



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

IDENTIFIKACE PARAMETRŮ NÁHRADNÍCH ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

PARAMETER IDENTIFICATION OF INDUCTION MOTOR EQUIVALENT CIRCUITS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Oleksii Karpenko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Toman

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Oleksii Karpenko

ID: 230381

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Identifikace parametrů náhradních zapojení asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s běžně užívanými náhradními zapojeními asynchronního motoru.
2. Nastudujte a popište různé metody experimentální identifikace parametrů náhradních zapojení asynchronního motoru. Zaměřte se na náhradní zapojení ve tvaru T-článku a ve tvaru Gama-článku. Dále se zaměřte jak na metody zajišťující identifikaci konstantních parametrů, tak na metody zajišťující identifikaci proměnných parametrů náhradního zapojení.
3. Pomocí nastudovaných metod proveďte experimentální identifikaci parametrů na reálném vzorku asynchronního motoru.
4. Použité metody porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Std 112-2017 (Revision of IEEE Std 112-2004), 2018.
- [2] ČSN EN 60034-2-1 Točivé elektrické stroje: Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla). Ed. 2. 2015.
- [3] Měřička Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. Elektrické stroje, Praha, ČVUT, 2000.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

V rámci řízení asynchronního motoru je důležité s co největší přesností určit parametry jeho náhradního zapojení. Tato práce se zaměřuje na identifikaci těchto parametrů různými metodami, které jsou reprezentovány ve tvaru Γ -článku a T-článku. Bakalářská práce je celkem rozdělena do pěti částí. První část se zaměřuje na teorii asynchronního motoru, jeho využití, rozdělení a vlastnosti. Druhá část se zabývá náhradními zapojeními asynchronního motoru, jejich specifiky a možnost jejich přepočtu. Třetí kapitola se zaměřuje na teoretické postupy identifikace parametrů pomocí různých metod a také na teorii zkoušek motoru. V posledních dvou kapitolách jsou teoretické poznatky z předchozích částí experimentálně ověřovány na reálném vzorku motoru. Následně byly porovnaný mezi sebou výsledky získané různými metodami.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asynchronní motor; identifikace parametrů; náhradní zapojení; T-článek; Γ -článek; $i\Gamma$ -článek; zkouška naprázdno; zkouška nakrátko, spřažený tok, experimentální identifikace

ABSTRACT

In the control of an asynchronous motor, it is important to determine the parameters of its replacement connection with the greatest accuracy. This work focuses on the identification of these parameters by various methods, which are represented in the form of a Γ -network and a T-network. The bachelor thesis is divided into five parts. The first part focuses on the theory of the asynchronous motor, its use, distribution and properties. The second part deals with replacement connections of the asynchronous motor, their specifics and the possibility of its conversion. The third chapter focuses on the theoretical procedures of parameter identification using various methods as well as the theory of engine tests. In the last two chapters, the theoretical findings from the previous parts are experimentally verified on a real engine sample. Subsequently, the results obtained by different methods were compared with each other.

KEYWORDS

Asynchronous motor, parameter identification, equivalent circuit, T-network, Γ -network, $i\Gamma$ -network, no-load test, short-circuit test, coupled flow, experimental identification

KARPENKO, Oleksii. *Identifikace parametrů malého asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 68 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Oleksii Karpenko
VUT ID autora: 230381
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Identifikace parametrů malého asyn-
chronního motoru

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Marku Tomanovi , za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
Cíle práce	12
1 Asynchronní motor	13
1.1 Význam a použití asynchronních strojů	13
1.2 Konstrukce	13
1.3 Princip činnosti	14
1.4 Rozdělení asynchronních motorů	15
2 Nahradní zapojení asynchronního motoru	16
2.1 T-článek a jeho vlastnosti	16
2.2 Γ -článek a jeho vlastnosti	17
2.3 Υ -článek a jeho vlastnosti	18
2.4 Přepočítání parametrů náhradních zapojení asynchronního zapojení	18
2.4.1 Přepočítání T-článku na Γ -článek	18
2.4.2 Přepočítání Γ -článku na T-článek	19
2.4.3 Přepočítání T-článku na Υ -článek	19
2.4.4 Přepočítání Υ -článku na T-článek	20
3 Metody identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru	21
3.1 Stav naprázdno	21
3.2 Stav nakrátko	21
3.3 Stav při jmenovitém zatížení	23
3.4 Měření odporu na statoru	23
3.5 Identifikace parametrů asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku	24
3.5.1 Identifikaci parametrů zpřesněného náhradního zapojení ze zkoušky naprázdno	24
3.5.2 Identifikace a závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na různých veličinách	24
3.5.3 Identifikace a závislost magnetizační indukčnosti na různých veličinách	26
3.5.4 Zkouška při jmenovitém zatížení	27
3.6 Klasický postup identifikace parametrů asynchronního motoru ve tvaru T-článku	28
3.6.1 Zkouška naprázdno	28
3.6.2 Zkouška nakrátko	28

3.7	Identifikace parametrů asynchronního motoru podle normy IEEE . . .	29
3.8	Identifikace parametrů asynchronního motoru podle normy IEEE 2 . . .	30
3.8.1	Korekce odporu podle teploty	34
3.8.2	Skluž	34
3.8.3	Korekce sklužu podle teploty	35
3.9	Účinník	35
3.10	Účinnost	35
4	Průběh zkoušek motoru a jejich závislosti na různých parametrech	37
4.1	Parametry analyzovaného asynchronního motoru	37
4.2	Identifikace odporu statorového vinutí	38
4.3	Zkouška naprázdno	39
4.3.1	Popis měřicího pracoviště a způsobu provádění experimentů	39
4.3.2	Identifikace mechanických ztrát a ztrát v železe	44
4.3.3	Identifikace odporu reprezentujícího ztráty v železe	48
4.3.4	Identifikace magnetizační indukčnosti	49
4.4	Zkouška nakrátko	51
4.5	Zkouška při zatížení	52
5	Experimentální identifikace parametrů asynchronního motoru	55
5.1	Klasická metoda identifikace parametrů T-článku	55
5.2	Identifikace parametrů asynchronního motoru podle normy IEEE	57
5.3	Identifikace parametrů pro Γ -článek	59
5.4	Porovnání identifikovaných hodnot asynchronního motoru pomocí různých metod	61
	Závěr	63
	Literatura	64
	Seznam symbolů a zkratk	66

Seznam obrázků

1.1	Konstrukce asynchronního motoru.	14
2.1	Nahradní zapojení ve tvaru T-článku.	16
2.2	Nahradní zapojení ve tvaru Γ -článku.	17
2.3	Nahradní zapojení ve tvaru $i\Gamma$ -článku.	18
3.1	Průběh veličin naprázdno a rozdělení ztrát naprázdno. [10]	22
3.2	Průběh veličin nakrátko při uzavřených drážkách rotoru. [10]	23
3.3	Náhradní zapojení AM zohledňující změnu R_{Fe} a $L_{\mu,T}$ na výbraných veličinách.	24
3.4	Teoretická závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na statorovém kmitočtu a spřaženém toku.	26
3.5	Celková reaktance na fázi.	31
4.1	Štítek asynchronního motoru.	38
4.2	Závislost napětí na spřaženém toku.	41
4.3	Závislost proudu na spřaženém toku.	41
4.4	Závislost příkonu na spřaženém toku.	42
4.5	Závislost účinníku na spřaženém toku.	42
4.6	Závislost statorového odporu na spřaženém toku.	43
4.7	Závislost teploty vinutí na spřaženém toku.	43
4.8	Závislost součtu mechanických ztrát a ztrát v železe na napětí pro 60 Hz	45
4.9	Srovnání měřených hodnot součtu mechanických ztrát a ztrát v železe s jejich výpočítanými hodnotami	47
4.10	Závislost mechanických ztrát na otáčkách při použití různých postupů	47
4.11	Závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na spřaženém toku a kmitočtu	49
4.12	Závislost magnetizační indukčnosti na spřaženém toku	50
4.13	Závislost magnetizační indukčnosti na spřaženém toku a kmitočtu	51
4.14	Závislost rozptylové indukčnosti na čase	52
4.15	Závislost magnetizační indukčnosti na čase	53
4.16	Závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na čase	53
4.17	Závislost rotorového odporu na čase	54

Seznam tabulek

4.1	Parametry asynchronního motoru	37
4.2	Odpory každé fázi a mezi jednotlivými fázovými vodiči	38
4.3	Odpor statorového vinutí	38
4.4	Výsledné hodnoty identifikovaných koeficientů.	46
4.5	Koeficienty polynomu pro výpočet závislosti magnetizační indukčnosti na spřaženém toku.	51
5.1	Naměřené hodnoty ze zkoušky naprázdno a zkoušky nakrátko nejvíc odpovídající hodnotám jmenovitého proudu.	55
5.2	Výsledné hodnoty identifikované klasickým postupem pro nahradní zapojení ve tvaru T-článku	56
5.3	Naměřené hodnoty ze zkoušky naprázdno a zkoušky nakrátko nejvíc odpovídající hodnotám jmenovitého proudu při různých frekvencích	57
5.4	Výsledné hodnoty identifikované pro nahradní zapojení ve tvaru T-článku metodou stanovenou normou IEEE	59
5.5	Výsledné hodnoty identifikované pro nahradní zapojení ve tvaru Γ -článku	61
5.6	Porovnání hodnot identifikovaných různými metodami	62

Úvod

Nejúčinnějším zařízením, které přeměňuje elektrickou energii na mechanickou energii, je asynchronní motor. Někdy v literatuře uváděn jako indukční motor. Je to dáno jeho jednoduchou konstrukcí, poměrně nízkými náklady na výrobu a tím, že roztáčí se bez dalších pomůcek. Obecně asynchronní motor se skládá z pevného statoru a pohyblivého rotoru. Asynchronní motor se používá v nejrůznějších průmyslových odvětvích a každý den se pouze zvyšuje oblast jeho použití. Používají se především jako čerpadla, kompresory, ventilátory, jeřáby, výtahy či stavební zařízení. Z toho důvodu, dneska je velký požadavek na cojnepřesnější identifikaci parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru. Cílem bakalařské práce je nastudovat pokročilé metody identifikace parametrů náhradního zapojení ve tvaru T-članku, Γ -članku a pak je aplikovat na reálnem vzorku motoru.

Cíle práce

Cílem bakalařské práce je seznámit se s běžně užívanými náhradními zapojeními asynchronního motoru, nastudovat základní metody identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru a následně provést rešerši v oblasti pokročilejších metod identifikace parametrů náhradního zapojení. Nastudované metody experimentálně ověřit v praxi a vybrat vhodnější pro co nejpřesnější identifikaci.

1 Asynchronní motor

Asynchronní stroj patří do velké skupiny elektrických strojů, umožňující elektro-mechanickou přeměnu energie. Dělíme je na motory, u nichž dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou a generátory, které mění mechanickou energii na elektrickou. Asynchronní stroje se používají téměř výhradně jako motory s výstupním mechanickým pohybem otáčivým nebo lineárním. [1]

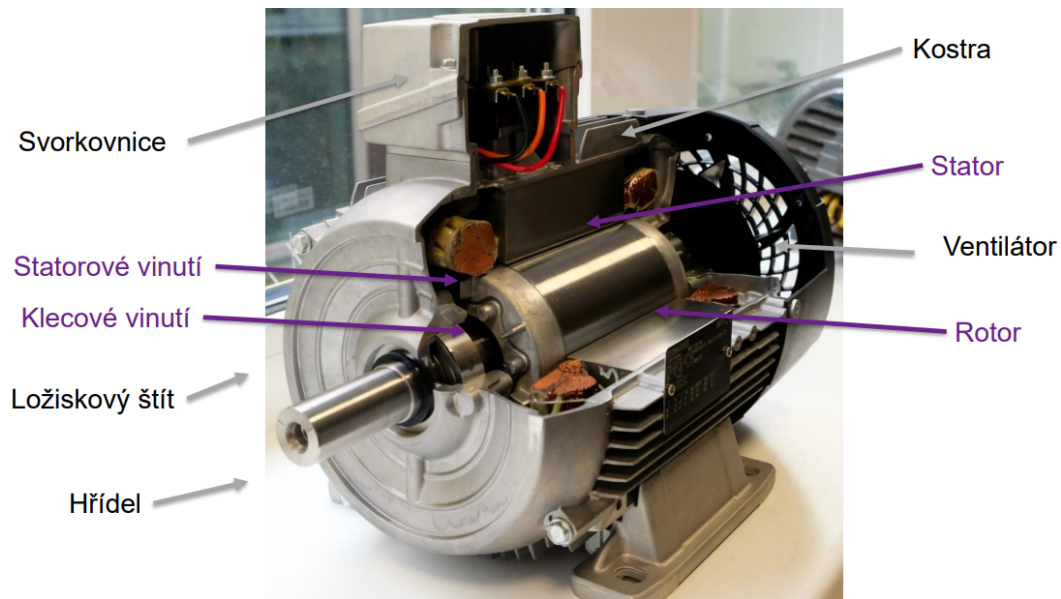
1.1 Význam a použití asynchronních strojů

Asynchronní motor je nejrozšířenějším typem elektrického stroje. Pro svou jednoduchost, levnou údržbu, relativně dobrou provozní spolehlivost a nízkou pořizovací cenu jsou asynchronní motory široce využívány. K jejímu růstu přispívá také rozšířené používání střídavých třífázových sítí pro rozvod elektrické energie. Výkonový rozsah vyráběných asynchronních motorů je široký a pohybuje se od několika wattů až po několik desítek megawattů. AM získává svou sílu k napájení nejběžnějších gadgetů i těch, které v dnešní době vyžadují regulaci rychlosti. Příklady jsou ventilátory, čerpadla, pračky, kompresory, stavební zařízení, výtahy, jeřáby, některé obráběcí stroje, pohony dopravníků a tak dále. K nevýhodám asynchronních motorů patří zvláště odběr jalové energie z napájecí sítě, kterou tyto stroje ke své činnosti vyžadují. Obtížná regulace otáček a velké proudové špičky při rozběhu jsou v literatuře často zmiňovány jako významné nevýhody asynchronních motorů. Důkazem použitelnosti asynchronních motorů pro regulované pohony je jejich současná aplikace v pohonech elektrických lokomotiv. Asynchronní motory v regulovaných pohonech postupně vytlačují z této oblasti stejnosměrné motory. V menší míře se používají rovněž asynchronní generátory např. pro malé vodní elektrárny, větrné elektrárny apod. Asynchronní stroj je elektrický stroj, který je schopný pracovat jak jako motor, tak jako generátor. Jeho přechod z jednoho stavu do druhého je plynulý. Například při pohonu zdvihu jeřábu funguje asynchronní stroj jako motor při zvedání břemene a při spouštění břemene se přepíná do generátorického režimu. Kromě toho mají asynchronní stroje ještě třetí pracovní oblast, a to oblast indukční brzdy. V této oblasti rotor otáčí proti směru točivého magnetického pole statoru, což vytváří brzdny moment.[2]

1.2 Konstrukce

Každý trojfázový asynchronní motor je složen ze dvou hlavních částí, viz Obr(1.1)

- **Stator** – netočivá část elektrického stroje, která tvoří část magnetického obvodu a v níž je uloženo vinutí statoru. Elektrotechnické plechy jsou připevněny



Obr. 1.1: Konstrukce asynchronního motoru.

na kostře motoru. Na vnitřní straně těchto plechů jsou drážky sloužící k uchycení statorového vinutí. Drážky rozdělujeme na otevřené a polootevřené.

- **Rotor** – otáčivá část asynchronního stroje. Rotorové plechy jsou nalisovány na hřídeli. Do těchto plechů vloženo klecové vinutí, tzv. s kotvou nakrátko.

1.3 Princip činnosti

Princip činnosti asynchronního elektromotoru je obsažen v jeho názvu (není synchronní). To znamená, že stator a rotor při zapnutí vytvářejí magnetická pole rostoucí s různou frekvencí. V tomto případě je rychlost otáčení magnetického pole rotoru vždy menší než rychlost otáčení magnetického pole statoru. Pro jasnější představu, při pohybu permanentního magnetu kolem své osy poblíž měděného disku, se disk začne s malým zpožděním otáčet za magnetem. Faktem je, že při otáčení magnetu jsou ve struktuře disku excitovány indukční proudy pohybující se v uzavřeném kruhu. Jsou to v podstatě zkratové proudy, které ohřívají kov. V disku „vzniká“ vlastní magnetické pole, které dále interaguje s polem magnetu.

Princip činnosti AM je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole vytvořeného proudem tekoucím ve vinutí statoru a indukovaných proudů ve vodičích rotoru tímto magnetickým polem. AM je tedy založen na indukci napětí a proudů v rotoru, a proto se také často nazývá **indukčním motorem**.

Vzhledem k tomu, že proud v rotoru je indukován bezkontaktně, není nutné instalovat posuvné kontakty, což činí asynchronní motory spolehlivějšími a účinnějšími.

Změnou směru proudu v jednom z vinutí (k tomu se musí změnit fáze na svorkách) může motor „vynutit“, aby se otáčel jedním nebo druhým směrem.

Rychlost otáčení magnetického pole statoru je ovlivněna frekvencí napájecí sítě a počtem pólových dvojic. Protože počet pólových dvojic závisí na typu motoru a nemění se, pro změnu otáček pole se mění frekvence napájecí sítě pomocí převodníku.

1.4 Rozdělení asynchronních motorů

Asynchronní motor se klasifikuje podle statorového nebo rotorového vinutí. Podle statorového vinutí se asynchronní motory dělí na:

Podle statorového vinutí asynchronní motor dělíme na:

- Jednofázový
- Trojfázový

Podle rotorového vinutí se asynchronní motory dělí na:

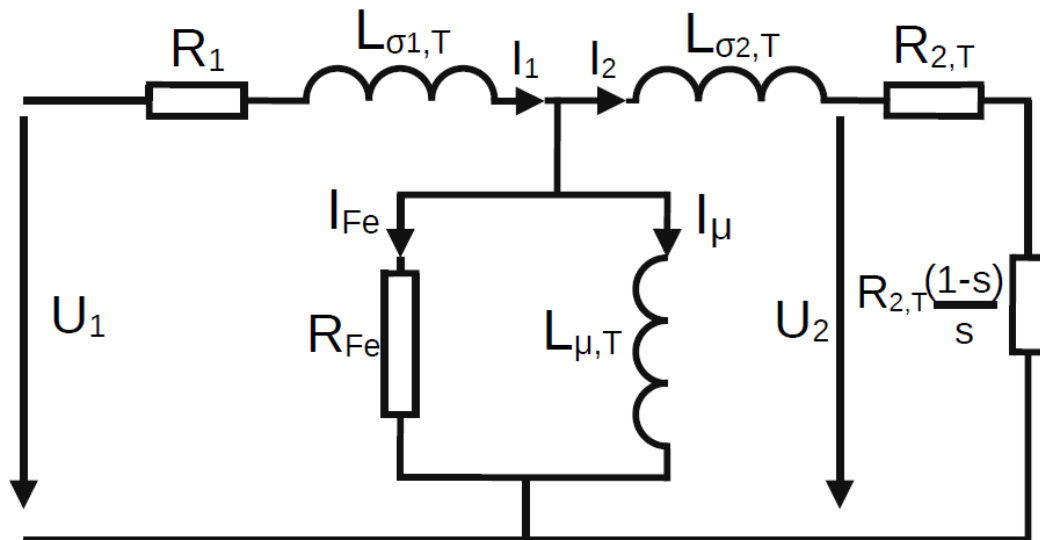
- *Kotva nakrátko* – má rotorové vinutí spojeno trvale nakrátko. Vinutí je zhotoveno z masivních tyčí, spojených po obou stranách vodivými kruhy
- *Kroužková kotva* – v drážkách plechů je uloženo trojfázové vinutí rotoru z izolovaných vodičů, které je zapojeno většinou do hvězdy, zřídka do trojúhelníka. Na hřídeli jsou kromě svazku rotorových plechů i sběrné kroužky.

2 Nahradní zapojení asynchronního motoru

Náhradní zapojení asynchronního motoru je analogické náhradnímu zapojení transformátoru. V praktických výpočtech je místo skutečného indukčního motoru v obvodu nahrazen ekvivalentním obvodem, ve kterém je elektromagnetické zapojení nahrazeno elektrickým připojením při zachování energetických poměrů v indukčním motoru. V tomto případě jsou parametry obvodu rotoru redukovány na parametry obvodu statoru. V této práci budou zmíněna celkem tři náhradní zapojení asynchronního motoru, a to ve tvaru výchozího článku, T-článku, Γ -článku a $i\Gamma$ -článku.

2.1 T-článek a jeho vlastnosti

T-článek indukčních motorů je široce používá se pro výpočty charakteristik a parametrů motoru. Ekvivalentní obvod asynchronního motoru ve tvaru T založený na standardních předpokladech, v rámci teorie elektrických strojů se používá ke zlepšení přesnosti stanovení charakteristických parametrů. Parametry obvodu jsou obvykle určeny ze zkoušky motoru naprázdno a nakrátko, jak je ukázáno v kapitole 3. Předpokládá se, že existuje takový článek ve tvaru T se šesti lineárními odpory a pro toto schéma je možné vypočítat charakteristiky odpovídající požadovanému asynchronnímu motoru. Přesné odvození náhradního zapojení ve tvaru T-článku, Γ -článku a $i\Gamma$ -článku se nachází v [7]. Odvození bylo provedeno pro transformátor, ale může se aplikovat i na zapojení jednofázového asynchronního motoru.



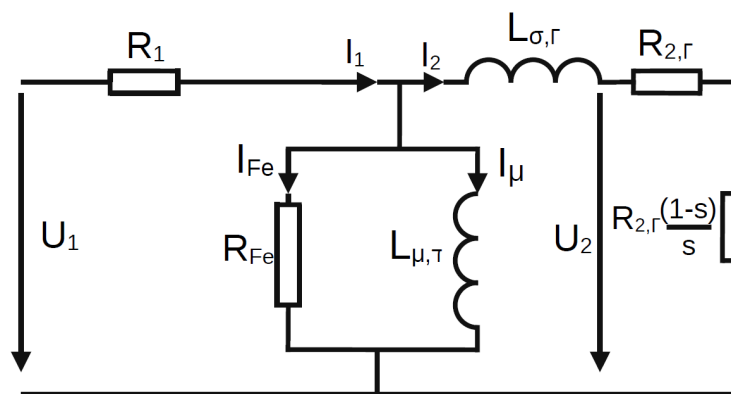
Obr. 2.1: Nahradní zapojení ve tvaru T-článku.

Význam jednotlivých symbolů:

$[U_1]$	fázové napětí	[V]
$[U_2]$	fázové napětí rotoru	[V]
$[I_1]$	statorový proud	[A]
$[I_2]$	rotorový proud	[A]
$[I_\mu]$	magnetizační proud	[A]
$[I_{Fe}]$	proud reprezentující ztráty v železe	[A]
$[R_1]$	odpor statoru	[Ω]
$[R_{2,T}]$	odpor rotoru	[Ω]
$[R_{Fe}]$	odpor reprezentující ztráty v železe	[Ω]
$[L_{\sigma_1,T}]$	reaktance statoru	[Ω]
$[L_{\sigma_2,T}]$	reaktance rotoru	[Ω]

2.2 Γ -článek a jeho vlastnosti

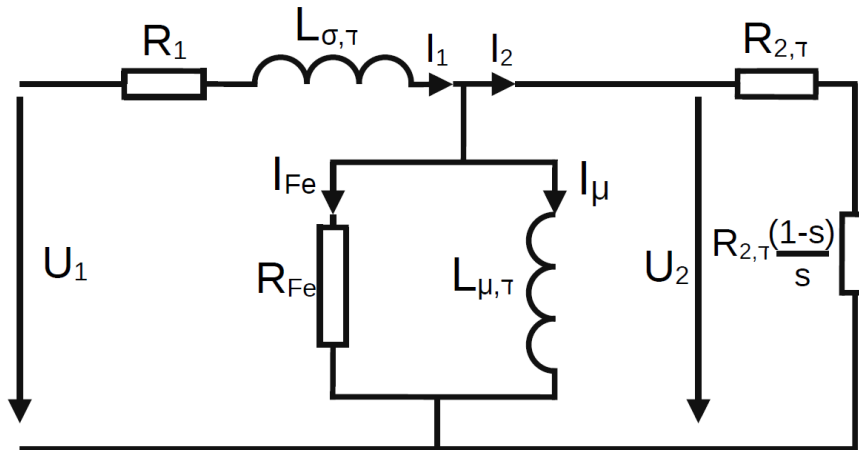
Odvození charakteristik pomocí náhradního zapojení v podobě T-článku, který se používá je příliš složité. Ve výpočtu se vyskytují složité algebraické výrazy. Běžně se tedy postupuje tak, že T-článek bývá nahrazen Γ -článkem. Náhradní zapojení ve tvaru Γ -článku ve srovnání s T-článkem se považuje za zjednodušující, protože se zde vyskytuje jenom jedna rozptylová indukčnost. Ve skutečnosti to tak není, jak je dokázáno v [7]. V [5] a [6] je ukázáno, že v zapojení ve tvaru T-článku je jedna ze dvou rozptylových indukčností je nadbytečná. Z toho plyne, že náhradní zapojení ve tvaru Γ -článku a T-článku jsou plnohodnotné a přesné. V případě Γ -článku je umístěna na sekundární straně rotoru, ovšem ve schématu je přepočtena na stranu primární, tj. na stator.



Obr. 2.2: Nahradní zapojení ve tvaru Γ -článku.

2.3 T-článek a jeho vlastnosti

iΓ-článek taky se považuje za zjednodušující stejně, jako Γ-článek, protože se zde objevuje také jenom jedna rozptylová indukčnost, ale stejně jak pro Γ-článek tomu tak není. V případě náhradního zapojení ve tvaru T-čláku je jediná rozptylová indukčnost umístěna na primární straně ve statoru. Toto zapojení je vhodné použít v případě, že je asynchronní motor napájen zdrojem proudu.



Obr. 2.3: Náhradní zapojení ve tvaru iΓ-čláku.

2.4 Přepočít parametrů náhradních zapojení asynchronního zapojení

2.4.1 Přepočít T-čláku na Γ-článek.

Postup přepočtu náhradních zapojení porovnáním vstupních impedancí, podle [3]:

1. Určit vstupní impedanci T-čláku.
2. Určit vstupní impedanci Γ-čláku.
3. Porovnat vstupní impedance a vyjádřit hledané parametry.

Na začátku se vypočítá vstupní impedance T-čláku podle vzorce:

$$Z_{VST,T} = \frac{p^2(L_{\sigma_1,T}L_{\sigma_2,T} + L_{\sigma_1,T}L_{\mu,T} + L_{\mu,T}L_{\sigma_2,T}) + p(L_{\sigma_1,T}R_{2,T} + L_{\mu,T}R_{2,T})}{p(L_{\sigma_2,T} + L_{\mu,T}) + R_{2,T}} \quad (2.1)$$

Druhým krokem pro porovnání z T-člákem se zjistí vstupní impedance Γ-čláku.

$$Z_{VST,\Gamma} = \frac{p^2L_{\mu,\Gamma}L_{\sigma,\Gamma} + pL_{\mu,i\Gamma}R_{2,\Gamma}}{p(L_{\sigma,\Gamma} + L_{\mu,\Gamma}) + R_{2,\Gamma}} \quad (2.2)$$

Porovnáním pravých stran rovnic 2.1 a 2.2 dostaneme:

$$\begin{aligned} \frac{p^2(L_{\sigma_1,T}L_{\sigma_2,T} + L_{\sigma_1,T}L_{\mu,T} + L_{\mu,T}L_{\sigma_2,T}) + p(L_{\sigma_1,T}R_{2,T} + L_{\mu,T}R_{2,T})}{p(L_{\sigma_2,T} + L_{\mu,T}) + R_{2,T}} &= \\ &= \frac{p^2L_{\mu,\Gamma}L_{\sigma,\Gamma} + pL_{\mu,\Gamma}R_{2,\Gamma}}{p(L_{\sigma,\Gamma} + L_{\mu,\Gamma}) + R_{2,\Gamma}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Pro zjištění hledaných parametrů, se nejdříve odstraní zlomky a rovnice se roznásobí. Po roznásobení se porovnají stejné koeficienty u mocnin p^2 , p^1 , p^0 . Z rovnic se vyjádří přepočtové vztahy pro přepočet T-článku na $i\Gamma$ -článek.

$$L_{\mu,\Gamma} = L_{\sigma_1,T} + L_{\mu,T} \quad (2.4)$$

$$L_{\sigma,\Gamma} = \frac{L_{\sigma_2,T}(L_{\sigma_1,T} + L_{\mu,T})^2 + L_{\sigma_1,T}L_{\mu,T}(L_{\sigma_1,T} + L_{\mu,T})}{L_{\mu,T}^2} \quad (2.5)$$

$$R_{2,\Gamma} = R_{2,T} \frac{(L_{\sigma_1,T} + L_{\mu,T})^2}{L_{\mu,T}^2} \quad (2.6)$$

2.4.2 Přepočet Γ -článku na T-článek

Zpětný přepočet parametrů Γ -článku na T-článek má patrný problém, a to že se musí určit čtyři neznámé parametry $L_{\sigma_1,T}$, $L_{\mu,T}$, $L_{\sigma_2,T}$, $R_{2,T}$. Toho důvodu se musí soustava doplnit o čtvrtou rovnici, jinak bude mít nekonečně mnoho řešení. Za předpokladu symetrického T-článku, tj. při $L_{\sigma_1,T} = L_{\sigma_2,T}$, výsledné vztahy pro přepočet Γ -článku na T-článek mají tvar:

$$L_{\mu,T} = \sqrt{\frac{L_{\mu,\Gamma}^3}{L_{\sigma,\Gamma} + L_{\mu,\Gamma}}} \quad (2.7)$$

$$L_{\sigma_1,T} = L_{\sigma_2,T} = L_{\mu,\Gamma} - L_{\mu,T} \quad (2.8)$$

$$R_{2,T} = R_{2,\Gamma} \frac{L_{\mu,T}^2}{L_{\mu,\Gamma}^2} \quad (2.9)$$

2.4.3 Přepočet T-článku na Γ -článek

Postup výpočtu je stejný jak v kapitole 5.1

Vstupní impedance T-článku:

$$Z_{VST,T} = \frac{p^2(L_{\sigma_1,T}L_{\sigma_2,T} + L_{\sigma_1,T}L_{\mu,T} + L_{\mu,T}L_{\sigma_2,T}) + p(L_{\sigma_1,T}R_{2,T} + L_{\mu,T}R_{2,T})}{p(L_{\sigma_2,T} + L_{\mu,T}) + R_{2,T}}$$

(2.10) Dal se určí vstupní impedance Γ -článku:

$$Z_{VST,\Gamma} = \frac{p^2L_{\sigma,\Gamma}L_{\mu,\Gamma} + p(L_{\sigma,\Gamma}R_{2,\Gamma} + L_{\mu,\Gamma}R_{2,\Gamma})}{pL_{\mu,\Gamma} + R_{2,\Gamma}} \quad (2.11)$$

Pak se stejným způsobem jak v rovnici 2.3 porovnají pravé části rovnic:

$$\begin{aligned} \frac{p^2(L_{\sigma_1,T}L_{\sigma_2,T} + L_{\sigma_1,T}L_{\mu,T} + L_{\mu,T}L_{\sigma_2,T}) + p(L_{\sigma_1,T}R_{2,T} + L_{\mu,T}R_{2,T})}{p(L_{\sigma_2,T} + L_{\mu,T}) + R_{2,T}} &= \\ &= \frac{p^2L_{\sigma,\Gamma}L_{\mu,\Gamma} + p(L_{\sigma,\Gamma}R_{2,\Gamma} + L_{\mu,\Gamma}R_{2,\Gamma})}{pL_{\mu,\Gamma} + R_{2,\Gamma}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Pro zjištění hledaných parametrů, se nejdříve odstraní zlomky a rovnice se roznásobí. Po roznásobení se porovnají stejné koeficienty u mocnin p^2 , p^1 , p^0 . Z rovnic se vyjádří přepočtové vztahy pro přepočet T-článku na Γ -článek.

$$L_{\mu,T} = \frac{L_{\mu,T}^2}{L_{\mu,T} + L_{\sigma_2,T}} \quad (2.13)$$

$$L_{\sigma,\Gamma} = L_{\sigma_1,T} + \frac{L_{\sigma_2,T}L_{\mu,T}}{L_{\mu,T} + L_{\sigma_2,T}} \quad (2.14)$$

$$R_{2,\Gamma} = R_{2,T} \frac{L_{\mu,T}^2}{(L_{\mu,T} + L_{\sigma_2,T})^2} \quad (2.15)$$

2.4.4 Přepočet Γ -článku na T-článek

Zpětný přepočet parametru Γ -článku na T-článek má patrný problém, a to že se musí určit čtyři neznámé parametry $L_{\sigma_1,T}$, L_{μ} , $L_{\sigma_2,T}$, $R_{2,T}$. Zpětný přepočet parametru i -článku na T-článek má patrný problém, a to že se musí určit čtyři neznámé parametry $L_{\sigma_1,T} = L_{\sigma_2,T}$, výsledné vztahy pro přepočet $i\Gamma$ -článku na T-článek mají tvar:

$$L_{\mu,T} = \sqrt{L_{\mu,\Gamma}}\sqrt{L_{\mu,\Gamma} + L_{\sigma,\Gamma}} \quad (2.16)$$

$$L_{\sigma_1,T} = L_{\sigma_2,T} = L_{\mu,\Gamma} + L_{\sigma,\Gamma} - \sqrt{L_{\mu,\Gamma}}\sqrt{L_{\mu,\Gamma} + L_{\sigma,\Gamma}} \quad (2.17)$$

$$R_{2,T} = \frac{R_{2,\Gamma}(L_{\mu,\Gamma} + L_{\sigma,\Gamma})}{L_{\mu,\Gamma}} \quad (2.18)$$

3 Metody identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru

U asynchronních motorů existují tři provozní stavy. Jedná se o chod naprázdno, chod nakrátko a chod při zatížení. Cílem měření na asynchronním motoru je získání základních údajů, ze kterých se získá vše pro analýzu a identifikaci parametrů asynchronního motoru.

3.1 Stav naprázdno

Při chodu naprázdno je asynchronní motor napájen jmenovitým napětím a má jmenovitou frekvenci. Z toho plyne, že motor není zatížen a točí se téměř synchronní rychlostí. Z toho vyplývá, že odebíraný příkon motoru se tedy musí přeměňovat pouze na ztráty v něm, konkrétně na ztráty v železe, ztráty Joulovy a ztráty mechanické. Moment na hřídeli a skluz bude nulový.

Test je prováděn při třech nebo více hodnotách napětí. Bude platit, že se snižujícím se napájecím napětím klesá proud protékající statorem. Proud bude klesat do nějaké určité hodnoty napětí, pak začne stoupat. Body ovlivněné tímto jevem již nejsou považovány jako součást měření naprázdno. Spodní hranici napětí pro tuto zkoušku tvoří poslední hodnota, přibližně 30% jmenovité hodnoty.

Pomocí měření je určeno napětí U_0 , proud I_0 a příkon P_1 . Úkolem měření naprázdno je zjištění účinníku naprázdno $\cos\varphi_0$, mechanických ztrát ΔP_{Mech} a ztrát v železe ΔP_{Fe} . Tyto hodnoty se získají pomocí změřených hodnot příkonu P_1
Účinník naprázdno:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0I_0} [-]. \quad (3.1)$$

Joulové ztráty:

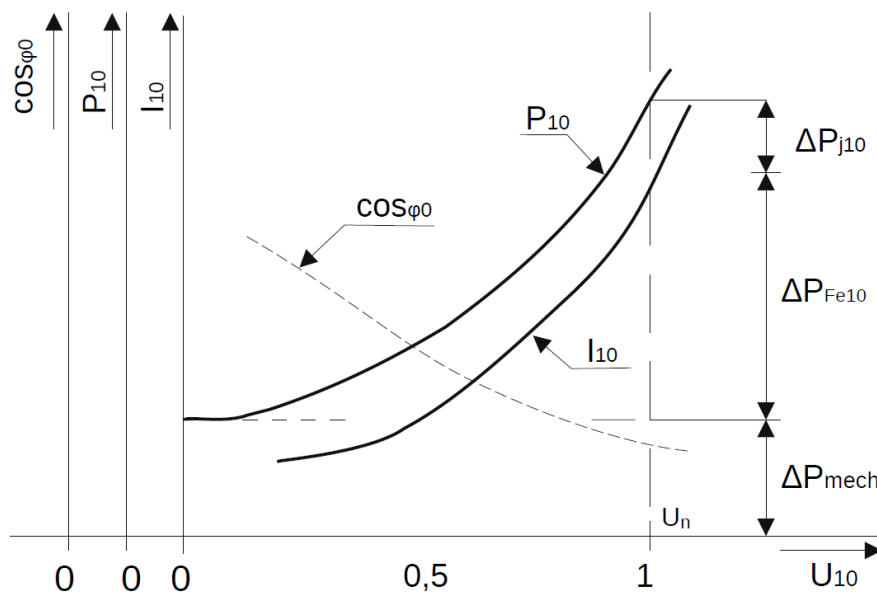
$$\Delta P_{J10} = 3RI_0^2 \text{ [W]}. \quad (3.2)$$

Mechanické ztráty ΔP_{Mech} jsou zjištěny z grafické závislosti příkonu na napájecím napětí prodloužením křivky do nulové hodnoty pomocí extrapolace, viz Obr(3.1). Ztráty v železe jsou určeny odečtením Joulových a mechanických ztrát od příkonu.

$$\Delta P_{Fe} = P_1 - \Delta P_{J10} - \Delta P_{Mech} \text{ [W]}. \quad (3.3)$$

3.2 Stav nakrátko

Chodem nakrátko se rozumí stav, kdy se rotor spojený nakrátko neotáčí ($n = 0$, $s = 1$) a je napájen ze sítě. Motor je ve stavu nakrátko a jeho proud je omezen pouze



Obr. 3.1: Průběh veličin naprázdno a rozdělení ztrát naprázdno. [10]

ohmickými odpory a rozptylovými reaktancemi vinutí. Tento tzv. záběrný proud dosahuje čtyřikrát až osmkrát větších hodnot, než je proud jmenovitý.[1] Pokud se asynchronní motory rozbíhají s rotorem spojeným nakrátko (asynchronní motory s kotvou nakrátko), jsou hodnoty proudu I_{1k} momentu nakrátko M_{1k} totožné s hodnotami záběrnými I_{1s} , M_{1s} (spouštěcími).[10]

Odečítané parametry při měření nakrátko jsou sdružené napájecí napětí U_{1k} , proud nakrátko I_{1k} a příkon motoru P_{1k} . Hledané parametry jsou účinník nakrátko, ztráty nakrátko a parametry pro výpočet prvků podélné větve R a X_σ .

Účinník nakrátko se vypočítá podle vztahu:

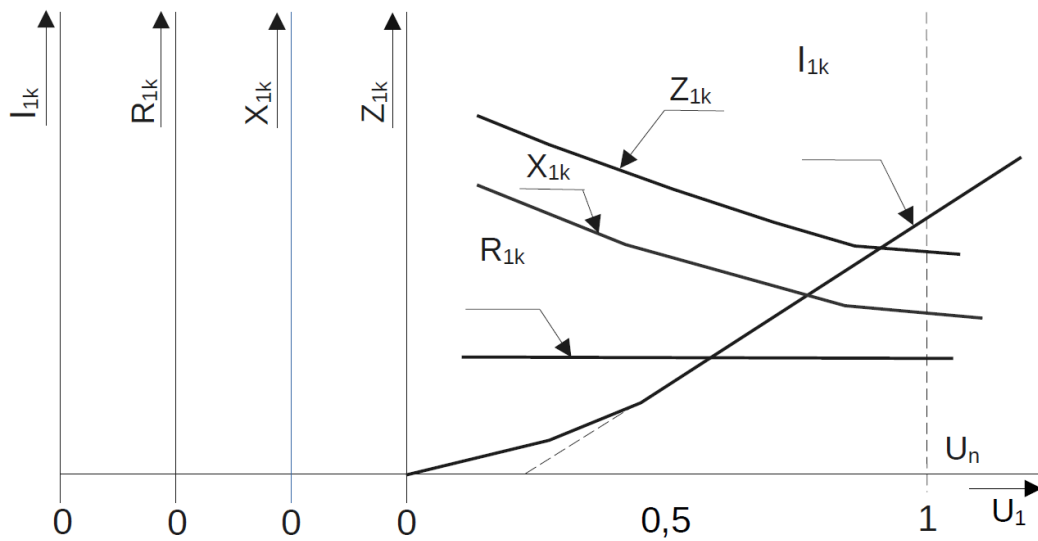
$$\cos\varphi_{1k} = \frac{P_{1k}}{\sqrt{3}U_{1k}I_{1k}} [-]. \quad (3.4)$$

Dalším krokem je výpočet ztráty ve vinutí statoru $\Delta P_{j_{sk}}$ rotoru $\Delta P_{j_{rk}}$. Ztráty ve vinutí statoru se určí z rovnice:

$$\Delta P_{j_{sk}} = 3RI_{1k}^2 [W]. \quad (3.5)$$

Z toho se určí ztráty ve vinutí rotoru:

$$\Delta P_{j_{rk}} = P_{1k} - \Delta P_{j_{sk}} - \Delta P_{Fe} [W]. \quad (3.6)$$



Obr. 3.2: Průběh veličin nakrátko při uzavřených drážkách rotoru. [10]

3.3 Stav při jmenovitém zatížení

Zkouška při zatížení je alternativa měření nakrátko. Výhodou měření v okolí jmenovitého zatížení oproti zkoušce nakrátko je, že identifikované parametry mnohem lépe odpovídají parametrům stroje během jeho chodu. Cílem zkoušky při zatížení je identifikovat hodnotu rotorového odporu R_2 a rozptylové reaktance X_σ .

3.4 Měření odporu na statoru

Při identifikaci parametrů náhradního zapojení, jedním z požadovaných měření je měření odporu na statoru. V náhradním zapojení odpor R_1 reprezentuje odpor jedné fáze. V tomto případě při měření odporu mezi jednotlivými fázovými vodiči, měření odporu dvou fází zapojených v sérii. Z rovnic se určí výsledné odpory jednotlivých fází. [8]

$$R_a = \frac{1}{2}(R_{ab} + R_{ac} - R_{bc}) \quad (3.7)$$

$$R_b = \frac{1}{2}(R_{ab} + R_{bc} - R_{ac}) \quad (3.8)$$

$$R_c = \frac{1}{2}(R_{ac} + R_{bc} - R_{ab}) \quad (3.9)$$

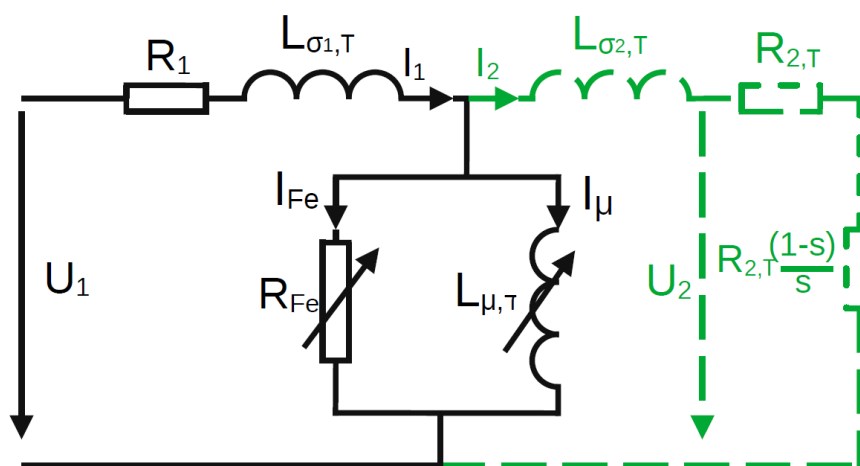
Pro stanovení odporu R_1 se musí určit průměrná hodnota odporů jednotlivých fází

$$R_1 = \frac{R_a + R_b + R_c}{3} \quad (3.10)$$

3.5 Identifikace parametrů asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku

3.5.1 Identifikaci parametrů zpřesněného náhradního zapojení ze zkoušky naprázdno

V dané metodě hodnoty jednotlivých parametrů v náhradním zapojení nejsou považovány za konstanty, ale jako proměnné parametry závislé na příslušných veličinách. Z toho důvodu, bylo provedeno upravení náhradního zapojení pro zkoušku naprázdno podle Obr.3.3. Ze zkoušky naprázdno získáme závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe a magnetizační indukčnosti na kmitočtu ($R_{Fe} = R_{Fe}(f_1)$), ($L_{\mu,T} = L_{\mu,T}(f_1)$). Aby bylo možné získat závislost, měření se musí provádět při různých hodnotách kmitočtu.



Obr. 3.3: Náhradní zapojení AM zohledňující změnu R_{Fe} a $L_{\mu,T}$ na výbraných veličinách.

3.5.2 Identifikace a závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na různých veličinách

Ztráty v železe ΔP_{Fe} lze rozdělit na dvě části: hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Pomocí postupu, který je definován v [13] a [8] je možné stanovit odpor reprezentující ztráty v železe R_{Fe} ze známých hodnot hysterezních ztrát a ztrát vířivými proudy.

Hysterezní ztráty jsou definovány jako

$$\Delta P_h = k_h \cdot f \cdot B_{\max}^n \quad (3.11)$$

kde

$$k_h = \chi \cdot V \quad (3.12)$$

n a χ jsou konstanty materiálu, V je objem, f provozní frekvence, B je amplituda magnetické indukce.

Ztráty vířivými proudy je možné určit podle rovnice

$$\Delta P_v = \frac{V \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot B_{\max}^2}{6 \cdot \rho} \quad (3.13)$$

kde

$$k_v = \frac{V \cdot \pi^2 \cdot d^2}{6 \cdot \rho} \quad (3.14)$$

V je objem jednoho plechu, d je tloušťka plechu, ρ je měrný elektrický odpor materiálu plechu.

Zavedením koeficientu k_v je možné zjednodušit do tvaru

$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \quad (3.15)$$

Nyní možné získat výslednou hodnotu celkových ztrát v železe

$$\Delta P_{\text{Fe}} = \Delta P_h + \Delta P_v = k_h \cdot f \cdot B_{\max}^n + k_v \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \quad (3.16)$$

Z toho vyplývá, že je možné odpor reprezentující celkové ztráty v železe rozložit na dva odpory, kde jeden reprezentuje ztráty hysterezní a druhý ztráty vířivými proudy. Výpočet ztrát v železe z měření naprázdno

$$\Delta P_{\text{Fe}} = m_1 \frac{U_0^2}{R_{\text{Fe}}} \quad (3.17)$$

Porovnáním rovnic (3.16) a (3.17) je možné získat odpor reprezentující ztráty v železe

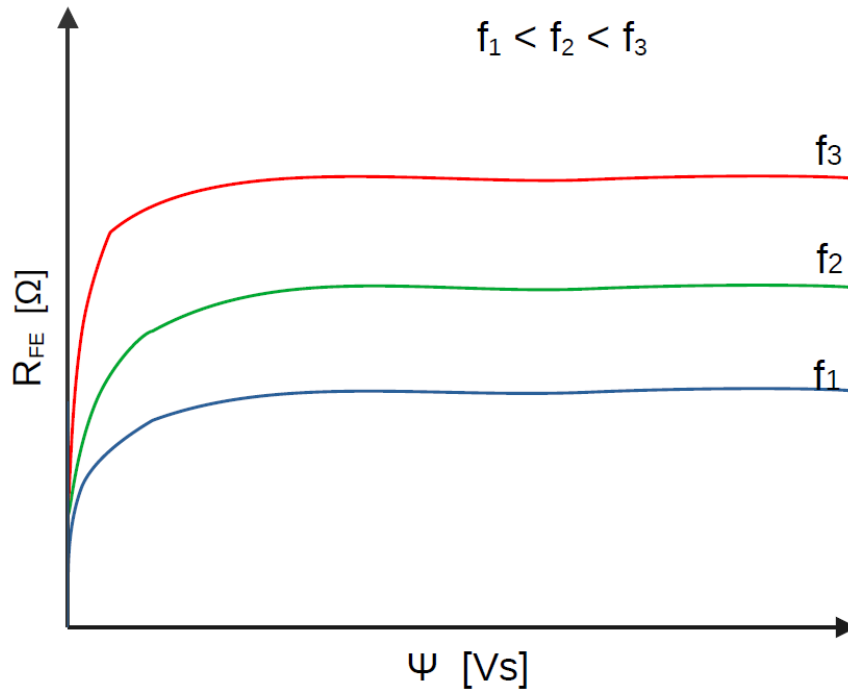
$$R_{\text{Fe}} = \frac{m_1 U_0^2}{k_h \cdot f \cdot B_{\max}^n + k_v \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2} \quad (3.18)$$

Při zkoušce naprázdno neodebírání se žádný výkon, takže pro příkon motoru bude platit, viz kapitolu 3.1.

$$P_1 = \Delta P_{\text{J10}} + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Mech}} \quad (3.19)$$

Z kapitoly 3.1 je vidět, že hodnoty příkonu P_1 a Joulevých ztrát jsou známé. Příkon je měřen. Joulové ztráty lze vypočítat podle rov (3.2). Často při modelování mechanické ztráty bývají zahrnuty do ztrát v železe nebo zanedbány. Rovnice (3.19) lze přepsat do tvaru

$$P_1 - 3RI_0^2 = \Delta P_{\text{Fe}} \quad (3.20)$$



Obr. 3.4: Teoretická závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na satorovém kmitočtu a spřaženém toku.

Nyní dosazením vztahu (3.16) místo ΔP_{Fe} se obdrží výsledná rovnice

$$P_1 - 3RI_0^2 = \Delta P_{\text{Fe}} = k_h \cdot f \cdot B_{\text{max}}^n + k_v \cdot f^2 \cdot B_{\text{max}}^2 \quad (3.21)$$

V [8] je uvedena možnost upravení rovnice (3.21) do tvaru

$$P_1 - 3RI_0^2 = \Delta P_{\text{Fe}} = k_h \cdot f \cdot \Psi^{n_h} + k_v \cdot f^2 \cdot \Psi^2 \quad (3.22)$$

Z toho je možné vykreslit teoretickou závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na satorovém kmitočtu a spřaženém toku. Z Obr.(3.4) je vidět, že čím větší bude hodnota satorového kmitočtu, tím vyšších hodnot může dosáhnout odpor R_{Fe} . V závislosti na spřaženém toku R_{Fe} extrémně roste do nějaké určitého bodu a pak ten růst zpomaluje. Toto tvrzení bylo potvrzeno v kapitole 4.3.3

3.5.3 Identifikace a závislost magnetizační indukčnosti na různých veličinách

Odvození magnetizační indukčnosti se vychází ze stavu naprázdno z Obr.(3.3). Podle [8] magnetizační indukčnost je možné stanovit následujícím způsobem

Odvození bude vycházet z rovnice jalového příkonu

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}. \quad (3.23)$$

Předpokládá se zapojení ve tvaru Γ -článku. Ve stavu naprázdno nebere v úvahu rozptylová indukčnost, takže zapojení bude obsahovat jenom magnetizační indukčnost. Pak celkový jalový výkon je možné opravit na následující tvar

$$Q_1 = \frac{m_1 U_0^2}{2\pi f_1 L_\mu} \quad (3.24)$$

Za předpokladu zapojení ve tvaru Γ -článku je možné odvodit vztah pro napětí naprázdno U_0

$$U_0 = \sqrt{\left(R_1 I_1 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}\right)^2 + (U_1 - R_1 I_1 \cos \varphi)^2} \quad (3.25)$$

Magnetizační indukčnost je možné stanovit dosazením rovnice (3.25) do (3.24) a pak porovnáním rovnic (3.23) a (3.24). Výsledná rovnice bude mít tvar

$$L_\mu = \frac{U_1^2 + R_1^2 I_1^2 - 2R_1 U_1 I_1 \cos \varphi}{2\pi f_1 U_1 I_1 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} \quad (3.26)$$

Na základě získaných výsledků je možné říct, že magnetizační indukčnost je nazavislá na statorovém kmitočtu.

3.5.4 Zkouška při jmenovitém zatížení

Principem identifikace je porovnání změřené a vypočtené vstupní impedance náhradního zapojení asynchronního stroje, kdy jediný rozdíl mezi měřením naprázdno a nakrátko prakticky spočívá v tom, jakým způsobem je uvažován tvar náhradního zapojení. Během těchto zkoušek se obvykle měří pouze elektrické veličiny, tj. statorové napětí, proud a fázový posun mezi napětím a proudem. Postup výpočtu parametrů je převzat z [11]. Na začátku je určena vstupní impedance jedné fáze.

$$\hat{Z}_{1,n} = R_1 + \frac{R_{Fe} X_{\mu,\Gamma}^2 (R_{2,\Gamma}^2 + R_{2,\Gamma} R_{Fe} s + s^2 X_{\sigma,\Gamma})}{2R_2 R_{Fe} X_{\mu,\Gamma}^2 s + R_{2,\Gamma}^2 (R_{Fe}^2 + X_{\mu,\Gamma}^2) + [X_{\mu,\Gamma}^2 X_{\sigma,\Gamma}^2 + R_{Fe}^2 (X_{\mu,\Gamma} + X_{\sigma,\Gamma})^2] s^2} + j \frac{[R_{Fe}^2 X_{\mu,\Gamma} [R_{2,\Gamma}^2 + s^2 X_{\sigma,\Gamma} (X_{\mu,\Gamma} + X_{\sigma,\Gamma})]]}{2R_2 R_{Fe} X_{\mu,\Gamma}^2 s + R_{2,\Gamma}^2 (R_{Fe}^2 + X_{\mu,\Gamma}^2) + [X_{\mu,\Gamma}^2 X_{\sigma,\Gamma}^2 + R_{Fe}^2 (X_{\mu,\Gamma} + X_{\sigma,\Gamma})^2] s^2} \quad (3.27)$$

Dalším krokem je výpočet vstupní impedance z měřených veličin

$$\hat{Z}_{1,n} = \underbrace{\frac{U_{1f,n}}{I_{1f,n}} \cos \phi_{1,n}}_{Z_{1re,n}} + j \underbrace{\frac{U_{1f,n}}{I_{1f,n}} \sin \phi_{1,n}}_{Z_{1im,n}} \quad (3.28)$$

Porovnáním rovnic (3.27) a (3.28) se určí odpor $R_{2,\Gamma}$ a reaktance $X_{\sigma,\Gamma}$

$$R_{2,\Gamma} = \frac{-[Z_{1im,n}^2 + (Z_{1re,n} - R_1)(Z_{1re,n} - R_1 - R_{Fe})] R_{Fe} s X_{\mu,\Gamma}^2}{[Z_{1im,n}^2 + (Z_{1re,n} - R_1)^2] R_{Fe}^2 - 2Z_{1im,n} R_{Fe}^2 X_{\mu,\Gamma} + [Z_{1im,n}^2 + (Z_{1re,n} - R_1 - R_{Fe})^2] X_{\mu,\Gamma}^2} \quad (3.29)$$

$$X_{\sigma,\Gamma} = \frac{R_{Fe}^2 X_{\mu,\Gamma} [Z_{1im,n} (X_{\mu,\Gamma} - Z_{1im,n}) - (Z_{1re,n} - R_1)^2]}{[Z_{1im,n}^2 + (Z_{1re,n} - R_1)^2] R_{Fe}^2 - 2Z_{1im,n} R_{Fe}^2 X_{\mu,\Gamma} + [Z_{1im,n}^2 + (Z_{1re,n} - R_1 - R_{Fe})^2] X_{\mu,\Gamma}^2} \quad (3.30)$$

3.6 Klasický postup identifikace parametrů asynchronního motoru ve tvaru T-článku

Identifikace parametrů pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku je mnohem složitější, protože se zde vyskytuje jedna rozptylová indukčnost navíc. Proto se při stanovování parametrů provádí výpočet za předpokladu, že $X_{\sigma_1,T} = X_{\sigma_2,T}$. Pro tuto metodu platí, že odpor reprezentující ztráty v železe je zanedbán za účelem zjednodušení řešení. Výpočet je proveden pro zapojení do hvězdy. Tento postup je převzat z [4]

3.6.1 Zkouška naprázdno

Z naměřených hodnot napětí naprázdno U_0 , proudu naprázdno I_0 a příkonu naprázdno P_0 jsou vypočteny pomocné parametry pro stanovení parametrů asynchronního motoru.

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} \quad [\Omega]. \quad (3.31)$$

$$R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} \quad [\Omega]. \quad (3.32)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad [\Omega]. \quad (3.33)$$

Z_0 celková impedance naprázdno, R_0 odpor naprázdno, L_0 indukčnost naprázdno.

3.6.2 Zkouška nakrátko

Z naměřených hodnot sdruženého napětí nakrátko U_{1k} , proudu nakrátko I_{1k} a příkonu nakrátko P_{1k} , se získá impedance nakrátko pro stanovení dalších parametrů.

$$Z_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} \quad [\Omega]. \quad (3.34)$$

$$R_{1k} = \frac{P_{1k}}{3I_{1k}^2} \quad [\Omega]. \quad (3.35)$$

$$X_{1k} = \sqrt{Z_{1k}^2 - R_{1k}^2} \quad [\Omega]. \quad (3.36)$$

Chybějící parametry obvodu se dopočítají pomocí vypočítaných hodnot z měření naprázdno.

$$R_{2,T} = R_{1k} - R_1 \quad [\Omega]. \quad (3.37)$$

Za předpokladu $X_{\sigma_1,T} = X_{\sigma_2,T}$ se rozptylová indukčnost vypočte podle vztahu

$$X_{\sigma_1,T} = X_{\sigma_2,T} = \frac{X_{1k}}{2} \quad [\Omega]. \quad (3.38)$$

$$X_{\mu,T} = X_0 - X_{\sigma_1,T} \quad [\Omega]. \quad (3.39)$$

3.7 Identifikace parametrů asynchronního motoru podle normy IEEE

Kromě základního způsobu identifikace parametrů asynchronního motoru, kde jsou parametry získané ze zkoušek naprázdno a nakrátko, existuje hodně nových a pokročilých metod identifikace parametrů AM. V dané kapitole budeme zvažovat metody založené na normě IEEE [12].

Pro danou metodu je nutné měřit hodnoty ze zkoušky nakrátko při polovičním kmitočtu a při čtvrtinovém kmitočtu. Během provádění měření bylo zjištěno, že minimální nastavitelná hodnota našich měřicích přístrojů byla 16 Hz. Proto bylo měření provedeno právě při těchto kmitočtech. Měření při nižších kmitočtech bylo prováděno kvůli skinefektu v rotorových tyčích. Skinefekt je jev, který se projevuje při průchodu vysokofrekvenčního proudu vodičem. Při vyšších frekvencích se proud koncentruje na povrchu vodiče a střed vodiče zůstává nevyužitý. Tento jev je způsoben vzájemným působením elektrického pole a vodiče. Ve specifickém případě rotorových tyčí se skinefekt projevuje při provozu asynchronních motorů s vysokými kmitočty. Při těchto kmitočtech dochází k výrazné koncentraci proudu na povrchu tyče, zatímco střed tyče je v praxi prakticky nevyužitý. To vede k nerovnoměrnému rozložení proudu v rotoru a způsobuje zvýšené tepelné ztráty a sníženou účinnost.

Výpočet jalového výkonu celého motoru bez zatížení, Q_0 a za podmínek impedanční zkoušky Q_{1k} .

$$Q_0 = \sqrt{(mU_0I_0)^2 - P_0^2} \quad (3.40)$$

a

$$Q_{1k} = \sqrt{(mU_{1k}I_{1k})^2 - P_k^2} \quad (3.41)$$

Napětí na fázi U_1 , které jsme se užili v rovnici (3.40) a rovnici (3.41) třífázový stroj se vypočte podle vztahu

$$U_1 = \frac{\text{Sdružené napětí}}{\sqrt{3}} \quad (3.42)$$

Nyní se stanoví magnetizační indukčnost

$$X_{\mu,T} = \frac{mU_0^2}{Q_0 - mI_0^2 X_{\sigma_1,T}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right)^2} \quad (3.43)$$

Vypočte se reaktance statoru X_{1k} při zkušební frekvenci.

$$X_{1k} = \frac{Q_{1k}}{mI_{1k}^2 \left[1 + \left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right) + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right]} \cdot \left[\left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right) + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right] \quad (3.44)$$

Dále se vypočítá reaktance statoru při jmenovité frekvenci.

$$X_{\sigma_1,T} = \frac{f}{f_{1k}} \cdot X_{1k} \quad (3.45)$$

Rovnice (3.43), rovnice (3.44) a rovnice (3.45) se vyřeší následovně

1. Prvním krokem je výpočet $X_{\mu,T}$ z rovnici (3.43) za předpokladu hodnot $\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}$ a $X_{\sigma_1,T}$.
2. Druhým krokem je výpočet X_{1k} z rovnici (3.44) za předpokladu stejné hodnoty $\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}$ jako v prvním kroku.
3. V třetím kroku se stanoví $X_{\sigma_1,T}$ z rovnici (3.45).
4. V dalším kroku se stanoví $X_{\mu,T}$ z rovnici (3.43) při uvažování $X_{\sigma_1,T}$ z rovnici (3.45) a poměru $\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}$ z rovnic (3.43) a (3.45).
5. Posledním krokem je iterace do momentu, kdy stabilní hodnoty $X_{\sigma_1,T}$ a $X_{\mu,T}$ budou získány s přesností do 0,1%.

Nyní je možné dopočítat ostatní parametry asynchronního motoru.

Magnetizační susceptance

$$B_{\mu,T} = \frac{1}{X_{\mu,T}} \quad (3.46)$$

Reaktance rotoru je vypočtena podle vztahů

$$X_{2k} = \frac{X_{1k}}{\left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right)} \quad (3.47)$$

$$X_{\sigma_2,T} = \frac{f}{f_{1k}} \cdot X_{2k} \quad (3.48)$$

Odpor reprezentující ztráty v železe, pomocí vodivosti ztrát v železe

$$G_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{mU_0^2} \cdot \left(1 + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right)^2 \quad (3.49)$$

$$R_{Fe} = \frac{1}{G_{Fe}} \quad (3.50)$$

ΔP_{Fe} celková ztráta v železe ve wattech, která je určena v kapitole 3.1.

Posledním krokem je stanovení odporů asynchronního motoru. Výpočet podle vztahu:

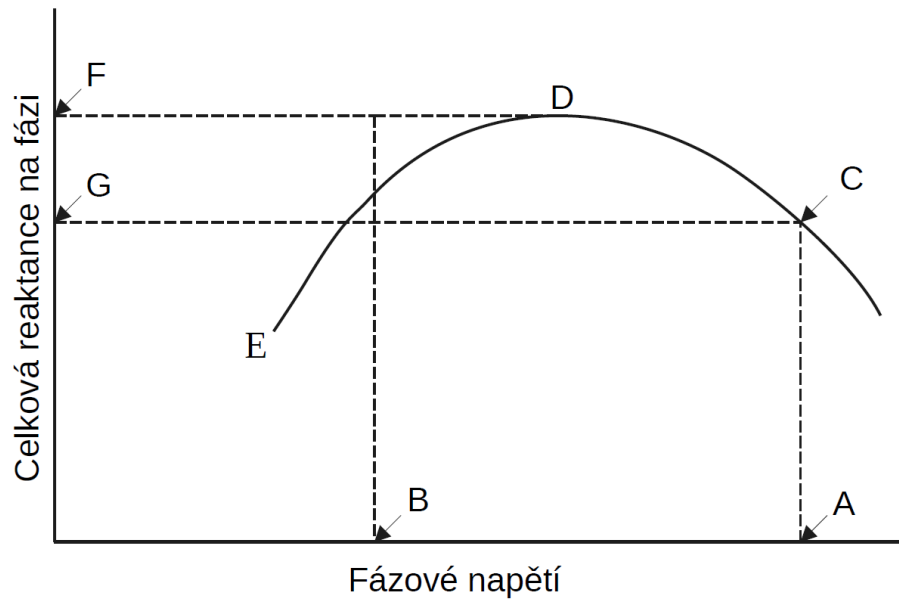
$$R_{2,T} = \left(\frac{P_{1k}}{mI_{1k}^2} - R_1\right) \cdot \left(1 + \frac{X_{\sigma_2,T}}{X_{\mu,T}}\right)^2 - \left(\frac{X_{\sigma_2,T}}{X_{\sigma_1,T}}\right)^2 \cdot (X_{1k}^2 G_{Fe}) \quad (3.51)$$

3.8 Identifikace parametrů asynchronního motoru podle normy IEEE 2

Při této metodě je stroj spuštěn odpojený nebo ve spojení se sníženým zatížením a napětím, které dává požadovanou rychlost skluzu. Generátor může být provozován jako motor nebo může být připojen k hnacímu zařízení rychlostí vyšší než

synchronní rychlost, která dává požadovanou skluznost při sníženém napětí, aby se snížil elektrický výstup. Skluz se měří velmi pečlivě.

S údaji z testu naprázdno, se vypočítá celková reaktance na fázi pro každý testovací bod a nakreslí se křivka závislosti celkové reaktance na fázi. Hodnoty voltů na fázi jsou vypočteny z napětí mezi řádky. V nejvyšším bodu na křivce č.3.5 se používá jako celková reaktance naprázdno na fázi, $X_{\sigma_1,T} + X_{\mu,T}$, při výpočtech testu skluzu sníženého napětí. V této práci je daná metoda pouze ukázková a nebude využita pro experimentální identifikaci.



Obr. 3.5: Celková reaktance na fázi.

Význam jednotlivých bodů:

- A – jmenovité volty.
- B – volty při zkoušce skluzu se sníženým napětím.
- C, D, E – křivka celkové reaktance ze zkoušky naprázdno.
- F – reaktance odpovídající nejvyššímu bodu D, testovací křivky C, D, E. Tato hodnota se používá jako celková reaktance, $X_{\sigma_1,T} + X_{\mu,T}$, při výpočtech testu skluzu sníženého napětí.
- G – celková reaktance $X_{\sigma_1,T} + X_{\mu,T}$, která se použije při určování $X_{\mu,T}$.

Pokud byl stroj provozován jako motor při provádění testu skluzu se sníženým napětím, pak měřená elektrická energie při použití ve výpočtech by měla být specifikována jako kladná hodnota. Pokud stroj byl testován jako generátor, měřená elektrická energie použitá ve výpočtech je specifikována jako má zápornou hodnotu, protože je opačná ve směru k toku energie, jak je znázorněno na obrázku (3.5).

Z údaje o zkoušce skluzu sníženého napětí lze vypočítat fázový uhel, celkový odpor R a celkovou reaktanci L .

$$\theta_1 = -\arccos(PF) \quad (3.52)$$

$PF = \cos\phi$, která je popsána v kapitole 3.6.

$$R = Z \cdot \cos(\theta_1) \quad (3.53)$$

$$L = Z \cdot \sin(\theta_1) \quad (3.54)$$

Pro první odhad součtu $X_{\sigma_1,T} + X_{\mu}$ se užije reaktance L , která se vypočetla v rovnici (3.54). Na základě toho předpokladu se stanoví $X_{\sigma_1,T}$.

$$X_{\sigma_1,T} = X \frac{\left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right)}{1 + \left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right)} \quad (3.55)$$

Z obrázku (3.5) v bodě D pomocí hodnoty celkové reaktance $X_{\sigma_1,T} + X_{\mu,T}$ lze stanovit magnetizační reaktanci X_{μ} .

$$X_{\mu,T} = (X_{\sigma_1,T} + X_{\mu,T}) - X_{\sigma_1,T} \quad (3.56)$$

U_2 lze vypočítat z údajů získaných z testu skluzu se sníženým napětím. Před stanovením dalších parametrů je nutné odpor R_1 během zkoušky před použitím upravit podle teploty, viz kapitolu 3.8.1.

$$U_2 = \sqrt{[U_1 - I_1 (R_1 \cos\theta_1 - X_{\sigma_1,T} \sin\theta_1)]^2 + [I_1 (R_1 \sin\theta_1 + X_{\sigma_1,T} \cos\theta_1)]^2} \quad (3.57)$$

Ostatní parametry se vypočtou podle vztahů

$$\theta_2 = \arctan \frac{-I_1 (R_1 \sin\theta_1 - X_{\sigma_1,T} \cos\theta_1)}{U_1 - I_1 (R_1 \cos\theta_1 + X_{\sigma_1,T} \sin\theta_1)} \quad (3.58)$$

Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{U_2}{X_{\mu,T}} \quad (3.59)$$

Odpor reprezentující ztráty v železe

$$R_{Fe} = \frac{U_2^2}{\left(\frac{P_{lk}}{m}\right)} \quad (3.60)$$

Vodivost reprezentující ztráty v železe

$$G_{Fe} = \frac{1}{R_{Fe}} \quad (3.61)$$

Proud reprezentující ztráty v železe

$$I_{Fe} = \frac{U_2}{R_{Fe}} \quad (3.62)$$

Rotorový proud

$$I_2 = \sqrt{[I_1 \cos\theta_1 - I_\mu \sin\theta_2 - I_{Fe} \cos\theta_2]^2 + [I_1 \sin\theta_1 + I_\mu \cos\theta_2 - I_{Fe} \sin\theta_2]^2} \quad (3.63)$$

Reaktance rotoru

$$X_{\sigma_2,T} = \frac{-U_1 I_1 \sin\theta_1 - I_1^2 X_{\sigma_1,T} - I_\mu^2 X_{\mu,T}}{I_2^2} \quad (3.64)$$

$$L = X_{\sigma_1,T} + X_{\sigma_2,T} \quad (3.65)$$

Následujícím krokem, pomocí hodnoty $\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}$ z rovnice (3.55) a hodnoty L z rovnice (3.65) se bude pokračovat iterací do momentu, kdy stabilní hodnoty $X_{\sigma_1,T}$ a $X_{\sigma_2,T}$ budou získány s přesností do 0,1%.

Impedance rotoru

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad (3.66)$$

Rotorový odpor

$$R_{2,T} = s\sqrt{(Z_2^2 - L_2^2)} \quad (3.67)$$

Poté se ze zkušebního bodu C z obrázku (3.5) z obrázku pomocí celkové reaktance vypočítá

$$X_\mu = (X_{\sigma_1,T} + X_\mu) - X_{\sigma_1,T} \quad (3.68)$$

$$B_\mu = \frac{1}{X_\mu} \quad (3.69)$$

$$U_2 = \sqrt{[U_1 - I_1 (R_1 \cos\theta_1 - X_{\sigma_1,T} \sin\theta_1)]^2 + [I_1 (R_1 \sin\theta_1 + X_{\sigma_1,T} \cos\theta_1)]^2} \quad (3.70)$$

$$G_{Fe} = \frac{P_k}{mU_2^2} \quad (3.71)$$

náhradním zapojení se užijí získané hodnoty $X_{\sigma_1,T}$ z rovnice (3.55) a $X_{\sigma_2,T}$ z rovnice (3.64). Odporů R_1 a R_2 musíme upravit podle teploty, viz kapitolu 3.8.1.

3.8.1 Korekce odporu podle teploty

Analýza vyžaduje provádět korekci odporu na zkušební teplotu. Proveďte se podle vztahu

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \quad (3.72)$$

kde

$[R_a]$	známá hodnota odporu vinutí při teplotě t_a	$[\Omega]$
$[t_a]$	teplota vinutí, když byl měřen odpor R_a	$[C^\circ]$
$[t_b]$	teplota na kterou má být odpor korigován	$[C^\circ]$
$[R_b]$	odpor vinutí korigovaný na teplotu t_b	$[\Omega]$
$[k_1]$	234,5 pro 100% IACS vodivost mědi nebo 225 pro hliník, na základě objemu vodivost 62%	$[-]$

Pro ostatní materiály vinutí se použije vhodná hodnota k_1 (odvozená teplota pro nulový odpor).

3.8.2 Skluz

Asynchronní stroj může dávat na výstupní hřídeli kroutící moment jen tehdy, pokud rychlost otáčení magnetického pole statoru je rozdílná oproti mechanickým otáčkám rotoru, tj. o skluz. Při nulovém skluzu se v rotoru neindukuje napětí, neteče proud a nevzniká rotorová část spřaženého magnetického pole stroje. Při synchronních otáčkách stroje se magnetické pole statoru vůči rotoru nepohybuje, tím se v rotoru neindukuje napětí a nevzniká kroutící moment.

Skluz se stanovuje výpočtem z měřené rychlosti (otáček) podle postupu.

Pro stanovení hodnoty skluzu se musí vypočítat velikost otáček vůči točivému magnetickému poli

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (3.73)$$

kde p je počet polů

Ze známé hodnoty otáček se zjistí skluz

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.74)$$

3.8.3 Korekce skluzu podle teploty

Skluz v přímo souvisí s odporem rotoru. Přesto v této kapitole budeme postupovat stejným způsobem, jako v kapitole 3.8.1.

$$s_s = \frac{s_t(t_s + k_1)}{t_t + k_1} \quad (3.75)$$

kde

$[s_s]$	skluz, který je korigován na specifikovanou teplotu statoru t_s	$[-]$
$[s_t]$	skluz, měřený při teplotě vinutí statoru t_t	$[-]$
$[t_s]$	specifikovaná teplota pro korekci odporu	$[C^\circ]$
$[t_t]$	pozorovaná teplota vinutí statoru během zatěžovací zkoušky	$[C^\circ]$
$[k_1]$	234,5 pro 100% IACS vodivost mědi nebo 225 pro hliník, na základě objemu vodivost 62%	$[-]$

3.9 Účinit

Účinit je kosinus vzájemného fázového posuvu mezi proudem a napětím elektrického obvodu s harmonickými průběhy střídavých proudů a napětí či periodickými průběhy o jednotlivých harmonických složkách proudů a napětí. Účinit je poměrem činného a zdánlivého elektrického výkonu v obvodu střídavého proudu a napětí, vyjadřuje, jak velkou část zdánlivého výkonu přeměňuje obvod na činný výkon, tj. na součet užitečného výkonu a ztrát. [12]

Účinit pro motor

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot UI} \quad (3.76)$$

Účinit pro generator

$$\cos\varphi = -\frac{P}{\sqrt{3} \cdot UI} \quad (3.77)$$

$[P]$	elektrický výkon stroje, vstup pro motor nebo výstup pro generátor	$[W]$
$[U]$	vstupní napětí	$[V]$
$[I]$	vstupní proud	$[A]$
$[\cos\varphi]$	Účinit motoru	$[-]$

3.10 Účinnost

Účinnost motoru je měřítkem efektivnosti, se kterou je elektrická energie přeměněna na mechanickou energii, a je vyjádřena jako poměr výkonu k příkonu. [12]

Obecný vztah pro výpočet účinnosti

$$\eta = \frac{\text{Výstupní výkon}}{\text{Vstupní výkon}} \quad (3.78)$$

Forma běžně používaná pro motory

$$\eta = \frac{\text{Výstupní výkon} - \text{Ztráty}}{\text{Vstupní výkon}} \quad (3.79)$$

Forma běžně používaná pro generátory

$$\eta = \frac{\text{Výstupní výkon}}{\text{Vstupní výkon} + \text{Ztráty}} \quad (3.80)$$

4 Průběh zkoušek motoru a jejich závislosti na různých parametrech

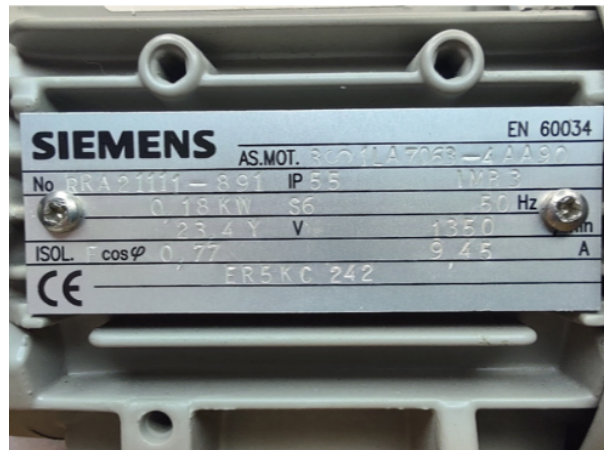
Důležitým aspektem zkoumání tohoto elektrického zařízení je experimentální stanovení charakteristik asynchronního motoru. Přesné hodnoty parametrů nezbytných pro správný chod motoru a provozní optimalizaci se snažíme zjistit pomocí experimentů a měření. Jsme schopni provést správný návrh motoru, jeho optimalizaci a diagnostiku díky přesnému pochopení vlastností motoru. Například při vývoji systémů a zařízení je klíčové porozumět specifikacím motoru, aby bylo možné vhodně dimenzovat elektrické obvody a zaručit optimální výkon. Identifikace parametrů během provozu motoru nám umožňuje sledovat stav motoru a identifikovat případné problémy. Identifikace parametrů motoru také umožňuje snížit spotřebu energie a zvýšit energetickou účinnost. V této kapitole se zaměříme na metody a postupy experimentální identifikace, které nám umožňují získat přesné informace o parametrech asynchronního motoru.

4.1 Parametry analyzovaného asynchronního motoru

Každý experimentální postup popsany v této práci byl proveden na skutečném vzorku asynchronního motoru. Jedná se o asynchronní motor značky SIEMENS, přesně typ 1LA7063-4AA90. Dotyčný motor nese sériové číslo RRA 21111-891. Tento motor byl vybrán, protože má správné vlastnosti a může splnit kritéria našeho výzkumu. Jmenovité parametry motoru popsany v Tab.4.1

Tab. 4.1: Parametry asynchronního motoru

Parametr	Hodnota
Výkon P	180 [W]
Otáčky n	1350 [ot/min]
Napětí U_1	23.4 [V]
Proud I_1	9.5 [A]
Frekvence f	50 [Hz]
Účinník $\cos\phi$	0.77 [-]



Obr. 4.1: Štítek asynchronního motoru.

4.2 Identifikace odporu statorového vinutí

Prvním krokem měření byla provedena identifikace statorového odporu. Tab.4.2 obsahuje naměřené hodnoty odporu mezi jednotlivými fázovými vodiči změřených při teplotě 21.8°C. Podle vztahů (3.7) až (3.10) dostaneme výslednou hodnotu R_1 .

Tab. 4.2: Odporů každé fázi a mezi jednotlivými fázovými vodiči

Odpor	Hodnota
R_{ab}	0.532 [Ω]
R_{bc}	0.512 [Ω]
R_{ac}	0.5126 [Ω]

Tab. 4.3: Odpor statorového vinutí

Statorový odpor	Hodnota
$R_1(0^\circ)$	0.2374 [Ω]
$R_1(20^\circ)$	0.2576 [Ω]

Před samotným měřením bylo umístěno teplotní čidlo, které sloužilo k měření teploty vinutí. Na základě těchto naměřených hodnot teploty byl poté upraven odpor pro

každé měření pomocí rovnice (4.2). Díky tomu dostaneme co nej přesnější hodnoty statorového odporu

$$R_t = R_{t_0} [1 + \alpha_{t_0} (t - t_0)]$$

kde R_t je hodnota odporu při teplotě t , t_0 je referenční teplota (obvykle 20°C), R_{t_0} je hodnota odporu při referenční teplotě, α_{t_0} je teplotní součinitel odporu. V následujících částech kapitoly bude uvedena závislost t_{vin} a R_1 na spáženém toku Ψ .

4.3 Zkouška naprázdno

Během testu naprázdno byla provedena řada měření ve frekvenčním rozsahu 20 až 100 Hz pro získání různých závislostí. Tento rozsah byl zvolen s ohledem na požadavek na sběr co nejširšího rozsahu dat pro co nej přesnější identifikaci parametrů. Pomocí tohoto frekvenčního rozsahu bylo možné získat data, které byly nutné pro stanovení ztrát v železe, magnetické indukčnosti a mechanických ztrát. Zavislosti změřených hodnot na spáženém toku lze vidět na obrázcích (4.2) až (4.7)

Při identifikaci parametrů zpřesněného náhradního zapojení asynchronního motoru, viz Obr.3.3, při zkoušce naprázdno je možné získat závislosti:

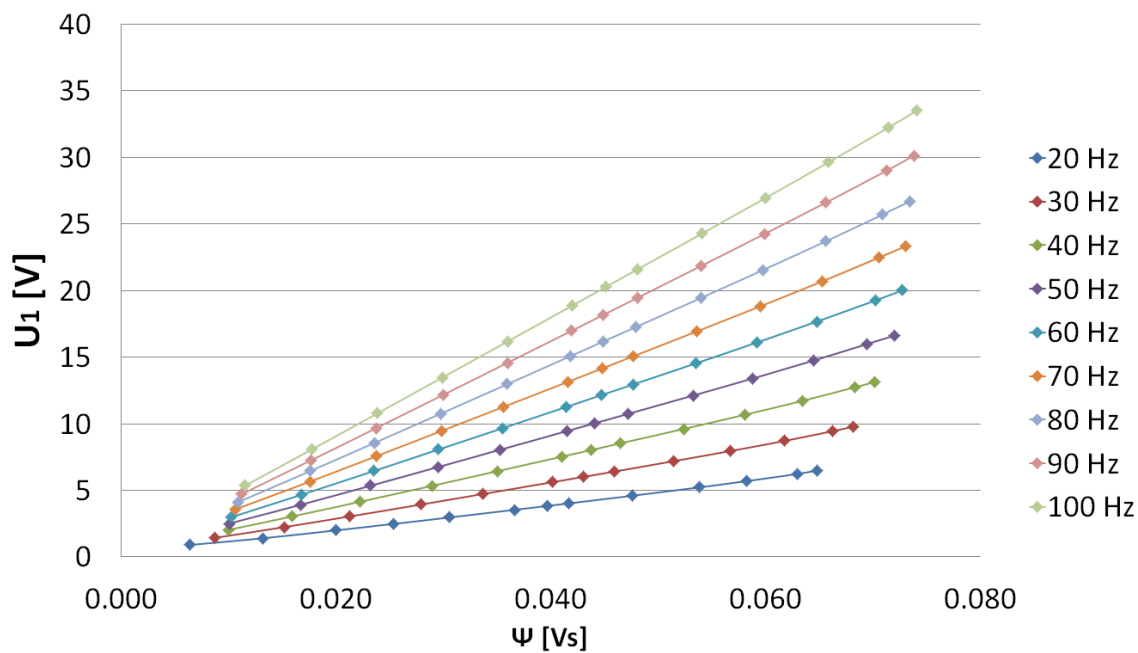
- závislost magnetizační indukčnosti na spáženém toku $L_\mu = L_\mu(\Psi)$
- závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na statorovém kmitočtu a spáženém toku $R_{Fe} = R_{Fe}(f, \Psi)$
- závislost mechanických ztrát a ztrát v železe na statorovém kmitočtu a spáženém toku $\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}(f, \Psi)$
- závislost mechanických ztrát na otáčkách $\Delta P_{Mech} = \Delta P_{Mech}(n)$

4.3.1 Popis měřicího pracoviště a způsobu provádění experimentů

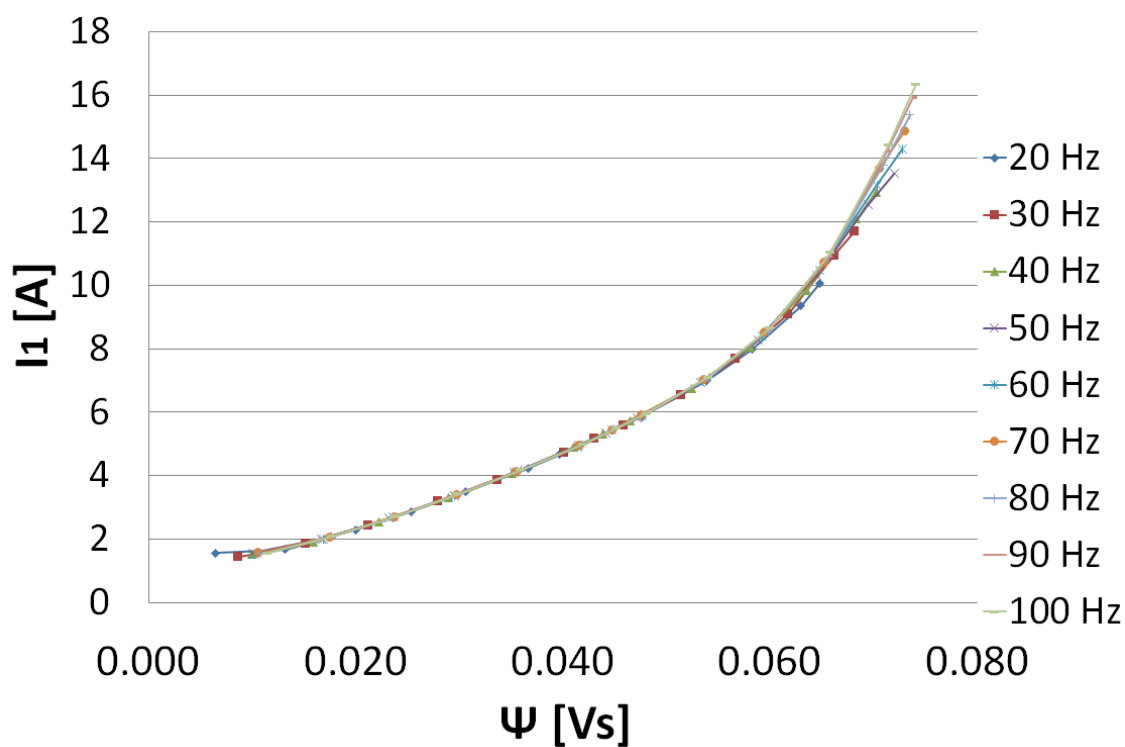
Měřicí pracoviště bylo nastaveno tak, aby provádělo testy při chodu naprázdno. Pro získání naměřených dat s různými kombinacemi frekvence a spáženého toku je nutné použití napájecího zdroje s možností nezávislé regulace výstupního napětí a frekvence. K měření potřebných elektrických veličin, jako je napětí U_1 , proud I_1 , výkon P_1 , kmitočet f_1 a účinník $\cos\phi$, byl použit přesný digitální wattmetr od společnosti Yokogawa = Yokogawa WT1800. Na motor bylo přiděleno teplotní čidlo, které umožnilo korigovaný odpor statorového vinutí podle postupu v kapitole 4.2. Všechna data byly zaznamenávány na počítač pomocí softwarového vybavení s použitím měřicích karet.

Měření bylo prováděno v rozsahu frekvencí od 20 do 100 Hz s krokem 10 Hz. Nastavením hodnot napětí a frekvence byly získány a zaznamenány všechny potřebné hodnoty pro identifikaci parametrů asynchronního motoru při chodu naprázdno.

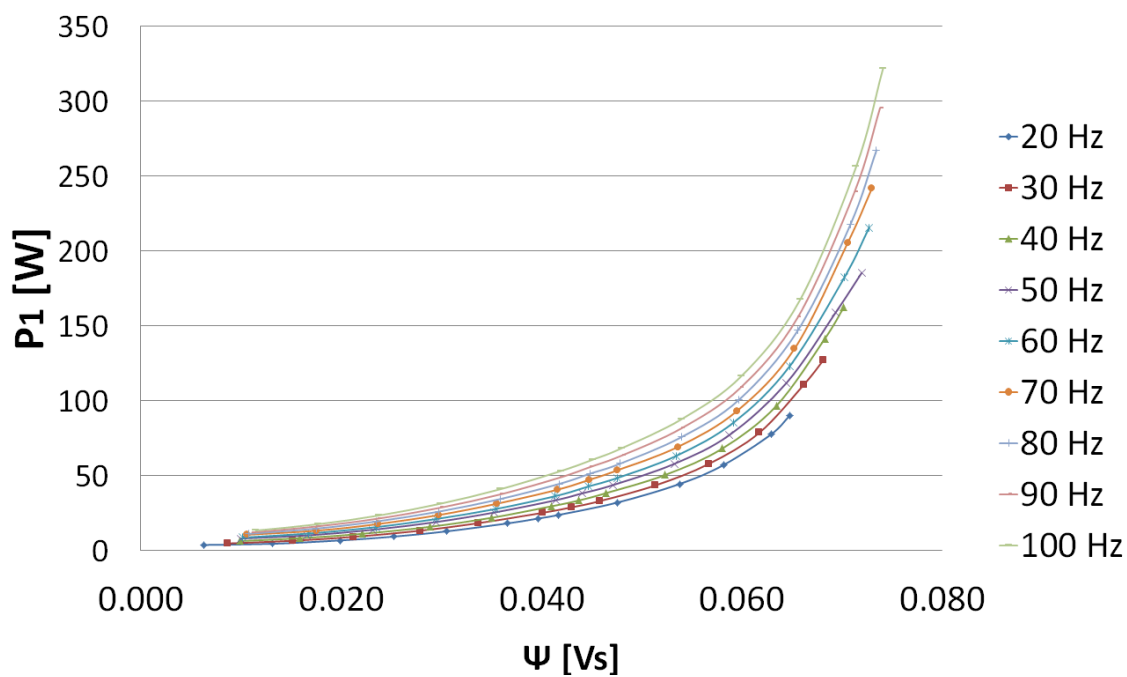
Měření napětí bylo prováděno v rozsahu od 20% do 125% jmenovité hodnoty. Před samotným měřením bylo nutné pečlivě zvolit hodnoty napětí pro každou frekvenci tak, aby byl dodržen konstantní poměr mezi napětím a frekvencí (U/f). Tento krok byl nezbytně nutný pro udržování správného provozu a dosažení optimálního výkonu asynchronního motoru. Pro náš konkrétní případ byl tento poměr roven 0.2702 [V/Hz]. Zpracování a využití naměřených dat budou ukázána v následujících kapitolách.



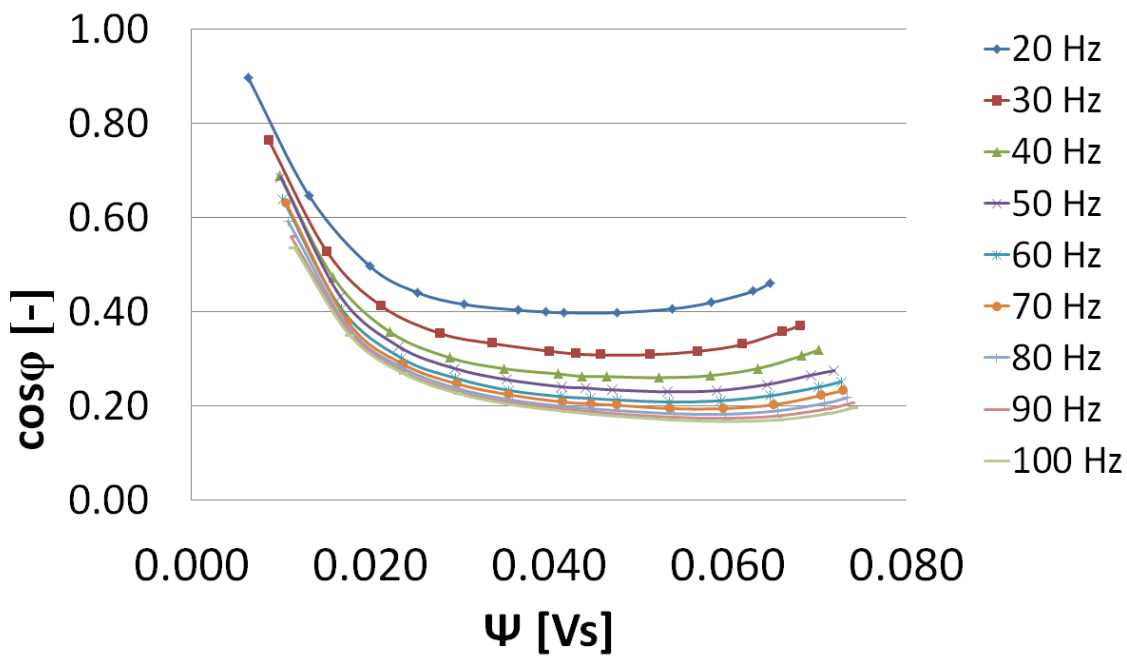
Obr. 4.2: Závislost napětí na spřaženém toku.



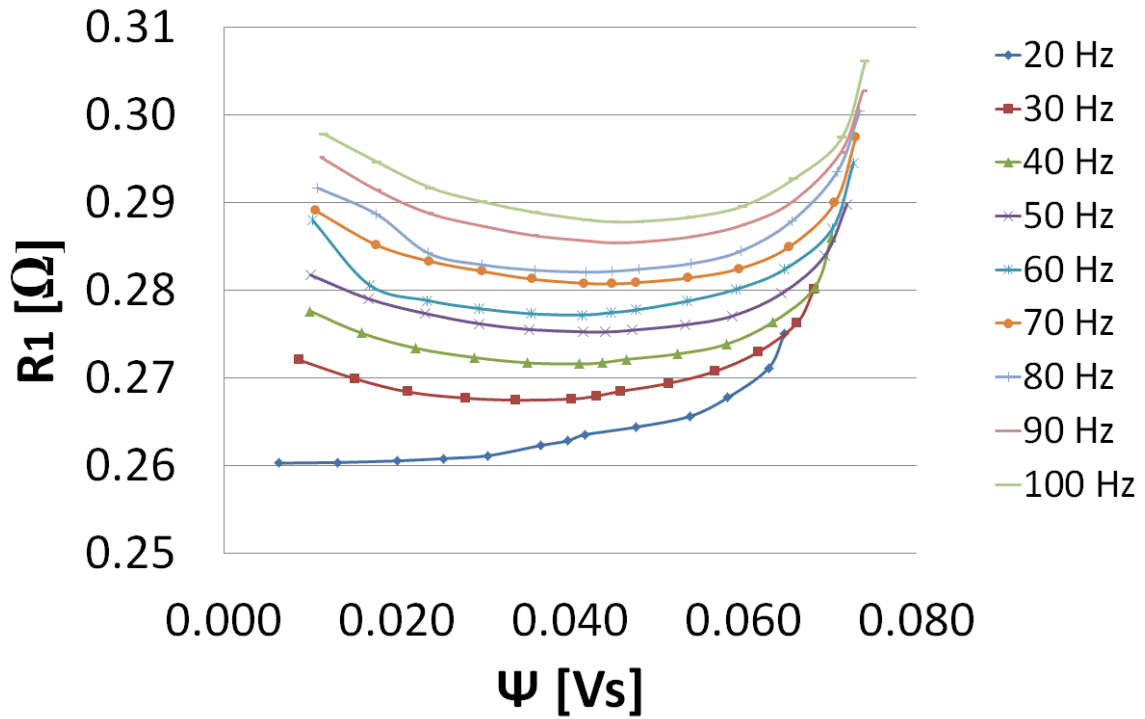
Obr. 4.3: Závislost proudu na spřaženém toku.



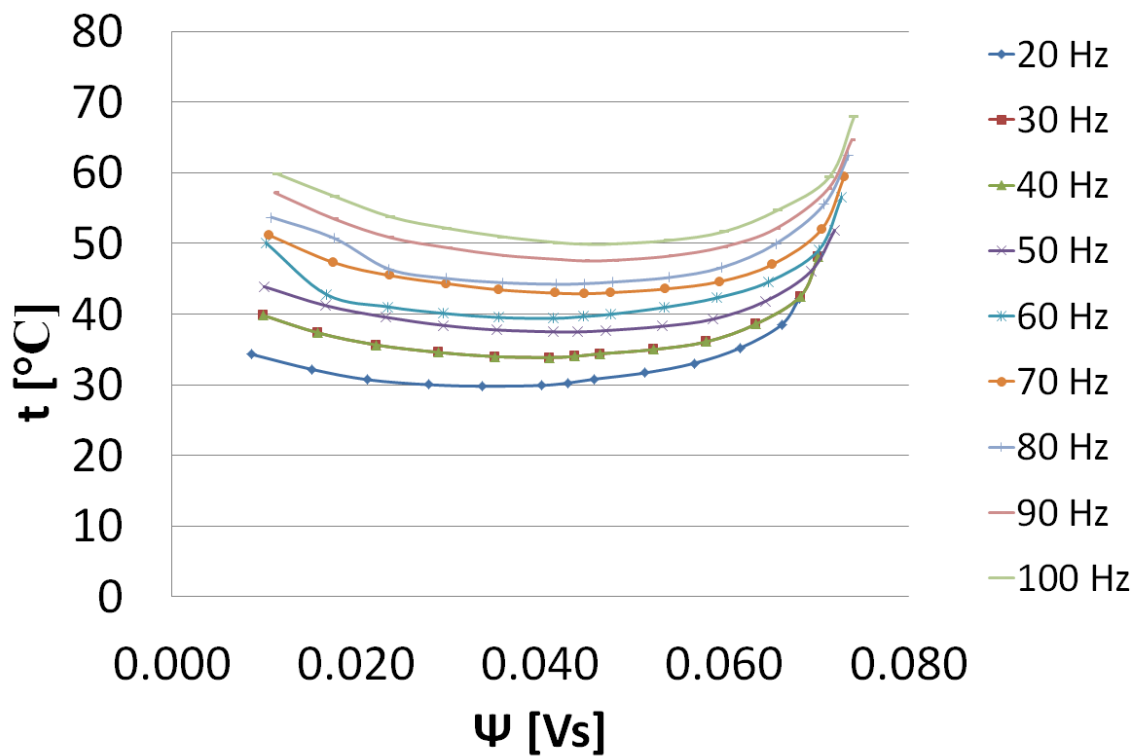
Obr. 4.4: Závislost příkonu na spřaženém toku.



Obr. 4.5: Závislost účinníku na spřaženém toku.



Obr. 4.6: Závislost statorového odporu na spřaženém toku.



Obr. 4.7: Závislost teploty vinutí na spřaženém toku.

4.3.2 Identifikace mechanických ztrát a ztrát v železe

Jak už bylo ukazáno v kapitole 3.5.2 ztráty v asynchronním motoru se skládají z Joulevých ztrát ΔP_{J10} , mechanických ztrát ΔP_{Mech} a ztrát v železe ΔP_{Fe} .

$$P_1 = \Delta P_{J10} + \Delta P_{Mech} + \Delta P_{Fe} \quad (4.1)$$

Tuto rovnici je možné upravit do jednoduššího tvaru, ve kterém jsou na jedné straně budou známé veličiny a na druhé straně neznámé veličiny, což nám umožňuje vyjádřit součet mechanických ztrát a ztrát v železe.

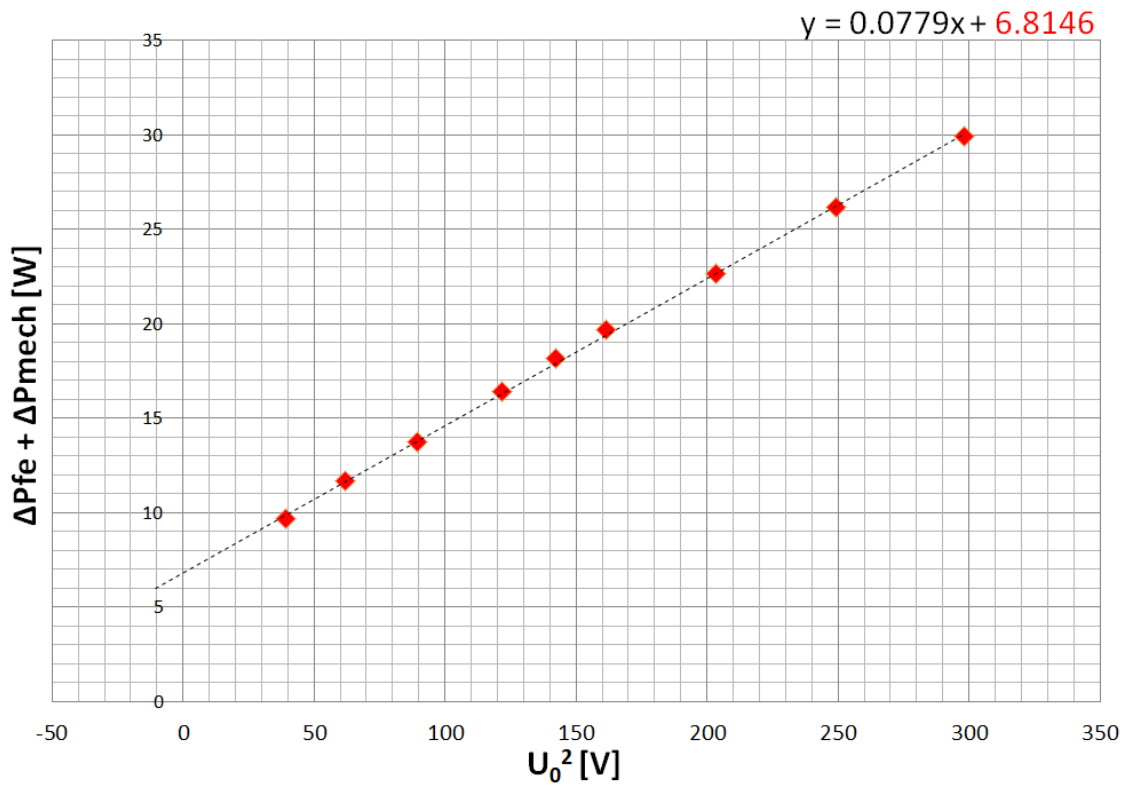
$$P_1 - 3RI^2 = \Delta P_{Mech} + \Delta P_{Fe} \quad (4.2)$$

Ztráty v železe a mechanické ztráty lze vyjádřit pomocí různých koeficientů ($k_h, k_v, k_f, k_w, n^{nh}$).

$$P_1 - 3RI^2 = \Delta P_{Mech} + \Delta P_{Fe} = k_h f_1 \Psi^{nh} + k_v f_1^2 \Psi^2 + k_f \frac{2\pi}{p} f_1 + k_w \frac{8\pi^3}{p^3} f_1^3 \quad (4.3)$$

V současné době postup stanovení jednotlivých koeficientů podle rovnice (4.3) se považuje za pokročilý a identifikace koeficientů z rovnice (3.22) je považována za normu. V této rovnici je prostřednictvím jenom 3 koeficientů (k_h, k_v, n^{nh}) identifikovány pouze ztráty v železe. V rámci této kapitoly se budeme zabývat identifikací mechanických ztrát ΔP_{Mech} pomocí pokročilého postupu a postupu podle normy. Následně porovnáme tyto metody v závislosti na otáčkách $\Delta P_{Mech} = \Delta P_{Mech}(n)$ a zjistíme, která metoda je přesnější.

Prvním krokem při identifikaci koeficientů podle normy je výpočet ztrát v železe. Tento výpočet lze provést pomocí grafického postupu, kdy závislost součtu mechanických ztrát a ztrát v železe je vykreslena v závislosti na druhé odmocnině napětí U_0^2 . Napětí se vypočítá podle rovnice (3.25), která je uvedena v kapitole 3.5.3. Po získání hodnot součtu ztrát mechanických a ztrát v železe pro různé hodnoty napětí U_0 je nutné extrapolovat tyto hodnoty do nulového napětí. Extrapolace se provádí pomocí lineárního přiblížení, které umožňuje odhadnout hodnoty ztrát při nulovém napětí. Po extrapolaci hodnot je nutné výsledky proložit lineární křivkou, která přesněji popisuje závislost ztrát na napětí. Z této křivky je možné odečíst hodnotu mechanických ztrát pro každou hodnotu frekvence. Hodnoty získané součtem celkových mechanických ztrát a ztrát v železe je důležité upravit o mechanické ztráty, které byly extrapolovány. V této fázi se zaměřujeme pouze na ztráty v železe a vynecháváme mechanické ztráty. Tímto způsobem získáme přesnější hodnoty ztrát v železe, které následně využijeme pro identifikaci koeficientů. Tímto postupem jsme schopni získat přesnější odhady ztrát v železe a vyhodnotit jejich závislost na frekvenci. Obrázek (4.8) znázorňuje tento postup pro frekvenci 60 Hz, kde červenou barvou označeny odečtené mechanické ztráty.



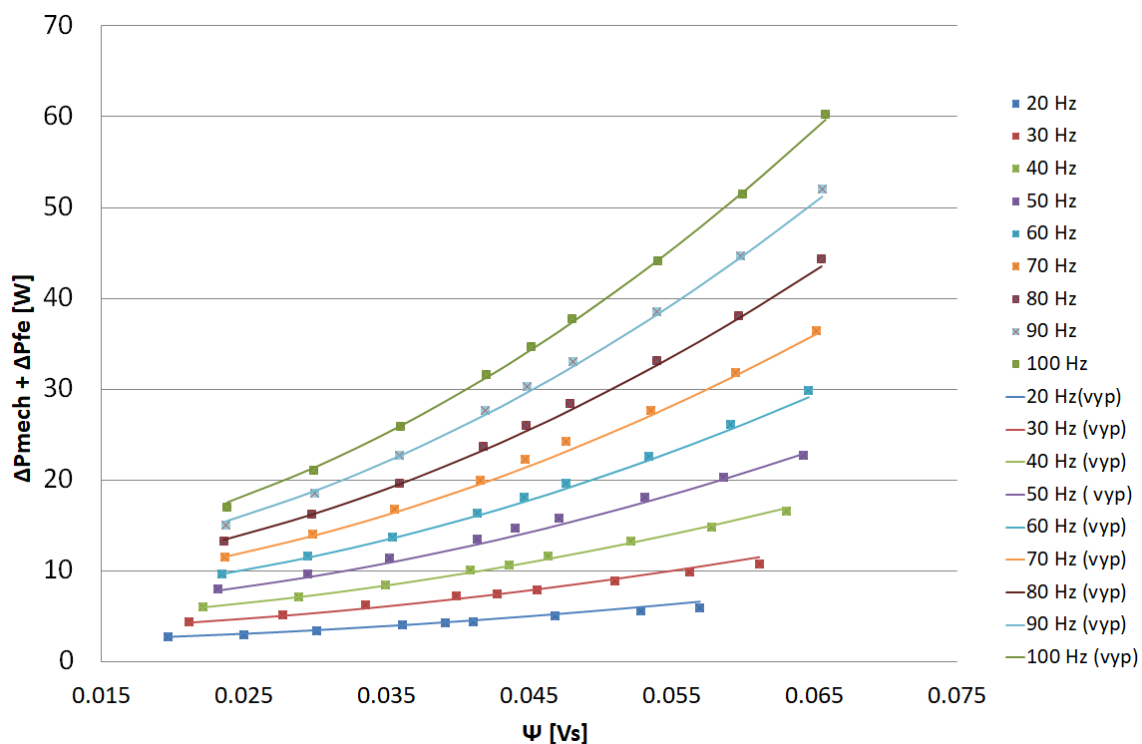
Obr. 4.8: Závislost součtu mechanických ztrát a ztrát v železe na napětí pro 60 Hz .

Pro identifikaci jednotlivých koeficientů, jako jsou k_h , k_v , k_f , k_w , n^{th} , na základě měřených dat s různými kombinacemi statorového kmitočtu je vhodné využití softwaru Matlab. Tento software nám umožňuje aproximovat rovnice (3.22) a (4.3) a získat tak jednotlivé koeficienty. Pro identifikaci koeficientů jsou v Matlabu dostupné dva způsoby. Prvním způsobem je použití příkazu „cftool“, který umožňuje importovat data (Ψ , f a P_{Fe}) z Excelu a přiřadit jim hodnoty X, Y a Z. Poté lze tato data vložit do otevřeného okna „Curve Fitting Toolbox“ a v položce „Custom equation“ zadat rovnice (3.22) a (4.3). Tato funkce nám umožní hledání hodnot koeficientů tak, aby co nejlépe odpovídaly měřeným datům. Druhým způsobem je možnost využití funkce „lsqnonlin()“, která umožňuje aproximaci parametrů rovnic pomocí metody nejmenších čtverců. Výsledné hodnoty identifikovaných koeficientů pro náš asynchronní motor jsou uvedeny v Tab.4.4

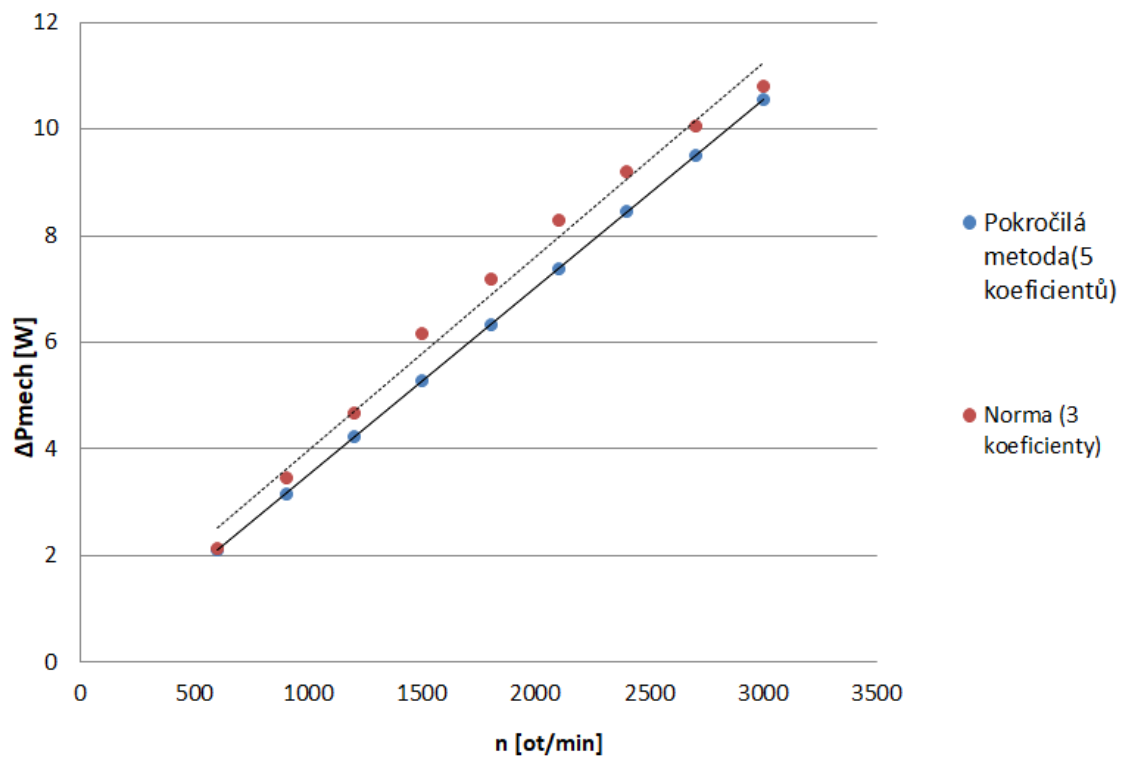
Tab. 4.4: Výsledné hodnoty identifikovaných koeficientů.

Koeficient	Pokročilá metoda	Norma
Koeficient hysterezních ztrát k_h	37.75 [W · s · T ^{-n_h}]	45.55 [W · s · T ^{-n_h}]
Exponent hysterezních ztrát n_{nh}	1.85	1.959
Koeficient vířivých ztrát k_h	0.5668 [W · s · T ⁻²]	0.6356 [W · s · T ⁻²]
Koeficient třecích ztrát k_f	0.03362 [W · s · rad ⁻¹]	-
Koeficient ventilačních ztrát k_w	1.83E-10 [W · s ³ · rad ⁻³]	-

Pomocí dosazených koeficientů jsme provedli zpětný výpočet hodnot mechanických ztrát a součtu ztrát mechanických a ztrát v železe. Tyto hodnoty jsme následně vykreslili v závislosti na otačkách ($\Delta P_{\text{Mech}} = \Delta P_{\text{Mech}}(n)$) a spřaženem toku a kmitočtu ($\Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{mech}} = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{mech}}(f, \Psi)$). Na Obr.4.9 je vidět srovnání naměřených a vypočítaných hodnot. Z výsledků je patrné, že vypočítané hodnoty jsou velmi blízké naměřeným, což naznačuje, že tato metoda je vhodná pro přesnou identifikaci ztrát. Na Obr.4.10 je zobrazena závislost mechanických ztrát získaných pomocí pokročilé metody a ztrát získaných podle normy. Z výsledků je zřejmé, že hodnoty mechanických ztrát stanovené pomocí pokročilé metody jsou přesnější než hodnoty stanovené podle normy, které vykazují významné odchylky. Na základě těchto závěrů můžeme konstatovat, že pokročilá metoda je přesnější a lepší pro identifikaci ztrát. Tento pokročilý postup nám umožňuje získat detailnější a spolehlivější informace o mechanických ztrátách a ztrátách v železe v analyzovaném systému. Na základě výsledků lze tedy doporučit využití pokročilé metody identifikace ztrát při podobných analýzách. Podobný postup je možné nalézt v [8]



Obr. 4.9: Srovnání měřených hodnot součtu mechanických ztrát a ztrát v železe s jejich výpočítanými hodnotami



Obr. 4.10: Závislost mechanických ztrát na otáčkách při použití různých postupů

4.3.3 Identifikace odporu reprezentujícího ztráty v železe

Identifikace odporu reprezentujícího ztráty v železe, také probíhá pomocí koeficientů identifikovaných v předchozí kapitole. Na začátku je nezbytné vyjádřit závislost mezi odporem reprezentujícím ztráty v železe a samotnými ztrátami v železe. Tento odpor lze identifikovat pomocí rovnice (4.4).

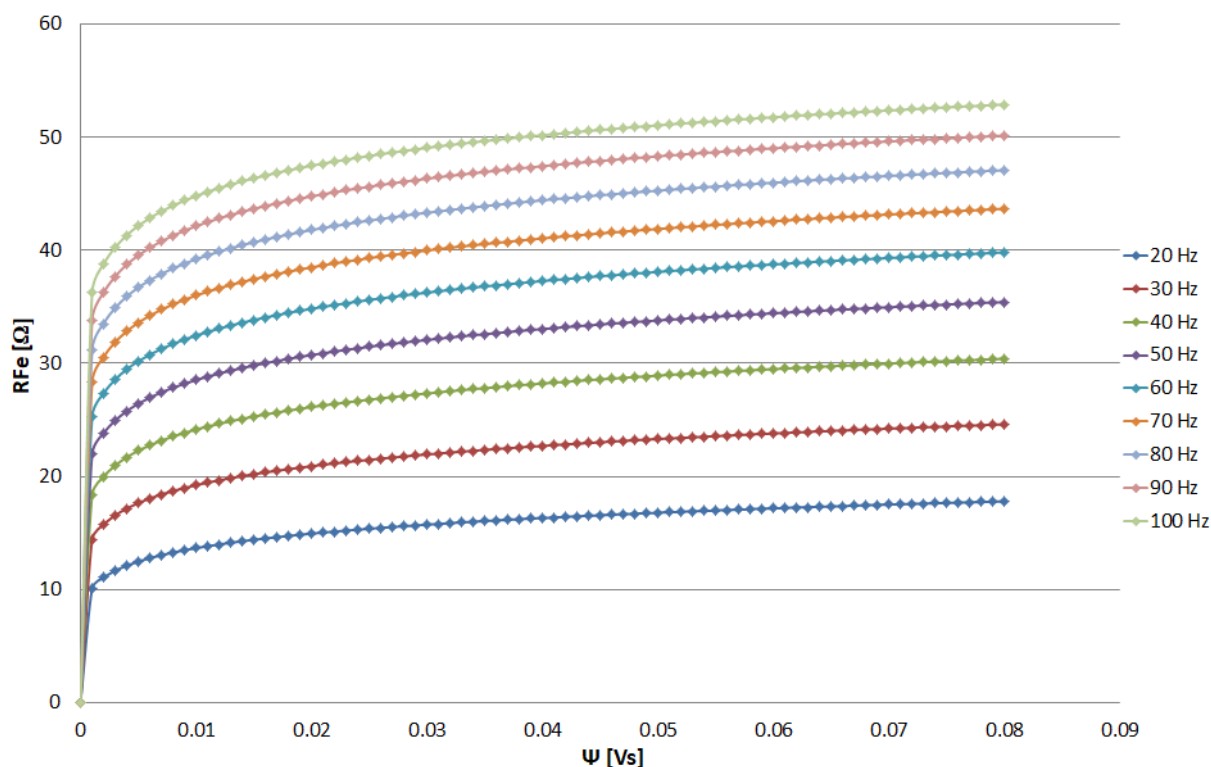
$$R_{Fe} = \frac{m_1 U_0^2}{\Delta P_{Fe}} \quad (4.4)$$

Rovnici (4.4) lze upravit tak, aby umožnila identifikaci odporu reprezentujícího ztráty v železe pomocí koeficientů

$$R_{Fe} = \frac{m_1 U_0^2}{k_h f_1 \Psi^{n_h} + k_v f_1^2 \Psi^2} = \frac{2m_1 \pi^2}{k_h f_1^{-1} \Psi^{(n_h-2)} + k_v} \quad (4.5)$$

Pro identifikaci hodnot R_{Fe} pro různé frekvence v závislosti na spřaženém toku, postupujeme následovně. Nejprve je nutné použít rovnici (4.5) a provést výpočet hodnot R_{Fe} pro rozmezí spřaženého toku od 0 do 0.08 s krokem 0.001. Toto rozmezí bylo zvoleno s ohledem na fakt, že vyšší hodnoty spřaženého toku již by způsobily přesycení motoru. Rozsah spřaženého toku, ve kterém se provádí identifikace hodnot R_{Fe} , je specifický pro každý konkrétní motor a závisí na jeho parametrech. Některé motory mohou vykazovat odlišný rozsah spřaženého toku vzhledem k jejich specifickým vlastnostem, konstrukci nebo provozním podmínkám. Proto je důležité brát v úvahu konkrétní charakteristiky daného motoru při určování optimálního rozsahu spřaženého toku pro identifikaci hodnot R_{Fe} .

Po provedení výpočtu byla obdržena sada naměřených hodnot R_{Fe} , které jsou závislé na spřaženém toku. Abychom tuto závislost vizualizovali, byl vytvořen graf, kde na ose Ψ zobrazeny hodnoty spřaženého toku a na ose R_{Fe} zobrazeny hodnoty odporu reprezentujícího ztráty v železe. Tento graf nám umožní vizuálně analyzovat závislost mezi hodnotami R_{Fe} , spřaženým tokem a kmitočtem. Na Obr.4.11 lze vidět tuto závislost.



Obr. 4.11: Závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na spřaženém toku a kmitočtu

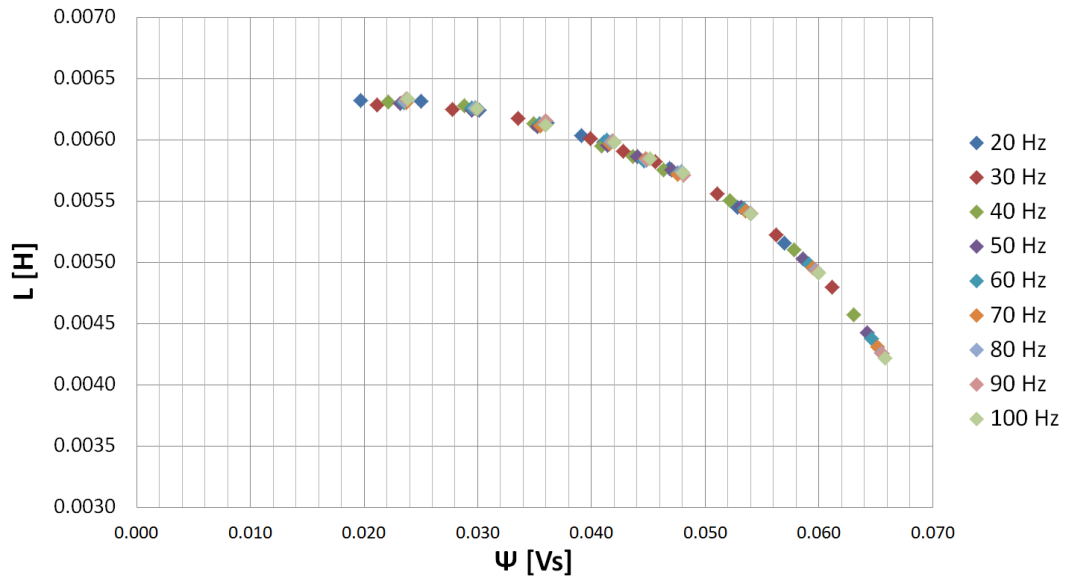
4.3.4 Identifikace magnetizační indukčnosti

V této části bakalářské práce se zaměřujeme na identifikaci magnetizační indukčnosti pomocí postupu, který jsme popsali v předchozí kapitole věnované magnetizační indukčnosti (3.5.3). Identifikace tohoto parametru se vychází ze zjednodušeného náhradního zapojení, které je znázorněno na Obr.3.3. Pro tento účel využíváme naměřené data z testů prováděných naprázdno, abychom ověřili naše dřívější tvrzení, že magnetizační indukčnost nezávisí na satorovém kmitočtu.

Z naměřených hodnot podle vztahu (3.26) byly vypočítány hodnoty L_{μ} a pak byla vykreslena závislost na spřaženém toku. Výsledky této závislosti jsou prezentovány na obrázcích (4.12) a (4.13). Z těchto obrázků je patrné, že magnetizační indukčnost skutečně závisí na hodnotě spřažného toku, avšak není ovlivněna frekvencí satoru. Do Obr.4.13 pro lepší přehlednost byla přidána trendová křivka, která byla proložena polynomem pátého řádu. Tato křivka je reprezentována přerušovanou červenou čarou. Přerušovaná modrá čára v daném obrázku znázorňuje konečný průběh, kde hodnoty do $\Psi_{L_{\mu, \max}}$ jsou považovány za konstantní a hodnoty po $\Psi_{L_{\mu, \max}}$ představují hodnoty magnetizační indukčnosti s konstantní strmostí.

Hodnoty L_{μ} byly vypočítány v rozsahu od 40 do 110% jmenovité hodnoty napětí.

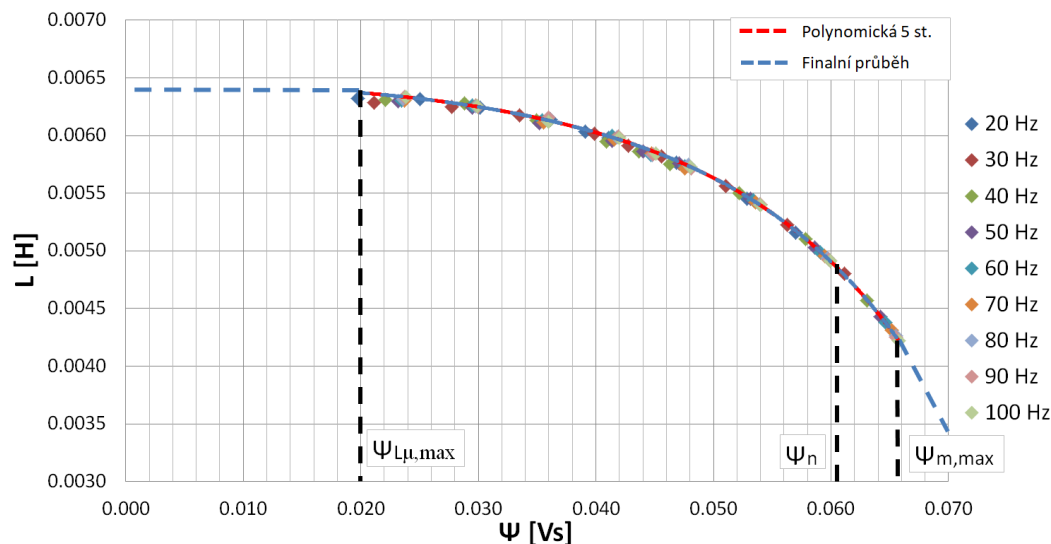
Je však důležité poznamenat, že při použití ještě širšího rozsahu hodnot spřaženého toku bychom se dostali do oblasti, kde by docházelo k poklesu hodnot magnetizační indukčnosti. Z tohoto důvodu v této práci považujeme hodnoty do $\Psi_{L_{\mu,\max}}$ za konstantní. Na Obr. 4.13 byly znázorněny důležité hodnoty spřaženého toku, kde $\Psi_{L_{\mu,\max}}$ je maximální hodnota magnetizační indukčnosti, Ψ_n je jmenovitá hodnota spřaženého toku a $\Psi_{L_{m,\max}}$ je maximální hodnota spřaženého toku.



Obr. 4.12: Závislost magnetizační indukčnosti na spřaženém toku

Pro analýzu trendu byla použita rovnice polynomického trendu pátého řádu. Tato rovnice může být přepsána do tvaru využívajícího šest koeficientů, které jsou shrnuty v Tab.4.5

$$L_{\mu} = \sum_{i=0}^5 a_i \Psi^i = a_5 \Psi^5 + a_4 \Psi^4 + a_3 \Psi^3 + a_2 \Psi^2 + a_1 \Psi^1 + a_0 \Psi^0 \quad (4.6)$$



Obr. 4.13: Závislost magnetizační indukčnosti na spřaženém toku a kmitočtu

Tab. 4.5: Koeficienty polynomu pro výpočet závislosti magnetizační indukčnosti na spřaženém toku.

Koeficient	Hodnota
a_0	0.0056 [H]
a_1	0.0606 [$\frac{\text{H}}{\text{V}\cdot\text{s}}$]
a_2	-0.8015 [$\frac{\text{H}}{\text{V}^2\cdot\text{s}^2}$]
a_3	-44.9586 [$\frac{\text{H}}{\text{V}^3\cdot\text{s}^3}$]
a_4	1231.6975 [$\frac{\text{H}}{\text{V}^4\cdot\text{s}^4}$]
a_5	-9869.7251 [$\frac{\text{H}}{\text{V}^5\cdot\text{s}^5}$]

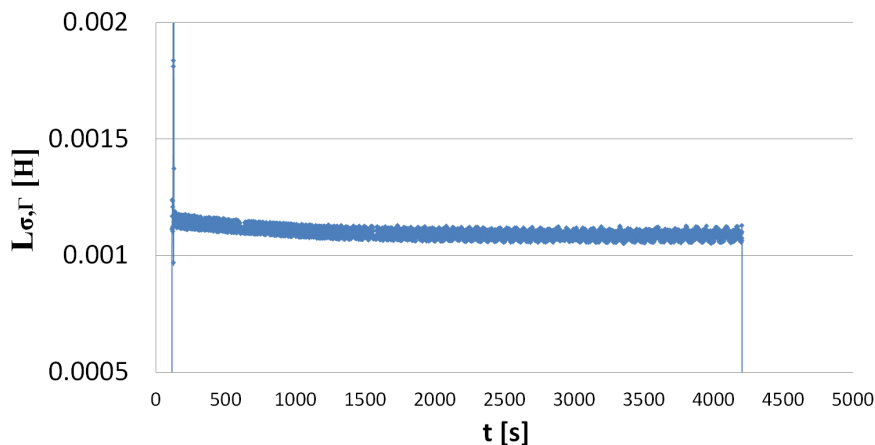
4.4 Zkouška nakrátko

Zkouška nakrátko byla prováděna tak, že rotor byl spojen nakrátko. Měření bylo provedeno pro tři různé hodnoty kmitočtu: 50, 25 a 16 Hz. Toto bylo provedeno z důvodu, že vybraná metoda z kapitoly 3.7 vyžadovala měření při nižších frekvencích. Hodnoty napětí, proudu, výkonu, účinníku, frekvence a také skutečné teploty byly zaznamenány do počítače. Následně naměřené hodnoty byly využity pro experimentální identifikaci parametrů v příslušné kapitole 5.

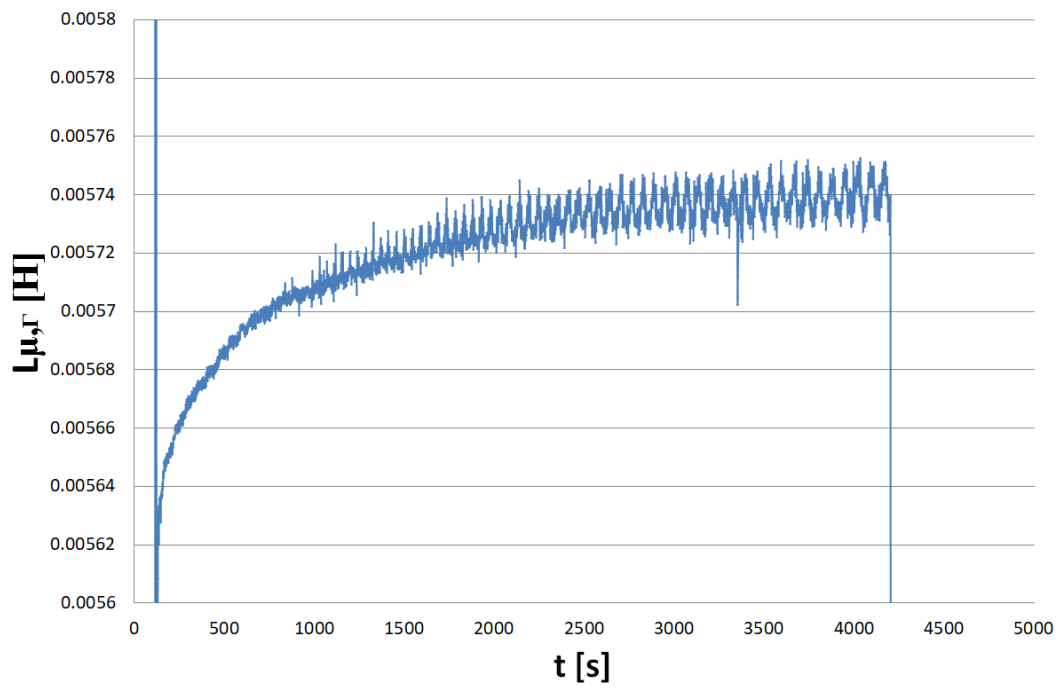
4.5 Zkouška při zatížení

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, zkouška při zatížení je alternativou zkoušky nakrátko, ale její výhoda spočívá v tom, že umožňuje měřit hodnoty v blízkosti jmenovitého proudu a obdržené hodnoty $R_{2,\Gamma}$ a $X_{\sigma,\Gamma}$ budou co nejvíce odpovídat skutečným parametrům.

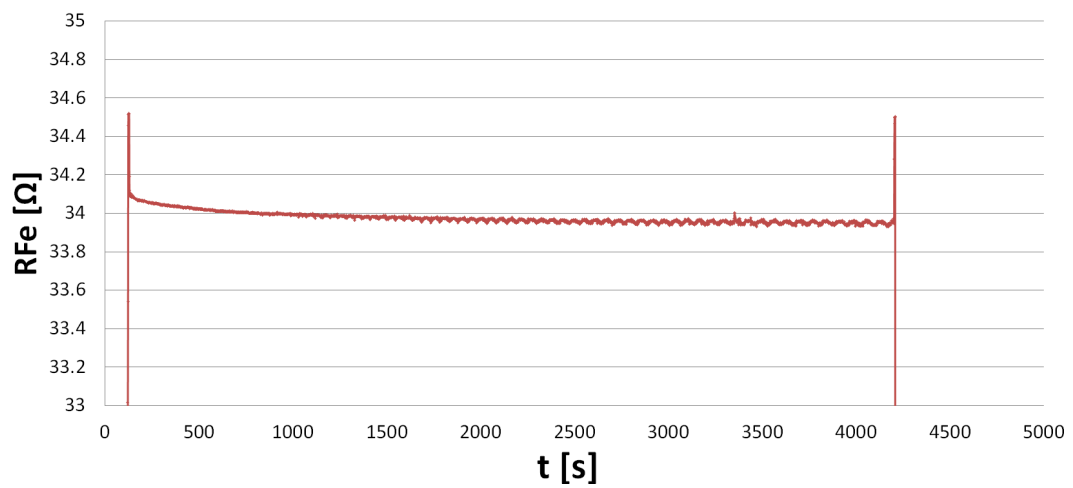
Provedení měření probíhalo následujícím způsobem: Nejprve bylo pracoviště nastaveno tak, aby motor byl zabrzděn. Poté byl motor spuštěn a nechán rozběhnout se do ustáleného stavu. Měření samotné se provádělo při jmenovitém zatížení kolem hodnoty 9,5 A. Po dosažení ustáleného stavu byly odečteny naměřené hodnoty a zjištěny potřebné parametry, které jsou popsány v kapitole 3.5.4. Z uvedených vztahů vyplývá nutnost použití hodnot z měření naprázdno (R_{Fe} , $X_{\mu,\Gamma}$) a statorového odporu R_1 , který byl upraven v závislosti na teplotě při měření při zatížení. Hodnota R_{Fe} byla stanovena pomocí příslušné rovnice (4.5) pomocí dříve zjištěných koeficientů, zatímco magnetizační indukce byla určena pomocí polynomu a jeho koeficientů, viz Tab.4.5 a rovnice (4.6), které byly následně přepočítány na požadovanou hodnotu reaktance $X_{\mu,\Gamma}$. Grafy závislostí jednotlivých parametrů na čase jsou zobrazeny na Obr (4.14) až (4.17). Získané parametry budou dále využity k úplné identifikaci parametrů náhradního zapojení ve formě Γ -článku, jak je popsáno v kapitole 5.3.



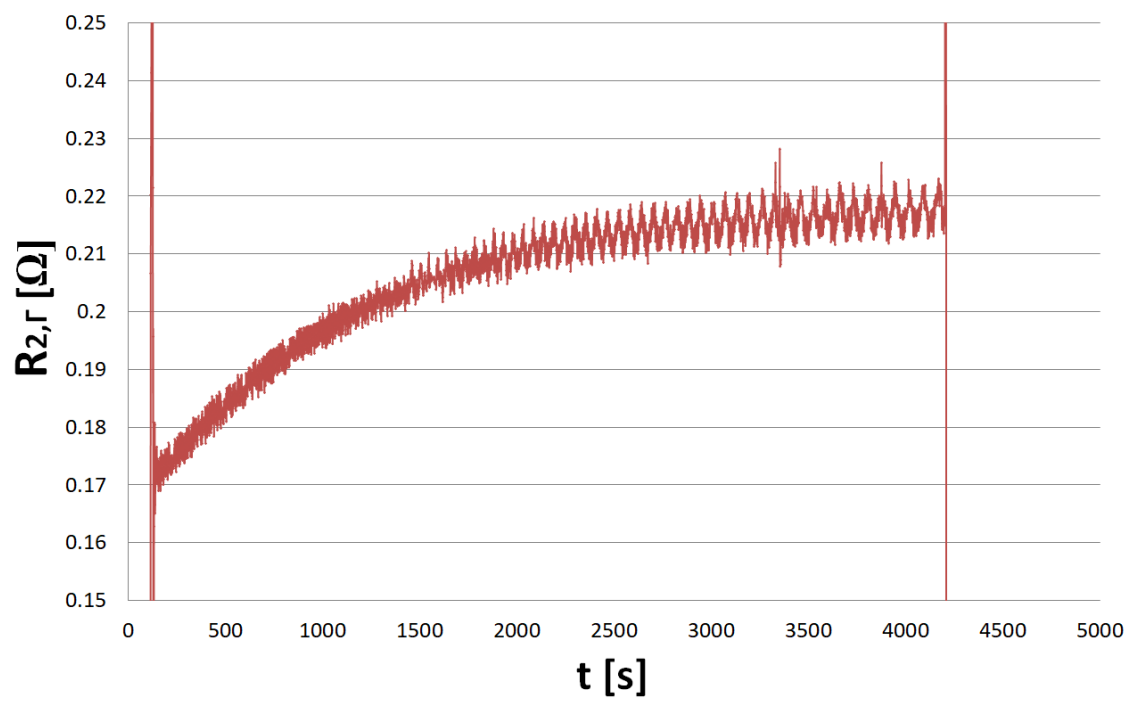
Obr. 4.14: Závislost rozptylové indukčnosti na čase



Obr. 4.15: Závislost magnetizační indukčnosti na čase



Obr. 4.16: Závislost odporu reprezentujícího ztráty v železe na čase



Obr. 4.17: Závislost rotorového odporu na čase

5 Experimentální identifikace parametrů asynchronního motoru

V této kapitole se zaměřujeme na experimentální identifikační metody, které nám umožňují získat přesné hodnoty parametrů motoru z testů a měření. Každá z těchto metod využívá měření a testy, jako jsou testy naprázdno, nakrátko a při zatížení, které umožňují získání konkrétních parametrů. V následující části této kapitoly probereme různé metody pro určování parametrů asynchronního motoru a ukážeme, jak je použít v našem experimentu. Data budou prozkoumána, výsledky budou diskutovány a případné závislosti budou identifikovány. V další části budou výsledky získané různými metodami vzájemně porovnány.

5.1 Klasická metoda identifikace parametrů T-článku

Postup identifikace této metody je popsán v kapitole 3.6. Metoda identifikuje parametry nahradního zapojení ve tvaru T-článku, který je zobrazen na Obr.2.1 Tato metoda je však považována za zjednodušenou ve srovnání s ostatními. Obsahuje několik předpokladů, například předpoklad, že hodnoty reaktance rozptylu na primární a sekundární straně jsou stejné. Navíc, na rozdíl od metod, které budou dále popsány, tato metoda zanedbává odpor R_{Fe} . Pro danou metodu byly použité hodnoty, viz Tab.5.1

Výpočet provedený v této části byl proveden pro hodnoty, které nejvíce odpovídají hodnotám jmenovitého proudu (9.5 A).

Tab. 5.1: Naměřené hodnoty ze zkoušky naprázdno a zkoušky nakrátko nejvíce odpovídající hodnotám jmenovitého proudu.

Parametr	Naměřená hodnota
U_0	14.08 [V]
I_0	9.29 [A]
P_0	94.57 [W]
U_{1k}	5.21 [V]
I_{1k}	9.5 [A]
P_{1k}	124.09 [W]
R_1	0.2784 [Ω]

Výpočet:

$$\begin{aligned}
 Z_0 &= \frac{U_0}{I_0} = \frac{14.08}{9.29} = 1.5156 \text{ } [\Omega] \\
 R_0 &= \frac{P_0}{3I_0^2} = \frac{94.57}{3 \cdot 9.29^2} = 0.3653 \text{ } [\Omega] \\
 X_0 &= \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{1.5156^2 - 0.3653^2} = 1.4709 \text{ } [\Omega] \\
 Z_{1k} &= \frac{U_{1k}}{I_{1k}} = \frac{5.21}{9.5} = 0.5484 \text{ } [\Omega] \\
 R_{1k} &= \frac{P_{1k}}{3I_{1k}^2} = \frac{124.09}{3 \cdot 9.5^2} = 0.4583 \text{ } [\Omega] \\
 X_{1k} &= \sqrt{Z_{1k}^2 - R_{1k}^2} = \sqrt{0.5484^2 - 0.4583^2} = 0.3012 \text{ } [\Omega] \\
 R_{2,T} &= R_{1k} - R_1 = 0.4583 - 0.2784 = 0.1799 \text{ } [\Omega] \\
 X_{\sigma_1,T} &= X_{\sigma_2,T} = \frac{X_{1k}}{2} = \frac{0.3012}{2} = 0.1506 \text{ } [\Omega] \\
 X_{\mu,T} &= X_0 - X_{\sigma_1,T} = 1.4709 - 0.1506 = 1.3203 \text{ } [\Omega]
 \end{aligned}$$

V naší práci se zaměřujeme především na hodnoty indukčnosti, proto budeme převádět hodnoty reaktance na hodnoty indukčnosti. K převodu těchto dat lze použít vztah

$$L = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (5.1)$$

Všechny zjištěné hodnoty jsou shrnuty v Tab.5.2 V následujících kapitolách budou tato data použita k porovnání s jinými metodami.

Tab. 5.2: Výsledné hodnoty identifikované klasickým postupem pro nahradní zapojení ve tvaru T-článku

Parametr	Výpočitaná hodnota
$X_{\sigma_1,T}$	0.1506 $[\Omega]$
$X_{\sigma_2,T}$	0.1506 $[\Omega]$
$X_{\mu,T}$	1.3203 $[\Omega]$
$L_{\sigma_1,T}$	0.0004794 $[H]$
$L_{\sigma_2,T}$	0.0004794 $[H]$
$L_{\mu,T}$	0.004203 $[H]$
$R_{2,T}$	0.1799 $[\Omega]$
R_{Fe}	– $[\Omega]$

5.2 Identifikace parametrů asynchronního motoru podle normy IEEE

Tato část práce bude zaměřena na identifikace parametrů asynchronního motoru pomocí postupu, který je popsán v kapitole 3.7 věnované identifikaci parametrů podle standardu IEEE. Pro porovnání výpočtu pomocí této metody budou využita stejná naměřená data při 50 Hz jako při měřeních z předchozí kapitoly 5.1, viz Tab.5.1. Tato metoda vyžaduje provedení měření nakrátko při nižších hodnotach kmitočtu, proto byly provedeny zkoušky při frekvencích 25 Hz a 16 Hz. Hodnoty získané ze zkoušky naprázdno byly použity pro všechny případy pouze pro kmitočet 50 Hz. Naměřená data pro všechny hodnoty kmitočtu, které budou použity pro experimentální výpočet, jsou uvedena v Tab 5.3. Pro ilustraci provedeme výpočet pro naměřené hodnoty při frekvenci 50 Hz a za předpokladu, že $X_{\sigma_1,T} = X_{\sigma_2,T}$.

Tab. 5.3: Naměřené hodnoty ze zkoušky naprázdno a zkoušky nakrátko nejvíc odpovídající hodnotám jmenovitého proudu při různých frekvencích

Naměřený parametr	50 Hz	25 Hz	16 Hz
U_0	14.08 [V]	-	-
I_0	9.29 [A]	-	-
P_0	94.57 [W]	-	-
P_{Fe}	15.148 [W]	-	-
U_{1k}	5.21 [V]	4.73 [V]	4.68 [V]
I_{1k}	9.5 [A]	9.51 [A]	9.51 [A]
P_{1k}	124.09 [W]	121.46 [W]	118.61 [W]
R_1	0.3187 [Ω]	0.3187 [Ω]	0.3187 [Ω]
$\cos\phi$	0.835 [-]	0.900 [-]	0.891 [-]

Výpočet:

$$Q_0 = \sqrt{(mU_0I_0)^2 - P_0^2} = \sqrt{(3 \cdot 14.08 \cdot 9.29)^2 - 94.57^2} = 380.84 \text{ [Var]}$$

$$Q_{1k} = \sqrt{(mU_{1k}I_{1k})^2 - P_{1k}^2} = \sqrt{(3 \cdot 5.21 \cdot 9.5)^2 - 124.09^2} = 81.54 \text{ [Var]}$$

Pro další výpočet byly zvoleny počáteční hodnoty rozptylové indukčnosti $X_{\sigma_1,T}$ a poměru $\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}$. Poměr byl zvolen $\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}} = 1$. Počáteční hodnotu $X_{\sigma_1,T}$ lze zvolit podle vztahu

$$X_{\sigma_1,T} = \frac{U_{1k} \cdot \sin\phi}{2 \cdot I_{1k}} = \frac{5.21 \cdot \sin(33.27)}{2 \cdot 9.5} = 0.1504 \text{ } [\Omega] \quad (5.2)$$

Nyní je možné přejít k iteračnímu řešení, kde hledáme parametry $X_{\sigma_1,T}$ a $X_{\mu,T}$. Prvním krokem iterace je:

$$X_{\mu,T} = \frac{mU_0^2}{Q_0 - mI_0^2 X_{\sigma_1,T}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right)^2} = \frac{3 \cdot 14.08^2}{380.84 - 3 \cdot 9.29^2 \cdot 0.1504} \cdot \frac{1}{(1+1)^2} = 0.43488 \quad [\Omega]$$

$$X_{1k} = \frac{Q_{1k}}{mI_{1k}^2 \left[1 + \left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right) + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right]} \cdot \left[\left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right) + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right] = \frac{81.54}{3 \cdot 9.51^2 [1 + 1 + 1]} \cdot [1 + 1] = 0.200353 \quad [\Omega]$$

$$X_{\sigma_1,T} = \frac{f}{f_{1k}} \cdot X_{1k} = \frac{50}{50} \cdot 0.200353 = 0.200353 \quad [\Omega]$$

Druhý krok iterace je prováděn podle postupu uvedeného v kapitole 3.7, kde jsou parametry $X_{\sigma_1,T}$ a $X_{\mu,T}$ vypočítávány pomocí stejných rovnic, ale s dosazením hodnot, které již byly získány v prvním kroku.

$$X_{\mu,T} = \frac{mU_0^2}{Q_0 - mI_0^2 X_{\sigma_1,T}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right)^2} = \frac{3 \cdot 14.08^2}{380.84 - 3 \cdot 9.29^2 \cdot 0.200353} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{0.200353}{0.43488}\right)^2} = 0.8468 \quad [\Omega]$$

$$X_{1k} = \frac{Q_{1k}}{mI_{1k}^2 \left[1 + \left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right) + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right]} \cdot \left[\left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right) + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right] = \frac{81.54}{3 \cdot 9.51^2 [1 + 1 + \frac{0.200353}{0.43488}]} \cdot \left[1 + \frac{0.200353}{0.43488}\right] = 0.1784 \quad [\Omega]$$

$$X_{\sigma_1,T} = \frac{f}{f_{1k}} \cdot X_{1k} = \frac{50}{50} \cdot 0.1784 = 0.1784 \quad [\Omega]$$

Následně je prováděn tento iterační postup až do okamžiku, kdy dosáhneme stabilních hodnot parametrů $X_{\sigma_1,T}$ a $X_{\mu,T}$ s přesností na 0.1%. Existuje možnost provést tento postup ručně stejným způsobem jako dříve, avšak pro zjednodušení práce lze vytvořit jednoduchý kód v libovolném programovacím jazyku. V rámci této práce byl vytvořen kód v jazyce Python, který pomocí iterační metody na základě vstupních hodnot (Q_0 , Q_{1k} , U_0 , I_0 , I_{1k}) určuje parametry podle rovnic uvedených v kapitole 3.7. Pro vybraný řádek naměřených hodnot pro 50 Hz byly tyto parametry stanoveny na $X_{\sigma_1,T} = 0.1581 \quad [\Omega]$ a $X_{\mu,T} = 1.4129 \quad [\Omega]$. Na základě zjištěných hodnot je možné stanovit všechny parametry asynchronního motoru.

$$B_{\mu,T} = \frac{1}{X_{\mu,T}} = \frac{1}{1.4129} = 0.7078 \quad [S]$$

$$X_{2k} = \frac{X_{1k}}{\left(\frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\sigma_2,T}}\right)} = \frac{X_{1k}}{1} = X_{1k}$$

$$G_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{mU_0^2} \cdot \left(1 + \frac{X_{\sigma_1,T}}{X_{\mu,T}}\right)^2 = \frac{15.148}{3 \cdot 14.08^2} \cdot \left(1 + \frac{0.1581}{1.4129}\right)^2 = 0.0315 \left[\frac{S}{m}\right]$$

$$R_{Fe} = \frac{1}{G_{Fe}} = \frac{1}{0.0315} = 31.745 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{2,T} = \left(\frac{P_{1k}}{mI_{1k}^2} - R_1\right) \cdot \left(1 + \frac{X_{\sigma_2,T}}{X_{\mu,T}}\right)^2 - \left(\frac{X_{\sigma_2,T}}{X_{\sigma_1,T}}\right)^2 \cdot (X_{1k}^2 G_{Fe}) =$$

$$= \left(\frac{124.09}{3 \cdot 9.5^2} - 0.3187\right) \cdot \left(1 + \frac{0.1581}{1.4129}\right)^2 - (1)^2 \cdot (0.1581^2 \cdot 0.0315) = 0.171 \text{ } [\Omega]$$

Stejným postupem budou dopočítány parametry pro zkoušku nakrátko při frekvencích 25 Hz a 16 Hz. Výsledky podobně budou se opět věnovat hodnotě indukčnosti, kterou lze přepočítat podle rovnice (5.1). Všechny zjištěné hodnoty jsou shrnuty v Tab. 5.4 V následujících kapitolách budou tato data použita k porovnání s jinými metodami.

Tab. 5.4: Výsledné hodnoty identifikované pro nahradní zapojení ve tvaru T-čláčku metodou stanovenou normou IEEE

Parametr	50 Hz	25 Hz	16 Hz
$X_{\sigma_1,T}$	0.1581 $[\Omega]$	0.113 $[\Omega]$	0.117 $[\Omega]$
$X_{\sigma_2,T}$	0.1581 $[\Omega]$	0.113 $[\Omega]$	0.117 $[\Omega]$
$X_{\mu,T}$	1.4129 $[\Omega]$	1.342 $[\Omega]$	1.203 $[\Omega]$
$L_{\sigma_1,T}$	0.000504 $[H]$	0.00037 $[H]$	0.00041 $[H]$
$L_{\sigma_2,T}$	0.000504 $[H]$	0.00037 $[H]$	0.00041 $[H]$
$L_{\mu,T}$	0.0045 $[H]$	0.00428 $[H]$	0.00383 $[H]$
$R_{2,T}$	0.171 $[\Omega]$	0.151 $[\Omega]$	0.142 $[\Omega]$
R_{Fe}	31.745 $[\Omega]$	28.414 $[\Omega]$	22.030 $[\Omega]$

5.3 Identifikace parametrů pro Γ -článek

Pro identifikaci parametrů nahradního zapojení ve tvaru Γ -čláčku se využívají hodnoty získané pomocí zkoušky naprázdno a při jmenovitém zatížení, jak je popsáno v kapitole 3.5. Z hodnot zkoušky naprázdno lze stanovit hodnoty R_{Fe} , $L_{\mu,\Gamma}$ a $X_{\mu,\Gamma}$. Hodnoty $R_{2,\Gamma}$, $L_{\sigma,\Gamma}$ a $X_{\sigma,\Gamma}$ budou určeny z hodnot zkoušky při jmenovitém zatížení.

Pro správné určení parametrů ze zkoušky naprázdno je nejprve nutné stanovit jmenovitou hodnotu spřaženého toku Ψ_n , jak je znázorněno na obrázku 4.13. Daný údaj je třeba stanovit tak, aby co nejlépe odpovídal jmenovité hodnotě proudu. Pro

daný motor je tato hodnota $\Psi_n = 0.0619$ [Vs]. Po odečtení parametrů z Obrázků (4.13) a (4.11) byly získány následující výsledky:

$$R_{Fe} = 34.544 \text{ } [\Omega]$$

$$L_{\mu,\Gamma} = 0.00473 \text{ } [\text{H}]$$

$$X_{\mu,\Gamma} = L_{\mu,\Gamma} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0.00473 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 1.486 \text{ } [\Omega]$$

Hodnoty měřených veličin při jmenovitém zatížení nás zajímají v okamžiku, kdy se ustálí na stabilních hodnotách. Pomocí grafů (4.14), (4.17) a výpočítaných dat je možné identifikovat potřebné parametry.

$$R_{2,\Gamma} = 0.2175 \text{ } [\Omega]$$

$$L_{\sigma,\Gamma} = 0.001086 \text{ } [\text{H}]$$

$$X_{\sigma,\Gamma} = L_{\sigma,\Gamma} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0.001086 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 0.3412 \text{ } [\Omega]$$

V nahradním zapojení ve tvaru Γ -článku se využívá pouze jedna rozptylová indukčnost. Tato konfigurace komplikuje srovnání různých metod, protože hodnoty parametrů nelze přímo porovnávat. Nicméně, abychom mohli provést srovnání metod, je možné využít postup popsany v kapitole 2.4.2, který nám umožní přepočítat identifikovaná data z Γ -článku na ekvivalentní T-článek. Přepočet na T-článek je důležitý, protože nám umožní porovnávat různé metody v rámci stejného nahradního zapojení. Tímto způsobem budeme mít stejné podmínky a budeme schopni lépe porovnat výkonnost jednotlivých metod v následující kapitole. Všechny zjištěné údaje pro daný typ nahradního zapojení jsou shrnuty v Tab.5.5

Přepočet:

$$L_{\mu,T} = \sqrt{\frac{L_{\mu,\Gamma}^3}{L_{\sigma,\Gamma} + L_{\mu,\Gamma}}} = \sqrt{\frac{0.00473^3}{0.001086 + 0.00473}} = 0.004266 \text{ } [\text{H}]$$

$$L_{\sigma_1,T} = L_{\sigma_2,T} = L_{\mu,\Gamma} - L_{\mu,T} = 0.00473 - 0.004266 = 0.000464 \text{ } [\text{H}]$$

$$R_{2,T} = R_{2,\Gamma} \frac{L_{\mu,T}^2}{L_{\mu,\Gamma}^2} = 0.2175 \cdot \frac{0.004266^2}{0.00473^2} = 0.1769 \text{ } [\Omega]$$

Tab. 5.5: Výsledné hodnoty identifikované pro nahradní zapojení ve tvaru Γ -článku

Parametr	Výpočitaná hodnota
$X_{\sigma_1, T}$	0.1458 [Ω]
$X_{\sigma_2, T}$	0.1458 [Ω]
$X_{\mu, T}$	1.3402 [Ω]
$L_{\sigma_1, T}$	0.000464 [H]
$L_{\sigma_2, T}$	0.000464 [H]
$L_{\mu, T}$	0.004266 [H]
R_2, T	0.1769 [Ω]
R_{Fe}	34.544 [Ω]

5.4 Porovnání identifikovaných hodnot asynchronního motoru pomocí různých metod

V poslední části této práce budou parametry stanovené pomocí experimentálních metod porovnány mezi sebou s cílem zjistit jejich přesnost a vhodnost pro použití. Hlavním zaměřením této práce je dosáhnout co nejpřesnější identifikace, a proto je nezbytné určit, která metoda je lepší pro daný účel. K tomuto účelu byly shrnuty všechny údaje v Tab.5.6, které byly vypočítány různými metodami pro kmitočet 50 Hz. Tato analýza a srovnání parametrů získaných různými metodami nám umožní vyhodnotit, jak přesně a spolehlivě každá metoda identifikuje parametry nahradního zapojení ve zkoumaném systému.

Na základě předchozích kapitol lze konstatovat, že metoda výpočtu pro nahradní zapojení ve tvaru Γ -článku se jeví jako nejvhodnější volba. Tato metoda zahrnuje vliv většího počtu faktorů, což jí umožňuje poskytnout přesnější a komplexnější model stroje v porovnání s ostatními metodami, které berou v úvahu méně faktorů. Pro numerické vyjádření přesnosti jednotlivých metod byly vytvořeny odchylky. V Tab. 5.6 jsou uvedeny vypočítané odchylky jednotlivých metod od stanovených hodnot pomocí Γ -článku. Tyto odchylky nám umožňují srovnat a vyhodnotit přesnost a spolehlivost každé metody při identifikaci parametrů nahradního zapojení. Čím nižší je hodnota odchylky, tím blíže je daná metoda ke skutečným hodnotám. Analýza odchylek nám poskytne informace o přesnosti jednotlivých metod a umožní nám vybrat nejlepší metodu pro další výpočty a analýzu nahradního zapojení ve zkoumaném motoru. Zohlednění této přesnosti je klíčové pro získání spolehlivých výsledků a správné porozumění chování stroje.

Z Tabulky 5.6 je patrné, že metoda stanovená normou IEEE vykazuje větší od-

chylnost od ostatních metod. Klasický postup, který byl použit, dosáhl poměrně přesných výsledků, zejména s ohledem na fakt, že byl zanedban odpor reprezentující ztráty v železe R_{Fe} . Celkově lze konstatovat, že všechny použité metody jsou vhodné pro identifikaci parametrů. Jak již bylo dříve zmíněno, metoda pro nahradní zapojení ve tvaru Γ -článku je považována za nejpřesnější z metod uvedených v této práci. Tímto bylo potvrzeno, že nahradní zapojení ve Γ -článku není zjednodušené v porovnání s T-článkem a poskytuje ne méně přesné výsledky.

Tab. 5.6: Porovnání hodnot identifikovaných různými metodami

Parametr	Klasický	Metoda IEEE	Γ -článek	Klasický	IEEE
$X_{\sigma_1, T}$	0.1506 [Ω]	0.1581 [Ω]	0.1458 [Ω]	3.29 [%]	8.44 [%]
$X_{\sigma_2, T}$	0.1506 [Ω]	0.1581 [Ω]	0.1458 [Ω]	3.29 [%]	8.44 [%]
$X_{\mu, T}$	1.3203 [Ω]	1.4129 [Ω]	1.3402 [Ω]	-1.48 [%]	5.42 [%]
$L_{\sigma_1, T}$	0.0004794 [H]	0.000504 [H]	0.000464 [H]	3.29 [%]	8.44 [%]
$L_{\sigma_2, T}$	0.0004794 [H]	0.000504 [H]	0.000464 [H]	3.29 [%]	8.44 [%]
$L_{\mu, T}$	0.004203 [H]	0.0045 [H]	0.004266 [H]	-1.48 [%]	5.42 [%]
R_2, T	0.1799 [Ω]	0.171 [Ω]	0.1769 [Ω]	1.696 [%]	-3.34 [%]
R_{Fe}	- [Ω]	31.745 [Ω]	34.544 [Ω]	- [%]	-8.1 [%]

Závěr

Z mnoha důvodů je vyžadována přesná identifikace specifikací náhradního zapojení asynchronního motoru. Je důležité porozumět přesným hodnotám těchto parametrů pro řízení motoru a přesné fungování. Nastavení náhradního připojení ovlivňuje chování motoru, výkon, účinnost, ztráty, nosnost a další vlastnosti. Přesná identifikace těchto charakteristik umožňuje optimalizaci řízení motoru, zlepšení energetické účinnosti a zvýšení výkonu. Dalším faktorem je diagnostika a údržba motoru. Identifikace parametrů náhradního zapojení umožňuje sledování stavu motoru, diagnostiku závad a prevenci jejich vzniku. Správnou údržbu a opravy lze provádět s přesným pochopením parametrů.

V bakalářské práci je provedena analýza různých náhradních zapojení asynchronního motoru, konkrétně T-článku, Γ -článku a Υ -článku. Práce je rozdělena do pěti základních částí. První část práce se věnuje teoretickému přehledu o asynchronním motoru. Zde jsou popsány jeho konstrukce, oblasti použití a vlastnosti, aby bylo dosaženo plného porozumění tomuto typu motoru a jeho důležitosti v různých aplikacích. Druhá kapitola práce se zaměřuje na náhradní zapojení asynchronního motoru, přičemž jsou tady vysvětleny jejich odlišnosti a přepočtové vztahy mezi jednotlivými typy zapojení. Tato oblast byla důležitá, protože umožnila převést parametry zjištěné pro ekvivalentní obvod ve formě Γ -článku na tvar T-článku. Tím bylo možné lépe zjistit přesnost jednotlivých metod a potvrdit, že přítomnost jedné rozptylové indukčnosti v Γ -článku a Υ -článku nelze považovat za zjednodušení. Třetí část popisuje teoretické poznatky o zkouškách asynchronního motoru a metodách vhodných pro identifikaci jeho parametrů. Celkem je představeno čtyři metody, ale v rámci praktické části experimentu byly využity pouze tři

- Klasická metoda identifikace parametrů pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku. [4]
- Metoda identifikace parametrů stanovená normou IEEE.[12]
- Pokročilá metoda identifikace parametrů náhradního zapojení ve tvaru Γ -článku je nový přístup, kde parametry nebyli považováni za konstanty ale se brali jako proměnné a závislé na konkrétních hodnotách, jako je spřažený tok Ψ a kmitočet f , viz Obr.3.3. Tato metoda bere v úvahu jejich změny a vliv na chování asynchronního motoru.[8]

V praktické části výše uvedené metody byly experimentálně ověřené na reálném motoru. Byla uvedena přesnost každého postupu. Při srovnání metod jsem dospěl k závěru, že nejvhodnější a nejpřesnější volbou bude identifikace parametrů pro Γ -článek, protože on zahrnuje vliv velkého množství faktorů, jako například skutečná teplota, různé koeficienty, které ovlivňují rozložení ztrát a vliv hodnoty spřaženého toku a kmitočtu. Z vyplývá výhodnost použití dané metody u AM.

Literatura

- [1] ONDRŮŠEK, Č. Skripta: Elektrické stroje.
- [2] CHMELÍK, Karel. Asynchronní a synchronní stroje. [online]. [2023-05-28]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/ber30/stroje/AMaSMstroje.pdf>.
- [3] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [4] Bárta, Jan. Asynchronní elektrické stroje [Přednáška]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Brno.
- [5] CIPÍN, R. *Moderní matematické metody syntézy a analýzy střídavých strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012 [cit. 2022-12-24]. Vedoucí dizertační práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.
- [6] ARAUJO, R. E., LEITE, A. V., FREITAS, D. S. Estimation of physical parameters of an induction motor using an indirect method. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2002. p. 535-540. ISBN 0-7803-7369-3.
- [7] PATOČKA, M. *Skripta: Vybrané statě z výkonové elektroniky: Magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulsní měniče s transformátorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008 [cit. 2022-12-25]
- [8] TOMAN, Marek. *Výpočet optimálního magnetického toku asynchronního motoru pro minimalizaci ztrát se zohledněním teplotních vlivů*. Brno, 2022. Disertační práce. VUT v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ustav výkonové elektrotechniky a elektroniky.
- [9] Yamazaki, K.; Suzuki, A.; Ohto, M.; aj.: Equivalent Circuit Modeling of Induction Motors Considering Stray Load Loss and Harmonic Torques Using Finite Element Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 47, č.5, 2011: s. 986-989, doi:10.1109/TMAG.2010.2087375
- [10] Měřička, J.; Hamata, V.; Voženílek, P.: *Elektrické stroje*, Praha, ČVUT, 2000.
- [11] CIPÍN, R. *Modely asynchronních strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017 [cit. 2022-12-23].

- [12] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Std 112-2017 (Revision of IEEE Std 112-2004), 2018.
- [13] ODHANO, S. A.; GRIVA, G.; ROSU, S. G.; BOGIETTI, A.; BOJOI, R.; *Maximum Efficiency per Torque Direct Flux Vector Control of Induction Motor Drives*. 2015.

Seznam symbolů a zkratek

U_1	[V]	Fázové napětí
U_2	[V]	Fázové napětí rotoru
U_0	[V]	Efektivní hodnota napětí v příčné větvi
I_1	[A]	Statorový proud
I_2	[A]	Rotorový proud
I_μ	[A]	Magnetizační proud
I_{Fe}	[A]	Proud reprezentující ztráty v železe
R_1	[Ω]	Odpor statoru
$R_{2,T}$	[Ω]	Odpor rotoru v T-článku
$R_{2,\Gamma}$	[Ω]	Odpor rotoru v Γ -článku
$R_{2,\mathbb{T}}$	[Ω]	Odpor rotoru v \mathbb{T} -článku
R_{Fe}	[Ω]	Odpor reprezentující ztráty v železe
$L_{\sigma_1,T}$	[H]	Rozptylová indukčnost statoru v T-článku
$L_{\sigma_2,T}$	[H]	Rozptylová indukčnost rotoru v T-článku
$L_{\sigma,\Gamma}$	[H]	Rozptylová indukčnost v Γ -článku
$L_{\sigma,\mathbb{T}}$	[H]	Rozptylová indukčnost v \mathbb{T} -článku
$L_{\mu,T}$	[H]	Magnetizační indukčnost v T-článku
$L_{\mu,\Gamma}$	[H]	Magnetizační indukčnost v Γ -článku
$L_{\mu,\mathbb{T}}$	[H]	Magnetizační indukčnost v \mathbb{T} -článku
$X_{\sigma_1,T}$	[Ω]	Rozptylová reaktance statoru v T-článku
$X_{\sigma_2,T}$	[Ω]	Rozptylová reaktance rotoru v T-článku
$X_{\sigma,\Gamma}$	[Ω]	Rozptylová reaktance v Γ -článku
$X_{\sigma,\mathbb{T}}$	[Ω]	Rozptylová reaktance v \mathbb{T} -článku
$X_{\mu,T}$	[H]	Magnetizační reaktance v T-článku

$X_{\mu,\Gamma}$	[H]	Magnetizační reaktance v Γ -článku
$X_{\mu,T}$	[H]	Magnetizační reaktance v T-článku
$X_{\mu,T}$	[S]	Magnetizační susceptance v T-článku
$\cos\phi$	[-]	Účinník
B_{\max}	[T]	Amplituda magnetické indukce.
d	[mm]	Tloušťka plechu.
V	[m ³]	Objem.
Z_{1imn}	[Ω]	Imaginární část vstupní impedance
Z_{1ren}	[Ω]	Reálná část vstupní impedance
ρ	[$\Omega \cdot m^{-1}$]	Měrný elektrický odpor materiálu plechu
ΔP_{Fe}	[W]	Ztráty v železe
ΔP_{J10}	[W]	Joulové ztráty
ΔP_{Mech}	[W]	Mechanické ztráty
ΔP_h	[W]	Hysterezní ztráty
ΔP_v	[W]	Ztráty vířivými proudy
P_1	[W]	Příkon
f_1	[Hz]	Frekvence
Ψ	[V · s]	Spřažený tok
Ψ_n	[V · s]	Jmenovitá hodnota spřaženého toku
$\Psi_{L\mu,max}$	[V · s]	Hodnota spřaženého magnetického toku, při které je hodnota magnetizační indukčnosti maximální
$\Psi_{m,max}$	[V · s]	Maximální hodnota spřaženého magnetického toku
k_h	[W · s · T ^{-n_h}]	Koeficient hysterezních ztrát
k_v	[W · s · T ⁻²]	Koeficient vířivých ztrát
k_f	[W · s · rad ⁻¹]	Koeficient třecích ztrát

k_w	$[\mathbf{W} \cdot s^3 \cdot rad^{-3}]$	Koeficient ventilačních ztrát
n_{nh}	$[-]$	Exponent hysterezních ztrát
m	$[-]$	Počet fází
a_i	$[\mathbf{H} \cdot V^{-i} \cdot s^{-i}]$	Polynomické koeficienty
t	$[\mathbf{s}]$	Čas
α	$[\mathbf{W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla
AM		Asynchronní motor