



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

AKCELERAČNÍ METODA MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

ACCELERATION METHOD OF MEASURING ELECTRICAL MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Ředina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Ondřej Ředina

ID: 220780

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Akcelerační metoda měření elektrických strojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Pro definované rychlostní profily proveďte oteplovací zkoušku novou akcelerační metodou.
2. Analyzujte naměřené hodnoty a porovnejte je s teoreticky stanovenými.
3. Vypracujte metodiku pro měření akcelerační metodou.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

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

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Tato práce se zabývá akcelerační metodou měření elektrických strojů. Začátek práce je věnován popisu standardním zatěžovacím metodám, popisu akcelerační metody a rozboru ztrát v elektrickém stroji. Jsou zvoleny dvě modulace otáček: lineární a sinusová. Každá modulace vyžaduje jiný postup určení parametrů rychlostního profilu. K aplikaci metody je nakresleno schéma zapojení pracoviště a provedena jeho optimalizace. Následně je provedeno ověření použitelnosti osciloskopické karty, která zajišťuje určení okamžité frekvence. Před samotnou zkouškou je provedeno měření momentu setrvačnosti a výpočet parametrů rychlostního profilu. Akcelerační metoda je doplněná zkouškou plným zatížením k detailnějšímu porovnání výsledků. Naměřená data se téměř shodují s předpokládanými hodnotami a průběhy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akcelerační metoda, speciální elektrické stroje, částečné zatížení, ztráty, modulace otáček

ABSTRACT

This thesis deals with the acceleration method of measuring electrical machines. The beginning of the work is dedicated to the description of standard loading methods, the description of the acceleration method and the analysis of losses in the electrical machine. Two speed modulations are selected: linear and sinusoidal. Each modulation requires a different procedure for determining the speed profile parameters. To apply the method, a diagram of the connection of the workplace is drawn and its optimization is carried out. Subsequently, the usability of the oscilloscope card is verified, which ensures the determination of the instantaneous frequency. Before the test itself, the moment of inertia is measured and the parameters of the speed profile are calculated. The acceleration method is supplemented by a full load test for a more detailed comparison of the results. The measured data almost coincide with the predicted values and trends.

KEYWORDS

Acceleration method, special electrical machines, partial load, lossess, speed modulation

ŘEDINA, Ondřej. *Akcelerační metoda měření elektrických strojů*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2024. Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Ondřej Ředina
VUT ID autora: 220780
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Akcelerační metoda měření elektrických strojů

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 diplomové panu Ing. Daliboru Červinkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Taktéž děkuji firmě AVL Moravia s. r. o. a jejím pracovníkům za poskytnutí zázemí, potřebného vybavení a důležitých poznatků. Dále děkuji firmě Moog Brno s. r. o. a jejím pracovníkům za umožnění provedení zatěžovací zkoušky.

Obsah

Úvod	14
1 Zatěžování elektrických strojů	15
1.1 Základní pojmy	15
1.2 Měření pomocí dynamometru	15
1.2.1 Stejnoseměrné dynamometry	16
1.2.2 Vířivé dynamometry	16
1.2.3 Střídavé dynamometry	16
1.3 Zatěžování systémem Back to Back	16
1.3.1 Hopkinsonův test	17
1.4 Akcelerační metoda	18
1.4.1 Zkouška jednoho stroje	19
1.4.2 Zkouška dvou strojů	19
1.4.3 Zkouška tří strojů	20
1.5 Ztráty v asynchronním motoru	20
1.5.1 Ztráty ve statorovém vinutí	21
1.5.2 Ztráty v rotorovém viní	21
1.5.3 Ztráty v železe	21
1.5.4 Mechanické ztráty	22
1.5.5 Dodatečné ztráty	23
1.6 Určení ztrát asynchronního stroje	23
2 Identifikace parametrů soustavy	24
2.1 Stanovení momentu setrvačnosti	24
2.1.1 Zkouška naprázdno	24
2.1.2 Doběhová zkouška	25
2.1.3 Výpočet momentu setrvačnosti	25
2.2 Definice lineárního rychlostního profilu	26
2.3 Definice sinusového rychlostního profilu	26
2.3.1 Sinusový profil bez stejnosměrné složky	27
2.3.2 Sinusový profil se stejnosměrnou složkou	28
3 Ztráty při různém rychlostním profilu	29
3.1 Rozvržení ztrát	29
3.1.1 Lineární rychlostní profil	29
3.1.2 Sinusový profil	31
3.2 Teoretické porovnání jednotlivých ztrát	33

4	Zkušební pracoviště pro akcelerační metodu	34
4.1	Sestava pracoviště	34
4.1.1	Frekvenční měnič	34
4.1.2	Snímač otáček	35
4.1.3	Brzdný odpor	36
4.1.4	Osciloskop	36
4.1.5	Teplotní čidlo	36
4.1.6	Výkonový analyzátor	36
4.2	Konkrétní použité komponenty	37
4.2.1	Dynamometr ASD1500	37
4.2.2	Frekvenční měnič Unidrive M700-034-00100	37
4.2.3	Enkodér ERO 1480	37
4.2.4	DBR3 1220 - 003009	38
4.2.5	PicoScope 2408B	38
4.2.6	Pt100 a Keysight 34465A	38
4.2.7	YOKOGAWA WT1803E	39
4.3	Softwarová obsluha pracoviště	39
4.3.1	Vývoj softwaru	40
5	Možnosti osciloskopické karty PicoScope 2408B	41
5.1	Režim persistence	41
5.2	Spektrální analýza	42
5.3	Režim masky	42
5.4	Generátor libovolného tvaru vlny a funkcí	43
5.5	Matematické kanály a filtry	44
6	Posouzení použitelnosti PicoScope 2408B	45
6.1	Výstupy enkodéru ERO 1480	45
6.2	Parametry simulovaného rychlostního profilu	45
6.2.1	Výpočet rampy otáček	46
6.2.2	Ověření mechanického výkonu	46
6.3	Ověření použitelnosti osciloskopické karty PicoScope 2408B	47
6.3.1	Záznam zkušebního signálu A	48
6.3.2	Zkouška optimalizovaného náhradního signálu	49
6.3.3	Vyhodnocení použitelnosti osciloskopické karty	52
7	Realizace měřícího pracoviště	53
7.1	Schéma zapojení	53
7.1.1	Frekvenční měnič a výkonový analyzátor	54

7.1.2	Napájecí a pomocné obvody	54
7.1.3	Čidlo otáček a teploty	54
7.2	Realizace a oživení měřicího pracoviště	54
7.2.1	Připojení osciloskopické karty	55
7.2.2	Zapojení výkonového analyzátoru	55
7.2.3	Oživení měřicího pracoviště	56
8	Výpočtová příprava před měřením	57
8.1	Určení momentu setrvačnosti	57
8.1.1	Měření naprázdno	57
8.1.2	Doběhová zkouška	58
8.1.3	Výpočet momentu setrvačnosti	59
8.2	Stanovení způsobu cyklování	59
8.2.1	Lineární modulace	59
8.2.2	Sinusová modulace	60
9	Aplikace akcelerační metody	62
9.1	Vlastní zkouška stroje	62
9.1.1	Zatížení S1	62
9.1.2	Zkouška lineární modulací	63
9.1.3	Zkouška sinusovou modulací	66
9.2	Vyhodnocení naměřených dat	68
9.2.1	Plné zatížení S1	68
9.2.2	Lineární profil	70
9.2.3	Sinusový profil	75
9.3	Srovnání naměřených a vypočtených dat	79
9.3.1	Výkon na hřídeli	79
9.3.2	Celkové ztráty	82
10	Posouzení rizik a nejistot metody	84
10.1	Určení momentu setrvačnosti	84
10.2	Volba rychlostního profilu	84
10.3	Měření otáček	84
10.4	Nastavení frekvenčního měniče	85
11	Metodické pokyny pro akcelerační zatěžovací metodu	86
11.1	Postup aplikace metody	86
11.2	Praktický návrh rychlostního profilu	87
	Závěr	89

Literatura	90
Seznam symbolů a zkratk	92

Seznam obrázků

1.1	Zapojení pro Hopkinsonův test [5]	17
1.2	Závislost momentu a úhlové rychlosti na čase při zatěžování jednoho stroje	19
1.3	Závislost úhlové frekvence a momentu na čase při zatěžování dvou strojů	20
1.4	Závislost úhlové frekvence a momentu na čase při zatěžování dvou strojů	20
2.1	Závislost ztráty naprázdno na napětí	24
2.2	Metoda tětivy [9]	25
2.3	Průběh výkonu na hřídeli při lineární modulaci otáček	26
2.4	Průběh výkonu sinusovým profilem bez stejnosměrné složky	27
2.5	Průběh výkonu sinusovým profilem se stejnosměrnou složkou	28
4.1	Příklad zapojení nepřímého měniče frekvence [10]	35
4.2	Enkodér ERO 1480 [16]	38
4.3	YOKOGAWA WT1803E [20]	39
5.1	Ukázka trvalého režimu [18]	41
5.2	Ukázka spektrální analýzy [18]	42
5.3	Ukázka režimu masky [18]	43
5.4	Ukázka generátoru funkcí [18]	43
5.5	Příklad matematické funkce <i>freq</i> [18]	44
6.1	Výstupní signály enkodéru ERO 1480 [16]	45
6.2	Naznačení průběhu výkonu pro lineární modulaci otáček	47
6.3	Modrá - zkušební signál A, Červená - okamžitá frekvence	49
6.4	Modrá - náhradní signál, Červená - okamžitá frekvence	50
6.5	Závislost úhlové frekvence na čase pro náhradní signál	50
6.6	Srovnání reálné úhlové frekvence s nahrazenými polynomy	51
6.7	Závislost výkonu na čase pro náhradní signál	52
7.1	Blokové schéma zapojení měřicího pracoviště	53
7.2	Původní měřicí pracoviště	55
7.3	Zapojení A) osciloskopické karty; B) výkonového analyzátoru	55
7.4	Měřicí pracoviště pro akcelerační metodu	56
8.1	Ztráty naprázdno v závislosti na napětí	57
8.2	Ztráty naprázdno v závislosti na kvadrátu napětí	58
8.3	Doběhová zkouška	58
8.4	Ideální průběh otáček a momentu lineární modulace v jednom cyklu	60
8.5	Ideální průběh výkonu lineární modulace v jednom cyklu	60
8.6	Ideální průběh otáček a momentu sinusové modulace v jednom cyklu	61
8.7	Ideální průběh výkonu sinusové modulace v jednom cyklu	61
9.1	Teplota kostry při trvalém zatížení	62
9.2	Odpor vinutí po ukončení měření trvalým zatížením	63

9.3	Teplota kostry při zkoušce lineárním profilem	64
9.4	Záznam signálu A z enkodéru při lineární modulaci	65
9.5	Odpor vinutí po ukončení měření lineární modulace	65
9.6	Teplota kostry při zkoušce sinusovým profilem	66
9.7	Záznam signálu A z enkodéru při sinusové modulaci	67
9.8	Odpor vinutí po ukončení měření sinusové modulace	67
9.9	Proložení naměřeného odporu vinutí při plném zatížení	68
9.10	Proložení naměřeného odporu vinutí při lineární modulaci	71
9.11	Frekvence signálu A v čase při lineární modulaci	72
9.12	Proložení úhlové frekvence při lineární modulaci	72
9.13	Průběh momentu a výkonu při lineární modulaci	73
9.14	Proložení naměřeného odporu vinutí při sinusové modulaci	75
9.15	Frekvence signálu A v čase při sinusové modulaci	76
9.16	Proložení úhlové frekvence při sinusové modulaci	77
9.17	Průběh momentu a výkonu při sinusové modulaci	77
9.18	Vypočtený a naměřený průběh úhlové frekvence v lineární modulaci . . .	79
9.19	Vypočtený a naměřený průběh momentu v lineární modulaci	80
9.20	Vypočtený a naměřený průběh výkonu v lineární modulaci	80
9.21	Vypočtený a naměřený průběh úhlové frekvence v sinusové modulaci . .	81
9.22	Vypočtený a naměřený průběh momentu v sinusové modulaci	81
9.23	Vypočtený a naměřený průběh výkonu v sinusové modulaci	82
11.1	Návrh modulace otáček a momentu pro ASM32000	88
11.2	Průběh výkonu ASM32000	88

Seznam tabulek

3.1	Porovnání dílčích ztrát pro různé rychlostní profily vůči zatížení S1	33
4.1	Parametry dynamometru ASD1500	37
4.2	Parametry měniče Unidrive M700-034-00100	37
9.1	Naměřené veličiny při trvalém zatížení	62
9.2	Naměřené veličiny při lineární modulaci	63
9.3	Naměřené veličiny při sinusové modulaci	66
9.4	Vypočtené parametry exponenciály v plném zatížení	68
9.5	Naměřené a vypočtené veličiny v plném zatížení	70
9.6	Vypočtené parametry exponenciály v lineární modulaci	70
9.7	Vypočtené parametry na hřídeli v lineární modulaci	73
9.8	Vypočtené veličiny v lineární modulaci	74
9.9	Vypočtené parametry exponenciály v lineární modulaci	75
9.10	Vypočtené parametry na hřídeli v sinusové modulaci	77
9.11	Vypočtené veličiny v sinusové modulaci	79
9.12	Porovnání předpokládaných a vypočtených ztrát	83
11.1	Parametry stroje ASM32000	87

Úvod

Vývoj elektrických strojů vyžaduje ověření funkčnosti či účinnosti stroje. K tomu se využívají různé zatěžovací metody jako je přímé měření výkonu a příkonu, zkouška rekuperací s dvojným či jedním napájením, určení účinnosti pomocí parametrů náhradního obvodu atd. Všechny tyto zatěžovací metody jsou popsány normou ČSN EN 60034-2-1 ed. 2.

Firma AVL Moravia s. r. o. se mimo jiné zabývá vývojem a konstrukcí speciálních elektrických strojů. Každý nově vyvinutý stroj je potřeba odzkoušet, zdali vyhovuje svým parametrům. Jelikož jsou stroje dělané na zakázku a každý je unikát, není vždy možné využití standardních zatěžovacích metod popsanych ve výše zmíněné normě. Proto je někdy nutno využít nestandardní akcelerační metodu zatěžování, která využívá k zatížení stroje pouze vlastní moment setrvačnosti zkoušeného stroje.

Cílem této práce je definice, ověření funkčnosti a vytvoření metodiky akcelerační metody. Pro účely byl využit vysokorychlostní dynamometr ASD1500 z roku 1995. Základem použití dané metody je znalost momentu setrvačnosti stroje, který bylo nutné experimentálně určit.

Práce je rozdělena do jedenácti kapitol. V první kapitole jsou popsány standardní zatěžovací metody, akcelerační metoda a ztráty v elektrickém stroji. Druhá a třetí kapitola je věnována teoretickým předpokladům jakožto odvození parametrů rychlostního profilu nebo vyjádření ztrát vůči ztrátám při plném zatížení. Následné kapitoly jsou věnovány zkušebnímu pracovišti, komponentům, optimalizaci, realizaci a ověření použitelnosti zvolené osciloskopické karty. Kapitola osmá je věnována výpočtu parametrů lineárního a sinusového rychlostního profilu. V deváté kapitole je popsáno samotné měření, zpracování a porovnání naměřených a předpokládaných dat. Desátá kapitola pojednává o rizicích a nejistotách metody. V poslední kapitole je vypracována metodika akcelerační metody.

1 Zatěžování elektrických strojů

Všechny typy zatěžování a metody určování účinnosti elektrických točivých strojů jsou popsány v normě ČSN EN 60034-2-1 ed.2. Motory se zkoušejí zatěžováním, aby se simulovaly podmínky v reálném provozu. K tomu lze použít několik metod zatěžování. Každá metoda je vhodná pro určité typy motorů.

1.1 Základní pojmy

Definice pojmů jsou vzaté z norem ČSN EN 60034-1 a ČSN EN 60034-2-2 ed.2. Všechny vypsání definice jsou potřebné k pochopení daných metod zatěžování.

Zatížení

"Veškeré hodnoty elektrických a mechanických veličin, vyjadřující požadavek kladený v daném okamžiku na točivý stroj elektrickým obvodem nebo mechanismem."[1]

Průběh zatížení

"Stanovení zatížení, kterému je stroj podroben, včetně rozběhu, elektrického brzdění, doby chodu naprázdno a doby odpojení a klidu, pokud přicházejí v úvahu, a to včetně jejich trvání a časové posloupnosti."[1]

Dynamometr

"Zařízení pro měření točivého momentu použité na rotační části zkoušeného stroje. Je vybaveno prostředky pro měření a indikaci točivého momentu a otáček a není omezeno na kolébkové provedení. In-line převodník točivého momentu se může použít za účelem zajištění přímého měření točivého momentu na hřídeli zkoušeného stroje."[2]

Zkouška dynamometrem

"Zkouška, při níž se mechanický výkon stroje, který pracuje jako motor, určuje pomocí dynamometru. Rovněž i zkouška, při které se mechanický příkon stroje, který pracuje jako generátor, určuje pomocí dynamometru."[2]

1.2 Měření pomocí dynamometru

Dynamometr může být ve dvou provedeních. Buď to jako elektromotor s tenzometrickou hřídelí nebo v kolébkovém provedení, kde rotor je upevněný na běhových ložiscích a stator upevněný na naklápěcích ložiscích. Naklápěcí ložiska umožňují přenesení reakční síly statoru na tenzometrická ramena, přes které je možno měřit vnitřní moment stroje. Rozdělení a popis nejčastějších dynamometrů je v kapitolách 1.2.1, 1.2.2 a 1.2.3. Ideální dynamometr má dostatečně velkou pracovní oblast a nulový moment setrvačnosti.[3]

1.2.1 Stejnoseměrné dynamometry

Jedná se o derivační stejnosměrný stroj. Buzení je v tomto případě paralelně připojeno na vinutí kotvy. Tento typ dynamometru se používá zřídka, jelikož je složitý na údržbu (uhlíkové kartáče), má velký moment setrvačnosti a malou pracovní oblast. Dříve se využíval hlavně kvůli možnosti rekuperace energie do sítě.[3][4]

1.2.2 Vířivé dynamometry

Princip těchto dynamometrů spočíval ve vytvoření brzdícího momentu díky vířivým ztrátám v magnetickém obvodu stroje. Rotor není složen z plechů, ale z oceli s vystouplými póly. Budicí cívka na statoru je napájena stejnosměrným napětím, které vytváří stejnosměrný magnetický tok. Vlivem otáčení rotoru dochází ke změně magnetického odporu, tudíž se mění i magnetický tok. Tato změna vyvolá v magnetickém obvodu indukované napětí, díky kterému začnou v obvodu vznikat vířivé proudy. Vířivé proudy vytvoří brzdící moment regulovatelný proudem v budicí cívkce.[3][4]

Jelikož vířivé proudy nevytváří pouze brzdící moment, ale také ztráty v podobě tepla, musí mít stroj zajištěn dostatečný odvod tepla (externí ventilace, chlazení vodou atd.).

Výhodami vířivého dynamometru je vysoký rozsah otáček, jednoduchá konstrukce a malé rozměry v poměru k jeho výkonu. Nevýhody spočívají hlavně v tepelných ztrátách, složitém řízení a malou dynamikou měření.

1.2.3 Střídavé dynamometry

Díky rozvoji výkonových frekvenčních měničů je nejvíce využíváno asynchronních dynamometrů ve výkonovém rozsahu od 1 kW do 1 MW. Řídí se vektorově se zpětnou vazbou otáček a momentu. Tento typ dynamometru spojuje výhody stejnosměrných a vířivých dynamometrů, zejména: bezúdržbový provoz, vysokou přesnost měření (až 0,1% z měřicího rozsahu), vysokou účinnost, malý moment setrvačnosti a jmenovitý moment při rozběhu.[3]

1.3 Zatěžování systémem Back to Back

Zkouška rekuperací s dvojitým napájením (dual-supply back-to-back test) jde použít jako provozní či kusovou zkouška. Dva identické stroje se mechanicky spojí. Stroj, který je v motorickém režimu, je napájen napětím U_M a frekvencí f_M . Stroj, který je v generátorickém režimu, je napájen napětím U_G a frekvencí f_G . Přičemž napětí a frekvence jednoho ze strojů jsou jmenovité hodnoty a zároveň frekvence motoru musí být vždy větší než frekvence generátoru $f_M > f_G$. Napětí druhého stroje je regulováno tak, aby se dosáhlo

jmenovitého poměru napětí a frekvence. Po dokončení zkoušky se napájení strojů obrátí a zkouška se opakuje.[2]

Při měření se u motoru i generátoru zaznamenává napájecí proud a napětí, frekvence, příkon a skluz otáček. Účinnost se určí z celkových ztrát a z celkového příkonu soustrojí pomocí vztahu 1.1 [2]:

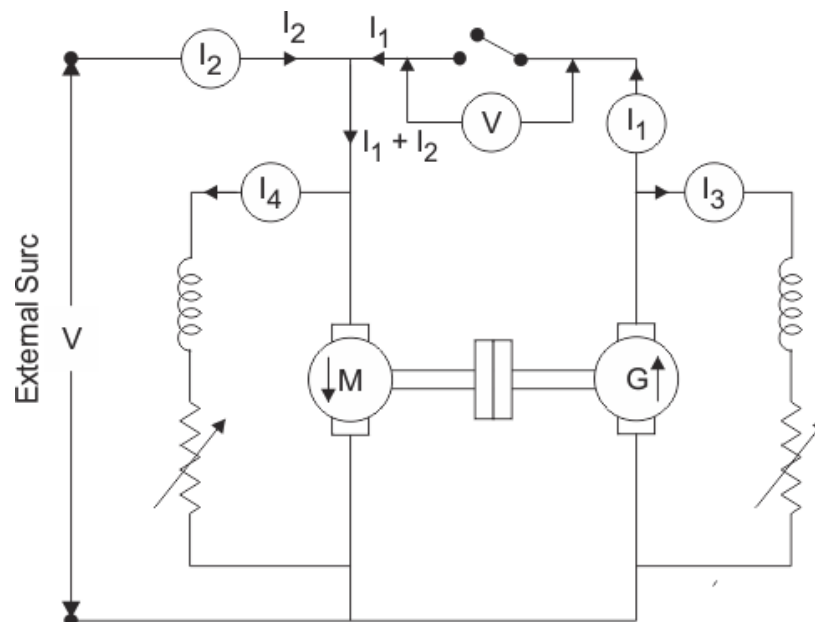
$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_M + \Delta P_G}{P_M + P_G} \quad (1.1)$$

kde η je účinnost, ΔP_M jsou celkové ztráty motoru, ΔP_G jsou celkové ztráty generátoru, P_M je příkon motoru a P_G je příkon generátoru.

1.3.1 Hopkinsonův test

Stejnoseměrné stroje je možné zkoušet Hopkinsonovým testem. Je to zkouška s plným zatížením, kde dva identické stroje jsou mechanicky spojeny. Z důvodů ztrát v motorech je zapotřebí externí napěťový zdroj, který kompenzuje úbytek napětí na generátoru.

Na Obr. 1.1 je znázorněno schéma zapojení pro tuto zkoušku. Pomocí regulace proudu bočnicku nastavitelným odporem se zajistí, aby motor běžel ve jmenovitých otáčkách. Stejně tak se nastaví napětí na generátoru, které musí být stejné jako napájecí napětí. Rozdíl těchto napětí se sleduje na voltmetru zapojeného na vypínač. Regulace proudu v bočnicku zajistí motoru plné zatížení.[5]



Obr. 1.1: Zapojení pro Hopkinsonův test [5]

Výhody

- Test nepotřebuje tolik energie ve srovnání s plným zatížením soustrojí motor - generátor. Větší stroje mohou být plně zatíženy bez většího odběru.
- Při zkoušce je možné měřit oteplování motoru.
- Možnost určení účinnosti stroje při různých zatížení.

Nevýhody

- Je zapotřebí zkoušet dva identické stroje.
- Oba stroje nelze zatěžovat rovnoměrně.
- Ztráty v železe není možné určit pro oba stroje zvlášť.

1.4 Akcelerační metoda

Metoda vychází z pohybové rovnice (1.2). K zatížení využívá pouze vlastní moment setrvačnosti stroje. Napájení zkoušeného stroje zajišťuje výkonový frekvenční měnič se zpětnou vazbou otáček. Zatížení může být konstantní či dynamické. Nejčastěji se používají intervaly: chod naprázdno, zatížení a vypnutý stav.

Dynamickým zatížením se plynule mění hodnota momentu v celém cyklu. Tudíž ne- vznikají tzv. momentové rázy, které mohou být u výkonnějších strojů nebezpečné.

Pohybová rovnice [6]:

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega \cdot \frac{dJ}{dt}, \quad (1.2)$$

kde M je mechanický moment, J je moment setrvačnosti a ω je úhlová frekvence.

Jelikož se po celou dobu zkoušky nemění celkový moment setrvačnosti, je možné rovnici (1.2) upravit na rovnici (1.3). Z této rovnice je zřejmé, že výsledný mechanický moment stroje závisí pouze na změně úhlové frekvence (otáček) stroje. Pro stroje s malým momentem setrvačnosti je možné na hřídel připojit setrvačnick pro přesnější měření momentu.

Pohybová rovnice pro konstantní moment setrvačnosti:

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.3)$$

Výsledný mechanický výkon je dán rovnicí:

$$P_{\text{mech}} = M \cdot \omega, \quad (1.4)$$

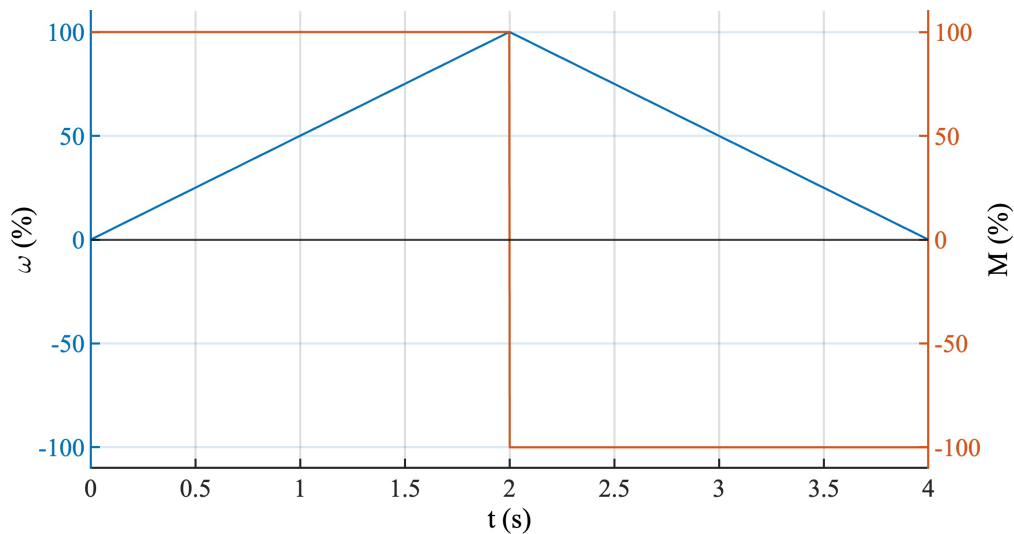
kde P_{mech} je mechanický výkon.

Využitím metody se zkoušený stroj cyklicky rozbíhá a generátoricky brzdí. Rozběh i brzdění je přizpůsobeno parametrům stroje. V průběhu zkoušky je nutné zajistit využití generované energie.

Tato metoda nezajišťuje plné zatížení stroje. Nejedná se o metodu, která by nahrazovala standardizované metody popsané v předešlých podkapitolách. Metoda je určena pro speciální stroje jako vysokomomentové či vysokootáčkové. V některých případech není možné tyto speciální stroje plně zatížit kvůli absenci dostatečně výkonného dynamometru či nevhodné mechanické spojce pro využití metody Back to Back. Aby bylo dosaženo alespoň částečného zatížení, generování ztrát a tím ohřátí stroje, je možné použít akcelerační metodu.

1.4.1 Zkouška jednoho stroje

V případě zkoušení jednoho stroje je stroj napájen z frekvenčního měniče se schopností rekuperace. U strojů s malým výkonem (do 10 kW) je možnost energii rekuperovat do meziobvodu měniče či do brzděného odporu. Na Obr. 1.2 lze vidět závislost momentu a úhlové frekvence na čase s konstantním zatížením. Pro stroje s větším výkonem se tento typ zatížení nedoporučuje, protože by se musela energie rekuperovat do sítě, což by bylo ekonomicky nevýhodné.

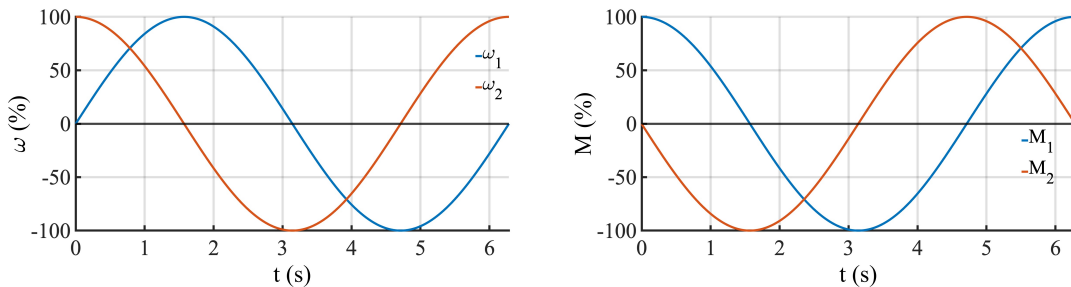


Obr. 1.2: Závislost momentu a úhlové rychlosti na čase při zatěžování jednoho stroje

1.4.2 Zkouška dvou strojů

Při zkoušce dvou strojů se stroje nespojují mechanicky, ale pouze elektricky přes meziobvod měničů. Stroje musí mít při zkoušce posun v řízení o čtvrt periody cyklu, aby jeden byl vždy v motorickém režimu a druhý v generátorickém režimu. To zajistí rekuperaci energie mezi stroji a není zapotřebí použití brzděných rezistorů či rekuperace do

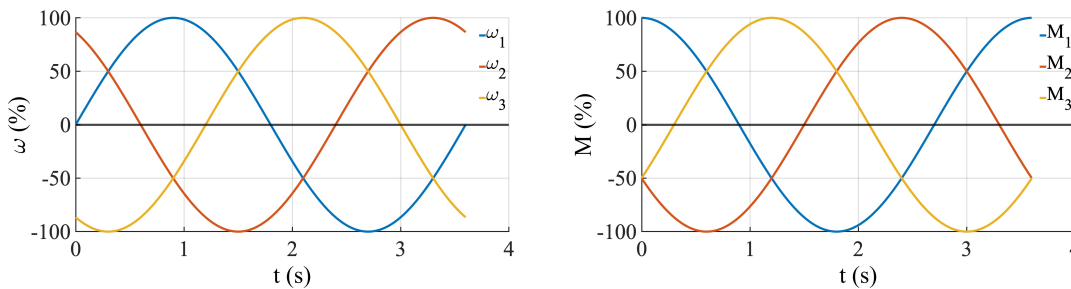
sítě. Ze sítě se odebrává pouze energie na pokrytí ztrát. Tento typ zatěžování je vhodný pro vysokomomentové stroje. Na Obr. 1.3 je vidět průběh úhlové rychlosti a momentu dynamicky zatěžovaných strojů.



Obr. 1.3: Závislost úhlové frekvence a momentu na čase při zatěžování dvou strojů

1.4.3 Zkouška tří strojů

Princip zatěžování tří strojů je velmi podobný jako v kapitole 1.4.2. I při zkoušení tří strojů záraz jsou stroje naprázdno a spojeny elektricky přes meziobvod měničů. Řízení je nutno provést tak, aby celková energie strojů (bez uvažování ztrát) byla nulová. To se docílí posunem otáček o třetinu cyklu mezi stroji. Vygenerovaná energie je opět využita pro napájení ostatních strojů a ze sítě se odebrává energie na pokrytí ztrát strojů. Na Obr. 1.4 je vidět průběh úhlové rychlosti a momentu dynamicky zatěžovaných strojů.



Obr. 1.4: Závislost úhlové frekvence a momentu na čase při zatěžování dvou strojů

1.5 Ztráty v asynchronním motoru

Provoz jakéhokoliv elektrického zařízení je postihnut ztrátami, které definují velikost účinnosti daného zařízení. Tato zmařená elektrická energie se mění v energii tepelnou a je zapotřebí ji správně odvádět ze zařízení. Ztráty v asynchronním stroji lze dělit na závislé na zatížení (Joulové ztráty) a na ztráty závislé na otáčkách (ztráty v železe, mechanické ztráty).

1.5.1 Ztráty ve statorovém vinutí

Joulové ztráty ve vinutí statoru jsou závislé na odporu vinutí a kvadrátu proudu jím procházející

$$\Delta P_{j1} = R \cdot I_{1,ef}^2, \quad (1.5)$$

kde ΔP_{j1} jsou ztráty ve statorovém vinutí, R je odpor vinutí a $I_{1,ef}$ je efektivní proud.

Odpor vinutí se mění s teplotou, proto je nutné jej změřit v ustáleném stavu (dle normy [2]). Pokud je známá pracovní teplota vinutí (dopočtená ze zatížení), je možné odpor přepočíst pomocí teplotního součinitele elektrického odporu a odporu za studena.

1.5.2 Ztráty v rotorovém vinutí

Joulové ztráty v rotorovém vinutí je možné vypočítat dle vztahu 1.5. U asynchronních motorů lze vyjádřit ztráty v rotoru jako závislost na výkonu procházejícího přes vzduchovou mezeru a skluzu

$$\Delta P_{j2} = P_{\delta} \cdot s, \quad (1.6)$$

kde ΔP_{j2} jsou ztráty v rotorovém vinutí, P_{δ} je výkon procházející přes vzduchovou mezeru a s je skluz.

1.5.3 Ztráty v železe

Pro usměrnění a vedení magnetického toku se využívají železné materiály s vysokou permeabilitou. Je-li však železný materiál vystaven střídavému magnetickému poli, generují se v něm ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Celkové ztráty v železe jsou dány součtem těchto dílčích ztrát [7]

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v, \quad (1.7)$$

kde ΔP_{Fe} jsou ztráty v železe, ΔP_h jsou hysterezní ztráty a ΔP_v jsou ztráty vířivými proudy.

Hysterezní ztráty

Tyto ztráty jsou dané energií spotřebovanou na přemagnetování plechů ve stroji. Energie je úměrná ploše hysterezní smyčky použitého materiálu. Hysterezní ztráty lze vyjádřit pomocí Steinmetzova vzorce [7]

$$\Delta P_h = K_h \cdot f \cdot B^{n_h}, \quad (1.8)$$

kde K_h je materiálová konstanta plechů, f je napájecí frekvence, B je magnetická indukce a n_h je materiálová konstanta plechů. Materiálová konstanta n_h se pohybuje v intervalu $< 1,5 ; 2,5 >$. V praxi se ve většině případů volí hodnota 2.

Ztráty vířivými proudy

Působení střídavého magnetického pole se v železných materiálech indukují tzv. vířivé proudy, které Joulovými ztrátami způsobují jejich zahřívání. K redukci tohoto nežádoucího jevu se používají izolované plechy, jejichž tloušťka se pohybuje v řádech desetin milimetru. Ztráty vířivými proudy jsou vyjádřené pomocí Steinmetzova vzorce [7]

$$\Delta P_v = K_v \cdot f^2 \cdot B^2, \quad (1.9)$$

kde K_v je materiálová konstanta plechů.

1.5.4 Mechanické ztráty

Stejně jako u ztrát v železe, lze vyjádřit mechanické ztráty dílčími složkami, které se liší svou povahou vzniku. Jedná se o součet ztrát ventilačních a ztrát třením [7]

$$\Delta P_{\text{mech}} = \Delta P_w + \Delta P_f, \quad (1.10)$$

kde ΔP_{mech} jsou mechanické ztráty, ΔP_w jsou ventilační ztráty a ΔP_f jsou třecí ztráty.

Ventilační ztráty

Ztráty ventilační jsou způsobené tlakem vzduchu na rotující části stroje (ventilátor, čela vlnutí). Jsou úměrné třetí mocnině rychlosti otáčení a lze je popsat vztahem [7]

$$\Delta P_w = K_w \cdot \omega^3, \quad (1.11)$$

kde K_w je koeficient ventilačních ztrát. Značná část ztrát je tvořena ventilátorem na hřídeli. Při použití cizího chlazení (externí ventilátor, chlazení vodou či olejem) jsou tyto ztráty zanedbatelné.

Třecí ztráty

Otáčením stroje vznikají v ložiscích třecí ztráty, které jsou přímo úměrné rychlosti otáčení. Závislost popisuje vztah [7]

$$\Delta P_f = K_f \cdot \omega, \quad (1.12)$$

kde K_f je koeficient třecích ztrát. Koeficient K_f zahrnuje nejen geometrické vlastnosti stroje, ale také různé statické momenty. [7]

1.5.5 Dodatečné ztráty

Dodatečné ztráty v sobě zahrnují zbytek ztrát, které není jednoduché určit z měření naprázdno či nakrátko. Do těchto ztrát řadíme různé přechodné jevy, ztráty použitím vyšších harmonických (PWM), změnou vodivostí částí materiálů při zatížení atd. V praxi se tyto ztráty udávají jako $0,5 \div 2$ % příkonu stroje.

Dle [8] jsou dodatečné ztráty závislé jak na zatížení, tak na otáčkách stroje a jejich úměru lze vyjádřit jako

$$\Delta P_d \sim I^2 \cdot f^{1,5}, \quad (1.13)$$

kde ΔP_d jsou dodatečné ztráty.

1.6 Určení ztrát asynchronního stroje

Norma [2] ukládá určování dílčích ztrát v asynchronním motoru ze zkoušek při zatížení a zkoušky naprázdno. Před začátkem měření se změří teplota a odpor vinutí. Při zatěžovací zkoušce se stroj zatíží na jmenovitý výkon až do dosažení ustáleného oteplení, které nesmí přesahovat 1 K za 30 min. Po dosažení ustáleného oteplení se zapíší hodnoty napětí na svorkách, proudu, teploty a odporu vinutí, momentu na hřídeli a otáček. Z proudu a odporu vinutí se dle vztahu (1.5) vypočtou ztráty ve statorovém vinutí.

Zkouška naprázdno (popsána v kapitole 2.1.1) se provádí na teplém stroji bezprostředně po zatěžovací zkoušce. Mechanické ztráty se určí jakožto aproximace křivky ztrát naprázdno v závislosti na napětí a odečte se hodnota ztrát naprázdno při nule napětí. Ztráty v železe jsou dány rozdílem ztrát naprázdno při jmenovitém napětí, ztrát mechanických a ztrát ve vinutí statoru. [2]

Výkon přecházející přes vzduchovou mezeru je nutný k určení ztrát v rotorovém vinutí a uvádí se jako příkon snížený o ztráty ve statorovém vinutí a ztráty v železe. Dle vztahu (1.6) se následně určí ztráty v rotorovém vinutí. Dodatečné ztráty jsou dány jako příkon snížený o výkon a všechny předem určené ztráty. [2]

2 Identifikace parametrů soustavy

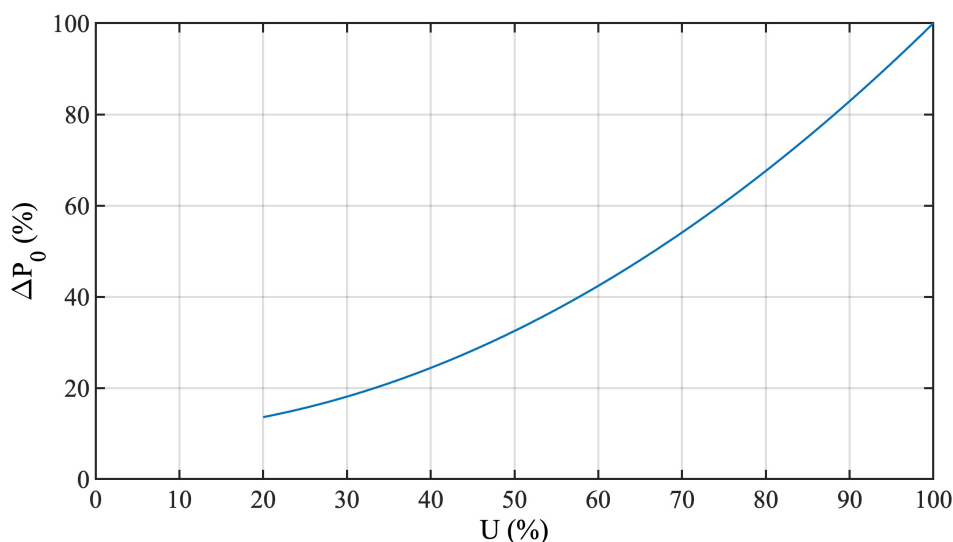
2.1 Stanovení momentu setrvačnosti

Pokud zkoušený stroj nemá v konstrukční dokumentaci přesné stanovený moment setrvačnosti, je nutné jej získat experimentálně. Jeden ze způsobů je použití rovnice (1.4). Pro tuto rovnici je zapotřebí zjistit mechanický výkon, který se určí ze zkoušky naprázdno. Z rovnice (1.3) je zřejmé, že je zapotřebí také zjistit derivaci úhlové frekvence podle času. Tato derivace se určí pomocí doběhové zkoušky.

2.1.1 Zkouška naprázdno

Při zkoušce asynchronního stroje naprázdno se stroj rozběhne na jmenovité otáčky při 100 % jmenovitého napětí. Poté se napájecí napětí přibližně po 10 % snižuje a zapisuje se změřený elektrický příkon (tzv. ztráty naprázdno ΔP_0). Při 50 % napájecího napětí se začne napětí snižovat o 10 % a to maximálně na 20 % jmenovitého napětí. Při dalším klesání nebude stroj dostatečně nasycen a změřené hodnoty by mohli být zkreslené. [2]

Na Obr. 2.1 je zobrazena závislost ztrát naprázdno na napájecím napětí. Jelikož naměřený výkon odpovídá celkovým ztrátám naprázdno, je zapotřebí z něj mechanický výkon separovat. Mechanický výkon jsou ztráty naprázdno při nulovém napětí. Ten však, jak bylo zmíněno dříve, nejde změřit, protože jsou výsledky zkreslené.



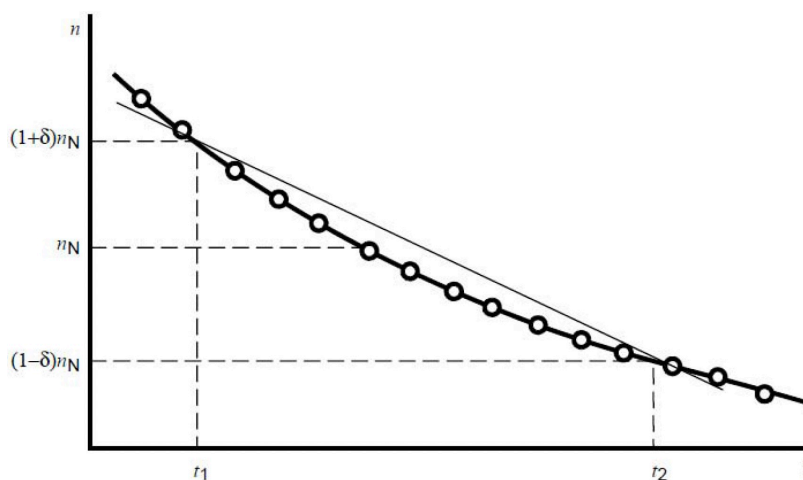
Obr. 2.1: Závislost ztráty naprázdno na napětí

Mechanický výkon se určí pomocí lineární regrese z naměřených dat pod 50 % jmenovitého napětí. Ztráty naprázdno se vykreslí v závislosti na kvadrátu napětí a určí se rovnice lineárního trendu. Je však zapotřebí kontrolovat korelační činitel, aby se blížil

1. Z rovnice trendu se nakonec určí ztráty naprázdno v nule napětí, neboli mechanický výkon. [2]

2.1.2 Doběhová zkouška

Pro zjištění zpomalení stroje lze použít metodu tětivy (viz Obr. 2.2). Použití této metody vyžaduje zvolení poměrné odchylky otáček δ , která má obvykle hodnotu 0,1. Stroj se roztočí otáčkami většími než $(1 + \delta)n_n$ a následně se odpojí od zdroje, přičemž se zaznamenávají otáčky v čase. Z naměřených hodnot se odečtou hodnoty času odpojení od zdroje t_1 pro $(1 + \delta)n_n$ a času konce měření t_2 pro $(1 - \delta)n_n$. [9]



Obr. 2.2: Metoda tětivy [9]

2.1.3 Výpočet momentu setrvačnosti

Z naměřených hodnot lze pomocí rovnic (1.3) a (1.4) vypočítat moment setrvačnosti stroje. Dosazením (1.3) do (1.4) se vyjádří moment setrvačnosti

$$J = \frac{P_{\text{mech}}}{\omega} \cdot \frac{dt}{d\omega}. \quad (2.1)$$

Mechanický výkon je určen měřením naprázdno. Úhlová frekvence je určena jmenovitými otáčkami a zpomalení stroje je zjištěno pomocí metody tětivy. Finální podoba rovnice pro výpočet momentu setrvačnosti je

$$J = \frac{P_{\text{mech}}}{\omega} \cdot \left| \frac{t_2 - t_1}{\frac{2\pi}{60} \cdot ((1 - \delta)n_n - (1 + \delta)n_n)} \right|. \quad (2.2)$$

V rovnici (2.2) je použita absolutní hodnota ze zpomalení stroje. To je proto, že derivace otáček zpomalujícího se stroje je vždy záporná, ale moment setrvačnosti je vždy kladný.

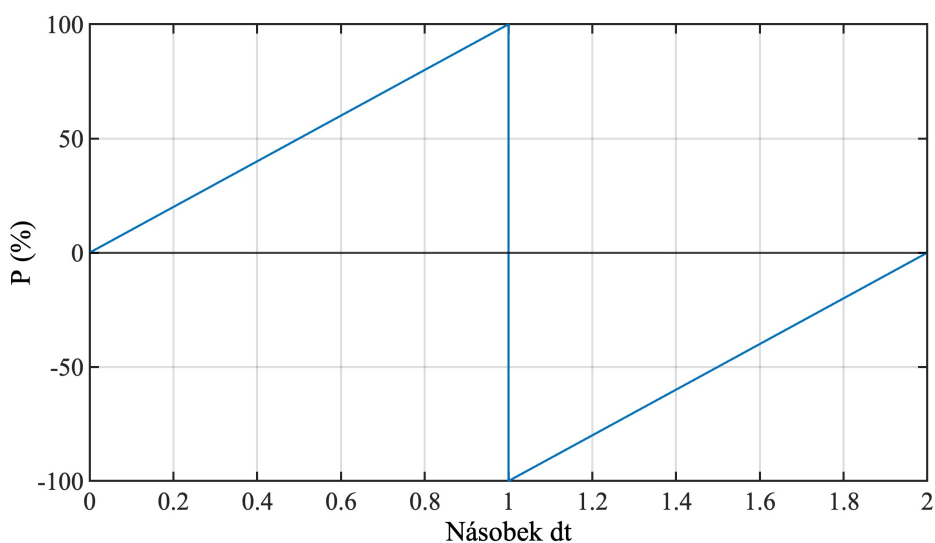
2.2 Definice lineárního rychlostního profilu

Parametry lineární modulační otáček, popsané v kapitole 1.4.1, vychází z momentu na hřídeli a střední hodnoty úhlové frekvence. Aby nebyl stroj přetěžován, tak se maximální hodnoty momentu a otáček volí jeho jmenovité. Základní parametry lineární modulační otáček jsou počáteční ω_{\min} a maximální ω_{\max} úhlová frekvence a doba změny otáček dt . Doba změny otáček je vyjádřena pro půl periody pomocí vztahu (1.3). Jelikož se jedná o lineární průběh, hodnota momentu je konstantní (jak lze vidět na Obr. 1.2). Výpočet změny otáček je tedy dán vztahem

$$dt = J \cdot \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{M}. \quad (2.3)$$

Na Obr. 2.3 je zobrazen průběh výkonu v čase. Zde je uvažován interval otáček $0 \div 100 \% n_n$. Mechanický výkon je dán střední hodnotou z poloviny průběhu výkonu (motorický či generátorický režim) a lze jej určit jako násobek momentu a střední úhlové frekvence ω_{str}

$$P_{\text{mech}} = M \cdot \omega_{\text{str}}. \quad (2.4)$$



Obr. 2.3: Průběh výkonu na hřídeli při lineární modulaci otáček

2.3 Definice sinusového rychlostního profilu

Zatěžování vysokomomentových strojů je plynulejší s použitím sinusové modulační otáček. Nevznikají tak momentové rázy, které se objevují v lineární modulaci vždy při změně zrychlení stroje. K určení parametrů modulační otáček je nutné zvolit maximální úhlovou

frekvenci a maximální moment. Tyto hodnoty se volí jakožto jmenovité hodnoty stroje, aby nedocházelo k přetěžování. Při dané modulaci má úhlová frekvence tvar funkce

$$\omega = \omega_{\max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right), \quad (2.5)$$

kde T je perioda.

Dosažením vztahu (2.5) do (1.3) lze popsat funkci momentu v čase při daném rychlostním profilu

$$M = J \cdot \omega_{\max} \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right). \quad (2.6)$$

Jelikož je známá maximální hodnota momentu (jmenovitá), lze vyjádřit vztah pro periodu jednoho cyklu otáček

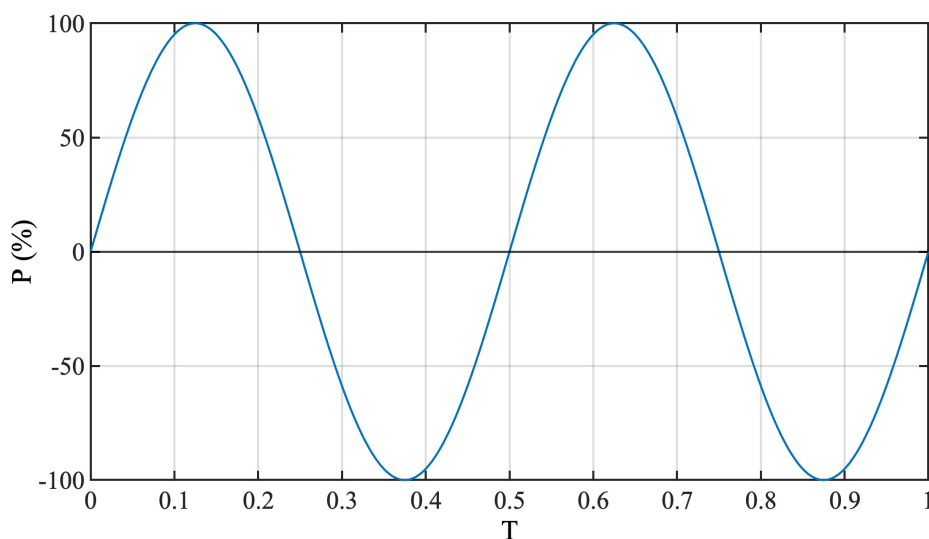
$$T = J \cdot \omega_{\max} \cdot \frac{2\pi}{M_{\max}}, \quad (2.7)$$

kde M_{\max} je maximální moment.

2.3.1 Sinusový profil bez stejnosměrné složky

Kmitání průběhu sinusové modulace otáček lze rozdělit na kmitání bez a se stejnosměrnou složkou. Doporučena je modulace bez stejnosměrné složky. Průběh výkonu stroje je popsán vztahem

$$P = M \cdot \omega = J \cdot \omega_{\max}^2 \cdot \frac{\pi}{T} \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{T} \cdot t\right). \quad (2.8)$$



Obr. 2.4: Průběh výkonu sinusovým profilem bez stejnosměrné složky

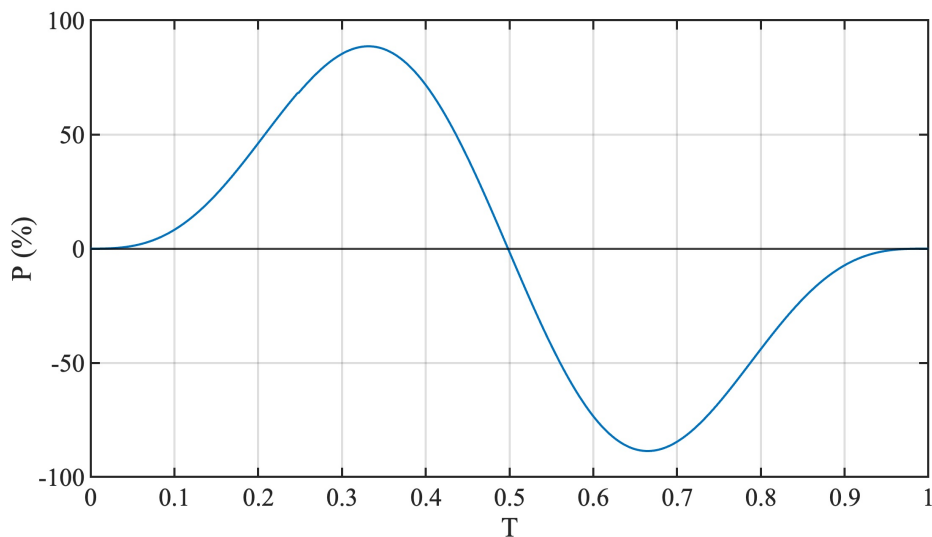
Ze vztahu (2.8) je tedy zřejmé, že výsledný průběh výkonu bude obsahovat pouze 2. harmonickou a je tak jednoduché určit jeho střední hodnotu v každé části cyklu. Na Obr. 2.4 lze vidět příklad průběhu výkonu bez stejnosměrné složky.

2.3.2 Sinusový profil se stejnosměrnou složkou

Pokud by se v modulaci otáček nacházela stejnosměrná složka ω_{ss} , nebylo by jednoduché určit periodu modulace. Vztah pro výkon by byl vyjádřen funkcí

$$P = J \cdot \omega_{\max}^2 \cdot \frac{\pi}{T} \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{T} \cdot t\right) + J \cdot \omega_{\max} \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \omega_{ss} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right). \quad (2.9)$$

Ze vztahu (2.9) je zřejmé, že výsledný průběh bude zdeformovaný složkou 1. harmonické. Na Obr. 2.5 lze vidět příklad zdeformovaného průběhu výkonu. Z tohoto důvodu nelze použít zjednodušení jako u lineární modulace - kmitání pouze v jednom směru otáčení.



Obr. 2.5: Průběh výkonu sinusovým profilem se stejnosměrnou složkou

3 Ztráty při různém rychlostním profilu

3.1 Rozvržení ztrát

Akcelerační metoda zajišťuje vznik pouze části z celkových ztrát, jelikož se neustále mění otáčky stroje případně i moment. Vyjádření poměru mezi konstantním zatížením S1 a zatížením akcelerační metodou bylo provedeno pomocí vztahů uvedených v kapitole 1.5. Řízení motoru je předpokládáno s maximálním momentem a konstantním buzením.

3.1.1 Lineární rychlostní profil

Lineární modulace otáček byla zvolena v intervalu $< 0 ; 100 > \%$ jmenovitých otáček. Průběh momentu je tedy konstantní. Mění se pouze jeho orientace v motorickém a generátorickém režimu.

Ztráty ve statorovém vinutí

Konstantní jmenovitý moment zajišťuje konstantní jmenovitý proud. Ze vztahu (1.5) vyplývá, že i při tomto stylu zatížení budou ztráty ve statorovém vinutí stejné jako při zatížení S1.

Ztráty v rotorovém vinutí

Jak je ukázáno ve vztahu (1.6), ztráty v rotoru jsou závislé na výkonu přecházejícího přes vzduchovou mezeru a skluzu motoru. Jelikož tento výkon přímo souvisí s mechanickým výkonem lze říci, že se pohybuje lineárně v rozmezí $< 0 ; 100 > \%$ výkonu přecházejícího přes vzduchovou mezeru při zatížení S1. Jedná li se o lineární závislost, uvažuje se střední hodnota tohoto intervalu v motorickém i generátorickém režimu, tudíž 50 %.

Řízení s konstantním momentem a proměnlivými otáčkami zajišťuje konstantní rotorovou frekvenci. Skluz v tomto případě není konstantní a pohybuje se lineárně ve stejném intervalu jako otáčky a to $< 0 ; 100 > \%$ jmenovitého skluzu. Opět lze uvažovat střední hodnotu daného intervalu 50 %.

Celkové ztráty v rotoru lze vyjádřit pro daný profil vztahem

$$\Delta P_{j2,lin} = 50 \% P_{\delta} \cdot 50 \% s_n = 25 \% \Delta P_{j2}. \quad (3.1)$$

Ztráty v železe

Konstantní buzení zaručuje konstantní magnetickou indukci i při lineárním profilu otáček. Ten je však určen měnicí se napájecí frekvencí motoru, která je přímo úměrná otáčkám. Napájecí frekvence se tedy pohybuje v intervalu otáček a to $< 0 ; 100 > \%$ jmenovité

frekvence. Hysterezní ztráty při daném lineárním profilu pak lze vyjádřit pomocí vztahu (1.8)

$$\Delta P_{h,lin} = K_h \cdot 50 \% f_n \cdot B_{max}^{n_h} = 50 \% \Delta P_h. \quad (3.2)$$

Podobně jako u hysterezních ztrát i zde je magnetická indukce konstantní a frekvence se pohybuje lineárně v intervalu $< 0 ; 100 > \%$ jmenovité frekvence. Dle vztahu (1.9) jsou ztráty vířivými proudy závislé na kvadrátu napájecí frekvence. Z čehož vyplývá, že tyto ztráty budou vyjádřeny jako

$$\Delta P_{v,lin} = K_v \cdot (50 \% f_n)^2 \cdot B_{max}^2 = 25 \% \Delta P_v. \quad (3.3)$$

Poměr hysterezních a vířivých ztrát není jednoduché určit. Z měření naprázdno lze určit celkové ztráty v železe a následně z nich vypočíst koeficienty K_h a K_v . To ovšem platí pouze pro plné zatížení S1. Určení těchto koeficientů a nimi poměru hysterezních a vířivých ztrát pro jiné rychlostní profily je nad rámec této diplomové práce. Proto byla vzata hodnota od firmy AVL Moravia s. r. o., kde byl z praxe odvozen poměr ztrát v železe pro různé rychlostní profily v intervalu $0 \div 100 \% n_n$ vůči ztrátám při zatížení S1

$$\Delta P_{Fe,lin} = 41 \% \Delta P_{Fe}. \quad (3.4)$$

Mechanické ztráty

Jak je uvedeno ve vztahu (1.11), ventilační ztráty jsou závislé na třetí mocnině otáček motoru. Střední hodnota otáček pro daný rychlostní profil je 50% . Ventilační ztráty jsou vyjádřeny jako

$$\Delta P_{w,lin} = K_w \cdot (50 \% \omega_n)^3 = 12,5 \% \Delta P_w. \quad (3.5)$$

Třecí ztráty jsou přímo úměrné rychlosti otáčení stroje. Pro daný lineární profil lze třecí ztráty vyjádřit jako

$$\Delta P_{f,lin} = K_f \cdot 50 \% \omega_n = 50 \% \Delta P_f. \quad (3.6)$$

Dodatečné ztráty

Jak bylo řečeno u ztrát ve statorovém vinutí, jelikož je moment konstantní, tak je konstantní také proud. Frekvence se naopak lineárně zvedá v intervalu $< 0 ; 100 > \%$ se střední hodnotou 50% . Dodatečné ztráty při daném lineárním profilu lze popsat

$$\Delta P_{d,lin} \sim I_n^2 \cdot (50 \% f_n)^{1,5} \sim 35,35 \% \Delta P_d. \quad (3.7)$$

3.1.2 Sinusový profil

Další možností řízení je sinusová modulace otáček. Ta nejenže odstraňuje momentové rázy, ale také zajišťuje plynulejší přechod z motorického do generátorického stavu a naopak. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.3.2 je nevhodné použít průběh se stejnosměrnou složkou kvůli deformaci průběhu mechanického výkonu. Rychlost otáčení stroje byla zvolena v rozmezí $\pm 100\%$ jmenovitých otáček. Aby nebyl motor přetěžován byl zvolen moment v rozmezí $\pm 100\%$ jmenovitého momentu.

Porovnání ztrát bylo provedeno pro motorický režim. Otáčky a moment se v tomto úseku pohybují v intervalu $< 0 ; 100 > \%$.

Ztráty ve statorovém vinutí

Na Obr. 1.3 lze vidět průběh momentu při sinusové modulaci otáček. Moment není konstantní, tudíž se bude také měnit napájecí proud, který definuje ztráty v mědi. Moment na hřídeli závisí na kvadrátu proudu, stejně jako ztráty v mědi. Jelikož se jedná o sinusový průběh, je využita efektivní hodnota. Vztah pro ztráty v mědi je ve tvaru

$$\Delta P_{j1,\sin} = R \cdot \frac{100\%}{\sqrt{2}} I_n^2 = 70,7\% \Delta P_{j1}. \quad (3.8)$$

Ztráty v rotorovém vinutí

Maximální mechanický výkon dosahuje 50% jmenovitého maximálního výkonu. Tím pádem výkon procházející vzduchovou mezerou se bude pohybovat v intervalu $< 0 ; 50 > \% P_\delta$. Činný výkon je dán střední hodnotou sinusového průběhu, neboli $\frac{2 \cdot 50\%}{\pi} P_\delta$.

Skluz se v tomto případě opět mění v intervalu $< 0 ; 100 > \% s_n$. Jeho změna není lineární ale sinusová, tudíž je brána efektivní hodnota $\frac{100\%}{\sqrt{2}} s_n$. Ztráty v rotoru jsou dány poměrem

$$\Delta P_{j2,\sin} = \frac{2}{\pi} \cdot 50\% \cdot P_\delta \frac{100\%}{\sqrt{2}} \cdot s_n = 22,5\% \Delta P_{j2}. \quad (3.9)$$

Ztráty v železe

Napájecí frekvence se stejně jako otáčky stroje mění sinusově v intervalu $< 0 ; 100 > \% f_n$. Efektivní hodnota je tedy $\frac{100\%}{\sqrt{2}} f_n$ a celkové hysterezní ztráty

$$\Delta P_{h,\sin} = K_h \cdot \frac{100\%}{\sqrt{2}} f \cdot B_{\max}^{n_h} = 42,2\% \Delta P_h. \quad (3.10)$$

Napájecí frekvence, jak bylo řečeno u hysterezních ztrát, má při sinusové modulaci efektivní hodnotu $\frac{100\%}{\sqrt{2}} f_n$. Ztráty vlivnými proudy lze tedy popsat vztahem

$$\Delta P_{v,\sin} = K_v \cdot \left(\frac{100 \%}{\sqrt{2}} f_n \right)^2 \cdot B_{\max}^2 = 50 \% \Delta P_v. \quad (3.11)$$

Stejně jako u lineárního profilu je obtížné určit koeficienty dílčích ztrát v železe a tím jejich poměr. U sinusového profilu se proto také bude uvažovat hodnota poměru ztrát při daném rychlostním profilu a plném zatížení S1 od firmy AVL Moravia s. r. o.

$$\Delta P_{Fe,\sin} = 41 \% \Delta P_{Fe}. \quad (3.12)$$

Mechanické ztráty

Otáčky stroje mají kubický vztah s ventilačními ztrátami. Odvozený vztah pro dané ztráty je ve tvaru

$$\Delta P_{w,\sin} = K_w \cdot \left(\frac{100 \%}{\sqrt{2}} \omega_n \right)^3 = 25 \% \Delta P_w. \quad (3.13)$$

Poměr ztrát třecích při tomto rychlostním profilu a plném zatížení S1 je popsán vztahem

$$\Delta P_{f,\sin} = K_f \cdot \frac{100 \%}{\sqrt{2}} \omega_n = 70,7 \% \Delta P_f. \quad (3.14)$$

Dodatečné ztráty

Jako u ztrát ve statorovém vinutí je efektivní hodnota kvadrátu proudu rovna $\frac{100 \%}{\sqrt{2}} I_n^2$. Frekvence má pro sinusový profil také efektivní hodnotu rovnou $\frac{100 \%}{\sqrt{2}} f_n$. Vztah pro dodatečné ztráty je ve tedy ve tvaru

$$\Delta P_{d,\sin} \sim \frac{100 \%}{\sqrt{2}} \cdot I_n^2 \cdot \left(\frac{100 \%}{\sqrt{2}} f_n \right)^{1,5} \sim 42 \% \Delta P_d. \quad (3.15)$$

3.2 Teoretické porovnání jednotlivých ztrát

V předchozích kapitolách byly teoreticky odvozeny dílčí ztráty v jednotlivých zvolených rychlostních profilech. Jakožto referenční hodnoty byly vzaty dílčí ztráty při konstantním plném zatížení S1. V Tab. 3.1 jsou uvedeny jejich procentní poměry. Lze vidět, že se vzrůstajícím mechanickým výkonem se celkově ztráty zvyšují. Kvůli nekonstantním otáčkám se nejvíce snižují ztráty ventilační a ztráty v rotoru, což je také patrné ze vztahů (1.11) a (1.6). Předpokládané ztráty jsou uvažovány jako střední hodnota ztrát v motoru v průběhu zkoušky daným zatížením. Nejedná se o ztráty okamžité.

Tab. 3.1: Porovnání dílčích ztrát pro různé rychlostní profily vůči zatížení S1

Ztráty	S1	Lineární profil	Sinusový profil
ΔP_{j1}	100 %	100 %	70,7 %
ΔP_{j2}	100 %	25 %	22,5 %
ΔP_h	100 %	50 %	70,7 %
ΔP_v	100 %	25 %	50 %
ΔP_w	100 %	12,5 %	25 %
ΔP_f	100 %	50 %	70,7 %
ΔP_d	100 %	35,35 %	42 %

4 Zkušební pracoviště pro akcelerační metodu

Každé pracoviště se skládá z různých komponent. Vždy záleží na typu zkoušeného stroje (stejnoseměrný, asynchronní či synchronní), typu zátěže (vysoko-momentový, vysoko-rychlostní či standardní zátěž), typu měřidla (senzory, čidla, analyzéry) atd.

4.1 Sestava pracoviště

V této podkapitole jsou obecně popsány jednotlivé přístroje, které jsou zapotřebí pro aplikaci akcelerační metody.

4.1.1 Frekvenční měnič

Měniče kmitočtu se používají k regulaci frekvence střídavého napětí a jeho efektivní hodnoty. Dělí se na přímé a nepřímé měniče.

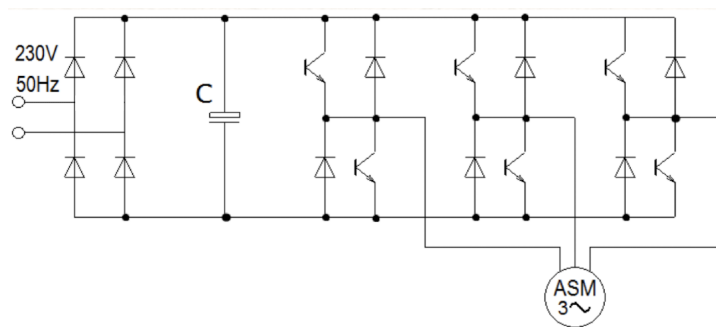
Přímé

Jedná se o cyklokonvektory a maticové měniče. Cyklokonvektory se skládají ze tří reverzačních tyristorových usměrňovačů. Výstupní frekvence může být pouze nižší a to do 40% vstupní frekvence. Maticové měniče se skládají z devíti uzlů. Každý uzel obsahuje dvojici paralelně zapojených tranzistorů s diodami, které dokážou vytvořit frekvenci i vyšší než vstupní frekvence. Oba tyto typy nejsou moc používané. Jsou složité na řízení a vzhledem k počtu polovodičových spínacích prvků i neekonomické. [10]

Nepřímé

Skládají se z usměrňovače (diodového či tyristorového), stejnosměrného meziobvodu a střídače. Jednotlivé části jsou kaskádně spojeny za sebou. Střídavé vstupní napětí je v usměrňovači přeměněno na stejnosměrné napětí, které však není dokonale konstantní. K tomu slouží stejnosměrný meziobvod (většinou LC-filtr), který napomáhá ke zmenšení odchylky od požadovaného průběhu. Střídač nakonec zajistí opětovné rozstředění napětí s požadovaným kmitočtem. [10]

V dnešní době se obvykle používají IGBT tranzistory s modulačním kmitočtem standardně 1,25 kHz až 4 kHz. U některých je možné je provozovat až do 16 kHz. Více se však objevují nové typy střídačů s tranzistory SiC (karbid křemíku), které dosahují modulačního kmitočtu 48 kHz (max. 96 kHz).



Obr. 4.1: Příklad zapojení nepřímého měniče frekvence [10]

4.1.2 Snímač otáček

Snímače rychlosti slouží nejen k měření rychlosti otáček elektrického stroje, ale také k řízení stroje samotného díky zpětné vazbě do měniče. Existují různé typy: magnetické, indukční, optické atd.

Magnetické snímače

Pracují na principu měření magnetického toku, které je generováno otáčením hřídele stroje. Nejznámějším příkladem je Hallova sonda. Měřený magnetický tok způsobí rozdílný potenciál na sondě, který je měřen jakožto Hallovo napětí. Magnetické snímače jsou konstrukčně jednoduché avšak nemusí být dostatečně přesné.

Indukční snímače

Tento typ snímače pracuje na principu měření změny magnetického toku. Nejznámější indukční snímač je resolver, který se skládá z rotoru a statoru. Na rotoru je umístěna cívka, která je napájena konstantním proudem. Na statoru jsou dvě cívky posunuté vůči sobě o 90° elektrických. Rotací napájené cívky dojde ke změně magnetického toku v cívkách na statoru. Tato změna toku indukuje napětí do cívek, které je měřeno a zaznamenáno. Indukční snímače jsou vhodné do těžkých pracovních podmínek.

Optické snímače

Optické snímače fungují na principu zaznamenání změny intenzity světla, které prochází otvorem v rotujícím disku. Jak lineární tak i rotační enkodéry jsou optickými snímači, kde dvě optozávory snímají pohyb mřížky na průhledném disku. Výstupem jsou dva obdélníkové signály posunuté o 90° el. Optické snímače rychlosti jsou sice dražší, ale velice přesné. [11]

4.1.3 Brzdný odpor

V případě zkoušení jednoho stroje s menším výkonem, je vhodné vygenerovanou energii nevracet zpět do sítě, ale zmařit ji v brzdém odporu na teplo. Pro větší výkony (cca od 10 kW) je možné použití vodních odporů. Vodní odpory vyžadují velký objem a regulovatelný přítok vody, díky čemuž se téměř nepoužívají. Nejčastější jsou brzdné odpory složené z vodičů. Díky Joulovým ztrátám se vygenerovaný proud přemění v teplo, které se odvádí do okolí. [12]

4.1.4 Osciloskop

Osciloskop je přístroj zobrazující průběhy měřeného napětí. Rozlišují se na analogové a digitální. Analogové osciloskopy dokážou zobrazit pouze periodický průběh. Funguje na principu zachytávání elektronů na stínítku, které je pokryto vrstvou luminoforu. Tento typ osciloskopu nemá žádnou paměť a další potřebné funkce.

Digitální osciloskop využívá A/D převodníku k upravení signálu do digitální podoby, který ukládá v paměti. Upravený signál je poté zobrazen na LCD displeji. Modernější digitální osciloskopy mají řadu užitečných funkcí: snímání, zobrazování, záznam, analýzu průběhu atd. [13]

4.1.5 Teplotní čidlo

Teplotní čidlo je zařízení, které převádí teplo na elektrickou veličinu. Existují různé typy těchto čidel, avšak pro měření teploty částí elektrického motoru se nejčastěji používá čidlo RTD. Využívají změnu odporu materiálu, který se zvyšuje se zvyšující se teplotou a naopak. Změřený elektrický odpor je možné změřit a také přepočíst pomocí ohmmetru nebo multimetru.

4.1.6 Výkonový analyzátor

Výkonový analyzátor je elektrické zařízení, které primárně slouží k měření spotřeby či generování elektrické energie. Modernější analyzátory jsou také schopny měřit výkon, impedanci, frekvenci, účinník nebo provádět analýzu jednotlivých fází. Nejdříve analyzátor vzorkuje průběhy měřených napětí a proudů, následně jsou data zpracovávána specializovaným vysokorychlostním digitálním signálovým procesorem a vypočítají se požadované parametry. [14]

Pro akcelerační metodu měření není tento komponent nezbytný. Analyzátor se zde využívá pouze jako kontrola celkových ztrát stroje při zkoušce.

4.2 Konkrétní použité komponenty

4.2.1 Dynamometr ASD1500

Pro aplikaci akcelerační metody byl zvolen dynamometr ASD1500 od firmy AVL Moravia s. r. o. Parametry použitého stroje jsou v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Parametry dynamometru ASD1500

f_n (Hz)	U_n (V)	n_n (ot/min)	I_n (A)	P_n (kW)
205	Y 340	12000	3,6	1,5

kde f_n je jmenovitá napájecí frekvence, U_n je jmenovité napětí, n_n jsou jmenovité otáčky, I_n je jmenovitý proud a P_n je jmenovitý výkon.

4.2.2 Frekvenční měnič Unidrive M700-034-00100

Frekvenční měnič řady Unidrive od firmy Control Techniques je univerzální střídavý měnič kmitočtu. Je vhodný pro napájení asynchronních motorů, servomotorů, motorů s permanentními magnety a lineárních motorů. Pro řízení je možné vybrat jednu ze tří kategorií provozu: otevřená smyčka, RFC-A (řízení rotorového toku asynchronního motoru) a RFC-S (řízení rotorového toku synchronního motoru). [15]

Jmenovité parametry měniče jsou uvedeny v Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Parametry měniče Unidrive M700-034-00100

U_n (V)	I_n (A)	P_n (kW)	I_{max} (A)	f_{vz} (kHz)
400	12,3	5,5	13,5	2-16

kde I_{max} je maximální proud a f_{vz} je vzorkovací frekvence.

4.2.3 Enkodér ERO 1480

Jako snímač otáček je použit již namontovaný enkodér ERO 1480 od firmy Heidenhain (viz Obr. 4.2). Enkodér používá sinusové rozhraní s 1024 period signálu na otáčku. Výstupem jsou tedy dva sinusové signály A a B, které jsou vzájemně posunuté o 90° elektrických s amplitudou 1 V_{pp}. Třetí výstupní signál R je referenční, přičemž má obdélníkový tvar, amplitudu 1 V_{pp}, periodu 360° elektrických a snímá se jednou za otáčku. [16]



Obr. 4.2: Enkodér ERO 1480 [16]

4.2.4 DBR3 1220 - 003009

Brzdňý rezistor DBR3 1220 - 003009 byl zvolen ke spotřebování vygenerované elektrické energie na teplo. Jmenovitý výkon činí 3000 W, odpor při 20 °C činí 9 Ω , maximální napětí 800 V a maximální proud 57 A. [17]

4.2.5 PicoScope 2408B

K záznamu rychlosti otáčení motoru byl zvolen PicoScope 2408B. Tato přenosná osciloskopická karta má čtyři analogové vstupy a jeden analogový výstup. Karta je schopna vzorkovat signál s rychlostí až 1 GS/s. Přístupná paměť je od 32 S do 128 MS. Ovládat jej je možné pomocí programu PicoScope 7 software, který je volně dostupný na většině platformách.

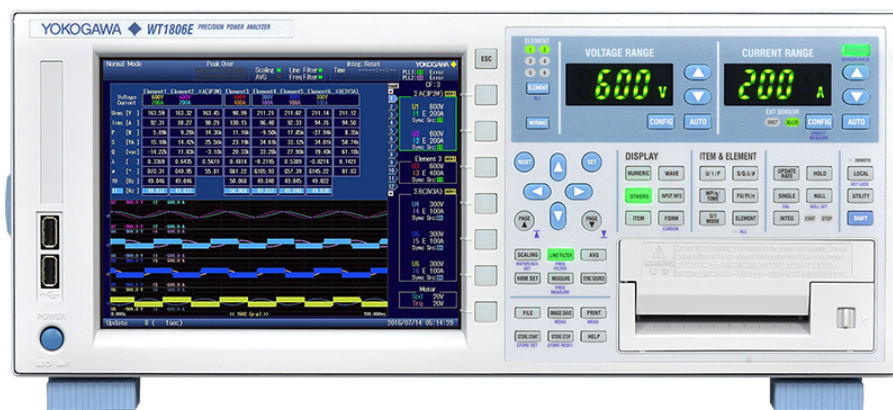
Zvolená osciloskopická karta má mimo jiné i matematické kanály, kde je možné např. vynést závislost frekvence měřeného signálu v čase, což je pro výpočet mechanického momentu motoru nezbytné (viz rovnice (1.3)). [18]

4.2.6 Pt100 a Keysight 34465A

Teplotní čidlo Pt100 bylo zvoleno pro měření teploty kostry stroje. Skládá se z měřeného materiálu (platiny), který má elektrický odpor 100 Ω při 0 °C. K měření odporu na tomto čidle byl zvolen digitální multimetr Keysight 34465A. Tento multimetr je schopen přímo přepočíst elektrický odpor čidla Pt100 na teplotu. [19]

4.2.7 YOKOGAWA WT1803E

Pro měření ztrátové energie zkoušeného motoru byl zvolen tří kanálový výkonový analyzátor YOKOGAWA WT1803E (viz Obr. 4.3). WT1803E je vysoce výkonný analyzátor výkonu, který zaručuje přesnost výkonu 0,05 % měřené hodnoty plus 0,05 % rozsahu. Je schopen analýzy harmonických až do 500. řádu základní frekvence 50/60 Hz. Se širokou škálou zobrazovacích a analytických funkcí a připojením k PC je WT1803E vhodným nástrojem pro přesné měření výkonových charakteristik a účinnosti elektrických zařízení. [20]



Obr. 4.3: YOKOGAWA WT1803E [20]

4.3 Softwarová obsluha pracoviště

Moderní pohony s proměnnými otáčkami nabízejí velké množství vestavěných funkcí, jako je řízení rampy, PID smyčky, jednoduché řízení polohy atd. Tato funkčnost je však omezená. Pohon může dělat jen základní řízení, a pokud jde o ovládání složitějších aplikací, uživatelé se často musí uchýlit k použití externích zařízení, jako jsou PLC, k ovládání pohonu ze systémového hlediska. [21]

Flexibilitu určitých pohonů však lze podstatně zvýšit použitím modulu SI- Applications Compact. Modul SI-Applications Compact poskytuje přídatný procesor pro měnič a umožňuje uživateli využívat stávající nebo psát vlastní software pro konkrétní aplikaci. Nabízí také výkonné síťové možnosti, takže mnoho pohonů (a dalšího vybavení) může být propojeno a sdělovat informace o celém procesu a nabízí tak kompletní aplikační řešení. SI-Applications Compact je modul systémové integrace, který lze nainstalovat do libovolného slotu volitelného modulu na Unidrive M. Modul je napájen z interního napájecího zdroje měniče.[21]

4.3.1 Vývoj softwaru

Aplikační programy pro SI-Applications Compact může uživatel vyvíjet pomocí softwarových nástrojů SyPT. [21]

SyPTPro nabízí různé nástroje, které vám pomohou při vývoji řešení [21]:

- Konfigurační editor pro konfiguraci pohonů a připojení v sítích CTNet, EtherNet, CT-RTU, CT-TCP a MD29MON.
- Programování žebříků a funkčních bloků na základě IEC61131-3.
- Nativní programování v jazyce DPL.
- Okno sledování pro monitorování parametrů měniče a doplňků a programových proměnných.
- Zařízení pro ladění s jedním krokem a bodem přerušení.

Se SyPTPro se můžete připojit k SI-Applications Compact buď [21]:

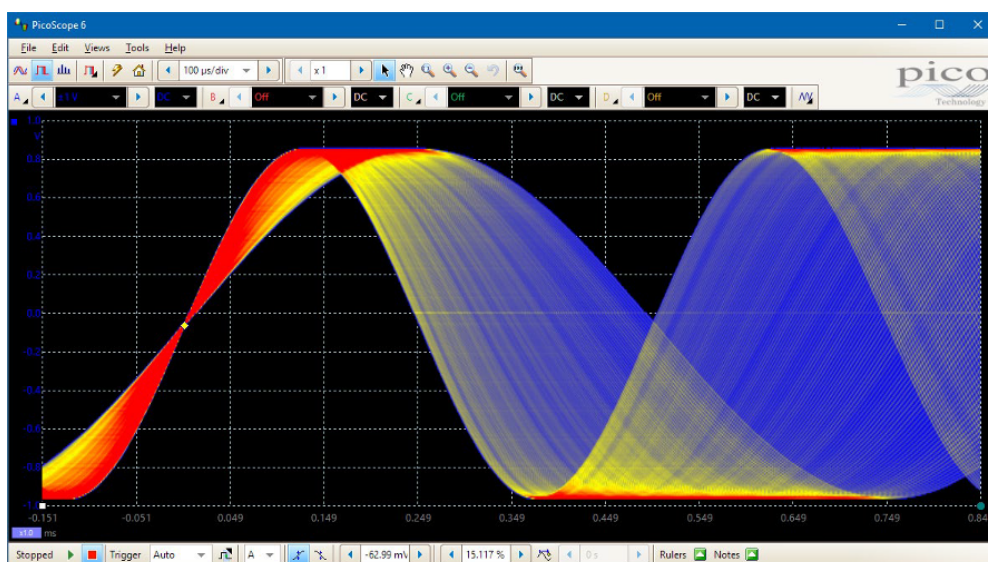
- Přímé připojení k portu EIA-485 nebo Ethernet na přední straně jednotky.
- Připojení k jedné nebo více možnostem v síti CTNet (bude vyžadována karta rozhraní CTNet pro PC).
- K modulu SI-Applications Compact není možné se připojit přes ethernetové porty modulů SI-Ethernet, MCi210 nebo SI-PROFINET V2.

5 Možnosti osciloskopické karty PicoScope 2408B

Osciloskopická karta Picoscope 2408B nahrazuje klasický osciloskop a navíc přispívá dalšími užitečnými funkcemi. K zobrazení dat slouží volně dostupný software Picoscope7. Pomocí tohoto softwaru je nejen možné zobrazování naměřených dat v reálném čase, ale také na nich provádět měření (amplitudy, frekvence, fázový posun atd.), matematické úkony (sčítání/odčítání průběhů, inverze, výpočet frekvence či derivace atd.) a samozřejmě je i zapisovat. Zápis naměřených hodnot je možný ve formátech: CSV, MATLAB file, Psdata file, nebo jako obrázek s formátem PNG.

5.1 Režim persistence

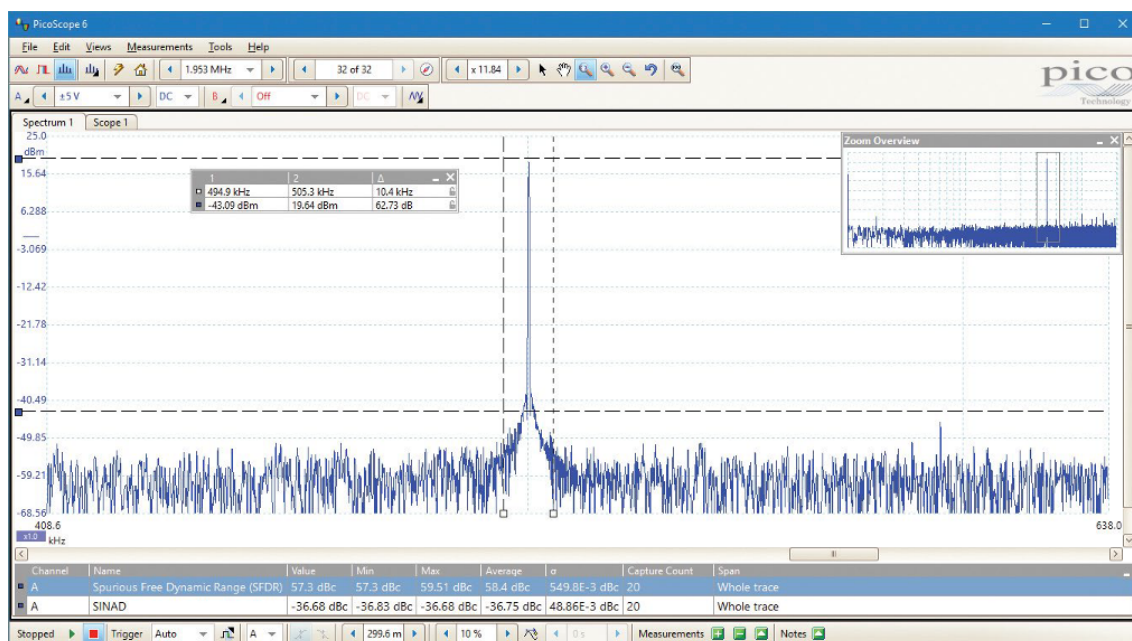
Možnosti trvalého režimu (znázorněného na Obr. 5.1) umožňuje vidět stará a nová superponovaná data s novějšími křivkami vykreslenými v jasnější barvě nebo hlubším odstínu. Díky tomu je snadné odhalit závady a výpadky a odhadnout jejich relativní frekvenci – užitečné pro zobrazení a interpretaci složitých analogových signálů, jako jsou obrazové křivky a signály analogové modulace. V režimu Fast Persistence (Rychlý trvalý režim) je dosažitelná rychlost aktualizace křivek až 80 000 křivek za sekundu. Barevné kódování nebo stupňování intenzity ukazuje, které oblasti jsou stabilní a které jsou přerušované. Je možné si vybrat mezi analogovou intenzitou, digitálním barevným a rychlým zobrazením nebo si vytvořit nastavení vlastní. [18]



Obr. 5.1: Ukázka trvalého režimu [18]

5.2 Spektrální analýza

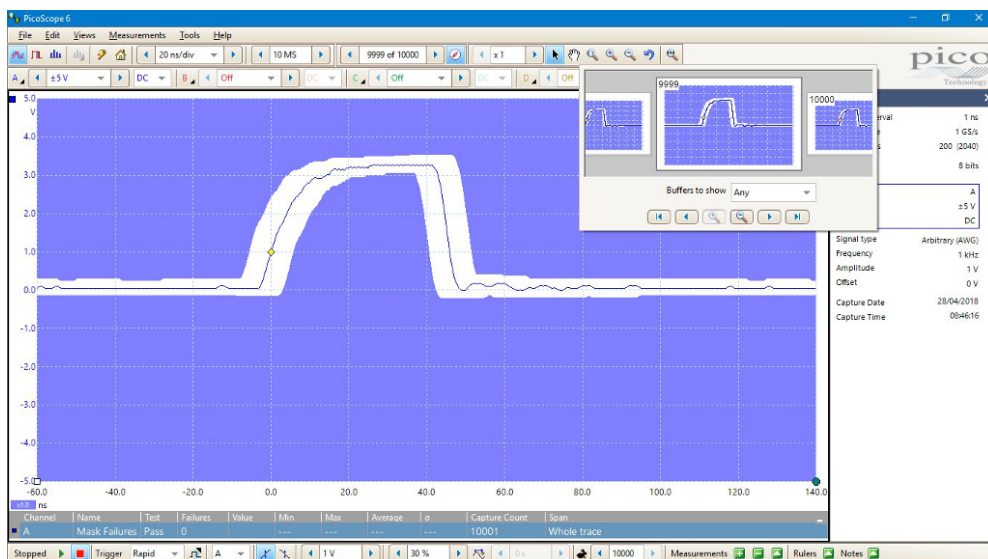
Spektrální analyzátor zobrazuje amplitudu proti frekvenci a je ideální pro nalezení šumu, přeslechů nebo zkreslení v signálech (viz Obr. 5.2). Software používá spektrální analyzátor s rychlou Fourierovou transformací (FFT), který (na rozdíl od tradičního analyzátoru s rozmítaným spektrem) dokáže zobrazit spektrum jediného, neopakujícího se tvaru vlny. [18]



Obr. 5.2: Ukázka spektrální analýzy [18]

5.3 Režim masky

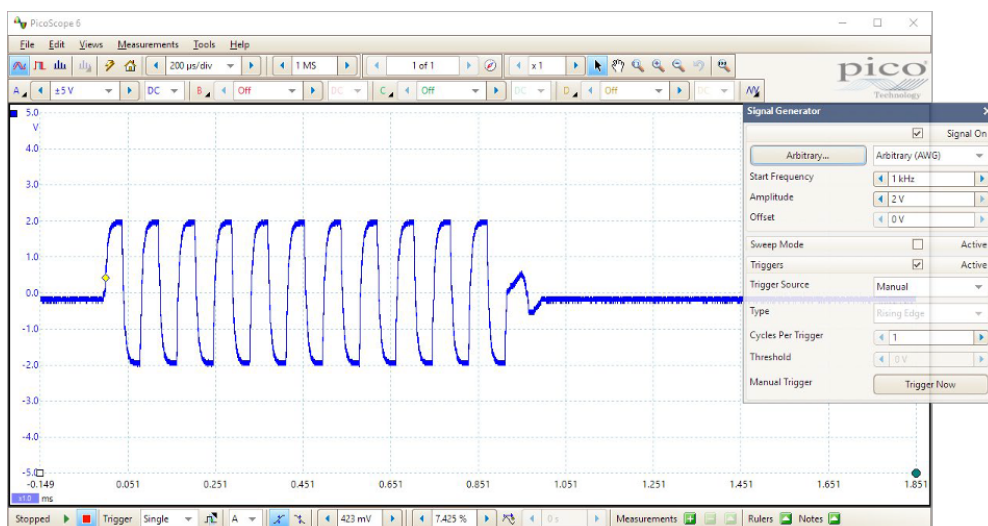
Režim masky (viz Obr. 5.3) umožňuje porovnat reálné signály se známými požadovanými signály a je navržen pro produkční a ladící prostředí. Jednoduše se zachytí známý požadovaný signál, vygeneruje se kolem něj maska a poté se použijí alarmy k automatickému uložení jakéhokoli průběhu (s časovým razítkem), který porušuje masku. PicoScope 7 zachytí všechny občasné závady a zobrazí počet selhání v okně Measurements (které se může stále používat pro jiná měření). Také je možné nastavit navigátor vyrovnávací paměti křivek tak, aby zobrazoval pouze selhání masky, což umožňuje rychle najít jakékoli závady. [18]



Obr. 5.3: Ukázka režimu masky [18]

5.4 Generátor libovolného tvaru vlny a funkcí

Osciloskopická karta má vestavěný generátor funkcí (znázorněný na Obr. 5.4) a generátor libovolného tvaru vlny (AWG). Funkční generátor (může vytvářet průběhy sinus, obdélník, trojúhelník a stejnosměrný proud a mnoho dalších, zatímco AWG umožňuje importovat průběhy z datových souborů nebo je vytvářet a upravovat pomocí vestavěného grafického editoru AWG. [18]

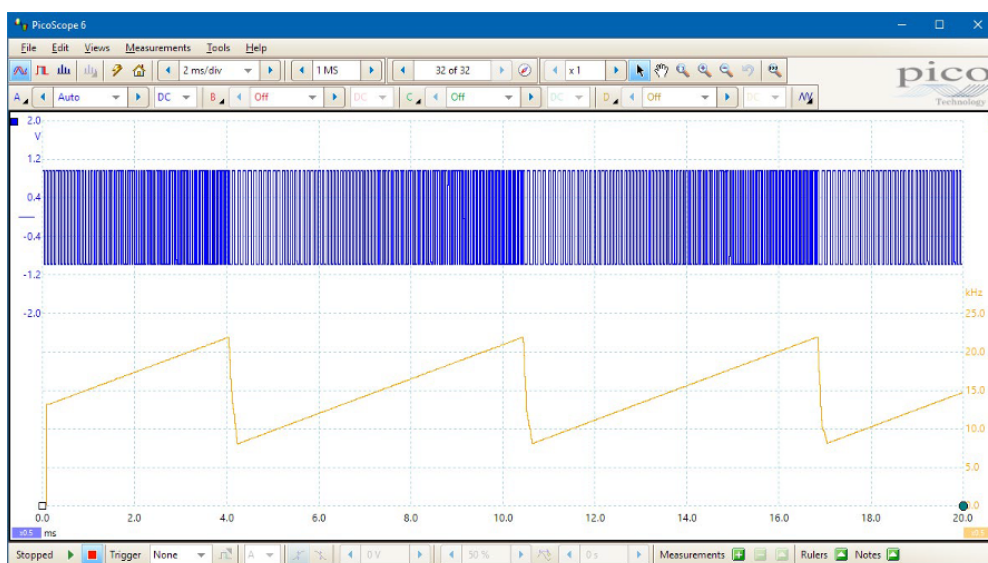


Obr. 5.4: Ukázka generátoru funkcí [18]

5.5 Matematické kanály a filtry

Pomocí PicoScope 7 je možné provádět různé matematické výpočty na vstupních signálech a referenčních křivkách. Lze vybrat jednoduché funkce, jako je sčítání a inverze, nebo použít editor rovnic a vytvořit tak složité funkce zahrnující filtry (dolní propust, horní propust, pásmová propust a pásmová zadrž), trigonometrii, exponenciály, logaritmy, statistiky, integrály a derivace. [18]

Karta může měřit frekvenci tvaru vlny, ale často je zapotřebí vědět, jak se tato frekvence mění v průběhu času, což je obtížné měření. Matematická funkce *freq* dokáže přesně toto: na Obr. 5.5 je frekvence modrého průběhu modulována rampovou funkcí, jak je vykreslena v průběhu žlutém. [18]



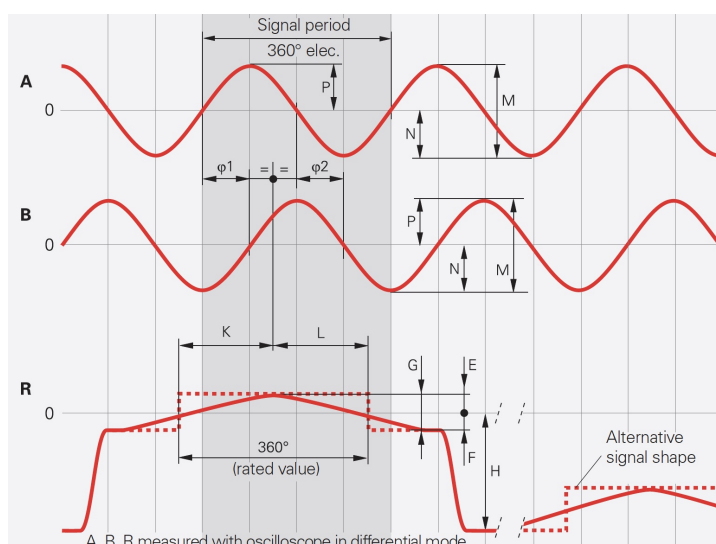
Obr. 5.5: Příklad matematické funkce *freq* [18]

6 Posouzení použitelnosti PicoScope 2408B

Měřené hodnoty otáček se při zkoušce nevyužijí pouze jako zpětná vazba do měniče, ale také pro stanovení mechanického momentu a následně mechanického výkonu (viz (1.3) a (1.4)). Při použití nepřesného snímače otáček či zapisovače měřených hodnot s nedostatečnou pamětí může dojít ke zkreslení výsledného průběhu momentu a výkonu. Z tohoto důvodu je zapotřebí vybrat vhodný snímač otáček i zapisovač.

6.1 Výstupy enkodéru ERO 1480

Enkodér od firmy Heidenhain typ ERO 1480, 1024 pulsů je vybaven třemi výstupními signály, které jsou znázorněny na Obr. 6.1. Všechny výstupní signály mají hodnotu napětí Peak to Peak $U_{pp} = 1$ V. Signál A je sinusová funkce s frekvencí $f_A = 1024 \cdot \frac{n}{60}$, přičemž n je okamžitá hodnota otáček elektrického stroje. Signál B je sinusová funkce s frekvencí $f_B = 1024 \cdot \frac{n}{60}$ a s fázovým posunem 90° el vůči signálu A. Signál R má obdélníkový průběh a frekvenci rovnu frekvenci otáčení stroje.



Obr. 6.1: Výstupní signály enkodéru ERO 1480 [16]

6.2 Parametry simulovaného rychlostního profilu

Prvotní návrh průběhu otáček vycházel z [22]. Otáčky stroje byly řízeny po sinusové funkci ze zastaveného stavu přes jmenovité otáčky opět do nulových otáček a následně v opačném směru. Tento způsob modulace otáček byl však použit protože bylo zapotřebí zatížit dva vysokomomentové nízkootáčkové stroje. Díky tomu nehrozilo nebezpečí

poškození strojů momentovými rázy a zároveň byla ze sítě odebírána pouze energie na pokrytí ztrát obou strojů.

Odzkoušení této metody bude zahrnovat jak sinusovou tak lineární modulaci. K ověření použitelnosti samotné karty byl vybrán lineární rychlostní profil. Zvolené hodnoty v této kapitole jsou pouze orientační, jelikož před tímto experimentem se uvažoval stroj s jinými jmenovitými parametry.

6.2.1 Výpočet rampy otáček

Aby bylo dosaženo podobného mechanického výkonu v motorickém i generátorickém režimu má náběžná i sestupná hrana stejnou absolutní hodnotu sklonu.

Pro výpočet sklonu byla zvolena počáteční a koncová frekvence. Jmenovité otáčky stroje jsou 12000 ot/min. Z této hodnoty byla vypočtena mechanická frekvence otáčení stroje

$$f_{\text{mech}} = \frac{n_n}{60} = \frac{12000}{60} = 200 \text{ Hz}, \quad (6.1)$$

kde f_{mech} je mechanická frekvence.

Koncová frekvence f_{end} byla zvolena stejná jako mechanická frekvence. Počáteční frekvence f_{start} byla zvolena jakožto poloviční hodnota mechanické frekvence.

Z rovnice (1.3) byl vyjádřen vztah pro sklon náběžné hrany pomocí frekvence

$$\frac{df_{\text{mech}}}{dt} = \frac{M}{2\pi \cdot J}. \quad (6.2)$$

Jelikož byla vybrána lineární modulace, lze rovnici (6.2) vyjádřit pomocí diference

$$\frac{\Delta f_{\text{mech}}}{\Delta t} = \frac{M}{2\pi \cdot J}. \quad (6.3)$$

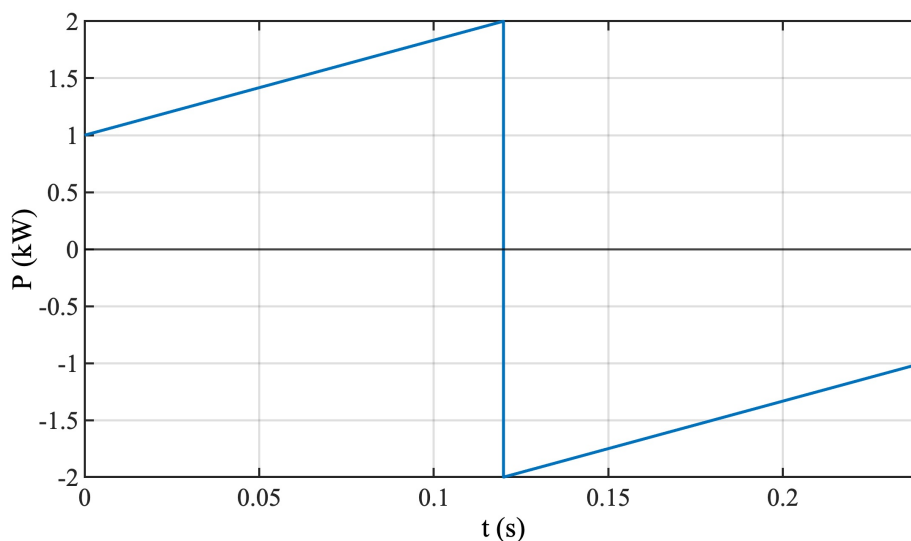
Z rovnice (6.3) byl vypočten čas náběžné hrany, přičemž byly zvoleny hodnoty momentu setrvačnosti $0,0003 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ a jmenovitý moment stroje $1,6 \text{ Nm}$

$$\Delta t = \frac{2\pi \cdot J \cdot \Delta f_{\text{mech}}}{M} = \frac{2\pi \cdot 0,0003 \cdot (200 - 100)}{1,6} \doteq 0,12 \text{ s}. \quad (6.4)$$

6.2.2 Ověření mechanického výkonu

Pro zvolené hodnoty sklonu je nutné ověřit hodnotu mechanického výkonu. Ten by se měl rovnat jmenovitému výkonu stroje, v tomto případě 2 kW .

V lineární modulaci otáček má moment stroje obdélníkový průběh. Vzhledem k rovnici (1.4) má mechanický výkon taktéž obdélníkový průběh, ale místo konstantní hodnoty se výkon lineárně zvyšuje případně snižuje (viz Obr. 6.2).



Obr. 6.2: Naznačení průběhu výkonu pro lineární modulaci otáček

Pro určení střední hodnoty mechanického výkonu byla vypočtena hodnota počátečního a koncového výkonu

$$\begin{aligned}
 P_{\text{start}} &= \omega_{\text{start}} \cdot M = 2\pi \cdot f_{\text{start}} \cdot J \cdot \frac{d\omega_n}{dt} = 2\pi \cdot f_{\text{start}} \cdot J \cdot 2\pi \cdot \frac{\Delta f_{\text{mech}}}{\Delta t} = \\
 &= 2\pi \cdot 100 \cdot 0,0003 \cdot 2\pi \cdot \frac{100}{0,12} = 987 \text{ W},
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{end}} &= \omega_{\text{end}} \cdot M = 2\pi \cdot f_{\text{end}} \cdot J \cdot \frac{d\omega_n}{dt} = 2\pi \cdot f_{\text{end}} \cdot J \cdot 2\pi \cdot \frac{\Delta f_{\text{mech}}}{\Delta t} = \\
 &= 2\pi \cdot 200 \cdot 0,0003 \cdot 2\pi \cdot \frac{100}{0,12} = 1974 \text{ W},
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

kde P_{start} je počáteční výkon, ω_{start} je počáteční úhlová frekvence, P_{end} je koncový výkon a ω_{end} je koncová úhlová frekvence.

Střední hodnota mechanického výkonu byla určena jako aritmetický průměr hodnot počátečního a koncového výkonu

$$P_{\text{str}} = \frac{P_{\text{start}} + P_{\text{end}}}{2} = \frac{987 + 1974}{2} = 1480,5 \text{ W}, \tag{6.7}$$

kde P_{str} je střední hodnota výkonu.

6.3 Ověření použitelnosti osciloskopické karty PicoScope 2408B

Vybraná osciloskopická karta PicoScope 2408B pro záznam měřených hodnot otáček enkodérem ERO 1480 je ovládána přes počítačovou aplikaci PicoScope 7 software. Tímto

softwarem lze zaznamenávat hodnoty rychlostí až 1 GS/s. Maximální paměť osciloskopické karty činí 128 MS.

Software disponuje matematickými kanály, díky kterým je možné zaznamenaný signál jakkoliv modifikovat. V tomto případě byla použita funkce *freq*. Pomocí této funkce je možné určit okamžitou hodnotu frekvence měřeného signálu.

Ověření funkčnosti karty bylo provedeno generátorem signálů RIGOL DG1032Z, který byl vypůjčen od firmy AVL Moravia s. r. o. Generátor má dva analogové výstupy, maximální frekvenci 30 MHz, základní funkce jako sinus, obdélník, rampa, pulz, šum atd. U funkce sinus a obdélník je možné modulovat frekvenci pomocí lineární, exponenciální, Gaussovy funkce a mnoho dalších. [23]

6.3.1 Záznam zkušebního signálu A

Jak bylo uvedeno v kapitole 6.1, signál A z enkodéru ERO 1480 má 1024 period sinusových funkcí na jednu mechanickou otáčku. Tudíž pro zvolené mechanické frekvence 100 a 200 Hz odpovídají počáteční a koncové frekvence signálu A:

$$f_{A,\text{start}} = 1024 \cdot f_{\text{start}} = 1024 \cdot 100 = 102,4 \text{ kHz}, \quad (6.8)$$

$$f_{A,\text{end}} = 1024 \cdot f_{\text{end}} = 1024 \cdot 200 = 204,8 \text{ kHz}, \quad (6.9)$$

kde $f_{A,\text{start}}$ je počáteční frekvence signálu A a $f_{A,\text{end}}$ je signálu A.

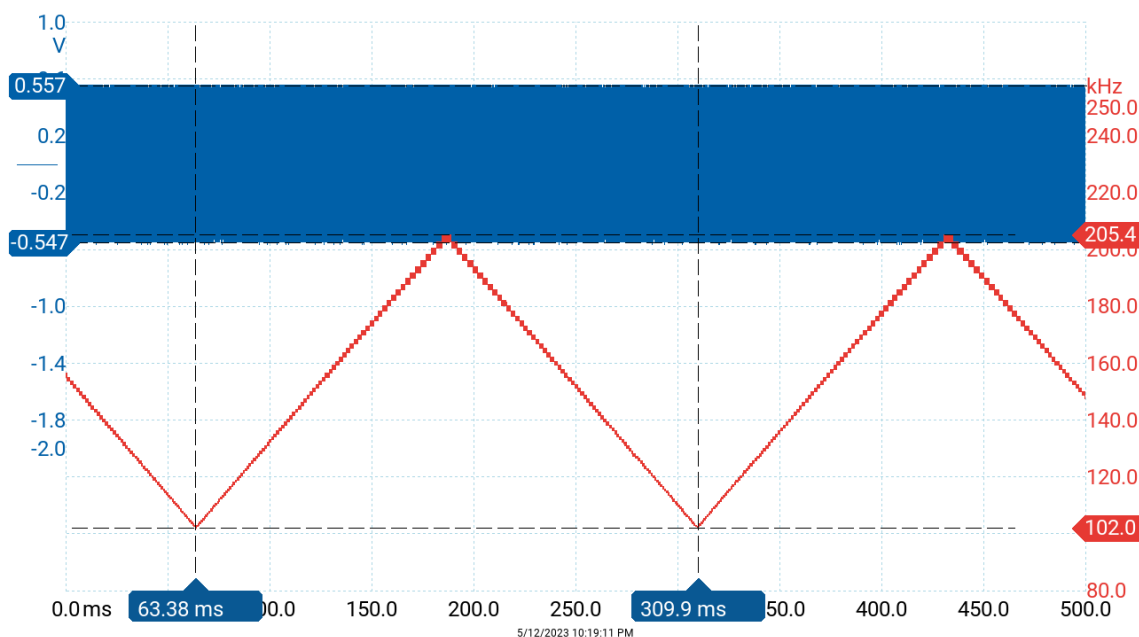
Náběžná rampa generovaného signálu byla nastavena s počáteční frekvencí 102,4 kHz a s koncovou frekvencí 204,8 kHz. Sestupná rampa generovaného signálu byla nastavena s počáteční frekvencí 204,8 kHz a s koncovou frekvencí 102,4 kHz. Doba obou ramp byla nastavena podle vypočteného času náběžné hrany 0,12 s (viz (6.4)).

Na Obr. 6.3 je vykreslený zaznamenaný zkušební signál A (modrá křivka) a vypočtená okamžitá hodnota frekvence signálu A (červená křivka). Napětí zkušebního signálu U_{pp} se shoduje s přednastavenou hodnotou 1 V. Perioda cyklu má hodnotu

$$T = 309,9 - 63,38 = 246,52 \text{ ms}. \quad (6.10)$$

Jelikož pravítka byla nastavována ručně, lze říci, že perioda cyklu má předpokládanou hodnotu $2 \cdot \Delta t = 240 \text{ ms}$. Minimální a maximální hodnota frekvence 102 kHz a 205,4 kHz jde taktéž považovat za nastavené hodnoty.

Je však zřejmé, že osciloskopická karta nestíhá výpočet matematického kanálu pro tak velké frekvence. I když má křivka konstantní sklon, je zde výrazné zkreslení PWM modulací. To bude způsobovat lehkou odchylku při nahrazování průběhu okamžité frekvence lineární regresí a tím také výsledný mechanický výkon.



Obr. 6.3: Modrá - zkušební signál A, Červená - okamžitá frekvence

6.3.2 Zkouška optimalizovaného náhradního signálu

Frekvence simulovaného signálu A byla příliš vysoká. Proto byla navržena ideální frekvence, díky které bude signál obsahovat dostatek pulsů na jednotku času a zároveň nebude moc vysoká. Ideální frekvence byla navržena se 100 pulsy na mechanickou otáčku. Té odpovídají počáteční a koncová frekvence

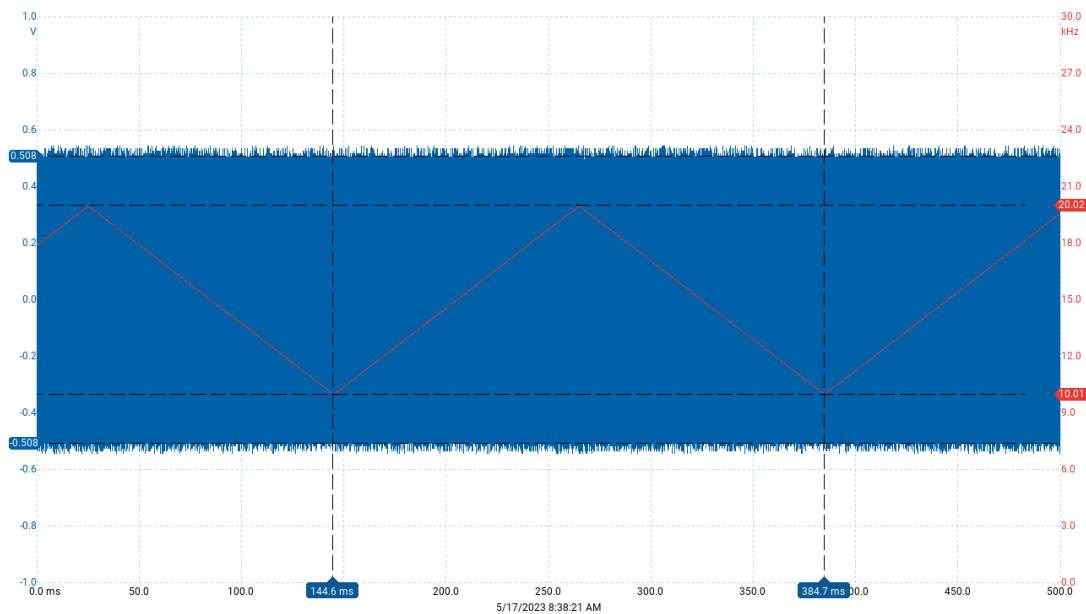
$$f_{id,start} = 100 \cdot f_{start} = 100 \cdot 100 = 10 \text{ kHz}, \quad (6.11)$$

$$f_{id,end} = 100 \cdot f_{end} = 100 \cdot 200 = 20 \text{ kHz}, \quad (6.12)$$

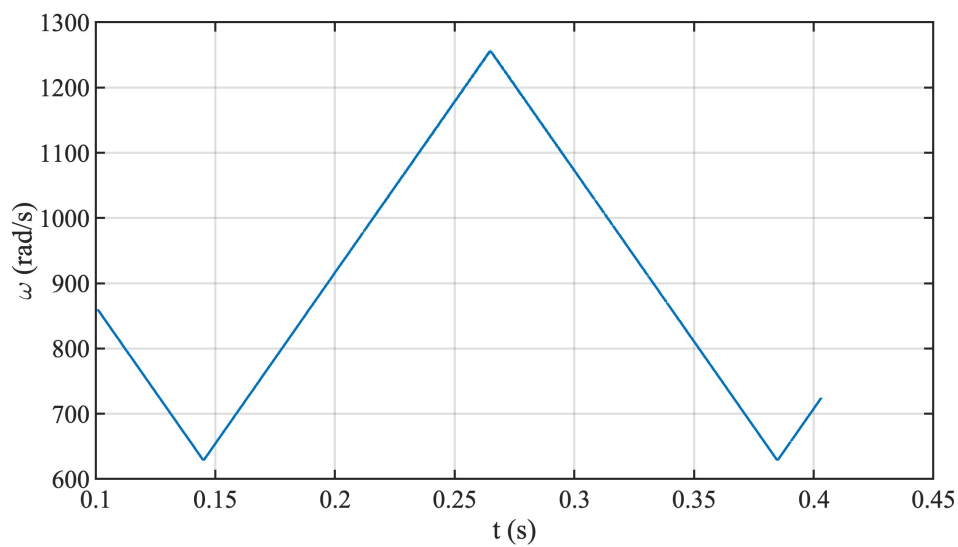
kde $f_{id,start}$ je počáteční frekvence ideálního signálu a $f_{id,end}$ je koncová frekvence ideálního signálu.

Ideální signál byl vytvořen generátorem pulsů RIGOL DG1032Z s periodou cyklu 240 ms viz Obr. 6.4.

Vzhledem k velkému množství dat, byly do prostředí MATLAB importovány pouze data v čase od 100 ms do 400 ms. Na Obr. 6.5 je vykreslená vypočtená mechanická úhlová frekvence ideálního signálu.

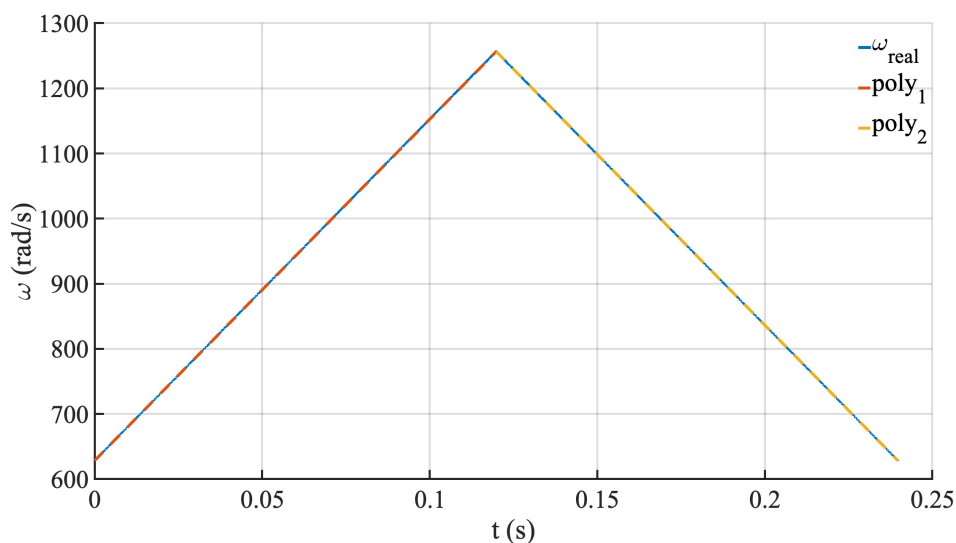


Obr. 6.4: Modrá - náhradní signál, Červená - okamžitá frekvence



Obr. 6.5: Závislost úhlové frekvence na čase pro náhradní signál

Pomocí funkce *polyfit* byla na náběžná a sestupná hrana nahrazena dvěma body. Pro porovnání sklonu byly obě přímky a reálná úhlová frekvence vykreslena do Obr. 6.6.



Obr. 6.6: Srovnání reálné úhlové frekvence s nahrazenými polynomy

Průběh úhlové frekvence byl nahrazen dvěma přímkami. Výkon stroje v čase byl vypočten z (1.3) a (1.4). Výkon stroje byl následně vykreslen do Obr. 6.7 a z uvedených hodnot v tomto grafu byly vypočteny hodnoty mechanického výkonu v motorickém a generátorickém režimu

$$P_m = \frac{P_{m,\max} + P_{m,\min}}{2} = \frac{1975,57 + 988,1}{2} = 1481,8 \text{ W}, \quad (6.13)$$

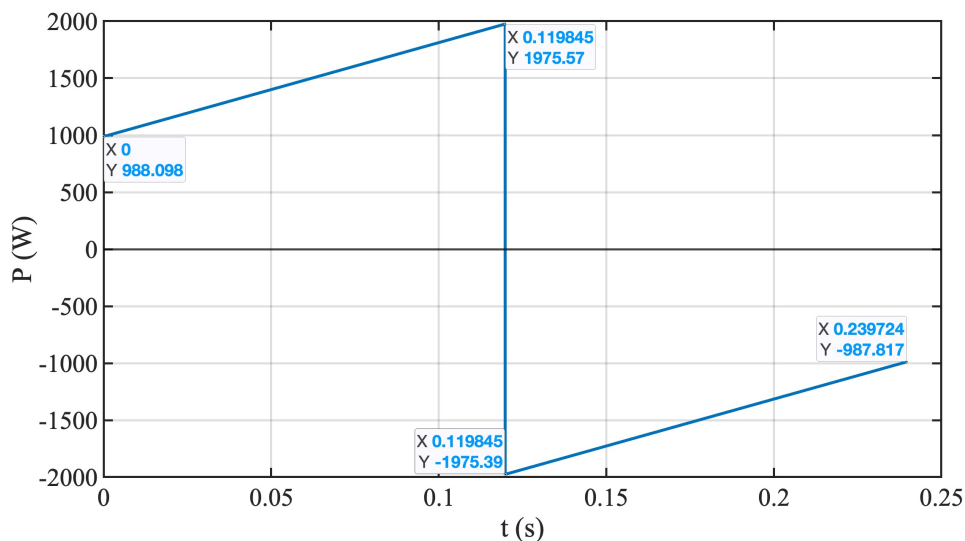
$$P_g = \frac{P_{g,\max} + P_{g,\min}}{2} = \frac{-1975,4 + (-987,8)}{2} = -1481,6 \text{ W}. \quad (6.14)$$

Pro vypočtené hodnoty byly určeny odchylky od předpokládané hodnoty mechanického výkonu

$$\varepsilon_m = \left| 1 - \frac{P_m}{P_{st}} \right| \cdot 100 = \left| 1 - \frac{|1481,8|}{1480,5} \right| \cdot 100 = 0,088 \%, \quad (6.15)$$

$$\varepsilon_g = \left| 1 - \frac{P_g}{P_{st}} \right| \cdot 100 = \left| 1 - \frac{|-1481,6|}{1480,5} \right| \cdot 100 = 0,074 \%, \quad (6.16)$$

kde ε_m je procentuální odchylka v motorickém režimu a ε_g je procentuální odchylka v generátorickém režimu.



Obr. 6.7: Závislost výkonu na čase pro náhradní signál

Ze vztahů (6.15) a (6.16) je zřejmé, že vypočtené hodnoty mechanického výkonu v obou režimech jsou téměř totožné s teoretickou hodnotou. Osciloskopická karta dokáže s dostatečnou přesností signál této frekvence zpracovat.

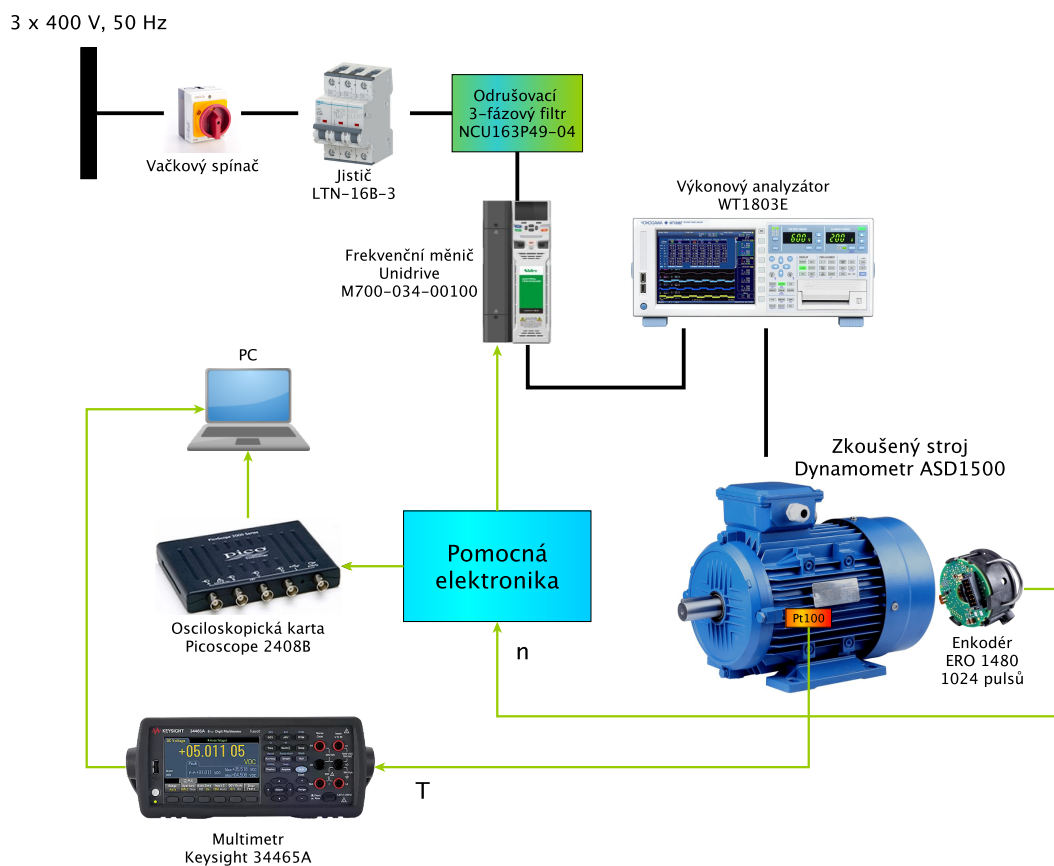
6.3.3 Vyhodnocení použitelnosti osciloskopické karty

Zvolená osciloskopická karta je schopna vypočítat přesně okamžitou frekvenci signálu se 100 pulzy na mechanickou otáčku. Při vyšších frekvencích se začíná projevovat kvantování, které deformuje průběh okamžité frekvence. Kvantování se dá předejít použitím karty s vyšším počtem bitů, která ovšem není k dispozici.

I přes nedokonalý průběh okamžité frekvence, určené osciloskopickou kartou ze zkušebního signálu A, je zachován tvar a požadovaného lineárního profilu. Proto byla karta vyhodnocena jako použitelná pro tuto aplikaci akcelerační metody.

7 Realizace měřícího pracoviště

Měřící pracoviště pro akcelerační metodu měření se skládá z různých přístrojů, které jsou detailně popsány v kapitole 4.2. Na Obr. 7.1 je znázorněno blokové schéma zapojení měřícího pracoviště pro akcelerační metodu.



Obr. 7.1: Blokové schéma zapojení měřícího pracoviště

7.1 Schéma zapojení

Schéma slouží především k popsání přesného zapojení vodičů mezi jednotlivými přístroji a komponenty. U každého vodiče musí být zřejmé jakou má barvu izolace, místo zapojení a případně typ kabelu. Svorky, kam je vodič zapojen, musejí být řádně popsány. Napájecí vodiče jsou ve schématu označeny červenou, nulové vodiče modrou a zemnicí vodiče čerchovanou čarou. Celé schéma zapojení je součástí přílohy této práce.

7.1.1 Frekvenční měnič a výkonový analyzátor

Zdroj pro zkoušený motor ASD1500 byl zvolen frekvenční měnič Unidrive M700-034-0100. Přívod vede přes odrušovací 3-fázový filtr NCU163P49-04. K měniči je připojen brzdňý odpor DBR3 1220 - 003009, který slouží ke spotřebování vygenerované energie při zkoušce akcelerační metodou.

Mezi frekvenčním měničem a samotným motorem je připojen výkonový analyzátor WT1803E. Analyzátor měří proud každé fáze, sdružené napětí na motoru a celkový elektrický příkon pomocí Aronova zapojení. Napětí není bráno ze svorek motoru, protože úbytek napětí na kabelu je zanedbatelný.

7.1.2 Napájecí a pomocné obvody

V pomocných obvodech se nachází zdroj vyhlazeného nestabilizovaného napětí 24 V DC pro napájení systémů měření, regulace, automatizace a řízení průmyslových zařízení a technologických celků AXSZ2V03. Tento zdroj napájí měřící ústřednu. Dále pomocné obvody obsahují napájení pro ventilátor dynamometru, ventilátor pracovního stolu a napájení pro měřící jednotku M350. [24]

7.1.3 Čidlo otáček a teploty

Čidlo otáček ERO1480 je zapojeno do svorkovnicového modulu, ze kterého jdou měřící signály do frekvenčního měniče a osciloskopické karty. Osciloskopickou kartou je z čidla otáček zapisován vstupem IN A signál A+. Signál B+ (nebo jiný) není potřeba, protože pro výpočet výkonu na hřídeli není potřeba znát směr otáčení stroje.

Teplota kostry stroje je snímána pomocí čidla teploty Pt100 a multimetru Keysight 34465A. Zvolený multimetr obsahuje databázi různých čidel teploty, tudíž lze z něj odčítat rovnou teplotu kostry. Pt100 byl zapojen čtyř-vodičově, aby se kompenzoval odpor přívodních vodičů.

7.2 Realizace a oživení měřícího pracoviště

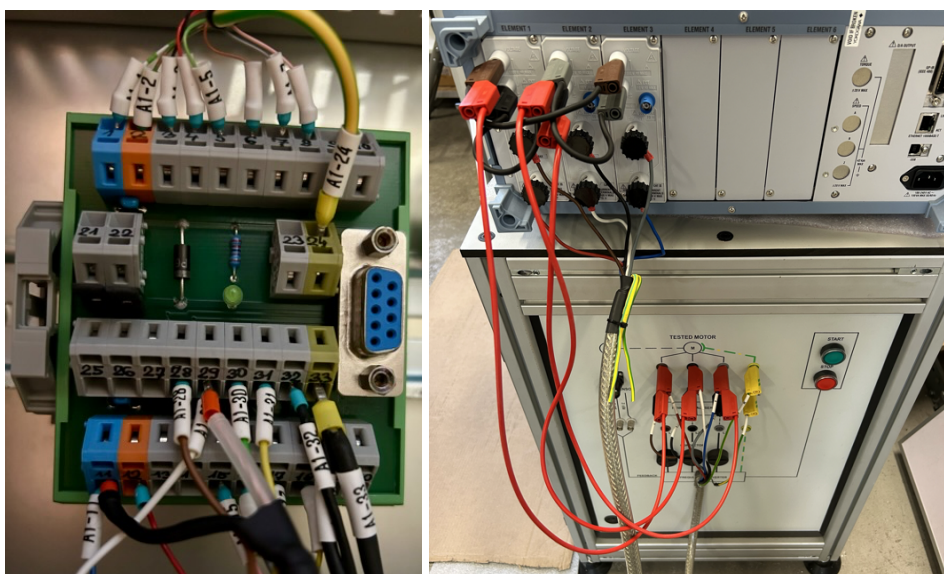
Firma AVL Moravia s. r. o. poskytla měřící pracoviště pro zkoušení malých strojů, které je zobrazeno na Obr. 7.2. Pracoviště se skládá zejména z: dynamometru ASD1500, dvou frekvenčních měničů Unidrive M700, řídicí jednotky M350, řídicích a napájecích obvodů. Pro aplikaci akcelerační metody není potřeba dvou motorů, tudíž byl použit pouze jeden frekvenční měnič. Zapojení pracoviště bylo provedeno podle schématu zapojení, které je součástí přílohy této práce.



Obr. 7.2: Původní měřící pracoviště

7.2.1 Připojení osciloskopické karty

Osciloskopická karta byla připojena ke svorkovnicovému systému, který umožňuje duplikování přivedených signálů z čidla otáček ER0 1480. Připojení lze vidět na Obr. 7.3 A).



Obr. 7.3: Zapojení A) osciloskopické karty; B) výkonového analyzátoru

7.2.2 Zapojení výkonového analyzátoru

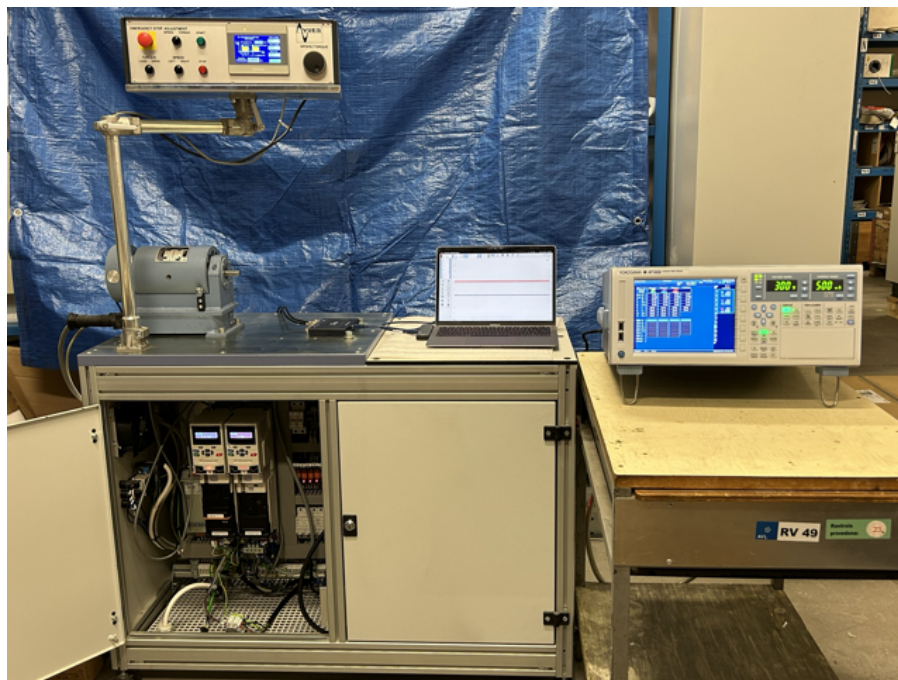
Na Obr. 7.3 B) lze vidět zapojení výkonového analyzátoru WT1803E. K připojení byla využita přídatná vestavěná svorkovnice v bočním panelu pracoviště. Na spodní části

svorkovnice jsou připojené vodiče (hnědá, černá, šedá) k výstupu měniče, na vrchní části svorkovnice jsou připojené vodiče (červená, bílá, modrá) ke svorkám zkoušeného motoru.

Výkonový analyzátor je vybaven na zadní straně třemi měřicími elementy. Každý element disponuje dvěma dvojicemi svorek (jedna dvojice na měření proudu a druhá dvojice na měření napětí). Vstupní svorky jsou svorkami vstupními a spodní svorky jsou svorkami výstupními. Na vrchní proudové svorky je tedy přiveden proud z měniče a na spodní proudové svorky je připojen zkoušený motor. Na napěťových svorkách je přivedeno napětí U_{uw} , U_{vw} a U_{uv} .

7.2.3 Oživení měřícího pracoviště

Po zapojení měřícího pracoviště bylo provedeno oživení pracoviště s pomocí pracovníků firmy AVL Moravia s. r. o. Oživení proběhlo bez komplikací. Celé oživené pracoviště lze vidět na Obr. 7.4.



Obr. 7.4: Měřící pracoviště pro akcelerační metodu

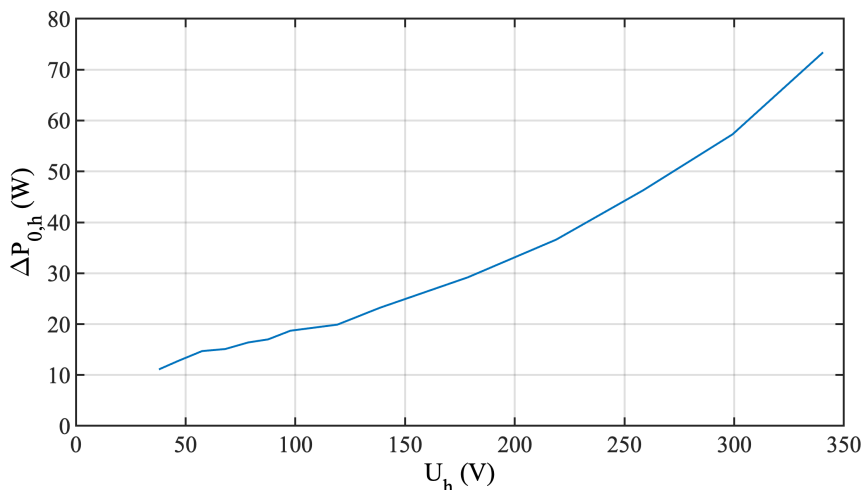
8 Výpočtová příprava před měřením

8.1 Určení momentu setrvačnosti

V konstrukční dokumentaci zkoušeného stroje je sice uvedena hodnota momentu setrvačnosti, ale pro účely akcelerační metody bylo zapotřebí určit jeho přesnou velikost. Proto bylo provedeno měření naprázdno a doběhová zkouška.

8.1.1 Měření naprázdno

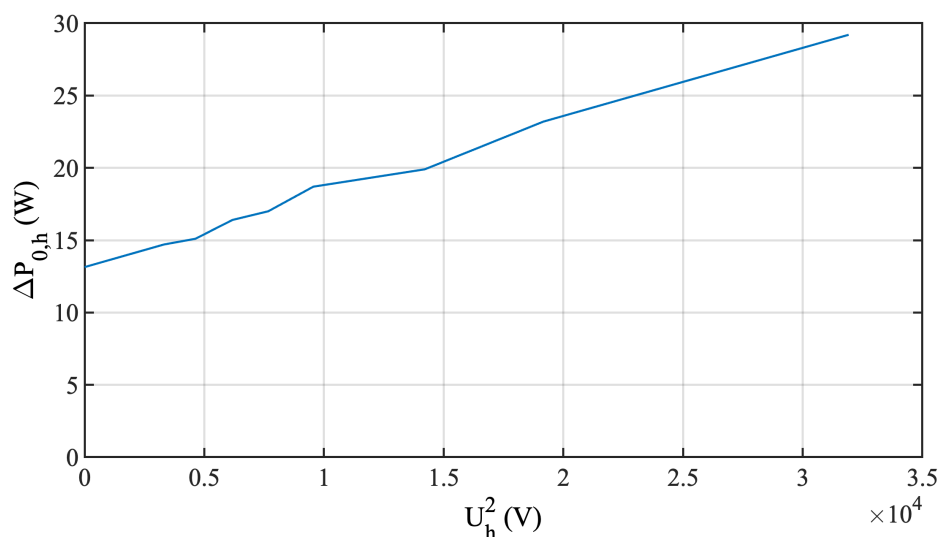
Při zkoušce naprázdno byl stroj uveden do chodu se jmenovitými otáčkami a napětím. Pomocí výkonového analyzátoru bylo zaznamenáváno mj. napětí 1. harmonické mezi jednotlivými fázemi a elektrický příkon 1. harmonické. Na Obr. 8.1 jsou vykresleny naměřené hodnoty.



Obr. 8.1: Ztráty naprázdno v závislosti na napětí

Pro určení mechanických ztrát byly naměřené hodnoty pod 50% jmenovitého napětí separovány. Následně byl určen v prostředí Excel korelační koeficient lineární regrese kvadrátu napětí, který nabýval hodnoty 0,971. Tato hodnota je příliš malá z důvodu chyby měření v intervalu pod 20% jmenovitého napětí. Proto byly poslední hodnoty v tomto intervalu prohlášené za neplatné. Následně byl znova určen korelační koeficient, který poté nabýval dostatečně velké hodnoty 0,993.

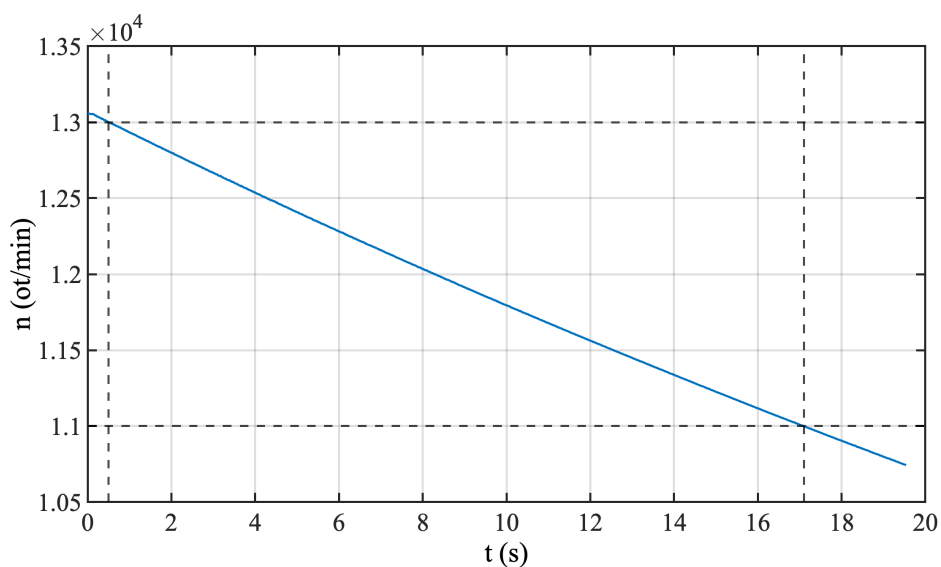
Lineární regresí byly ze zbylých dat určeny mechanické ztráty ΔP_{mech} . Na Obr. 8.2 lze vidět závislost ztrát naprázdno na kvadrátu napětí včetně dopočteného úseku pod 20% jmenovitého napětí. Mechanické ztráty jsou ztráty naprázdno při nulovém napětí a nabývají hodnoty 13,14 W.



Obr. 8.2: Ztráty naprázdno v závislosti na kvadrátu napětí

8.1.2 Doběhová zkouška

Stroj se roztočil na vyšší otáčky než $(1 + \delta)n_n$ (13000 ot/min), přičemž velikost poměrné odchylky δ byla zvolena dle doporučení normy 0,1. Po začátku měření byl stroj odpojen od zdroje a samovolně zpomaloval. Měření bylo ukončeno chvílí po té, co se stroj otáčel otáčkami menšími než $(1 - \delta)n_n$ (11000 ot/min).



Obr. 8.3: Doběhová zkouška

Pro kontrolu bylo měření provedeno ještě jednou. Naměřené hodnoty byly téměř totožné, tudíž pro výpočet momentu setrvačnosti byly vzaté jejich průměrné hodnoty. Na Obr. 8.3 je vykreslen průběh otáček v závislosti na čase první doběhové zkoušky. Průměrná diference otáček byla $\Delta n = 2001,2$ ot/min a průměrný čas zpomalení byl $\Delta t = 16,54$ s.

8.1.3 Výpočet momentu setrvačnosti

K výpočtu momentu setrvačnosti bylo provedeno měření naprázdno, ze kterého byly určeny mechanické ztráty, a doběhová zkouška, ze které byla určena diference otáček a času. Z těchto hodnot byl po dosazení do vztahu (2.2) vypočten moment setrvačnosti

$$J = \frac{P_{\text{mech}}}{\omega} \cdot \frac{\Delta t}{\frac{2\pi}{60} \cdot \Delta n} = \frac{13,14}{\frac{2\pi}{60} \cdot 12000} \cdot \frac{16,54}{\frac{2\pi}{60} \cdot 2001,2} = 0,000825 \text{ kg} \cdot \text{m}^2. \quad (8.1)$$

8.2 Stanovení způsobu cyklování

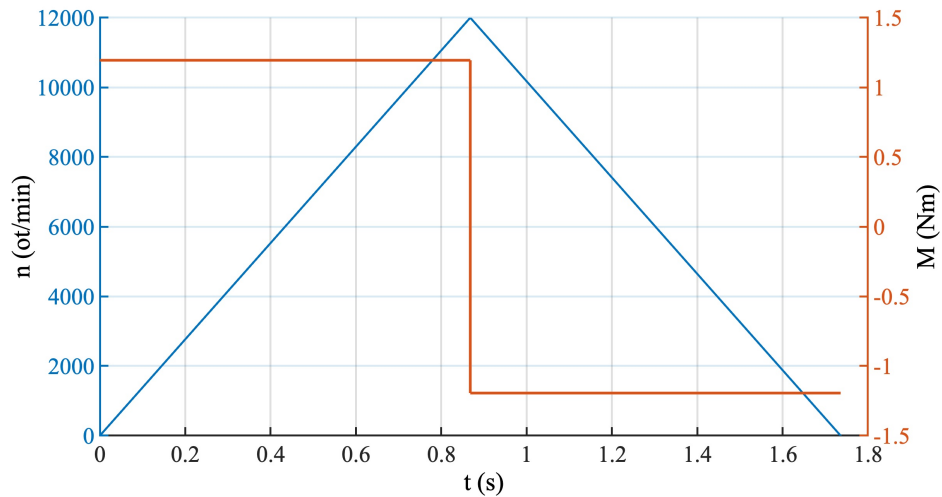
K experimentálnímu ověření akcelerační metody měření elektrických strojů byly navrženy dvě modulace otáček: lineární a sinusová. U obou modulací byly stanoveny parametry průběhu otáček a následně vytvořen model ideálního průběhu momentu a výkonu.

8.2.1 Lineární modulace

Aby bylo měření co nejjednodušší, bylo rozhodnuto, že daný průběh nebude kmitat kolem nulových otáček. To umožní zaznamenávání pouze jednoho průběhu z čidla otáček. Jelikož se jedná o vysokootáčkový stroj, zvolily se otáčky v intervalu od 0 do 12000 ot/min. Střední hodnota otáček tedy je 6000 ot/min a diference otáček je 12000 ot/min. Doba změny otáček byla vypočtena dle (2.3)

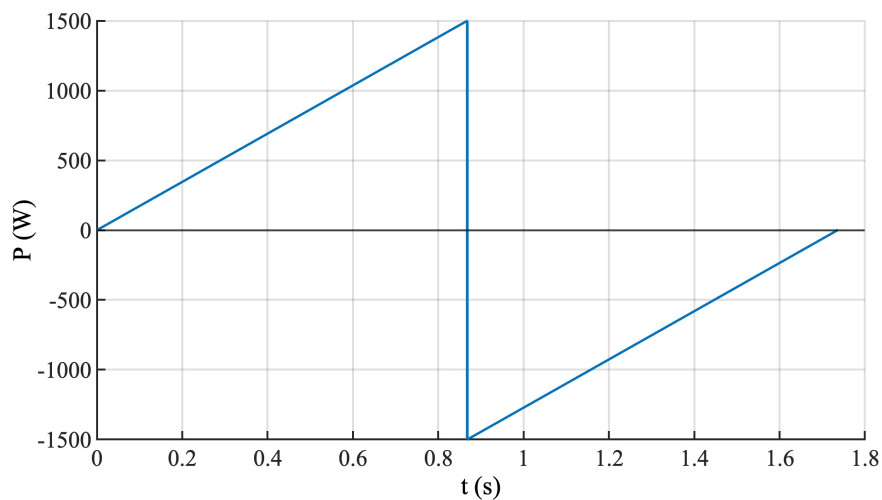
$$dt = J \cdot \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{M} = 0,000825 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{12000 - 0}{1,194} = 0,868 \text{ s}. \quad (8.2)$$

Pomocí vypočteného času změny otáček v (8.2) a dalších vypočtených či zvolených parametrů, byla vytvořena simulace jednoho cyklu výsledného průběhu otáček, momentu (Obr 8.4) a výkonu stroje (Obr 8.5).



Obr. 8.4: Ideální průběh otáček a momentu lineární modulace v jednom cyklu

Z nasimulovaného ideálního průběhu výkonu byla vypočtena hodnota mechanického výkonu jedné půl-periody $P_{\text{mech}} = 750,4 \text{ W}$.



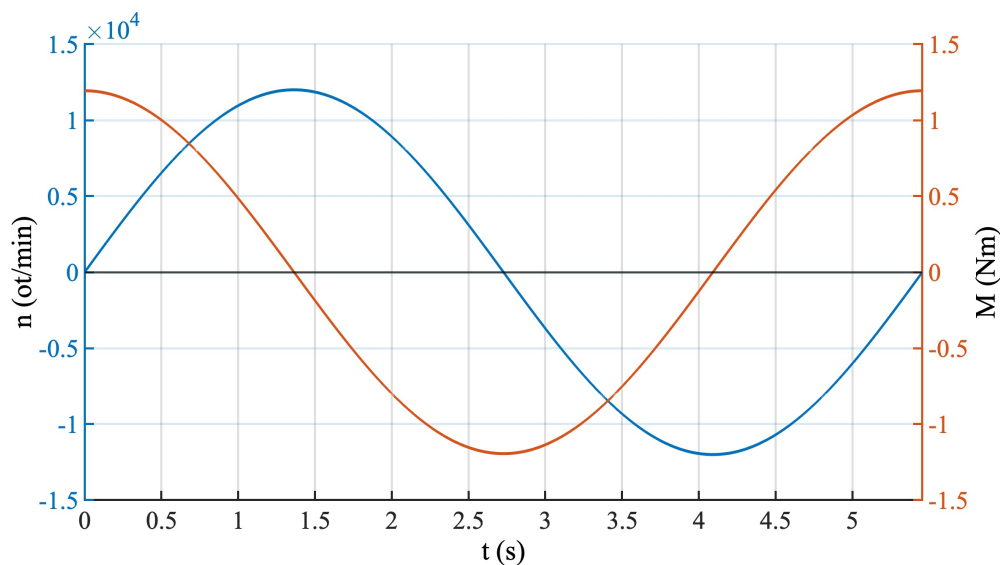
Obr. 8.5: Ideální průběh výkonu lineární modulace v jednom cyklu

8.2.2 Sinusová modulace

Jak bylo vysvětleno v kapitole 2.3.2, nelze použít zjednodušení měření jako u lineární modulace. Proto střední hodnota otáček je zde nulová a amplituda průběhu nabývá hodnoty jmenovitých otáček, tedy 12000 ot/min. Perioda jednoho cyklu byla vypočtena ze vztahu (2.7)

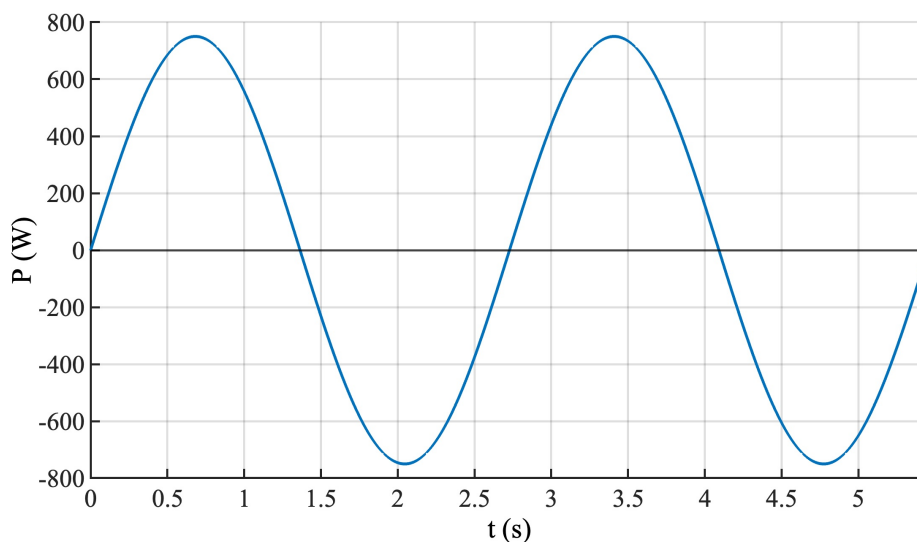
$$T = J \cdot \omega_{\max} \cdot \frac{2\pi}{M_{\max}} = 0,000825 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 12000 \cdot \frac{2\pi}{1,194} = 5,456 \text{ s.} \quad (8.3)$$

Díky vypočtené periodě v (8.3) a dalším vypočteným či určeným parametrům, byla vytvořena simulace jednoho cyklu výsledného průběhu otáček, momentu (Obr 8.6) a výkonu stroje (Obr 8.7).



Obr. 8.6: Ideální průběh otáček a momentu sinusové modulace v jednom cyklu

Z nasimulovaného ideálního průběhu výkonu byl vypočtena hodnota mechanického výkonu jedné půl-periody $P_{\text{mech}} = 477,5 \text{ W}$.



Obr. 8.7: Ideální průběh výkonu sinusové modulace v jednom cyklu

9 Aplikace akcelerační metody

9.1 Vlastní zkouška stroje

Pro zkoušku dynamometru akcelerační metodou byly vybrány dva rychlostní profily. Lineární rychlostní profil zajišťuje konstantní moment na hřídeli pro motorický i generátorický režim. Směr momentu se však v daných režimech liší, proto dochází k momentovým rázům, které mohou způsobit poškození stroje. Sinusový rychlostní profil těmto momentovým rázům předchází a zaručuje plynulejší tok energie. Nastavení frekvenčního měniče bylo zajištěno pracovníky AVL Moravia s. r. o.

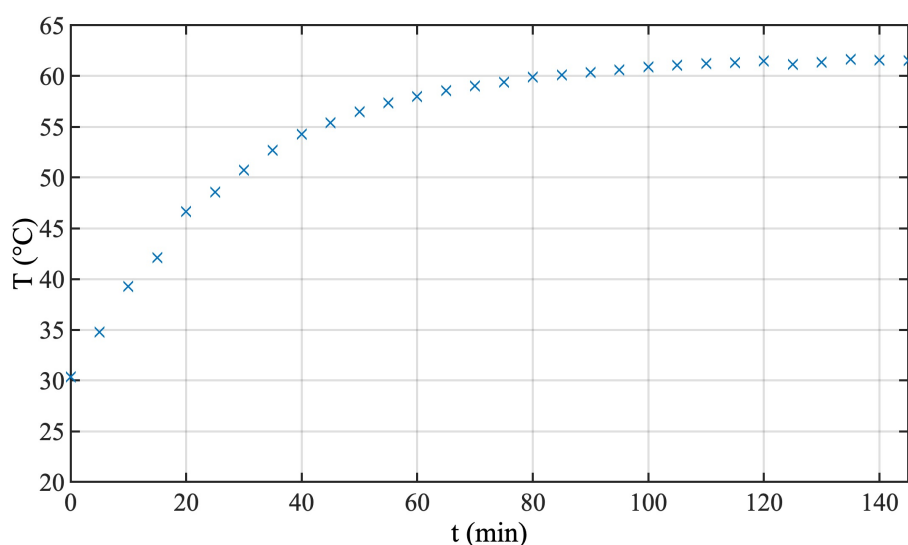
9.1.1 Zatížení S1

Pro přesnější určení dílčích ztrát ve zkoušeném stroji byla provedena zkouška trvalým zatížením S1 dle [1]. Tato zkouška byla uskutečněna ve firmě Moog Brno s. r. o., protože disponuje dynamometrem ASD2000, který má stejné či lepší parametry než zvolený zkoušený stroj.

Výkonovým analyzátozem byl zaznamenávána dodaná energie, jejíž hodnota je uvedena v Tab. 9.1. Dále byly zaznamenány efektivní hodnoty napětí U_{ef} a proudu I_{ef} .

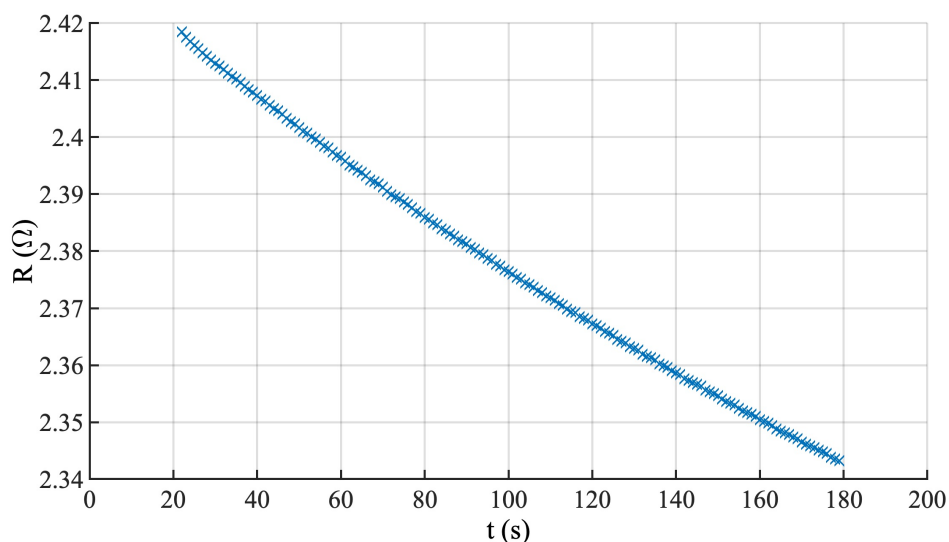
Tab. 9.1: Naměřené veličiny při trvalém zatížení

t (h)	W_m (kWh)	P_2 (kW)	U_{ef} (V)	I_{ef} (A)
2,4828	4,26443	1,503	342,3	3,601



Obr. 9.1: Teplota kostry při trvalém zatížení

Oteplení kostry je zobrazeno na Obr. 9.1. Teplota okolí činila $\theta_{ok,S1} = 23,15 \text{ }^\circ\text{C}$. Ustálená teplota dosáhla teploty $61,54 \text{ }^\circ\text{C}$. Po konci zkoušky bylo provedeno měření odporu vinutí. První odečtená hodnota byla v čase 22 s. Průběh odporu vinutí v čase je zobrazen na Obr. 9.2.



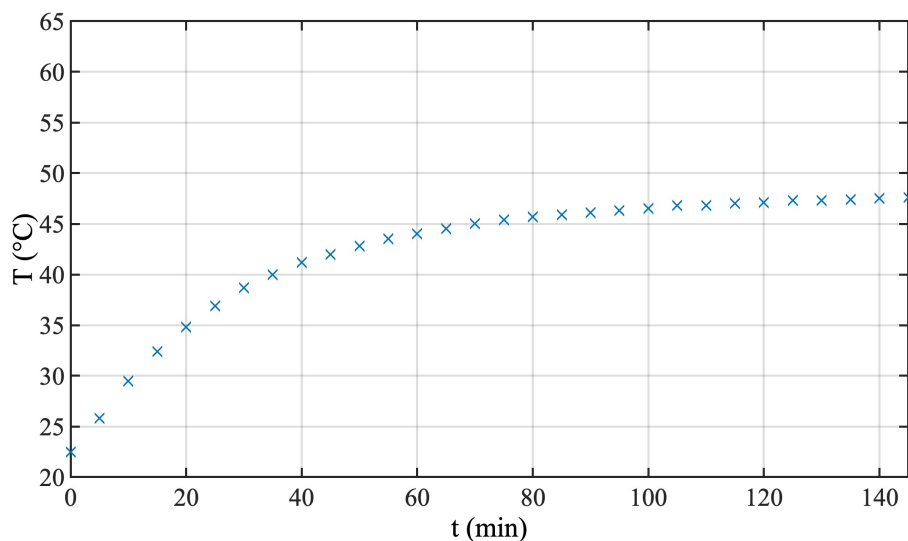
Obr. 9.2: Odpor vinutí po ukončení měření trvalým zatížením

9.1.2 Zkouška lineární modulací

Dynamometr ASD1500 byl napájen frekvenčním měničem M700-034-00100 s lineární změnou otáček tak, aby se zachoval konstantní jmenovitý proud 3,6 A. Parametry rampy vypočtené v kapitole 8.2.1 jsou: $0 \div 12000 \text{ ot/min}$ a $\Delta t = 0,868 \text{ s}$. Po dobu zkoušky byla měřena celková dodaná W_m a vygenerovaná W_g energie výkonovým analyzátozem, přičemž zkouška trvala 2 hod 28 min 58 s. Naměřené hodnoty lze vidět v Tab. 9.2.

Tab. 9.2: Naměřené veličiny při lineární modulaci

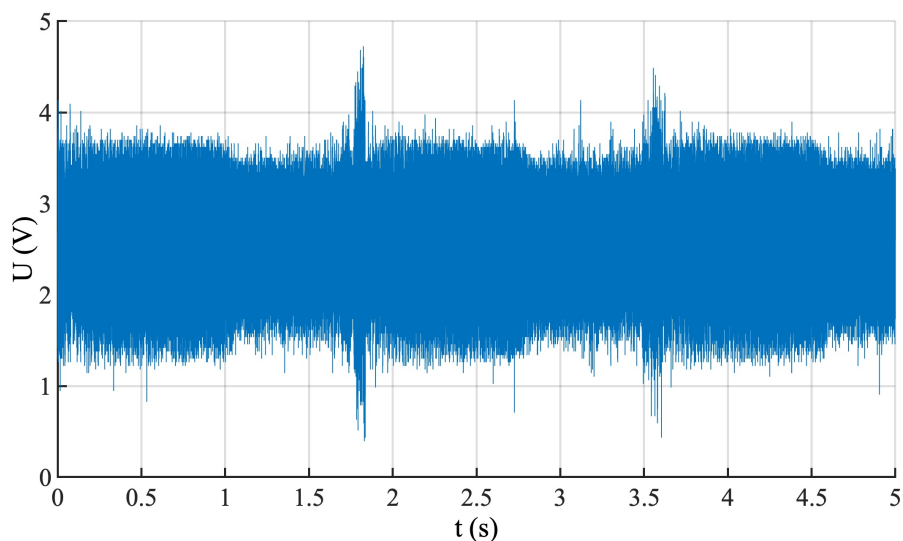
t (h)	W_m (kWh)	W_g (kWh)	I_{ef} (A)
2,4828	1,51241	-1,16938	3,58



Obr. 9.3: Teplota kostry při zkoušce lineárním profilem

Před začátkem měření byl změřen odpor vinutí $R_{\text{vin},0} = 1,969 \Omega$ při teplotě $\theta_0 = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota okolí činila $\theta_{\text{ok,lin}} = 20,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Během zkoušky byla zaznamenávána teplota kostry pomocí teplotního čidla Pt100 a multimetru Keysight 34465A. Naměřená data jsou vykreslená na Obr. 9.3. Ustálená teplota kostry dosahovala $47,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

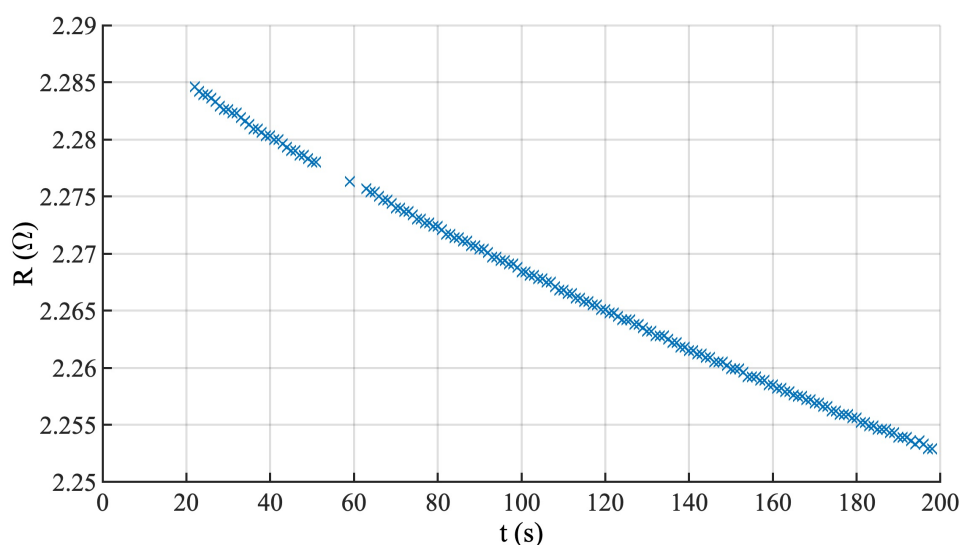
Po dosažení ustáleného oteplení byl proveden záznam průběhu otáček z enkodéru ERO 1480 osciloskopickou kartou PicoScope 2408B. Záznam trval 5 s, aby bylo zajištěno zachycení alespoň jedné celé periody. Následně byl v prostředí PicoScope Software 7 aplikován na tento průběh matematický kanál s výpočtem okamžité frekvence. Výpočet okamžité frekvence ovšem nebyl úspěšný z důvodu zachycování rušení od měniče v podobě vyšších harmonických, jak lze vidět v Obr. 9.4. Také bylo zjištěno, že karta není schopna kvůli omezené paměti zaznamenávat delší průběhu (v řádech sekund) s maximální vzorkovací frekvencí 1 GS/s . Časová základna 5 s dovozovala vzorkování pouze $9,62 \text{ MS/s}$. Jelikož má signál z enkodéru maximální frekvenci $204,8 \text{ kHz}$ je vzorkovací frekvence cca 50-ti násobek maximální frekvence zaznamenávaného signálu. Doporučené vzorkovací frekvence se pohybují mezi 100 až 1000 násobkem.



Obr. 9.4: Záznam signálu A z enkodéru při lineární modulaci

Matematický kanál umožňoval aplikování dolní propusti, což následně utlumilo vyšší harmonické ze signálu. Osciloskopická karta však neumožňovala použití dvou matematických operací (filtr a výpočet okamžité frekvence) najednou. Tudíž tento matematický kanál nebyl využit.

Ihned po ukončení měření byla provedena ochlazovací zkouška pomocí měřící jednotky odporu M433. Naměřené hodnoty jsou vykresleny na Obr. 9.5. První odečet hodnot byl uskutečněn do 30 s od vypnutí napájení stroje, což udává norma [1]. Během záznamu hodnot nastala chyba připojení svorek (mezi 50 a 60 s), proto tyto hodnoty nebyly použity. I přes tuto chybu lze říci, že měření proběhlo úspěšně.



Obr. 9.5: Odpor vinutí po ukončení měření lineární modulace

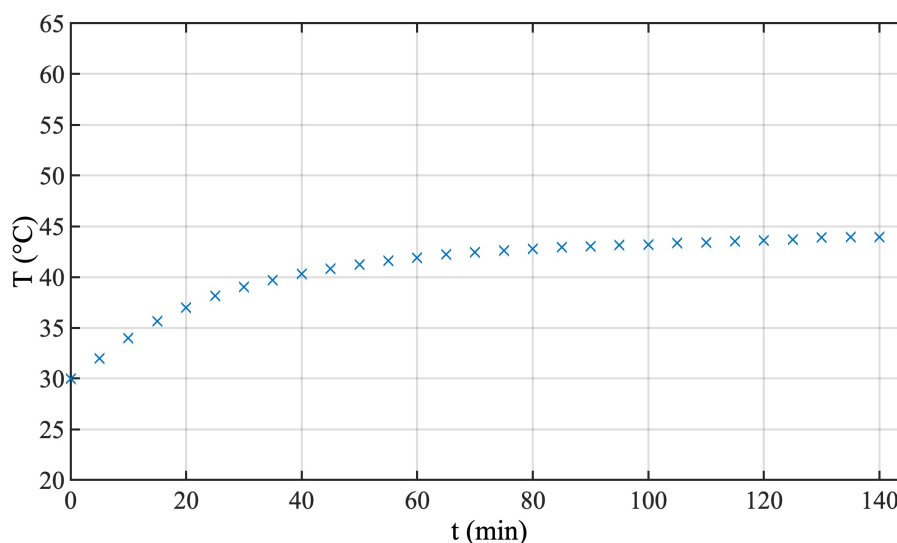
9.1.3 Zkouška sinusovou modulací

Modulace otáček nebyla v tomto případě řízena na konstantní jmenovitý proud, jelikož se předpokládá, že průběh efektivní hodnoty proudu bude, stejně jako průběh momentu, sinusový. Do frekvenčního měniče byl použit sinusový signál s periodou 5,456 s a amplitudou odpovídající 12000 ot/min. Výkonový analyzátor zaznamenával energii dodanou a vygenerovanou. Teplota okolí při zkoušce činila $\theta_{ok,sin} = 21,4$ °C. Hodnoty energií jsou uvedeny v Tab. 9.3.

Tab. 9.3: Naměřené veličiny při sinusové modulaci

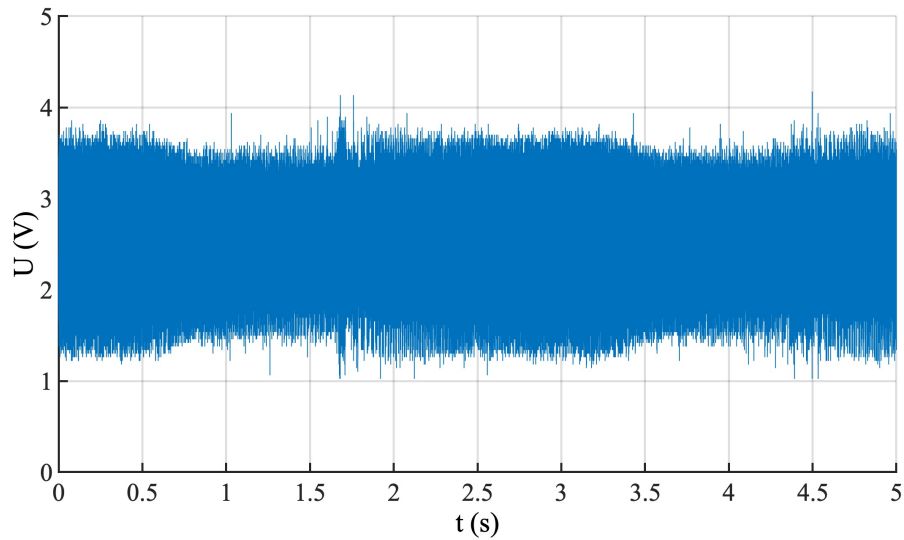
t (h)	W_m (kWh)	W_g (kWh)	I_{ef} (A)
2,4828	1,21673	-0,95607	2,83

Každých 5 min během zkoušky byla zapisována teplota kostry z multimetru Keysight. Zaznamenané teploty jsou vykresleny na Obr. 9.6. Ustálená teplota nabývá hodnoty 43,9 °C. Rozdíl teplot oproti lineární modulaci naznačuje menší výkon a tím menší generování ztrát.



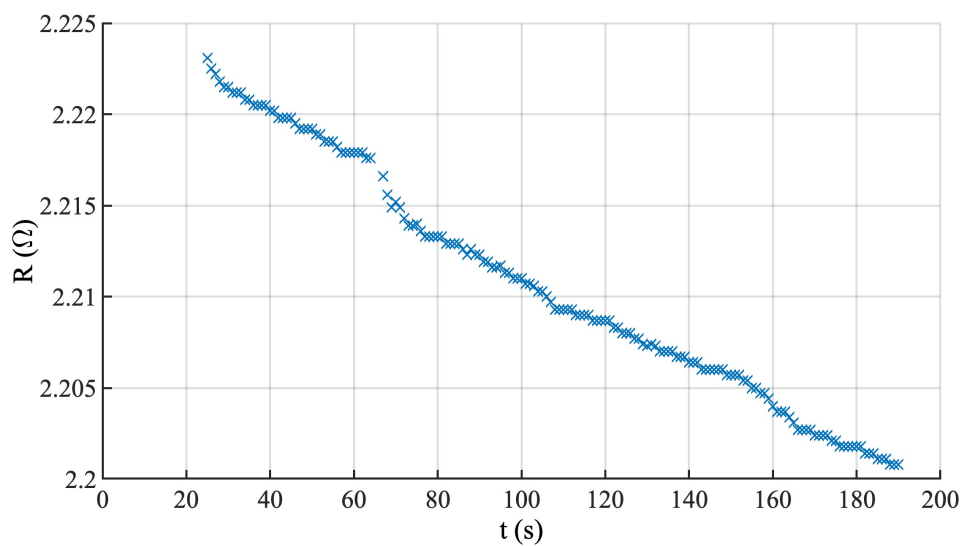
Obr. 9.6: Teplota kostry při zkoušce sinusovým profilem

Po dosažení ustálené hodnoty byl proveden záznam signálu A z enkodéru (viz Obr. 9.7) po dobu 5 s. Jelikož nezávisí na směru otáčení stroje, stačilo zachytit půl-periodu modulovaných otáček, která odpovídá 2,728 s. Jak bylo řečeno při lineární modulaci, karta má nedostatečnou vnitřní paměť a tím omezuje vzorkovací frekvenci na 9,62 MS/s. Také se zde vyskytují vyšší harmonické důsledkem PWM frekvenčního měniče.



Obr. 9.7: Záznam signálu A z enkodéru při sinusové modulaci

Bezprostředně po odpojení napájení stroje byla na svorky stroje připojena měřící jednotka odporu M433 a zaznamenán odpor vinutí v čase. Naměřené hodnoty odporu vinutí jsou zobrazeny na Obr. 9.8. První odečtená hodnota byla v čase 25 s po vypnutí napájení.



Obr. 9.8: Odpor vinutí po ukončení měření sinusové modulace

9.2 Vyhodnocení naměřených dat

9.2.1 Plné zatížení S1

Výpočet ztrát ve standardním zatížení zahrnuje určení odporu vinutí v ustálené teplotě, oteplení vinutí, elektrického příkonu a mechanického výkonu.

Oteplení vinutí

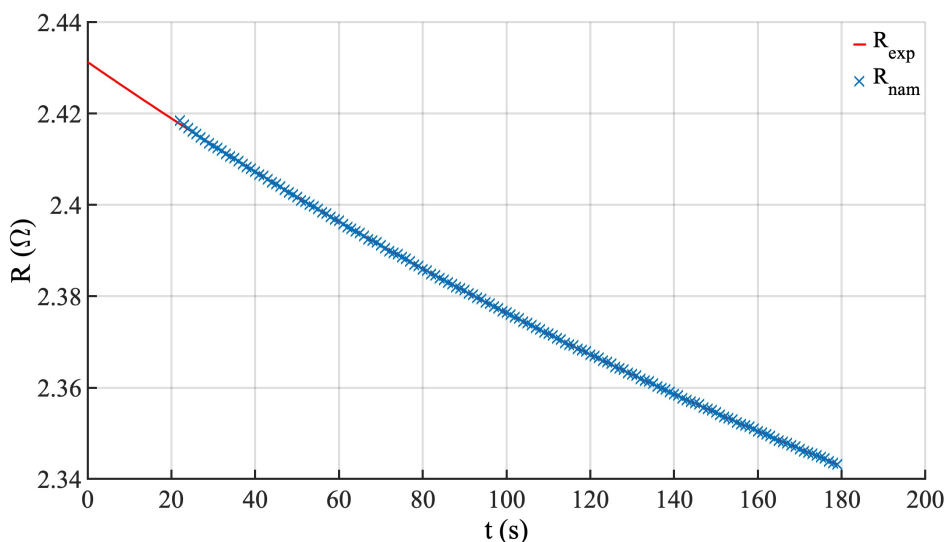
Stanovení odporu vinutí bylo provedeno odporovou metodou popsanou v [1]. Odpor vinutí za studena byl změřen měřicí jednotkou odporu M433 $R_{\text{vin},0} = 1,969 \Omega$ při teplotě $\theta_0 = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$. V prostředí MATLAB byly pomocí funkce *fit* určeny parametry exponenciály s funkčním předpisem $A \cdot e^{-B \cdot t} + C$, kde parametr A značí hodnotu funkce v čase 0 s v případě, že C je rovno 0, B značí sklon křivky a C značí hodnotu asymptoty.

Tab. 9.4: Vypočtené parametry exponenciály v plném zatížení

A (Ω)	B (s^{-1})	C (Ω)
$0,2116 \pm 0,02$	$0,003 \pm 0,0001$	$2,22 \pm 0,002$

Proložení naměřených dat vypočtenou exponenciálou je zobrazeno na Obr. 9.9. Odpor vinutí za ustálené teploty se vypočetl jako součet parametrů A a C

$$R_{\text{vin},S1} = A + C = 0,2116 + 2,22 = 2,436 \Omega. \quad (9.1)$$



Obr. 9.9: Proložení naměřeného odporu vinutí při plném zatížení

Oteplení vinutí bylo vypočteno dle [1]

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{ot,S1} &= \frac{R_{vin,S1} - R_{vin,0}}{R_{vin,0}} \cdot (k + \theta_0) + \theta_0 + \theta_{ok,S1} = \\ &= \frac{2,436 - 1,969}{1,969} \cdot (235 + 22,5) + 22,5 - 23,15 = 60,4 \text{ } ^\circ\text{C}.\end{aligned}\quad (9.2)$$

Výpočet dílčích ztrát

Joulové ztráty ve vinutí byly vypočteny z naměřeného proudu a vypočteného odporu vinutí použitím vztahu (1.5)

$$\Delta P_{j1} = \frac{3}{2} \cdot R_{vin,S1} \cdot I_{ef}^2 = \frac{3}{2} \cdot 2,436 \cdot 3,601^2 = 47,38 \text{ W}.\quad (9.3)$$

Ztráty v železe byly odečteny ze závislosti ztrát naprázdno na napětí. Odpovídají ztrátám naprázdno při jmenovitém napětí bez ztrát joulových naprázdno a ztrát mechanických. Proud naprázdno činil 1,7 A

$$\begin{aligned}\Delta P_{Fe} &= \Delta P_{0,Un} - \frac{3}{2} \cdot R_{vin,S1} \cdot I_0^2 - \Delta P_{mech} = \\ &= 73,2 - \frac{3}{2} \cdot 2,436 \cdot 1,7^2 - 13,14 = 49,5 \text{ W}.\end{aligned}\quad (9.4)$$

Výkon procházející přes vzduchovou mezeru, potřebný k výpočtu joulových ztrát v rotoru, byl vypočten pomocí příkonu

$$P_1 = \frac{W_m}{t} = \frac{4264,43}{2,4828} = 1717,6 \text{ W},\quad (9.5)$$

joulových ztrát ve statoru a ztrát v železe

$$P_\delta = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} = 1717,6 - 47,38 - 49,5 = 1620,7 \text{ W}.\quad (9.6)$$

Joulové ztráty v rotoru byly vypočteny dle vztahu (1.6). Skluz nabýval hodnoty 2,44 %

$$\Delta P_{j2} = P_\delta \cdot s = 1620,7 \cdot \frac{2,44}{100} = 39,55 \text{ W}.\quad (9.7)$$

Dodatečné ztráty byly vypočteny ze ztrát celkových

$$\Sigma \Delta P = P_1 - P_2 = 1717,6 - 1503 = 214,6 \text{ W}\quad (9.8)$$

a ztrát ostatních

$$\begin{aligned}\Delta P_d &= \Sigma \Delta P - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{j2} - \Delta P_{mech} = \\ &= 214,6 - 47,38 - 49,5 - 39,55 - 13,14 = 65,03 \text{ W}.\end{aligned}\quad (9.9)$$

V Tab. 9.5 jsou vypsány všechny veličiny změřené i vypočtené potřebné k porovnání mezi zatěžovacími zkouškami.

Tab. 9.5: Naměřené a vypočtené veličiny v plném zatížení

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
P_1 (W)	1717,6	ΔP_{j1} (W)	47,38
P_2 (W)	1503	ΔP_{j2} (W)	39,55
I_{ef} (A)	3,601	ΔP_{Fe} (W)	49,50
$R_{vin,S1}$ (Ω)	2,436	ΔP_{mech} (W)	13,14
$\Sigma \Delta P$ (W)	214,6	ΔP_d (W)	65,03

9.2.2 Lineární profil

Z naměřených dat během akcelerační metody s lineární modulací otáček byl pro určení ztrát ve stroji vypočten odpor vinutí při ustálené teplotě, oteplení vinutí, elektrický příkon a mechanický výkon v motorickém a generátorickém režimu.

Oteplení vinutí

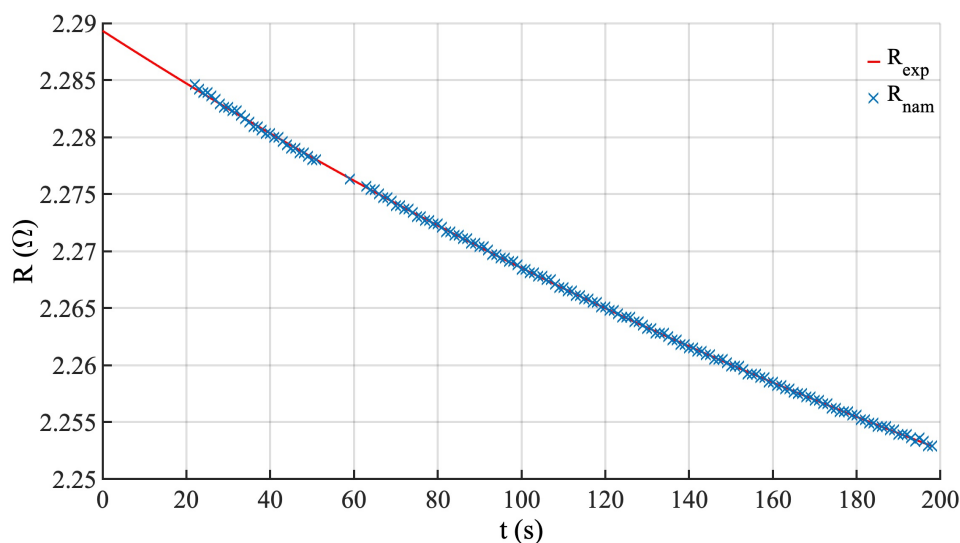
Odpor vinutí při ustálené teplotě byl vypočten pomocí odporové metody (viz Obr. 9.5), kde se naměřené hodnoty proložily exponenciálou, jejíž parametry byly nalezeny funkcí *fit* a jsou uvedeny v Tab. 9.6. Po dosažení ustálené teploty byl bezprostředně po odpojení stroje od zdroje měřen odpor vinutí (viz Obr. 9.5), přičemž byla dodržena podmínka první odečtené hodnoty do 30 s.

Tab. 9.6: Vypočtené parametry exponenciály v lineární modulaci

A (Ω)	B (s^{-1})	C (Ω)
$0,088 \pm 0,002$	$0.002683 \pm 0,0001$	$2,201 \pm 0,002$

Z parametrů exponenciály uvedených v Tab. 9.6 a vykreslené na Obr. 9.10 byl určen odpor vinutí v ustálené teplotě jako součet parametrů A a C

$$R_{vin,lin} = A + C = 0,088 + 2,201 = 2,289 \Omega. \quad (9.10)$$



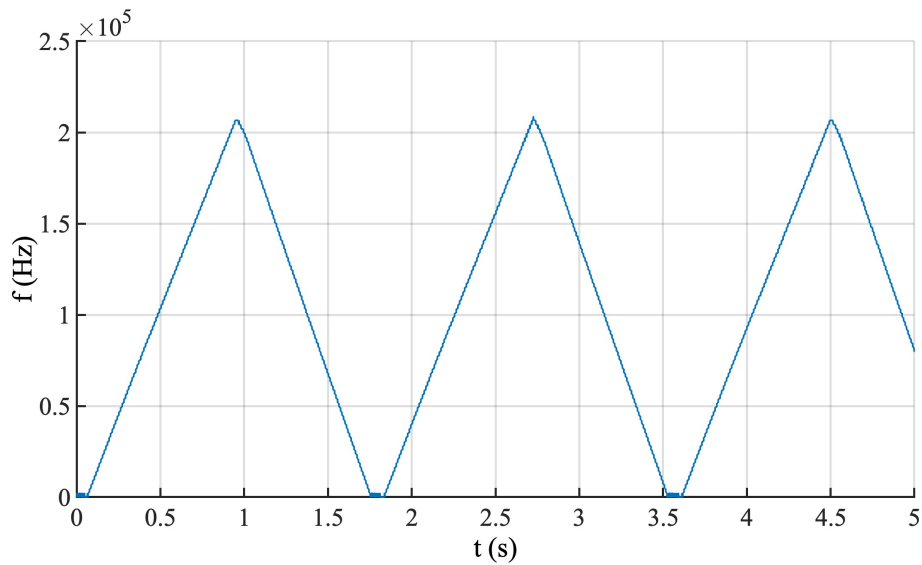
Obr. 9.10: Proložení naměřeného odporu vinutí při lineární modulaci

Oteplení vinutí bylo vypočteno ze vztahu daným normou [1]

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta_{\text{ot,lin}} &= \frac{R_{\text{vin,lin}} - R_{\text{vin,0}}}{R_{\text{vin,0}}} \cdot (k + \theta_0) + \theta_0 + \theta_{\text{ok,lin}} = \\
 &= \frac{2,289 - 1,969}{1,969} \cdot (235 + 22,5) + 22,5 - 20,3 = 44,05 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}
 \tag{9.11}$$

Určení výkonu na hřídeli

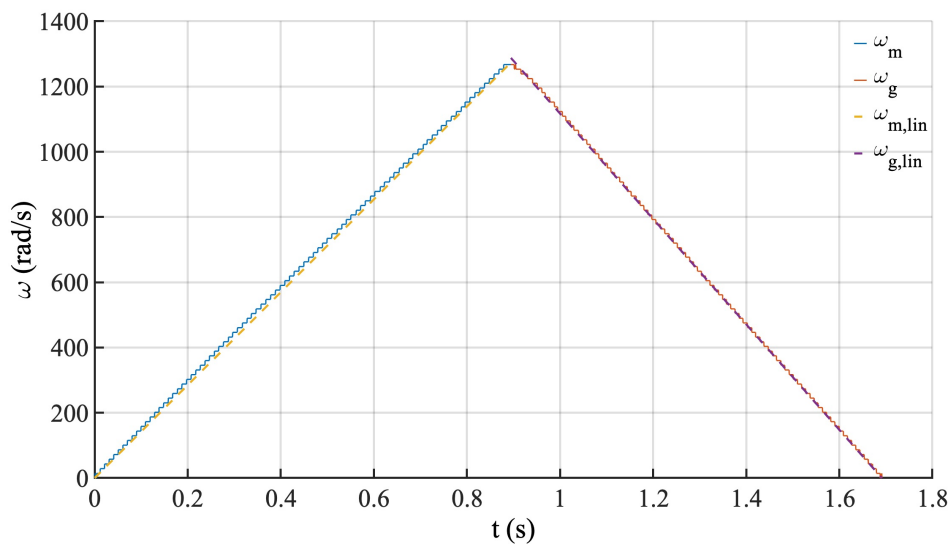
Osciloskopická karta nebyla schopna v praxi určit okamžitou frekvenci signálu z důvodu malé vnitřní paměti a zachytávání rušení od frekvenčního měniče. Proto byla na zaznamenaný signál z enkodéru v MATLAB použita funkce *spectrogram*, která určila zastoupení jednotlivých frekvencí v jednotlivých časových intervalech. Následně byly vyextrahovány frekvence s nejvyšší intenzitou a vykresleny do Obr. 9.11.



Obr. 9.11: Frekvence signálu A v čase při lineární modulaci

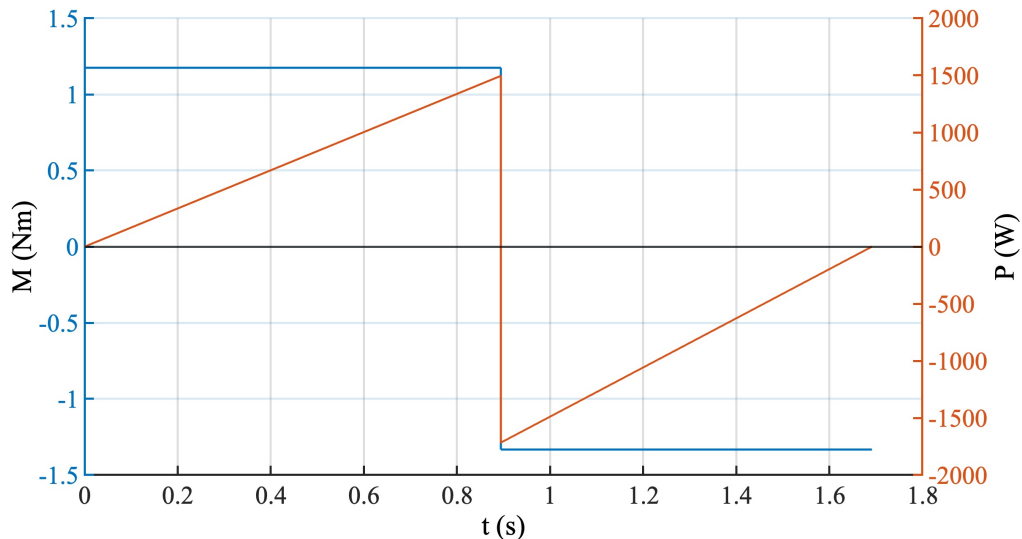
Přepočet frekvence signálu A na mechanickou úhlovou frekvenci byl proveden podle vztahu (9.12). Následně pomocí funkce *findpeaks* byla vyseparována jedna perioda průběhu a rozdělena na náběžnou hranu (motorický režim) a sestupnou hranu (generátorický režim). Pro každý režim zvlášť byla provedena lineární regrese funkcí *fit*. Proložení je zobrazeno na Obr. 9.12.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f}{1024} \quad (9.12)$$



Obr. 9.12: Proložení úhlové frekvence při lineární modulaci

Moment na hřídeli byl následně vypočten z pohybové rovnice (1.3) a mechanický výkon dle vztahu (1.4) použitím lineárního proložení úhlové frekvence. Průběh vypočteného momentu a výkonu je vidět na Obr. 9.13. V Tab. 9.7 jsou vypsány hodnoty motorického momentu M_m , generátorického momentu M_g , střední hodnoty mechanického výkonu $P_{m, \text{str}}$, střední hodnoty mechanického příkonu $P_{g, \text{str}}$, doby motorického režimu t_m a doby generátorického režimu t_g .



Obr. 9.13: Průběh momentu a výkonu při lineární modulaci

Tab. 9.7: Vypočtené parametry na hřídeli v lineární modulaci

Motorický režim		Generátorický režim	
M_m (Nm)	1,175	M_g (Nm)	-1,333
$P_{m, \text{str}}$ (kW)	747,95	$P_{g, \text{str}}$ (kW)	-858,09
t_m (s)	0,8944	t_g (s)	0,7972

Výpočet dílčích ztrát

Ztráty zde představují střední hodnotu ztrát během celého měření. Nejedná se o okamžité ztráty v jednom cyklu či v jednom časovém bodě. Joulovy ztráty ve statoru byly vypočteny z naměřeného proudu a vypočteného odporu vinutí použitím vztahu (1.5)

$$\Delta P_{j1, \text{lin}} = \frac{3}{2} \cdot R_{\text{vin}, \text{lin}} \cdot I_{\text{ef}}^2 = \frac{3}{2} \cdot 2,289 \cdot 3,58^2 = 44,01 \text{ W.} \quad (9.13)$$

Ztráty v železe nelze ze změřených parametrů při tomto zatěžování vypočíst. Ztráty byly určeny díky vztahu (3.4), který byl odvozen pracovníky AVL Moravia s. r. o.

$$\Delta P_{\text{Fe,lin}} = 41 \% \Delta P_{\text{Fe}} = 0,41 \cdot 49,5 = 20,29 \text{ W.} \quad (9.14)$$

Celkové ztráty byly odvozeny z rozdílů energií

$$\Sigma \Delta P_{\text{lin}} = \frac{W_{\text{m}} + W_{\text{g}}}{t} = \frac{1512,41 - 1169,38}{2,4828} = 138,2 \text{ W.} \quad (9.15)$$

Z celkových ztrát byl odvozen příkon stroje

$$P_{1,\text{lin}} = P_{\text{m,str}} + \Sigma \Delta P_{\text{lin}} = 747,95 + 138,2 = 886,15 \text{ W.} \quad (9.16)$$

Následně byly vypočteny joulové ztráty v rotoru. Jelikož se skluz měnil lineárně, je vzata předpokládaná poloviční hodnota

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{j2,lin}} &= (P_{1,\text{lin}} - \Delta P_{\text{j1,lin}} - \Delta P_{\text{Fe,lin}}) \cdot \frac{s}{2} = \\ &= (886,15 - 44,01 - 20,29) \cdot \frac{2,44}{2 \cdot 100} = 10,02 \text{ W.} \end{aligned} \quad (9.17)$$

Mechanické ztráty byly vzaty přímo z předpokladu, protože jejich přesné určení by vyžadovalo složitější měření. Zkoušený stroj má cizí ventilaci, tudíž se uvažují pouze ztráty třením dané vztahem (3.6)

$$\Delta P_{\text{mech,lin}} = 50 \% \Delta P_{\text{mech}} = 0,5 \cdot 13,14 = 6,57 \text{ W.} \quad (9.18)$$

Dodatečné ztráty byly vypočtené jako odečet ostatních ztrát od celkových

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{d,lin}} &= \Sigma \Delta P_{\text{lin}} - \Delta P_{\text{j1,lin}} - \Delta P_{\text{j2,lin}} - \Delta P_{\text{Fe,lin}} - \Delta P_{\text{mech,lin}} = \\ &= 138,2 - 44,01 - 10,02 - 20,29 - 6,57 = 57,3 \text{ W.} \end{aligned} \quad (9.19)$$

Všechny naměřené a vypočtené veličiny potřebné k porovnání mezi zatěžovacími metodami jsou uvedeny v Tab. 9.8.

Tab. 9.8: Vypočtené veličiny v lineární modulaci

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$P_{1,\text{lin}}$ (W)	886,15	$\Delta P_{\text{j1,lin}}$ (W)	44,01
$P_{\text{m,lin}}$ (W)	747,95	$\Delta P_{\text{j2,lin}}$ (W)	10,02
$P_{\text{g,lin}}$ (W)	-858,09	$\Delta P_{\text{Fe,lin}}$ (W)	20,29
$R_{\text{vin,lin}}$ (Ω)	2,289	$\Delta P_{\text{mech,lin}}$ (W)	6,57
$t_{\text{m,lin}}$ (s)	0,8944	$\Delta P_{\text{d,lin}}$ (W)	57,3
$t_{\text{g,lin}}$ (s)	0,7972	$\Sigma \Delta P_{\text{lin}}$ (W)	138,2

9.2.3 Sinusový profil

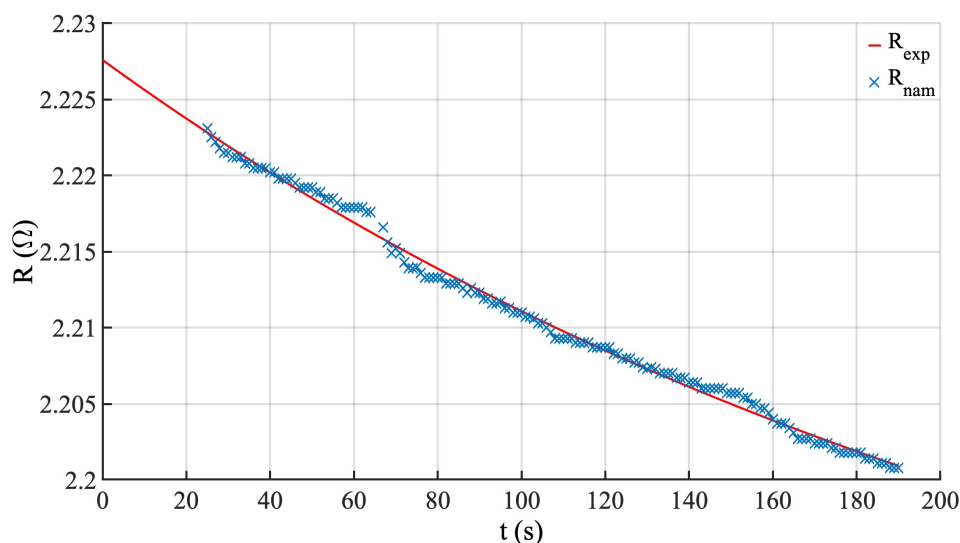
Určení ztrát ve stroji během akcelerační metody se sinusovou modulací otáček obsahovalo výpočet odporu vinutí za ustálené teploty, oteplení vinutí, elektrický příkon a mechanický výkon v motorickém a generátorickém režimu.

Oteplení vinutí

Měření a následný výpočet odporu vinutí při ustálené teplotě bylo provedeno odporovou metodou popsanou v [1]. Okamžitě po odpojení stroje od zdroje byl měřen odpor vinutí (viz Obr. 9.8). Stejně jako u určení odporu u lineárního profilu byly naměřené hodnoty proloženy exponenciálou, jejíž parametry jsou vypočtené v Tab. 9.9.

Tab. 9.9: Vypočtené parametry exponenciály v lineární modulaci

$A (\Omega)$	$B (s^{-1})$	$C (\Omega)$
$0.05021 \pm 0,004$	$0.003984 \pm 0,0005$	$2,177 \pm 0,004$



Obr. 9.14: Proložení naměřeného odporu vinutí při sinusové modulaci

Proložení naměřených dat vypočtenou exponenciálou je zobrazeno na Obr. 9.14. Odpor vinutí v ustáleném oteplení se vypočetl jako součet parametrů A a C

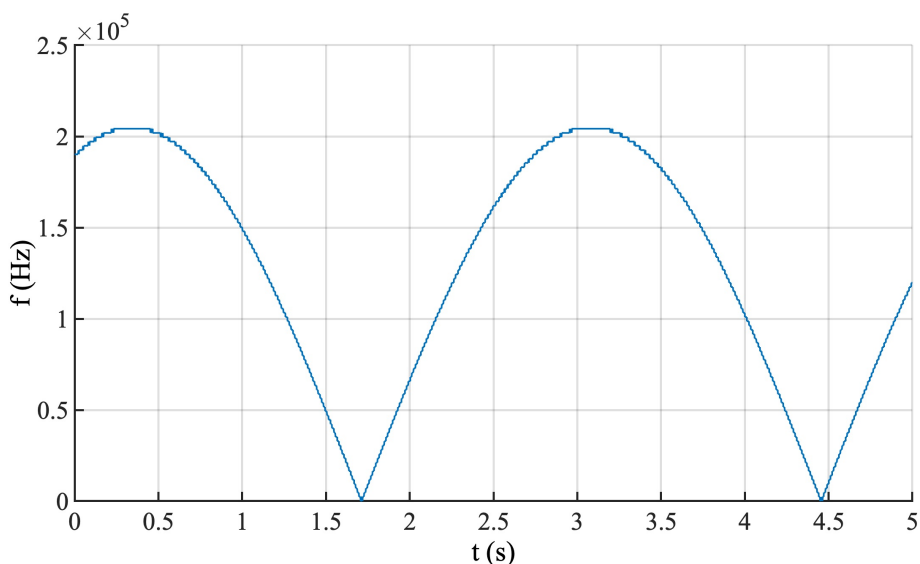
$$R_{\text{vin,sin}} = A + C = 0,0502 + 2,177 = 2,227 \Omega, \quad (9.20)$$

oteplení vinutí bylo vypočteno dle [1]

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{ot,sin} &= \frac{R_{vin,sin} - R_{vin,0}}{R_{vin,0}} \cdot (k + \theta_0) + \theta_0 + \theta_{ok,sin} = \\ &= \frac{2,227 - 1,969}{1,969} \cdot (235 + 22,5) + 22,5 - 21,4 = 34,8 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (9.21)$$

Určení výkonu na hřídeli

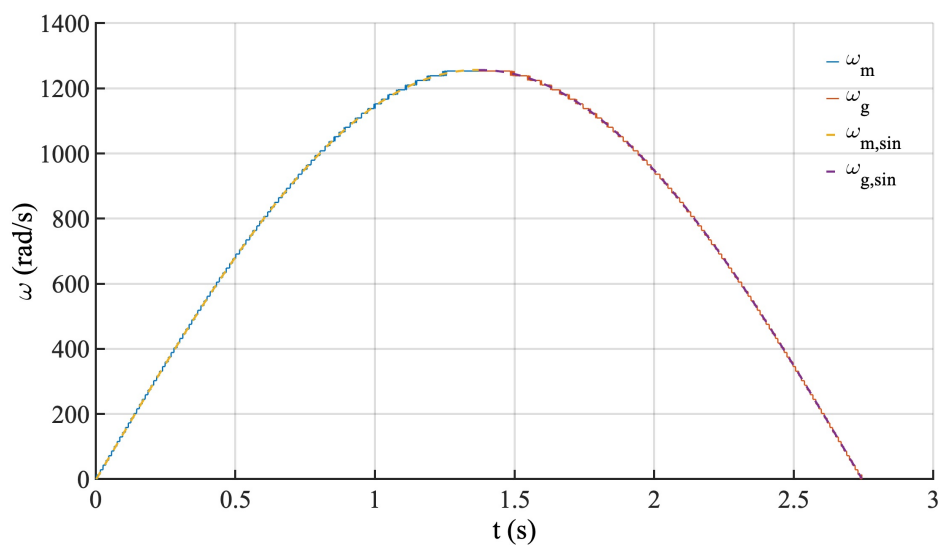
Stejně jako u výpočtu výkonu na hřídeli při lineární modulaci byla i zde použita funkce *spectrogram*, která určila intenzitu jednotlivých frekvencí v čase. Separace frekvencí s největší intenzitou v čase je zobrazena na Obr. 9.15. Jelikož byl zaznamenán pouze jeden signál otáček z enkodéru není možné určit jakým směrem se stroj v daný moment točil. To však není pro určení výkonů v motorickém a generátorickém režimu podstatné.



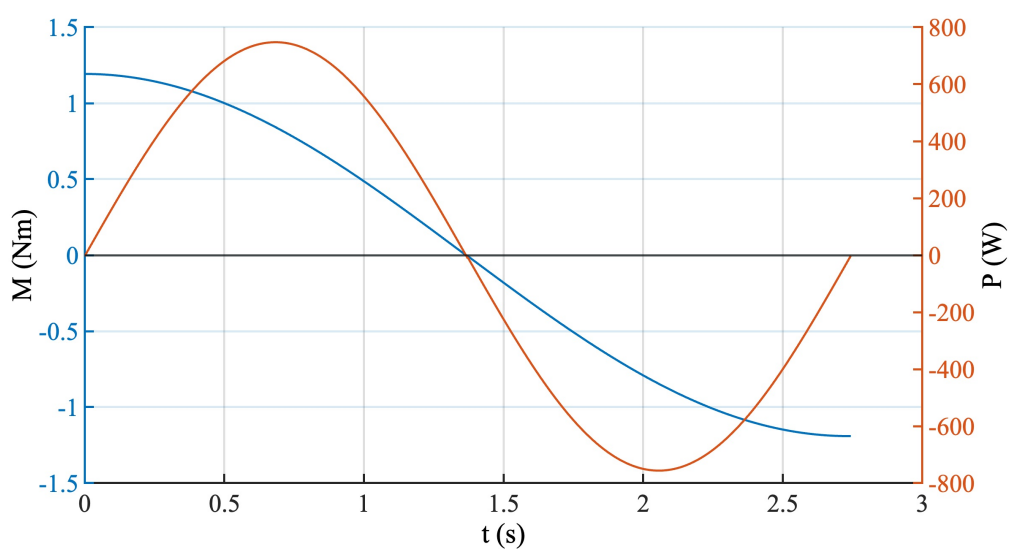
Obr. 9.15: Frekvence signálu A v čase při sinusové modulaci

Přepočtení frekvence signálu A na mechanickou úhlovou frekvenci bylo provedeno podle vztahu (9.12). Použitím funkce *findpeaks* byla separována jedna půl-perioda otáček a rozdělena na motorickou a generátorickou část. Následně funkcí *fit* byly obě části proloženy sinusovou funkcí a zobrazeny na Obr. 9.16.

Díky proložení naměřených dat ideální sinusovou funkcí byl vypočten moment podle vztahu (1.3) a výkon ze vztahu (1.4). Oba vypočtené průběhy za půl-periody otáček jsou zobrazeny na Obr. 9.17. V Tab. 9.10 jsou uvedeny důležité parametry těchto průběhů.



Obr. 9.16: Proložení úhlové frekvence při sinusové modulaci



Obr. 9.17: Průběh momentu a výkonu při sinusové modulaci

Tab. 9.10: Vypočtené parametry na hřídeli v sinusové modulaci

Motorický režim		Generátorický režim	
$M_{m,max}$ (Nm)	1,193	$M_{g,max}$ (Nm)	-1,190
$P_{m,str}$ (kW)	475,78	$P_{g,str}$ (kW)	-481,32
t_m (s)	1,3718	t_g (s)	1,3719

Výpočet dílčích ztrát

Joulové ztráty ve statoru byly vypočteny z naměřeného proudu a vypočteného odporu vinutí použitím vztahu (1.5)

$$\Delta P_{j1,\sin} = \frac{3}{2} \cdot R_{\text{vin},\sin} \cdot I_{\text{ef}}^2 = \frac{3}{2} \cdot 2,227 \cdot 2,83^2 = 26,75 \text{ W}. \quad (9.22)$$

Ztráty v železe stejně jako u lineární modulační nelze ze změřených parametrů vypočíst. Ztráty byly určeny díky vztahu (3.4), který byl odvozen pracovníky AVL Moravia s. r. o.

$$\Delta P_{\text{Fe},\sin} = 41 \% \Delta P_{\text{Fe}} = 0,41 \cdot 49,5 = 20,29 \text{ W}. \quad (9.23)$$

Celkové ztráty byly odvozeny z rozdílů energií

$$\Sigma \Delta P_{\text{sin}} = \frac{W_m + W_g}{t} = \frac{1216,73 - 956,07}{2,4828} = 105,0 \text{ W}. \quad (9.24)$$

Z celkových ztrát byl následně odvozen příkon stroje

$$P_{1,\sin} = P_{m,\text{str}} + \Sigma \Delta P_{\text{sin}} = 475,78 + 105,0 = 580,78 \text{ W}. \quad (9.25)$$

Joulové ztráty v rotoru byly určeny jako v lineární modulaci

$$\begin{aligned} \Delta P_{j2,\sin} &= (P_{1,\sin} - \Delta P_{j1,\sin} - \Delta P_{\text{Fe},\sin}) \cdot \frac{s}{\sqrt{2}} = \\ &= (580,78 - 26,75 - 20,29) \cdot \frac{2,44}{\sqrt{2} \cdot 100} = 9,21 \text{ W}. \end{aligned} \quad (9.26)$$

Mechanické ztráty byly taktéž převzaty z předpokladu dle (3.14)

$$\Delta P_{\text{mech},\sin} = 70,7 \% \Delta P_{\text{mech}} = 0,707 \cdot 13,14 = 9,29 \text{ W}. \quad (9.27)$$

Dodatečné ztráty byly určeny jako zbytek do celkových ztrát

$$\begin{aligned} \Delta P_{d,\sin} &= \Sigma \Delta P_{\text{sin}} - \Delta P_{j1,\sin} - \Delta P_{j2,\sin} - \Delta P_{\text{Fe},\sin} - \Delta P_{\text{mech},\sin} = \\ &= 105,0 - 26,75 - 9,21 - 20,29 - 9,29 = 39,46 \text{ W}. \end{aligned} \quad (9.28)$$

Všechny naměřené a vypočtené veličiny při sinusové modulaci potřebné k porovnání mezi zatěžovacími metodami jsou uvedeny v Tab. 9.11.

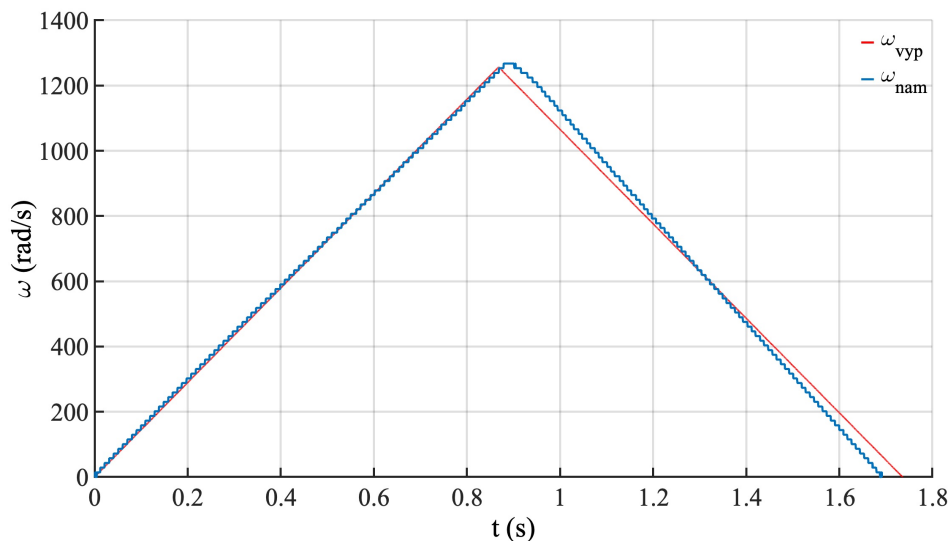
Tab. 9.11: Vypočtené veličiny v sinusové modulaci

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$P_{l,\sin}$ (W)	580,78	$\Delta P_{j1,\sin}$ (W)	26,75
$P_{m,\sin}$ (W)	475,78	$\Delta P_{j2,\sin}$ (W)	9,21
$P_{g,\sin}$ (W)	-481,32	$\Delta P_{Fe,\sin}$ (W)	20,29
$R_{vin,\sin}$ (Ω)	2,227	$\Delta P_{mech,\sin}$ (W)	9,29
$t_{m,\sin}$ (s)	1,3718	$\Delta P_{d,\sin}$ (W)	39,46
$t_{g,\sin}$ (s)	1,3719	$\Sigma \Delta P_{\sin}$ (W)	105,0

9.3 Srovnání naměřených a vypočtených dat

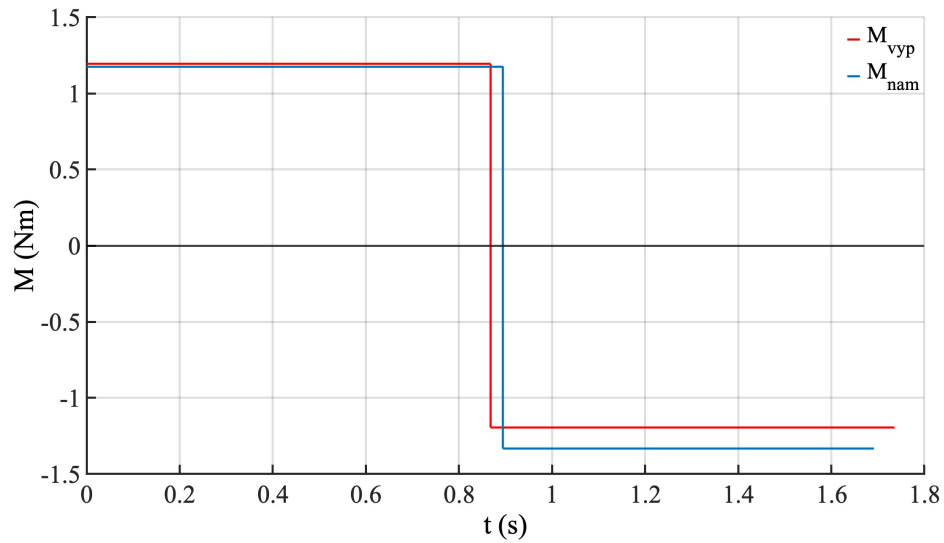
9.3.1 Výkon na hřídeli

V kapitole 8 byl proveden předpoklad průběhů otáček, momentu a výkonu zkoušeného stroje. V motorickém režimu byl předpokládán a vypočtený moment a výkon téměř totožný. Doba vzestupné hrany otáček byla trochu větší z důvodu přechodných jevů, které nejsou při lineární modulaci tak plynulé jako u sinusové modulace. Větší odchylka se vyskytla v generátorickém režimu. To bylo způsobeno řízením frekvenčního měniče, který zachovával konstantní proud. Aby stroj dokázal generovat jmenovitý napájecí proud, tak byla zkrácena doba sestupné hrany otáček, čímž se dle pohybové rovnice zvýšil moment a tím také mechanický příkon. Zvýšením momentu se tak pokryly ztráty ve stroji a zachoval se konstantní proud.

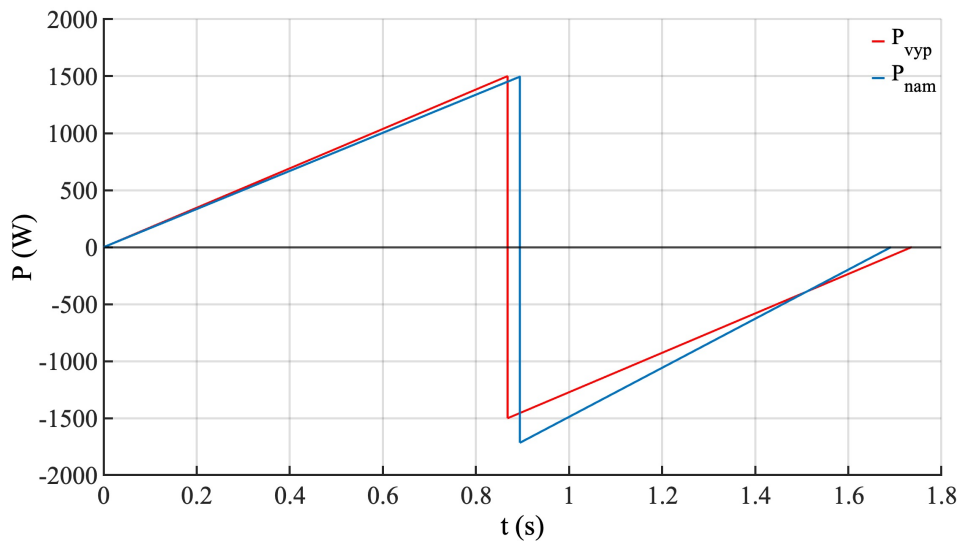


Obr. 9.18: Vypočtený a naměřený průběh úhlové frekvence v lineární modulaci

Na Obr. 9.18, 9.19 a 9.20 je zobrazené porovnání vypočtených a naměřených průběhů úhlové frekvence, momentu a výkonu na hřídeli stroje při lineární modulaci.



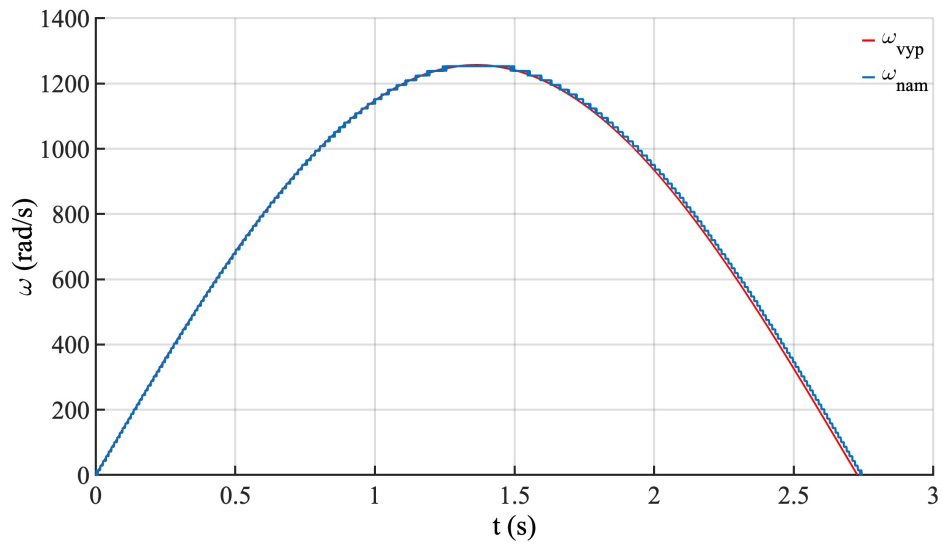
Obr. 9.19: Vypočtený a naměřený průběh momentu v lineární modulaci



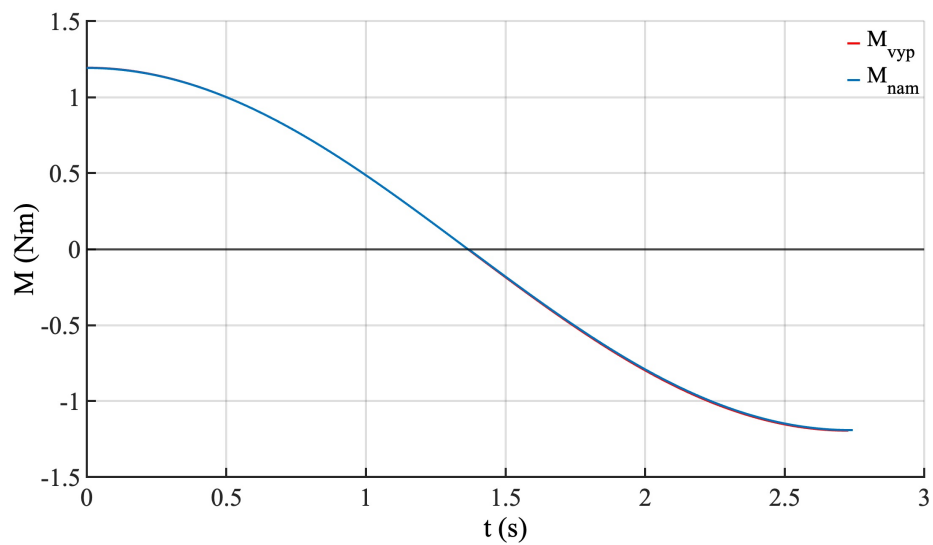
Obr. 9.20: Vypočtený a naměřený průběh výkonu v lineární modulaci

Výsledná data ze sinusové modulace odpovídají vypočteným průběhům ve všech ohledech. Změna otáček byla řízena pomocí externího signálu, tudíž nedocházelo ke zkračování doby generátorického režimu jako u lineární modulace. To také způsobilo snížení efektivní hodnoty proudu za periodu cyklu a tím i menší joulové ztráty ve statoru. Na

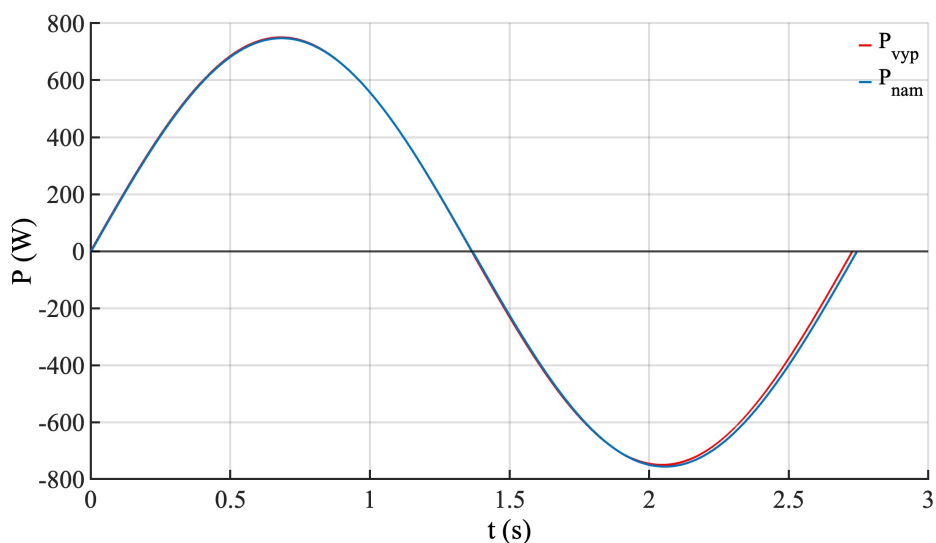
Obr. 9.21, 9.22 a 9.23 je zobrazené porovnání vypočtených a naměřených průběhů během jedné půl-periody otáček úhlové frekvence, momentu a výkonu na hřídeli stroje při sinusové modulaci.



Obr. 9.21: Vypočtený a naměřený průběh úhlové frekvence v sinusové modulaci



Obr. 9.22: Vypočtený a naměřený průběh momentu v sinusové modulaci



Obr. 9.23: Vypočtený a naměřený průběh výkonu v sinusové modulaci

9.3.2 Celkové ztráty

Ztráty předpokládané byly určeny ze ztrát při plném zatížení a procentuálních poměrů uvedených v Tab. 3.1. Joulové ztráty ve satorovém vinutí se při lineární modulaci téměř shodují s předpokladem díky zachování konstantního proudu. Rozdíl oproti předpokladu plyne ze zanedbání závislosti odporu vinutí na teplotě, který se s rostoucí teplotou zvyšuje. U sinusového profilu je tomu taktéž, avšak kvůli nižší hodnotě proudu v generátorickém režimu je pokles ztrát výraznější.

I když bylo nutno uvažovat poloviční hodnotu skluzu z předpokladu, jsou Joulové ztráty v rotoru v lineárním režimu rovny s předpokládanými. U sinusové modulace je vidět pokles ztrát. K určení přesné hodnoty by bylo zapotřebí záznamu skluzu alespoň v jedné periodě otáček.

Ztráty v železe a ztráty mechanické odpovídají předpokladům, protože je nebylo pomocí dosavadních měření možné vypočíst. Dodatečné ztráty se především odvíjí ze ztrát celkových. Ty byly s lineárním profilem vyšší než předpokládané. To je nejspíše způsobeno nemožností přesnějšího určení mechanických ztrát a ztrát v železe nebo momentovými rázy a celkovou neplynulostí toku energie ve stroji.

Tab. 9.12: Porovnání předpokládaných a vypočtených ztrát

Ztráty	Plné zatížení	Lineární profil		Sinusový profil	
		Předpoklad	Výpočet	Předpoklad	Výpočet
ΔP_{j1} (W)	47,38	47,38	44,01	33,50	26,75
ΔP_{j2} (W)	39,55	9,88	10,02	8,90	9,21
ΔP_{Fe} (W)	49,50	20,29	20,29	20,29	20,29
ΔP_{mech} (W)	13,14	6,57	6,57	8,89	9,29
ΔP_d (W)	65,30	23,00	57,3	27,32	39,46
$\Sigma \Delta P$ (W)	214,6	107,13	138,2	99,30	105,0
$\Sigma \Delta P$ (%)	100	50	64	46	49

Celkové ztráty aplikací akcelerační metody dosahují při lineární modulaci otáček **64 %** a při sinusové modulaci otáček **49 %**. Stroj byl částečně zatížen oběma metodami modulace otáček. Použitím lineárního profilu se docílilo větší generace ztrát a tím také většího oteplení než u sinusového profilu.

Veškeré naměřené průběhy a data se i přes drobné odchylky shodují s předpoklady uvedenými v kapitolách 3 a 8. Oteplení strojů jak při plném zatížení, tak při zatěžování akcelerační metodou, odpovídá naměřeným ztrátám v jednotlivých zkouškách. Akcelerační metoda je vhodná především k zaběhnutí, oživení a stabilizaci nově zkonstruovaných vysokomomentových či vysokorychlostních strojů. S tím spojené ověření mechanické a elektrické funkčnosti bez použití přídatných zařízení (dynamometr, mechanická spojka atd.).

10 Posouzení rizik a nejistot metody

Měření jakékoliv veličiny je postihnuo určitou odchylkou. Každý měřicí přístroj neuvede pokaždé stejnou hodnotu, i když jsou zachovány stejné podmínky. Aby se tato odchylka co nejvíce zredukovala je nutné zvolit vhodný přístroj a měřicí metodu dané veličiny.

10.1 Určení momentu setrvačnosti

Klíčem k přesnému výpočtu parametrů průběhu modulace otáček je znalost momentu setrvačnosti stroje. Tuto hodnotu lze obvykle najít v datovém listu zkoušeného stroje, která je vypočtená pomocí různých softwarů. Při konstrukci jakékoliv části stroje však nejsou vždy zachovány výrobní tolerance a parametry použitého materiálu taktéž nemusí souhlasit s předpokládanými parametry. Proto je doporučeno určit moment setrvačnosti pomocí zkoušky naprázdno, díky které se zjistí také mechanické a ztráty v železe, a dobřehové zkoušky nebo metodou přídavného setrvačníku.

10.2 Volba rychlostního profilu

Zatížení akcelerační metodou je možné jakýmkoliv rychlostním profilem. Nejvhodnější je však lineární a sinusová modulace, jelikož u ostatních (kvadratická, exponenciální atd.) se můžou projevat větší momentové rázy a přechodné jevy, které by deformovaly výsledný rychlostní profil otáček. Lineární modulace je doporučena pro stroje s malým momentem setrvačnosti. Pro ověření chodu v obou směrech je možné, stejně jako u sinusového profilu, měnit rychlost otáčení v intervalu $\pm 100\% n_n$. Většího zatížení lineárním profilem, ovšem pouze v jednom směru otáčení, je možné docílit zmenšením rozsahu otáček (např. $50 \div 100\% n_n$), čímž se zvýší střední hodnota úhlové frekvence a tím i výkon na hřídeli.

Sinusový profil je doporučen pro stroje vysokomomentové, kvůli absenci momentových rázů, které by jej mohli poškodit. Také zajišťuje plynulejší přechody mezi motorickým a generátorickým režimem. Nevýhodou této modulace je nemožnost zvýšení zatížení stroje jako u lineárního profilu. Střední složka sinusového profilu deformuje průběh výkonu na hřídeli, jak je uvedeno na Obr. 2.5.

10.3 Měření otáček

Pro výpočet výkonu na hřídeli v průběhu zkoušky akcelerační metodou je zásadní přesné snímání a zapisování otáček stroje. Speciální stroje jsou většinou vybaveny resolverem, enkodérem či jiným snímačem otáček sloužící ke zpětnovazebnímu řízení. Čidlo otáček

musí mít dostatečně velkou vzorkovací frekvenci. Stačí zapisovat pouze jeden signál z čidla otáček, jelikož při dalším postupu nezáleží na směru otáčení stroje.

Určení okamžité frekvence lze mnoha způsoby. Při použití enkodéru je možné využít osciloskopickou kartu s matematickými kanály, avšak karta musí mít dostatečné rozlišení a vnitřní paměť. Výhodnější je zapsat signál klasickým osciloskopem a následně provést analýzu signálu v jakémkoliv výpočtovém programu (MATLAB, Python, atd.), stejně tak v případě použití resolveru.

10.4 Nastavení frekvenčního měniče

Modulace otáček, kterou zajišťuje frekvenční měnič, je nutné nastavit dle parametrů zkoušeného stroje. Při lineární modulaci s řízením na konstantní proud není zachován sklon otáček v generátorickém režimu, což způsobuje lehké přetížení. Preferuje se řízení pomocí externího signálu. Většina průmyslových frekvenčních měničů nemá funkce na definici průběhu otáček. K tomu lze využít externího zdroje, jako byl v tomto případě modul SI-Application, řídicí systém SIMATIC či jiné PLC.

11 Metodické pokyny pro akcelerační zatěžovací metodu

11.1 Postup aplikace metody

1. **Seznámení se se zkoušeným strojem** - parametry stroje jsou známy ze štítku či datového listu. Je nutné vědět tyto parametry: jmenovitý výkon, jmenovitý moment a jmenovité otáčky.
2. **Určení momentu setrvačnosti** - moment setrvačnosti může být uveden v datovém listu. Jelikož je pro tuto metodu zapotřebí znát co nejpřesnější hodnotu, doporučuje se jej vypočítat použitím metody uvedené v kapitole 2.1 či jiné.
3. **Zvolení rychlostního profilu** - lineární profil je vhodný pro menší stroje (většinou vysokorychlostní). Je možné zvolit menší interval otáček pro zvýšení zatížení stroje. Sinusový profil se volí v případě zkoušení vysokomomentového stroje nebo při zatěžování více strojů zároveň, aby byl zajištěn plynulý tok energie v soustavě.
4. **Výpočet parametrů rychlostního profilu** - parametry se určí v závislosti na zvoleném profilu otáček. Postup výpočtu je uveden v kapitole 2.2.
5. **Zkušební pracoviště** - komponenty a zapojení uvedené v kapitole 4.1 závisí na mechanických a elektrických parametrech zkoušeného stroje. V případě zkoušení jednoho stroje je nutné zajistit odvádění generované energie. Není zapotřebí výkonového analyzátoru, ten byl využit pouze pro ověření celkových ztrát ve stroji.
6. **Nastavení frekvenčního měniče** - ke správnému řízení otáček je zapotřebí, mimo jiné, zajistit externí signál, ze kterého bude měnič brát okamžitou požadovanou hodnotu otáček. Lze využít vnitřní funkce, pokud je toho měnič schopen, či jakéhokoliv PLC.
7. **Zápis dat** - během zkoušky je zapisována teplota kostry či jiné části stroje. Po dosažení ustáleného oteplení se zapíše data otáček. Je doporučen časový úsek dvou period průběhu otáček, aby bylo zajištěno zapsání alespoň jedné periody v kuse a vzorkovací frekvence 1000x větší než maximální frekvence snímaného signálu. Zapsáním vícero časových oken se může zajistit přesnější výpočet výkonu na hřídeli, není to však nutné.
8. **Zpracování dat** - pokud při zápisu dat není rovnou určený průběh okamžité frekvence (např. použitím matematického kanálu karty PicoScope), lze jej určit v různých výpočtových programech (např. MATLAB s funkcí *spectrogram*). Protože není vhodné derivovat diskretní signál, je následně profil otáček rozdělen na motorický a generátorický režim a provede se proložení vhodnou funkcí, díky které se následně vypočte moment a výkon na hřídeli.
9. **Vyhodnocení dat** - z vypočtených průběhů momentu a výkonu lze usoudit, zda-li

stroj dosáhl předpokládaných mechanických hodnot. Oteplovací křivku a vypočtené průběhy momentu a výkonu je možné předat zpět výpočetním analytikům, kteří určí ustálenou teplotu při plném zatížení. Tato hodnota se následně porovná s maximálním dovoleným oteplením stroje.

11.2 Praktický návrh rychlostního profilu

V současnosti chce firma AVL Moravia s. r. o. zaběhnout a ověřit parametry jednoho vysokomomentového stroje. Jelikož nedisponují dostatečně výkonným dynamometrem, rozhodli se pro využití akcelerační metody. V této části je proveden praktický návrh rychlostního profilu dle výše uvedené metodiky.

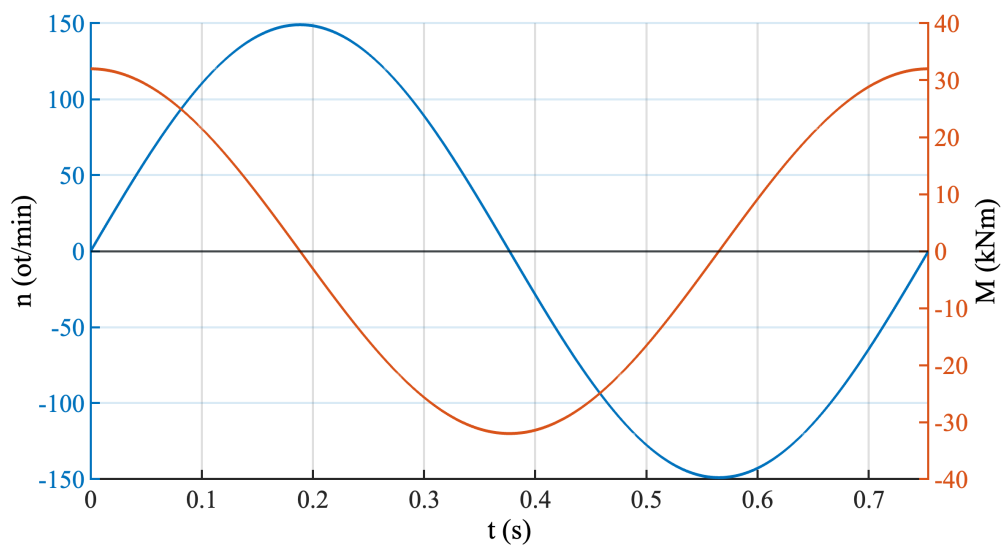
- 1. Parametry zkoušeného stroje** - parametry, vypsány v Tab. 11.1, byly převzaty z poskytnutého datového listu.

Tab. 11.1: Parametry stroje ASM32000

P_{2n} (kW)	M_n (Nm)	n_n (ot/min)	$\Sigma\Delta P$ (kW)	η (%)	J (kg · m ²)
459	32000	149	40,7	91,85	246,8

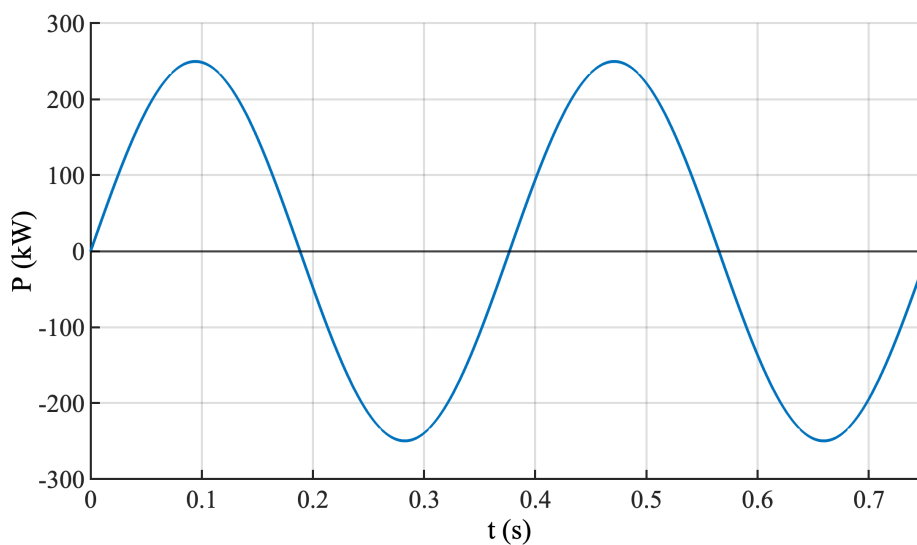
- 2. Určení momentu setrvačnosti** - moment setrvačnosti je znám z datového listu. V praxi by se ovšem provedlo jeho ověření měřením.
- 3. Zvolení rychlostního profilu** - jedná se o vysokomomentový stroj, tudíž je zvolen sinusový průběh. Aby bylo dosaženo co největšího zatížení, je zvolen interval otáček $\pm 100\% n_n$.
- 4. Výpočet parametrů rychlostního profilu** - výpočet byl proveden dle vztahů uvedených v kapitole 2.3

$$T = J \cdot \omega_n \cdot \frac{2\pi}{M_n} = 246,8 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 149 \cdot \frac{2\pi}{32000} = 0,756 \text{ s.} \quad (11.1)$$



Obr. 11.1: Návrh modulace otáček a momentu pro ASM32000

Na Obr. 11.1 a 11.2 jsou zobrazeny průběhy modulace otáček, momentu a výkonu na hřídeli.



Obr. 11.2: Průběh výkonu ASM32000

Střední hodnota výkonu stroje v průběhu zkoušky bude dosahovat hodnoty 158,9 kW. Ztráty ve stroji budou dosahovat hodnoty 19,9 kW.

Závěr

Diplomová práce se věnovala akcelerační metodě měření elektrických strojů. Na začátku práce jsou popsány standardní zatěžovací metody, princip akcelerační metody, její výhody a možnosti použití. Dále byl uveden rozbor ztrát v elektrickém stroji a metody pro jejich určení.

Předpokládané generované ztráty během zkoušky akcelerační metodou byly odvozeny z rozboru ztrát a vyjádřené vůči ztrátám při plném zatížení. K aplikaci metody bylo optimalizováno zkušební pracoviště poskytnuté firmou AVL Moravia s. r. o. Součástí optimalizace bylo vytvořeno kompletní schéma zapojení celého pracoviště, které je součástí přílohy této práce. Osciloskopická karta PicoScope 2408B byla zvolena k zápisu signálu z čidla otáček, jelikož disponuje funkcí výpočtu okamžité hodnoty frekvence nezbytné k určení výsledného výkonu na hřídeli. Ověření použitelnosti karty bylo provedeno pomocí generátoru pulsů RIGOL DG1032Z. I přes nedokonalý průběh, způsobený malým rozlišením, byla tato karta použita.

Před aplikací metody na vysokorychlostní dynamometr ASD1500 proběhlo měření momentu setrvačnosti a výpočet parametrů pro zvolený lineární a sinusový rychlostní profil. Dále pro zjištění dílčích ztrát ve stroji bylo provedeno zatížení dynamometrem, které bylo zrealizováno za pomoci firmy Moog Brno s. r. o. Následně byla použita k zatížení stroje akcelerační metoda s lineárním a sinusovým rychlostním profilem. Během měření se zjistilo, že výpočet okamžité frekvence osciloskopickou kartou není v praxi možný, kvůli rušení od měniče a nedostatečné vnitřní paměti. Proto byla veškerá data importována do prostředí MATLAB, kde pomocí vhodné funkce byl proveden výpočet okamžité frekvence a následně analýza ostatních dat.

Z naměřených dat vyplývá, že při lineárním rychlostním profilu se generuje 64 % ztrát oproti plnému zatížení. Pro sinusový rychlostní profil je to 49 % ztrát. Tím byla prokázáno, že akcelerační metoda dokáže částečně zatížit a zahřát zkoušený stroj. Dané výsledky byly konzultovány také s pracovníky AVL Moravia s. r. o., kteří je shledali za úspěšné. Metoda je vhodná především k zaběhnutí a oživení vysokomomentových či vysokorychlostních strojů a k ověření jejich mechanické a elektrické funkčnosti.

Pro záznam signálu z čidla otáček je vhodnější použít standardní osciloskop a výpočet okamžité frekvence provést ve výpočetním programu (MATLAB, Python atd.). Modulace otáček je vhodnější zajišťovat přes externí signál, jelikož s řízením na konstantní proud u lineární modulace docházelo k deformaci rychlostního profilu.

Literatura

- [1] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ, 2011. ČSN EN 60034-1, *Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti*. Ed. 2.
- [2] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ, 2014. 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.
- [3] ŘEDINA, Jiří a ROUCHAL, Robert, 2009. *Pohony pro zatěžování a měření na zkušebnách a v laboratořích*. XXXI. konference Elektrické pohony. S. 6.
- [4] MARTINEK, Jan, 2020. *Inovace zatěžovacího pracoviště pro elektrické pohony*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně.
- [5] *Hopkinson test*. Online. Electrical 4U. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/hopkinsons-test>. [cit. 2024-04-05].
- [6] CAHA, Zdeněk a ČERNÝ, Miroslav, 1990. *Elektrické pohony*. Praha: Nakladatelství technické literatury. ISBN 80-03-00418-7.
- [7] Toman M. *Výpočet Optimálního Magnetického Toku Asynchronního Motoru Pro Minimalizaci Ztrát Se Zohledněním Teplotních Vlivů*. Disertační práce. 2022.
- [8] PYRHÖNEN, Juha; JOKINEN, Tapani a HRABCOVÁ, Valéria, 2008. *Design of Rotating Electrical Machines*. Johny Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [9] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ, 2011. ČSN EN 60034-2-2, *Točivé elektrické stroje: Část 2-2: Specifické metody pro určování dílčích ztrát velkých strojů ze zkoušek*.
- [10] PAVLÍK, Ondřej, 2011. *Měnič pro malý 3f asynchronní motor*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně.
- [11] PAŠTYKA, Jan a HRUŠKA, Ondřej, 2017. *Rotační enkodér*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.
- [12] MEZ VÝVOJOVÝ ZÁVOD, 1951. *Zkoušení elektrických strojů*. Část 1. a 2.
- [13] YOKOGAWA, 2021. *All products guide, 2021*. Online. Japonsko. Dostupné z: <https://cdn.tmi.yokogawa.com/1/4764/files/CTYMI130-EN.pdf>. [cit. 2024-04-05].

- [14] *Analyzátory výkonu a kvality energie*. Online. Blue Panther Instruments. Dostupné z: <https://www.blue-panther.cz/analyzatory-kvality-energie>. [cit. 2024-04-11].
- [15] CONTROL TECHNIQUES, 2016. Online. *Uživatelská příručka Unidrive M700 M701 M702*. Druhé doplněné vydání. Dostupné z: https://www.pohony-menice.cz/data/downloads/M700/CZ/M700_Uzivatelaska_prirucka_3-10_2N.pdf. [cit. 2024-04-05].
- [16] HEIDENHAIN, 2011. Online. Německo. *Encoders for Servo Drives*. Dostupné z: https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_Encoders_for_Servo_Drives_ID208922_en.pdf. [cit. 2024-04-05].
- [17] NIDEC, 2017. Online. *DBR3 1220-0030009*. Dostupné z: <https://www.nidec-netherlands.nl/media/3085-opties-en-accessoires-remweerstand-dbr3-3000-w-datasheet.pdf>. [cit. 2024-05-03].
- [18] PICOTECHNOLOGY, 2021. Online. *PicoScope 2000 Series: Ultra-compact PC oscilloscopes*. Dostupné z: <https://www.picotech.com/download/datasheets/picoscope-2000-series-data-sheet-en.pdf>. [cit. 2024-04-05].
- [19] KEYSIGHT. *Digital Multimeters 34460A, 34461A, 34465A (6½ digit), 34470A (7½ digit)*. Online. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-03846/data-sheets/5991-1983.pdf>. [cit. 2024-04-12].
- [20] *WT1800E Series High performance Power Analyzers*. Online. Dostupné z: <https://cdn.tmi.yokogawa.com/1/2678/files/BUWT1800E-01EN.pdf>. [cit. 2024-04-11].
- [21] CONTROL TECHNIQUES, 2018. *SI-Applications Compact: User guide*.
- [22] ŘEDINA, Ondřej, 2022. *Cyklická akcelerační metoda měření elektrických strojů*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <<https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142714>>.
- [23] RIGOL TECHNOLOGIES, 2016. Online. *DG1000Z series*. Dostupné z: <<https://datasheet.octopart.com/DG1032Z-Rigol-datasheet-164728267.pdf>>. [cit. 2024-04-05].
- [24] AXIMA SOLUTION. Online. *Zdroj vyhlazeného napětí 24 V DC*. Dostupné z: <<https://www.axima-obchod.cz/admin-data/storage/get/51-axsz2.pdf>>.

Seznam symbolů a zkratek

ČSN	česká technická norma	
ASM	asynchronní motor	
A/D	analogově-digitální převodník	
LCD	display z tekutých krystalů	
RFC-A	řízení rotorového toku asynchronního motoru	
RFC-S	řízení rotorového toku synchronního motoru	
PID	proporčně-integračně-derivační	
PLC	programovatelný logický automat	
RTD	resistance temperature detector	
PWM	pulsně-šířková modulace	
CSV	Comma-separated values	
AWG	Arbitrary waveform generator	
U_M	napájecí napětí v motorickém režimu	(V)
f_M	napájecí frekvence v motorickém režimu	(Hz)
U_G	napájecí napětí v generátorickém režimu	(V)
f_G	napájecí frekvence v generátorickém režimu	(Hz)
η	účinnost	(-)
ΔP_M	celkové ztráty motoru	(W)
ΔP_G	celkové ztráty generátoru	(W)
P_M	příkon motoru	(W)
P_G	příkon generátoru	(W)
M	mechanický moment	(Nm)
J	moment setrvačnosti	(kg·m ²)
ω	úhlová frekvence	(rad/s)

P_{mech}	mechanický výkon	(W)
ΔP_{j1}	ztráty ve statorovém vinutí	(W)
R	odpor vinutí	(Ω)
$I_{1,\text{ef}}$	efektivní hodnota proudu	(A)
ΔP_{j2}	ztráty v rotorovém vinutí	(W)
P_{δ}	výkon procházející přes vzduchovou mezeru	(W)
s	skluz	(-)
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	(W)
ΔP_{h}	hysterezní ztráty	(W)
ΔP_{v}	ztráty vířivými proudy	(W)
K_{h}	materiálová konstanta plechů	(J)
f	frekvence	(Hz)
B	magnetická indukce	(T)
n_{h}	materiálová konstanta plechů	(-)
K_{v}	materiálová konstanta plechů	(J/Hz)
ΔP_{mech}	mechanické ztráty	(W)
ΔP_{w}	ventilační ztráty	(W)
ΔP_{f}	třecí ztráty	(W)
K_{w}	koeficient ventilačních ztrát	(Nm/s ²)
K_{f}	koeficient třecích ztrát	(Nm)
ΔP_{d}	dodatečné ztráty	(W)
ΔP_{o}	ztráty naprázdno	(W)
δ	odchylka otáček	(ot/min)
n_{n}	jmenovité otáčky	(ot/min)
t_1	čas odpojení od zdroje	(s)

t_2	čas konce měření	(s)
dt	doba změny otáček	(s)
ω_{\max}	maximální úhlová frekvence	(rad/s)
ω_{\min}	minimální úhlová frekvence	(rad/s)
ω_{str}	střední hodnota úhlové frekvence	(rad/s)
T	perioda	(s)
$\Delta P_{j1,\text{lin}}$	ztráty ve statorovém vinutí pro lineární profil	(W)
$\Delta P_{j2,\text{lin}}$	ztráty v rotorovém vinutí pro lineární profil	(W)
$\Delta P_{h,\text{lin}}$	hysterezní ztráty pro lineární profil	(W)
$\Delta P_{v,\text{lin}}$	ztráty vířivými proudy pro lineární profil	(W)
$\Delta P_{\text{Fe},\text{lin}}$	ztráty v železe pro lineární profil	(W)
$\Delta P_{\text{mech},\text{lin}}$	mechanické ztráty pro lineární profil	(W)
$\Delta P_{w,\text{lin}}$	ztráty ventilační pro lineární profil	(W)
$\Delta P_{f,\text{lin}}$	ztráty třecí pro lineární profil	(W)
$\Delta P_{d,\text{lin}}$	ztráty dodatečné pro lineární profil	(W)
$\Delta P_{j1,\text{sin}}$	ztráty ve statorovém vinutí pro sinusový profil	(W)
$\Delta P_{j2,\text{sin}}$	ztráty v rotorovém vinutí pro sinusový profil	(W)
$\Delta P_{h,\text{sin}}$	hysterezní ztráty pro sinusový profil	(W)
$\Delta P_{v,\text{sin}}$	ztráty vířivými proudy pro sinusový profil	(W)
$\Delta P_{\text{Fe},\text{sin}}$	ztráty v železe pro sinusový profil	(W)
$\Delta P_{\text{mech},\text{sin}}$	ztráty mechanické pro sinusový profil	(W)
$\Delta P_{w,\text{sin}}$	ztráty ventilační pro sinusový profil	(W)
$\Delta P_{f,\text{sin}}$	ztráty třecí pro sinusový profil	(W)
$\Delta P_{j1,\text{sin}}$	ztráty dodatečné pro sinusový profil	(W)
f_n	jmenovitá napájecí frekvence	(Hz)

U_n	jmenovité napětí	(V)
n_n	jmenovité otáčky	(ot/min)
I_n	jmenovitý proud	(A)
P_n	jmenovitý výkon	(W)
I_{max}	maximální proud	(A)
f_{vz}	vzorkovací frekvence	(kHz)
U_{pp}	napětí špička-špička	(V)
f_A	frekvence signálu A	(Hz)
f_B	frekvence signálu B	(Hz)
P_{start}	počáteční výkon	(W)
f_{mech}	mechanická frekvence	(Hz)
ω_{start}	počáteční úhlová frekvence	(rad/s)
P_{end}	koncový výkon	(W)
ω_{end}	koncová úhlová frekvence	(rad/s)
P_{str}	střední hodnota výkonu	(W)
$f_{A,start}$	počáteční frekvence signálu A	(Hz)
$f_{A,end}$	koncová frekvence signálu A	(Hz)
P_m	mechanický výkon v motorickém režimu	(W)
$P_{m,max}$	maximální výkon v motorickém režimu	(W)
$P_{m,min}$	minimální výkon v motorickém režimu	(W)
P_g	mechanický výkon v generátorickém režimu	(W)
$P_{g,max}$	maximální výkon v generátorickém režimu	(W)
$P_{g,min}$	minimální výkon v generátorickém režimu	(W)
ε_m	procentuální odchylka v motorickém režimu	(%)
ε_g	procentuální odchylka v generátorickém režimu	(%)

$f_{id,start}$	počáteční frekvence ideálního signálu	(Hz)
$f_{id,end}$	koncová frekvence ideálního signálu	(Hz)
U_{uw}	napětí mezi fázemi U a W	(V)
U_{vw}	napětí mezi fázemi V a W	(V)
U_{uv}	napětí mezi fázemi U a V	(V)
Δn	diference otáček	(ot/min)
W_m	dodaná energie	(Wh)
P_2	výkon	(W)
U_{ef}	efektivní hodnota napětí	(V)
$\theta_{ok,S1}$	teplota okolí při zkoušce plným zatížením	(°C)
W_g	generovaná energie	(Wh)
$R_{vin,0}$	odpor vinutí za studena	(Ω)
$\theta_{ok,lin}$	teplota okolí při zkoušce lineární modulací	(°C)
$\theta_{ok,sin}$	teplota okolí při zkoušce sinusovou modulací	(°C)
θ_0	teplota okolí za studena	(°C)
A	parametr exponenciály	(Ω)
B	parametr exponenciály	(s^{-1})
C	parametr exponenciály	(Ω)
$R_{vin,S1}$	odpor vinutí při plném zatížení	(Ω)
$\Delta\theta_{ot,S1}$	oteplení při plném zatížení	(°C)
$\Delta P_{0,Un}$	ztráty naprázdno při jmenovitém napětí	(W)
I_0	proud naprázdno	(A)
P_1	příkon	(W)
$\Sigma\Delta P$	celkové ztráty	(W)
$R_{vin,lin}$	odpor vinutí při lineární modulaci	(Ω)

$\Delta\theta_{ot,lin}$	oteplení při lineárním profilu	(°C)
M_m	motorický moment	(Nm)
M_g	generátorický moment	(Nm)
$P_{m,str}$	střední hodnota mechanického výkonu	(W)
$P_{g,str}$	střední hodnota mechanického příkonu	(W)
t_m	doba motorického režimu	(s)
t_g	doba generátorického režimu	(s)
$\Sigma\Delta P_{lin}$	celkové ztráty při lineárním profilu	(W)
$P_{1,lin}$	příkon při lineárním profilu	(W)
$R_{vin,sin}$	odpor vinutí při sinusové modulaci	(Ω)
$\Delta\theta_{ot,sin}$	oteplení při sinusovém profilu	(°C)
$M_{m,max}$	maximum motorického momentu	(Nm)
$M_{g,max}$	maximum generátorického moment	(Nm)
$\Sigma\Delta P_{sin}$	celkové ztráty při sinusovém profilu	(W)
$P_{1,sin}$	příkon při sinusovém profilu	(W)