třetině délky kmitu napájecího napětí. Složením těchto tří pulzujících polí vznikne výsledné točivé pole, jenž se ve statoru otáčí.[2] Rotorové vinutí je buď klecové spojené nakrátko, nebo třífázové.



Obr. 3: Rotorové klecové vinutí [4]

Základem činnosti asynchronního motoru je vznik točivého magnetického pole ve statoru. Toto pole prochází přes vzduchovou mezeru a indukuje v rotorových vodičích napětí. *Protože je rotorové vinutí uzavřeno, začne jím protékat rotorový proud, který vytvoří kolem vodičů magnetické pole rotoru. Vzájemným působením statorového a rotorového pole vznikne výsledné pole, které působí na rotorové vodiče silami. Působením těchto sil se začne rotor otáčet, vznikne točivý moment asynchronního motoru.* [2]

Synchronní otáčky statoru spočítáme z počtu pólů a kmitočtu napájecího napětí:

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (1)$$

Asynchronní motor pracuje se skluzem, což znamená, že rotor nikdy nedosáhne synchronních otáček statoru:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Otáčky rotoru lze regulovat změnou počtu pólů, napájecí frekvence, napájecího napětí nebo změnou skluzu. Otáčky jsou i při proměnlivé zátěži téměř konstantní.

Třífázové statorové vinutí (s vyvedenou svorkovnicí) lze zapojit do hvězdy nebo do trojúhelníku. *Při spojení do hvězdy spojíme všechny začátky (nebo konce) vinutí do uzlu a na protilehlé konce přivedeme trojfázové síťové napětí. Při spojení do trojúhelníku spojíme začátek každé fáze na konec fáze předcházející, přičemž je potřeba dodržet sled fází (tj. zapojovat fáze za sebou tak, jak jsou postupně navinuty ve stroji). Zapojením vinutí do trojúhelníku prochází motorem trojnásobek proudu než při spojení do hvězdy a zároveň je třikrát vyšší moment i výkon motoru.* [2]

3.1.2 Spouštění a brzdění

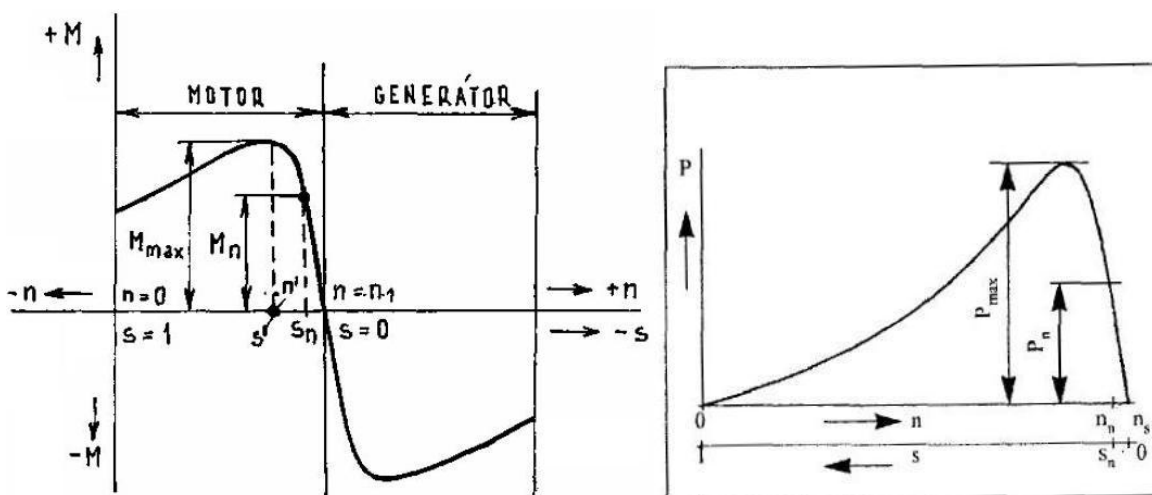
Asynchronní motor je možné spouštět připojením přímo na síť. Takovýmto zapojením však dochází k proudovým nárazům, proto lze takto spouštět jen motory menších výkonů. Využívá se proto přepínače hvězda trojúhelník, autotransformátoru, snížení napájecího napětí nebo polovodičového regulátoru. U motoru s kroužkovou kotvou se mezi výstupní svorky rotoru zapojí proměnlivý odpor (rotorový spouštěč). Posledním řešením je speciální úprava klece (odporová klec, dvojité klece).

Brzdění se provádí buď generátoricky, dynamicky (stejnoseměrné napětí) nebo protiproudem (vytvoření opačného směru otáčení magnetického pole statoru). Poslední dva způsoby nejsou příliš vhodné, neboť při nich vzniká teplo, které se hromadí v motoru a hrozí jeho poškození.

3.1.3 Generátorický režim

Asynchronní spolu se synchronními točivými elektrickými stroji jsou společně nazývány alternátory. Důvodem je, že generují střídavé napětí oproti stejnosměrným dynamům.

Výhradně se používají motory s klecovým vinutím na rotoru. Přechod z motorického režimu na generátorický lze jednoduše vysvětlit na principu malé vodní elektrárny. Nejprve se musí motor svépomocí roztočit na asynchronní otáčky. Poté je na lopatky turbíny vpuštěna voda. Motor se dostane na synchronní a dále nadsynchronní otáčky a může dodávat energii do sítě. Stroj se po připojení do sítě mechanicky zatíží a ustálí se jeho otáčky. Fázeování jako u synchronních motorů není nutné.



Obr. 4a) Momentová charakt. as. motoru [1]

b) Výkonová charakt. as. motoru [2]

Vztah mezi výkonem a momentem:

$$P = M\omega = M \frac{2\pi n}{60} \quad (3)$$

Napětí na výstupu je možné regulovat pouze rychlostí hnacího ústrojí, což je při dodávání výkonu do sítě nepřijatelné - s rychlostí otáčení rotoru se mění frekvence.

3.1.4 Použití a regulace výstupu

Asynchronní motory jsou nejpoužívanějšími elektrickými motory v průmyslu. Jsou vysoce spolehlivé, avšak mají nižší účinnost. Lze je zakoupit v celém rozsahu výkonů a otáček. Ze všech zde zmiňovaných elektromotorů jsou nejlevnější.

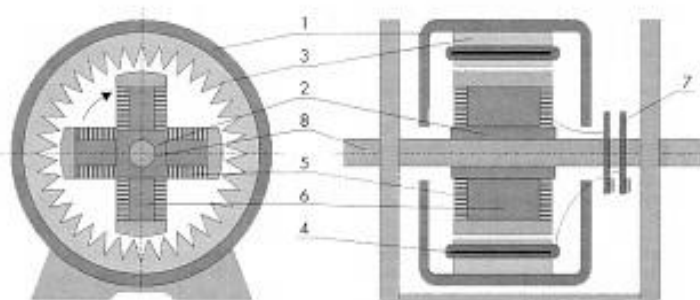
Jako generátory jsou velmi často používány v malých vodních a větrných elektrárnách, automobilech nebo elektrocentrálách. Je možné je také spatřit ve výtazích, kdy při zvedání kabiny spotřebovávají elektrickou energii a při jízdě dolů ji vrací zpět do sítě.

Postup při regulaci výstupu velmi záleží na konkrétním zvoleném motoru a požadovaném výstupním napětí. Jako příklad bych uvedl třífázový motor s efektivní hodnotou napětí 230V. Pro regulaci na 24V DC je nutné nejprve toto napětí přetransformovat na zhruba 28V, dále pomocí šestipulzního usměrňovače Gretz toto napětí usměrnit a nakonec vyhladit využitím vhodného regulátoru.

3.2 Synchronní střídavý

3.2.1 Konstrukce a princip činnosti

Stator synchronního točivého stroje je prakticky stejný jako asynchronního. Je tvořen ze statorových plechů a statorových cívek v drážkách. Na rotoru se nachází stejnosměrné budící vinutí. Napětí na toto vinutí je přiváděno pomocí kroužků na rotoru a kartáčů na statoru. Podle konstrukce rotoru rozlišujeme motory s hladkým rotorem (turboalternátory) a s vyniklými póly na rotoru (hydroalternátory). U motoru s hladkým rotorem je vinutí instalováno v drážkách. Stroj s vyniklými póly má vinutí umístěny na pólech, na jejichž koncích jsou pólové nástavce. Točivé magnetické pole statoru interaguje s magnetickým polem rotoru a tím vytváří rotační pohyb rotoru.



1 – stator, 2 – rotor, 3 –
magnetický obvod statoru, 4 –
statorové vinutí, 5 – rotorové
vinutí, 6 – póly, 7 – sběrací
kroužky, 8 – hřídel

Obr. 5: Konstrukce motoru s vyniklými póly [4]

Již podle názvu je zřejmé, že rychlost rotace magnetického pole statoru je totožná s rychlostí rotoru (nulový skluz):

$$n = \frac{60f}{p} \quad (4)$$

Synchronní motor se po připojení na síť sám neroztočí. Je k tomu třeba využít pomocný asynchronní motor (téměř se nevyužívá) nebo asynchronní rozběh motoru. Rotorové vinutí je po dobu rozběhu spojeno přes rezistor nakrátko. Po dosažení asynchronních otáček se rezistor odpojí, rotor se nabudí a poté se automaticky vtáhne do synchronismu.

3.2.2 Generátorický režim

Když rotorovým vinutím prochází budící (stejnosměrný) proud, vznikne v rotoru magnetické pole. Protože se rotor otáčí, magnetické pole rotoru protíná statorové vinutí a indukuje v něm napětí. Na svorkách alternátoru se objeví střídavé trojfázové napětí. Připojíme-li k alternátoru nějaký spotřebič, začne statorovým vinutím procházet proud. Jako budič se používá usměrňovač nebo dynamo, umístěné na společné hřídeli s alternátorem. [4]

Turboalternátory se používají jako generátory tam, kde je potřeba aby se elektromotor točil vyšší rychlostí ($1500\text{--}3000\text{min}^{-1}$) - příkladem může být větrná elektrárna. Mají dlouhý rotor o průměru maximálně 1m. Tato konstrukce je nutná kvůli velkým odstředivým silám při rychlé rotaci rotoru. Také vzduchová mezera mezi rotorem a státorem je velmi malá (řádově milimetry).

Hydroalternátory se využívají hlavně ve vodních elektrárnách nebo všude tam, kde najde uplatnění pomaluběžný stroj - otáčky se pohybují pod 1500min^{-1} . Mají krátký rotor s velkým průměrem. Kvůli pomalé rotaci musí mít větší počet pólů než motor s hladkým rotorem.

Alternátory musí pracovat tak, aby jejich svorkové napětí bylo při každém zatížení alternátoru stálé. Se změnou zatížení, tj. se změnou proudu statoru alternátoru se musí měnit budící proud rotoru a tím i magnetické pole rotoru tak, aby svorkové napětí alternátoru bylo konstantní. To znamená, že při poklesu svorkového napětí alternátoru vlivem většího zatížení je nutno zvýšit budící proud alternátoru (tj. alternátor přibudit), při nárůstu svorkového napětí naopak budící proud snížit (tj. alternátor odbudit). [3]

Napětí na alternátoru lze také řídit změnou rychlosti otáčení rotoru, tím se ale mění i kmitočet indukovaného napětí. V případě, že alternátor bude pracovat do rozvodné sítě, je tento způsob řízení napětí nepřijatelný. Kmitočet napájecí sítě, tzv. průmyslový kmitočet 50Hz se udržuje, stejně jako svorkové napětí alternátoru na konstantní hodnotě. [3]

3.2.3 Nafázování na síť a práce do samostatné zátěže

Synchronní stroj nelze v generátorickém režimu přímo připojit na síť. Je nutné ho nafázovat se sítí a poté připojit. Musí se dodržet následující podmínky:

- *Stejný sled fází alternátoru a sítě*
- *Stejné efektivní hodnoty napětí alternátoru a sítě*
- *Stejný kmitočet alternátoru a sítě*
- *V okamžiku připojení k síti stejné okamžité hodnoty napětí [3]*

Při nedodržení tohoto postupu hrozí poškození nebo úplné zničení stroje. Změnou buzení se nemění výstupní napětí, ale pouze jalový výkon a účinník.

Jestliže motor pracuje do samostatné zátěže, není nutné ho fázovat. Napětí na výstupu je možné regulovat budícím vinutím na rotoru.

3.2.4 Použití a regulace výstupu

Synchronní motory lze použít v aplikacích, kde nedochází k častému rozběhu, jsou konstantní otáčky a zatížení. Jako příklad bych uvedl kompresory, velká čerpadla a ventilátory. Dále se používají jako synchronní kompenzátory pro zlepšení účinníku rozvodné sítě.

Synchronní generátory jsou nejčastěji používanými stroji při výrobě elektrické energie v elektrárnách. Lze je najít také v elektrocentrálách.

Postup při regulaci je obdobný jako u asynchronního motoru.

3.3 Stejnosemřný

3.3.1 Konstrukce a princip činnosti

Stejnosemřný motor je oproti předchozím dvěma typům napájen stejnosemřným napětím. Také využívá elektromagnetické indukce. Stejnosemřné napětí je přivedeno na komutátor kde se při komutaci mění na střídavé (překlápí stejnosemřné napětí). To vyvolá v rotoru elektromagnetickou indukci, která v magnetickém poli statoru zapříčiní rotační pohyb rotoru.

Komutátor je nejslabší součást celého stroje. Je zdrojem častých poruch a rušení. Dochází zde k přímému kontaktu rotujících vodivých lamel s grafitovými kartáči na statoru. Grafitové kartáče mají omezenou životnost. Při příliš rychlém otáčení komutátoru dochází k jiskření, proto je rychlost otáčení limitována komutátorem. Pro plynulejší komutaci se u některých strojů používá přídavné komutační vinutí nebo natáčecí kartáče (u strojů s nižší rychlostí otáčení).

3.3.3 Generátorický režim

Každý stejnosměrný motor lze použít jako generátor. Nejvíce se však používají motory s derivačním a kompaundním buzením.

Činnost dynamu je rovněž založena na elektromagnetické indukci. Budící proud ve statorovém vinutí vyvolá ve statoru magnetický tok. Ve vinutí rotoru se při jeho otáčení v magnetickém poli indukuje střídavé napětí, které se komutátorem upevněným na hřídeli rotoru, mění na napětí stejnosměrné. [4]

Dynamo s cizím buzením umožňuje řídit napětí v celém rozsahu otáček. Napětí jen mírně klesá se zatížením. Derivační dynamo má měkkou zatěžovací charakteristiku, ale je odolné proti zkratu. Pro nabuzení potřebuje zbytkový magnetismus v obvodu. Sériové dynamo se může nabudit pouze v uzavřeném obvodu při zatížení. Výstupní napětí silně klesá se zatížením. U kompaundního dynamu kryje sériové buzení ztráty při zatížení. Má téměř ideálně tvrdou zatěžovací charakteristiku.

3.3.4 Použití a regulace výstupu

Stejnosiměrný motor je nejstarší elektrický točivý stroj. Dříve se používal na výrobu veškeré elektrické energie. S vývojem polovodičových součástek však byl postupně vytlačován konstrukčně modernějšími motory. V dnešní době se tyto motory používají jako trakční motory, kde se využije jak motorický tak generátorický režim. Dále se používají jako budiče u synchronních strojů. Stejnosiměrné stroje jsou menší a lehčí než stroje střídavé obdobného výkonu.

Každý stejnosměrný točivý elektrický stroj může pracovat jako motor i jako generátor. Regulace výstupu není nutná. Na výstupních svorkách je přímo požadované usměrněné napětí.

3.4 BLDC

3.4.1 Konstrukce a princip činnosti

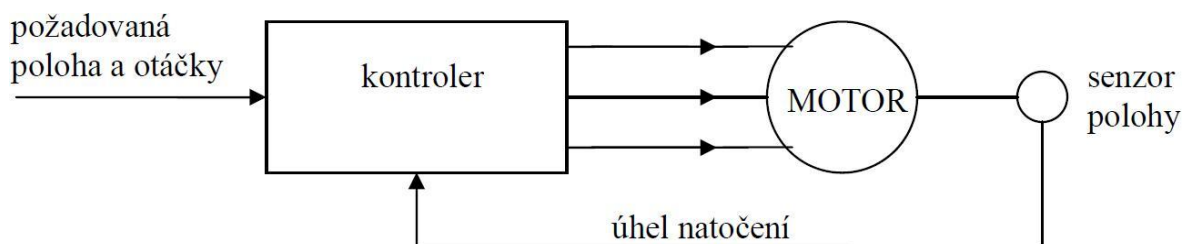
BLDC (brushless direct current) nebo EC (electronically commutated) motor je bezkartáčový neboli elektronicky komutovaný stejnosměrný elektrický točivý stroj. Motor lze najít pod oběma názvy. Názvosloví dosud není sjednocené, podobně jako u předchozích strojů.

Je to v podstatě synchronní motor s permanentními magnety na rotoru. Konstrukce statoru je obdobná jako u asynchronních nebo synchronních střídavých strojů. Na rotoru jsou upevněny permanentní magnety.

Motory se dělí na diskové a válcové. Obě skupiny se dále dělí na motory s vnějším a vnitřním rotorem.

Komutace se neodehrává na mechanickém komutátoru, ale v tranzistorovém měniči. Měnič pomocí pulzní šířkové modulace (PWM) postupně spíná jednotlivé cívky statoru, tak dochází ke vzniku točivého momentu.

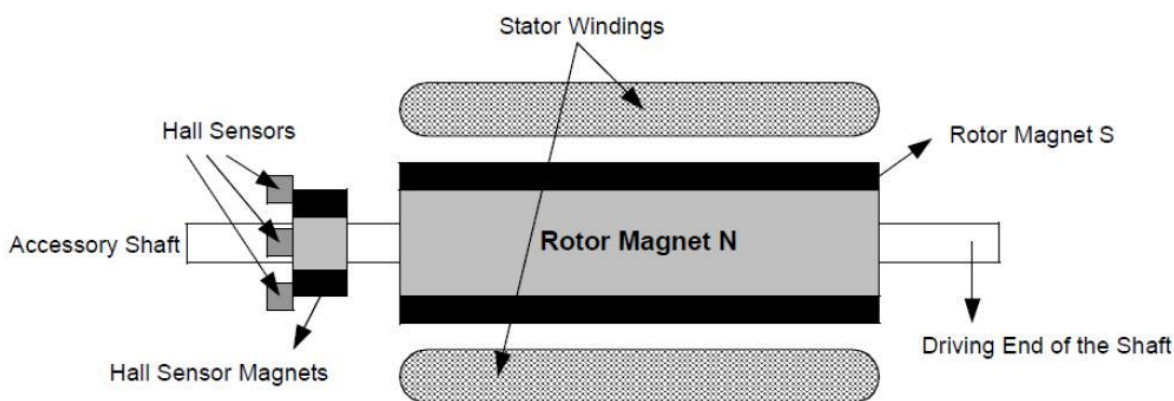
Otáčky mají lineární průběh v závislosti na napětí. Průběh momentu je taktéž lineární, v závislosti na proudu.



Obr. 8: Blokové schéma BLDC motoru [7]

3.4.2 Senzory polohy

BLDC motoru potřebuje pro svoji činnost snímat natočení rotoru. Řídící jednotka musí přesně vědět, v jaké poloze se rotor nachází, aby sepnula správnou cívku na statoru a zajistila rotaci rotoru. Používají se indukční snímače, optické snímače, Hallové sondy nebo bezsenzorové snímání. Nejčastěji se využívají čidla s Hallovými sondami.



Obr. 9: BLDC motor s Hallovými sondami [8]

3.4.3 Generátorický režim

Pro použití v generátorickém režimu je třeba odpojit tranzistorový měnič. BLDC motor stačí připojit k hnacímu motoru a roztočit na jmenovité otáčky. Výstupní napětí má sinusový průběh.

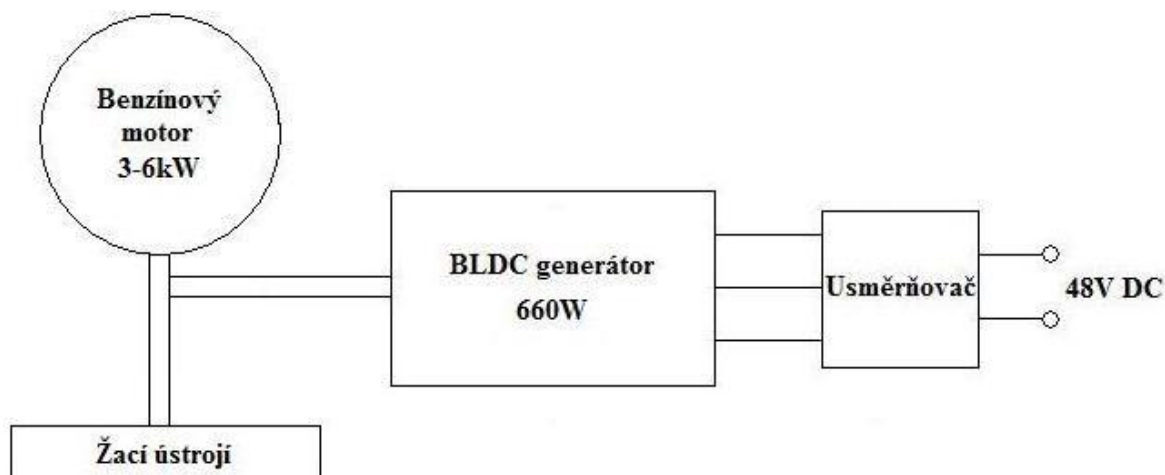
3.4.4 Použití a regulace výstupu

EC motory jsou méně známé, ne však nepoužívané motory. Jsou velice spolehlivé, mají vysokou účinnost a menší rozměry než ostatní motory. Další výhody jsou vysoká dynamická odezva a dlouhá životnost. Jedinou velkou nevýhodou je vyšší cena motoru. Používají se pro nejrůznější aplikace. Lze je také najít například v elektrocentrálách, CD, DVD přehrávačích a ve větrácích u zdrojů v PC.

Postup při regulaci výstupu je obdobný jako u třífázového synchronního a asynchronního motoru.

4 Schematický návrh

Po zvážení všech výhod a nevýhod jak hnacího, tak elektrického motoru jsem se rozhodl pro konstrukci benzín elektrického generátoru s BLDC motorem. K benzínovému motoru o výkonu 3-6kW, jehož primárním účelem je pohon žacího ústrojí sekačky, je jako generátor připojen BLDC motor o výkonu 660W.



Obr. 10: Schematický návrh

5 Mechanická konstrukce testovacího zařízení

Po dohodě s vedoucím bakalářské práce bylo rozhodnuto, že kontrolní měření bude provedeno za použití elektrického motoru namísto benzínového.

5.1 Přehled BLDC motorů

Před konstrukcí modelu a vlastního testovacího zařízení bylo třeba zakoupit BLDC motor. V následující tabulce je uveden přehled vybraných dostupných BLDC motorů ve výkonovém rozmezí 350 – 500 W:

Výrobce	Typ	Jmenovitý výkon [W]	Napětí [VDC]	Jmenovitá otáčky [rpm]	Hmotnost [kg]	Cena	Cena [CZK]
Smart Motor Devices	FL86BLS98	440	48	3000	2,6	162 EUR	4050
Transmotec	B86112-48	436	48	2975	3,15	494 USD	8892
Transmotec	B86112-24	393	24	3126	3,15	525 USD	9450
Dunkenmotoren	BG 75x50	430	24,4	3500	2,2	490 EUR	12250
Golden Motor	90BLDC-002	400	48	2000	2,8	85 USD	1530
Maxon Motor	EC60	400	48	2680-4960	2,45	1034 CHF	20680
Boyang Motor	BY92BL24-500	500	24	3500	3	180 USD	3240
Anaheim Automation	BLY343	440	30-48	3000-3200	3	368 USD	6624
Smart Motor Devices	FL86BLS125	660	48	3000	4	215 EUR	5375

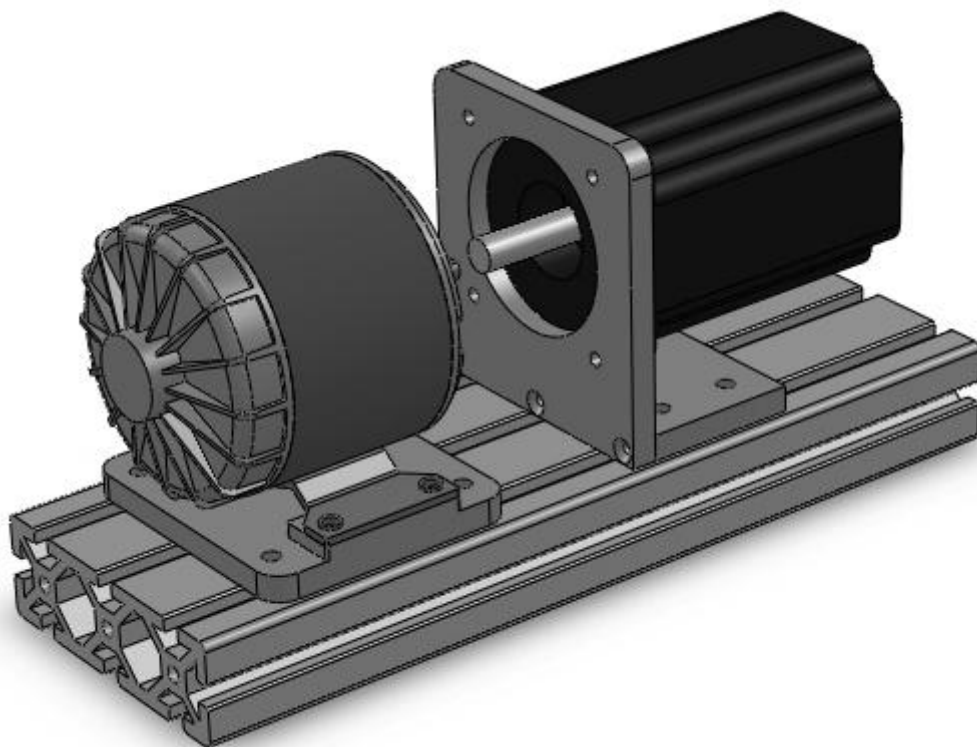
Přepočty: 1EUR = 25CZK; 1USD = 18CZK; 1CHF = 20CZK

Obr. 11: Tabulka: Přehled BLDC motorů

Nakonec bylo rozhodnuto, že kontrolní měření bude provedeno na silnější (660W) variantě motoru FL86BLS98 od firmy Smart Motor Devices OÜ. Důvodem pro toto rozhodnutí byla prakticky srovnatelná cena s méně výkonnou variantou.

5.2 Model v programu Solidworks

V programu Solidworks jsem vytvořil návrh celého testovacího zařízení s nákresem obou motorů, jejich upevňovacími součástmi a kolejnicí pro přichycení modelu. Hliníkové součásti na uchycení obou motorů bylo následně nutné nechat vyrobit.



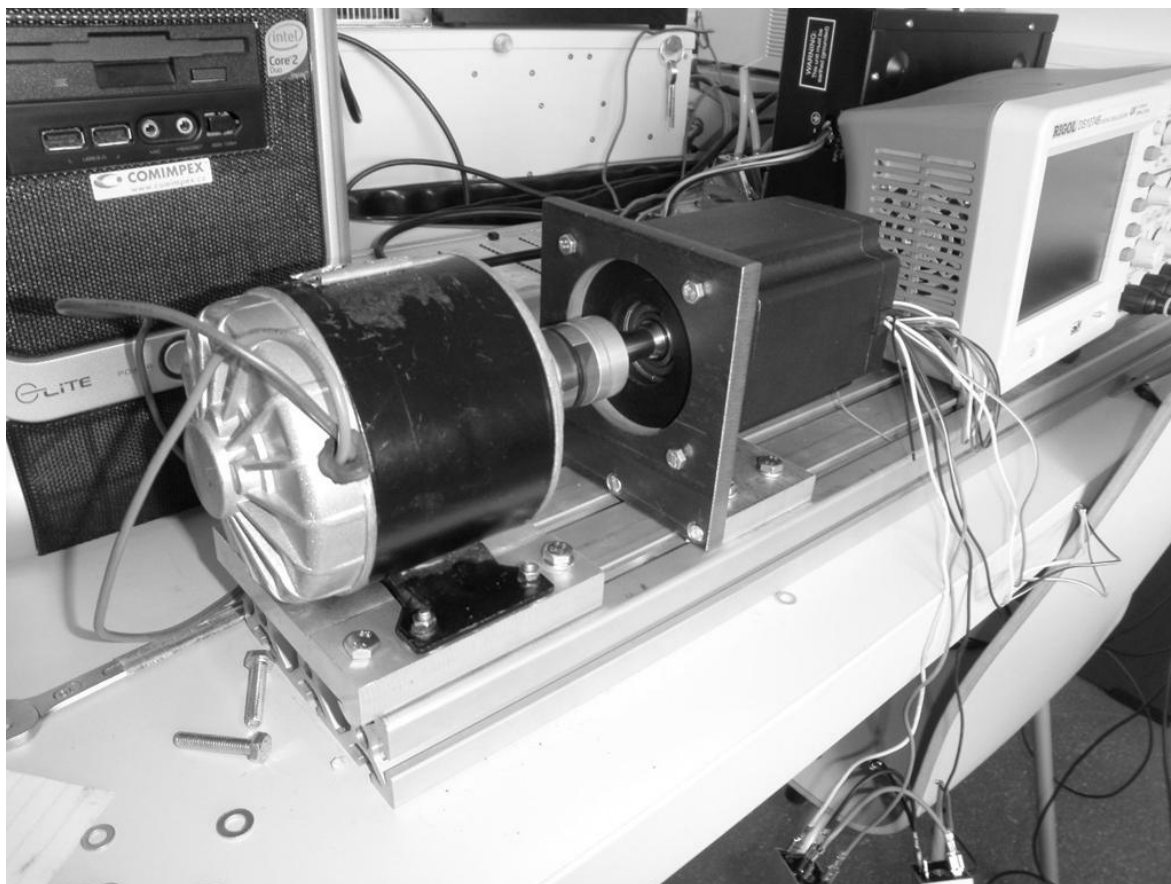
Obr. 12: Model testovacího zařízení v programu Solidworks

5.3 Vlastní konstrukce

Podle modelu z programu Solidworks jsem sestavil testovací zařízení a provedl kontrolní měření.

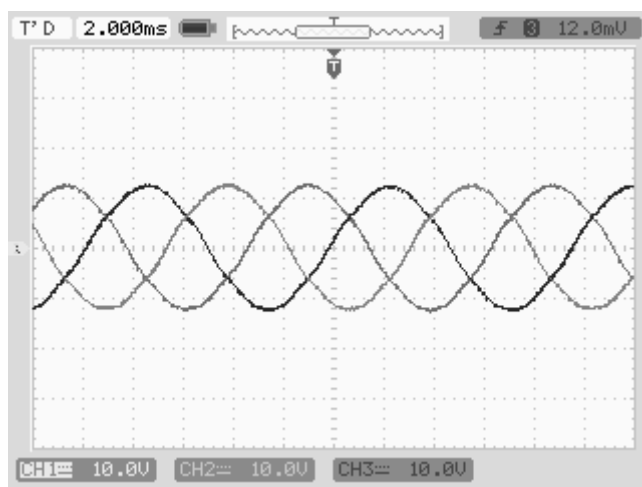
Seznam použitých součástí:

- BLDC motor: typ: FL86BLS125, 48V 660W od firmy: Smart Motor Devices OÜ
- DC motor: typ MY1035: 36V 350W od firmy: JY Motor Co.
- „Lko“ k upevnění BLDC motoru
- Podložka k upevnění DC motoru
- Kolejnice pro uchycení obou motorů
- Zdroj pro DC motor
- Osciloskop
- Usměrňovač



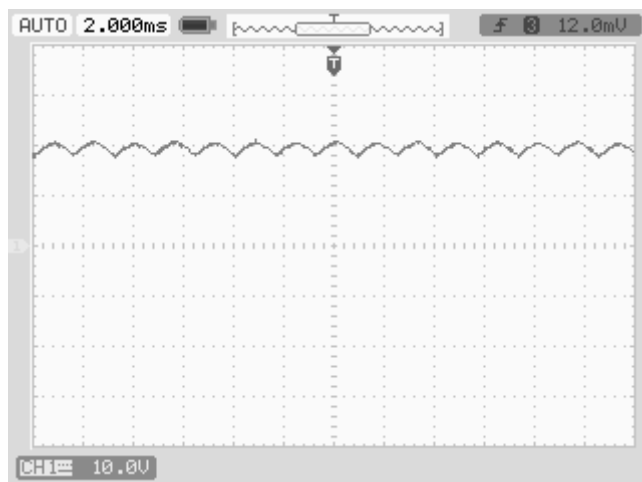
Obr. 13: Testovací zařízení

Po připojení DC motoru na zdroj a roztočení BLDC motoru se na výstupu BLDC motoru objevilo třífázové sinusové napětí:



Obr. 14: Výstup BLDC motoru před usměrněním

V následujícím obrázku je vidět stejné napětí usměrněné pomocí šestipulzního usměrňovače Gretz:



Obr. 15: Výstup BLDC motoru po usměrnění

6 Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo vytvořit funkční model generátoru pro mobilní robotické aplikace. Jako generátor byl použit BLDC motor typ: FL86BLS125, 48V 660W od firmy: Smart Motor Devices OÜ. Po dohodě s vedoucím bakalářské práce bylo rozhodnuto, že se kontrolní měření provedlo za použití hnacího elektrického motoru namísto benzínového.

V první části bakalářské práce jsem provedl průzkum dostupných elektrických generátorů, jak na tuzemském, tak na zahraničním trhu. Elektrocentrály jsem zkoumal z hlediska hnacího motoru i elektromotoru. V zadaném výkonovém a napěťovém rozmezí se mi podařilo najít pouze dvě benzínové centrály. Pro naše potřeby je nejvýhodnější použít malý benzínový agregát. Velkou výhodou je nízká spotřeba a hmotnost, dále pak nízké provozní náklady a snadná dostupnost.

Ve druhé části je popsán přehled dostupných elektrických strojů použitelných v generátorickém režimu. U každého motoru jsem uvedl základní konstrukci stroje a princip činnosti, dále jak funguje jako generátor a případnou regulaci výstupu a dále pak specifika jednotlivých motorů. Po zvážení všech výhod a nevýhod dostupných elektrických strojů, jsem jako generátor použil BLDC motor o výkonu 660W.

Ve třetí části je uveden popis sestavení testovacího zařízení od modelu v programu Solidworks, přes vlastní konstrukci, až po kontrolní měření. Na výstupu BLDC motoru jsem naměřil očekávaný třífázový sinusový průběh napětí. Následně jsem ještě toto napětí usměrnil pomocí šestipulzního usměrňovače Gretz.

7 Seznam literatury

- [1] ONDRUŠEK, Čestmír. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Elektromechanické přeměna energie*. Brno, 2007.
- [2] ISŠ VALAŠSKÉ MEZIRÍČÍ. *Elektrické stroje: Asynchronní motory*. Valašské Meziříčí, 2005.
- [3] KOČMAN, Stanislav. FEI VŠB - TU OSTRAVA. *Synchronní stroje*. Ostrava, 2004.
- [4] Elektrické stroje. JZED & ENERGYWEB. [online]. 2004. vyd. Dostupné z: http://ok1zed.sweb.cz/s/el_generator.htm
- [5] DUŠEK, J. *Speciální asynchronní motor jako zdroj elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 85 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Skalka.
- [6] TOMÁŠEK, Z. *Konstrukce modelářského elektromotoru*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, 2007. 78 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Šerý.
- [7] CHLOUPEK, K. *Program pro výpočet EC motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [8] BUBLÍK, S. *Výukový modul pro předmět mikropočítače: BLDC motor*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikovaní informatiky, 2010. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Dostálek.
- [9] LÁZŇOVSKÝ, Matouš. Aby baterie dohonila benzin, musí se naučit dýchat. *Idnes.cz* [online]. 19. 12. 2011. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/aby-baterie-dohonila-benzin-musi-se-naucit-dychat-fbq-/tec_technika.aspx?c=A111219_004819_tec_technika_mla
- [10] DC Generator for telecom. SOLEADO POWERNICS INTERNATIONAL LIMITED. [online]. 2012. vyd. Dostupné z: <http://www.soleadopower.com/>
- [11] VOP CZ, s.p. VOP CZ. [online]. 2011. vyd. Dostupné z: <http://www.vop.cz>
- [12] Princip stejnosměrných motorů. ELEKTRIKA.CZ. [online]. 2012. vyd. Dostupné z: <http://elektrika.cz>
- [13] VADLEJCH, F. *Konstrukce podvozku experimentálního vozidla se čtyřmi řízenými koly*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D.
- [14] Datasheet k BLDC motoru FL86BLS125, od firmy: Smart Motor Devices OÜ. [online]. Dostupné z: <http://stepmotor.biz>

8 Seznam symbolů a zkratek

Značka	Veličina	Jednotka
f	Kmitočet napájecího napětí	Hz
F	Síla	N
I	Proud	A
M	Moment	Nm
$M_{\max}$	Maximální moment	Nm
M_n	Jmenovitý moment	Nm
n	Otáčky	min ⁻¹
n_s	Synchronní otáčky	min ⁻¹
2p	Počet pólů	-
p	Počet pólových dvojic	-
P	Výkon	W
$P_{\max}$	Maximální výkon	W
P_n	Jmenovitý výkon	W
s	Skluz	-
s_n	Jmenovitý skluz	-
U	Napětí	V
ω	Úhlová rychlost	rad/s

9 Seznam příloh

CD: Výkresy všech součástí v programu Solidworks