

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
KEV

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření vlastností BLDC pohonu

Autor práce: **Martin Linhart**
Vedoucí práce: **Zdeněk Frank**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin LINHART**
Osobní číslo: **E19B0152P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Téma práce: **Měření vlastností BLDC pohonu**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

Změřte a určete el. vlastnosti komponentů BLDC pohonu.

1. Popište topologie pohonu.
2. Změřte pohonnou jednotku.
3. Vyhodnoťte naměřená data.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Student si potřebnou literaturu vyhledá sám dle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Frank

Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **7. října 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**



L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá měřením třífázových i vícefázových BLDC motorů. V první části jsou uvedeny teoretické poznatky o BLDC motorech ve srovnání s ostatními druhy elektromotorů a základy energetické bilance BLDC motorů.

Ve druhé části práce je popsáno měření třífázového BLDC motoru a z tohoto měření jsou vyhodnoceny parametry měřeného motoru.

Třetí část je věnována vícefázovým BLDC motorům a jejich výhodám. Dále je změřen jeden neznámý BLDC motor, a podle výsledků měření jsou vyhodnoceny parametry tohoto motoru.

Závěrečná část zkoumá účinnost vícefázového BLDC motoru při oteplovací zkoušce.

Klíčová slova

PMSM, BLDC motor, EC motor, měření naprázdno, měření nakrátko, motor, náhradní schéma, indukčnost, oteplovací zkouška, generátor

Abstract

This bachelor thesis deals with the measurement of three-phase and multiphase BLDC motors. In the first part, the theoretical knowledge of BLDC motors is presented in comparison with other types of electric motors and the basics of energy balance of BLDC motors are mentioned.

In the second part, the measurement of a three-phase BLDC motor is described, and the parameters of the measured motor are evaluated from this measurement.

The third part is dedicated to the multiphase BLDC motors and their advantages followed by a measurement and a characterization of an unknown multiphase BLDC motor using the measured values.

The last part of the thesis investigates the efficiency of the multiphase BLDC motor during the heating test.

Keywords

PMSM, BLDC, EC, motor, Stall current measurement, no-load voltage measurement, inductance, heating test, generator

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Měření vlastností BLDC pohonu“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu na konci práce. Veškeré použité informační zdroje jsou v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Plzni dne 20.5.2023

.....
Martin Linhart

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Zdeňku Frankovi za ochotu a trpělivost, za spousty cenných rad při psaní této práce, realizaci měření v prostorách Západočeské univerzity a za celkové vedení práce až ke konečnému výsledku.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Teorie BLDC pohonů	- 2 -
1.1 Topologie BLDC pohonu	- 3 -
1.1.1 Motor	- 3 -
1.1.2 Měnič	- 4 -
1.1.3 Baterie.....	- 5 -
1.2 Ztráty v motoru	- 5 -
1.2.1 Ztráty ve vinutí (Joulovy ztráty).....	- 5 -
1.2.2 Ztráty v železe	- 6 -
1.2.3 Mechanické ztráty.....	- 7 -
1.2.4 Přídavné ztráty.....	- 7 -
1.3 Měřicí stanoviště.....	- 7 -
1.3.1 Požadavky na měřicí stanoviště.....	- 7 -
2 Měření třífázového stroje.....	- 8 -
2.1.1 Reálné měřicí stanoviště.....	- 8 -
2.2 Měření odporu.....	- 10 -
2.3 Měření naprázdno	- 10 -
2.4 Měření nakrátko	- 11 -
2.5 Analýza náhradního schématu	- 13 -
2.5.1 Určení parametrů náhradního schématu	- 13 -
2.5.2 Výpočet indukčnosti při zanedbaném odporu	- 15 -
3 Měření vícefázového stroje	- 17 -
3.1 Výhody vícefázových strojů	- 17 -
3.2 Měřicí stanoviště.....	- 17 -
3.3 Měření odporu vinutí	- 18 -
3.4 Měření naprázdno	- 19 -
3.5 Měření nakrátko	- 20 -
3.6 Analýza náhradního schématu	- 21 -
3.6.1 Určení parametrů náhradního schématu.....	- 21 -

3.6.2	Výpočet indukčnosti při zanedbaném odporu	- 21 -
3.7	Momentová a výkonová charakteristika	- 22 -
4	Oteplovací zkouška vícefázového motoru.....	- 24 -
4.1	Měřicí stanoviště.....	- 24 -
4.2	Postup měření.....	- 25 -
4.3	Výpočet účinnosti stroje	- 25 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 31 -
	Literatura	- 32 -
	Přílohy	- 35 -

Seznam symbolů

Značka	Jednotka	Název značky
f	Hz	frekvence
I_k	A	proud nakrátko
L	H	indukčnost
M	Nm	točivý moment
m	-	počet fází
n	ot/min	otáčky motoru
p	-	počet pólových dvojic
P	W	výkon
ΔP	W	ztráty
ΔP_{Fe}	W	ztráty v železe
ΔP_j	W	Joulovy ztráty
R	Ω	činný odpor
t	s	čas
U_i	V	indukované napětí
U_f	V	fázové napětí
X_d	Ω	synchronní reaktance
Z	Ω	impedance
α	K^{-1}	teplotní součinitel odporu
β	$^\circ$	zátěžný úhel
η	-	účinnost
ω	rad/s	úhlová frekvence
Δ	W	ztráty

Seznam zkratk

Zkratka	Význam anglicky	Význam česky
BLDC	BrushLess Direct Current	Bezkartáčový stejnosměrný
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud
AC	Alternating Current	Střídavý proud
EC	Electronically Commutated	Elektronicky komutovaný
AM	Asynchronous motor	Asynchronní motor
HSM	Hybrid Synchronous motor	Hybridní synchronní motor
PMSM	Permanent Magnet Synchronous motor	Synchronní motor s permanentními magnety
IGBT	Insulated-gate Bipolar Transistor	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
MOS-FET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	Polem řízený tranzistor

Úvod

Bezkartáčové stejnosměrné motory jsou typem elektromotoru, který se v dnešní době uplatňuje v široké škále aplikací od domácích spotřebičů, elektrických vozidel a elektrokol, přes klimatizace a vzduchotechniku až po velké průmyslové stroje dosahující výkonů několika stovek kilowattů až megawattů.

V jejich technické dokumentaci je možné najít velké množství parametrů a informací o konkrétním motoru, ke kterému je tato dokumentace přiložena. Jaká je ale míra užitečnosti udávaných informací? Byly tyto parametry změřeny za ideálních podmínek v laboratoři, nebo v amatérské dílně s nepřesnými měřicími přístroji? Tato práce se zaměřuje na ověření parametrů udávaných v technické dokumentaci motoru, které jsou pro nás důležité kvůli jeho aplikaci do reálných zařízení.

Postup diskutovaný v této práci je také možné uplatnit v případě, že k motoru technická dokumentace chybí úplně, parametry motoru tedy neznáme a potřebujeme je zjistit pouze z velmi omezených dostupných informací. Pomocí měření popsanych v následujícím textu je možné zjistit alespoň základní informace o motoru a najít mu tak vhodné uplatnění.

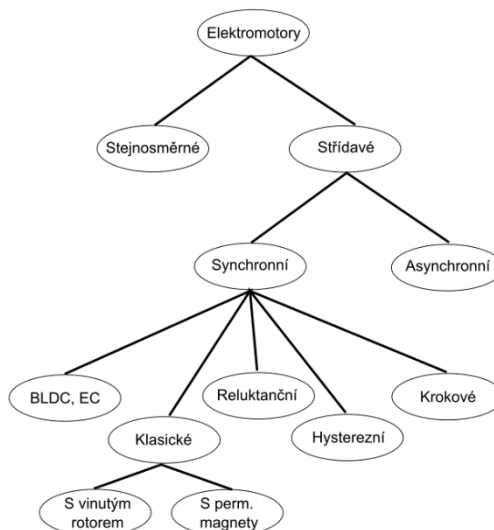
1 Teorie BLDC pohonů

Díky svému kompaktnímu designu, bezúdržbové konstrukci a širokému spektru využitelnosti se v poslední době dostávají BLDC motory na přední místa při volbě vhodného motoru pro danou aplikaci. Oproti tradičním stejnosměrným motorům a jiným typům elektromotorů mají BLDC motory několik výhod:

- disponují **vyšší účinností**, až 95 %;
- díky své zjednodušené konstrukci vyžadují BLDC motory **méně údržby** než tradiční stejnosměrné motory;
- mají **vyšší hustotu výkonu**, což znamená, že i při menších rozměrech mohou produkovat poměrně vysoké výkony;
- nabízejí **přesné řízení otáček a točivého momentu** motoru, což je například u asynchronních motorů řešeno velmi složitě.

BLDC motory je možné zařadit do několika různých kategorií motorů, ale kvůli mnoha různým parametrům, podle kterých je můžeme rozdělovat, není zatím jasně daná hierarchie jejich zařazení. Většina dělení se shoduje na oddělení AC a DC motorů, stejně tak v přiřazení (správně) synchronních a asynchronních motorů do kategorie střídavých (AC) motorů. Kde se ale názory rozdělují, jsou právě hlavně BLDC (BrushLess Direct Current) nebo EC (Electronically Commutated) motory. Tyto motory jsou svou konstrukcí v podstatě identické, a sdílejí podobnou stavbu jak se stejnosměrnými, tak se synchronními motory. To působí problémy v jejich zařazení.

Na následujícím obrázku je zobrazeno jedno z možných rozdělení motorů do různých kategorií:



Obr. 1: Schéma rozdělení elektromotorů

1.1 Topologie BLDC pohonu

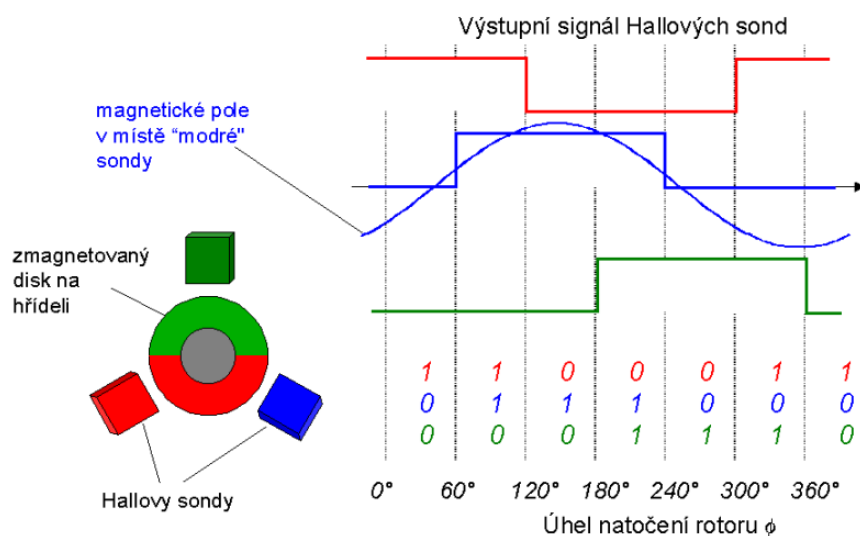
BLDC motor se obvykle skládá ze 3 součástí: baterie, měniče a samotného motoru.

1.1.1 Motor

Motor BLDC sestává ze tří hlavních částí: rotoru a statoru a vyhodnocovací elektroniky. **Rotor** je rotující součást, která obsahuje permanentní magnety, zatímco **stator** je stacionární součást, která obsahuje vinutí vytvářející elektromagnetické pole. Svou stavbou jsou tak BLDC motory velmi podobné PMSM motorům, rozdíl je v jejich napájení. PMSM motory jsou totiž druhem synchronních motorů, které jsou napájeny třífázovým napětím, zatímco BLDC motory napájíme nejčastěji stejnosměrným napětím. Uvnitř obou druhů motorů ale průběh proudu vypadá velmi podobně. To se děje díky měniči, který plní úlohu elektronického komutátoru. Více o tomto tématu bude pojednáno dále v textu.

Oproti stejnosměrným motorům mají zase BLDC motory „opačnou“ konstrukci. Stejnosměrné motory se většinou vyrábí s vinutým rotorem a permanentní magnety nebo elektromagnety jsou osazeny do statoru. Nejvýznamnější rozdíl oproti stejnosměrným motorům je ale v **absenci komutátoru a kartáčů** (kluzných kontaktů), jakožto součástí problematických na údržbu. V komutátoru také dochází k dalším ztrátám z důvodu nedokonalého elektrického kontaktu a tření kluzných kontaktů. Odstranění komutátoru celkově změnilo využitelnost těchto motorů. Mohou totiž být mnohem lépe utěsněny proti vniknutí prachových částic a jiných nečistot, protože zmizela nutnost vyměňovat uhlíkové kartáče z komutátoru, které se poměrně rychle opotřebovávaly. To zvyšuje jejich spolehlivost a životnost, umožňující tak aplikace například v letectví nebo kosmonautice pro řízení raket a satelitů.

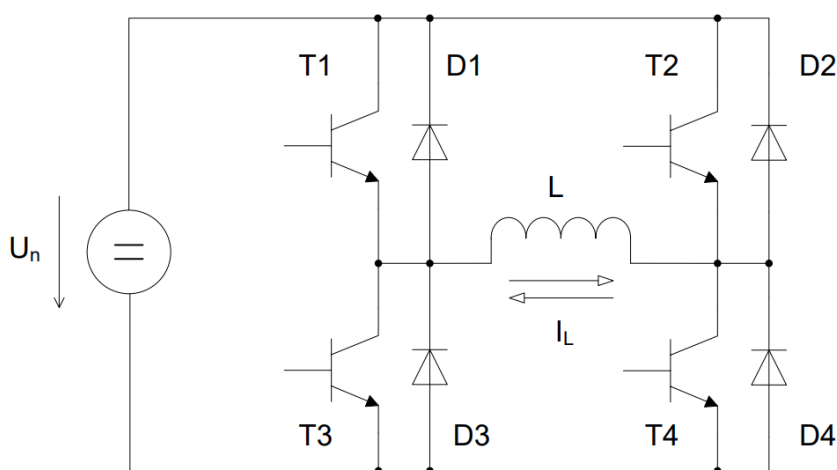
Jak tedy dochází ke komutaci, když ne v komutátoru? K tomu slouží vyhodnocovací elektronika, která má za úkol dávat informaci o otočení rotoru. Tento údaj je velmi důležitý pro měnič, který obsahuje výkonové spínací prvky a má za úkol správně načasovat napájení jednotlivých fází. Řeč je tedy o takzvané **elektronické komutaci**, kdy otočení rotoru určuje část vinutí, která má být zrovna napájena. [4] Snímání natočení rotoru Hallovými sondami ale není jediné ani nejlepší řešení vyhodnocovací elektroniky. Hallové sondy jsou totiž náchylné na rušení svého signálu šumem například při rozběhu motoru a průběh proudu ve vinutí je skokový, což je pro náročnější aplikace problém. Pro plynulejší magnetické pole se tak používají resolvery nebo inkrementální čítače, které zajišťují spojitou změnu napětí na vinutí, a tím i přesnější a spolehlivější řízení otáček motoru. Diagram průběhu signálů z Hallových sond je na obr. 2.



Obr. 2: Diagram výstupních signálů z Hall senzoru a jejich umístění u rotoru. Převzato z [4]

1.1.2 Měníč

Jak už bylo popsáno výše, měnič koná funkci elektronického komutátoru. Obsahuje elektronické spínací prvky, které řídí přepínání napájení do správného vinutí. Těmi jsou nejčastěji MOS-FET tranzistory pro měniče malých a středních výkonů, pro velké výkony se používají spíše IGBT tranzistory. Předchozí typ už zde není žádoucí kvůli velkým ztrátám při sepnutém stavu. [5] Použití těchto elektronických součástek má i jistou nevýhodu, a tou je pořizovací cena. Ta dále stoupá s rostoucími nároky na dimenzování měniče i celého řídicího obvodu. Na obr. 3 je znázorněno obecné schéma zapojení H-můstku jakožto příkladu jednoduchého měniče.

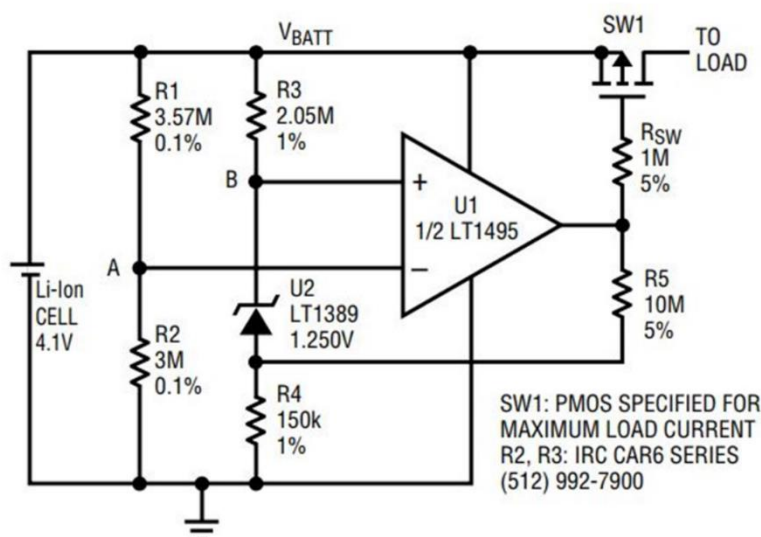


Obr. 3: Schéma zapojení H-můstku (převzato z [6])

1.1.3 Baterie

Jako napájení pro BLDC motor se běžně používá síťové napětí, které se dá využít například v laboratoři, což ale velmi omezuje využitelnost tohoto motoru. Aby mohl být motor použit v mobilních strojích, musí být napájen zdrojem s vysokou hustotou energie, jako například Li-Ionová baterie (akumulátor). Tyto baterie mají také tu vlastnost, že se samy velmi pomalu vybíjí. Jejich nevýhodou je hlavně zvýšená náročnost na údržbu, skladování, a při nesprávném zacházení jsou poměrně nebezpečné – vznětlivé.

Li-Ionová baterie zároveň potřebuje pro správnou činnost ochranný obvod, který od ní odpojuje zátěž v případě, že její náboj klesne pod určitou úroveň. (Jednoduché schéma obvodu proti vybíjení baterie je na obr. 4).



Obr. 4: Schéma ochranného obvodu v Li-ionovém akumulátoru
(převzato z [5])

Tento obvod má sám o sobě proudový odběr přibližně 4,5 μ A, tudíž baterii po odpojení už dále téměř nevybíjí.

1.2 Ztráty v motoru

Při provozu motoru se nevyhne různým druhům ztrát. Následující text popisuje, ke kterým ztrátám může v motoru dojít a jak ty podstatné vypočítat:

1.2.1 Ztráty ve vinutí (Joulové ztráty)

Joulové ztráty nesou obvykle největší podíl na celkových ztrátách ve vinutí motoru, v tomto případě tedy pouze ve vinutí statoru. Jsou způsobené průchodem proudu vinutím s nenulovým odporem, a mají za důsledek zahřívání motoru a zhoršení jeho účinnosti.

Můžeme je vyjádřit pomocí vzorce pro stroj s libovolným počtem fází:

$$\Delta P_j = m \cdot R \cdot I^2 \quad (1)$$

Joulové ztráty tedy závisí na druhé mocnině proudu protékajícího vinutím. Jak bude diskutováno dále v textu, tento proud se dá snížit například zvýšením počtu fází v motoru.

V motorech s měniči (například BLDC), kde dochází ve vinutí k velmi rychlým změnám v toku proudu, navíc můžeme pozorovat zvýšený účinek skin efektu, který způsobuje nerovnoměrné rozložení proudu na průřezu vodiče, což má za následek další zvýšení těchto ztrát.

Další faktor, který ovlivňuje Joulové ztráty, je odpor vinutí. Odpor vodičů se s rostoucí teplotou poměrně značně zvyšuje a také zvětšuje Joulové ztráty. Vinutí v motoru se při provozu značně zahřeje, a je tedy třeba vypočítat ekvivalentní odpor R_{ekv} pro teplotu vinutí v době měření (ϑ). Podmínkou je, že musíme znát hodnotu odporu R_0 při nějaké jiné konkrétní teplotě (ϑ_0), ekvivalentní odpor můžeme potom spočítat takto:

$$R_{ekv} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad (2)$$

kde α značí teplotní součinitel odporu, který má pro měď, ze které je vyrobena většina vinutí, hodnotu $0,00392 \text{ K}^{-1}$. $\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot $|\vartheta - \vartheta_0|$.

1.2.2 Ztráty v železe

Každý magnetický materiál má svoji hysterezní smyčku, která charakterizuje, jak lehce lze tento materiál přemagnetovat. Plocha uvnitř této hysterezní smyčky zároveň určuje energii, která je třeba na jeho přemagnetování. Této energii jsou přímo úměrné hysterezní ztráty. Proto je potřeba volit pro materiál statoru co nejměkčí magnetický materiál s úzkou hysterezní smyčkou.

V železe je možné se setkat ještě s jedním typem ztrát, a to se ztrátami vířivými proudy. Ty jsou zapříčiněny nerovnoměrným rozložením proudové hustoty po průřezu vodiče způsobené střídavou magnetizací. Zmenšit tyto ztráty můžeme hlavně skládáním z tenkých, vzájemně izolovaných plechů, jelikož zmenšíme plochu, na které se tyto vířivé proudy mohou tvořit. [7,8]

Spočítat tyto ztráty je možné podle vzorce:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_H + \Delta P_V = k_H \cdot B^2 \cdot f + k_v \cdot B^2 \cdot f^2 \quad (3)$$

kde k_H a k_v jsou materiálové konstanty, B je magnetická indukce a f je frekvence.

1.2.3 Mechanické ztráty

Tyto ztráty vznikají hlavně třením v ložiscích a v převodu a jsou úměrné rychlosti otáčení motoru. Závisí také na typu zvolených ložisek. Tyto ztráty ale oproti výše zmíněným ztrátám nejsou tak významné, v dalších výpočtech nebudou vyčísleny.

1.2.4 Přídavné ztráty

V reálném motoru dochází k řadě dalších ztrát, například k ventilačním ztrátám, v permanentních magnetech nebo ke ztrátám na součástkách v měniči, ale tyto ztráty opět nebudou počítány, protože jsou špatně vyčíslitelné a ve výsledném výpočtu nehrají příliš velkou roli.

1.3 Měřicí stanoviště

1.3.1 Požadavky na měřicí stanoviště

Pro úspěšný průběh měření je nutné mít k dispozici dobře vybavené pracoviště. V případě, že je motor měřen v generátorickém režimu, potřebujeme druhý motor, který slouží jako pohon. Pro tento účel je dobré mít k dispozici široký výběr motorů, aby bylo možné vybrat ten správný s vhodnými parametry. Když je motor v chodu, může docházet k silným vibracím, pracoviště tedy musí být nejlépe vybaveno antivibrační podložkou. Jako pevný podklad pro spolehlivé uchycení celé měřicí sestavy je nejlepší použít univerzální desku s členitým povrchem (například T-drážky).

Pro napájení všech zařízení je nutné mít k dispozici zdroje elektřiny s dostatečným rozsahem, přístup k třífázovému rozvodu elektřiny je u větších strojů také téměř samozřejmost.

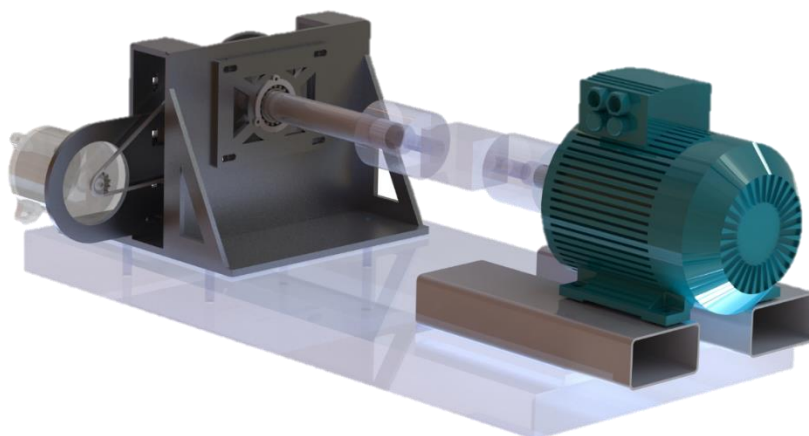
Pro spolehlivé zaznamenání všech údajů je nutné použít různé měřicí přístroje: osciloskop pro průběhy proudů a napětí nebo momentové senzory.

Obecně se počítá s tím, že osoba provádějící měření má přístup k velkému portfoliu zdrojů a měřicí techniky a dokáže splnit všechna specifika každé napěťové hladiny.

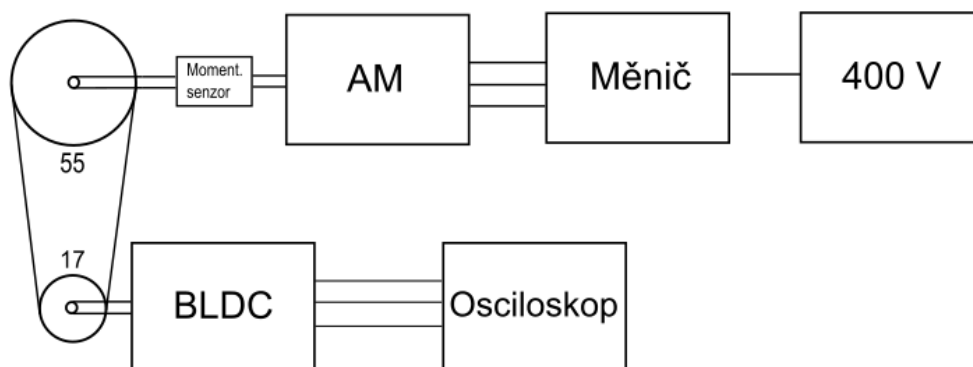
2 Měření třífázového stroje

2.1.1 Reálné měřicí stanoviště

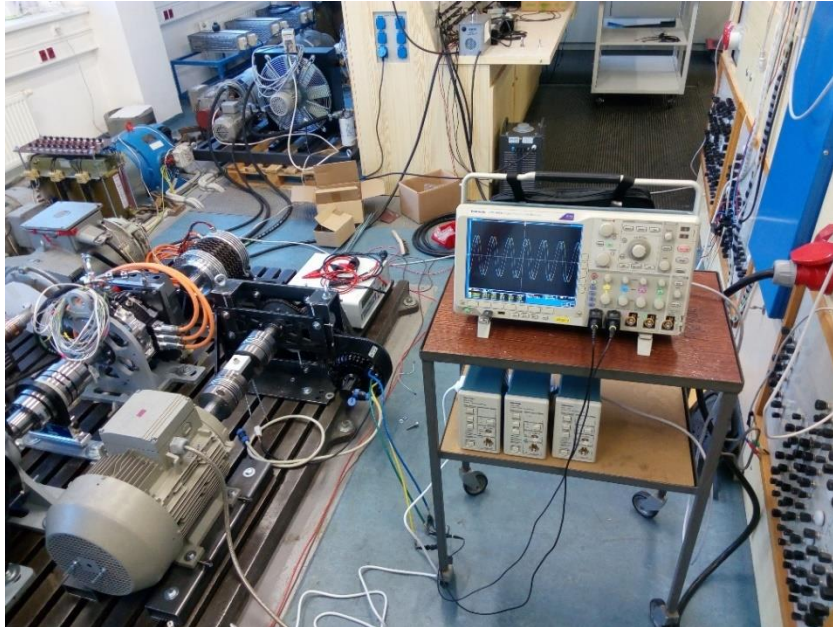
Měnič značky ABB byl podle blokového schématu na obr. 6 zapojen do třífázové elektrické zásuvky na 400 V a byl jím napájen asynchronní motor značky Siemens D-91056 (jeho štítkové údaje jsou uvedeny v tabulce 1). Na hřídeli tohoto motoru byl nasazen senzor momentu typu T20WN. Na jeho druhém konci byla uchycena hřídel, která byla přes řetězový převod 55:17 spojena s hřídelí měřeného BLDC motoru (štítkové údaje uvedeny v tabulce 2). Ten byl připevněn ke kovovému držáku převodu (model celého soustrojí je na obr. 5). Na výstupní svorky BLDC motoru byl připojen osciloskop Tektronix DPO 4034B. Foto měřicího stanoviště je na obr. 7. BLDC motor byl měřen v generátorickém režimu, proto na něj bude v textu dále odkazováno jako „generátor“.



Obr. 5: Model soustrojí



Obr. 6: Blokové schéma měřicího stanoviště



Obr. 7: Foto měřícího stanoviště

Tabulka 1: Štítkové hodnoty asynchronního motoru

Typ	Siemens D-1056
f	50 Hz
P_n	11 kW
$\cos(\varphi)$	0,84
n	1460 ot/min

Tabulka 2: Štítkové hodnoty generátoru

Typ	Golden motor HPM48-5000
U_n	48 V
I_n	120 A
P_n	5 kW
n	3500 ot/min
p	4
M_n	14 Nm
R	5,2 Ω
L	85 μ H

2.2 Měření odporu

Pro výpočet parametrů náhradního schématu je nutné znát odpory vinutí jednotlivých fází. Jako měřicí přístroj byl použit Microohmmeter Cropico DO5000. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 3. Z důvodu zjednodušení výpočtů se všechny tři hodnoty zprůměrují a v dalších výpočtech je použita tato průměrná hodnota odporu vinutí R_P .

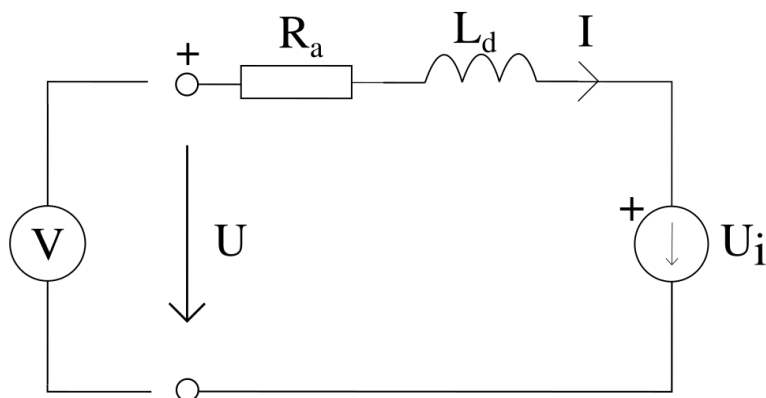
Tabulka 3: Naměřené hodnoty odporu vinutí

R_1	7,63 m Ω
R_2	7,64 m Ω
R_3	7,63 m Ω
R_P	7,63 m Ω

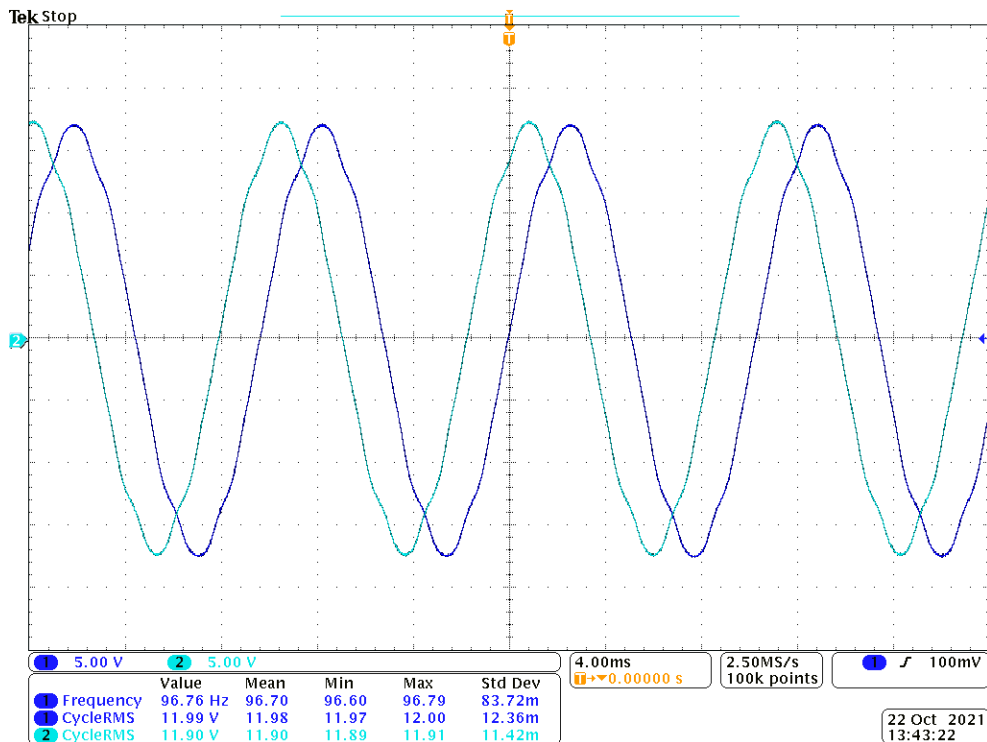
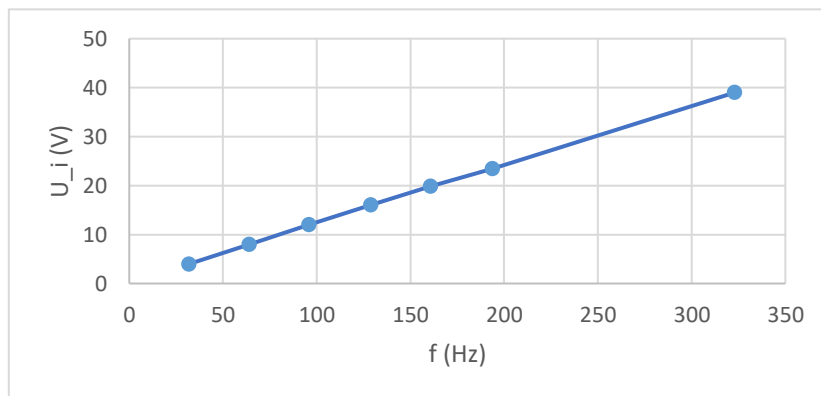
2.3 Měření naprázdno

Generátor byl nejdříve změřen naprázdno. Tato metoda nám umožňuje měřit napětí naprázdno bez vlivu odporu vinutí, neboť výstupní svorky motoru jsou rozpojeny. Skrze generátor tedy neteče žádný proud a nezpůsobuje žádné ztráty ve vinutí generátoru.

Na výstupní svorky je podle schématu na obr. 8 připojen voltmetr, kterým měříme sdružené indukované napětí naprázdno U , protože generátor nemá vyvedený střed. Přes měnič zvyšujeme otáčky pohonného motoru a zaznamenáváme hodnoty napětí při určité frekvenci. Snímek z osciloskopu při frekvenci 97 Hz je na obr. 9. Naměřené hodnoty jsou graficky znázorněny v charakteristice naprázdno na obr. 10.



Obr. 8: Schéma měření naprázdno

Obr. 9: Snímek z osciloskopu z měření naprázdno při $f = 97$ Hz

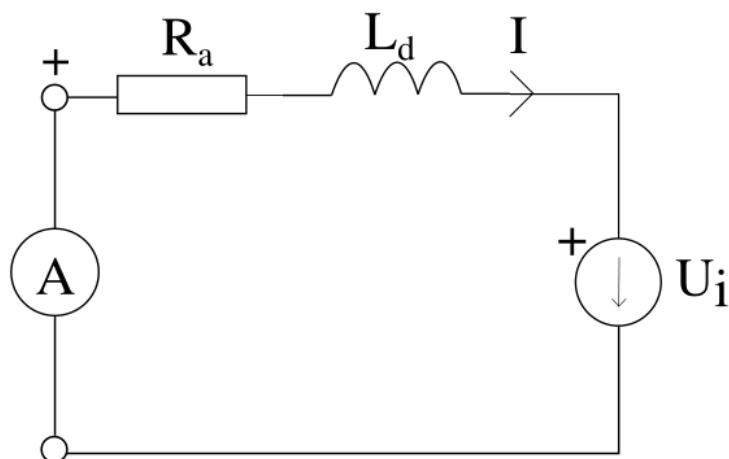
Obr. 10: Charakteristika naprázdno

2.4 Měření nakrátko

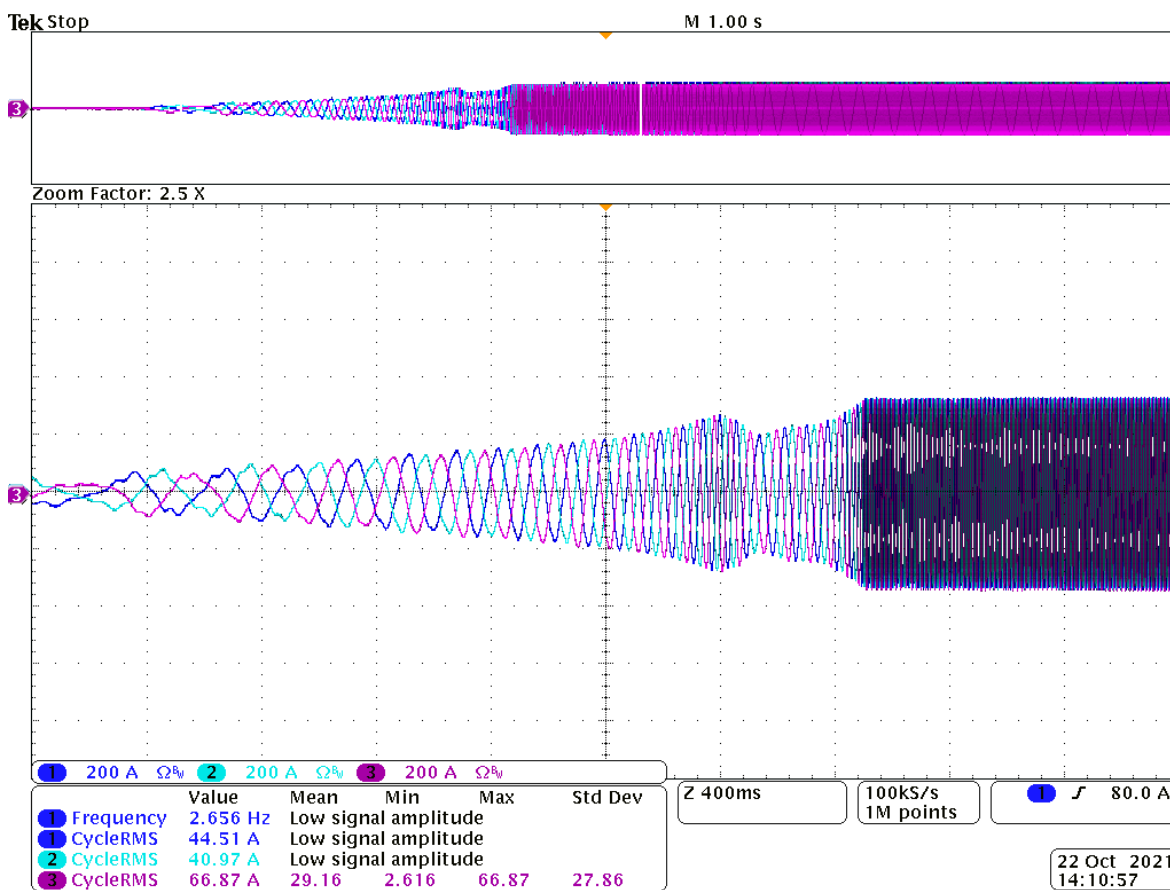
Proud nakrátko I_k je měřen narozdíl od měření naprázdno při zkratovaných výstupních svorkách (schéma zapojení je zobrazeno na obr. 11). Asynchronním motorem poháníme generátor a na jeho výstupních svorkách měříme proud nakrátko I_k . Tento proud je dále použit pro výpočet parametrů náhradního schématu.

Na obr. 12 je zobrazen snímek z osciloskopu při rozběhu generátoru a je možné na něm vidět, že je průběh proudu mírně rozkmitaný, než se ustálí na konstantní hodnotě. Toto

rozkmitání je způsobeno nevhodnou regulací měniče, který nebyl opatřen senzorem otáček, proto se při rozběhu rozkmital a až po nějaké době se ustálil. V kapitole 2.5.2 bude odvozen teoretický vzorec pro výpočet průběhu proudu nakrátko.



Obr. 11: Schéma měření nakrátko

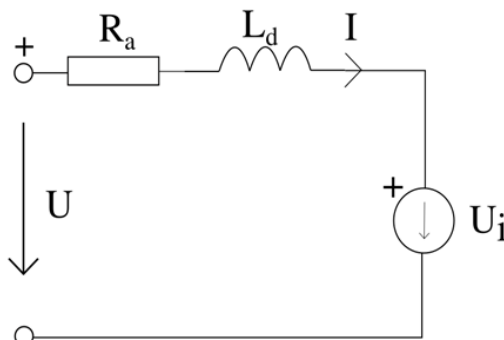


Obr. 12: Snímek z osciloskopu z měření nakrátko (rozběh generátoru)

2.5 Analýza náhradního schématu

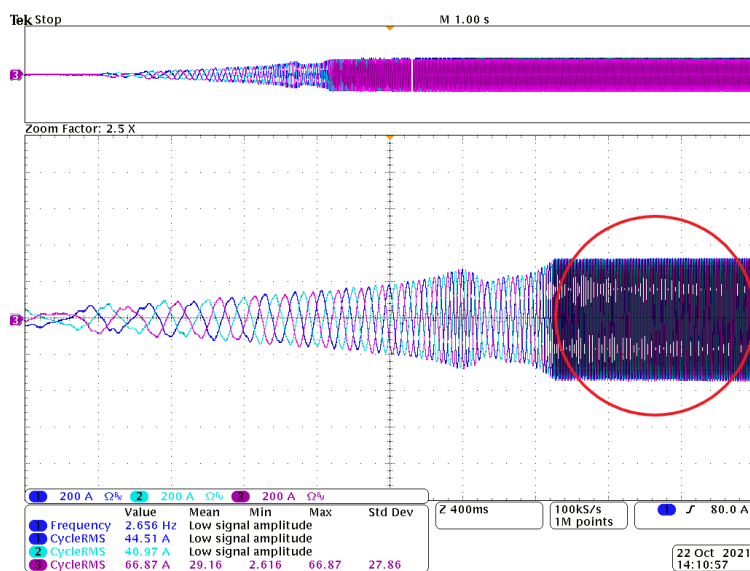
2.5.1 Určení parametrů náhradního schématu

Pro tento výpočet bude využito schéma synchronního stroje podle [1]:



Obr. 13: Náhradní schéma synchronního stroje (převzato z [1])

Nejprve využijeme data z měření nakrátko. Ve snímku z osciloskopu se zaměříme na oblast, kde se proud nakrátko ustálil (znázorněno červeně):



Obr. 14: Změřená charakteristika proudu nakrátko (snímek z osciloskopu)

V této oblasti si zvolíme jednu hodnotu frekvence jako pracovní bod a odečteme pro něj hodnotu proudu nakrátko. Pro tuto frekvenci je zároveň potřeba zjistit hodnotu indukovaného napětí. To je možné vypočítat z charakteristiky naprázdno z obr. 10, která je zjevně lineární, napětí se z ní tedy dá dopočítat i v bodě, ve kterém nebylo přímo změřeno.

Nejprve určíme směrnici charakteristiky naprázdno K_u :

$$K_u = \frac{U_i}{f} = \frac{7,4}{59,25} = 0,125 \quad (4)$$

Pro zvolenou frekvenci dopočteme s pomocí směrnice odpovídající sdružené indukované napětí U_i :

$$U_i = K_u \cdot f = 0,125 \cdot 59,25 = 7,4 \text{ V} \quad (5)$$

Ze vzorce pro Ohmův zákon spočítáme impedanci nakrátko:

$$Z_K = \frac{U_i}{I_k} = \frac{7,4}{233,5} = 0,03172 \Omega \quad (6)$$

Od impedance nakrátko vektorově odečteme odpor vinutí, abychom dostali synchronní reaktanci X_d :

$$X_d = \sqrt{Z_K^2 - R^2} = \sqrt{0,03172^2 - 0,00763^2} = 0,03079 \Omega \quad (7)$$

A z ní následně vypočítáme indukčnost vinutí generátoru:

$$L_d = \frac{X_d}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,03079}{2 \cdot \pi \cdot 59,25} = 82,7 \mu\text{H} \quad (8)$$

Všechny vypočtené a naměřené hodnoty pro pracovní bod $f = 59,25$ Hz jsou zapsány do následující tabulky 4:

Tabulka 4: Naměřené a vypočtené hodnoty pro pracovní bod 59,25 Hz

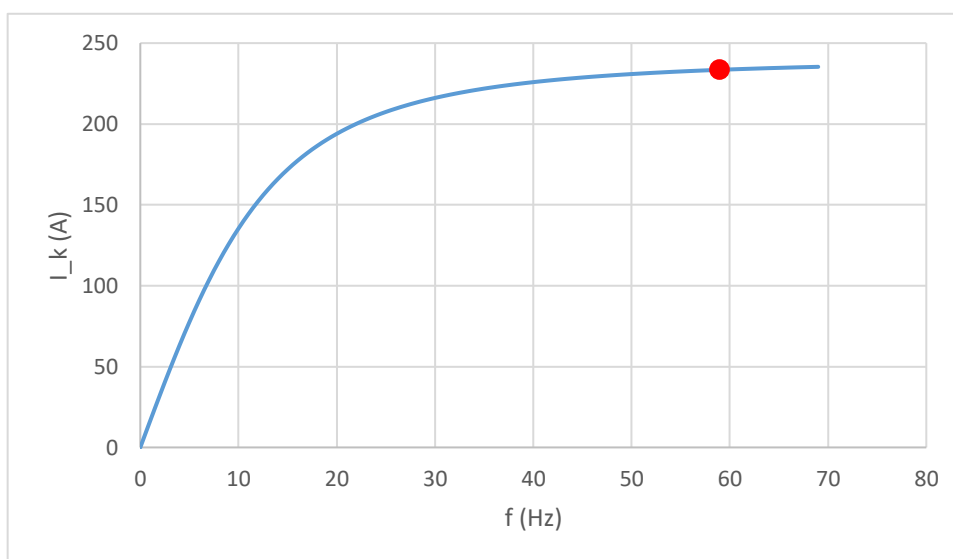
f (Hz)	59,25
U_i (V)	7,4
I_k (A)	233,5
R (m Ω)	7,63
L_d (μH)	82,7

2.5.2 Výpočet indukčnosti při zanedbaném odporu

Pro zjednodušení výpočtů se může použít metoda zanedbání odporu. Aby bylo možné počítat průběh indukčnosti v závislosti na frekvenci, je nutné znát vzorec pro průběh proudu nakrátko. Ten rekurzivně vypočítáme z dříve vypočtené indukčnosti:

$$I_k = \frac{U_i}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \quad (9)$$

Vypočtený průběh proudu nakrátko je zobrazen na obr. 15 (zvolený pracovní bod je vyznačen červeným bodem):



Obr. 15: Teoretický průběh proudu nakrátko

Porovnáním tohoto průběhu proudu nakrátko s průběhem z obr. 12 je vidět, že už není zakmitaný, a tudíž se dá lépe použít pro další výpočty.

Pro výpočet indukčnosti je vhodné zvolit bod na charakteristice nakrátko, kde je proud na téměř konstantní hodnotě. Tato volba je výhodná proto, že na průběh proudu má v tomto bodě indukčnost největší vliv. Výpočet indukčnosti tak bude obsahovat co nejmenší možnou chybu. Chybě výpočtu se ale není možné úplně vyhnout, proto je potřeba zjistit, jaká chyba může při výpočtu nastat.

Vycházet budeme samozřejmě z náhradního schématu z obr. 13. Indukované napětí U_i můžeme spočítat podle 2. Kirchhofova zákonu jako součet napětí na odporu U_R a napětí na cívce U_L . U_R je složka nezávislá na frekvenci, U_L na frekvenci naopak závislé je. Napětí

na cívce se tedy s rostoucí frekvencí zvyšuje a při vysokých otáčkách začíná být dominantní složkou celého součtu, tudíž od určité frekvence můžeme napětí U_R zanedbat. Je potřeba se ale ujistit, že tímto zanedbáním nebude způsobena moc velká chyba.

Indukčnost je počítána podle postupu v kapitole 2.5.1 jen s tím rozdílem, že je zanedbán odpor R , tudíž se impedance nakrátko Z_k skládá pouze z reaktance X_d . Příklad výpočtu indukčnosti při zanedbání odporu pro pracovní bod $f = 59$ Hz:

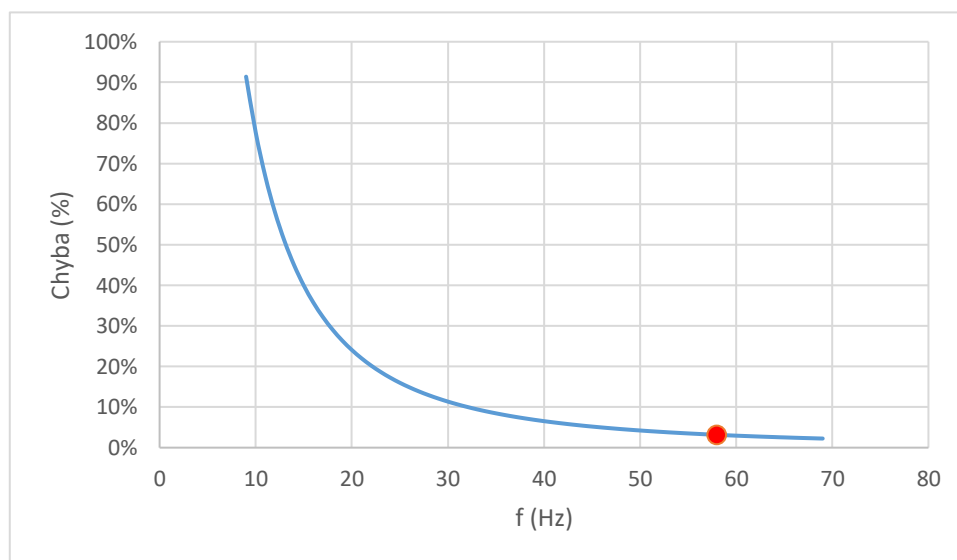
$$L_d = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{U_i}{I_k} = \frac{1}{370,71} \cdot \frac{7,375}{233,5} = 85,2 \mu H$$

(10)

Porovnáním této rovnice s rovnicí (8) získáme průběh chyby v závislosti na frekvenci:

$$\frac{U_i}{\omega \cdot I_k} \approx \frac{\sqrt{Z_k^2 - R^2}}{\omega}$$

(11)



Obr. 16: Průběh chyby měření indukčnosti při zanedbání odporu

Z výpočtu (10) vyšla hodnota indukčnosti při zanedbání odporu $85,2 \mu H$. Pro stejný pracovní bod byla vypočítána indukčnost bez zanedbání odporu $82,7 \mu H$. Chyba výpočtu zanedbání odporu vychází tedy přibližně na $3,1 \%$.

Z grafu na obr. 16 je patrné, že chyba měření indukčnosti při zanedbání odporu se s rostoucími otáčkami motoru snižuje, proto je nutné zvolit pracovní bod při co největších otáčkách (vyznačen červeným bodem). Chyba výpočtu indukčnosti při zanedbání odporu je potom minimální.

3 Měření vícefázového stroje

Na toto měření byl použit vícefázový BLDC motor neznámých parametrů. Naším úkolem tudíž bude tento motor správně zařadit do určité výkonové kategorie a pokusit se co nejpřesněji určit jeho parametry, aniž bychom měli k dispozici jeho technickou dokumentaci.

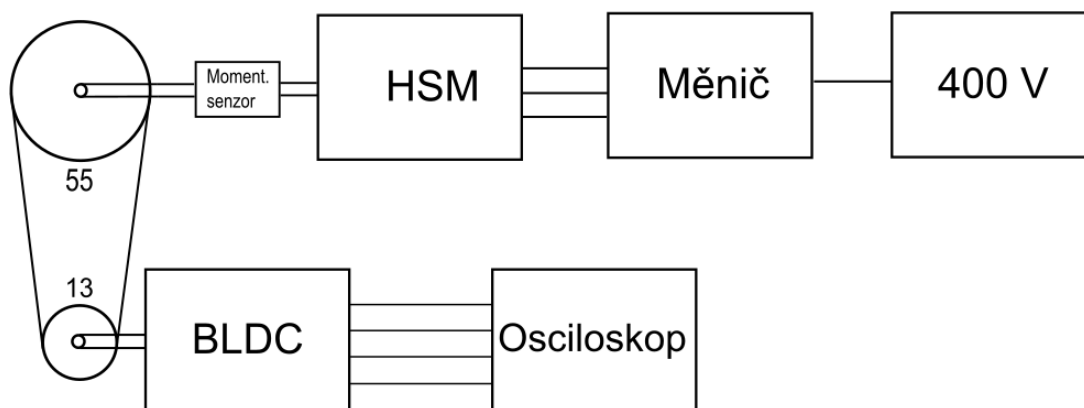
3.1 Výhody vícefázových strojů

Zvyšování počtu fází v motoru má několik důvodů:

- **zvýšená spolehlivost:** Čím je vinutí rozděleno na více menších segmentů, tím je plynulejší otáčení rotoru. Zároveň se rozdělením statoru na malé části snižuje náchylnost motoru na poruchu. Je samozřejmě možné rozdělit třífázové vinutí rovnoměrně po obvodu na spoustu částí, ale pokud jedna fáze přestane fungovat, pořád zbývají v motoru už jen dvě funkční fáze, což v některých případech nemusí stačit na roztočení motoru. Pokud je ale fází v motoru více než 3, je velká šance, že porucha jedné fáze motor nevyřadí z provozu. Podle [3] jsou potřeba alespoň 3 fáze pro nepřerušovaný chod motoru;
- **menší nároky na součástky a vinutí stroje:** Vícefázový stroj má při stejném výkonu jako třífázový motor svůj výkon rozdělený na více vinutí. Jedním vinutím tedy teče menší proud než u třífázového motoru, a to klade menší nároky na spínací prvky v měniči i na robustnost vinutí uvnitř motoru. Zároveň je tedy možné dimenzovat vícefázové motory pro velmi vysoké výkony.

3.2 Měřicí stanoviště

Celá měřicí sestava na měření vícefázového motoru byla velmi podobná té z obr. 6. Měnič Brusa DMC534 – ISU byl zapojen do třífázové elektrické zásuvky na 400 V a byl jím napájen hybridní synchronní motor Brusa HSM1 – 6.17.12 (štitkové údaje jsou uvedeny v tabulce 5). Na hřídeli tohoto motoru byl opět nasazen senzor momentu typu T20WN. Na jeho druhém konci byla uchycena hřídel, která byla přes řetězový převod 55:13 spojena s hřídelí měřeného vícefázového BLDC motoru (ten byl opět měřen v generátorickém režimu, dále tedy jen „generátor“). Ten byl připevněn ke kovovému držáku převodu (Schéma celého soustrojí je na obr. 17). Na výstupní svorky byl připojen osciloskop Tektronix DPO 4034B.



Obr. 17: Blokové schéma zapojení vícefázového generátoru

Tabulka 5: Štítkové hodnoty pohonného HSM motoru

Název	HSM1 – 6.17.12 – E02
I_{\max}	300 A
M_{\max}	220 Nm
n_{\max}	12000 ot/min
U_n	400 VDC
P	96 kW

3.3 Měření odporu vinutí

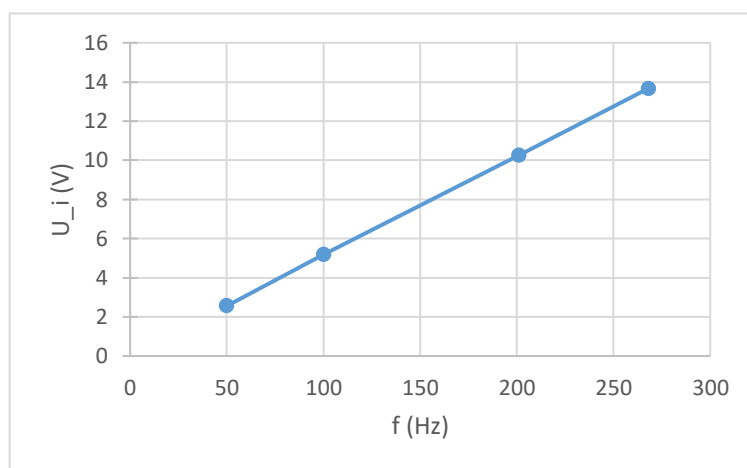
Pomocí Ohmmetru byly opět změřeny odpory vinutí, naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6. Všechny hodnoty byly aritmeticky zprůměrovány, průměrný odpor je označen R_P .

Tabulka 6: Naměřené hodnoty odporu vinutí

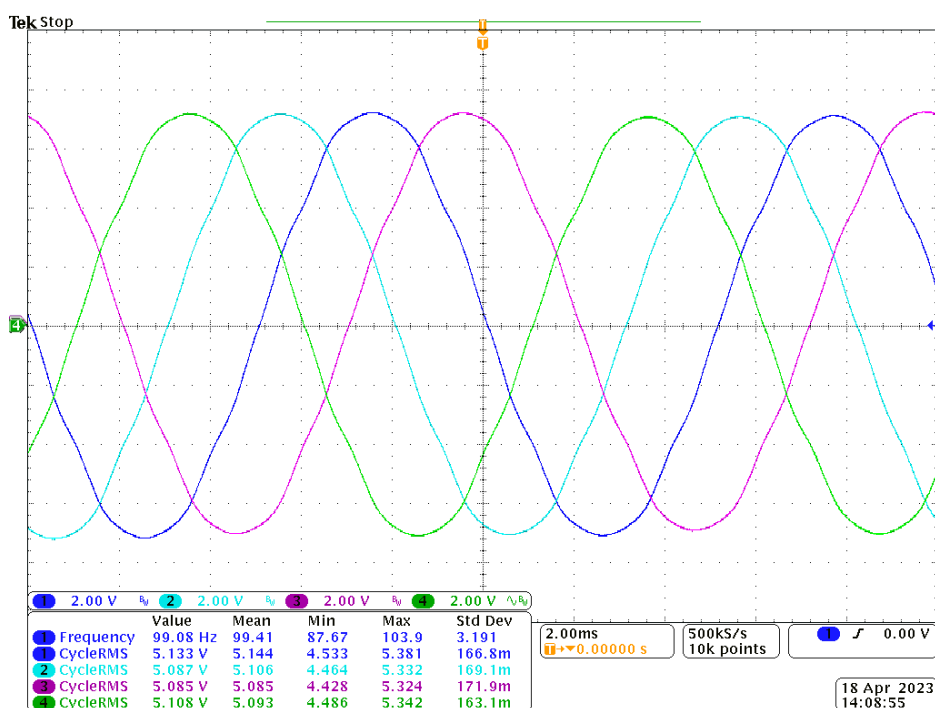
R_1 (m Ω)	27,18
R_2 (m Ω)	27,15
R_3 (m Ω)	28,15
R_4 (m Ω)	27,28
R_5 (m Ω)	27,13
R_P (m Ω)	27,38

3.4 Měření naprázdno

Generátor byl změřen naprázdno podle stejného schéma zapojení jako v bodě 2.3, při frekvencích od 50 do 200 Hz, charakteristika naprázdno je na obr. 18. Na obr. 19 je zobrazen snímek z osciloskopu při frekvenci 99 Hz. Při tomto měření bylo provedeno ověření počtu fází tohoto BLDC stroje. Z důvodu limitovaného počtu kanálů na osciloskopu bylo možné změřit pouze čtyři fázová napětí najednou. To je důvod, proč jsou na obr. 19 zobrazeny jen 4 průběhy fázových napětí. Výstupních svorek vedlo z motoru 5, k osciloskopu byly připojeny jen 4, ale při připojení jedné sondy z osciloskopu na zbývající výstupní svorku bylo změřeno napětí o identické amplitudě, jen fázově posunuté oproti ostatním průběhům. Motor má tedy opravdu 5 fází.



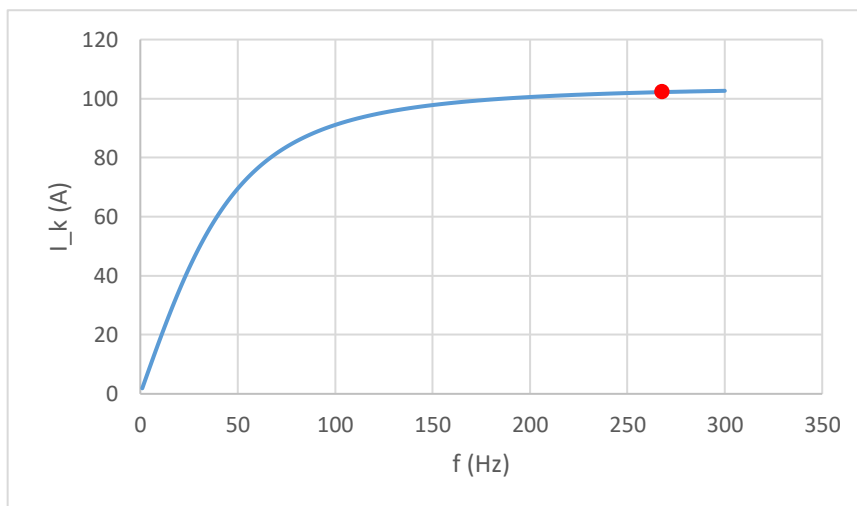
Obr. 18: Charakteristika naprázdno



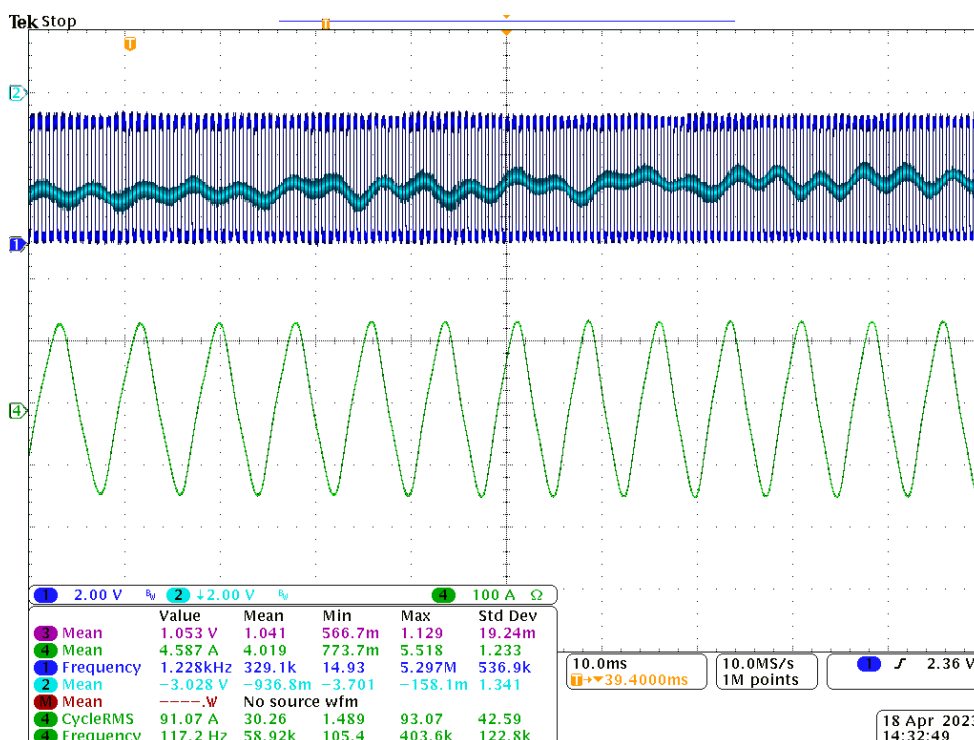
Obr. 19: Snímek z osciloskopu z měření naprázdno při $f=99$ Hz

3.5 Měření nakrátko

Měření proudu nakrátko proběhlo dle postupu z kapitoly 2.4 – všech 5 fází bylo zkratováno a hřídel motoru bylo otáčeno pomocí hybridního synchronního stroje Brusa. Měření nakrátko bylo provedeno pro frekvence od 65,5 do 268 Hz, snímek z osciloskopu je zobrazen na obr. 21. Z hodnot tohoto měření byl vykreslen graf zobrazující průběh proudu nakrátko (obr. 20).



Obr. 20: Teoretický průběh proudu nakrátko (pracovní bod je vyznačen červeným bodem)



Obr. 21: Snímek z osciloskopu z měření nakrátko při $f = 117$ Hz

3.6 Analýza náhradního schématu

3.6.1 Určení parametrů náhradního schématu

Pro určení parametrů náhradního schématu byl použit stejný postup jako v bodě 2.5.1. Teoretický průběh proudu nakrátko je znázorněn na obr. 20. Naměřené a vypočítané hodnoty pro zvolený pracovní bod jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Naměřené a vypočítané hodnoty pro pracovní bod $f = 268$ Hz

I_k (A)	102,2
U_i (V)	13,668
R (Ω)	0,02738
L (μ H)	77,7

Příklad výpočtu indukčnosti pro frekvenci 268 Hz:

$$L_d = \frac{X_d}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,131}{2 \cdot \pi \cdot 268} = 77,7 \mu H$$

(12)

3.6.2 Výpočet indukčnosti při zanedbaném odporu

Podle vztahu (10) vypočítáme indukčnost motoru, přičemž opět zanedbáme odpor vinutí. Následuje příklad výpočtu pro frekvenci 268 Hz:

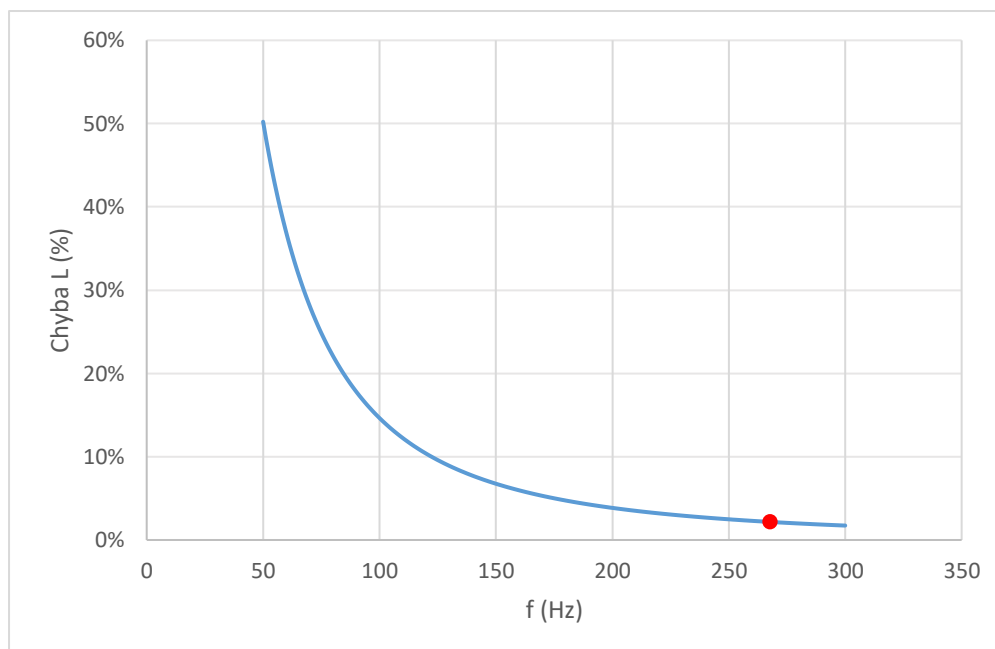
$$L_{bezR} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{U_i}{I_k} = \frac{1}{1683,9} \cdot \frac{13,67}{102,2} = 79,4 \mu H$$

(13)

Dále stanovíme chybu výpočtu indukčnosti podle vztahu:

$$\delta_L = \frac{L_{bezR} - L_d}{L_d} = \frac{79,4 - 77,7}{77,7} = 2,16 \%$$

(14)



Obr. 22: Průběh chyby výpočtu indukčnosti při zanedbání odporu. Červený bod označuje měřený bod.

Na obr. 22 je zobrazen průběh chyby výpočtu indukčnosti. Vypočítaná indukčnost při zanedbání odporu by byla 79,4 μH oproti výpočtu bez zanedbání, odporu, která je 77,7 μH . Chyba tohoto měření by byla přibližně 2,16 %.

3.7 Momentová a výkonová charakteristika

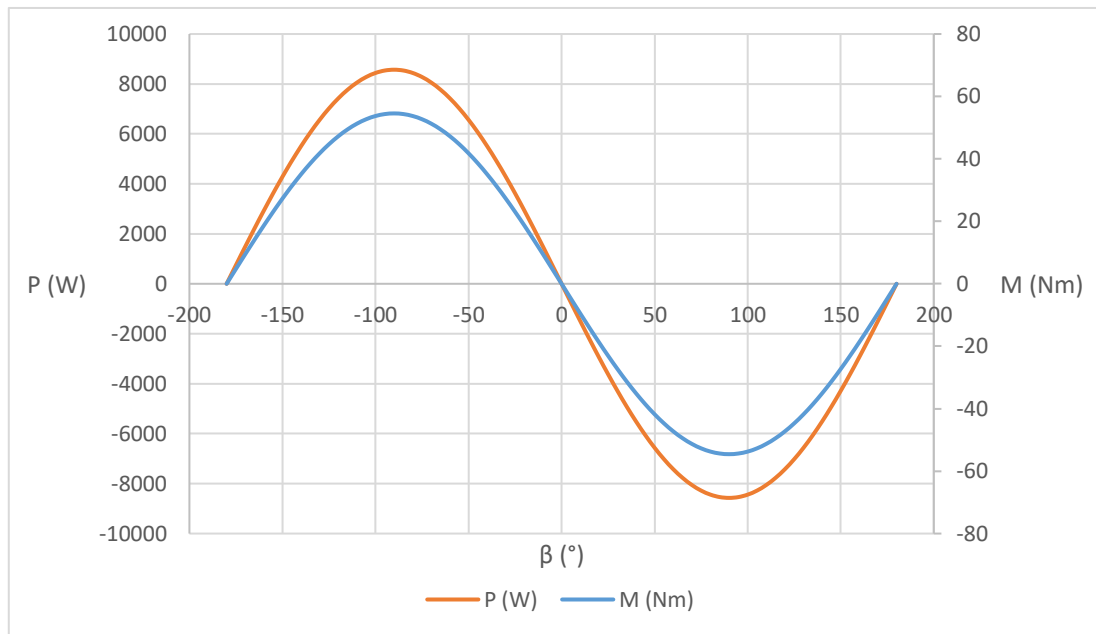
Generátor je dále vhodné charakterizovat pomocí výkonu nebo momentu. V kapitole 4 bude měřena oteplovací zkouška, kde tento vícefázový generátor bude měřen při 1500 ot / min, což se rovná frekvenci 200 Hz (přepočtení a postup měření jsou souhrnně uvedeny v kapitole 4). Maximální moment je vypočítán podle vzorce pro výpočet točivého momentu pro ideální stroj podle [2] (při $\beta = -90^\circ$ a $f = 200$ Hz):

$$M_{MAX} = -\frac{p \cdot m}{\omega_1} \cdot U \cdot \frac{U_i}{X_d} \sin \beta = -\frac{8 \cdot 5}{2 \cdot \pi \cdot 200} \cdot 22 \cdot \frac{10,2}{0,131} \cdot \sin -90^\circ = 54,57 \text{ Nm} \quad (15)$$

Výpočet výkonu pro $f = 200$ Hz a $\beta = -90^\circ$:

$$P_{MAX} = M \cdot \frac{\omega_1}{p} = 54,57 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 200}{8} = 8571 \text{ W} \quad (16)$$

Průběhy obou těchto veličin jsou zaznamenány v grafu na obr. 23.



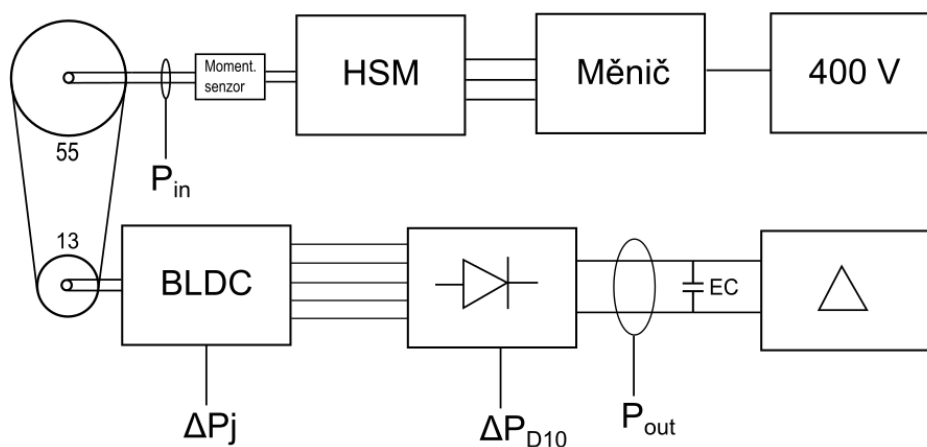
Obr. 23: Momentová a výkonová charakteristika vícefázového generátoru při otáčkách 1500 ot / min

4 Oteplovací zkouška vícefázového motoru

Vinutími generátoru protékají poměrně velké proudy, a jelikož odpor vinutí není nulový, vznikají tak ztráty. Tyto ztráty se projevují vznikem tepla ve vinutí generátoru, které následně způsobuje oteplování celého generátoru. Teplo vzniká také třením ložisek na hřídeli, magnetickým tokem v rotoru a také se zahřívají součástky, co řídí vinutí ve statoru. Vysoká teplota generátoru je nežádoucí, protože zhoršuje jeho elektrické i magnetické vlastnosti a samozřejmě i životnost samotného generátoru. Následující část této bakalářské práce se bude věnovat analýze tepelných ztrát v generátoru, a jak tyto ztráty ovlivňují jeho výkon.

4.1 Měřicí stanoviště

Celá oteplovací zkouška byla měřena na podobném stanovišti jako je uvedena v bodě 2.1.1. Vícefázový BLDC motor byl poháněn motorem Brusa HSM1 – 6.17.12 (Štítkové hodnoty jsou uvedeny v přechodí kapitole v tabulce 5) napájený měničem Brusa DMC534 – ISU, na hřídeli byl opět nasazen momentový senzor T20WN, hřídele obou motorů byly spojené přes řetězový převod 55:13. K výstupním svorkám BLDC motoru byl navíc připojen výkonový usměrňovač (spolu s BLDC motorem tvoří stejnosměrný generátor) a usměrněný proud z něj odebíral obousměrný zdroj Delta Elektronika SM70 – CP – 450, který sloužil jako zátěž. Mezi zdrojem a usměrňovačem byly zapojeny 2 filtrační elektrolytické kondenzátory F&T o kapacitě 1 mF. Teplota byla měřena pomocí 4 teplotních senzorů umístěných na vinutí uvnitř motoru, na čele motoru, zvenku na kostře motoru a ve vzduchu ve vzdálenosti 30 cm od motoru. Tyto senzory byly připojené do data loggeru Ahlborn ALMEMO 2590. Blokové schéma zapojení je zobrazeno na obr. 24.

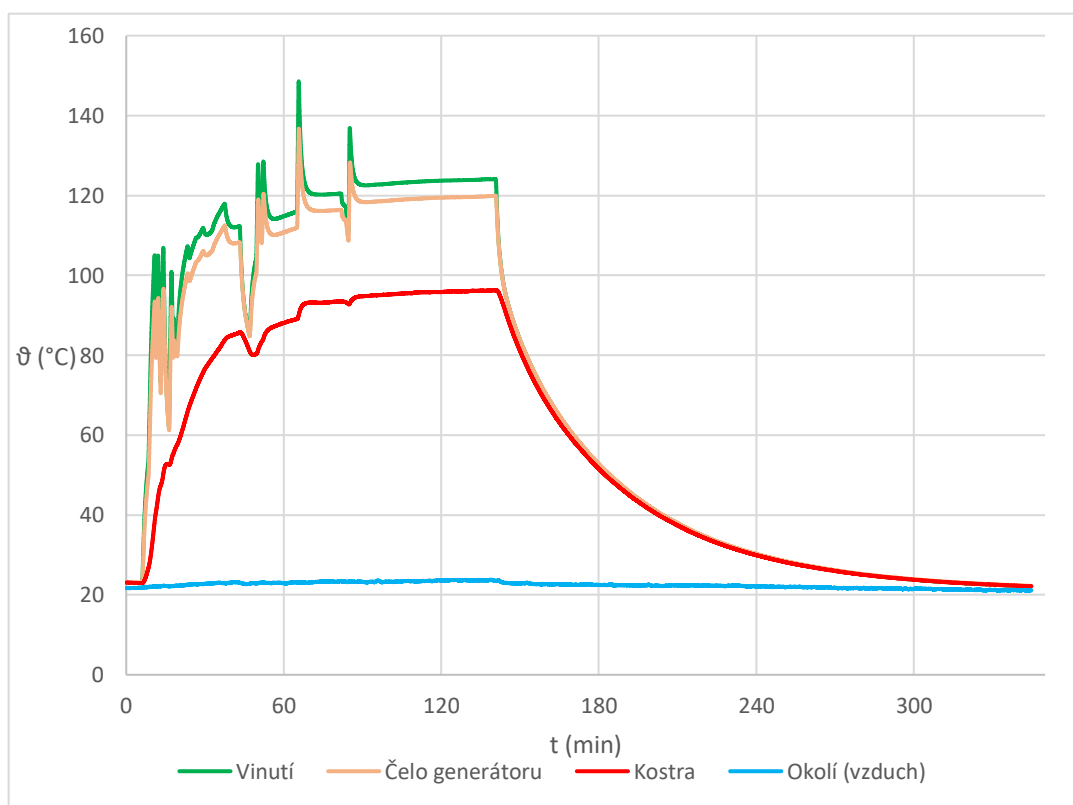


Obr. 24: Blokové schéma zapojení při oteplovací zkoušce

4.2 Postup měření

Smyslem tohoto měření by mělo být zahřátí generátoru na určitou teplotu a po ustálení teploty v celém generátoru měřit jeho účinnost a ztráty. Generátor tímto způsobem měříme za reálných podmínek, ve stavu, do jakého se běžně dostane v provozu.

Generátor byl roztočen na 1500 ot/min a v tomto stavu byl ponechán celý průběh měření. Pro ušetření času a urychlení celého procesu byl z generátoru v krátkých časových úsecích odebrán zvýšený proud a oteplování generátoru se tak značně zrychlilo (to je možné vidět na obr. 25 jako skokové nárůsty teploty v zeleném a žlutém průběhu). Když se přírůstek teploty ustálil a rostl dále stabilně se směrnicí přibližně $1,69\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, dalo se předpokládat, že jeho teplota už dál nevzroste o více než $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a měření bylo možno ukončit dříve. Generátor byl v zastaveném stavu ponechán na vzduchu a chlazen byl jen přirozenou konvekcí.



Obr. 25: Oteplovací charakteristika

4.3 Výpočet účinnosti stroje

Z dat, která byla naměřena, lze dále vypočítat reálnou účinnost jak celé sestavy, tak i samotného generátoru při dlouhodobém provozu. Díky momentovému senzoru víme, jaký moment byl naměřen na hřídeli pohonného motoru. Z technické dokumentace momentového

senzoru typu T20WN bylo zjištěno, že jeho napěťová konstanta je 20 Nm / V. Z obr. 26 je možné vyčíst napětí na momentovém senzoru (světle modrý průběh) o velikosti 1,44 V, toto napětí U_m odpovídá momentu na první hřídeli (k je napěťová konstanta):

$$M_1 = U_m \cdot k = 1,44 \cdot 20 = 28,8 \text{ Nm} \quad (17)$$

Pohonná hřídel s momentem M_1 je spojena přes řetězový převod 55/13 s poháněnou hřídelí generátoru. Převodový poměr můžeme spočítat jako podíl počtu zubů ozubeného kola na poháněné straně z_2 a počtu zubů na pohonné straně z_1 :

$$i_{1,2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{13}{55} = 0,236 \quad (18)$$

Přenásobením momentu na pohonné hřídeli převodovým poměrem získáme moment na poháněné hřídeli:

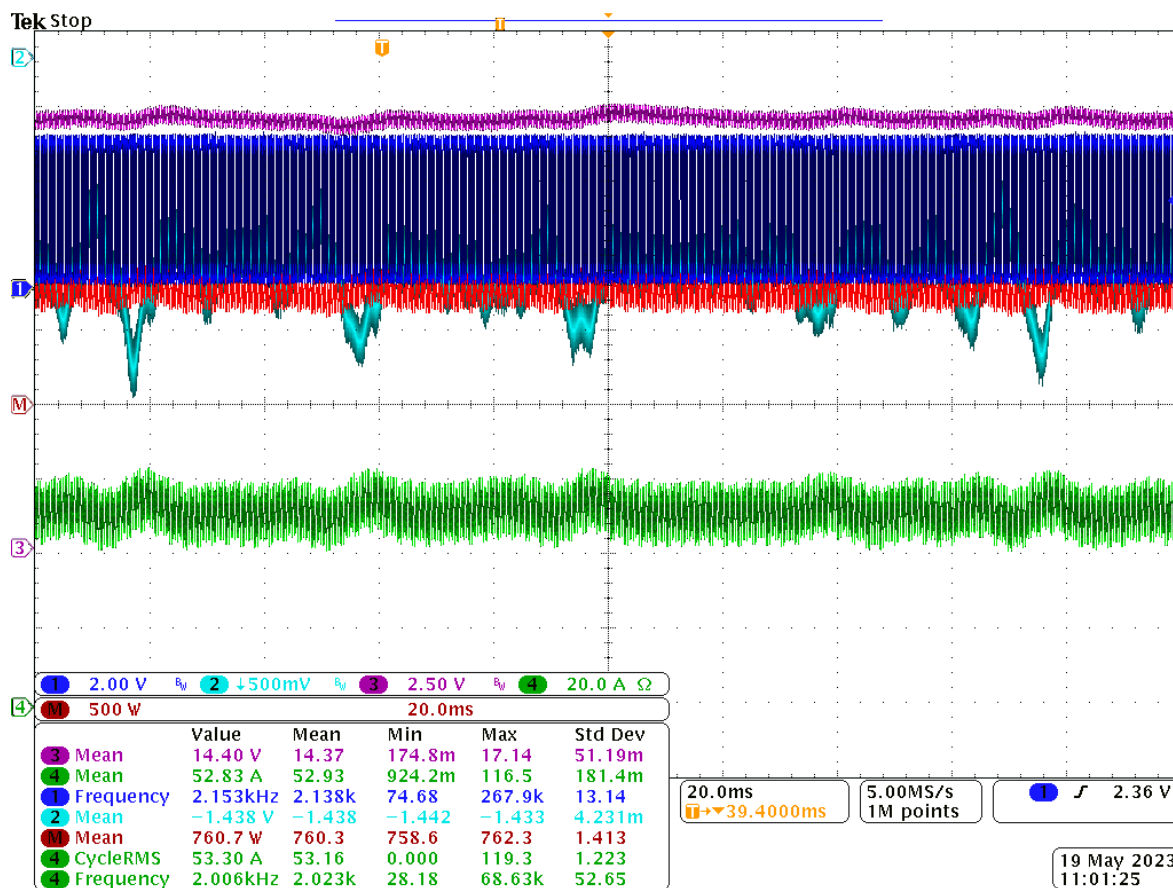
$$M_2 = M_1 \cdot i_{1,2} = 28,8 \cdot 0,236 = 6,81 \text{ Nm} \quad (19)$$

Otáčky generátoru se vypočítají podle následujícího vzorce:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 200}{8} = 1500 \text{ ot/min} \quad (20)$$

Vstupní výkon generátoru se potom vypočítá takto:

$$P_{IN} = M_2 \cdot \omega = 6,81 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 1069,3 \text{ W} \quad (21)$$



Obr. 26: Snímek z osciloskopu z oteplovací zkoušky

Na celé sestavě také došlo k několika ztrátám. Určité ztráty nebudou pro účel zkrácení celého výpočtu počítány, jelikož nejsou v porovnání s ostatními ztrátami tak významné. Jsou to všechny přídavné ztráty, které již byly zmíněny v kapitole 1.2.4.

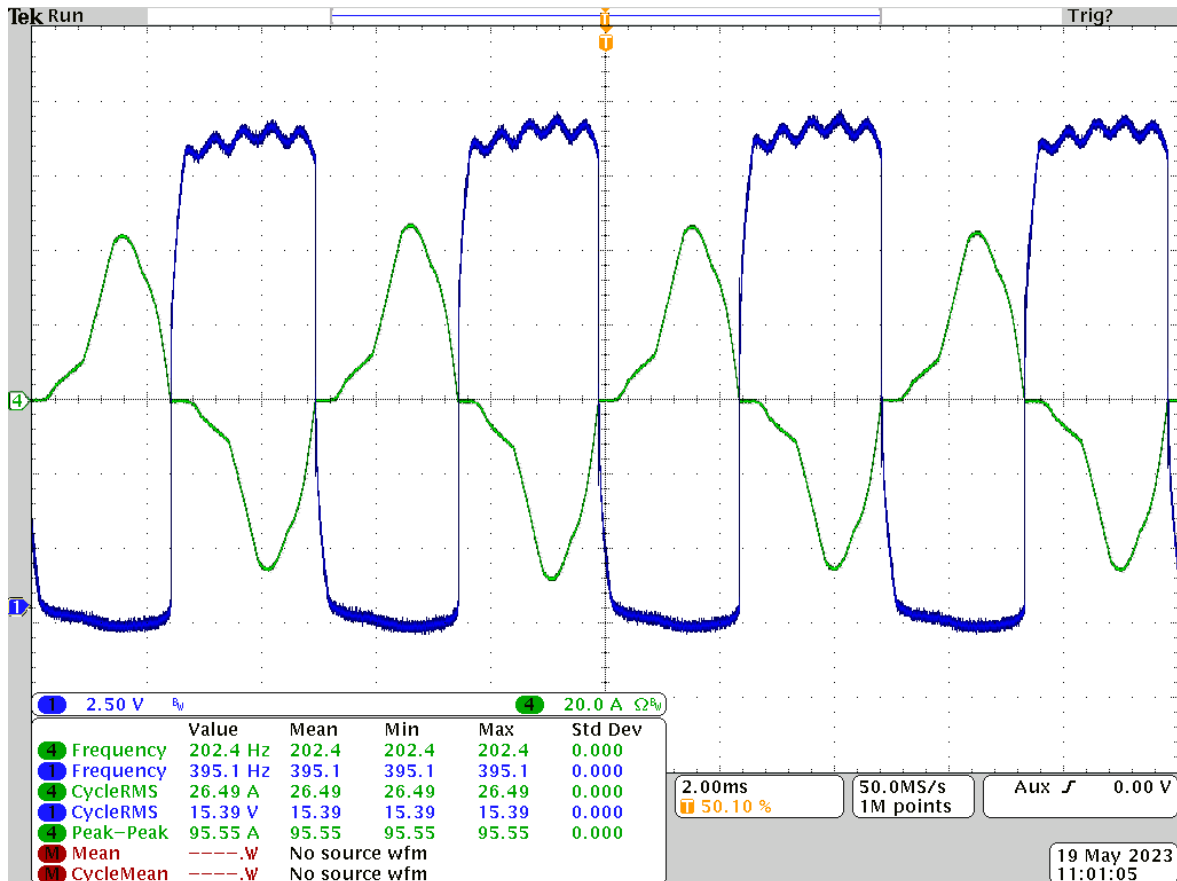
První ztráty, které je potřeba vyčíslit, jsou Joulovy ztráty ve vinutí motoru. Ty se dají vyjádřit pomocí vzorce (1). Jak už bylo zmíněno v kapitole 1.2.1, je nutné dopočítat ekvivalentní odpor pro teplotu, kterou v době měření vinutí mělo. Odpor vinutí při pokojové teplotě byl změřen v kapitole 3.3 (zde označen R_0). Z měření teploty vyčteme hodnotu teploty vinutí: 124,1 °C. Odpor vinutí při této teplotě vypočítáme podle vzorce (2) uvedeného v teoretickém úvodu:

$$R_{ekv} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = 0,0274 \cdot (1 + 0,00392 \cdot 102,4) = 0,0384 \Omega \quad (22)$$

Hodnotu tohoto ekvivalentního odporu je možné následně dosadit do vzorce pro výpočet Joulových ztrát (fázový proud I_f odečteme ze snímku z osciloskopu na obr. 27 (zelený průběh)):

$$\Delta P_j = m \cdot R_{ekv} \cdot I_f^2 = 5 \cdot 0,0382 \cdot 26,5^2 = 134,7 \text{ W}$$

(23)



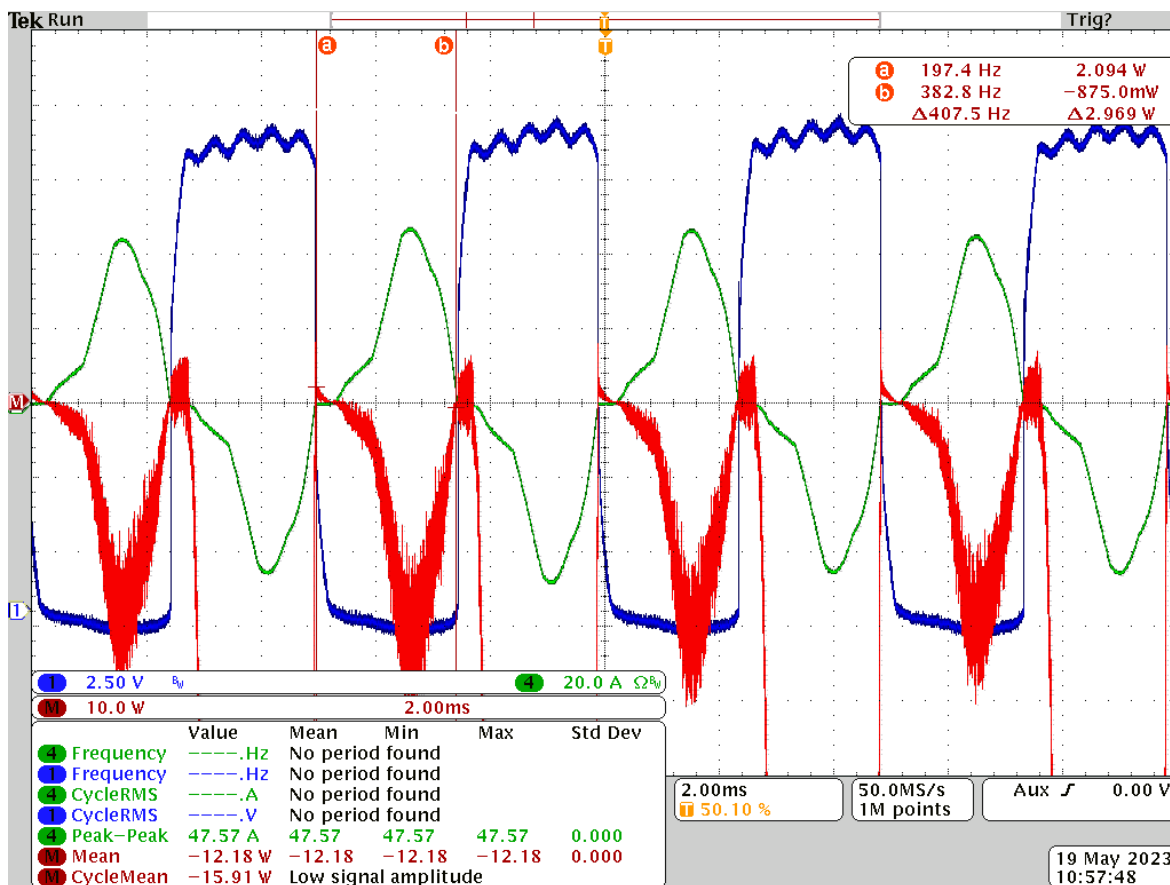
Obr. 27: Snímek z osciloskopu z oteplovací zkoušky: fázový proud (zeleně) a fázové napětí (modře) generátoru

Joulový ztráty nezahřátého vinutí by pro porovnání činily přibližně 96,1 W, tudíž zahřátím vinutí na teplotu 124,1 °C vznikla ztráta přibližně 38,6 W.

Další ztráty, ke kterým na celé sestavě došlo, jsou ztráty na usměrňovači. Každá fáze byla připojena ke dvěma diodám, celkem se tedy v obvodu projevuje 10 diod. Úbytek na jedné diodě ΔP_D je zobrazen na obr. 28. Úbytek na 10 diodách bude potom takový:

$$\Delta P_{D10} = 10 \cdot \Delta P_D = 10 \cdot 12,2 = 122 \text{ W}$$

(24)



Obr. 28: Snímek z osciloskopu, červený průběh značí ztráty na jedné diodě

Největší část výkonu ale byla spotřebována přístrojem Delta Elektronika SM70 – CP-450 – sloužil jako zátěž. Spotřebovaný výkon P_{OUT} lze vidět v grafu na obr. 26 (červený průběh). Jeho hodnota je 761 W. P_{OUT} představuje výstupní výkon, který je sestava schopná poskytnout. Podílem tohoto výstupního výkonu P_{OUT} a celkového vstupního výkonu P_{IN} jsme schopni určit účinnost celé této sestavy:

$$\eta_g = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{761}{1069,3} = 0,712 = 71,2\%$$

(25)

Pokud bychom chtěli počítat účinnost samotného generátoru, museli bychom do výstupního výkonu zahrnout i ztráty v usměrňovači vypočtené výše. Výpočet by pak vypadal takto:

$$\eta_m = \frac{P_{OUT} + \Delta P_{D10}}{P_{IN}} = \frac{761 + 122}{1069,3} = 0,826 = 82,6\%$$

(26)

V celém procesu této oteplovací zkoušky by se našlo několik míst, kde by se dala účinnost zlepšit, například si lze všimnout poklesu účinnosti jen samotným přidáním usměrňovače. Účinnost by se tak dala zvýšit například efektivnějším usměrněním, nebo případně lepším chlazením generátoru pro snížení Joulových ztrát. Elektromechanické přeměny obecně nepatří zrovna k nejúčinnějším energetickým přeměnám, takže je účinnost sestavy 71,2 % poměrně uspokojivá a očekávaná hodnota. Účinnost samotného generátoru 82,6 % se dá považovat za velmi dobrou účinnost v porovnání například s účinností asynchronních motorů.

Zhodnocení a závěr

Tato práce měla za úkol shromáždit základní teoretické informace o BLDC motorech a naznačit možný způsob zařazení elektromotorů do kategorií, a mimo jiné správně zařadit i BLDC motory do některé z této kategorií. Dále byla v této práci rozebrána topologie BLDC pohonu, jeho části a náležitosti pracovního stanoviště. Na závěr první kapitoly byly uvedeny ztráty, k jakým může za chodu motoru docházet.

V druhé kapitole byl úspěšně změřen třífázový generátor, a byly ověřeny parametry náhradního schématu, které odpovídají parametrům uváděným v technické dokumentaci, tyto parametry jsou tedy opravdu dosažitelné a reálné.

Ve třetí kapitole byl změřen neznámý vícefázový generátor a v průběhu měření bylo ověřeno, že se jedná o pětifázový BLDC motor, byly opět změřeny jeho charakteristiky a vypočítány parametry, které řádově odpovídají předpokládaným výsledkům. Tento fakt potvrzuje, že je touto metodikou opravdu možné změřit téměř libovolný BLDC motor a takto ho identifikovat.

V následující kapitole byla na tomto generátoru provedena oteplovací zkouška, která měla za výsledek změřit trvalý výkon, který dokáže generátor dodávat. Za předpokladu, že při zkoušce bylo dosaženo ustáleného stavu, můžeme říct, že je sestava schopna dodávat trvalý výkon s výslednou účinností 71,2 %. Samotný generátor potom pracuje s účinností 82,6 %.

Závěrem je důležité podotknout, že výhody vícefázových BLDC motorů velmi silně převyšují jejich nevýhody, které se týkají zejména nákladů na výrobu těchto motorů a příslušenství k nim. Jak bylo v předchozím textu uvedeno, díky chybějícímu komutátoru se diametrálně snížily nároky na údržbu těchto motorů, což dává těmto motorům i ekonomickou výhodu. Přerušování výroby ve velkých firmách je též velmi nákladné a nežádoucí, jsou-li tedy vícefázové BLDC motory schopny zajistit odolnost soustrojí proti výpadku jedné, případně i více fází, jejich ekonomický význam tím výrazně stoupá a v dlouhodobém měřítku se může investice do sice dražší, ale mnohem spolehlivější techniky, velmi vyplatit.

Literatura

- [1] ... BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-332-9.
- [2] ... BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-509-0.
- [3] ... E. Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 5, pp. 1893-1909, May 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.918488.
- [4] ... Malé stejnosměrné motory, [online]. URL: http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf (květen 2023)
- [5] ... 4,5 μ A Li-Ion Battery protection circuit, [online]. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/battery-protection-circuit.html>
- [6] ... STEJSKAL, M. Měření tepelné odezvy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [7] ... SKALICKÝ, Martin. Zpracování teplotního modelu synchronního stroje s PM v prostředí MATLAB [online]. Plzeň, 2018 [cit. 2023-05-23]. Available from: <https://theses.cz/id/qjg4sy/>. Bachelor's thesis. University of West Bohemia, Faculty of Electrical Engineering. Thesis supervisor Ing. Lukáš Veg.
- [8] ... Ztráty v transformátoru, [online]. URL: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/ztraty-v-transformatoru>

Seznam obrázků

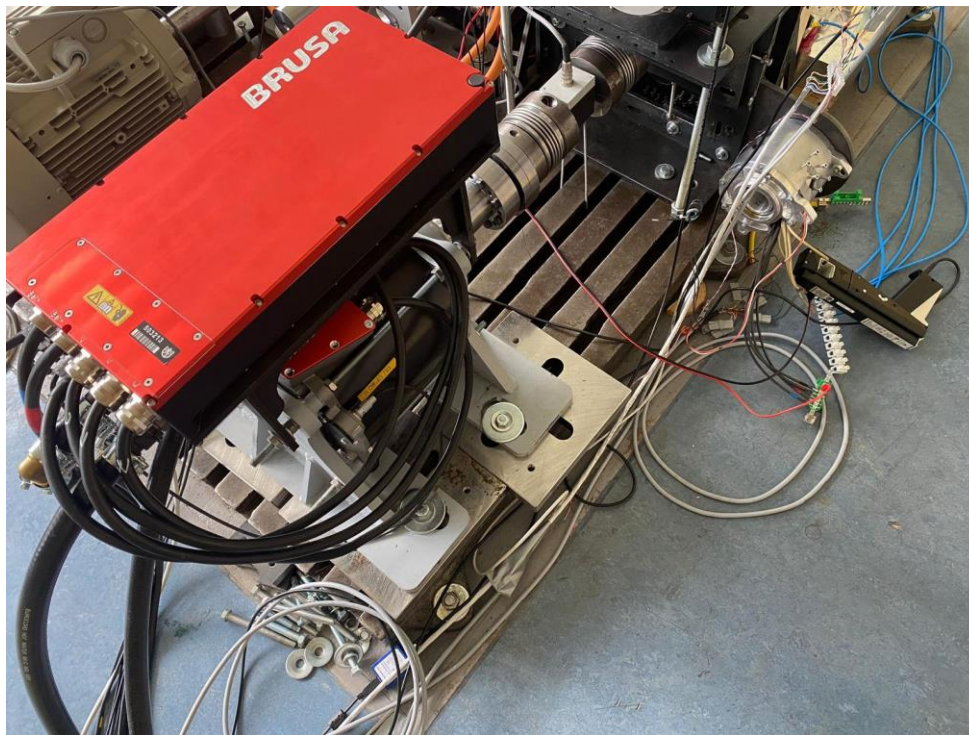
Obr. 1: Schéma rozdělení elektromotorů.....	- 2 -
Obr. 2: Diagram výstupních signálů z Hall senzoru a jejich umístění u rotoru.	- 4 -
Obr. 3: Schéma zapojení H-můstku.....	- 4 -
Obr. 4: Schéma ochranného obvodu v Li-ionovém akumulátoru	- 5 -
Obr. 5: Model soustrojí.....	- 8 -
Obr. 6: Blokové schéma měřicího stanoviště	- 8 -
Obr. 7: Foto měřicího stanoviště	- 9 -
Obr. 8: Schéma měření naprázdno	- 10 -
Obr. 9: Snímek z osciloskopu z měření naprázdno při $f = 97$ Hz.....	- 11 -
Obr. 10: Charakteristika naprázdno.....	- 11 -
Obr. 11: Schéma měření nakrátko	- 12 -
Obr. 12: Snímek z osciloskopu z měření nakrátko (rozběh generátoru)	- 12 -
Obr. 13: Náhradní schéma synchronního stroje (převzato z [1])	- 13 -
Obr. 14: Změřená charakteristika proudu nakrátko (snímek z osciloskopu).....	- 13 -
Obr. 15: Teoretický průběh proudu nakrátko	- 15 -
Obr. 16: Průběh chyby měření indukčnosti při zanedbání odporu	- 16 -
Obr. 17: Blokové schéma zapojení vícefázového generátoru	- 18 -
Obr. 18: Charakteristika naprázdno.....	- 19 -
Obr. 19: Snímek z osciloskopu z měření naprázdno při $f=99$ Hz.....	- 19 -
Obr. 20: Teoretický průběh proudu nakrátko	- 20 -
Obr. 21: Snímek z osciloskopu z měření nakrátko při $f = 117$ Hz	- 20 -
Obr. 22: Průběh chyby výpočtu indukčnosti při zanedbání odporu.....	- 22 -
Obr. 23: Momentová a výkonová char. vícefázového generátoru ($n = 1500$ ot / min) ..	- 23 -
Obr. 24: Blokové schéma zapojení při oteplovací zkoušce	- 24 -
Obr. 25: Oteplovací charakteristika.....	- 25 -
Obr. 26: Snímek z osciloskopu z oteplovací zkoušky	- 27 -
Obr. 27: Snímek z osciloskopu z oteplovací zkoušky generátoru.....	- 28 -
Obr. 28: Snímek z osciloskopu, červený průběh značí ztráty na jedné diodě	- 29 -
Obr. 29: Fotografie celé sestavy seshora	- 35 -
Obr. 30: Fotografie celé sestavy z boku	- 35 -
Obr. 31: Fotografie usměrňovače a zdroje Delta.....	- 36 -

Seznam tabulek

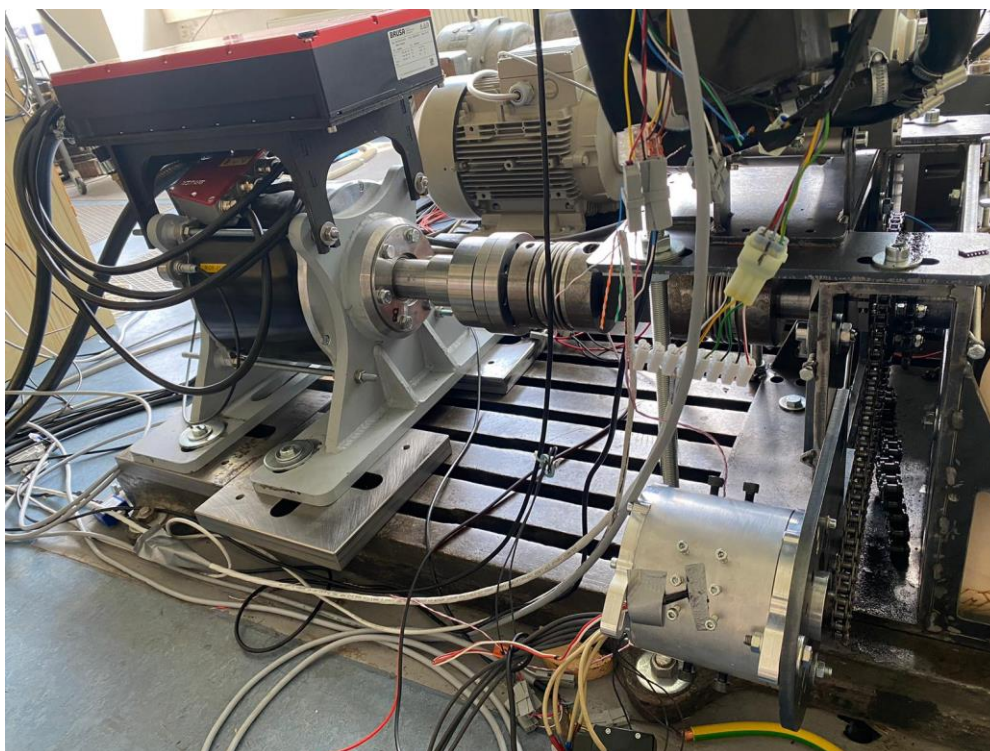
Tabulka 1: Štítkové hodnoty asynchronního motoru	9
Tabulka 2: Štítkové hodnoty BLDC motoru	9
Tabulka 3: Naměřené hodnoty odporu vinutí.....	10
Tabulka 4: Naměřené a vypočtené hodnoty pro pracovní bod 59,25 Hz	14
Tabulka 5: Štítkové hodnoty pohonného HSM motoru.....	18
Tabulka 6: Naměřené hodnoty odporu vinutí.....	18
Tabulka 7: Naměřené a vypočítané hodnoty pro pracovní bod $f = 268$ Hz.....	21

Přílohy

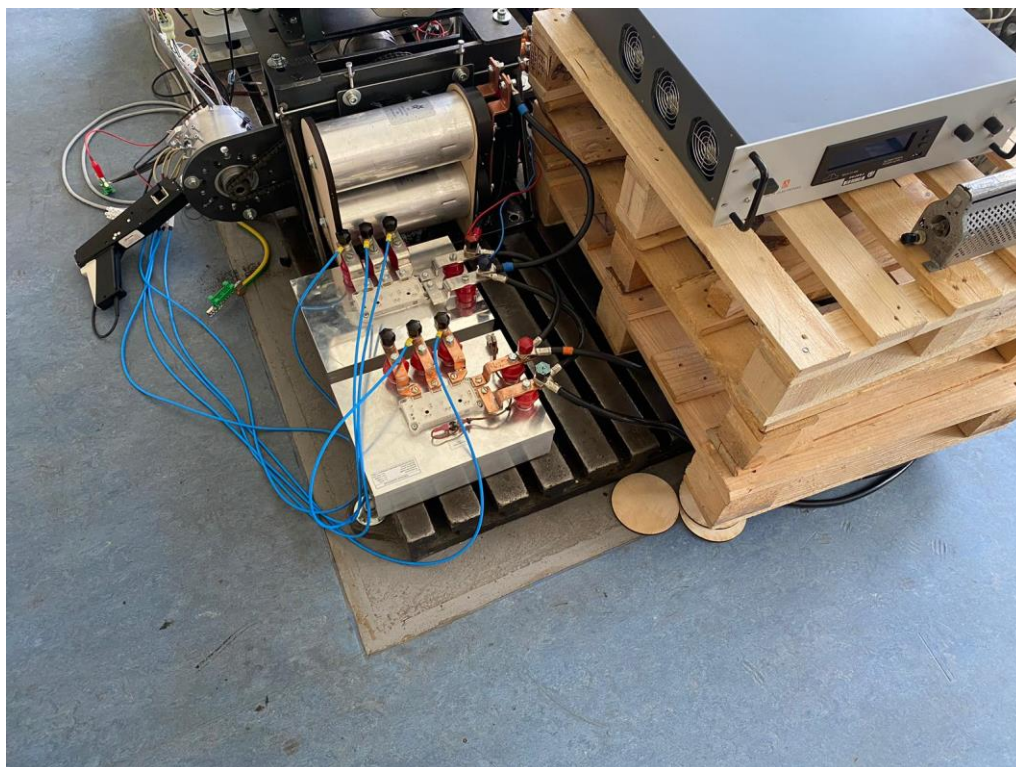
Příloha 1: Fotografie z měřicího stanoviště z měření vícefázového generátoru



Obr. 29: Fotografie celé sestavy seshora



Obr. 30: Fotografie celé sestavy z boku



Obr. 31: Fotografie usměrňovače a zdroje Delta