

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Ondřej Ředina



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

CYKLICKÁ AKCELERAČNÍ METODA MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

CYCLIC ACCELERATION METHOD FOR ELECTRICAL MACHINES MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Ředina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Ondřej Ředina

ID: 220780

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Cyklická akcelerační metoda měření elektrických strojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte přehled metod měření parametrů elektrických strojů
2. Teoreticky zpracujte cyklickou akcelerační metodu měření3. Aplikujte metodu na konkrétní stroje a vyhodnoťte výsledky

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Pavelka, J., Čeřovský, Z., Javůrek, J., Elektrické pohony, 2001, České vysoké učení technické
- [2] SKALICKÝ, J. Navrhování elektrických pohonu. Navrhování elektrických pohonu. Brno: VUT FEKT, 2002.
- [3] Bacha, S., Munteanu, I., Bratcu, A.I.: Power Electronic Converters Modeling and Control. 2014

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

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

Bakalářská práce se zabývá cyklickou akcelerační metodou měření a zatěžování elektrických motorů. Práce obsahuje popis měřicí metody a zpracování naměřených dat. Aplikace metody byla uskutečněna ve firmě AVL Moravia s. r. o. Zpracování změřených dat ve formě sinusového průběhu bylo provedeno v programu MATLAB. V závěru práce jsou shrnuty nepřesnosti měření a následná optimalizace této metody.

Klíčová slova

Asynchronní motor, měřicí metoda, akcelerace, cyklus, MATLAB, optimalizace

Abstract

The bachelor thesis deals with the cyclic acceleration method of measuring and loading electrical machines. The thesis contains a description of the measuring method and processing of measured data. The application of the method was realized in the company AVL Moravia s. r. o. The processing of the measured data in the form of a sine wave was performed in the MATLAB program. At the end of the thesis are summarized the inaccuracies of measurements and following optimization of this method.

Keywords

Asynchronous motor, measuring method, acceleration, cycle, MATLAB, optimization

Bibliografická citace

ŘEDINA, Ondřej. *Cyklická akcelerační metoda měření elektrických strojů*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142714>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Dalibor Červinka.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Ondřej Ředina*

VUT ID studenta: *220780*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2021/22*

Téma závěrečné práce: *Cyklická akcelerační metoda měření elektrických stojů*

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 jsem si 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.

V Brně dne: 26. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Daliboru Červinkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Děkuji firmě AVL Moravia s. r. o. a všem jejím pracovníkům za aplikaci cyklické akcelerační metody, zpřístupnění změřených dat a konzultaci při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 26. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD.....	11
1. ASYNCHRONNÍ STROJ.....	12
1.1 KONSTRUKCE.....	12
1.1.1 Stator.....	12
1.1.2 Šířky s ložiskovými uzly.....	12
1.1.3 Rotor.....	12
1.2 PRINCIP TROJFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	12
1.3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU.....	13
1.3.1 Ztráty v železe.....	13
1.3.2 Ztráty ve vinutí statoru.....	14
1.3.3 Ztráty ve vinutí rotoru.....	14
1.3.4 Mechanické ztráty.....	14
1.3.5 Dodatečné ztráty.....	14
1.3.6 Celkové ztráty.....	14
2. ZKUŠEBNÍ METODY PRO URČENÍ ÚČINNOSTI ASYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	15
2.1 PŘEDNOSTNÍ ZKUŠEBNÍ METODY.....	15
2.1.1 Přímé měření příkonu a výkonu.....	15
2.1.2 Součet ztrát, přídatné ztráty při zatížení podle metody zbytkových ztrát.....	15
2.1.3 Součet ztrát s přídatnými ztrátami při zatížení z přiřazené tolerance.....	16
2.2 ZKUŠEBNÍ METODY PRO PROVOZNÍ NEBO VÝROBNÍ KUSOVÉ ZKOUŠKY.....	16
2.2.1 Zkouška rekuperací s dvojím napájením.....	16
2.2.2 Zkouška rekuperací s jedním napájením.....	17
2.3 AKCELERAČNÍ METODY MĚŘENÍ.....	17
2.3.1 Pohybová rovnice.....	17
2.3.2 Cyklická akcelerační metoda měření a zatížení asynchronního motoru.....	18
3. APLIKACE CYKlickÉ AKCELERAČNÍ METODY.....	23
3.1 PARAMETRY ZKOUŠENÝCH MOTORŮ.....	24
3.2 POPIS ZKUŠEBNÍHO PRACOVISTĚ.....	25
3.2.1 Rozložení pracoviště.....	26
3.2.2 Upevnění stroje.....	26
3.2.3 Chlazení stroje.....	27
3.3 MĚŘENÍ.....	27
3.4 ZPRACOVÁNÍ ZMĚŘENÝCH HODNOT.....	30
3.4.1 Vstupní hodnoty.....	30
3.4.2 Přímý výpočet momentu.....	31
3.4.3 Výpočet momentu z aproximační funkce.....	32
4. OPTIMALIZACE CYKlickÉ AKCELERAČNÍ METODY MĚŘENÍ.....	36
4.1 NĚPŘESNOSTI METODY.....	36
4.2 ZMĚŘENÍ MOMENTU SETRVAČNOSTI METODOU PŘÍDAVNÉHO SETRVAČNÍKU.....	36

4.3	VÝKONNĚJŠÍ ANALYZÁTOR SE ZÁPÍSEM OTÁČEK.....	37
4.4	NÁVRH OPTIMALIZOVANÉHO PRACOVIŠTĚ	37
5.	ZÁVĚR	39
	LITERATURA	40
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	41
	SEZNAM PŘÍLOH.....	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Tok výkonu motorem – upraveno z [2].....	13
Obrázek 2 – Blokové schéma cyklického zatížení jednoho motoru	19
Obrázek 3 - Lineární průběh úhlové rychlosti	19
Obrázek 4 - Sinusový průběh úhlové rychlosti	20
Obrázek 5 - Blokové schéma cyklického zatížení soustavy dvou motorů	20
Obrázek 6 – Průběhy úhlové rychlosti a momentu pro soustavu dvou motorů	21
Obrázek 7 - Blokové schéma cyklického zatížení soustavy tří motorů	21
Obrázek 8 - Průběhy úhlové rychlosti a momentu pro soustavu tří motorů	21
Obrázek 9 - Zkoušené stroje.....	23
Obrázek 10 – Zatěžovací charakteristika zkoušených strojů v motorickém režimu.....	24
Obrázek 11 - Zkušební pracoviště.....	25
Obrázek 12 – Blokové schéma zapojení pracoviště.....	26
Obrázek 13 - Upevnění stroje.....	26
Obrázek 14 - Chlazení stroje.....	27
Obrázek 15 - Display elektroměru na konci zkoušky	28
Obrázek 16 - Záznam teploty stroje [7]	28
Obrázek 17 - Záznam měření odporu vinutí mezi jednotlivými fázemi [7].....	29
Obrázek 18 – Průběh změřených otáček.....	30
Obrázek 19 - Výpočet momentu setrvačnosti pomocí simulace.....	31
Obrázek 20 - Závislost numericky vypočteného momentu na čase	32
Obrázek 21 - Průběh změřené a ideální úhlové rychlosti.....	33
Obrázek 22 - Závislost analyticky vypočteného momentu na čase	33
Obrázek 23 – Ilustrativní rozložení výkonů a ztrát v generátorickém a motorickém režimu	35
Obrázek 24 - Doběhová charakteristika rotoru a rotoru se setrvačnickem [8]	37
Obrázek 25 - Blokové schéma optimalizovaného pracoviště pro soustavu dvou motorů	37
Obrázek 26 – Datový list 1/3.....	45
Obrázek 27 - Datový list 2/3	46
Obrázek 28 - Datový list 3/3	47

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Šítkové hodnoty zkoušených motorů.....	24
--	----

ÚVOD

Firma AVL Moravia s. r. o., dříve VUES Brno s. r. o., je tradičním výrobcem speciálních elektrických strojů. Vzhledem k velmi širokému sortimentu vyráběných strojů je nutné prokazovat funkčnost při náhradním provozu, aby bylo možné dosáhnout co nejvíce deklarovaných parametrů (především mechanický moment a otáčky).

V poslední době bylo nutné vyřešit v krátkém časovém období ověření funkčnosti dvou nízko otáčkových asynchronních motorů s vysokým mechanickým momentem. I když je laboratoř vybavená pro univerzální měření, není vždy schopna splnit všechny požadavky. V tomto případě bylo nutné aplikovat ne zcela běžnou metodu cyklického zatížení, poněvadž v daném časovém okamžiku nebyla k dispozici adekvátní mechanická spojka a snímač momentu pro klasické měření a zatěžování zkoušených strojů v režimu back to back. Navržená metoda cyklického zatěžování nevyžaduje tento jednorúčelový HW a přes to pomohla prokázat funkce schopnost stroje a uspokojit tím požadavek zákazníka.

Cílem práce je popis cyklické akcelerační metody, zpracování změřených dat v průběhu zkoušky a návrh optimalizace pro budoucí aplikaci. Zpracování dat je provedeno v programu MATLAB.

Text práce je rozdělen do čtyř kapitol. První kapitola popisuje konstrukci, princip funkce a jednotlivé ztráty asynchronního stroje. Ve druhé kapitole jsou nastíněny základní měřicí metody pro určení účinnosti asynchronních motorů a vysvětlen princip cyklické akcelerační metody. Následující kapitola se zabývá aplikací metody a zpracování změřených hodnot. Ve čtvrté kapitole jsou shrnuty chyby měření a návrh zdokonalení metody.

1. ASYNCHRONNÍ STROJ

Asynchronní (indukční) motor je typ elektrického točivého stroje, který umožňuje elektromechanickou přeměnu energie. Tento typ stroje lze provozovat v motorickém i generátorickém režimu. Motory slouží k přeměně elektrické energie na energii mechanickou a generátory k přeměně mechanické energie na elektrickou. [1]

1.1 Konstrukce

Všechny asynchronní motory jsou složeny ze statoru, štítů s ložiskovými uzly a rotoru.

1.1.1 Stator

Jedná se o nepohyblivou část motoru. Obsahuje svazek elektrotechnických plechů a statorové vinutí vložené do drážek statorových plechů. Vinutí stroje je nejčastěji měděné s různou kvalitou izolačního systému (měděný lakovaný drát, dvojitě lakovaný, drát se skelnou izolací atd.).

1.1.2 Štíty s ložiskovými uzly

Štíty s ložiskovými uzly jsou spojeny s kostru motoru. Zajišťují upevnění statoru a zachycení rotoru pomocí ložisek, aby byla zajištěna jejich sousost. Přední štít může také tvořit přírubu pro uchycení stroje.

1.1.3 Rotor

Rotor je pohyblivá část motoru. Skládá se z hřídele, na které jsou nalisované rotorové plechy. V drážkách plechů je umístěna kotva nakrátko (klecová) případně kotva kroužková.

Kotva nakrátko je složena z neizolovaných měděných či mosazných tyčí spojenými na koncích pomocí kruhů nakrátko. Dále může být klec vyrobena z hliníkových vodičů, které jsou nejčastěji odlité do drážek rotorových plechů a na koncích jsou spojeny zkratovacími kruhy.

Kroužková kotva se může použít pouze u vícefázových motorů. Je tvořena izolovaným vinutím vloženým do drážek rotorových plechů. V případě trojfázového motoru je vinutí zapojeno do trojúhelníka nebo hvězdy a vyvedeno na tři sběrací kroužky umístěné na hřídeli. Pomocí uhlíkových kartáčů je z kroužků odebíráno indukované napětí a proud. Tento typ stroje se využíval v době, kdy nebyla k dispozici výkonová elektronika. [1]

1.2 Princip trojfázového asynchronního motoru

Jedná se o nejrozšířenější typ asynchronního stroje. Statorové vinutí je připojeno na trojfázovou síť, díky čemuž ve statoru vznikne točivé magnetické pole. Toto magnetické

pole se otáčí synchronními otáčkami [2]

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (1.1)$$

kde f_1 frekvence napájecího napětí
 p počet pólových dvojic

Vzniklé astatické magnetické pole zasahuje do prostoru vodičů v rotoru, ve kterých se následně indukuje napětí a pokud je vinutí rotoru uzavřeno, protéká jím proud. Trojfázový proud vytvoří magnetické pole rotoru. Interakcí těchto dvou magnetických polí vzniká síla, která působí na vodiče v rotoru ve stejném směru utáčení statorového magnetického pole. [1]

Jelikož se napětí může indukovat pouze v případě relativního pohybu pole statoru vůči vodičům v rotoru, tak jmenovité otáčky rotoru n musejí být menší než otáčky statorového magnetického pole. Tento jev se nazývá skluz [2]

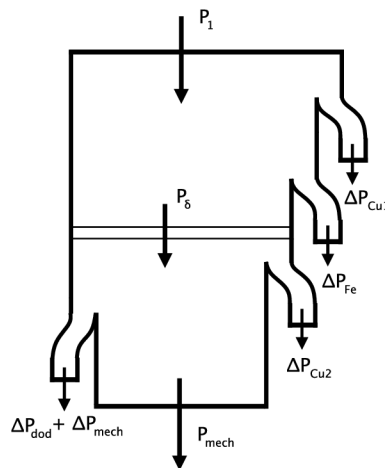
$$s = \frac{n_s - n}{n_s}. \quad (1.2)$$

Otáčky rotoru závisí na otáčkách statorového magnetického pole a na skluzu

$$n = n_s \cdot (s - 1) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (s - 1). \quad (1.3)$$

1.3 Ztráty v asynchronním motoru

V asynchronním motoru je řada ztrát. Na Obrázek 1 je znázorněn tok výkonu motorem a jeho jednotlivé ztráty.



Obrázek 1 - Tok výkonu motorem – upraveno z [2]

1.3.1 Ztráty v železe

Dělí se na ztráty hysterezní a vířivými proudy. Tyto ztráty způsobují zahřívání statorových i rotorových plechů, čímž se sníží jejich magnetická vodivost.

1.3.2 Ztráty ve vinutí statoru

Známé také jako Joulovy ztráty. Představují výkon přeměněný na teplo v činných odporech statorového vinutí. Jsou závislé na odporu vinutí R_1 a druhé mocnině statorového proudu I_1 [1]

$$\Delta P_{Cu1} = R_1 \cdot I_1^2. \quad (1.4)$$

1.3.3 Ztráty ve vinutí rotoru

Tyto ztráty se nazývají elektrické ztráty ΔP_e nebo Joulovy ztráty v rotoru ΔP_{Cu2} . Jsou dány vztahem [1]

$$\Delta P_{Cu2} = P_\delta \cdot s = m \cdot I_2^2 \cdot R_2, \quad (1.5)$$

kde P_δ výkon přenášený přes vzduchovou mezeru
 m počet fází stroje
 I_2 proud protékající rotorovým vinutím
 R_2 odpor rotorového vinutí

1.3.4 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty jsou součtem ztrát třením a ventilačních ztrát [1]

$$\Delta P_{mech} = \Delta P_f + \Delta P_v, \quad (1.6)$$

Ztráty způsobené třením se nacházejí v ložiscích.

Ventilační ztráty se zvětšují s třetí mocninou otáček stroje [3]

$$\Delta P_v = M_z \cdot \omega = \text{sgn}(\omega) \cdot b_2 \cdot |\omega|^2 \cdot \omega, \quad (1.7)$$

kde M_z zátěžný moment ventilátoru
 ω úhlová rychlost rotoru
 b_2 konstanta stroje

Důvodem je zvětšující se odpor vzduchu na lopatkách ventilátoru.

1.3.5 Dodatečné ztráty

Líší se u každého stroje. Jsou zde uváženy okolní negativní vlivy (teplota okolí, elektromagnetické rušení atd.).

1.3.6 Celkové ztráty

Celkové ztráty ΔP_T určují rozdíl mezi příkonem P_1 a výkonem motoru P_2

$$\Delta P_T = P_1 - P_2, \quad (1.8)$$

kteřé jsou také součtem všech ztrát ve stroji

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{dod}. \quad (1.9)$$

2. ZKUŠEBNÍ METODY PRO URČENÍ ÚČINNOSTI ASYNCHRONNÍCH STROJŮ

Tyto metody určuje norma ČSN EN 60034-2-1 ed. 2. Každá metoda slouží k zjištění účinnosti stroje. Závisí na druhu zkoušeného stroje a na jeho jmenovitých hodnotách.

2.1 Přednostní zkušební metody

2.1.1 Přímé měření příkonu a výkonu

Tuto zkušební metodu je možno aplikovat na všechny jednofázové stroje. Využívá měření elektrického výkonu P_{el} dodaného ze zdroje a stanovení mechanického výkonu P_{mech} pomocí měření točivého momentu na hřídeli stroje. [4]

Pro motorický režim platí

$$P_1 = P_{el}; P_2 = P_{mech}, \quad (2.1)$$

pro generátorický režim platí

$$P_1 = P_{mech}; P_2 = P_{el}, \quad (2.2)$$

kde P_1 příkon
 P_2 výkon

Při samotné zkoušce se zkoušený motor spojí s dynamometrem či zatěžovacím strojem s měřičem točivého momentu, kde motor pracuje při konstantním zatížení, dokud nenastane tepelná rovnováha. Zaznamená se vstupní napětí, proud, elektrický výkon, mechanický moment, otáčky a vstupní teplota primárního chladiva. [4]

Účinnost stroje η se poté určí pomocí výpočtu

$$\eta = \frac{P_1}{P_2}. \quad (2.3)$$

2.1.2 Součet ztrát, přídavné ztráty při zatížení podle metody zbytkových ztrát

Další metoda spočívá ve stanovení účinnosti pomocí součtu samostatných ztrát, který se skládá ze ztrát v železe, ventilačních ztrát a ztrát třením, ztrát v mědi rotoru a statoru a přídavných ztrát při zatížení. Metoda se může použít u trojfázových strojů s jmenovitým výkonem až 2 MW. [4]

Pro výpočet účinnosti je zapotřebí vypočítat celkové ztráty

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{fw} + \Delta P_{s\theta} + \Delta P_{r\theta} + \Delta P_{LL}, \quad (2.4)$$

kde ΔP_T celkové ztráty ve stroji
 ΔP_{Fe} ztráty v železe
 ΔP_{fw} korigované ztráty způsobené třením a ztráty ventilační

$\Delta P_{s\theta}$ korigované ztráty ve statorovém vinutí

$\Delta P_{r\theta}$ korigované ztráty v rotorovém vinutí

ΔP_{LL} zbytkové ztráty

Účinnost je poté dána vztahem

$$\eta = \frac{P_{1,\theta} - \Delta P_T}{P_{1,\theta}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_T}, \quad (2.5)$$

kde $P_{1,\theta}$ korigovaný příkon

2.1.3 Součet ztrát s přídavnými ztrátami při zatížení z přiřazené tolerance

Jako u předešlé metody se účinnost stroje určí pomocí součtu samostatných ztrát. Tato metoda je aplikována pro trojfázové stroje s jmenovitým výkonem nad 2 MW. Kvůli tak velkému výkonu se u zkoušky při plném zatížení a zkoušky křivky zatížení používá snížené napětí. [4]

Součtem všech ztrát vzniknou celkové ztráty

$$\Delta P_T = \Delta P_c + \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{LL}, \quad (2.6)$$

kde ΔP_c konstantní ztráty

Účinnost se určí pomocí vzorce

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_T}. \quad (2.7)$$

2.2 Zkušební metody pro provozní nebo výrobní kusové zkoušky

Zkušební metody v této skupině lze aplikovat při jakékoliv zkoušce (provozní, přejímací, výrobní kusové atd.).

2.2.1 Zkouška rekuperací s dvojitým napájením

Zkušební postup

Při této zkoušce se mechanicky spojí dva totožné stroje. Následně se svorky poháněného stroje připojí k soustrojí nebo k měniči dodávajícímu jalový výkon a spotřebovávajícímu činný výkon. První stroj se napájí jmenovitým napětím a kmitočtem. Napájení druhého stroje se liší, pokud jde o generátorický nebo motorický režim. V případě generátorického režimu je stroj napájen nižším kmitočtem oproti prvnímu stroji. U motorického režimu pak kmitočtem vyšším. Po této zkoušce se spoje motoru a generátoru vymění a zkouška se opakuje. [4]

Zaznamenávají se hodnoty pro obě zkoušky:

- Pro motor: napětí, proud, příkon, frekvence, skluz
- Pro generátor: napětí, proud, příkon, frekvence, skluz

- Vstupní teplota chladiva

Určení účinnosti

Jelikož se jedná o stejné stroje, tak je účinnost dána polovinou celkových ztrát a průměrnou hodnotou příkonu motoru a generátoru

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}}, \quad (2.8)$$

přičemž

$$\Delta P_T = \frac{1}{2}(\Delta P_1 + \Delta P_2). \quad (2.9)$$

2.2.2 Zkouška rekuperací s jedním napájením

Zkušební postup

Zkouška rekuperací s jedním napájením je určena pro asynchronní stroje s vinutým rotorem. Stroj, který pracuje jako motor musí mít zkratované rotorové vinutí. Druhý stroj pracující jako generátor má rotorové vinutí připojeno k vícefázovému napájení. Oba stroje musí být mechanicky spojeny a elektricky připojeny ke stejnému zdroji. [4]

Určení účinnosti

Účinnost se určí pomocí vztahu

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_T}{P_M}. \quad (2.10)$$

kde P_M výkon spotřebovaný motorem
 $\Delta P_T = \frac{1}{2}(\Delta P_1 + \Delta P_{Cu2})$ celkové ztráty jednoho stroje

Další metody jsou podrobně popsány v [4].

2.3 Akcelerační metody měření

2.3.1 Pohybová rovnice

„Pohybová rovnice (2.11) vyjadřuje vzájemný vztah mezi hnacím elektromotorem a pracovním mechanismem. Je matematickým vyjádřením vztahu mezi momenty nebo silami působícími na vyšetřovaný hmotný útvar, tj. na soustavu motor-pracovní mechanismus, a kinematickými veličinami určujícími vzniklý pohyb.“ (Caha, 1990)

$$\sum_{i=1}^n M_i + M_d = 0, \quad (2.11)$$

$$M_{\text{stroje}} = M_{\text{zátěžný}} + M_d. \quad (2.12)$$

kde M_{stroje} celkový točivý moment stroje
 $M_{\text{zátěžný}}$ poháněcí moment
 M_d dynamický moment

Pro akcelerační metody je pohybová rovnice základním vztahem. Akcelerace (zrychlení) je zde využívána ve formě úhlového zrychlení, díky kterému je možné vypočítat dynamický moment [5]

$$M_d = J \cdot \epsilon, \quad (2.13)$$

kde ϵ úhlové zrychlení
 J moment setrvačnosti zkoušeného stroje

Úhlové zrychlení popisuje změnu úhlové rychlosti za jednotku času a je možné jej vyjádřit vztahem

$$\epsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad (2.14)$$

kde ω úhlová rychlost
 φ úhlové natočení (úhlová odlehlost)

Rovnice (2.13) lze použít pouze pro konstantní moment setrvačnosti. V případě, že moment setrvačnosti není konstantní neboli je funkcí času $J = J(t)$, je zapotřebí použít následující vztah [5]

$$M_d = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ}{dt} \cdot \omega. \quad (2.15)$$

Výpočet mechanického výkonu

Mechanický výkon (výkon na hřídeli) je dán vztahem

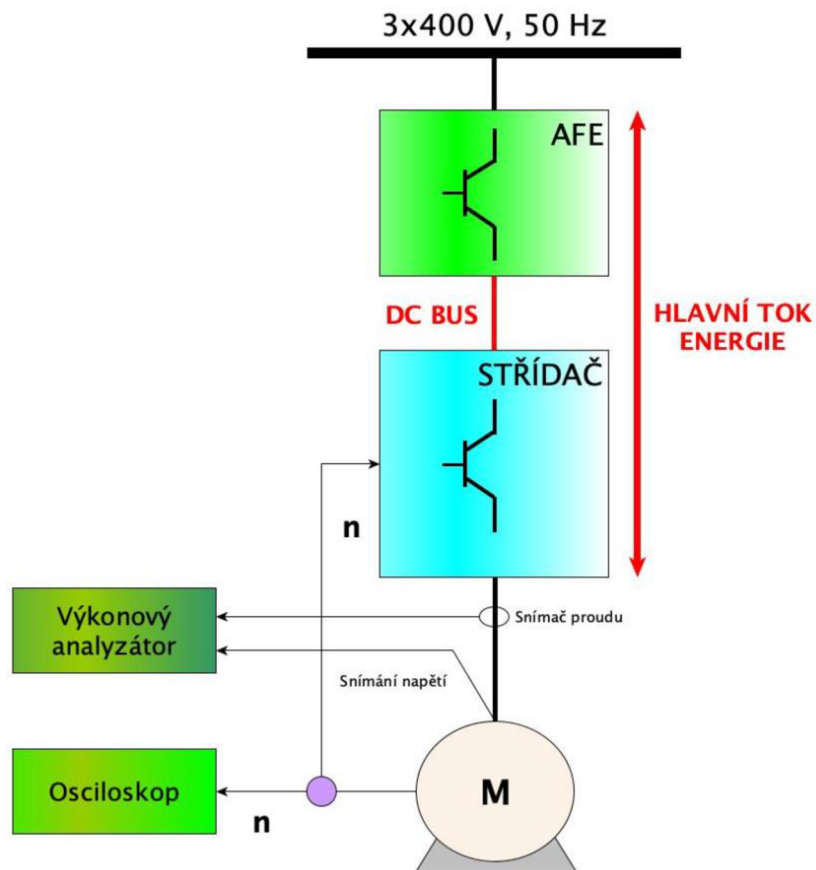
$$P_{\text{mech}} = M_d \cdot \omega. \quad (2.16)$$

2.3.2 Cyklická akcelerační metoda měření a zatížení asynchronního motoru

Cyklická akcelerační metoda využívá pro zatížení zkoušených strojů vlastní moment setrvačnosti. Z pohybové rovnice (2.12) je zřejmé, že celkový moment stroje se skládá ze součtu zátěžových momentů a dynamického momentu. Pokud je zkoušený motor samostatně uložen (naprázdno), pak $M_{\text{zátěžný}}$ je roven 0.

Pokud dochází k cyklickému rozběhu a brzdění motoru, je motor zatěžován dynamickou složkou momentu. Velikost cyklického momentu je tedy potom úměrná součinu momentu setrvačnosti a úhlového zrychlení (viz rov (2.13)).

Cyklické zatížení lze aplikovat na jeden motor viz Obrázek 2. Toto uspořádání vyžaduje rekuperační měniče s 4Q provozem s vektorovým řízením otáček.



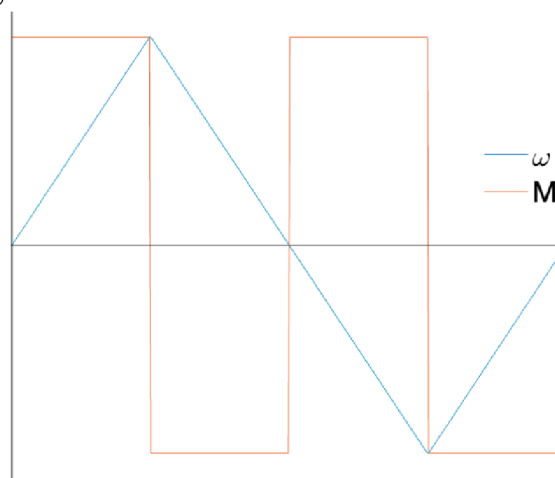
Obrázek 2 – Blokové schéma cyklického zatížení jednoho motoru

Pro zatížení jsou teoretické dva průběhy:

a) Lineární funkce (Obrázek 3)

Výhody: velmi snadné nastavení a řízení pohonu

Nevýhody: dochází k velkým momentovým rázům při změně gradientu úhlové rychlosti a smyslu otáčení

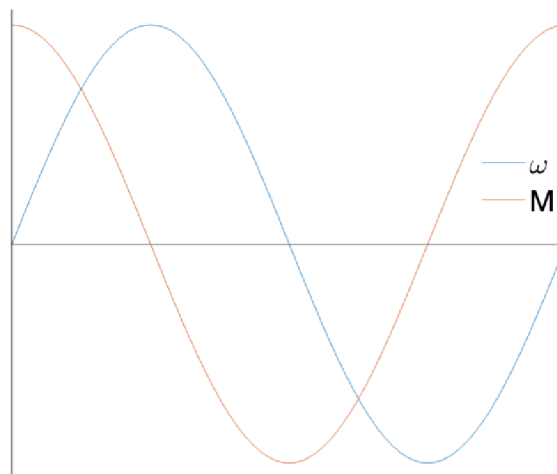


Obrázek 3 - Lineární průběh úhlové rychlosti

b) Sinusová funkce (Obrázek 4)

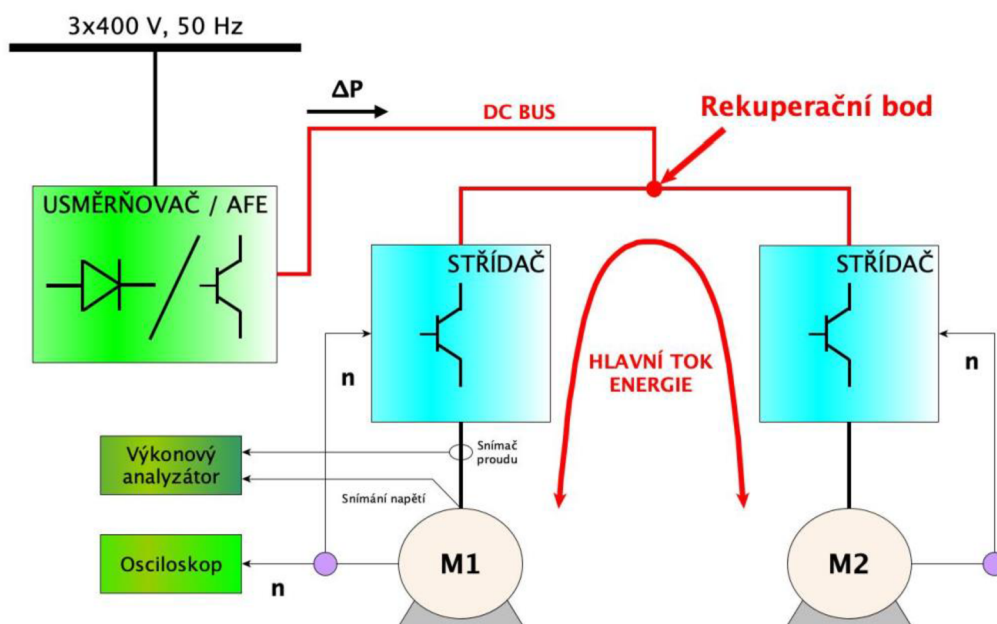
Výhody: plynulý mechanický chod

Nevýhody: komplikovanější řízení a ovládání (nutnost využít přídavný kontrolér nebo PLC)

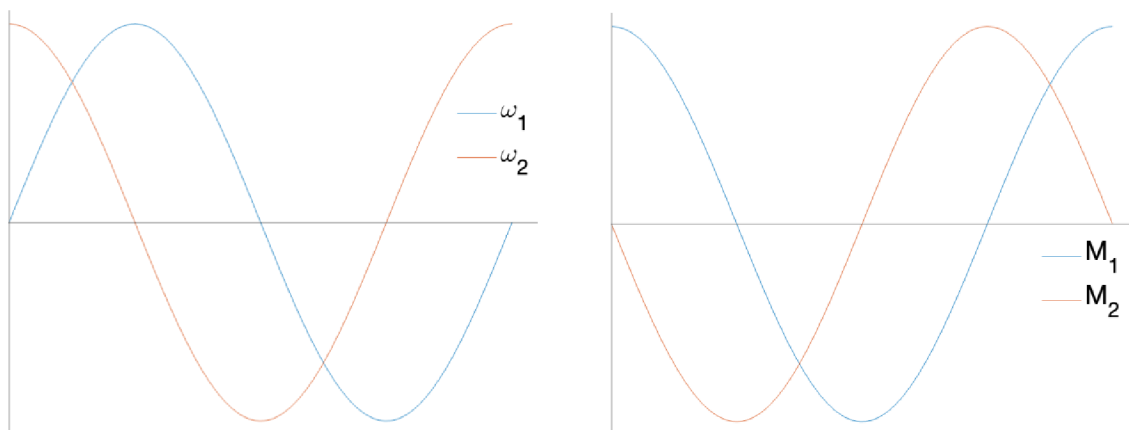


Obrázek 4 - Sinusový průběh úhlové rychlosti

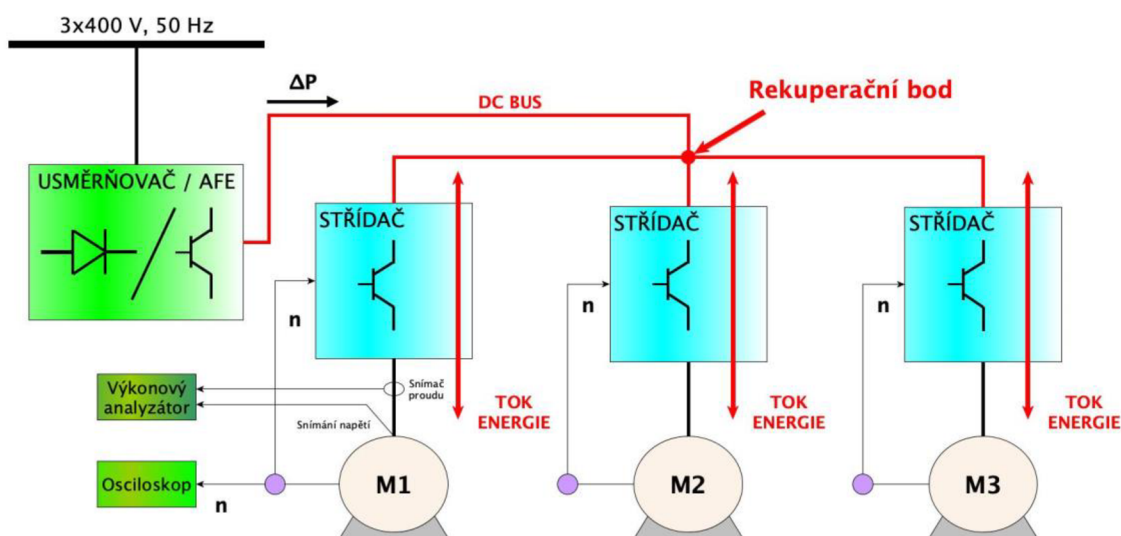
Tuto metodu lze snadným způsobem aplikovat i na více motorů současně. Pro takové zatížení je nejvýhodnější aplikovat sinusovou funkci úhlové rychlosti. Na Obrázek 5 a Obrázek 7 jsou naznačeny principy pro soustavu dvou a tří zkoušených motorů. Na Obrázek 6 a Obrázek 8 jsou vykresleny jejich průběhy úhlové rychlosti a mechanického momentu. Při více motorovém zatížení se nabízí využití přelévání energie z jednoho motoru do druhého a obráceně. Napájecí měnič nevyžaduje rekuperační jednotku s plným výkonem, ale stačí usměrňovací model, který napájí meziobvod měniče tak, aby byly pokryty ztráty celého systému.



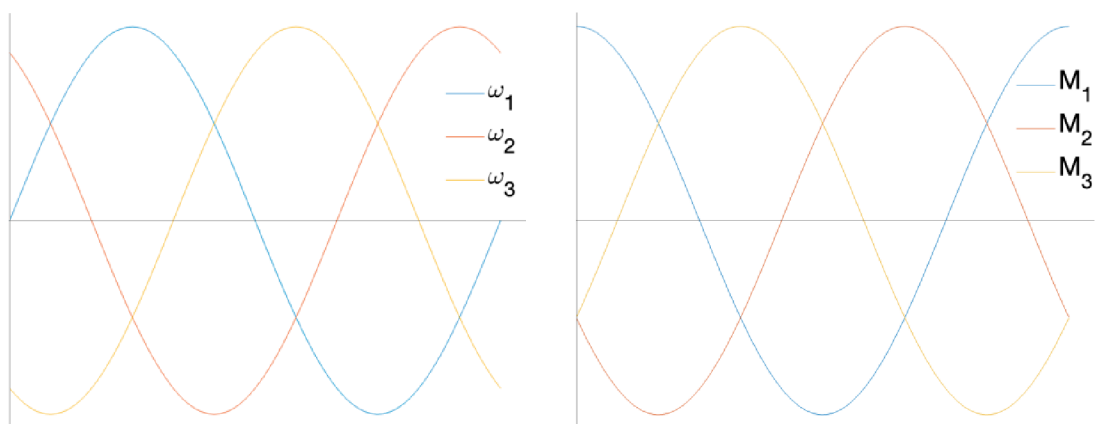
Obrázek 5 - Blokové schéma cyklického zatížení soustavy dvou motorů



Obrázek 6 – Průběhy úhlové rychlosti a momentu pro soustavu dvou motorů



Obrázek 7 - Blokové schéma cyklického zatížení soustavy tří motorů



Obrázek 8 - Průběhy úhlové rychlosti a momentu pro soustavu tří motorů

Pro měření příkonu elektrického výkonu nelze využít standardních měřených veličin výkonového analyzátoru, protože hodnoty proudu, napětí se neustále mění. Pro cyklické

zatížení lze využít funkci elektroměru, který měří práci (dodávaná nebo odebíraná energie).

Tato metoda není plnohodnotnou metodou pro určení účinnosti a kvantifikaci jednotlivých ztrát stroje. Primárně slouží k zatížení stroje a k ověření maximálního oteplení.

2.3.2.1 Uspořádání zkušebního pracoviště

Pro ověření parametrů zkoušených motorů je nutné změřit energii, která je spotřebována a vygenerována jedním strojem. Ke změření této energie lze využít výkonový analyzátor (viz Obrázek 2, Obrázek 5 a Obrázek 7). Výkonový analyzátor změří pomocí snímače proudu a napětí jejich vstupní a výstupní hodnoty. Následně z těchto hodnot určí celkovou spotřebovanou a vygenerovanou energii za dobu měření.

Snímáním otáček se docílí zpětnovazební regulace otáček stroje, kterou zajišťují střídače napájející stroje. Také se tyto hodnoty mohou zapsat a zobrazit pomocí osciloskopu. Derivací signálu skutečných otáček se získá moment. Z těchto hodnot se určí mechanický výkon na hřídeli.

Poměr mechanického výkonu a příkonu (zjištěného ze spotřebované energie) určuje účinnost stroje v motorickém režimu. Tato účinnost není stejná pro generátorický režim. Účinnost stroje v generátorickém režimu je dána poměrem elektrického výkonu (zjištěného z vygenerované energie) a mechanického výkonu.

2.3.2.2 Napájení a ovládání zkoušených motorů

Napájení a ovládání motorů zajišťují frekvenční měniče s vektorovým zpětnovazebním řízením otáček. V aplikačním modulu měniče se vytvoří generátor lineárního či sinusového signálu žádané hodnoty otáček. Tento signál se zavede na vstup řízení otáček střídače. Pro případ sestav více motorů je potřeba zajistit fázový posun mezi vstupním signálem dvou ($\frac{T}{4}$, Obrázek 6) nebo tří ($\frac{2T}{3}$, Obrázek 8) motorů.

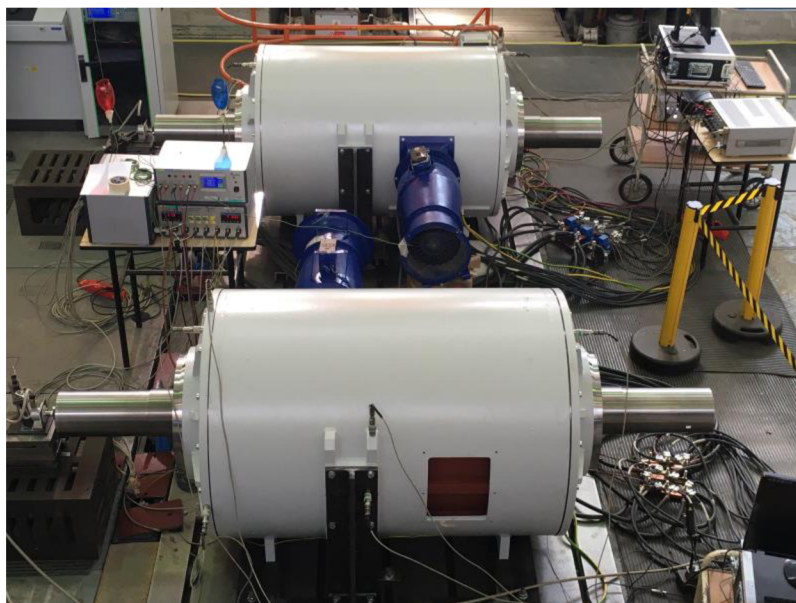
3. APLIKACE CYKlickÉ AKCElERACní METODY

Cyklická akcelerační metoda byla použita pro ověření parametrů dvou identických asynchronních strojů s rotorem s měděnou klecí nakrátko (vč. 134964 a vč. 134965), které lze vidět na Obrázek 9. Tato zkouška proběhla ve firmě AVL Moravia s. r. o.

Pozn.: Všechny naměřené hodnoty, data a fotografie uvedené v této práci byly konzultovány a bylo povoleno jejich zveřejnění.

Tato zkušební metoda byla vybrána z několika důvodů:

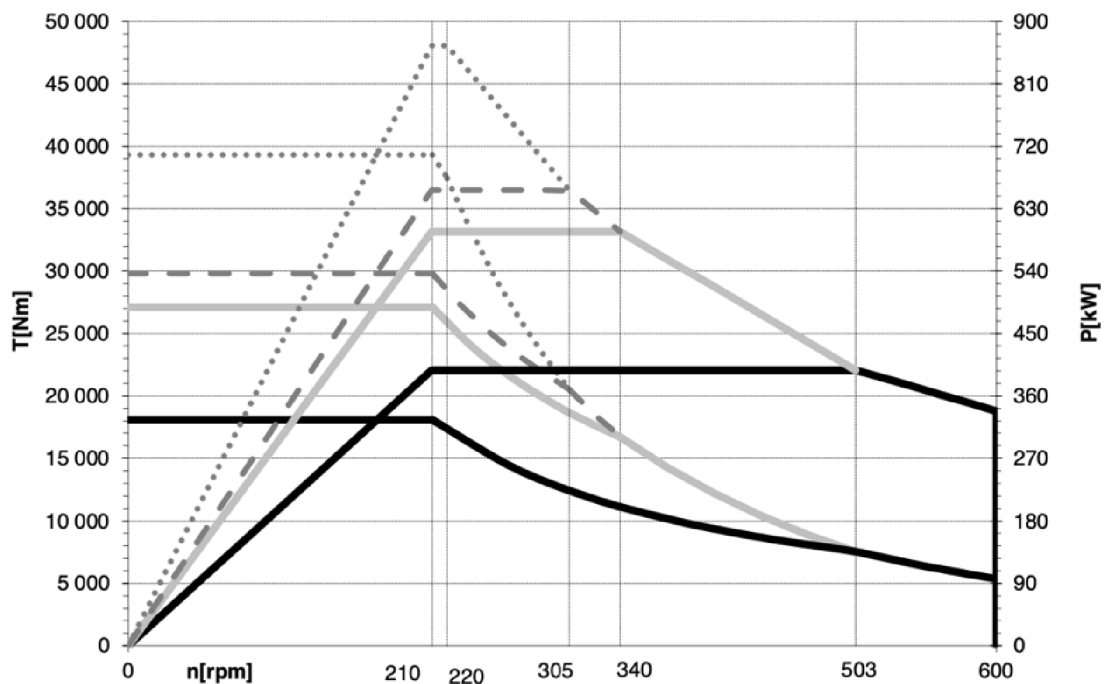
- Zákazník si vyžádal zkoušku se zatížením minimálně 50 % krátce před dokončením motorů a jejich odesláním do Jižní Ameriky. Zatížení odpovídá momentu přibližně 13 400 Nm.
- Kvůli vysokému požadovanému momentu nebyla možnost použít na zkoušku dynamometr. Nejvhodnější nejsilnější dynamometr mohl vyvinout moment 4 000 Nm, což odpovídá pouze 15% zatížení.
- Vzhledem k tomu, že byly k dispozici dva identické stroje, tak by se logicky nabízela metoda rekuperací s dvojitým napájením (viz. 2.2.1). Tato zkouška však požaduje mechanické spojení strojů, ovšem spojka s tak velkým momentem na danou hřídel nebyla k dispozici.
- Z důvodu velice krátkého času k realizaci zkoušky nebylo možné zakoupit či vypůjčit lepší dynamometr nebo spojku s vysokým jmenovitým momentem.
- Možnost použití metody rekuperací s jedním napájením se zavrhla, protože by to znamenalo cyklicky odebírat a následně dodávat do sítě špičkový výkon 320 kW. To by bylo ekonomicky náročné a zbytečně by to zatěžovalo energetickou síť pulsním odběrem.



Obrázek 9 - Zkoušené stroje

3.1 Parametry zkoušených motorů

Na Obrázek 10 (převzat z datového listu v Příloha A -) je zatěžovací charakteristika měřených strojů v motorickém režimu pro různé zatížení, kde: černá křivka vyjadřuje jmenovité zatížení stroje na 67 %, šedá křivka vyjadřuje 100 % zatížení po maximální dobu 15 minut, čárkovaná křivka vyjadřuje 110 % přetížení po maximální dobu 60 sekund a tečkovaná křivka vyjadřuje 145 % přetížení po maximální dobu 10 sekund. Po využití nejvyššího přetížení je nutné snížit zatížení na 90 % po minimální dobu 5 minut, kvůli ochlazení stroje.



Obrázek 10 – Zatěžovací charakteristika zkoušených strojů v motorickém režimu

Ze štítku stroje jsou zapsány do Tabulka 1 nejdůležitější parametry.

Tabulka 1 - Štítkové hodnoty zkoušených motorů

Typ motoru	ASB 398K-10/18000	Typ motoru	ASB 398K-10/18000
$P_{2,67\%}$ (kW)	397	U_n (V)	460
$M_{n,67\%}$ (Nm)	18 075	I_n (A)	624
$\Delta P_{\Sigma,67\%}$ (kW)	29,6	f_1 (Hz)	17,8
$P_{2,100\%}$ (kW)	597	$\cos\varphi$ (-)	0,85
$M_{100\%}$ (Nm)	27 127	2p (-)	10
n_n (rpm)	210	η (%)	93,1

kde	$P_{2,67\%}$	výkon motoru při 67% zatížení
	$M_{n,67\%}$	jmenovitý moment při 67% zatížení
	$\Delta P_{\Sigma,67\%}$	celkové ztráty při 67% zatížení
	$P_{2,100\%}$	výkon motoru při 100% zatížení
	$M_{100\%}$	mechanický moment při 100% zatížení
	n_n	jmenovité otáčky
	U_n	jmenovité napětí
	I_n	jmenovitý proud
	f_1	frekvence napájecího napětí
	$\cos\varphi$	účinník
	$2p$	počet pólů
	η	účinnost

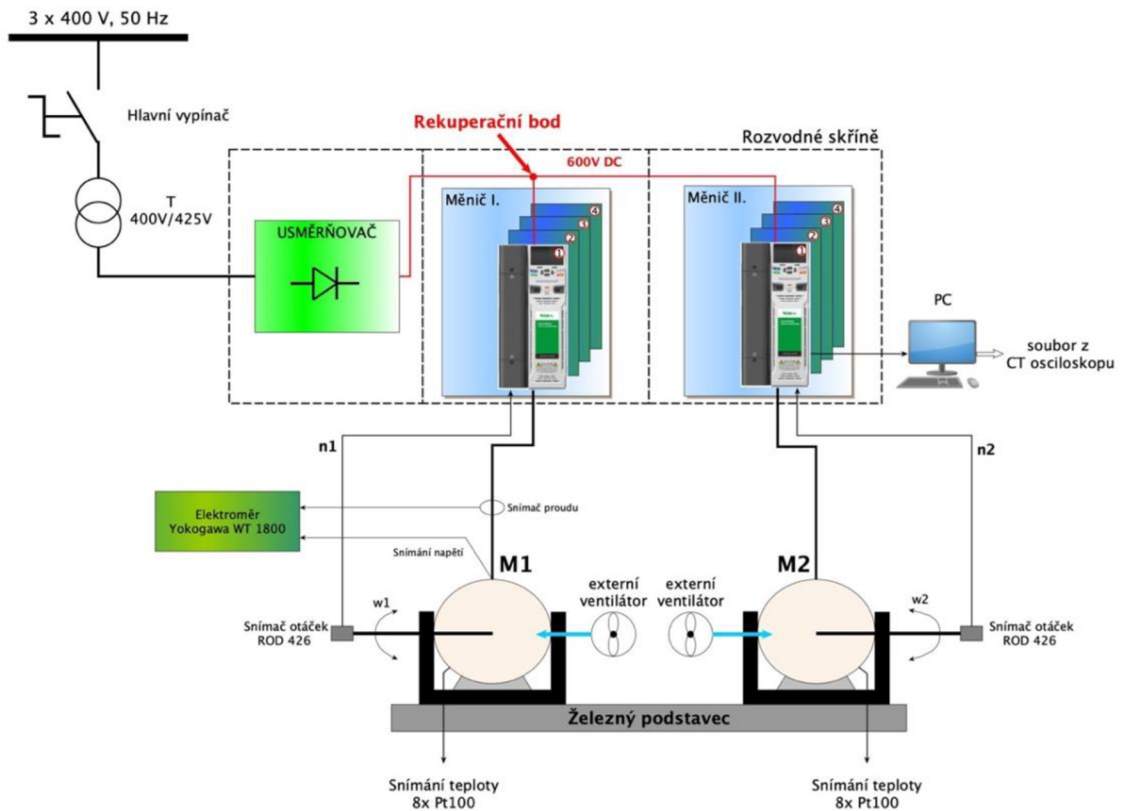
3.2 Popis zkušebního pracoviště

Motory jsou uloženy paralelně na Fe-desce s T-drážkami (Obrázek 11). Každý motor je zafixován jednoúčelovým přípravkem ve tvaru U. Přípravek znemožňuje pohyb motoru i přes vysoký moment setrvačnosti.



Obrázek 11 - Zkušební pracoviště

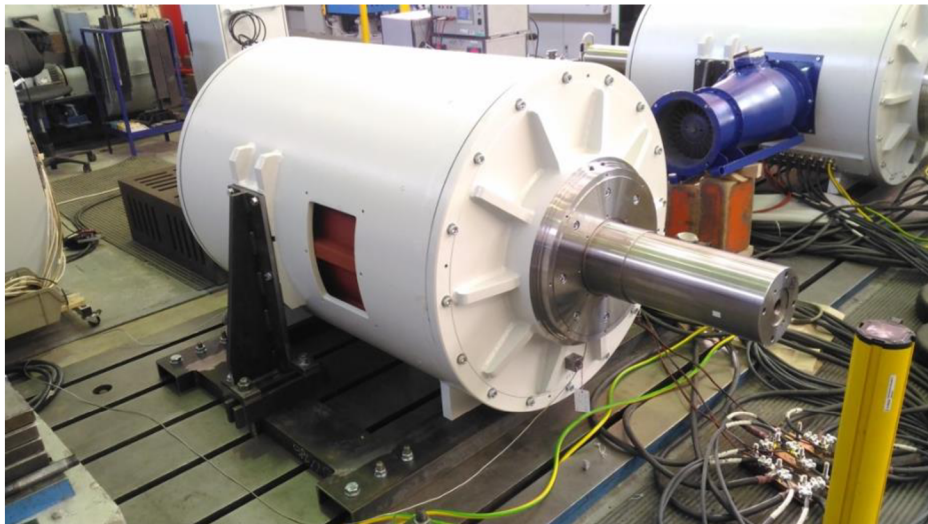
3.2.1 Rozložení pracoviště



Obrázek 12 – Blokové schéma zapojení pracoviště

3.2.2 Upevnění stroje

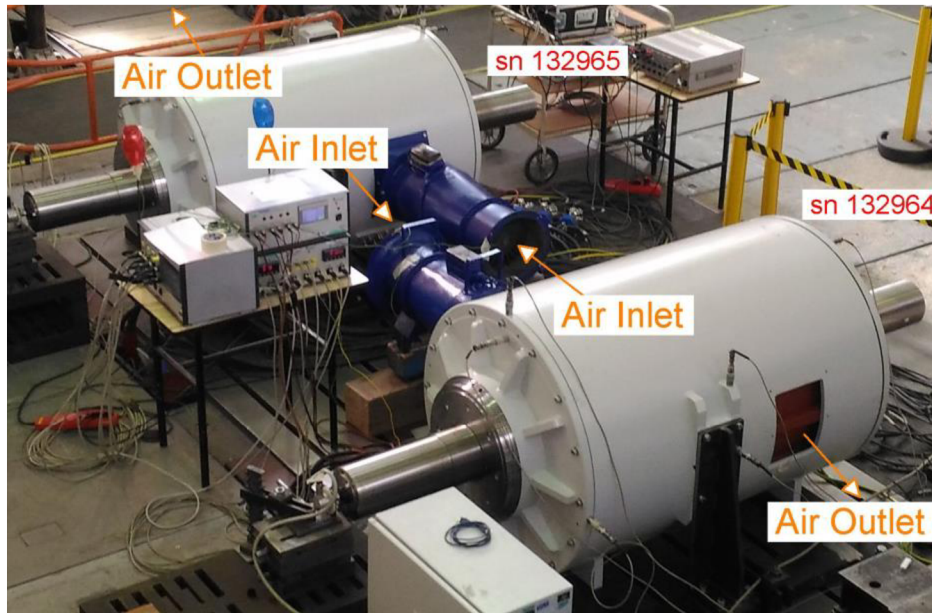
Oba stroje byly upevněny k Fe desce pomocí jednorázových přípravků ve tvaru U, jak je vidět na Obrázek 13.



Obrázek 13 - Upevnění stroje

3.2.3 Chlazení stroje

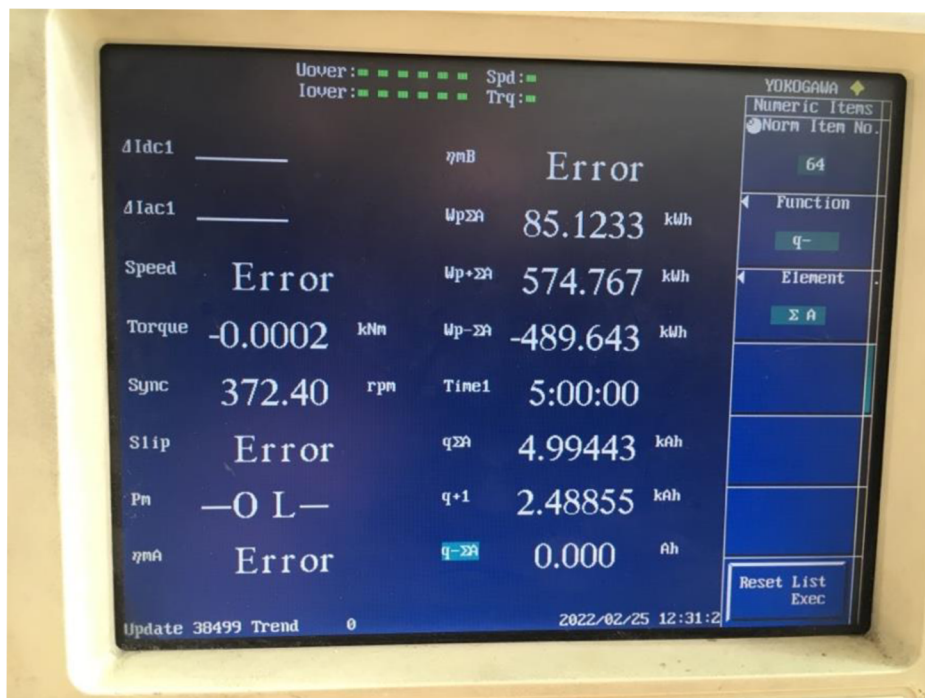
Chlazení bylo zajištěno dvěma externími ventilátory (viz Obrázek 14). Zvolené ventilační jednotky zajišťovaly průtok chladiva $0,73 \text{ m}^3/\text{s}$ [7]. Parametry a celkové ztráty stroje byly vypočteny pro průtok $1,35 \text{ m}^3/\text{s}$ (viz Obrázek 27). Tudíž použité ventilační jednotky zajišťovaly pouze 54 % požadovaného průtoku chladiva.



Obrázek 14 - Chlazení stroje

3.3 Měření

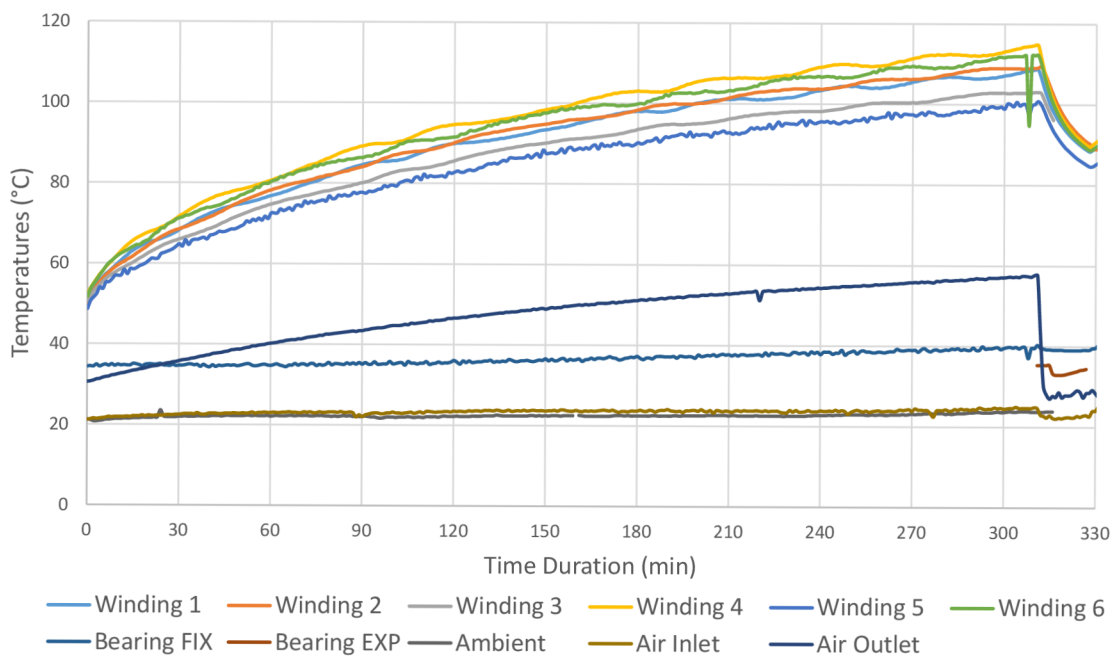
Zatěžovací zkouška trvala 5 hodin. Hodnoty naměřené elektroměrem Yokogawa WT1800 lze vidět na Obrázek 15. Přičemž $W_{p+\Sigma A}$ značí spotřebovanou energii v kWh, $W_{p-\Sigma A}$ značí vygenerovanou energii v kWh, $W_{p\Sigma A}$ značí součet spotřebované a vygenerované energie stroje v kWh a $Time_1$ značí dobu zkoušky. [6]



Obrázek 15 - Display elektroměru na konci zkoušky

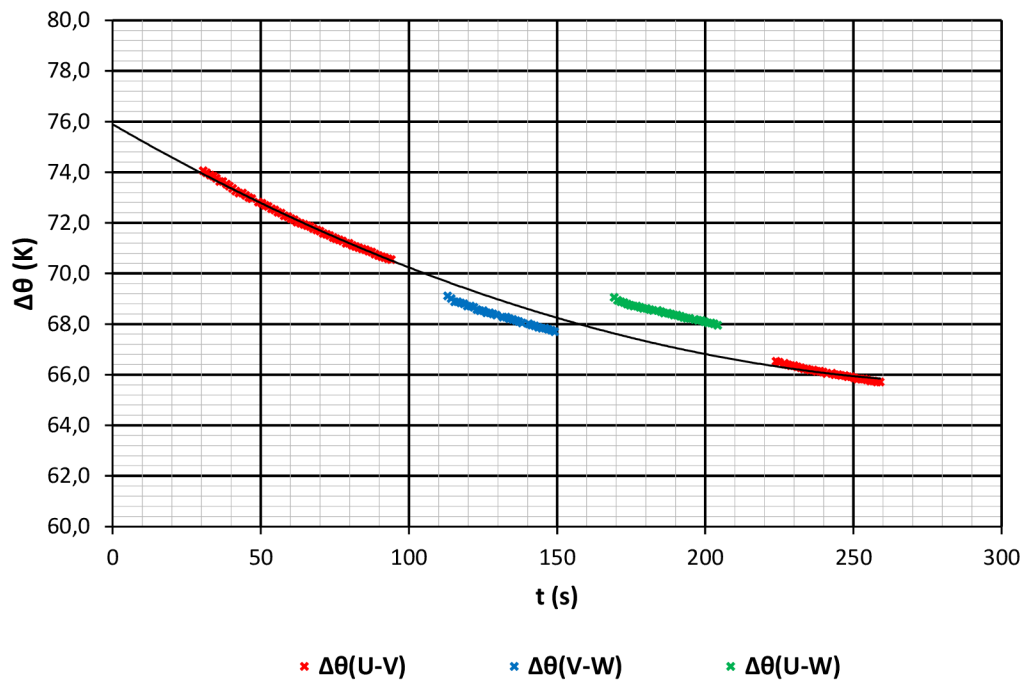
V průběhu zatěžování motorů byla zaznamenávána teplota obou strojů pomocí jedenácti snímačů teploty Pt100. Pro jeden stroj je zobrazen průběh teploty na Obrázek 16. Maximální naměřená teplota dosahovala 114,8°C. [7]

Temperature from PT100 sensors
sn. 134964



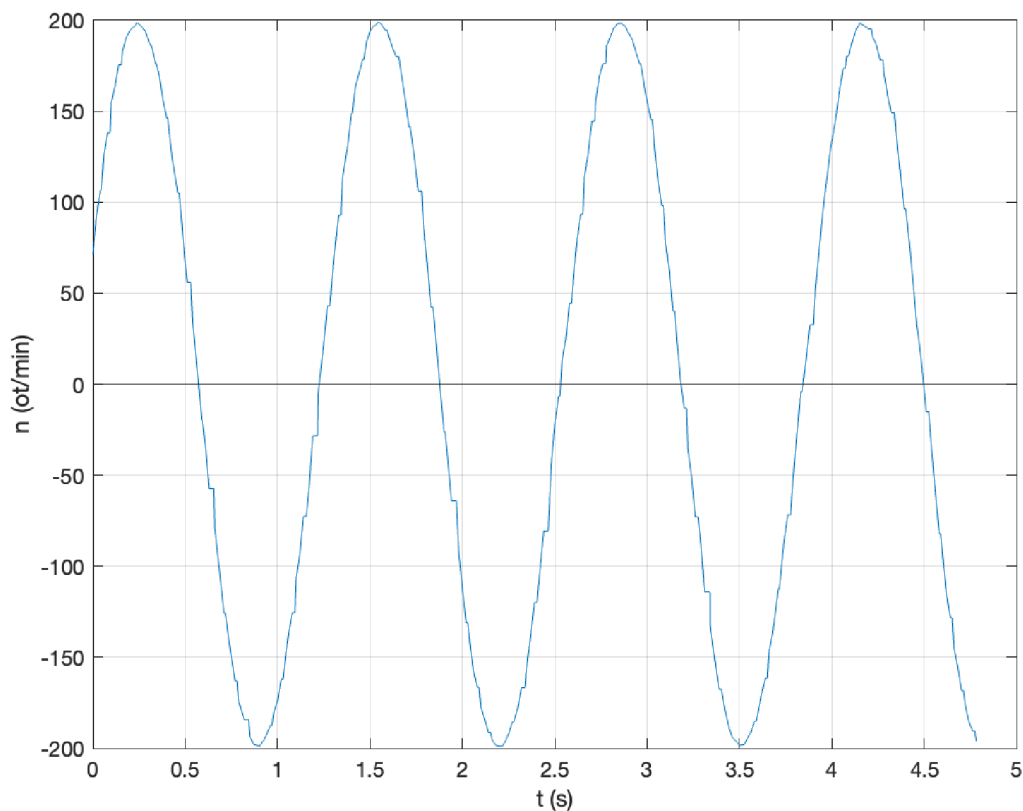
Obrázek 16 - Záznam teploty stroje [7]

Po ukončení zatěžování nastalo měření ochlazení mezi jednotlivými fázemi (viz Obrázek 17). [7]



Obrázek 17 - Záznam měření odporu vinutí mezi jednotlivými fázemi [7]

Zaznamenán byl i průběh otáček. Tyto hodnoty jsou postihnuty chybami. Na Obrázek 18 lze vidět nepřesnosti ve formě „zubů“ (stejná hodnota otáček pro více časových bodů po sobě) na sinusové funkci. To způsobila krátká vzorkovací frekvence, která byla 50 Hz, a komunikace mezi SW CT osciloskop a měničem. Doporučená vzorkovací frekvence je 1-10 kHz.



Obrázek 18 – Průběh změřených otáček

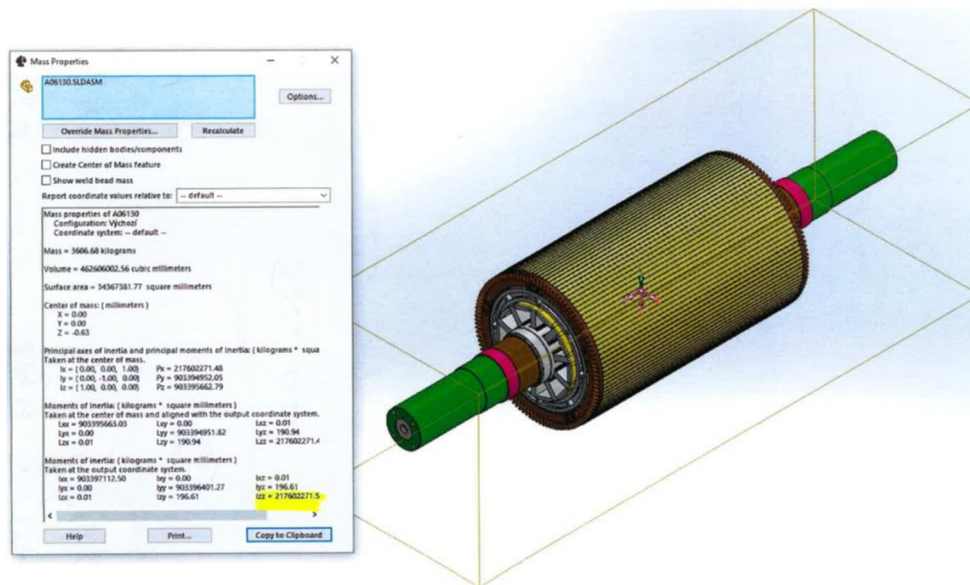
3.4 Zpracování změřených hodnot

Zpracování změřených hodnot bylo provedeno v programu MATLAB. Skript s výpočtem mechanického výkonu je v Příloha B -.

3.4.1 Vstupní hodnoty

K vypočtení výkonu stroje je nutné změřit či vypočíst tyto hodnoty:

- a) **Moment setrvačnosti** – Z konstrukční výrobní dokumentace, která je vytvořena v programu SolidWorks, byla automaticky vygenerována hodnota momentu setrvačnosti rotoru v rotační ose z_z . Moment setrvačnosti je $J = 217,60 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ (viz Obrázek 19).



Obrázek 19 - Výpočet momentu setrvačnosti pomocí simulace

- b) **Závislost otáček na čase** – Při zkoušce byly zapsané otáčky stroje v daný čas. Průběh otáček je zobrazen na Obrázek 18. Ke zpracování dat bylo použito 286 hodnot za dobu 4 782 ms.
- c) **Data z elektroměru** – Z monitoru výkonového analyzátoru (Obrázek 15) byly odečteny hodnoty změřených energií a celkový čas měření:

$$W_{p\Sigma A} = 85,1233 \text{ kWh}$$

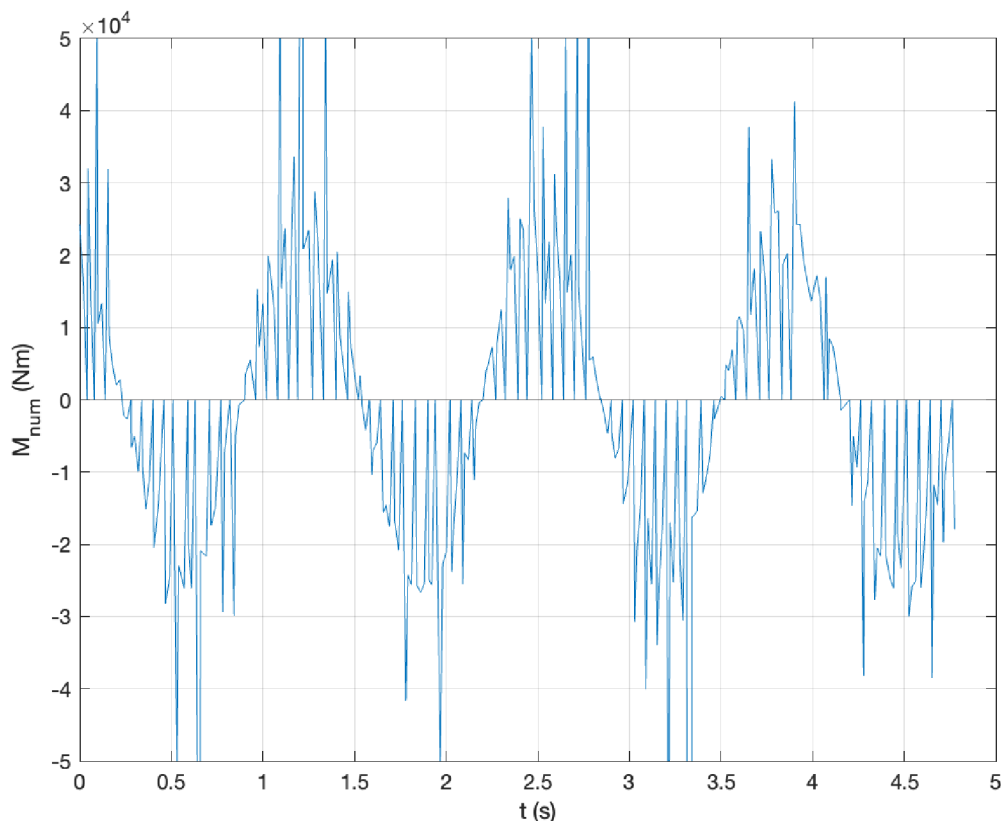
$$W_{p+\Sigma A} = 574,767 \text{ kWh}$$

$$W_{p-\Sigma A} = -489,643 \text{ kWh}$$

$$Time_1 = 5:00:00 \text{ h}$$

3.4.2 Přímý výpočet momentu

Na Obrázek 18 lze vidět, že měření otáček v závislosti na čase bylo postihnuto mnoho chybami. Pomocí derivace úhlové rychlosti, vypočtené z naměřených otáček, a momentu setrvačnosti, byl vypočten průběh mechanického momentu. Kvůli nespojitosti průběhu naměřených otáček byl průběh vypočteného mechanického momentu značně deformován (Obrázek 20). Proto není možné přesně stanovit jeho efektivní hodnotu, která je potřebná k výpočtu střední hodnoty mechanického výkonu na hřídeli.



Obrázek 20 - Závislost numericky vypočteného momentu na čase

3.4.3 Výpočet momentu z aproximační funkce

Pro výpočet efektivních hodnot mechanického momentu a výkonu stroje je zapotřebí pracovat pouze s jednou periodou ze změřených dat. Byla použita funkce `findpeaks()`, která našla jednotlivé vrcholy průběhu změřených otáček. Následně byly vybrány hodnoty mezi prvním a druhým vrcholem. Odečtením času prvního vrcholu od času druhého vrcholu byla vypočtena velikost periody $T = 1,301$ s. Následně byla provedena korekce času, aby pracovní perioda začínala v čase $t = 0$ s.

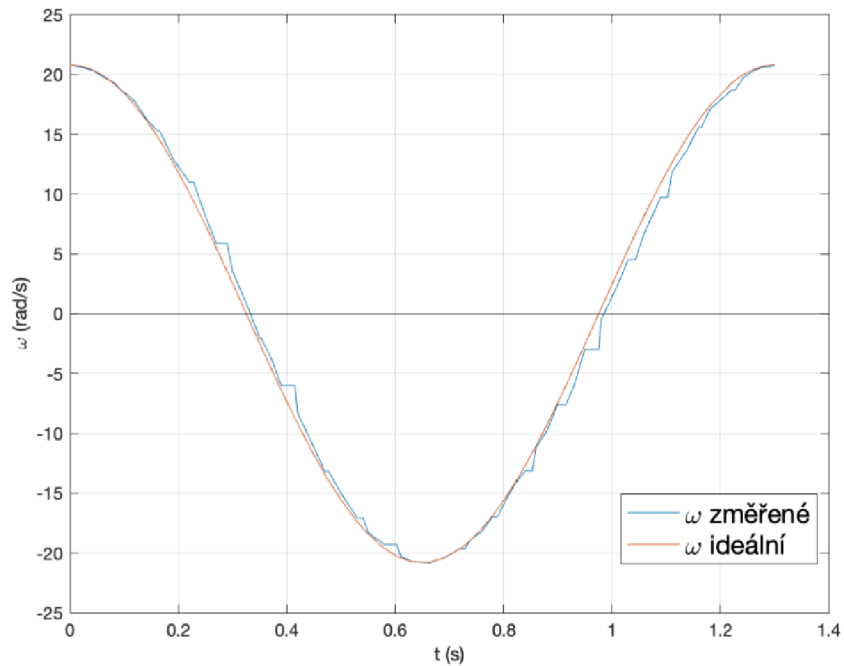
K předejití deformace průběhu mechanického momentu byla použita aproximační funkce. Tato funkce může být libovolná. Vzhledem k nastavení aplikačního modulu v měničích, který generoval sinusový signál, by byla vhodná sinusová funkce. Jelikož perioda naměřených otáček je definována pomocí dvou maxim, je nejvhodnější aplikovat kosinovou funkci.

Při přepočtu na úhlovou rychlost je rovnice této funkce

$$\omega(t) = \omega_{\max} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{1}{T} \cdot t_n\right) = \omega_{\max} \cdot \cos(\omega_f \cdot t_n), \quad (3.1)$$

kde	ω_{\max}	maximální úhlová rychlost
	ω_f	úhlová rychlost napájecí frekvence
	t_n	čas odpovídající změřeným otáčkám

Na Obrázek 21 je znázorněna jedna perioda vypočtené úhlové rychlosti z naměřených otáček a ideální kosinová funkce podle rovnice (3.1).



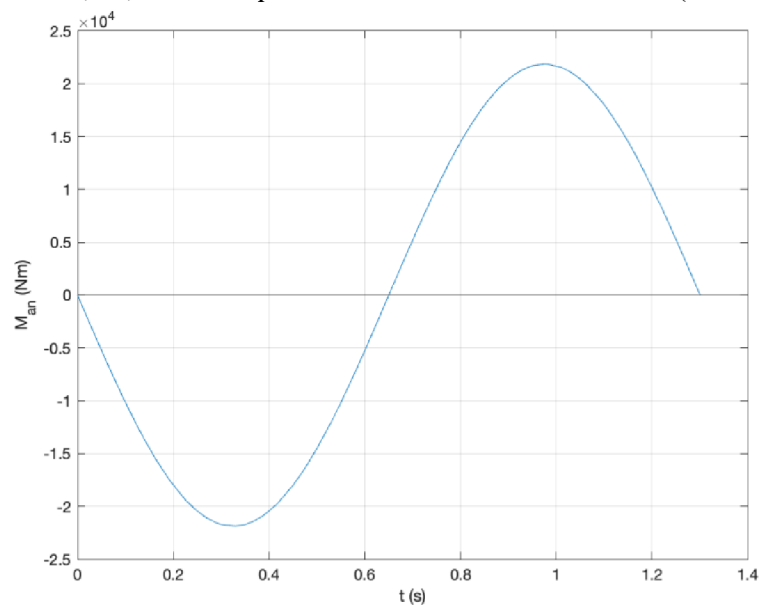
Obrázek 21 - Průběh změřené a ideální úhlové rychlosti

Výpočet mechanického momentu

Pro výpočet mechanického momentu bylo zapotřebí zjistit derivaci úhlové rychlosti podle času

$$M_{\text{mech}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \omega_{\text{max}} \cdot \omega_f \cdot [-\sin(\omega_f \cdot t_n)]. \quad (3.2)$$

Pomocí rovnice (3.2) lze určit průběh mechanického momentu (viz Obrázek 22).



Obrázek 22 - Závislost analyticky vypočteného momentu na čase

Všechny následující vypočtené hodnoty jsou hodnoty dlouhodobé, ne okamžité. Neboli každá hodnota je určená pro čtvrt či půl periodu změřených otáček.

Výpočet efektivní hodnoty momentu

Efektivní hodnota mechanického momentu byla vypočtena z průběhu momentu na Obrázek 22

$$M_{ef} = 15\,419,7 \text{ Nm.} \quad (3.3)$$

Výpočet střední hodnoty mechanického výkonu

Mechanický výkon se skládá pouze z činného výkonu, který je určen jako násobek střední hodnoty úhlové rychlosti a efektivní hodnoty momentu

$$\begin{aligned} P_{mech} = P_{\check{c}} &= M_{ef} \cdot \omega_{stř} = M_{ef} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \omega_{max} = \\ &= 15\,419,7 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 20,8078 = 204\,260 \text{ W.} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Výpočet příkonu

Příkon stroje je určen ze součtu absolutních hodnot spotřebované a vygenerované energie za celkový čas měření

$$P_1 = \frac{W_{p+\Sigma A}}{\frac{Time_1}{2}} = \frac{574\,767}{\frac{5}{2}} = 229\,907 \text{ W.} \quad (3.5)$$

Výpočet elektrického výkonu

Elektrický výkon je výkon vygenerovaný strojem za půl periodu, který se vrací zpět o měniče

$$P_{el} = \frac{W_{p-\Sigma A}}{\frac{Time_1}{2}} = \frac{-489,643}{\frac{5}{2}} = -195\,857 \text{ W.} \quad (3.6)$$

Výpočet ztrát v motorickém režimu

$$\Delta P_{mot} = P_1 - P_{mech} = 229\,907 - 204\,260 = 25\,647 \text{ W} \quad (3.7)$$

Výpočet ztrát v generátorickém režimu

$$\Delta P_{gen} = P_{mech} - P_{el} = 204\,260 - 195\,857 = 8\,403 \text{ W} \quad (3.8)$$

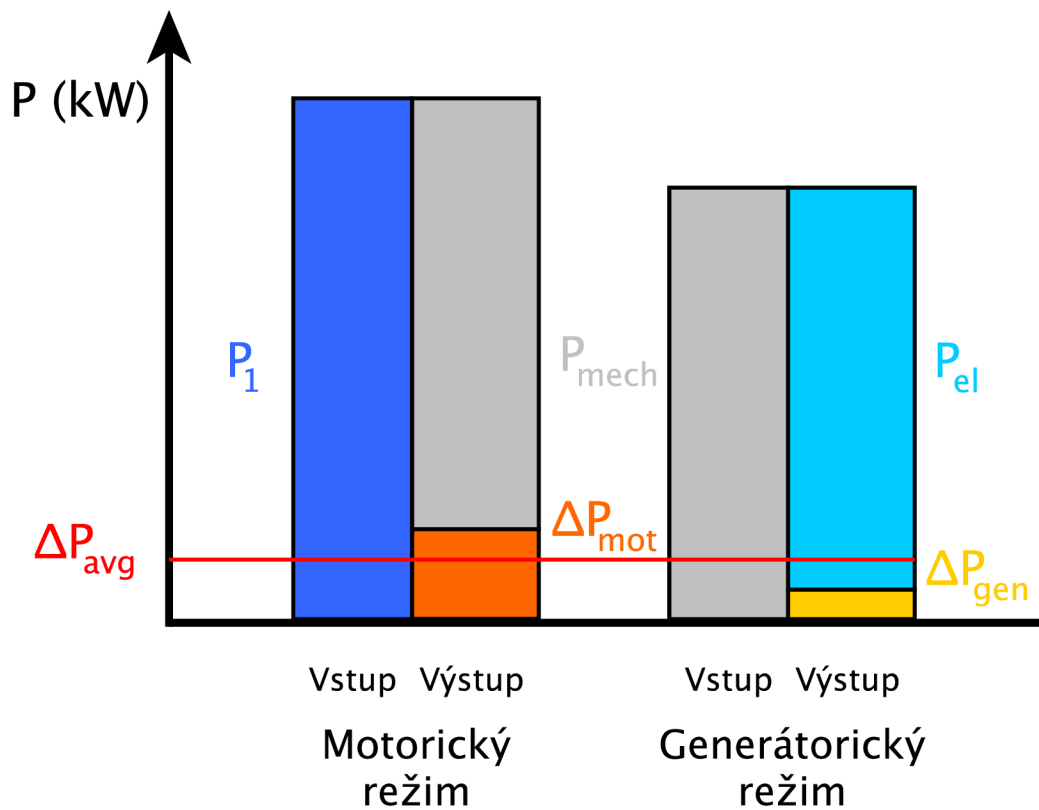
Výpočet celkových průměrných ztrát

$$\Delta P_{\text{avg}} = \frac{W_{\text{p}\Sigma A}}{\text{Time}_1} = \frac{\Delta P_{\text{mot}} + \Delta P_{\text{gen}}}{2} = \frac{25\,647 + 8\,403}{2} = 17\,025 \text{ W} \quad (3.9)$$

Na Obrázek 23 jsou znázorněny rozložení výkonů a ztrát pro motorický a generátorický režim. Nejde o přesné průběhy, ale pouze o ilustrativní rozložení jednotlivých veličin.

V motorickém režimu se spotřebovává energie dodaná elektrickým příkonem P_1 . Výstupem je mechanický výkon P_{mech} . Ztráty během tohoto režimu odpovídají ΔP_{mot} .

V generátorickém režimu se spotřebovává energie dodaná mechanickým příkonem P_{mech} . Výstupem je elektrický výkon P_{el} . Ztráty během tohoto režimu odpovídají ΔP_{gen} . ΔP_{avg} jsou celkové průměrné ztráty za půlperiodu mechanických otáček.



Obrázek 23 – Ilustrativní rozložení výkonů a ztrát v generátorickém a motorickém režimu

4. OPTIMALIZACE CYKlickÉ AKCElERACní METODY MĚŘENí

Použitý postup a elektrické přístroje nebyly pro tuto metodu měření ideální. Z toho důvodu je zde navrženo pár vylepšení.

4.1 Nepřesnosti metody

Každá metoda měření se potýká s chybami a nepřesnostmi měření, na které je potřeba brát ohled. Cyklická akcelerační metoda je postihnuta chybou měřících přístrojů. Každý měřící přístroj má danou možnou odchylku měřených hodnot.

Hodnota momentu setrvačnosti stroje, určena pomocí programu SolidWorks, odpovídá ideálnímu stavu. Jelikož program nezohledňuje výrobní tolerance a případné materiálové nehomogenity, není tato hodnota přesná.

Celkové průměrné ztráty jsou sice konstantní, ale jednotlivé ztráty ve stroji se mění. To je způsobeno cyklickou akcelerací, díky které se neustále mění vstupní hodnoty proudu a napětí. Na proudu jsou hlavně závislé Joulovy ztráty ve statorovém i v rotorovém vinutí. Na napětí jsou převážně závislé ztráty v železe (hysterezní ztráty i ztráty vířivými proudy).

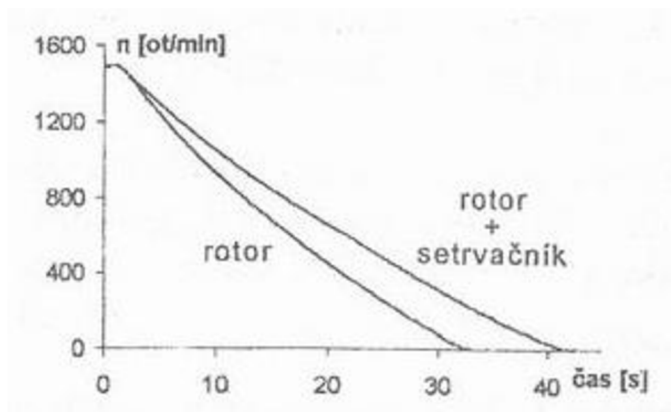
4.2 Změření momentu setrvačnosti metodou přídavného setrvačnicku

Metoda přídavného setrvačnicku spočívá v porovnání času doběhu motoru naprázdno a zatíženého motoru. Zátěž zde představuje setrvačnick se známým momentem setrvačnosti (spojka, jiný stroj, zátěž atd.). Výsledný moment setrvačnosti měřeného stroje se určí pomocí vztahu [8]

$$J = J_s \frac{t_1}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

kde J_s moment setrvačnosti setrvačnicku
 t_1 čas doběhu naprázdno
 t_2 čas doběhu se setrvačnickem

Na Obrázek 24 jsou znázorněny průběhy doběhové charakteristiky.



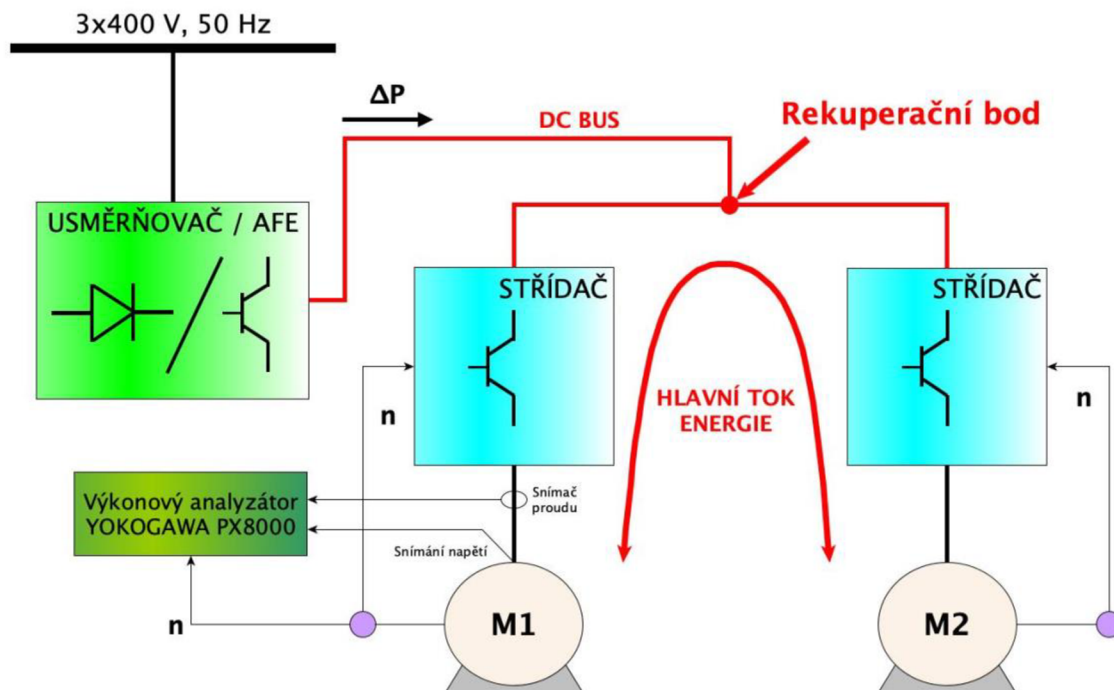
Obrázek 24 - Doběhová charakteristika rotoru a rotoru se setrvačníkem [8]

4.3 Výkonnější analyzátor se zápisem otáček

Použitý výkonový analyzátor Yokogawa WT1800 je pro tuto metodu dostačující, avšak je možné použít i datalogger Yokogawa PX8000. Tento analyzátor má mimo jiné i funkci měření ve stylu osciloskopu. Tato funkce zajišťuje real-time zápis hodnot otáček i energie zároveň a tím předchází chybám, které se vyskytly v tomto měření (viz 3.3).

4.4 Návrh optimalizovaného pracoviště

Jak je popsáno v kapitole 4.3, nejvhodnější přístroj pro zápis hodnot otáček stroje a měření energie v real-time je výkonový analyzátor PX8000. Zapojení tohoto analyzátoru, pro soustavu dvou motorů, je zobrazeno na Obrázek 25.



Obrázek 25 - Blokové schéma optimalizovaného pracoviště pro soustavu dvou motorů

Postup zpracování dat:

- Nezávislé změření momentu setrvačnosti
- Průběžné měření a zápis otáček, napětí a proudu
- Odečtení dat z výkonového analyzátoru
- Výpočet efektivní hodnoty mechanického momentu
- Výpočet střední hodnoty mechanického výkonu
- Určení příkonu, elektrického výkonu a ztrát stroje

5. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala popsáním cyklické akcelerační metody měření elektrických strojů a zpracováním naměřených dat. Tato metoda byla zvolena z důvodu velmi rychlé realizace a nedostupnosti potřebných prvků (spojka, dynamometr).

Začátek práce je věnován asynchronnímu stroji, jeho konstrukci, principu funkce a popisu jednotlivých ztrát. Dále jsou popsány zkušební metody měření pro určení účinnosti asynchronních strojů z normy ČSN EN 60034-2-1 a princip cyklické akcelerační metody.

Aplikace metody proběhla ve firmě AVL Moravia s. r. o. V průběhu zkoušky se měřily otáčky, energie a oteplení stroje. Naměřené hodnoty otáček byly postihnuty chybou, která byla způsobena nízkou vzorkovací frekvencí a komunikací mezi měničem a SW CT osciloskopu. Tyta chyba se podařilo odstranit pomocí implementace ideální COS funkce v programu MATLAB. Aplikací pohybové rovnice byl vypočten mechanický výkon $P_{\text{mech}} = 204\,260\text{ W}$. Následně z naměřených dat výkonovým analyzátozem byl vypočten příkon $P_1 = 229\,907\text{ W}$, elektrický výkon vygenerovaný strojem zpět do měniče $P_{\text{el}} = -195\,857\text{ W}$ a celkové průměrné ztráty stroje $\Delta P_{\text{avg}} = 17\,025\text{ W}$.

Vypočtené průměrné ztráty korespondují s předpokládanými celkovými ztrátami v Tabulka 1. V případě přepočtení předpokládaných ztrát na vypočtený mechanický moment nejsou tyto ztráty zcela shodné s vypočtenými průměrnými ztrátami. To je způsobené nekonstantními ztrátami v průběhu měření a použitím ventilačních jednotek, které nevytvářely dostatečný průtok chladiva. Oteplení stroje na teplotu $114,8\text{ °C}$ nepřesáhlo maximální teplotu izolace 180 °C .

Optimalizace metody spočívá v přesnějším změření momentu setrvačnosti stroje a použitím výkonového analyzátoru s funkcí měření ve stylu osciloskopu. Tyto vylepšení by měly být provedeny v rámci diplomové práce, která by měla zahrnovat ověření metody na jiných vzorcích motorů a současně provedení analýzy chování jednotlivých ztrát motorů.

Metoda je vhodná pro zkoušky strojů s vysokým momentem setrvačnosti (např. nízkootáčkové stroje, stroje s vnějším rotorem), strojů s atypickým zakončením hřídele (složitě mechanické spojení s dynamometrem) a pro stroje s vlastním resolverem. Tato metoda je se s výhodou může aplikovat na skupině strojů při životnostních zkouškách.

LITERATURA

- [1] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje*. Brno.
- [2] *Zkoušení elektrických strojů*, 1951. Část 1. a 2. MEZ VÝVOJOVÝ ZÁVOD.
- [3] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické pohony*. Brno.
- [4] ČSN EN 60034-2-1: *Točivé elektrické stroje – Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*, 2014. Ed. 2.
- [5] CAHA, Zdeněk a Miroslav ČERNÝ, 1990. *Elektrické pohony*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury. ISBN 80-03-00418-7.
- [6] WT1800 Precision Power Analyzer Getting Started Guide. 3rd Edition. YOKOGAWA.
- [7] BOLUŠEK, Petr a Zdeněk DVOŘÁK, 2022. *Test report no. 13245*. AVL Moravia s. r. o., Testing laboratory.
- [8] BARTOŠ, Václav a Bohumil SKALA, 2002. *Měření na elektrických strojích*. Západočeská univerzita v Plzni. ISBN 80-7082-896-X.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
HW	hardware
4Q	čtyř kvadrantový
CT	Control Techniques
SW	software
PLC	programovatelný logický automat

Symboly:

n_s	synchronní otáčky	(rpm)
f_1	frekvence napájecího napětí	(Hz)
p	počet pólových dvojic	(-)
s	skluz	(-)
n	otáčky rotoru	(rpm)
ΔP_{Cu1}	Joulovy ztráty statorového vinutí	(W)
I_1	statorový proud	(A)
R_1	odpor statorového vinutí	(Ω)
ΔP_e	elektrické ztráty rotorového vinutí	(W)
ΔP_{Cu2}	Joulovy ztráty rotorového vinutí	(W)
P_δ	výkon přenášený vzduchovou mezerou	(W)
m	počet fází stroje	(-)
I_2	rotorový proud	(A)
R_2	odpor rotorového vinutí	(Ω)
ΔP_{mech}	mechanické ztráty	(W)
ΔP_f	ztráty třením	(W)
ΔP_v	ztráty ventilační	(W)
M_z	zátěžný moment	(Nm)
ω	úhlová rychlost rotoru	(rad/s)
b_2	konstanta stroje	(-)
ΔP_T	celkové ztráty	(W)
P_1	příkon	(W)
P_2	výkon	(W)
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	(W)
ΔP_{dod}	dodatečné ztráty	(W)
P_{el}	elektrický výkon	(W)
η	účinnost	(-)
ΔP_{fw}	korigované ztráty třením a ztráty ventilační	(W)

$\Delta P_{s\theta}$	korigované ztráty ve statorovém vinutí	(W)
$\Delta P_{r\theta}$	korigované ztráty v rotorovém vinutí	(W)
ΔP_{LL}	zbytkové ztráty	(W)
$P_{1, \theta}$	korigovaný příkon	(W)
ΔP_c	konstantní ztráty	(W)
ΔP_1	celkové ztráty prvního motoru	(W)
ΔP_2	celkové ztráty druhého motoru	(W)
P_M	výkon spotřebovaný motorem	(W)
M_d	dynamický moment	(Nm)
M_{stroje}	celkový točivý moment	(Nm)
$M_{zátěžný}$	poháněcí moment	(Nm)
J	moment setrvačnosti	(kg*m ²)
ε	úhlové zrychlení	(rad/s ²)
t	čas	(s)
φ	úhlové natočení	(rad)
P_{mech}	mechanický výkon na hřídeli	(W)
$P_{2, 67 \%}$	jmenovitý výkon při 67% zatížení	(W)
$M_{n, 67 \%}$	jmenovitý moment při 67% zatížení	(Nm)
$\Delta P_{\Sigma, 67 \%}$	celkové ztráty při 67% zatížení	(W)
$P_{2, 100 \%}$	výkon při 100% zatížení	(W)
$M_{100 \%}$	moment při 100% zatížení	(Nm)
n_n	jmenovité otáčky	(rpm)
U_n	jmenovité napětí	(U)
I_n	jmenovitý proud	(A)
$\cos \varphi$	účinník	(-)
$2p$	počet pólových dvojic	(-)
$W_{p+\Sigma A}$	spotřebovaná energie	(Wh)
$W_{p-\Sigma A}$	vygenerovaná energie	(Wh)
$W_{p\Sigma A}$	součet spotřebované a vygenerované energie	(Wh)
$Time_1$	doba zkoušky	(h)
<i>Temperature</i>	teplota	(°C)
<i>Time Duration</i>	doba trvání	(min)
$\Delta \theta$	oteplení	(K)
T	perioda	(s)
$\omega(t)$	funkce úhlové rychlosti	(rad/s)
ω_{max}	maximální úhlová rychlost	(rad/s)
t_n	čas odpovídající změřeným otáčkám	(s)
ω_f	úhlová rychlost napájecí frekvence	(rad/s)
M_{mech}	mechanický moment	(Nm)
M_{an}	analyticky vypočtený mechanický moment	(Nm)

M_{ef}	efektivní hodnota mechanického momentu	(Nm)
$\omega_{stř}$	střední hodnota úhlové rychlosti	(rad/s)
ΔP_{mot}	ztráty v motorickém režimu	(W)
ΔP_{gen}	ztráty v generátorickém režimu	(W)
ΔP_{avg}	celkové průměrné ztráty	(W)
J_s	moment setrvačnosti setrvačnicku	(kg*m ²)
t_1	čas doběhu naprázdno	(s)
t_2	čas doběhu se setrvačnickem	(s)

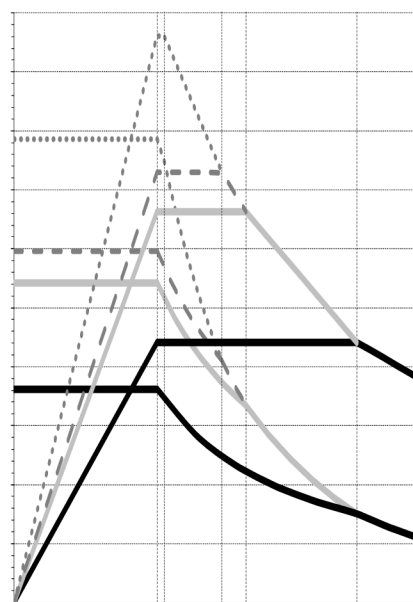
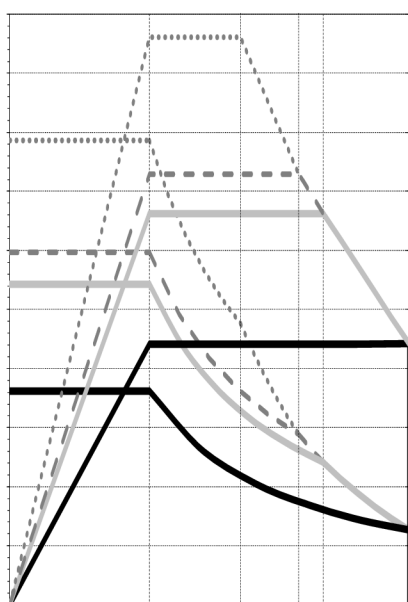
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - DATOVÝ LIST DBL	45
PŘÍLOHA B - ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU MECHANICKÉHO MOMENTU	48

Příloha A - Datový list DBL

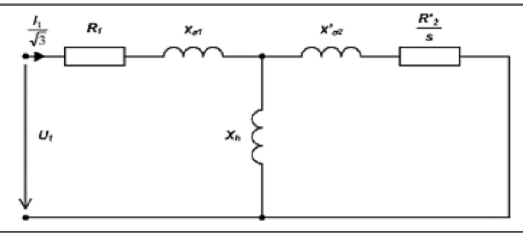
MOOG

	————			———			- - - -				
φ												



Obrázek 26 – Datový list 1/3

Equivalent circuit diagram (driving data)			1) 4) 5)		
U_1	460	V	temp.	100	°C
f_1	17,8	Hz	R_1	38	mΩ
P_{mech}	397	kW	R'_2	20	mΩ
I_1	623	A	$X_{\sigma 1}$	101	mΩ
$\cos \phi_1$	0,85	-	$X'_{\sigma 2}$	78	mΩ
T	18066	Nm	$X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}$	179	mΩ
n	210	rpm	X_n	2,83	Ω
I_0	272	A	s	1,50	%
$\Sigma \Delta P$	28922	W	l	-233	kg·m ²



Cooling parameters (driving data)			1) 4) 5)			Ventilation data		Design data	
RMS power	397	kW	type of 3~ motor		mounting		IM6802		
nominal speed	210	rpm	efficiency class		protection		IP21		
RMS losses	29,6	kW	number of the units		cooling		IC37		
air volume	1,35	m ³ /s	electrical power		weight		~9200 kg		
pressure losses	2280	Pa	frequency		power supply		converter		
ambient temperature	40	°C	voltage		connection		D		
insulation class	180(H)	-	rated current		drawings				
temperature class	155(F)	-	Ventilation unit is not the scope of the delivery						
temperature rise of the air	18	K							

Notes:

- 1) Sine wave data, the first harmonic, the vendor of the motor is not responsible for design of complete drive.
- 2) Radial load (rev A): $F_{tractive}=29651N / F_{tractive (O.L.)}=64524N$ and $F_{wheel}=44482N$ at 1168,4mm; $F_{roller}=15569N$ at 952,5mm.
- 3) Radial load (rev B): $F_{tractive}=44499N / F_{tractive (O.L.)}=64524N$ and $F_{wheel}=111205N$ at 1041,4mm; $F_{roller}=15569N$ at 901,7mm. Minimum safety factor to fatigue limit 1,5.
- 4) Tolerances acc. EN60034.
- 5) **PRELIMINARY DATA!**

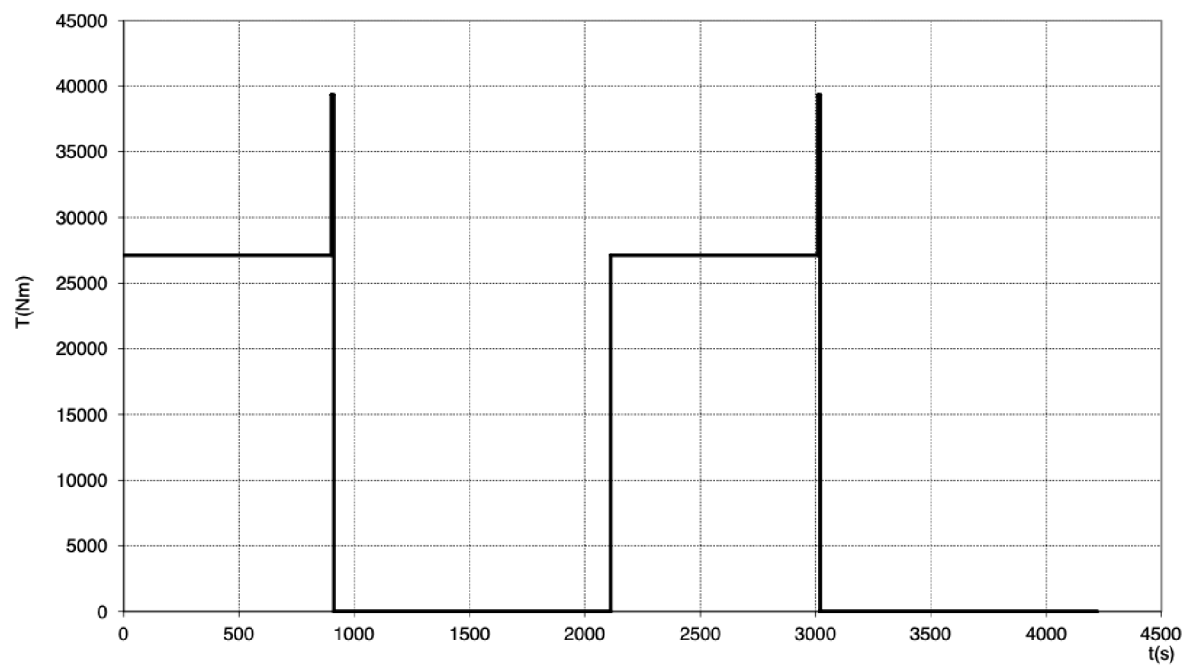
rev1 27.1.2021 Martinek changed radial shaft load regarding to revision B
 rev0 27.2.2020 Martinek creation of the document

27.1.2021

2 / 3 Martinek

Obrázek 27 - Datový list 2/3

Loading cycle



Obrázek 28 - Datový list 3/3

Loading cycle: 15min 27127Nm, 10s 39334Nm, 20min pause.

This cycle can start only from cold state. If this cycle follows after S1, 30min pause is necessary before it.

rev1	27.1.2021	Martinek	changed radial shaft load regarding to revision B
rev0	27.2.2020	Martinek	creation of the document

27.1.2021

3 / 3 Martinek

Příloha B - Zdrojový kód výpočtu mechanického momentu

```
%% Vstupní- hodnoty

J=217.6022715;% moment setrvačnosti (kg*m^2)

t=readmatrix('Otacky_zmerene.xlsx','Range','A2:A287')./1000; % načtení
dat změřeného času (s)

n=readmatrix('Otacky_zmerene.xlsx','Range','B2:B287'); % načtení dat
změřených otáček (ot/min)

figure(1) % graf zobrazující naměřené otáčky
plot(t,n)
xlabel('t (s)')
ylabel('n (ot/min)')
yline(0, '-')
grid on
title('Naměřené otáčky')

%% Přímý výpočet

t_num=t'; % korekce pole času
w_num=2*pi*n'/60; % výpočet úhlové rychlosti

i=linspace(1,numel(w_num)-1,numel(w_num)-1); % pomocný vektor k derivaci
úhlové rychlosti za čas
dw_num=(w_num(i+1)-w_num(i))./(t_num(i+1)-t_num(i)); % derivace úhlové
rychlosti za čas

M_num=J*dw_num; % výpočet mechanického momentu

P_num=M_num.*w_num(1:numel(w_num)-1); % výpočet mechanického výkonu

figure(2) % graf zobrazující- mechanický moment
plot(t_num(1:end-1),M_num)
xlabel('t (s)')
ylabel('M_n_u_m (Nm)')
ylim([-50000 50000])
yline(0, '-')
grid on
title('Numericky vypočtený mechanický moment')

%% Výpočet z aproximační funkce

[~,locs]=findpeaks(n); % vyhledání vrcholů signálu
n_1=n(locs(1):locs(2)); % ořezání hodnot otáček
t_1=t(locs(1):locs(2)); % ořezání hodnot času

r=1:numel(t_1); % pomocný vektor pro korekci času
t_1(r)=t_1(r)-t_1(1); % korekce času => 0 až T

t_end=t_1(end); % poslední čas měření
t_start=t_1(1); % počáteční čas měření
T=(t_end-t_start); % perioda (s)
```

```

w_1=2*pi*n_1/60; % výpočet úhlové rychlosti

w_max_an=max(w_1); % maximální hodnota úhlové rychlosti
w_an=w_max_an*cos(2*pi*(1/T)*t_1); % implementace ideální COS funkce
úhlové rychlosti

figure(3) % graf zobrazující jednu periodu změřených a proložených hodnot
úhlové rychlosti
plot(t_1,w_1,t_1,w_an)
xlabel('t (s)')
ylabel('\omega (rad/s)')
yline(0, '-')
grid on
title('Jedna perioda změřené a ideální mechanické úhlové rychlosti')
legend({'\omega změřené', '\omega ideální'}, 'FontSize', 15)

dw_an=w_max_an*(2*pi*(1/T))*(-sin(2*pi*(1/T)*t_1)); % derivace úhlové
rychlosti

M_an=J*dw_an; % výpočet mechanického momentu

j=linspace(2, numel(t_1), numel(t_1)-1); % pomocný vektor pro určení dt
dt(1)=0;
dt(j)=t_1(j)-t_1(j-1); % určení dt
dt=dt';

M_ef_an_1=sqrt((sum(M_an.^2.*dt))/T); % výpočet efektivní hodnoty
momentu pomocí základního vztahu
M_ef_an_2=max(M_an)/sqrt(2); % výpočet efektivní hodnoty momentu pomocí
odvozeného vztahu

P_mech=2/pi*w_max_an*M_ef_an_1; % výpočet mechanického výkonu

figure(4) % graf zobrazující mechanický moment
plot(t_1,M_an)
xlabel('t (s)')
ylabel('M_a_n (Nm)')
yline(0, '-')
grid on
title('Analyticky vypočtený mechanický moment')

```