

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Frekvenčně řízený pohon s reluktančním motorem

Diplomová práce

2020

Michal Řihák

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Řihák**
Osobní číslo: **D18434**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Téma práce: **Frekvenčně řízený pohon s reluktančním motorem**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

1. Sestavte přehled základních vlastností reluktančních motorů a jejich regulace
2. Navrhněte a realizujte laboratorní přípravek s měničem pro reluktanční motor
3. Ověřte funkčnost přípravku a proveďte vzorová měření na pohonu s reluktančním motorem
4. Proveďte experimentální srovnání účinností a ztrát pohonů s reluktančním motorem a s asynchronním motorem

Rozsah pracovní zprávy: **dle zadání**
Rozsah grafických prací: **dle zadání**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Kobrlé, P., Pavelka, J.: Elektrické pohony a jejich řízení, skriptum ČVUT v Praze, FEL, 2016, ISBN 978-80-01-06007-0

Javůrek, J.: Regulační moderních elektrických pohonů, Grada, 2003, ISBN 8024705079

Firemní literatura Danfoss

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.**
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **12. února 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **1. června 2020**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze 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, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 26. 5. 2020

Michal Řihák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své diplomové práce prof. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc., za věnovaný čas a poskytnuté konzultace, jakož i Ing. Petru Sýkorovi za četné cenné poznámky k podobě a praktickému vyhotovení přípravku s frekvenčním měničem. Poděkování patří také Ing. Zdeňku Maškovi, Ph.D., za pomoc při práci s vybavením od společnosti National Instruments.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá postupem sestavení laboratorního pracoviště se synchronním reluktančním motorem. Nejdříve je popsán samotný elektrický stroj a další příslušenství včetně frekvenčního měniče. Dále je uvedena analýza dat získaných při měření účinnosti, ztrát a odebíraného proudu reluktančního motoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrické pohony, synchronní reluktanční motory, frekvenční měniče, účinnost elektrických strojů

TITLE

Frequency Controlled Drive with Reluctance Motor

ANNOTATION

The diploma thesis deals with the process of assembling of the laboratory stand with the synchronous reluctance motor. First, there is described the own electrical machine and other accessories including the frequency converter. Then the thesis states the analysis of the data contains of measured efficiency, losses and current of the reluctance motor.

KEYWORDS

electrical drives, synchronous reluctance motors, frequency converters, electrical machines efficiency

OBSAH

Úvod.....	10
1 Charakteristika konstrukce SynRM	12
1.1 Stručný popis konstrukce SynRM.....	12
1.1.1 Konstrukční řešení statoru SynRM.....	12
1.1.2 Konstrukční řešení rotoru SynRM.....	12
1.1.3 Fyzikální princip a některé vlastnosti SynRM.....	13
1.2 Způsob napájení a řízení SynRM.....	15
1.3 Srovnání s dalšími elektrickými stroji.....	17
1.3.1 Vybrané podobnosti SynRM s dalšími elektromotory	17
1.3.2 Vybrané odlišnosti SynRM a jiných elektromotorů	18
2 Popis vybavení pro pracoviště se SynRM	19
2.1 Polovodičový měnič společnosti Danfoss.....	19
2.1.1 Štítkové hodnoty polovodičového měniče Danfoss.....	19
2.1.2 Digitální vstupní a výstupní signály měniče Danfoss.....	21
2.1.3 Analogové vstupní a výstupní signály měniče Danfoss	22
2.1.4 Některé další funkce měniče Danfoss.....	23
2.1.5 Prameny dalších informací k měniči Danfoss	24
2.2 SynRM společnosti KSB.....	25
2.2.1 Štítkové hodnoty SynRM KSB.....	25
2.2.2 Prameny dalších informací k SynRM KSB	26
2.3 SynRM společnosti ABB	27
2.3.1 Štítkové hodnoty SynRM ABB	27
2.3.2 Prameny dalších informací k SynRM ABB.....	28
2.3.3 Základní údaje IRC čidla na SynRM ABB.....	29
3 Měření provedená při zprovoznování SynRM.....	30
3.1 Měření hlavních parametrů SynRM.....	30

3.1.1	Stanovení ohmického odporu statorového vinutí	30
3.1.2	Stanovení indukčnosti statorového vinutí	31
3.1.3	Závislost indukčnosti na úhlu natočení rotoru pro SynRM KSB	33
3.1.4	Závislost indukčnosti na úhlu natočení rotoru pro SynRM ABB	34
3.2	Měření na SynRM při chodu naprázdno	35
3.2.1	Chod naprázdno SynRM KSB	36
3.2.2	Chod naprázdno SynRM ABB	38
3.3	Měření statického momentu SynRM	39
3.3.1	Statický moment u SynRM KSB	40
3.3.2	Statický moment u SynRM ABB	41
3.4	Použité napájecí, regulační a měřicí přístroje, elektrické stroje	43
3.4.1	Štítkové údaje použitých napájecích, regulačních a měřicích přístrojů	43
3.5	Shrnutí poznatků z měření při zprovoznování SynRM	44
4	Návrh přípravku pro pracoviště se SynRM	46
4.1	Návrh funkcí a ovládání přípravku pro pracoviště se SynRM	46
4.2	Návrh elektrického zapojení přípravku pro pracoviště se SynRM	48
4.2.1	Návrh silového zapojení přípravku	48
4.2.2	Návrh řídicích obvodů přípravku	49
4.3	Návrh mechanického řešení přípravku pro pracoviště se SynRM	50
4.3.1	Specifikace komponent pro sestavení přípravku	50
4.3.2	Návrh rozložení elementů v rámci přípravku	51
4.3.3	Návrh rozložení ovládacích a indikačních prvků	52
4.3.4	Postup sestavení přípravku	53
4.3.5	Propojení datových vodičů s ovládacími a indikačními prvky	55
5	Měření prováděná s využitím dynamometru	56
5.1	Srovnávací měření se SynRM a ASM	56
5.1.1	Zatěžování SynRM KSB	57

5.1.2	Zatěžování SynRM ABB	61
5.1.3	Zatěžování ASM Siemens	65
5.1.4	Pracovní charakteristiky	69
5.1.5	Použité napájecí, regulační a měřicí přístroje, elektrické stroje	73
5.2	Porovnání prověřovaných strojů	74
5.2.1	Porovnání naměřených charakteristik.....	74
5.2.2	Porovnání dalších vlastností strojů	76
5.3	Vzorová zadání měření se SynRM pro studenty KEEZ.....	77
5.3.1	Oteplovací charakteristika motoru při napájení z frekvenčního měniče	78
5.3.2	Zatěžování SynRM	78
6	Námět k dalšímu vybavení pracoviště	80
7	Závěr	82
	Použitá literatura	83
	Seznam obrázků	88
	Seznam tabulek	90
	Přílohy.....	91

ÚVOD

V současné době je v osobní železniční dopravě kladen důraz např. na zvyšování cestovní rychlosti či poskytování bonusových služeb cestujícím. Nákladní dopravci se snaží přizpůsobovat se trendům nové generace průmyslu a logistiky. Mezitím je jistě na místě uvažovat z hlediska řádných hospodářů nad zvyšováním efektivity souvisejících činností. Pro provozovatele moderních elektrických lokomotiv to může znamenat zvýšení požadavků na jejich univerzálnost – poslouží spolu s netrakovou jednotkou pro expresní dálkovou dopravu i v čele ucelené soupravy samovýsypných vozů ložených uhlím.

Efektivita celého podniku jistě souvisí s tím, nakolik hospodárné jsou jím užívané nástroje. To lze přenést i směrem k elektrickým strojům a přístrojům. Zatímco spousta v současnosti vyráběných vozidel elektrické trakce využívá frekvenčně řízené pohony s asynchronními motory (ASM), pro dosažení vyšší účinnosti či splnění např. kritéria nízkopodlažnosti je možno zkoumat, příp. i využít vlastnosti dalších typů elektromotorů. V tomto duchu došlo k osazení synchronních motorů s permanentními magnety na rotoru (PMSM) na 250 tramvaji Škoda 15T ForCity pro Dopravní podnik hlavního města Prahy. [1]

Další pohonnou jednotkou, u níž se nabízí prověření vhodnosti pro trakční techniku, může být reluktanční motor. Zatímco spínaný reluktanční motor (SRM) má vlastnosti odpovídající použití spíše v servotechnice, synchronní reluktanční motor (SynRM) může vykazovat chování srovnatelné s PMSM. Podobnost je zřejmá také u polovodičového měniče, který slouží pro napájení a řízení stroje. Spolu se zakoupením dvojice SynRM se otevřela cesta k jejich zkoumání také na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě (KEEZ), která je součástí Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice.

Myšlenkou, která vedla k jejich pořízení, byl plán na sestavení výukového pracoviště jako součásti laboratoře elektrických pohonů ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě v Doubravících. Při práci s demonstrační pomůckou tam mají studenti jednak poznat další typ střídavého elektrického stroje, jednak poznat další zařízení, které pracuje s polovodičovým frekvenčním měničem jako napájecí a řídicí jednotkou, a také prověřit odlišnosti od rozšířenějších strojů asynchronních.

Cílem této práce má být sestavení přípravku pro výukové pracoviště následované ověřením jeho funkcí. Pro tento postup je nejprve potřeba popsat teoretické předpoklady stran

konstrukce a vlastností SynRM. Následovat může popis vybavení, které bylo pořízeno pro předemtné pracoviště. Dále lze zmínit provedení měření orientovaných na základní elektrické i mechanické vlastnosti SynRM. A konečně po samotné realizaci přípravku může dojít k měření účinnosti strojů dvou výrobců i porovnání s ASM.

Některé poznatky z přípravy SynRM a dalšího příslušenství ke zprovoznění již byly shrnuty v pracích ročníkového projektu – Přehledová studie pohonných jednotek pro trakční techniku [2] a Příprava ke zprovoznění pohonu se synchronním reluktančním motorem [3]. Následující texty tedy využijí informace v projektech uvedené i odkazy na zmíněné dokumenty.

1 CHARAKTERISTIKA KONSTRUKCE SYNRM

1.1 Stručný popis konstrukce SynRM

1.1.1 Konstrukční řešení statoru SynRM

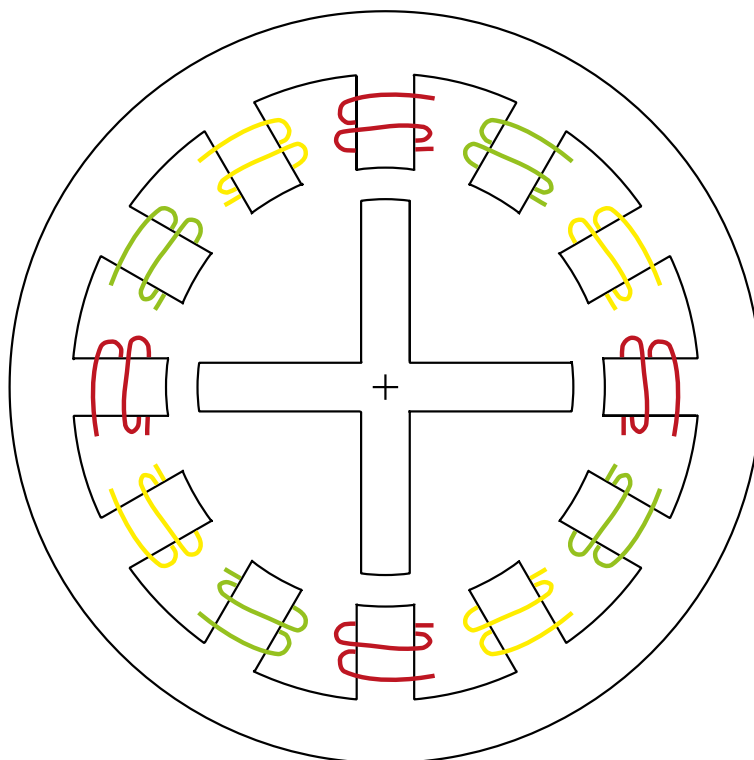
Magnetický obvod statoru u SynRM je tvořen vzájemně izolovanými ocelovými plechy s tloušťkou obvykle 0,5 mm. Princip a význam této konstrukce je obdobný jako u transformátorů (odkud si tyto prvky také získaly pojmenování „trafoplechy“), přičemž je nežádoucí vznik a protékání vířivých proudů v magnetickém obvodu – snažíme se zde minimalizovat ztráty. [2]

V drážkách plechů jsou uloženy cívky tří fází statorového vinutí. Podle jejich uspořádání lze určit počet pólových dvojic stroje, jednu pólovou dvojici tvoří cívka, která vytváří severní a jižní pól. Nachází-li se na statoru od každé fáze dvě dvojice pólů, stroj nazýváme čtyřpólovým. U takového bychom našli celkem dvanáct statorových pólů, protože každá ze tří fází vytvoří dva plus dva póly. [2]

1.1.2 Konstrukční řešení rotoru SynRM

Rotor SynRM je složen z transformátorových plechů, vykazuje magnetickou nesymetrii, a disponuje tedy vyniklými póly. U stroje této konstrukce je vždy uvažován shodný počet pólů na statoru i rotoru. Čtyřpólový stroj tedy disponuje také čtyřmi rotorovými póly, které se vyznačují malým magnetickým odporem a větší indukčností a také s nimi ztotožňujeme osy d . V příčném svislém řezu tělesem motoru vytvoří rotorové póly dvě středově souměrné dvojice, přičemž si lze představit, že skrz každou z nich se mohou uzavírat magnetické indukční čáry pole, které je vytvářeno statorovými cívkami. [4]

V prostoru mezi popsány rotorovými póly leží stejný počet oblastí, v nichž má hmota rotoru největší magnetický odpor a zároveň menší indukčnost – s nimi ztotožňujeme osy q . Takových vlastností lze dosáhnout např. vložením vzduchových mezer do magnetického obvodu. Vystouplost pólů oproti těmto magneticky méně vodivým oblastem však nemusí být patrná na první pohled – z vnějšku se rotor může jevit jako hladký a vzduchové mezery mohou být situovány uvnitř jeho plechů. [2]



Obrázek 1 – Principiální náčrt konstrukce statoru a rotoru SynRM. [2]

1.1.3 Fyzikální princip a některé vlastnosti SynRM

Točivé magnetické pole SynRM je vytvářeno třífázovým napájením statorového vinutí. Rotor se následně snaží zaujmout takovou pozici, aby jeho osy d splývaly s magnetickými indukčními čarami vytvořeného pole. Jde tedy o minimalizaci magnetického odporu magnetického obvodu – magnetické indukční čáry budou prostupovat skrz ty oblasti rotoru, kde se nachází plechy (ne vzduchové mezery). [2]

Točivý moment rotoru je vytvářen tak dlouho, dokud nedojde k natočení osy d do magnetických siločar pole statoru. Následně se však statorové pole pootočí tak, jak je dáno střídavým napájecím napětím. Při určitém zjednodušení snad lze použít představu, že magneticky vystouplý pól rotoru se „chytí“ odpovídajícího místa statorového magnetického pole, s nímž se („pevně svázán“) otáčí. Mechanické otáčky stroje jsou shodné se synchronními a na momentu vytvářeném strojem nezávisí. Mechanická charakteristika SynRM je absolutně tvrdá, mechanické otáčky jsou v celém rozsahu dovolených momentů konstantní. [2]

$$\omega_m = \omega_s = \frac{\omega_1}{p_p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_p} \quad (1)$$

ω_m	mechanická úhlová rychlost v $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	
ω_s	synchronní úhlová rychlost v $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	
ω_1	úhlová frekvence napájecího napětí v $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	
p_p	počet pólových dvojic stroje	[5]
f	frekvence napájecího napětí v Hz	



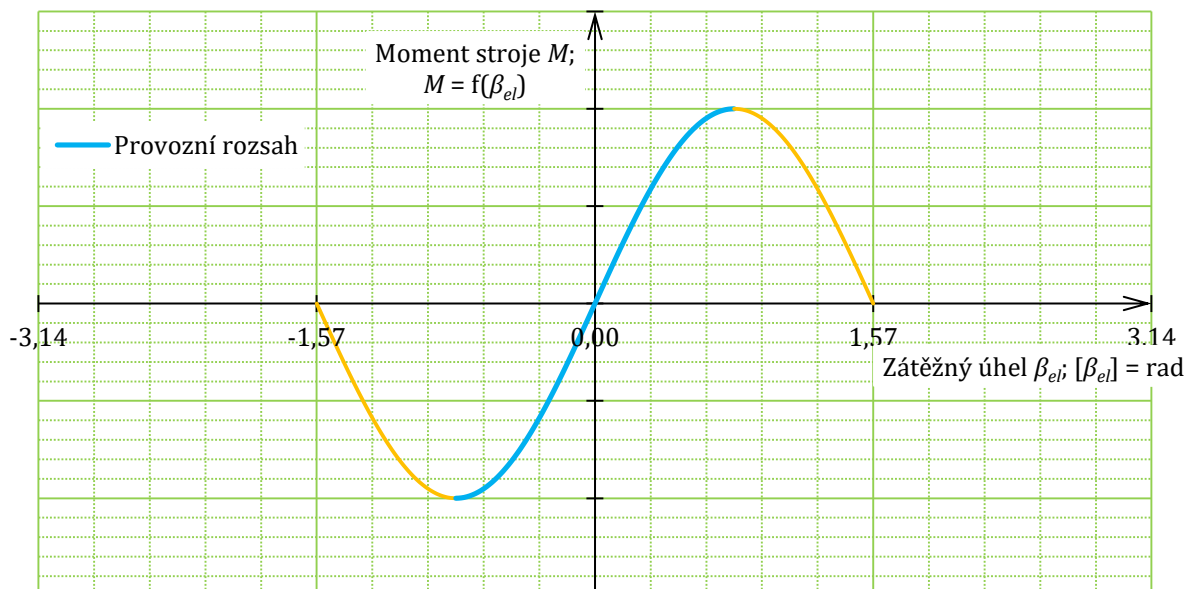
Obrázek 2 – Vyobrazení SynRM společnosti ABB. Převzato z [6]

Ve vztahu pro moment SynRM vystupuje velikost a frekvence napájecího napětí, počet pólových dvojic stroje i indukčnost v příčném a podélném směru:

$$M = \frac{3 \cdot p_p}{\omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\beta_{el} \quad (2)$$

M	moment vyvíjený strojem v Nm	
p_p	počet pólových dvojic stroje	
ω_1	úhlová frekvence napájecího napětí v $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	
U_1	efektivní hodnota napájecího napětí ve V	[5]
X_q	příčná indukční reaktance v Ω (ve směru osy q)	
X_d	podélná indukční reaktance v Ω (ve směru osy d)	
β_{el}	elektrická reprezentace zátěžného úhlu v rad	

Navíc se projevuje závislost na sinu dvojnásobku zátěžného úhlu β_{el} . Při $\beta_{el} = \pm \frac{\pi}{4}$ nabývá moment stroje maxima a jeho překročení znamená vypadnutí ze synchronismu – motor přestane vyvíjet moment a zastaví se.



Obrázek 3 – Závislost momentu SynRM na elektrickém zátěžném úhlu

Zátěžný úhel může mít také mechanickou reprezentaci, přičemž přepočtovou konstantou je počet pólových dvojic stroje:

$$\beta_{mech} = \frac{\beta_{el}}{p_p} \quad (3)$$

β_{mech} mechanická reprezentace zátěžného úhlu v rad

β_{el} elektrická reprezentace zátěžného úhlu v rad

p_p počet pólových dvojic stroje

[5]

Zatímco β_{el} je k nalezení ve fázorovém diagramu, který zachycuje elektrické veličiny v SynRM, pro β_{mech} lze použít představu, že při zatížení se rotor otáčí „se zpožděním“ právě β_{mech} za točivým magnetickým polem statoru. Jak vyplývá z nahoře uvedených vztahů a obrázku, s rostoucím momentem v provozním rozsahu β_{mech} roste a naopak.

1.2 Způsob napájení a řízení SynRM

Z poznatků uvedených v části 1.1.3 je zřejmé, že SynRM vyžaduje třífázové napájení střídavým napětím a že frekvence tohoto napětí jednoznačně určuje mechanické otáčky stroje.

Tyto vlastnosti sice nevyklučují přímé připojení SynRM k síti 3x 400 V, takové zapojení by však neumožňovalo řídit rozběh stroje ani jeho otáčky v ustálených stavech. Proto se zároveň s nasazením SynRM uvažuje zejména napájení z polovodičového frekvenčního měniče – tranzistorového střídače s mikroprocesorovým řízením. [2]

Při provozu SynRM je vyžadována znalost polohy rotoru vzhledem ke statoru, na základě níž řídicí systém frekvenčního měniče zajišťuje vytváření magnetického pole v souvislosti s požadovanými otáčkami a zatížením stroje. Značná magnetická nesymetrie však dovolí získat údaj o úhlovém natočení i bez externího zařízení pro snímání pozice, využití resolveru nebo IRC čidla není nutné. [7]

Pro potřeby popisu a vytváření regulačních smyček střídavých elektrických strojů se třífázová soustava s fázemi U, V, W transformuje na soustavu d, q , která se v komplexní rovině otáčí s úhlovou frekvencí napájecího napětí ω_l . V soustavě d, q se fázor statorového proudu I rozdělí na dvě složky, pomocí nichž lze zapsat i vztah (2) pro moment SynRM:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d \quad (4)$$

M	moment vyvíjený strojem v Nm	
p_p	počet pólových dvojic stroje	
L_d	podélná indukčnost v H (ve směru osy d)	
L_q	příčná indukčnost v H (ve směru osy q)	[8]
i_q	momentotvorná složka statorového proudu v A	
i_d	tokotvorná složka statorového proudu v A	

Od statorového proudu požadujeme vytvoření magnetického toku uvnitř stroje i hnacího momentu na hřídeli. Ze vztahu (4) je navíc zřejmé, že pro vytvoření nenulového momentu SynRM musí být regulována momentotvorná i tokotvorná složka proudu na nenulovou hodnotu. Vektor I potom bude mít ve fázorovém diagramu obecnou polohu, nebude totožný s některou z os d či q . [2]

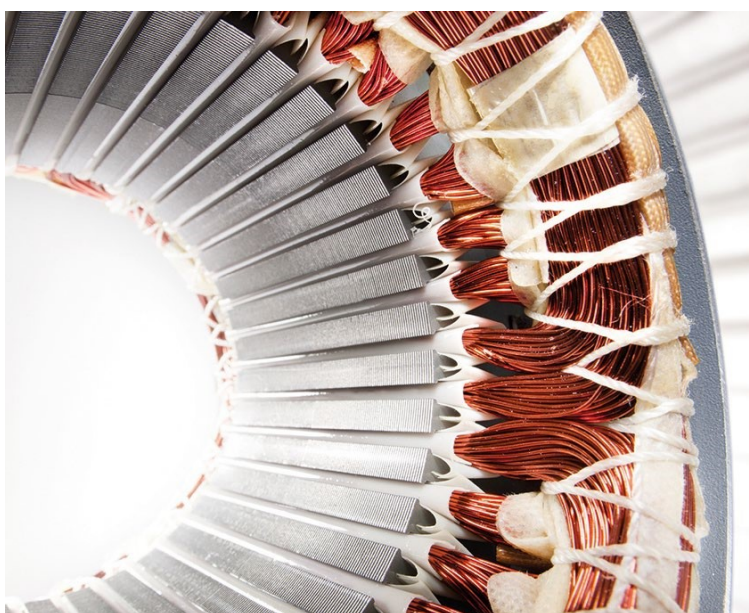
Za nejvýhodnější lze v souladu se vztahem (4) považovat takový postup řízení, při němž vektor statorového proudu svírá s osou d , která představuje směr největší magnetické vodivosti, úhel 45° . Při provozu v motorickém režimu se tedy vektor I nachází v prvním kvadrantu souřadnicové soustavy d, q . Takto lze vytvářet při dané velikosti fázového proudu

maximální moment stroje. Naproti tomu při řízení PMSM nastane obdobný případ, je-li úhel mezi osou d a vektorem I 90° .

1.3 Srovnání s dalšími elektrickými stroji

1.3.1 Vybrané podobnosti SynRM s dalšími elektromotory

Dalším střídavým elektromotorům se SynRM podobá, pokud jde o konstrukci statoru. Tentýž popis – tedy cívky třífázového vinutí uložené v drážkách transformátorových plechů – nalézáme u ASM i u PMSM.



Obrázek 4 – Snímek statoru ASM společnosti ABB. Převzato z [6]

Podniku, který se chystá pořídit pohon se SynRM, nebude tato podobnost příliš platná. Za určitých okolností však pomůže výrobcům strojů – postupy a dokumentace, dle nichž produkují součásti rozšířených ASM, najdou uplatnění i při výrobě dosud vzácnějších SynRM.

Vztah (4), který popisuje moment SynRM v závislosti na složkách statorového proudu, má velmi blízkou obdobu při popisu PMSM. Konkrétně moment synchronního motoru s permanentními magnety vnořenými do rotoru (IPMSM, příp. označován jako synchronní motor s magneticky nesymetrickým rotorem) se skládá z tzv. synchronní a reluktanční složky. Zatímco synchronní složku tvoří příspěvek magnetického toku od permanentních magnetů, reluktanční složka je dána nesymetrií rotoru podobnou, jaká je

popsána u SynRM. Právě proto je reluktanční složka, která je svázána s indukčnostmi L_d i L_q , u IPMSM shodná s momentem SynRM. [2]

1.3.2 Vybrané odlišnosti SynRM a jiných elektromotorů

Mezi reluktanční motory se řadí také stroje, které mají různý počet pólových dvojic na statoru a rotoru. Ty jsou někdy nazývány jako spínané reluktanční motory (SRM) a pro pohonnou techniku se jeví jako méně vhodné vzhledem k možnému kolísání momentu. Zatímco SynRM jsou konstruovány jako třífázové s počty pólových dvojic podobnými jako u ASM, počty statorových a rotorových pólů i napájecích fází SRM se navrhují ve větším rozsahu hodnot (i pro šest napájecích fází). [2]

Jak bylo popsáno v části 1.1.2, rotor SynRM neobsahuje žádný elektrický obvod, kterým by protékal proud. Jde o odlišnost od konstrukce ASM, která znamená, že v rotoru nevzniká Joulovo ztrátové teplo. Celkové ztráty se tak dle materiálu společnosti ABB mohou zmenšit až o 40 %, což posune motor srovnatelných rozměrů o dvě třídy účinnosti IE výše. [6]

Zatímco rotor PMSM je osazen skupinami permanentních magnetů (např. z materiálu NdFeB), u SynRM jde pouze o ocelové plechy obrobené do speciálních tvarů tak, aby vznikla pásma s menším i větším magnetickým odporem. Výroba SynRM proto nezatíží životní prostředí ani těžbou vzácných zemin, ani použitím lepidel, pomocí nichž jsou magnety k rotoru PMSM přichyceny. [2]

2 POPIS VYBAVENÍ PRO PRACOVÍŠTĚ SE SYNRM

2.1 Polovodičový měnič společnosti Danfoss

2.1.1 Štítkové hodnoty polovodičového měniče Danfoss

Před zprovozněním jakéhokoliv elektrického zařízení se předpokládá, že obsluha bude seznámena se základními informacemi a pokyny výrobce, které se zařízení i jeho provozu týkají. Obecně lze předpokládat, že tomuto postupu by mělo být věnováno tím více času a pozornosti, čím je zprovozňovaný předmět složitější a jeho pořizovací náklady vyšší. Tato úměra bezesporu platí i při přípravě natolik specifického spotřebiče, jakým je polovodičový měnič osazený moderními IGBT prvky.

Jako ústřední jednotka zde popisovaného pracoviště se SynRM totiž má sloužit polovodičový frekvenční měnič od společnosti Danfoss se zkráceným typovým označením VLT FC-302. V takovém případě, je-li tedy na pracovišti k dispozici konkrétní zařízení (elektrický stroj, polovodičový měnič), nabízí se čerpat základní informace z něho samotného, resp. z jeho štítku. Ten může obecně nést např. identifikační znaky, údaje o jmenovitých hodnotách elektrických veličin či o prostředí, ve kterém lze zařízení provozovat. [3]



Obrázek 5 – Štítek se základními údaji polovodičového měniče Danfoss

Protože jsou štítkové hodnoty nanejvýš směrodatné pro provoz zařízení, uvádí je také Tabulka 1. O dalších pramenech, které rovněž obsahují směrodatné instrukce vztažené k frekvenčnímu měniči Danfoss, pojednává část 2.1.5.

Tabulka 1 – Štítkové hodnoty polovodičového měniče Danfoss [3]

Označení	Parametr	Hodnota	Poznámka
	Výrobce	Danfoss	
	Obchodní označení	VLT AutomationDrive	FC-302
T/C	Typové označení	FC-302P4K0T5E20H1BG	XXXXSXXXXAXBXCXXXXDX
S/N	Sériové číslo	024724G117	
	Výkon na hřídeli	4,0 kW	Při napájecím napětí 400 V
	Výkon na hřídeli	5,0 HP	Při napájecím napětí 460 V
IN	Vstupní napětí	3x 380 až 500 V	
IN	Frekvence vstupního napětí	50 / 60 Hz	
IN	Vstupní proud	9,0 / 7,4 A	Spojité proud při vstupním napětí do / nad 440 V
OUT	Výstupní napětí	3x 0 až V_{in}	Maximum je limitováno velikostí vstupního napětí
OUT	Výstupní frekvence	0 až 590 Hz	V režimu řízení vektoru magnetického toku max. 300 Hz
OUT	Výstupní proud	10 / 8,2 A	Při vytížení na 160 % a výstupním napětí do / nad 440 V
CHASSIS	Krytí (ochrana)	IP 20	
Tamb.	Teplota okolí	50 °C	
Tamb.	Teplota okolí	122 °F	

Z uvedení více hodnot či intervalů hodnot u některých veličin lze usuzovat, že výrobce počítá s provozem zařízení v podmínkách několika zemí či distribučních soustav, resp. s nasazením na evropský i americký trh. Patříčný výklad je třeba přiřadit také ke dvěma hodnotám vstupního proudu na štítku měniče. Dle informací v manuálu jde o ustálené („spojité“) hodnoty maximálního vstupního proudu, přičemž vyšší hodnota platí při napájecím napětí 380 až 440 V, nižší pak při napětí 441 až 500 V. [9]

2.1.2 Digitální vstupní a výstupní signály měniče Danfoss

Frekvenční měnič Danfoss VLT FC-302 disponuje řadou komunikačních rozhraní – např. při využití externího indikačního a obslužného pultu, osobního počítače či dalších prvků pohonu. Širokou škálu možností nabízí sada digitálních vstupních a výstupních signálů, které naleznou využití i při provozování přípravku popsaného v bodu 4. Tomuto typu komunikace je určena jedna ze svorkovnic, které se nacházejí na čelní stěně měniče pod ochranným krytem. Zjednodušený výčet digitálních vstupních a výstupních signálů obsahuje následující tabulka.

Tabulka 2 – Svorky digitálních vstupů a výstupů měniče Danfoss. Sestaveno na základě [9] a [10]

Skupina	Svorka	Param.	Výchozí funkce	Popis
+24 V (D)	12	–	+24 V ss	Napětí 24 V pro obvody digitálních vstupů
+24 V (D)	13	–	+24 V ss	Napětí 24 V pro obvody digitálních vstupů
D IN	18	5-10	[8] Start	Po přivedení log. 1 proběhne start motoru
D IN	19	5-11	[10] Reverzace	Po přivedení log. 1 pouze změní směr otáčení, bez aktivace startu
D IN	27	5-12	[2] Doběh (invertovaný vstup)	Po přivedení log. 0 je motor zastaven volným doběhem
D OUT	27	5-30	[0] Bez funkce	Ve výchozím nastavení se svorka 27 chová jako digitální vstup
D IN	29	5-13	[14] Konstantní otáčky	Po přivedení log. 1 udržuje konstantní otáčky motoru nastavené v parametru 3-11
D OUT	29	5-31	[0] Bez funkce	Ve výchozím nastavení se svorka 29 chová jako digitální vstup
D IN	32	5-14	[0] Bez funkce	
D IN	33	5-15	[0] Bez funkce	
GND (D)	20	–	0 V	Společná svorka 0V potenciálu pro svorky D OUT a +24 V (D)
D IN	37	5-19	[1] Poplach při STO	Při aktivaci STO je ponechán motor ve volném doběhu, měnič vyžaduje ruční reset

Svorky digitálních vstupů a výstupů jsou rozčleněny do čtyř skupin dle toho, zda se jedná o digitální vstup, výstup, svorku stabilizovaného napětí +24 V ss, nebo společnou zemní svorku. Svorky nesou číselné označení, jak jej lze nalézt na samotné svorkovnici, ve schématu zapojení i při parametrování měniče. Funkci dané svorky lze nastavovat v příslušném parametru (zde ze skupiny 5-**). Při prvním spuštění měniče je použito výchozí nastavení předvolené výrobcem. [3]

Maximální výstupní proud společný pro všechny 24V výstupy je 200 mA. Nastavení, zda se mají svorky 27 a 29 chovat jako digitální vstup, nebo výstup, lze provést v parametrech 5-01 a 5-02. Svorka 37 je vstupem pro funkci Safe Torque Off (materiály výrobce užívají zkratku STO), tedy bezpečnostní zastavení pohonu. V základní konfiguraci je mezi svorky 12 a 37 umístěna propojka, na svorce 37 je tedy napětí 24 V odpovídající log. 1. Po odebrání signálu log. 1 dojde k aktivaci STO. [9]

2.1.3 Analogové vstupní a výstupní signály měniče Danfoss

Další svorkovnice, rovněž umístěná na čelní stěně frekvenčního měniče pod ochranným krytem, slouží sadě analogových vstupů a výstupů. Pomocí nich lze nastavovat, resp. odečítat veličiny, které ze své podstaty nabývají více než dvou hodnot. Význam šestice svorek je zanesen do následující tabulky.

Tabulka 3 – Svorky analogových vstupů a výstupů měniče Danfoss. Sestaveno na základě [9] a [10]

Kategorie	Svorka	Param.	Výchozí funkce	Popis
GND (A)	39	–	0 V	Svorka 0V potenciálu pro analogový výstup
A OUT	42	6-50	[0] Bez funkce	Proudový analogový výstup
+10 V (A)	50	–	+10 V ss	Napětí 10 V pro obvody analogových vstupů
A IN	53	6-1*	Žádaná hodnota	Pro zadání žádané hodnoty otáček dle převodní charakteristiky
A IN	54	6-2*	Zpětná vazba	Pro poskytnutí zpětné vazby
GND (A)	55	–	0 V	Společná svorka 0V potenciálu pro svorky A IN

Také svorky 39 až 55 lze rozdělit podle jejich charakteru – zda se jedná o analogový vstup, výstup, svorku stabilizovaného napětí +10 V ss, nebo společnou zemní svorku pro analogové řídicí obvody. Číselné označení svorky je užíváno shodně na samotné svorkovnici,

v menu parametrů měniče nebo např. ve schématu zapojení. Funkce vstupně-výstupních analogových svorek lze nastavovat ve skupině parametrů 6-**. [3]

Nastavení, zda se mají svorky 53 a 54 chovat jako proudové, nebo napět'ové vstupy, lze provést přepínači S201 (A53) a S202 (A54). Tyto přepínače jsou umístěny pod modulem ovládacího panelu s LCD displejem (v literatuře výrobce označován zkratkou LCP), přistupovat k nim lze až po odpojení měniče od napájení a demontáži LCP. Zjištění stavu přepínačů je možné i prostřednictvím softwarové indikace, a to v parametrech 16-61 Svorka 53, nastavení přepínače a 16-63 Svorka 54, nastavení přepínače. [9]

2.1.4 Některé další funkce měniče Danfoss

V části 2.1.2 je stručně popsána funkce bezpečnostního zastavení pohonu STO. Tato patrně nenalezne využití při studentských cvičeních v laboratoři, a tak i během postupů spojených s přípravou této práce byla na svorkovnici měniče ponechána propojka, která přivádí na svorku 37 spojenou s STO napětí 24 V. Při nasazení u průmyslového pohonu by se naopak nabízelo svorky 12 a 37 propojit skrz tlačítko nouzového stopu, např. tzv. červený hříbek s aretací. Chování měniče po změně logické úrovně na svorce 37 pak lze nastavovat parametrem 5-19 Svorka 37, Bezpečné zastavení, kde jsou při základní konfiguraci měniče k dispozici tři možnosti. [10]

Tabulka 4 – Základní možnosti pro nastavení parametru 5-19. Sestaveno na základě [10]

Možnost	Popis
[0] Bez funkce	Měnič zůstává v chodu bez ohledu na logickou úroveň na svorce 37
[1] Poplach při bezpečnostním zastavení	Po aktivaci STO pohon volně doběhne a měnič vyžaduje reset prostřednictvím LCP či digitálního vstupu. Jedná se o výchozí nastavení.
[3] Samočinné vynulování při bezpečnostním zastavení	Po aktivaci STO pohon volně doběhne a měnič dovolí pokračovat v chodu ihned po přivedení log. „1“ na svorku 37

Na čelní stěně v blízkosti již popsaných vstupně-výstupních svorek se nachází svorkovnice (č. 61, 68 a 69), jež slouží ke komunikaci po lince RS485. Parametry menu měniče, které jsou svázány s touto komunikací, se nacházejí ve skupině 8-3* Nastavení FC portu. Na stejném panelu je umístěn i konektor, pomocí něhož a standardního USB kabelu lze měnič připojit k počítači, odkud je možné prostřednictvím softwarové aplikace MCT 10

provádět nastavení měniče. Další informace spojené s komunikací po sériové lince RS485 a USB byly popsány v projektu [3] a jsou k dispozici ve firemní literatuře Danfoss [9].

Jednou z forem zpětné vazby, kterou popisovaný měnič podporuje, je připojení teplotního čidla (např. termistoru typu PTC), které může být umístěno ve vinutí motoru. Svorku, skrz niž má měnič přijímat signál z termistoru, i následné chování lze samozřejmě nastavit v menu přístroje. Ve výchozí konfiguraci je nastavení takové, aby nebylo ani očekáváno připojení PTC, ani aplikováno ochranné chování. Dalším typem vstupních údajů, které měnič dokáže zpracovávat, jsou signály inkrementálního čidla otáček (IRC). To se připojuje ke svorkám č. 12 (+24 V (D)), 32 (kanál A), 33 (kanál B) a 20 (GND (D)) a další nastavení poskytne skupina parametrů 5-7*. [3]

V blízkosti svorek silových kabelů frekvenčního měniče Danfoss VLT FC-302 jsou umístěny také dva reléové výstupy. Jedná se o relé typu C (II. třídy bezpečnosti funkce), přičemž svorky prvního jsou označeny č. 01 až 03, svorky druhého pak č. 04 až 06. Kontakty relé jsou konstruovány na 240 V stř, 2 A v kategorii užití AC-1. Nastavení reléových výstupů se provádí parametry skupiny 5-4*. [9]

2.1.5 Prameny dalších informací k měniči Danfoss

Byť je popisovaný frekvenční měnič z jistého pohledu zajímavým zařízením, tato práce si neklade za cíl zcela rozebrat jeho vlastnosti a chování. Hlavním zdrojem v této oblasti je jistě literatura dodávaná výrobcem, především dostupný návod k obsluze [9]. Jeho součástí je i schéma základního zapojení s vyznačením napájecích i řídicích obvodů. Dále jsou uvedeny instrukce k mechanické i elektrické instalaci, vlastnosti silových i ovládacích konektorů a instrukce pro provoz v souladu s pravidly elektromagnetické kompatibility. [3]

Zmíněný uživatelský návod lze získat v tištěné formě přímo při nákupu zařízení, ale i kdykoliv dodatečně v elektronické podobě z webové databáze výrobce [11]. Pro daný typ měniče (či obecně zařízení) však výrobce může postupně aktualizovat jak návody, tak i samotné vestavěné softwarové vybavení. Pak se může stát, že elektronická verze materiálu, který byl dodán v tištěné podobě s nákupem, už není zařazena mezi tzv. publikovanými dokumenty, ale je třeba ji dohledávat v archivu. [3]

Dalším materiálem výrobce je programátorská příručka [10]. V ní lze nalézt rozsáhlejší informace k nastavování parametrů měniče – kromě struktury menu jsou zde totiž popsány i přípustné hodnoty jednotlivých parametrů. Pro zde popisovaný měnič společnosti

Danfoss byla takováto publikace vydána elektronicky v r. 2007 a opět je dohledatelná v on-line databázi výrobce [11]. V nabízeném filtru je však nutné požadovat zobrazení archivovaných dokumentů. [3]

2.2 SynRM společnosti KSB

2.2.1 Štítkové hodnoty SynRM KSB

Prvním zkoumaným elektrickým strojem pro zde popisované pracoviště má být SynRM od společnosti KSB, opatřený nezvyklým zlatým nátěrem. Při cvičném sestavování pracoviště byly odečteny a do následující tabulky zaznamenány hodnoty z jeho štítku.

Tabulka 5 – Štítkové hodnoty SynRM KSB [3]

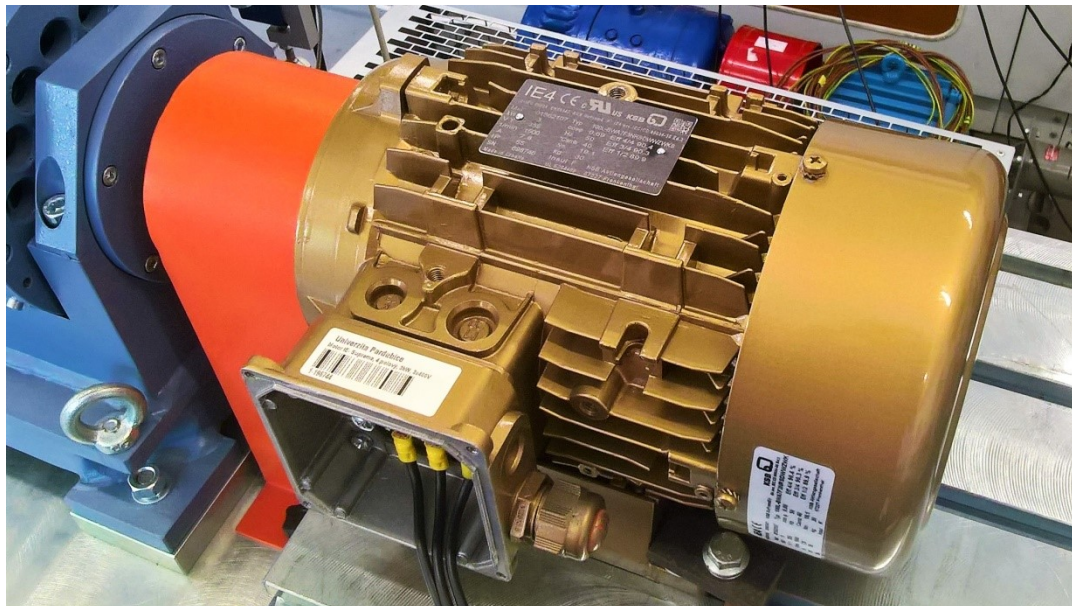
Parametr	Hodnota	Jednotka	Poznámka
Obchodní označení	KSB SuPremE		Made in Croatia
Materiálové číslo	01562107		
Typové číslo	100L		BWA7F3NRSDWWZKS
Sériové číslo	698746		
Napájení	3f		Dle normy IEC/CD 60034-30 Ed. 2
Jmenovitý výkon		3 kW	
Jmenovité napětí		355 V	Při zapojení vinutí do hvězdy
Jmenovitá frekvence		50 Hz	Frekvence napájecího napětí
Jmenovité otáčky		1 500 ot.·min ⁻¹	
Jmenovitý proud		7,8 A	
Jmenovitý moment		19,1 Nm	
Krytí (ochrana)		IP 55	
Hmotnost		30 kg	
Teplota okolí		40 °C	
Teplotní třída		F	Pro izolaci, odpovídá max. 155 °C
Účinník		0,69	
Třída účinnosti		IE4	
Účinnost Eff 4/4		90,4 %	Při jmenovitém zatížení
Účinnost Eff 3/4		90,3 %	Při zatížení na 75 % jmenovitého
Účinnost Eff 1/2		89,9 %	Při zatížení na 50 % jmenovitého

Tabulka 5 napovídá, že dle údajů výrobce SynRM splňuje podmínky pro třídu účinnosti IE4. V roce 2016, kdy byl tento konkrétní stroj vyroben, šlo o nejvyšší mezinárodně definovanou třídu účinnosti, které bylo dosahováno. Plnění tohoto standardu je doloženo vyznačením účinnosti při třech různých úrovních zatížení, přičemž už při 50 % zatížení má být dosahováno účinnosti 89,9 %. V této hodnotě je dle KSB zahrnut vliv ztrát v motoru vlivem tvaru proudu z polovodičového měniče, avšak dosažení této účinnosti je garantováno jen ve spojení s měniči KSB PumpDrive 2. [12]

2.2.2 Prameny dalších informací k SynRM KSB

Společnost KSB nabízí své katalogy on-line ke stažení z produktové stránky věnované motorům řady SuPremE, a to např. v české [13] jazykové verzi. V takovém dokumentu lze na základě čísla ze štítku elektromotoru zjistit další údaje i odlišnosti od jiných strojů téže řady. [3]

V instalačním a obsluhovacím manuálu je dále uvedeno, co je třeba dodržet před spuštěním SynRM, resp. celého pohonu. Mezi kritéria samozřejmě patří řízení stroje z polovodičového měniče, ale také např. prověření izolačního stavu vodičů vinutí. [14]



Obrázek 6 – SynRM KSB SuPremE 100L pro pracoviště KEEZ

2.3 SynRM společnosti ABB

2.3.1 Štítkové hodnoty SynRM ABB

Druhým zkoumaným elektrickým strojem má být SynRM od společnosti ABB, opatřený modro-šedým nátěrem. Poslední štítkové údaje, které je třeba doplnit, popisují právě tento stroj:

Tabulka 6 – Štítkové hodnoty SynRM ABB

Parametr	Hodnota	Jednotka	Poznámka
Obchodní označení	ABB M3AL		100 LB 4
Montážní pozice	IMB3/IM1001		
Kód produktu	3GAL		102523-ASB436661
Rok výroby	2016		No. 3G1F1620328489
Sériové číslo	1167640-2		oba směry otáčení
Napájení	3f		Dle normy IEC 60034-1
Jmenovitý výkon		3 kW	
Jmenovité napětí		380 V	Při zapojení vinutí do hvězdy
Napětí sítě		400 V	
Jmenovitá frekvence		50 Hz	Frekvence napájecího napětí
Jmenovité otáčky		1 500 ot.·min ⁻¹	
Maximální otáčky		2 100 ot.·min ⁻¹	
Jmenovitý proud		7,1 A	
Krytí (ochrana)	IP 55		
Hmotnost		23 kg	
Teplotní třída	F		Pro izolaci, odpovídá max. 155 °C
Účinnost		85,5 %	
Zatěžovací cyklus	S9		Neperiodické zatížení
Ložisko levé	6306-2Z/C3		Na straně výstupu hřídele z motoru
Ložisko pravé	6205-2Z/C3		Na straně ventilátoru

U zkoumaného stroje není výrobcem udána mezinárodní třída účinnosti IE. Uváděná hodnota 85,5 % ve jmenovitém pracovním bodě však dle tabulek dostupných v katalogu [15]

koresponduje se třídou IE2. U stroje ABB tedy očekáváme účinnost srovnatelnou s ASM, na němž budou provedena srovnávací měření v části 5, ale o dvě třídy nižší než u SynRM KSB.

2.3.2 Prameny dalších informací k SynRM ABB

Další technické údaje a instrukce k provozování SynRM výrobce ABB jsou k dispozici v elektronické podobě na webových stránkách [16]. Tam je zveřejněn např. aktuální katalog SynRM ve třídě účinnosti IE5 [17].

Konkrétní model SynRM ABB, který je připraven pro pracoviště KEEZ, je zmíněn ve starším katalogu [4]. Tam nalezneme klíč, díky němuž lze z kódu produktu určit některé vlastnosti stroje. Spojení „3GAL“ na pozicích 1 až 4 znamená SynRM chlazený ventilátorem v hliníkovém rámu velikosti 90 až 132. Číslice „10“ na pozicích 5 a 6 odpovídají velikosti rámu 10 dle IEC. Číslice „2“ na pozici 7 značí čtyřpólový stroj. Písmeno „A“ na pozici 12 znamená patkové provedení, následující písmeno „S“ pak síťové napětí 400 V stř, 50 Hz. Na 14. pozici následuje „C“ odpovídající vysokovýkonnému SynRM bez udané třídy účinnosti. V závěru kódu jsou číslice značící konkrétní variantu – konkrétně „436“ informuje o zabudovaných PTC termistorech ve statorovém vinutí (tři kusy v sérii, do 150 °C), „661“ pak o IRC čidlu Hohner Serie 59 s 1 024 pulsy na otáčku. [3]



Obrázek 7 – SynRM ABB M3AL 100 LB 4 pro pracoviště KEEZ

2.3.3 Základní údaje IRC čidla na SynRM ABB

Základní údaje v předchozí části vzpomenutého IRC čidla uvádí následující tabulka, přičemž více informací je k dispozici na webu výrobce [18]. S ohledem na uvedené informace je patrné, že stíněný přívodní kabel IRC čidla má osm žil – dvě pro napájení a šest pro výstupní signály.

Tabulka 7 – Základní údaje IRC čidla Hohner na SynRM ABB

Označení	59-12111-1024
Krytí	IP65
Způsob uchycení	Rear clamp (zadní stěna motoru)
Průměr hřídele	12 mm
Výstupní signály	A, \bar{A} , B, \bar{B} , 0, $\bar{0}$
Napájení	11 až 30 V ss
Počet pulsů na otáčku	1 024

3 MĚŘENÍ PROVEDENÁ PŘI ZPROVOZŇOVÁNÍ SYNRM

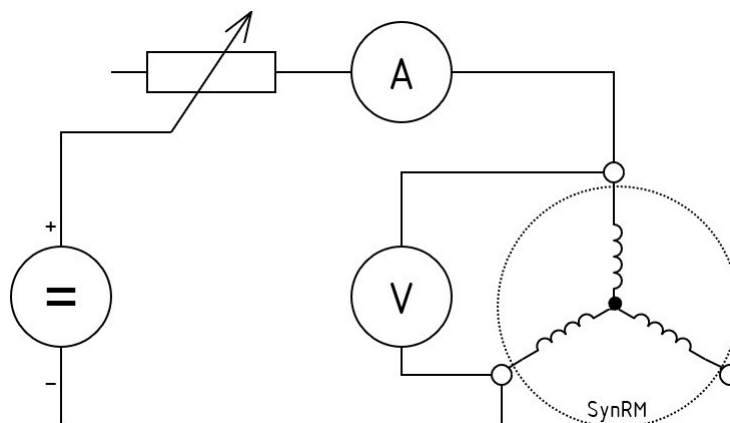
V této části jsou popsána jednoduchá měření, která byla na SynRM provedena při jejich zprovoznění „na stole“, tj. bez uchycení do stojanu dynamometru.

3.1 Měření hlavních parametrů SynRM

Vzpomeneme-li na konstrukční řešení statoru SynRM, jak bylo popsáno v části 1.1.1, jeho vinutí je principiálně složeno ze tří cívek zapojených do hvězdy. Každá z nich vykazuje hodnotu čistě reálného (ohmického) odporu R a indukčnosti L , která způsobuje čistě imaginární reaktanci X_L . Kapacitní charakter se předpokládá zanedbatelný. Geometrickým součtem vektorů, které reprezentují ohmický odpor R a indukční reaktanci X_L , vznikne komplexní impedance Z . S těmito poznatky pracují následující odstavce, neboť jde o parametry, podle nichž lze SynRM od různých výrobců vzájemně porovnávat. [3]

3.1.1 Stanovení ohmického odporu statorového vinutí

Stanovit elektrický odpor vodiče (či prvku obecně) lze Ohmovou metodou, kdy je třeba sestavit obvod se zdrojem stejnosměrného napětí, ampérmetrem, voltmetrem a prověřovaným prvkem, jak ukazuje následující obrázek. [3]



Obrázek 8 – Schéma obvodu pro měření odporu vinutí Ohmovou metodou [3]

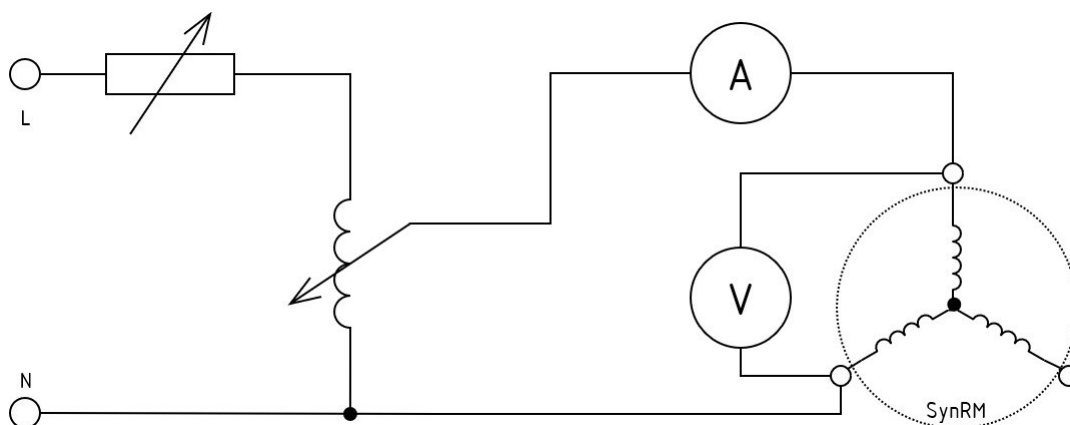
Z úbytku napětí na spotřebiči a velikosti proudu, který jím protéká, lze pomocí Ohmova zákona vypočítat jeho odpor. Měření se nabízí provést ve dvou bodech, zde byly hodnoty veličin pro výpočet odporu odečteny vždy při protékajícím proudu přibližně 3 a 6 A. Získané údaje uvádí následující tabulka včetně výsledku měření digitálním ohmmetrem (na pátém řádku), které bylo provedeno pro porovnání. [3]

Tabulka 8 – Hodnoty získané při měření odporu vinutí SynRM [3]

	SynRM KSB		SynRM ABB	
$U; [U] = V$	7,21	14,02	4,87	9,82
$I; [I] = A$	3,1	6,0	3	6
$R; [R] = \Omega$	<u>2,326</u>	<u>2,337</u>	<u>1,623</u>	<u>1,637</u>
$R_{výsl}; [R_{výsl}] = \Omega$	<u>2,33</u>		<u>1,63</u>	
$R_{multi}; [R_{multi}] = \Omega$	2,7		2,1	

3.1.2 Stanovení indukčnosti statorového vinutí

Také při zjišťování indukčnosti prvku lze v zásadě vycházet ze zapojení pro Ohmovu metodu, avšak využít je zdroj střídavého napětí, zde o průmyslové frekvenci 50 Hz a při regulaci autotransfornátorem o velikosti okolo 90 V. Přesnější představu nabídne následující obrázek.



Obrázek 9 – Schéma obvodu pro určení impedance vinutí Ohmovou metodou [3]

Pak i výsledek měření ukáže „střídavý odpor“, tedy celkovou impedanci vinutí. Z ní lze při známém reálném odporu pomocí Pythagorovy věty určit indukční reaktanci. Z dalšího vztahu se nabízí po krátké úpravě dopočíst indukčnost prověřovaného prvku:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \Rightarrow L = \frac{X_L}{2\pi \cdot f} = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi \cdot f} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}}{2\pi \cdot f} \quad (5)$$

X_L	indukční reaktance v Ω	
f	frekvence protékajícího střídavého proudu v Hz	
L	indukčnost prvku v H	[3]
Z	celková impedance v Ω	
R	elektrický odpor v Ω	

U úbytek napětí ve V
 I protékající střídavý proud v A

Základní princip využívaný SynRM koresponduje s tím, že příspěvek indukčnosti pro každou fázi se mění v závislosti na natočení rotoru. Proto je na místě toto měření provést v závislosti na úhlovém natočení rotoru. Pro nalezení extrému impedance, a tedy i indukčnosti bylo měření nejprve provedeno po 30° krocích a potvrdilo, že průběh indukčnosti se přibližně opakuje po 90°. Detailnější měření bylo provedeno pro jeden ze čtyř „kvadrantů“ u každého SynRM. Přitom bylo zřejmé, že moment je do jisté míry vytvářený i při částečném napájení jen sníženým napětím a při otáčení rotorem se mění obdobně jako impedance, resp. indukčnost. [3]

Další možností, jak určit neznámou indukčnost prvku, je využití digitálního měřiče, v češtině někdy označovaného jako LCR můstek, v angličtině prostě LCR meter. Ten dokáže po úvodní kalibraci a zvolení frekvence měřicího signálu (až do 100 kHz) zobrazit elektrický odpor R , indukčnost L a kapacitu C prvku. Nejnižší nabízenou měřicí frekvencí je 100 Hz (v případě měřiče APPA 703 dostupného v laboratoři KEEZ), napětíová úroveň odpovídá 9V baterii. Z toho vyplývá, že číselné hodnoty indukčnosti, získané LCR měřičem a dopočtem z Ohmovy metody, se liší – beze změny zůstává pouze úhlová poloha extrémů. [3]



Obrázek 10 – Pracoviště pro měření Ohmovou metodou na SynRM ABB

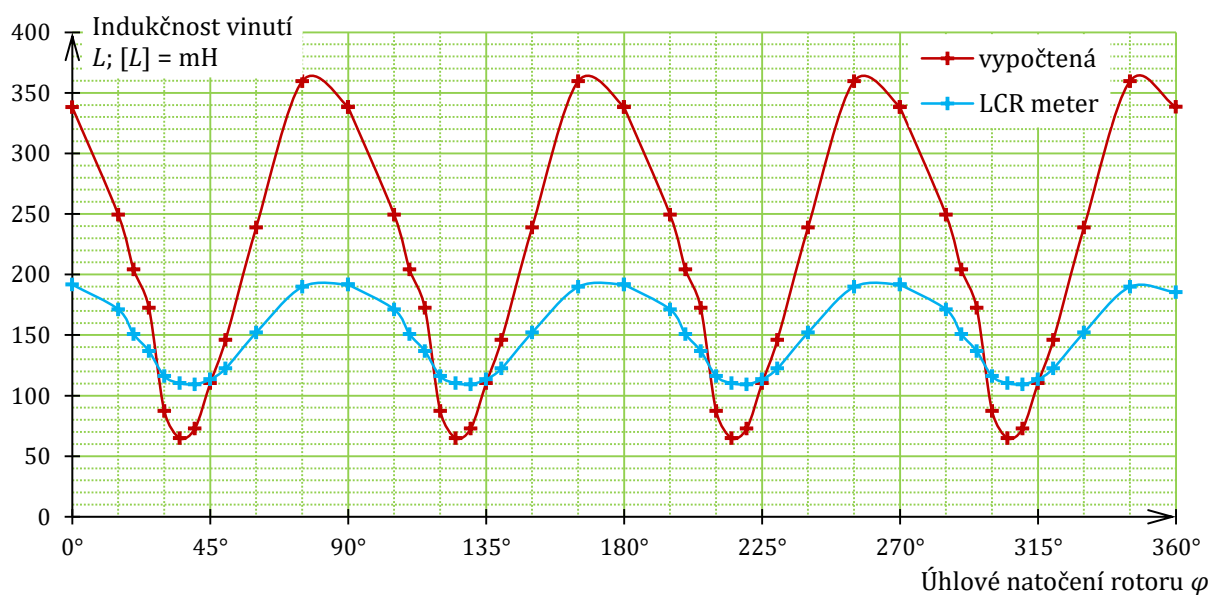
3.1.3 Závislost indukčnosti na úhlu natočení rotoru pro SynRM KSB

Při hledání extrémů indukčnosti v rámci 90° natočení rotoru SynRM KSB byly naměřeny a dopočteny hodnoty, které uvádí následující tabulka. Indukčnost $L_{vypoč}$ je vypočtena dle vztahu (5), L_{meter} byla zjištěna LCR měřičem.

Tabulka 9 – Hodnoty získané při měření a výpočtu indukčnosti vinutí SynRM KSB [3]

Ohmický odpor vinutí $R = 2,33 \Omega$				
Frekvence měřícího napětí $f = 50 \text{ Hz}$				
φ	$U; [U] = \text{V}$	$I; [I] = \text{A}$	$L_{vypoč};$ [$L_{vypoč}$] = mH	$L_{meter};$ [L_{meter}] = mH
0°	90,3	0,85	338,08	191,7
15°	90,1	1,15	249,28	171,2
20°	89,9	1,40	204,27	150,8
25°	89,5	1,65	172,50	136,8
30°	88,2	3,20	87,42	116,1
35°	87,1	4,25	64,81	110,3
40°	87,4	3,80	72,83	109,4
45°	88,6	2,55	110,35	113,4
50°	89,5	1,95	145,91	122,4
60°	90,1	1,20	238,88	152,0
75°	90,4	0,80	359,61	189,8
90°	90,4	0,85	338,45	185,3

Následuje graf závislosti indukčnosti na úhlové poloze rotoru pro stroj KSB. Hodnoty vycházejí z podrobnějšího měření v jednom z „kvadrantů“, jehož výsledky byly „roztáhány“ do celého rozsahu 360°.



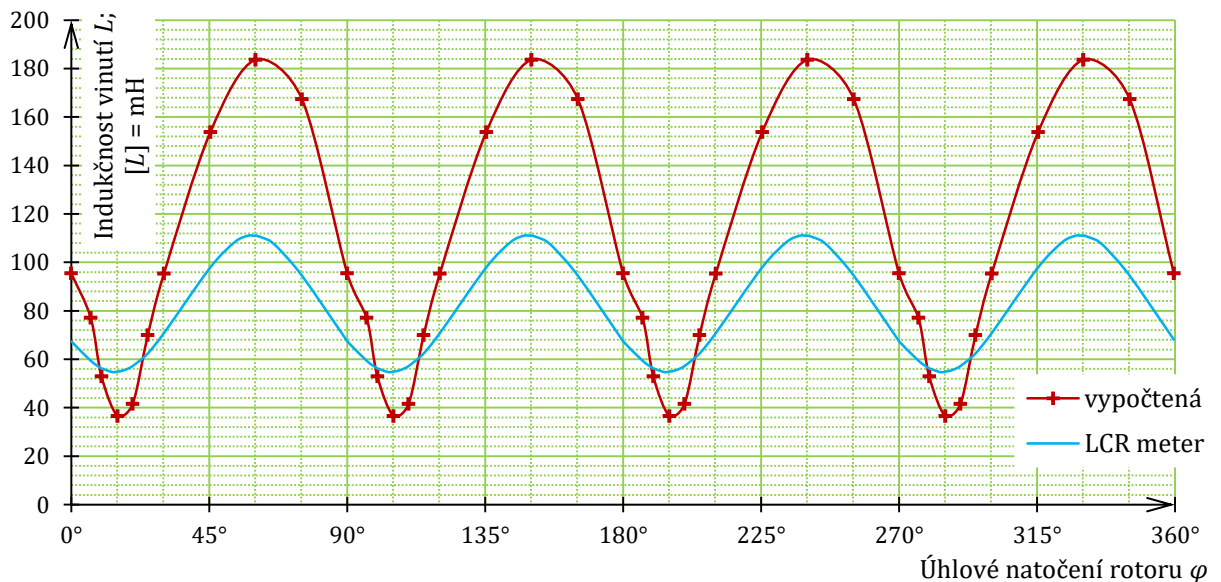
Obrázek 11 – Indukčnost u SynRM KSB v závislosti na úhlu natočení [3]

3.1.4 Závislost indukčnosti na úhlu natočení rotoru pro SynRM ABB

Při hledání extrémů indukčnosti v rámci 90° natočení rotoru SynRM ABB byly naměřeny a dopočteny hodnoty, které uvádí následující tabulka a které byly také vyneseny do grafu s „roztažením“ do celé otáčky 360°. Indukčnost $L_{vypoč}$ je vypočtena dle vztahu (5), L_{meter} byla zjištěna LCR měřičem.

Tabulka 10 – Hodnoty získané při měření a výpočtu indukčnosti vinutí SynRM ABB [3]

Ohmický odpor vinutí $R = 1,63 \Omega$				
Frekvence měřicího napětí $f = 50 \text{ Hz}$				
φ	$U; [U] = \text{V}$	$I; [I] = \text{A}$	$L_{vypoč};$ [$L_{vypoč}$] = mH	$L_{meter};$ [L_{meter}] = mH
0°	60,1	2,00	95,51	68,7
5°	59,5	2,45	77,13	60,9
10°	58,5	3,50	52,95	56,4
15°	58,0	5,00	36,56	54,9
20°	58,6	4,45	41,59	56,9
25°	59,5	2,70	69,95	62,4
30°	60,0	2,00	95,35	69,4
45°	60,4	1,25	153,72	97,1
60°	60,6	1,05	183,64	111,4
75°	60,5	1,15	167,38	95,3
90°	60,1	2,00	95,51	68,7

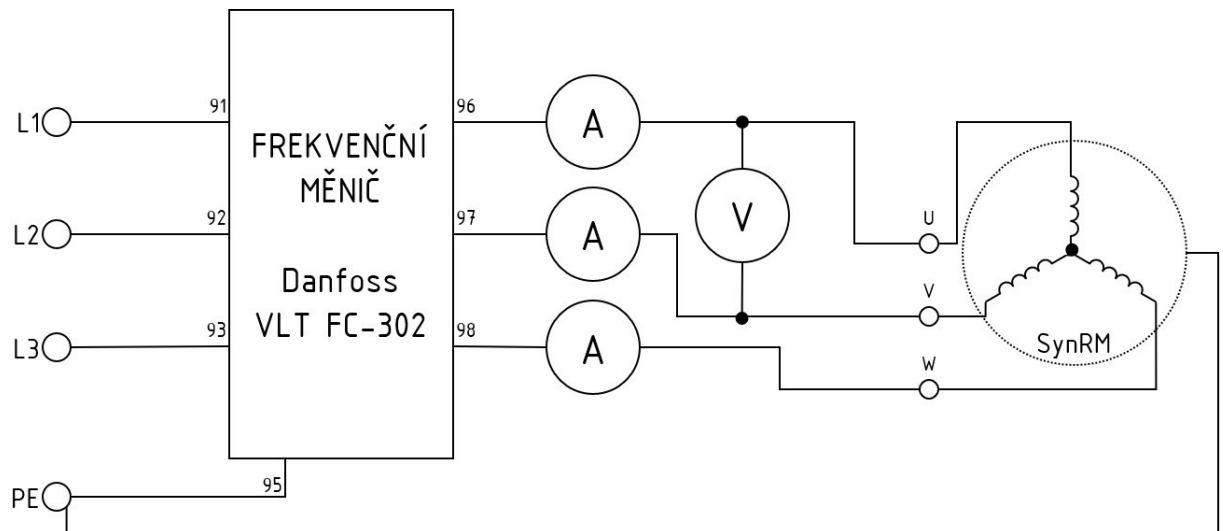


Obrázek 12 – Indukčnost u SynRM ABB v závislosti na úhlu natočení [3]

Napájecí a měřicí přístroje, které byly využity při měření hlavních parametrů SynRM, jak je zde popsáno, jsou uvedeny v části 3.4.

3.2 Měření na SynRM při chodu naprázdno

Při chodu SynRM naprázdno se již předpokládá jeho napájení z frekvenčního měniče. I tak má pracoviště pro prověření chodu naprázdno velmi jednoduché zapojení, jak zaznamenává následující obrázek. Oba prvky s kovovou kostrou je třeba připojit ochranným vodičem k PE svorce. [3]



Obrázek 13 – Zapojení pracoviště pro měření na SynRM naprázdno [3]

Po připojení měniče k napájení 3x 400 V stř, 50 Hz je možné započít s nastavováním jeho parametrů a se zprovozněním pohonu. Pro místní obsluhu přístroje slouží grafický ovládací panel LCP. Skrze něj je možné otevřít hlavní menu, které nabídne přístup ke všem programovatelným parametrům i těm, které jsou určeny pouze ke čtení. Výrobce měniče Danfoss doporučuje v hlavním menu zkontrolovat, resp. upravit nejprve základní nastavení týkající se země nasazení a jazyka. Rovněž lze sjednotit jazyk displeje s manuálem, který má uživatel k dispozici, přestože anglické výrazy užívané ve struktuře menu jsou zpravidla srozumitelné. [3]

Ve výchozím nastavení je svorka 27 (s odpovídajícím parametrem 5-12) nastavena na invertovaný signál doběhu, tj. měnič očekává na tomto digitálním vstupu log. „1“, jinak je aktivní funkce „doběh“, která zabrání roztočení motoru. Pro rozběh motoru je tedy nutné buď umístit propojku mezi řídicí svorky 12 a 27, nebo změnit hodnotu vzpomenutého parametru. Pro eliminaci bezpečnostního stopu se předpokládá umístění propojky mezi svorky 12 a 37. [9]

Skutečností odpovídající hodnoty je potřeba zvolit v parametrech 1-10 Konstrukce motoru a 1-2* Data motoru. Další vlastnosti, např. odpor statorového vinutí nebo indukčnost v osách d a q , jsou pro měnič směrodatné při výpočtech matematického modelu řízeného stroje. Lze je rovněž nastavit manuálně, druhou možností však je využití samočinného procesu přizpůsobení parametrů měniče k připojenému motoru (v literatuře Danfoss užívána zkratka AMA z anglického Automatic Motor Adaptation). Po jeho dokončení může následovat uvedení SynRM do chodu tlačítkem Hand On a zadáním žádané hodnoty otáček. [3]



Obrázek 14 – Ovládací a indikační panel LCP měniče Danfoss VLT FC-302 před oživením

3.2.1 Chod naprázdno SynRM KSB

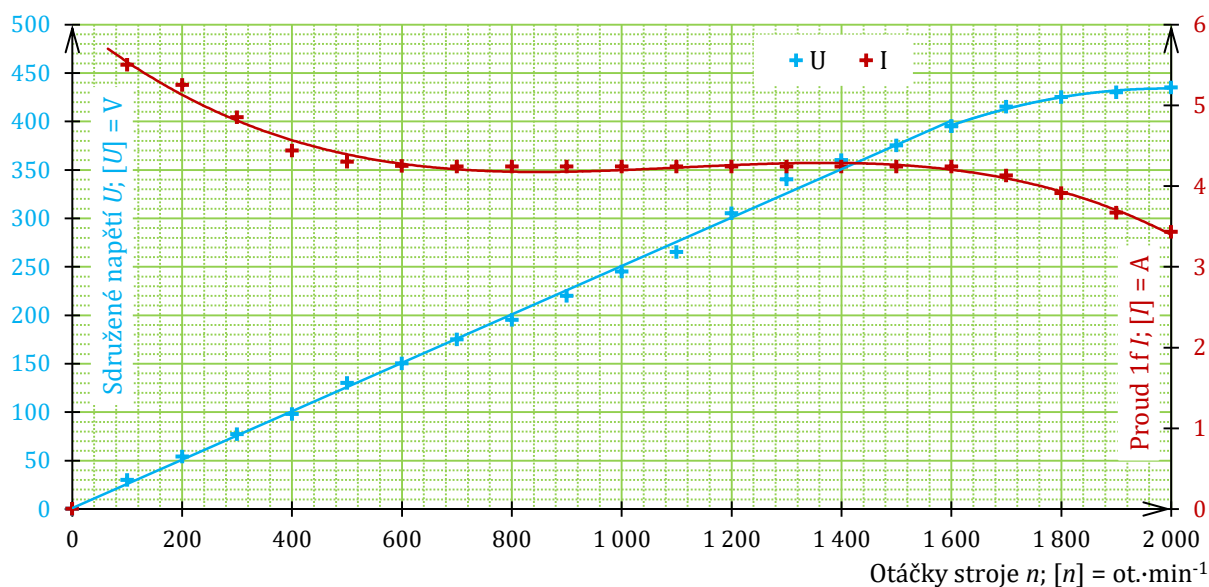
Při měření na stroji s chodem naprázdno lze zachytit závislost sdruženého napětí a střídavého proudu jednou přívodní fází na otáčkách motoru. Hodnoty odečtené z ampérmetru, který byl pro vyrovnání indukčnosti umístěn do všech tří fází, a voltmetru, který měřil sdružené napětí, zaznamenává Tabulka 11 a Obrázek 15. [3]

Sdružené napětí, kterým je SynRM napájen, téměř lineárně roste až k 420 V. Dále není jeho růst možný vzhledem k omezení, které je dáno napětím třífázové sítě, a tedy i stejnosměrného meziobvodu měniče. Regulační obvod tedy přistoupí k principu odbuzování – regulaci tokotvorné složky proudu na nižší hodnotu. Tím dojde ke zmenšení vektoru I , a tak klesá i zde naměřený proud. [3]

Tabulka 11 – Měření na SynRM KSB naprázdno [3]

$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$U; [U] = \text{V}$	$I; [I] = \text{A}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$U; [U] = \text{V}$	$I; [I] = \text{A}$
0	0	0,00	1 100	265	4,24
100	30	5,50	1 200	305	4,24
200	54	5,25	1 300	340	4,24
300	77	4,85	1 400	360	4,24
400	98	4,44	1 500	375	4,24
500	130	4,30	1 600	395	4,24
600	150	4,25	1 700	415	4,13
700	175	4,24	1 800	425	3,91
800	195	4,24	1 900	430	3,67
900	220	4,24	2 000	435	3,43
1 000	245	4,24			

Během postupného zvyšování otáček byl u stroje KSB zaznamenán neklidný chod v okolí rychlosti $500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že SynRM nebyl uchycen k podložce, vibrace znamenaly i jeho pohyb po pracovním stole. Výrobce měniče doporučuje v takovém případě korigovat parametr 1-14 Zesílení tlumení na 110 % až 200 % výchozí hodnoty. Pokud by nedošlo ke zklidnění chodu a stroj hrozil podobným chováním i v ostrém provozu, nabízí se definování pásma zakázaných otáček (rovněž dostupné v hlavním menu měniče, skupina parametrů 4-6*). [9]



Obrázek 15 – Závislost napětí a proudu na otáčkách SynRM KSB (chod naprázdno) [3]

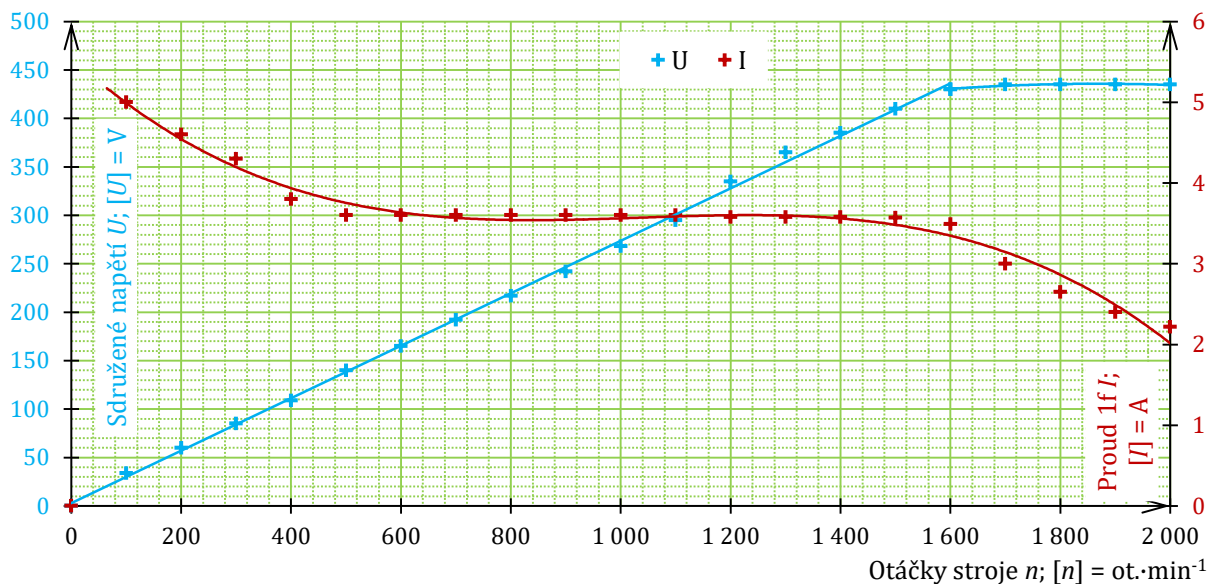
3.2.2 Chod naprázdno SynRM ABB

Také při měření na stroji ABB s chodem naprázdno byla zachycena závislost sdruženého napětí a střídavého proudu jednou přívodní fází na otáčkách motoru. Odečtené hodnoty, opět v rozsahu 0 až 2 000 ot. \cdot min⁻¹, zaznamenává Tabulka 12 a Obrázek 16.

Tabulka 12 – Měření na SynRM ABB naprázdno [3]

$n; [n] =$ $= \text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$	$U; [U] = \text{V}$	$I; [I] = \text{A}$	$n; [n] =$ $= \text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$	$U; [U] = \text{V}$	$I; [I] = \text{A}$
0	0	0,00	1 100	295	3,60
100	34	5,00	1 200	335	3,58
200	60	4,60	1 300	365	3,58
300	85	4,30	1 400	385	3,58
400	109	3,80	1 500	410	3,57
500	140	3,60	1 600	430	3,49
600	165	3,60	1 700	435	3,00
700	192	3,60	1 800	435	2,65
800	217	3,60	1 900	435	2,40
900	242	3,60	2 000	435	2,22
1 000	268	3,60			

Při pohledu na grafy závislosti elektrických veličin na otáčkách je zřejmý velmi podobný tvar u obou SynRM. Po dosažení maxima napětí, které je dáno nabitím kondenzátorů stejnosměrného meziobvodu měniče, začíná klesat protékající proud. [3]



Obrázek 16 – Závislost napětí a proudu na otáčkách SynRM ABB (chod naprázdno) [3]

Napájecí a měřicí přístroje, které byly využity při měření na SynRM naprázdno, jak je zde popsáno, jsou uvedeny v části 3.4.

3.3 Měření statického momentu SynRM

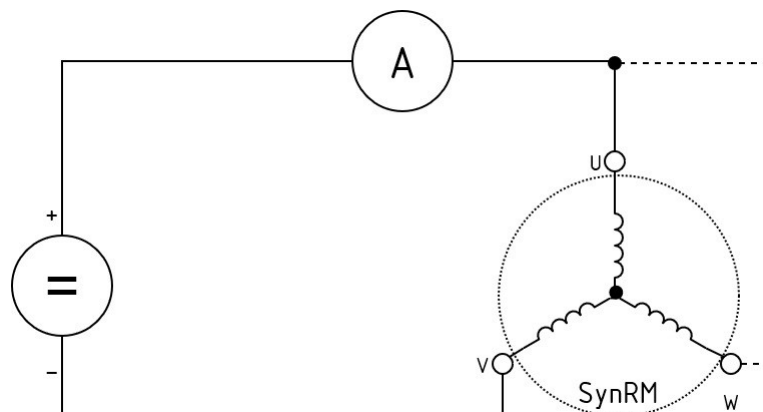
Je-li pro těleso definována osa otáčení a k ní kolmá rovina, v níž působí vnější síla, jejíž vektor neprochází průsečíkem osy a roviny, lze statický moment síly vzhledem k ose určit součinem velikosti síly a vzdálenosti působíště síly od osy otáčení (tzv. délka ramene). Pro určení statického momentu, který SynRM vytváří, je tedy potřeba definovat rameno (spojnici působíště síly a osy otáčení) a změřit působící sílu. K prvně jmenovanému může pomoci např. dřevěná deska, která bude na jednom konci připevněna do spojky na výstupu hřídele ze SynRM. Na jejím druhém konci je třeba do odměřené vzdálenosti připravit otvor pro uchycení siloměru. [3]

V případě cejchování stupnice v kilogramech (pro hmotnost váženého předmětu) je třeba dříve zmíněný součin doplnit o tíhové zrychlení. Finální podoba vztahu pro výpočet vytvářeného statického momentu pak bude:

$$M = F_G \cdot r = m \cdot g \cdot r \quad (6)$$

M	statický moment síly vzhledem k ose otáčení v Nm	
F_G	tíhová síla v N, kterou působí vážené těleso na mincích	
r	vzdálenost působíště síly od osy otáčení v m	[3]
m	hmotnost odečtená na stupnici mincíře v kg	
$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	tíhové zrychlení v zeměpisných podmínkách České republiky	

Elektrické zapojení pracoviště pro tento případ neobsahuje frekvenční měnič. Naopak k napájení poslouží laboratorní zdroj stejnosměrného napětí s regulovatelným výstupem v rozsahu 0 až 30 V, jímž bude třeba dostavovat konstantní velikost proudu vinutím. [3]



Obrázek 17 – Schéma zapojení pro měření statického momentu SynRM [3]

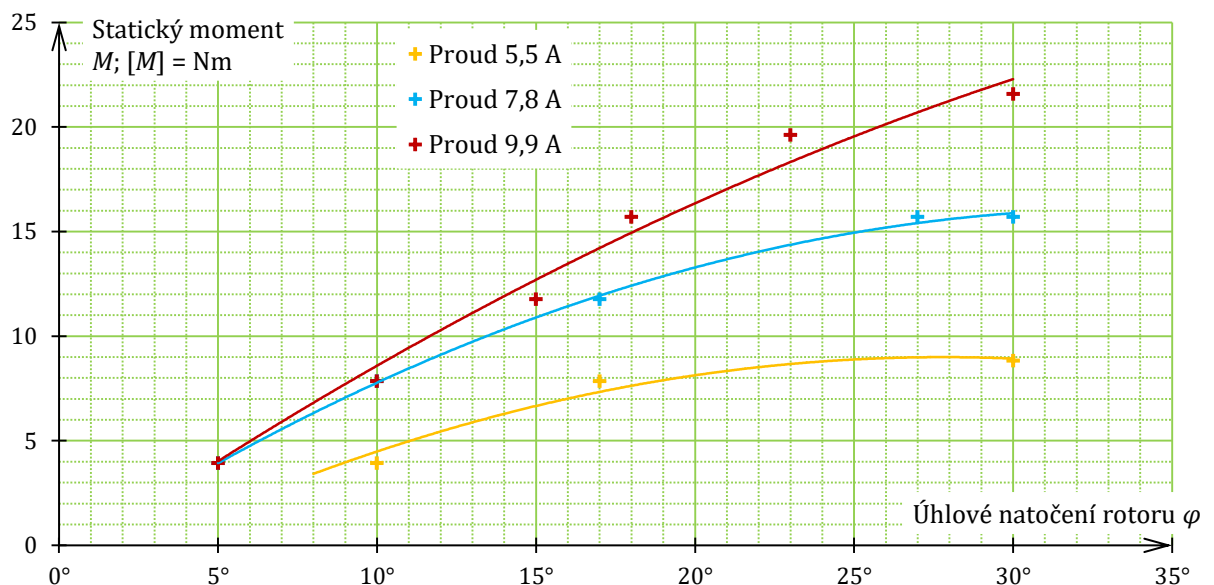
3.3.1 Statický moment u SynRM KSB

V první etapě tohoto měření byl mincíř uchycen do otvoru ve vzdálenosti 20 cm od hřídele motoru a napájení připojeno ke svorkám U, V. Použita byla postupně tři různá nastavení zdroje – s protékajícím proudem 5,5 A, 7,8 A (což je jmenovitá hodnota) a 9,9 A. Je také třeba popsat, které veličiny jsou při tomto měření sledovány – jistě se nabízí prověřit závislost statického momentu na úhlovém natočení rotoru. Ve snadno identifikovatelných bodech natažení pružiny mincíře (např. celé sudé kilogramy) lze odečíst z dočasně připevněné úhlové stupnice na čele SynRM aktuální polohu rotoru. Následující tabulka uvádí zjištěné hodnoty po přepočtu dle vztahu (6). [3]

Tabulka 13 – Hodnoty statického momentu SynRM KSB [3]

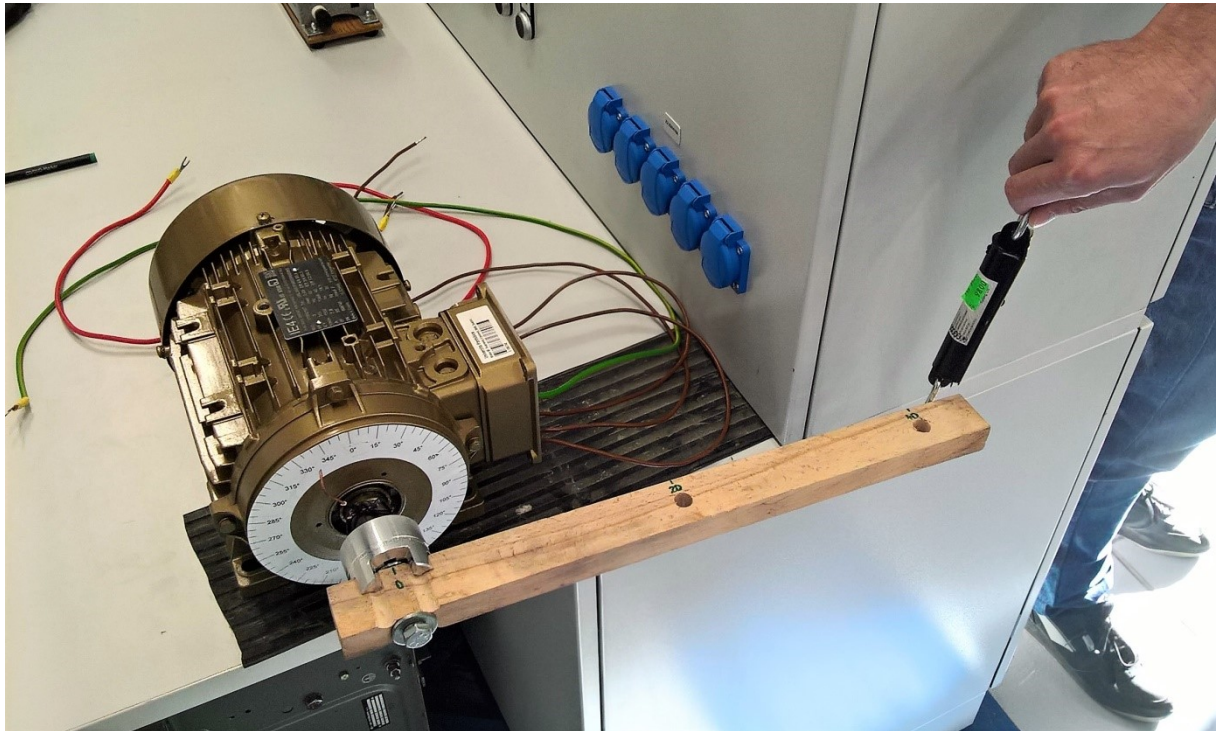
Zapojení jen vinutí U (+), V (-); rameno $r = 20$ cm					
5,5 A ~ 70,5 % I_n		7,8 A ~ 100 % I_n		9,9 A ~ 127 % I_n	
φ	$M; [M] = \text{Nm}$	φ	$M; [M] = \text{Nm}$	φ	$M; [M] = \text{Nm}$
10°	3,92	5°	3,92	5°	3,92
17°	7,85	10°	7,85	10°	7,85
30°	8,83	17°	11,77	15°	11,77
		27°	15,70	18°	15,70
		30°	15,70	23°	19,62
				30°	21,58

Po vynesení odečtených hodnot do grafu očekáváme závislost ve tvaru části sinusoidy, jak vyplývá z obrázků uvedených v části 3.1.



Obrázek 18 – Závislost statického momentu na úhlovém natočení rotoru SynRM KSB [3]

Za „nulovou“ polohu je považována ta, do níž se při připojeném stejnosměrném napájení rotor samočinně natáčí. Po překročení rysky 30° bylo v momentu zřejmé zakolísání a tento se až do 45° nezvětšoval. Následně se rotor ocitl v dalším „kvadrantu“, jemuž už náležela nová „nulová“ poloha, do níž se hřídel bez vnějšího působení natočil. [3]



Obrázek 19 – Pracoviště pro měření statického momentu SynRM KSB [3]

Následně bylo podobné měření závislosti statického momentu na úhlovém natočení rotoru stroje provedeno při napájení přivedeném na svorky vinutí U, V i W (vizte Obrázek 17, čárkovaná propojka). Maxima momentu, kterých bylo dosahováno, byla zhruba o 12 % menší než ve zde popsaném případě. Podrobnější rozbor alternativního měření nabízí dokument ročníkového projektu [3].

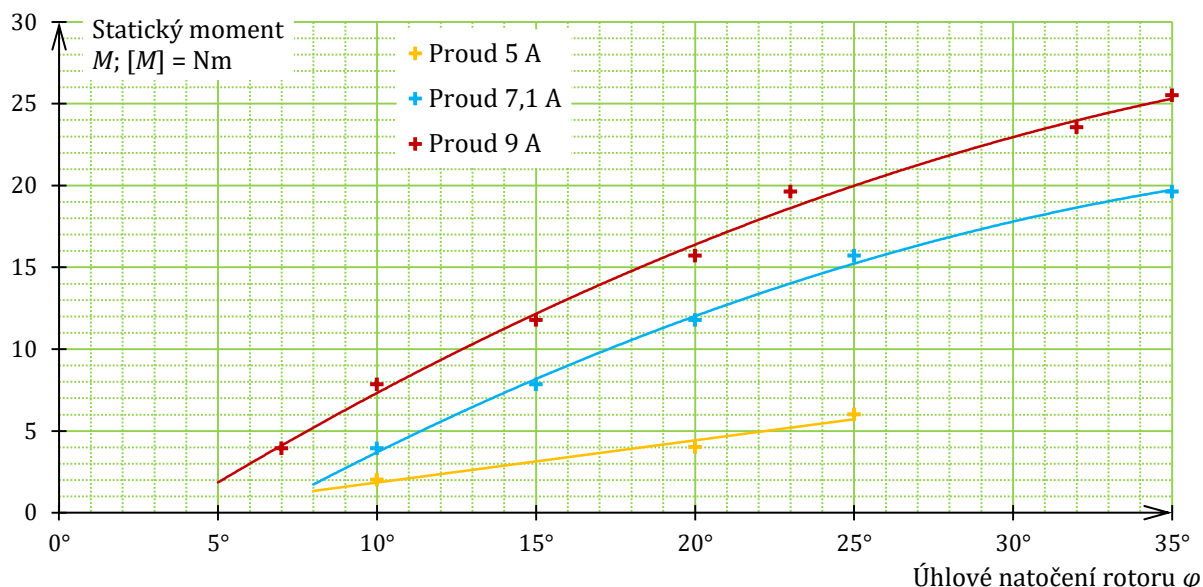
3.3.2 Statický moment u SynRM ABB

Rovněž při prověřování SynRM ABB byl mincír uchycen do otvoru ve vzdálenosti 20 cm od hřídele motoru a napájení připojeno ke svorkám U, V. S ohledem na jmenovitý proud motoru byla použita postupně tři různá nastavení zdroje – s protékajícím proudem 5 A, 7,1 A (což je jmenovitá hodnota) a 9 A. Následující tabulka uvádí zjištěné hodnoty momentu po přepočtu z odečtených „hmotností“ dle vztahu (6). [3]

Tabulka 14 – Hodnoty statického momentu SynRM ABB [3]

Zapojení jen vinutí U (+), V (-); rameno $r = 20$ cm					
5 A ~ 70,5 % I_n		7,1 A ~ 100 % I_n		9 A ~ 127 % I_n	
φ	$M; [M] = \text{Nm}$	φ	$M; [M] = \text{Nm}$	φ	$M; [M] = \text{Nm}$
10°	3,92	10°	3,92	7°	3,92
20°	7,85	15°	7,85	10°	7,85
25°	11,77	20°	11,77	15°	11,77
		25°	15,70	20°	15,70
		35°	19,62	23°	19,62
				32°	23,54
				35°	25,51

Po překročení rysky 35° bylo v momentu zřejmé zakolísání a tento se až do 45° nezvětšoval. Po vynesení odečtených hodnot do grafu opět očekáváme závislost ve tvaru části sinusoidy:

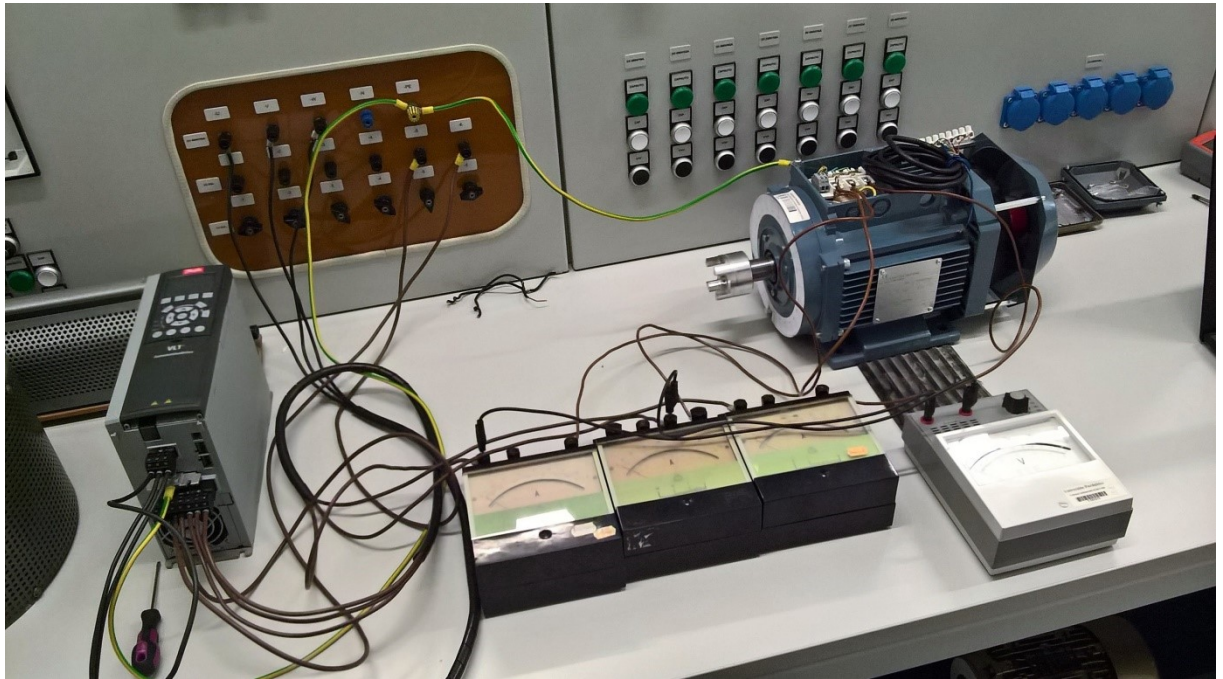


Obrázek 20 – Závislost statického momentu na úhlovém natočení rotoru SynRM ABB [3]

Následně bylo podobné měření provedeno při napájení přivedeném na svorky vinutí U, V i W. Maxima momentu, kterých bylo dosahováno, byla zhruba o 20 % menší než ve zde popsaném případě. Podrobnější rozbor alternativního měření nabízí dokument ročníkového projektu [3]. Napájecí a měřicí přístroje, které byly využity při zjišťování statického momentu SynRM, jak je zde popsáno, jsou uvedeny v části 3.4.

3.4 Použité napájecí, regulační a měřicí přístroje, elektrické stroje

Prověřovány byly SynRM KSB a ABB (údaje dle částí 2.2.1 a 2.3.1), jako jejich napájecí a řídicí přístroj při měření za chodu naprázdno byl využit frekvenční měnič Danfoss VLT FC-302 (údaje dle části 2.1.1).



Obrázek 21 – Pracoviště pro měření na SynRM ABB naprázdno [3]

3.4.1 Štítkové údaje použitých napájecích, regulačních a měřicích přístrojů

Laboratorní zdroj Manson SPS-9602 (pro ss Ohmovu metodu dle části 3.1.1 a měření statického momentu dle části 3.3): vstupní napětí 230 V stř 50 Hz, jmenovitý vstupní proud 4,6 A; rozsah výstupního napětí 0 až 30 V ss, výstupní proud 0 až 3 A (standardní svorky na čele přístroje), výstupní proud 0 až 30 A (silové svorky na zadní stěně přístroje)

Předřadný reostat Metra (regulace proudu při ss měření, odstranění proudové špičky před autotransfornátorem při stř měření v části 3.1): jmenovitý proud 10 A, odpor vinutí 6,7 Ω , nejvyšší dovolené napětí 500 V, krytí IP 00

Regulační autotransfornátor RA10 (regulace proudu při stř měření dle části 3.1.2): vstupní napětí 120 / 220 V, příkon 2,5 kVA, frekvence 50 až 60 Hz; rozsah výstupního napětí 0 až 250 V, výstupní proud 8 / 10 A

Ampérmetr stejnosměrný ručkový (pro ss Ohmovu metodu dle části 3.1.1 a měření statického momentu dle části 3.3): pracovní poloha vodorovná, měřicí systém magnetoelektrický, třída přesnosti 0.5, izolační hladina 2 kV, použitý rozsah 10 A

Ampérmetr střídavý ručkový (pro stř Ohmovu metodu dle části 3.1.2 a měření naprázdno dle části 3.2): pracovní poloha vodorovná, měřicí systém elektromagnetický, třída přesnosti 1, izolační hladina 2 kV, frekvence proudu 50 Hz, použité rozsahy 5 a 10 A

Voltmetr střídavý ručkový (pro měření naprázdno dle části 3.2): pracovní poloha vodorovná, měřicí systém magnetoelektrický s usměrňovačem, třída přesnosti 1.5, izolační hladina 2 kV, použité rozsahy 120, 240 a 600 V

Multimetr digitální (voltmetr pro ss i stř Ohmovu metodu, ohmmetr pro doplňkové měření dle části 3.1): Mastech MY-64

LCR měřič (doplňkové zjištění indukce dle části 3.1.2): APPA 703 (testovací frekvence 100 Hz)

Mincíř (siloměr dle části 3.3): rozsah 20 kg, rozlišení 2 kg na dílek

3.5 Shrnutí poznatků z měření při zprovoznování SynRM

Stanovení ohmického odporu statorového vinutí SynRM bylo především dílčím výsledkem, který byl potřebný pro určení indukčnosti v následujícím kroku. Přesto bylo možné na základě většího zjištěného odporu u motoru KSB učinit předpoklad, že promítne-li se tento parametr i do komplexní impedance vinutí, pro dosažení téže velikosti protékajícího proudu bude na jeho svorky nutné přiložit vyšší napětí i při měření se střídavým zdrojem. Tento předpoklad byl při jednoduchém postupu v následující části potvrzen – u stroje KSB bylo dosaženo maxima proudu 4,25 A při napětí přes 87 V, zatímco vinutím stroje ABB protékal proud o velikosti 5 A při napětí jen 58 V.

Další srovnání nabízí zjištěné hodnoty indukčnosti. Budeme-li uvažovat výsledky získané výpočtem z měření tzv. Ohmovou metodou, u SynRM KSB bylo dosaženo maxima přibližně 360 mH, u SynRM ABB pak 184 mH. I opačné extrémy se liší – pro stroj KSB je minimum přibližně 65 mH, zatímco pro stroj ABB asi 37 mH. Ve vztahu pro moment SynRM (4) však vystupuje rozdíl indukčností $L_d - L_q$, směrodatná je tedy velikost rozdílu největší a nejmenší indukčnosti pro daný stroj. U motoru KSB se dostáváme k hodnotě téměř 295 mH,

zatímco u motoru ABB jen ke 147 mH. Tento ukazatel hovoří jednoznačně, avšak předběžně ve prospěch stroje KSB.

Hodnoty indukčnosti odečtené z displeje LCR měřiče víceméně korespondují s výše zmíněnými poznatky, avšak číselně se liší – dokonce natolik, že rozdíl $L_d - L_q$ je pro SynRM KSB jen 82 mH, pro SynRM ABB pak 57 mH. Tyto odlišnosti jsou velmi pravděpodobně dány výrazně menšími proudy a vyšší frekvencí, na základě nichž LCR můstek svůj výsledek určuje. Projevily se tak vlastnosti magnetizační charakteristiky magnetického obvodu stroje. Zatímco LCR měřič se pohybuje v jejím počátku, kde se magnetický tok při změně protékajícího proudu mění málo, do měření Ohmovou metodou se promítá lineární oblast této charakteristiky, v níž je změna magnetického toku při změně protékajícího proudu výraznější a v níž lze také získat výsledky více vypovídající o chování motoru za provozu.

Co lze pozorovat na grafech závislosti sdruženého napětí a fázového proudu na otáčkách motoru při jeho provozu naprázdno, bylo zhruba popsáno přímo u obou obrázků. Porovnáme-li však tyto průběhy pro dva SynRM navzájem, je zřejmé, že proud motoru KSB je v celém rozsahu rychlostí alespoň o 0,5 A vyšší. Při jmenovitých $1\,500\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ byla naměřena hodnota 4,24 A a následně při $2\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ klesla na 3,43 A. Mezitím stroj ABB odebíral proud jednou fází 3,57 A při $1\,500\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a při $2\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ klesla tato hodnota až na 2,22 A. Tato zjištění korespondují i s rozdílnými štítkovými hodnotami jmenovitých proudů, jež se liší o 0,7 A s tím, že vyšší je udána výrobcem KSB (7,8 A).

Při měření statického momentu SynRM při nejmenší ze tří hodnot stejnosměrného proudu bylo vyvinuto pouze 8,83 Nm u motoru KSB a 11,77 Nm u motoru ABB. Využití jmenovité hodnoty proudu znamenalo také přiblížení ke jmenovité hodnotě momentu (19,1 Nm), konkrétně šlo o 15,7 Nm u stroje KSB a 19,62 Nm u stroje ABB. V případě, kdy teklo vinutím SynRM přibližně 127 % jmenovitého proudu, bylo dosaženo momentu 21,58 Nm (KSB), resp. 25,51 Nm (ABB). Toto srovnání tedy vyznělo příznivěji pro SynRM výrobce ABB. Další a pro provozování elektromotorů dost možná relevantnější ukazatele však přinese měření se zatěžováním strojů za pomoci dynamometru, jehož výsledky budou uvedeny na straně č. 56 a následujících.

4 NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO PRACOVÍŠTĚ SE SYNRM

4.1 Návrh funkcí a ovládání přípravku pro pracoviště se SynRM

Při sestavování laboratorního přípravku pracoviště se SynRM by měl být frekvenční měnič Danfoss posazen na dřevěnou desku společně s lištami pro svorky napájecích vodičů a s plastovým externím ovládacím panelem. Ten by měl nabízet možnost obsluhy digitálních a analogových vstupů měniče. Očekává se také možnost jisté formy čtení údajů z jeho digitálních a analogových výstupů. Pro tyto účely může posloužit vyvedení digitálních vstupů měniče na páčkové přepínače, analogových vstupů na otočné potenciometry, digitálních výstupů na signální LED a konečně analogových výstupů na zdířky pro banánkové konektory.

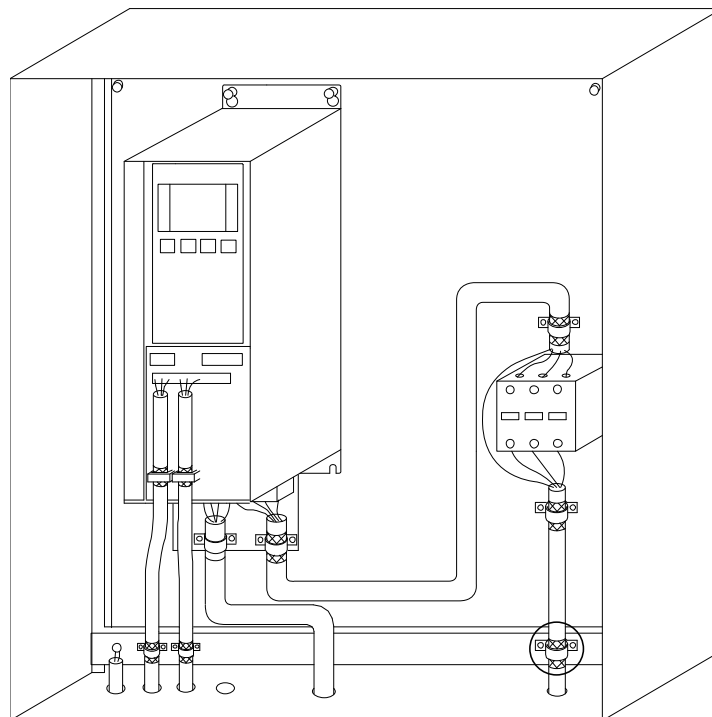
Principiálně je frekvenční měnič schopný se SynRM pracovat tak, jak byl vyroben, resp. dodán. V takovéto konfiguraci a při provozu v prostředí univerzitní laboratoře by však docházelo k několika nežádoucím jevům:

- Svorky pro připojení napájecích vodičů ze sítě i k řízenému stroji mohou být nadměrně opotřebovávány vlivem častější montáže a demontáže silových vodičů. Navíc je pro práci s nimi nutné používat křížový šroubovák.
- Při ovládání frekvenčního měniče a zadávání žádaných hodnot regulovaných veličin pouze skrze panel LCP je práce pomalejší a dochází k nežádoucímu opotřebovávání nejčastěji užívaných tlačítek.
- Digitální a analogové vstupní a výstupní svorky měniče jsou nevyužité. Případné sestavování externích ovládacích a indikačních obvodů pro každé měření zvlášť by jednak bylo časově náročné, jednak vedlo k nadměrnému opotřebovávání svorkovnic. Pro práci s nimi je navíc nutné používat plochý šroubovák.

Sestavení přípravku s frekvenčním měničem, externími silovými svorkovnicemi a ovládací krabičkou vyřeší všechny výše zmíněné problémy. Navíc tak lze dosáhnout sjednocení typu silových svorek, ovládacích prvků i celkového vzezření u několika obdobných zařízení (polovodičových měničů), které jsou v laboratoři KEEZ zastoupeny. Používání navrhovaného přípravku v praxi přinese:

- Připojování napájecích vodičů na externí svorkovnici, která snese jejich častější montáž a demontáž. Upevňovat do svorek kabely s nalisovanými vidličkami je navíc možné šroubováním jen rukou.
- Zadávání žádané hodnoty regulované veličiny pomocí knoflíku otočného potenciometru nebo polohy přepínače. Práce obsluhy při ovládání pohonu se tak může stát rychlejší a plynulejší.
- Trvalé zapojení signálních vodičů do vstupně-výstupních svorek. Připojené přepínače, potenciometry či indikační prvky je pak možné využívat v plné míře tak, jak umožňují parametry v menu měniče.

Ani sestavení přípravku s ovládací skříňkou a silovými svorkami takto prakticky nepřináší provozování měniče v doporučené poloze, tedy s LCD displejem i montážní deskou ve svislé rovině. Tato poloha zabezpečuje měniči příznivé podmínky pro vlastní chlazení. Porušení instrukcí výrobce je v laboratoři KEEZ akceptováno, protože nejde o zatížení při trvalém provozu, neočekávají se tedy ani přílišné nároky na chlazení přístroje samotného.

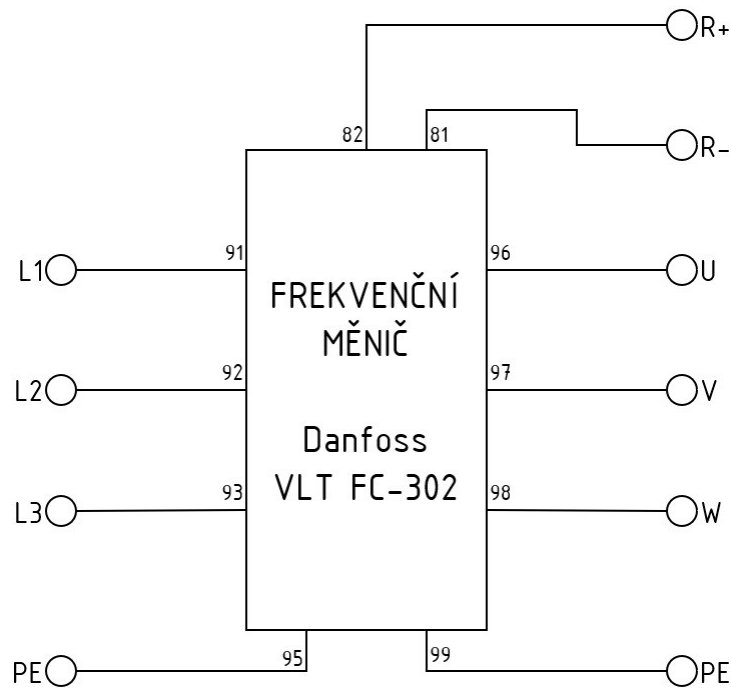


Obrázek 22 – Předepsaný způsob montáže měniče Danfoss VLT FC-302. Převzato z [9]

4.2 Návrh elektrického zapojení přípravku pro pracoviště se SynRM

4.2.1 Návrh silového zapojení přípravku

Schéma silového zapojení přípravku je velmi jednoduché, jde totiž v zásadě jen o vyvedení napájecích vodičů na externí svorky. Přesnější představu, včetně číselného označení svorek na frekvenčním měniči Danfoss, přináší následující obrázek.



Obrázek 23 – Schéma silového zapojení přípravku s měničem Danfoss

Pro připojování silových vodičů k přípravku byly zvoleny panelové zdířky od společnosti Ritel pro banánkové konektory o průměru 4 mm. K jejich uchycení byly vybrány plechové pozinkované U-profilů rozměru 40 x 20 mm, délky 200 a 304 mm.

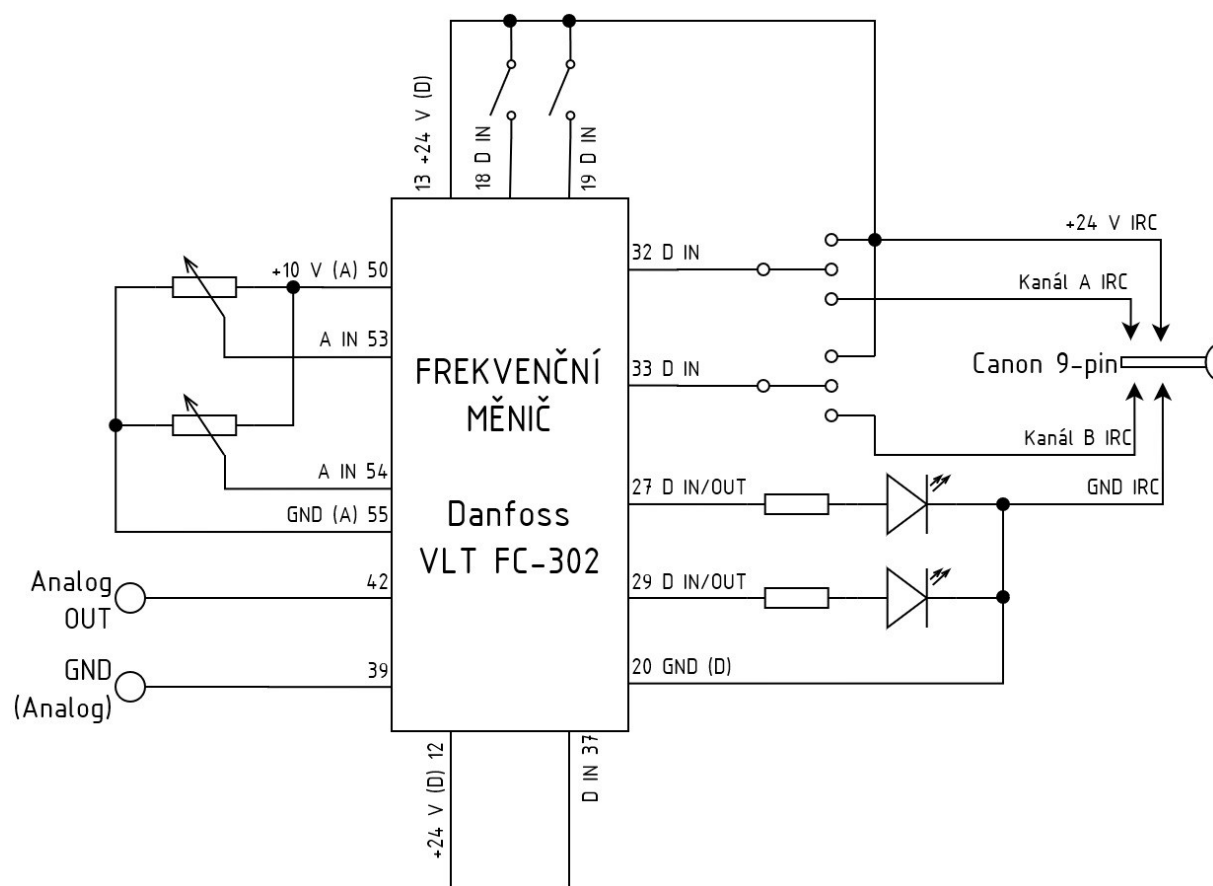


Obrázek 24 – Panelová zdířka Ritel pro vyvedení napájecích vodičů. Převzato z [19]

Pro vstupní vedení od síťových zdírek L1 až L3 a PE k měničovým svorkám 91 až 95 byl připraven čtyřvodičový kabel o průřezu žil 1,5 mm² s izolací z PVC. Pro stejnosměrné vedení od měničových svorek 81 a 82 ke zdírkám brzdového odporu byl připraven dvouvodičový kabel o průřezu žil 1,5 mm² s izolací z PVC. Pro výstupní vedení od měničových svorek 96 až 99 k motorovým zdírkám U až W a PE byl připraven čtyřvodičový kabel o průřezu žil 1,5 mm² se stínícím opletem.

4.2.2 Návrh řídicích obvodů přípravek

Schéma zapojení řídicích obvodů pro přípravek s frekvenčním měničem Danfoss koresponduje s návrhem uvedeným v části 4.1. Využívají se v něm vstupně-výstupní signální svorky měniče a je uvedeno na následujícím obrázku.



Obrázek 25 – Schéma řídicích obvodů přípravek s měničem Danfoss

Přepínače připojené ke svorkám digitálních vstupů č. 18 a 19 mohou udávat úroveň log. „0“ (rozpojeno), nebo „1“ (spojeno s napětím +24 V ss na svorce 13). Přepínače připojené ke svorkám digitálních vstupů č. 32 a 33 mohou udávat úroveň log. „0“ (rozpojeno), „1“ (spojeno s napětím +24 V ss na svorce 13), příp. mohou na vstup měniče

přivádět odpovídající kanály z IRC čidla otáček motoru. Vstupně-výstupní svorky č. 27 a 29 jsou připraveny pro funkci digitálních výstupů, jejich hodnoty jsou reprezentovány signálními LED, jejichž obvody se uzavírají k potenciálu GND (D) na svorce 20.

Jezdce dvou potenciometrů jsou připojeny na analogové vstupní svorky č. 53 a 54, přičemž úrovně napájecího napětí +10 V ss a GND (A) jsou definovány svorkami 50 a 55. Analogovou veličinu může měnič poskytovat na jediném výstupu, kterému jsou určeny svorky 42 a 39. Propojka mezi svorkami č. 12 a 37 zabraňuje aktivaci funkce bezpečnostního stopu STO, jak byla popsána v části 2.1.2.

Pro komunikaci s IRC čidlem otáček, jímž může být řízený elektromotor vybaven, je na přípravku umístěna zásuvka D-SUB (tzv. Canon konektor) s devíti piny. Do ní je třeba přivést vodiče od měničových svorek č. 13 a 20 (jako zdroj napájení IRC), 32 a 33 (jako digitální vstupy, na nichž měnič dokáže přijímat signály z kanálu A a B IRC).



Obrázek 26 – D-SUB zásuvka zvolená jako rozhraní pro připojení IRC. Převzato z [20]

4.3 Návrh mechanického řešení přípravku pro pracoviště se SynRM

4.3.1 Specifikace komponent pro sestavení přípravku

Komponenty využití v rámci silového zapojení přípravku s měničem Danfoss byly popsány v části 4.2.1. Zbývá tedy upřesnit, jaké díly byly vybrány pro sestavení řídicích obvodů, jak je znázorňuje Obrázek 25.

Veškeré komponenty budou rozmístěny na ovládací panel, který bude tvořen plastovou krabičkou s půdorysnými rozměry 185 x 135 mm a šikmým sklonem k delší straně [21]. Další použité součástky jsou popsány v následující tabulce. Její druhý sloupec pomáhá s identifikací prvku v rámci schématu zapojení a třetí obsahuje krátký popis, jehož detaily jsou dostupné on-line v katalogu prodejce GM electronic. [22]

Tabulka 15 – Kusovník součástí pro ovládací panel přípravku

Součást	Použití (svorka)	Popis	Počet	Zdroj
Potenciometr	analogové vstupy (53, 54)	5 k Ω 0,2 W, otočný, lineární	2 ks	[23]
Přístrojový knoflík	k potenciometru	plastový, průměr 18,8 mm, díra 6 mm	2 ks	[24]
Zdířka panelová	analogový výstup (42)	pro banánek 4 mm, červená	1 ks	[25]
Zdířka panelová	analogový výstup (39)	pro banánek 4 mm, černá	1 ks	[26]
Páčkový spínač	digitální vstupy (18, 19)	dvupolohový	2 ks	[27]
Páčkový spínač	digitální vstupy (32, 33)	třípolohový	2 ks	[28]
LED	digitální výstupy (27, 29)	průměr 5 mm, studená bílá, 3 800 mcd	2 ks	[29]
Rezistor	k LED	1 k Ω 0,4 W	2 ks	–
Objímka	k LED	plastová, 5 mm	2 ks	[30]
D-SUB konektor	rozhraní pro IRC	CAN 9pinový, zásuvka	1 ks	[20]
Montážní sada	k D-SUB	šroubky pro konektor Canon	1 ks	[31]



Obrázek 27 – Páčkový spínač pro obsluhu digitálních vstupů měniče. Převzato z [27]

4.3.2 Návrh rozložení elementů v rámci přípravku

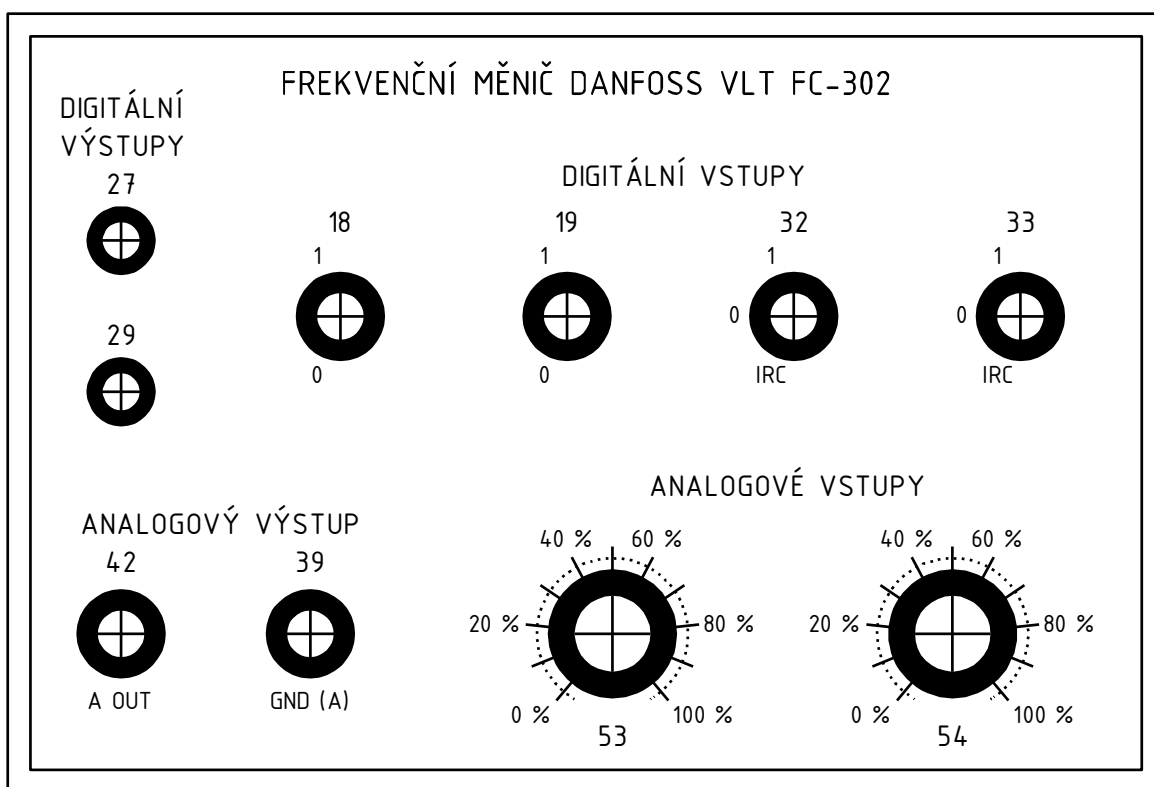
Deska, která poslouží pro výrobu přípravku, a tedy rozmístění všech jeho komponentů, má rozměry 370 x 455 mm. Na její levý a zadní okraj patří připevnit lišty se silovými svorkami. Dále v levé polovině desky má být umístěn frekvenční měnič Danfoss, v pravé pak krabička s ovládacími a indikačními prvky.

V rámci návrhu rozložení byl sestaven náčrt, který přináší lepší představu o prostorovém uspořádání jednotlivých komponent v rámci přípravku. Tento obrázek uvádí Příloha A na straně č. 92.

Na základě požadavků na uspořádání prvků vznikl i náčrt, který obsahuje informace o rozložení jednotlivých děr, které je potřeba do podkladové dřevěné desky vyvrtat. Ty následně poslouží pro uchycení jednotlivých komponent přípravku. Obrázek podkladové dřevěné desky uvádí Příloha B na straně č. 93.

4.3.3 Návrh rozložení ovládacích a indikačních prvků

Návrh externího ovládacího panelu, na němž je třeba rozmístit ovládací a indikační prvky popsané v části 4.3.1, je nutné provést s ohledem na rozměry dostupné krabičky i jednotlivých elementů. Přitom je důležité, aby rozložení přepínačů, potenciometrů apod. nabízelo určitý komfort při obsluze, ale i při sestavování krabičky a připojování datových vodičů. Na základě těchto požadavků pak lze vyměřit potřebné rozměry před obráběním plastového panelu a také pro něj připravit nálepku, která bude informovat o funkci jednotlivých prvků. Právě návrh takovéto nálepky je uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 28 – Nálepka s popisy ovládacích a indikačních prvků

Stejným způsobem je vhodné připravit popisy pro lišty se silovými svorkami pro připojení síťových vodičů, napájeného elektromotoru a brzdového odporu. Vzhledem ke zbývajícím ploše mezi plastovou krabičkou a výstupními svorkami na podkladové desce

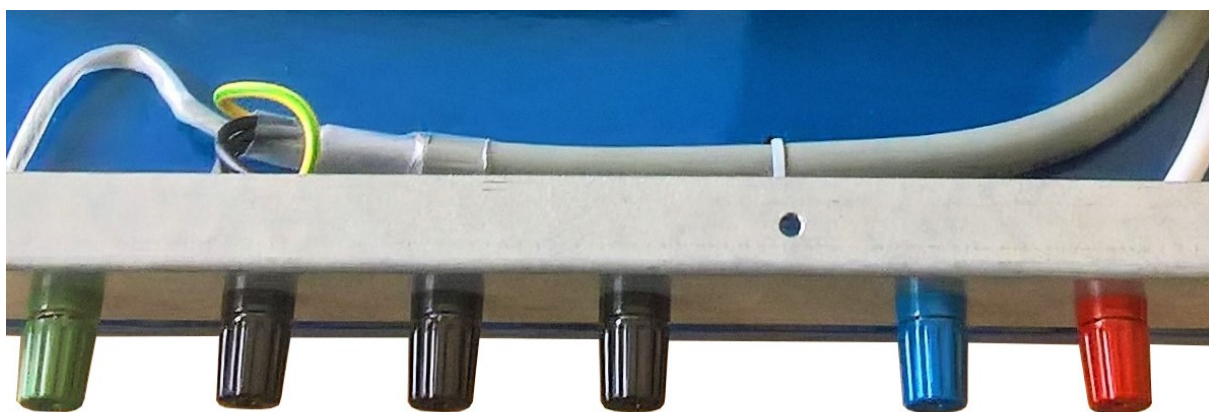
přípravku je možné připravit také etiketu shrnující základní údaje osazeného frekvenčního měniče.

FREKVENČNÍ MĚNIČ DANFOSS VLT FC-302		
Nejvyšší výkon motoru	$P_{max} = 4 \text{ kW}$	při $U_{IN} = 400 \text{ V}$
Vstupní napětí	$U_{IN} = 3 \times 380 \text{ až } 500 \text{ V}$	
Frekvence vstupního napětí	$f_{U_{IN}} = 50 \text{ nebo } 60 \text{ Hz}$	
Jmenovitý vstupní proud	$I_{IN} = 9 \text{ A}$	při U_{IN} do 440 V
Výstupní napětí	$U_{OUT} = 3 \times 0 \text{ až } U_{IN}$	
Výstupní frekvence	$f_{OUT} = 0 \text{ až } 590 \text{ Hz}$	
Nejvyšší ustálený výstupní proud	$I_{OUT} = 10 \text{ A}$	při U_{IN} do 440 V

Obrázek 29 – Nálepka se základními údaji frekvenčního měniče Danfoss

4.3.4 Postup sestavení přípravku

Prvním krokem při sestavování přípravku s frekvenčním měničem podle návrhu v části 4.3.2 může být sestavení silových svorkovnic. To obnáší vyvrtání děr průměru 8 mm pro zvolené panelové zdířky se základní roztečí 40 mm (ta je mezi skupinami svorek pro připojení brzdového odporu a elektromotoru zvětšena na 64 mm). Chybějící díry pro šrouby, které přichytí lišty k dřevěné desce, byly voleny o průměru 4,5 mm.

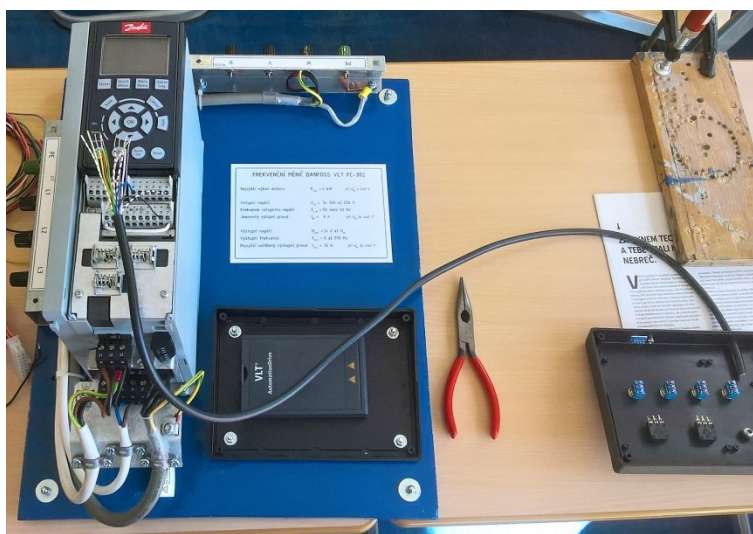


Obrázek 30 – Sestavená lišta se svorkami pro vodiče elektromotoru a brzdového odporu

Do samotné podkladové dřevěné desky je třeba vyvrtat díry dle návrhu, který je znázorněn na obrázku na straně č. 93. Konkrétně jde o čtveřici děr pro šrouby, jimiž budou

k desce přichyceny nožky, rovněž čtveřici děr pro šrouby, jimiž bude k desce přichycena plastová krabička, pět děr pro šrouby, jimiž budou k desce přichyceny lišty se silovými svorkami a šest děr pro plastové stahovací pásky, jimiž budou k desce přichyceny kabely mezi měničem a zdírkami na lištách – všechny tyto o průměru 4,5 mm. Čtveřice děr pro šrouby, jež k desce přichytí frekvenční měnič, má průměr 5,5 mm. Následovat může napouštěcí nátěr dřeva lněnou fermeží a dále pohledový nátěr syntetickým emailem, v tomto případě lesklým v modré barvě, v níž je vyvedeno i logo a různá zařízení příslušející k Dopravní fakultě Jana Pernera.

Po zaschnutí emailového nátěru mohou být k desce přišroubovány nožičky z měkčeného PVC, díky nimž nebude docházet ke vzájemnému škrábání přípravku a pracovního stolu. Následně je možné připevnit lišty se silovými svorkami a také spodní díl plastové krabičky, která bude plnit funkci externího ovládacího panelu měniče. Dále už zbývá k podkladové desce přišroubovat samotný frekvenční měnič, po čemž lze začít s přípravou silových kabelu a signálního kabelu vstupně-výstupních obvodů.



Obrázek 31 – Pracoviště při sestavování přípravku s měničem Danfoss

Při zde popsané kompletaci přípravku je nutné využití množství spojovacího materiálu. Jeho seznam uvádí následující tabulka sestavená s pomocí katalogu [32].

Tabulka 16 – Kusovník spojovacího materiálu pro sestavení přípravku

Součást	Použití	Popis	Počet
Šroub s půlkulatou hlavou	nožičky	M4 x 25, kříž	4 ks
Podložka plochá	nožičky	M4	4 ks

Součást	Použití	Popis	Počet
Podložka karosářská	nožičky	M4, vnější ø20	4 ks
Matice klobouková	nožičky	M4	4 ks
Šroub s půlkulatou hlavou	krabička	M4 x 22, kříž, s límcem	4 ks
Podložka pod nýty	krabička	M4, vnější ø12	4 ks
Podložka pérová	krabička	M4	4 ks
Matice	krabička	M4, přesná	4 ks
Šroub s půlkulatou hlavou	lišta svorek	M4 x 20, kříž, s límcem	5 ks
Podložka pod nýty	lišta svorek	M4, vnější ø12	5 ks
Matice samojisticí	lišta svorek	M4	5 ks
Šroub s půlkulatou hlavou	měníč	M5 x 25, kříž, s límcem	4 ks
Podložka pod nýty	měníč	M5, vnější ø15	2 ks
Podložka plochá	měníč	M5	2 ks
Podložka pérová	měníč	M5	4 ks
Matice	měníč	M5, přesná	4 ks

Podobu celého přípravku po dokončení kompletačních prací zachycuje fotografie uvedená v příloze k této práci na straně 94.

4.3.5 Propojení datových vodičů s ovládacími a indikačními prvky

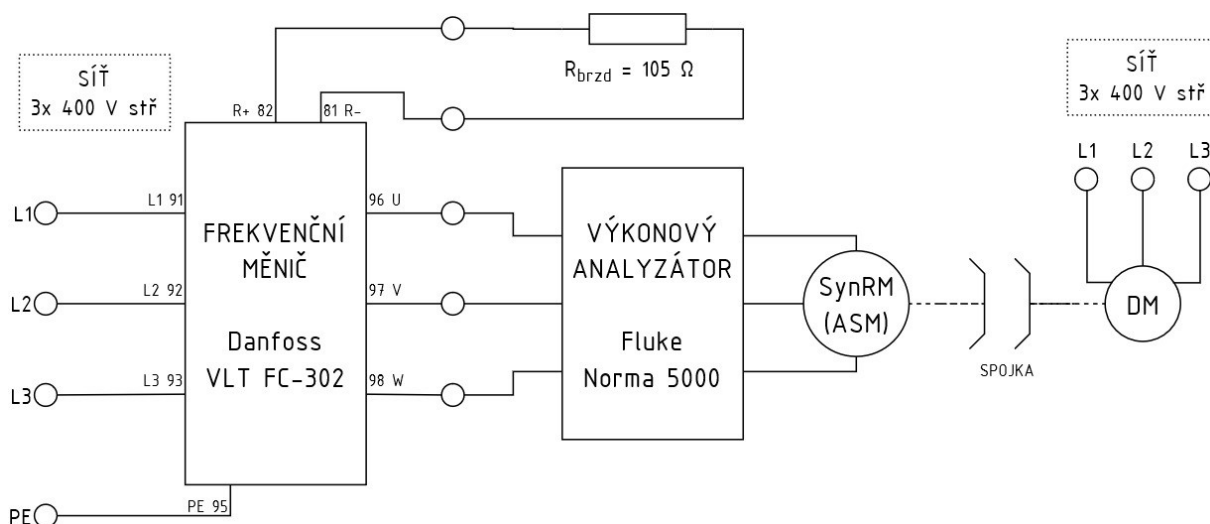
K propojení signálních svorek měniče s indikačními a ovládacími prvky na externím panelu může posloužit vícežilový kabel. V rámci přípravku je manipulace s ním snazší a prostorová náročnost je jistě menší než při využití řady jednotlivých vodičů. V laboratoři KEEZ je pro tyto potřeby k dispozici šestnáctižilový kabel, který v minulosti mohl sloužit pro vzájemnou komunikaci některých již vyřazených zařízení.

Vzájemné rozlišení jednotlivých vodičů v kabelu je v takovémto případě zpravidla provedeno barvami jejich izolace. Na základě nich pak lze sestavit tabulku či náčrt zapojení jednotlivých součástí, jak jsou v rámci externího ovládacího panelu rozmístěny. Pro přehlednost byla ve zde popisovaném procesu zvolena grafická reprezentace, která je uvedena na obrázku v příloze, strana č. 95. Jedná se o pohled zdola, oproti nálepce je tedy uspořádání zrcadlově převráceno podle svislé osy. Dále je na fotografii (rovněž na straně 95) zachycena skutečná podoba zapojení uvnitř krabičky.

5 MĚŘENÍ PROVÁDĚNÁ S VYUŽITÍM DYNAMOMETRU

5.1 Srovnávací měření se SynRM a ASM

V předchozích kapitolách bylo popsáno měření na SynRM „na stole“ i sestavení přípravku s frekvenčním měničem Danfoss. Nyní je možné toto zkombinovat a poněkud rozšířit v další měření. Při něm už mají být oba SynRM napájeny a řízeny ze zkompletovaného přípravku, zavázány do stojanu dynamometru a pomocí něho zatěžovány. Pro další možnost porovnání vstupuje do prověřování také ASM od výrobce Siemens stejné výkonové kategorie. Hodnoty elektrických veličin v napájecích vodičích strojů lze odečítat pomocí výkonového analyzátoru, jak ukazuje i následující obrázek.



Obrázek 32 – Schéma zapojení pro měření se SynRM a ASM na dynamometru

Po sestavení pracoviště je nutné provést nastavení základních parametrů v menu měniče a proces AMA (příp. manuální zadání dalších údajů, např. odporu a indukčnosti vinutí motoru), jak bylo popsáno v části 3.2. Pro následné spuštění pohonu je třeba na LCP stisknout tlačítko Auto On, načež se měnič začne chovat dle instrukcí daných digitálními a analogovými vstupy.

Jedna ze základních konfigurací odpovídá povolení rozběhu motoru logickou úrovní „1“ na digitálním vstupu č. 18 a zadávání žádané hodnoty otáček potenciometrem, jehož pohyblivý kontakt je připojen ke svorce analogového vstupu č. 53.

5.1.1 Zatěžování SynRM KSB

Pro měření na SynRM se zatížením byla zvolena strategie nastavení konstantní žádané hodnoty otáček a jako nezávisle proměnný byl nastavován zatěžovací moment. Následně bylo možné z dynamometru odečítat vyvíjený moment, aktuální otáčky a mechanický výkon stroje. Z displeje výkonového analyzátoru byly zaznamenávány hodnoty sdruženého napětí, proudu jednou fází a elektrického výkonu. Pomocí jednoduchého výpočtu pak byly stanoveny ztráty v motoru samotném:

$$\Delta P = P_{el} - P_{mech} \quad (7)$$

ΔP	ztráty v elektrickém stroji ve W
P_{el}	elektrický příkon / výkon udaný výkonovým analyzátozem ve W
P_{mech}	mechanický výkon udaný dynamometrem ve W

Podobně byl využit vztah pro výpočet účinnosti stroje:

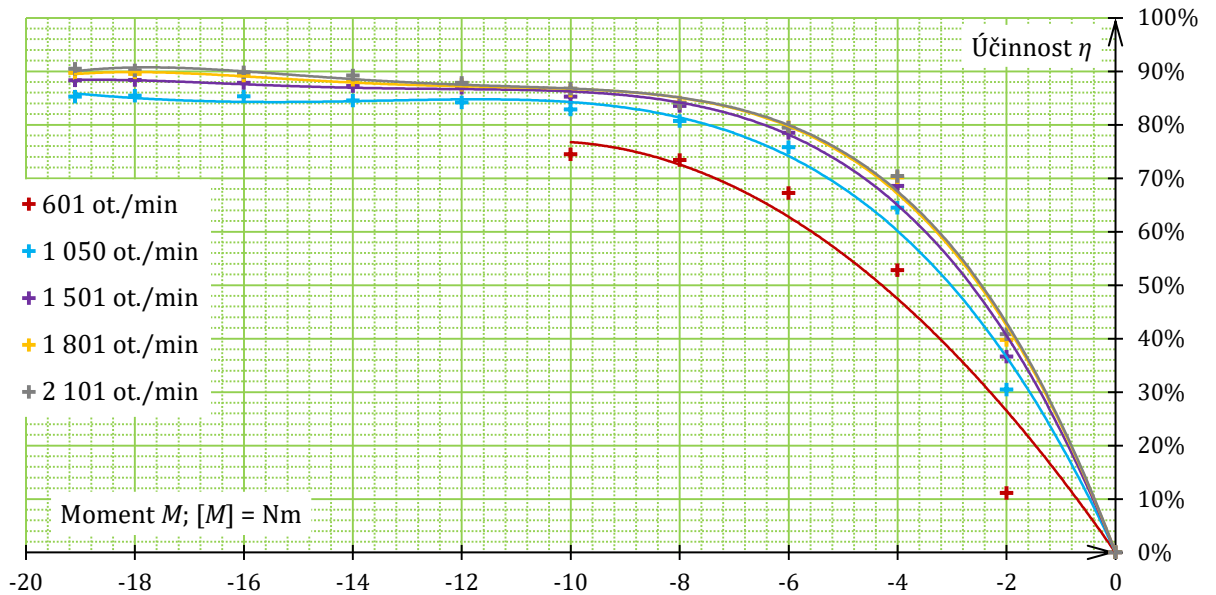
$$\eta = \begin{cases} \frac{P_{el}}{P_{mech}} \cdot 100 \% \text{ pro } M < 0 \\ \frac{P_{mech}}{P_{el}} \cdot 100 \% \text{ pro } M \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

η	účinnost elektrického stroje v %
P_{el}	elektrický příkon / výkon udaný výkonovým analyzátozem ve W
P_{mech}	mechanický výkon udaný dynamometrem ve W
M	moment vyvíjený strojem v Nm

Kvůli prověření chování ve větším množství provozních stavů bylo měření opakováno pro pětici hodnot frekvence napájecího napětí motoru – 20, 35, 50, 60 a 70 Hz (resp. jde o rychlosti 600, 1 050, 1 500, 1 800 a 2 100 ot. \cdot min⁻¹). Zároveň bylo možné ověřit tvrdost mechanické charakteristiky SynRM při zpětnovazební regulaci otáček, tedy představit si závislost skutečných otáček na zatěžovacím momentu při konstantní žádané hodnotě otáček.

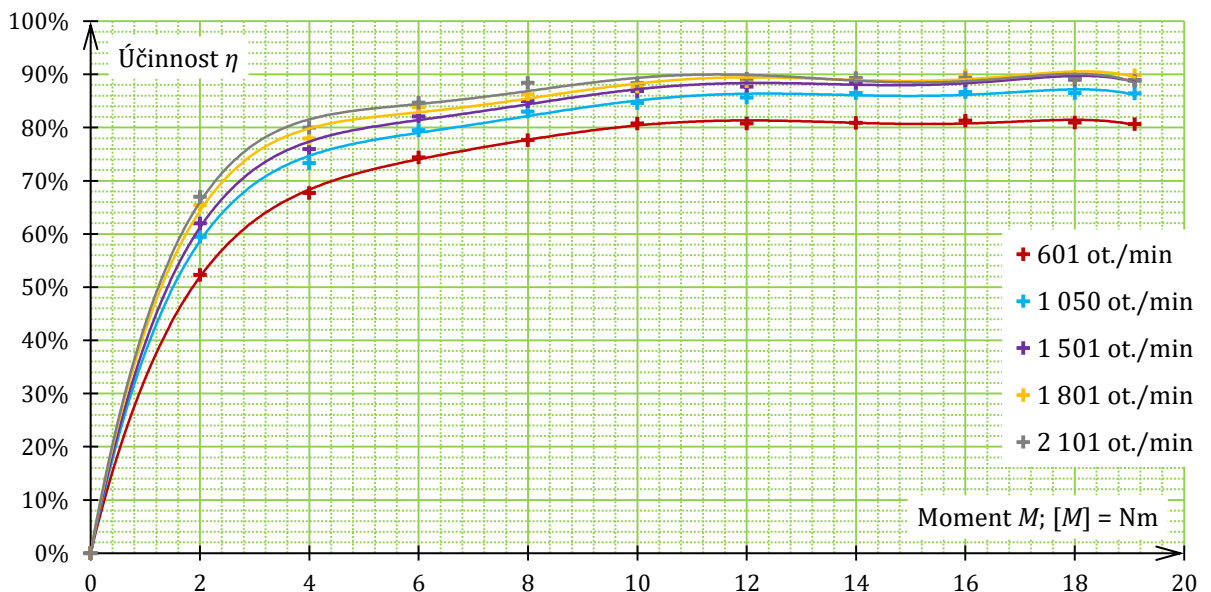
Naměřené údaje pro SynRM KSB jsou uvedeny v tabulkách v závěru práce (Příloha E, od strany č. 96). Tyto obsahují mimo všeho již vzpomenutého také sloupce $I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}$ a $P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}$, v nichž jsou zapsány hodnoty odečtené z LCP měniče. Ty se přibližně rovnají odpovídajícím číslům z výkonového analyzátoru.

Na základě zaznamenaných hodnot byl sestaven první graf. Ten popisuje pro režim generátoru závislost účinnosti stroje KSB na (v tomto případě brzděném) momentu, přičemž každá z křivek byla naměřena pro jednu z pětice konstantních žádaných hodnot otáček.



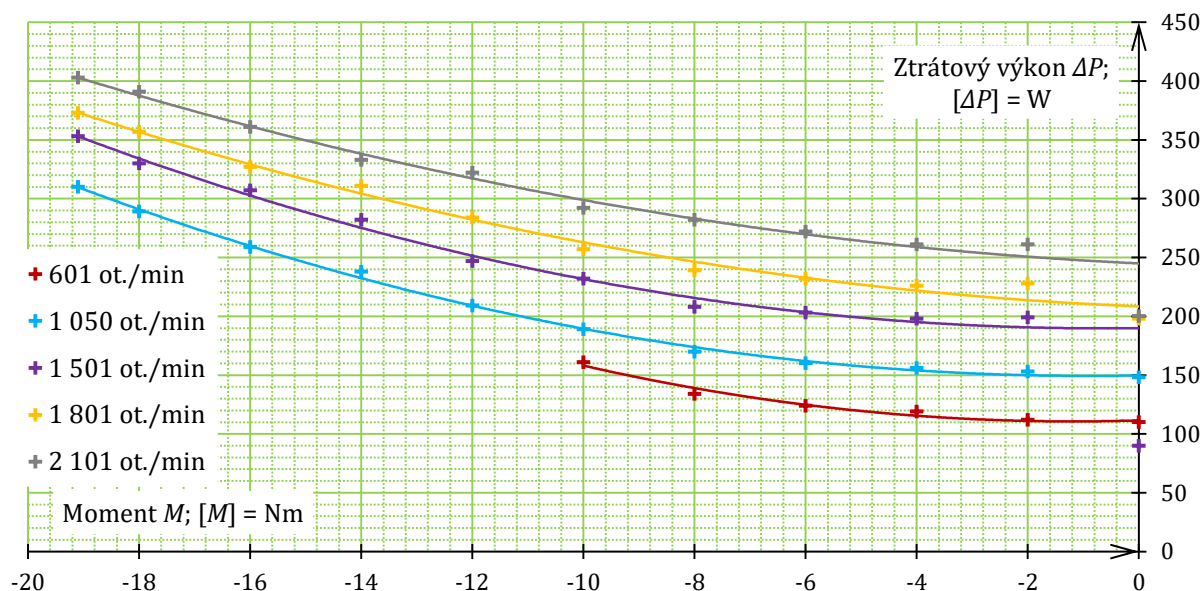
Obrázek 33 – Účinnost SynRM KSB v generátorickém režimu

Při nejnižší frekvenci 20 Hz se nepodařilo dosáhnout vyššího brzděného momentu než 10 Nm. Následně totiž došlo k nekorektnímu chování měniče, který sice informoval o rychlosti přibližně $600 \text{ ot.} \cdot \text{min}^{-1}$, ale dle dynamometru byla tato jen málo přes $300 \text{ ot.} \cdot \text{min}^{-1}$. Následující obrázek zachycuje obdobné závislosti při provozu stroje v režimu motoru.



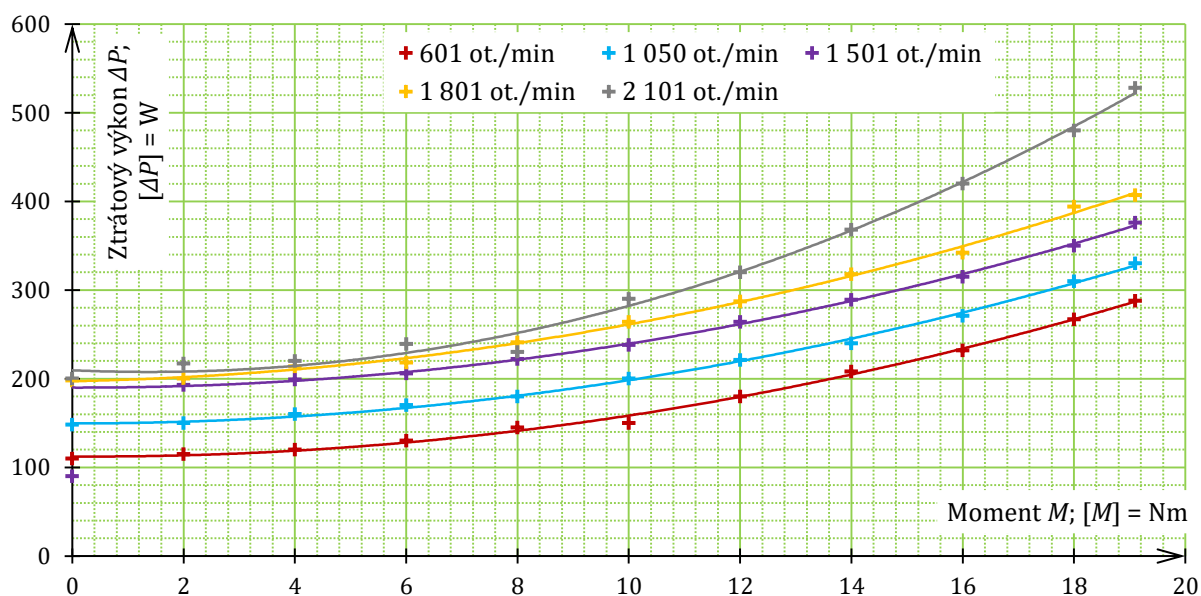
Obrázek 34 – Účinnost SynRM KSB v motorickém režimu

Zatímco účinnost SynRM je při nulovém momentu nulová a s rostoucí jeho absolutní hodnotou poměrně rychle roste, a v grafu tak vytvoří konkávní křivku, křivka ztrát je konvexní. Konkrétně v následujícím obrázku jsou uvedeny křivky znázorňující závislost ztrát ve stroji KSB na momentu v režimu generátoru.



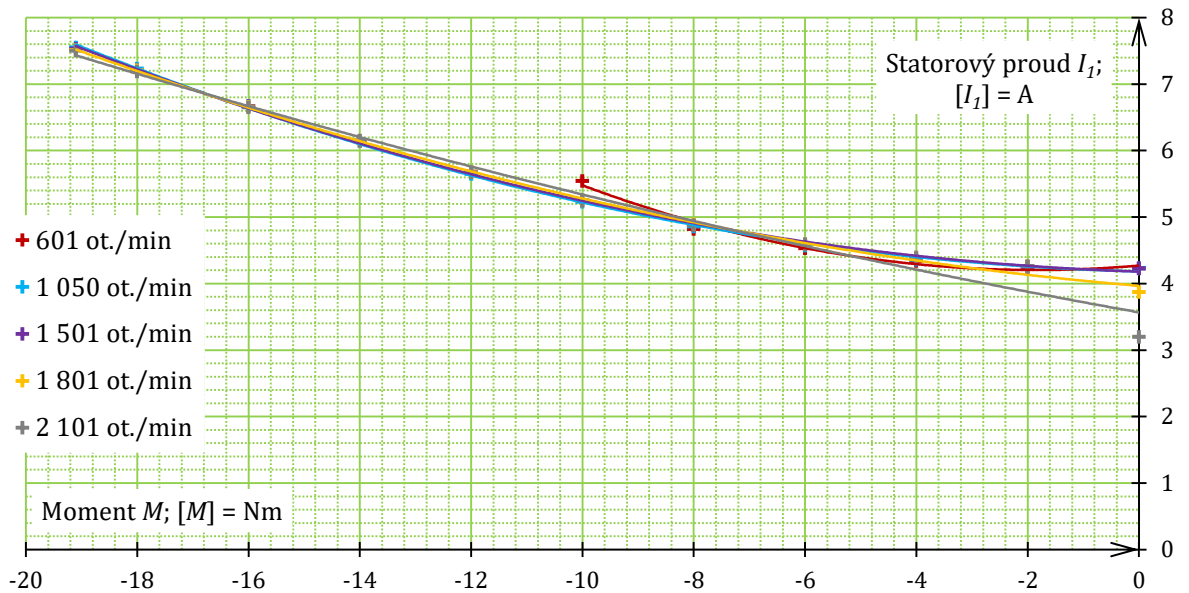
Obrázek 35 – Ztráty SynRM KSB v generátorickém režimu

Obdobné křivky byly zaznamenány také v motorickém režimu SynRM KSB, jak ukazuje následující obrázek:



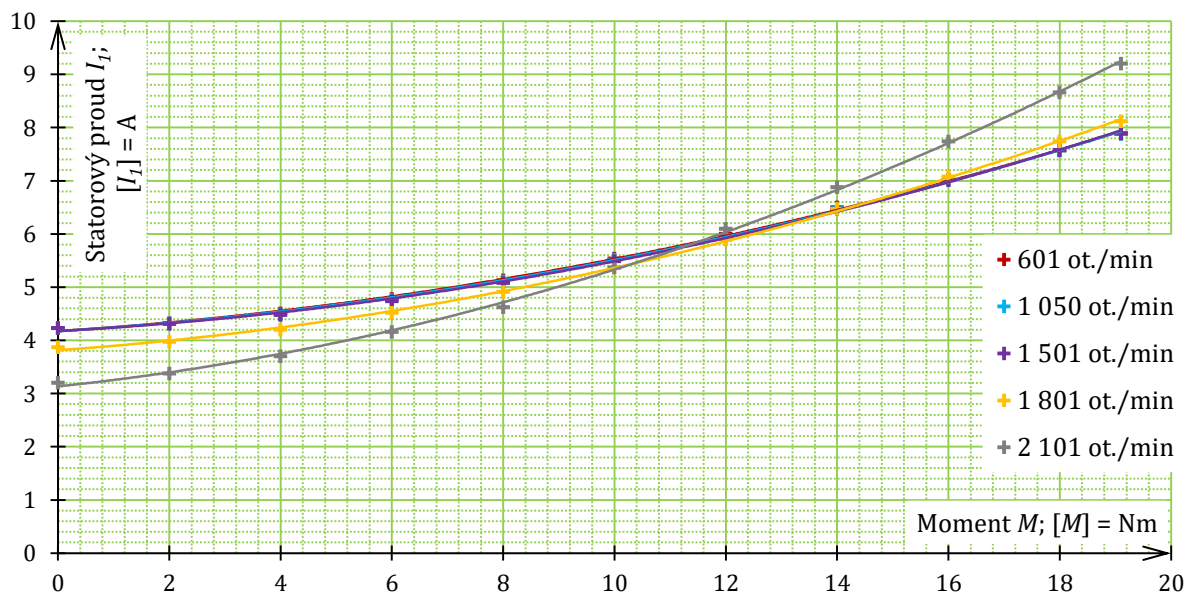
Obrázek 36 – Ztráty SynRM KSB v motorickém režimu

Následující graf (opět pro SynRM KSB v režimu generátoru) závislosti proudu na momentu přináší zajímavé zjištění, že křivky proudu jednou fází stroje při různých otáčkách jsou v zásadě totožné. Při všech zvolených frekvencích tak je maximum proudu přibližně 7,5 A, jak je zřejmé i z následujícího obrázku:



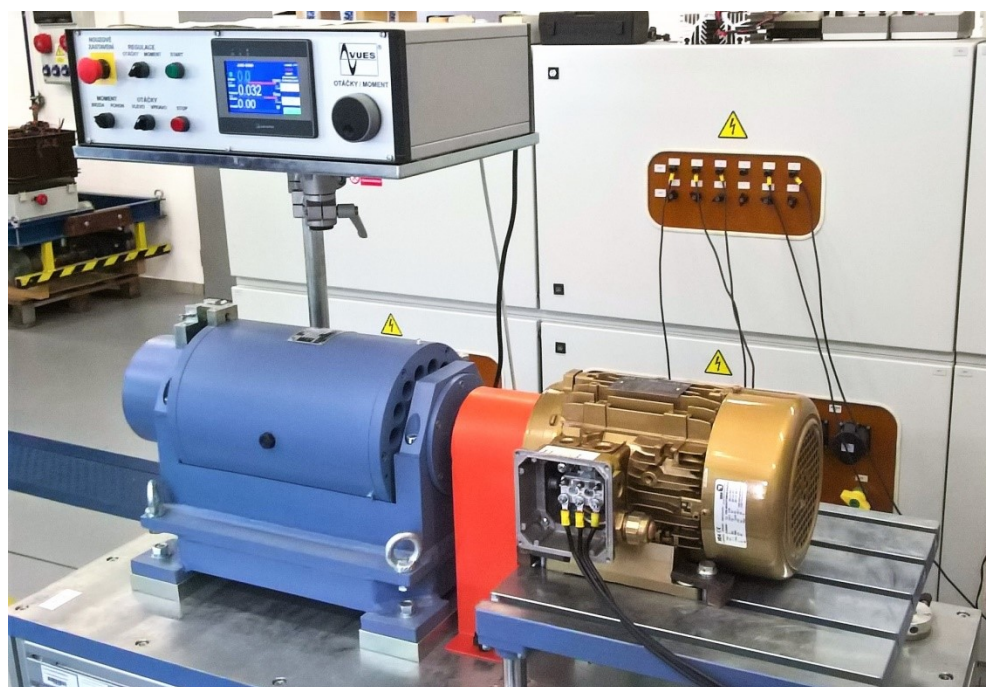
Obrázek 37 – Proud SynRM KSB v generátorickém režimu

Velmi podobné závislosti vzešly i z měření v motorickém režimu. Pouze při rychlosti přibližně 2 100 ot. \cdot min⁻¹ (odpovídá frekvenci 70 Hz) je bez zatížení proud oproti ostatním o asi 1 A nižší, při jmenovitém zatížení pak asi o 1 A vyšší – vizte následující obrázek.



Obrázek 38 – Proud SynRM KSB v motorickém režimu

Poslední obrázek týkající se stroje KSB zaznamenává jeho usazení ve stojanu dynamometru v laboratoři KEEZ.



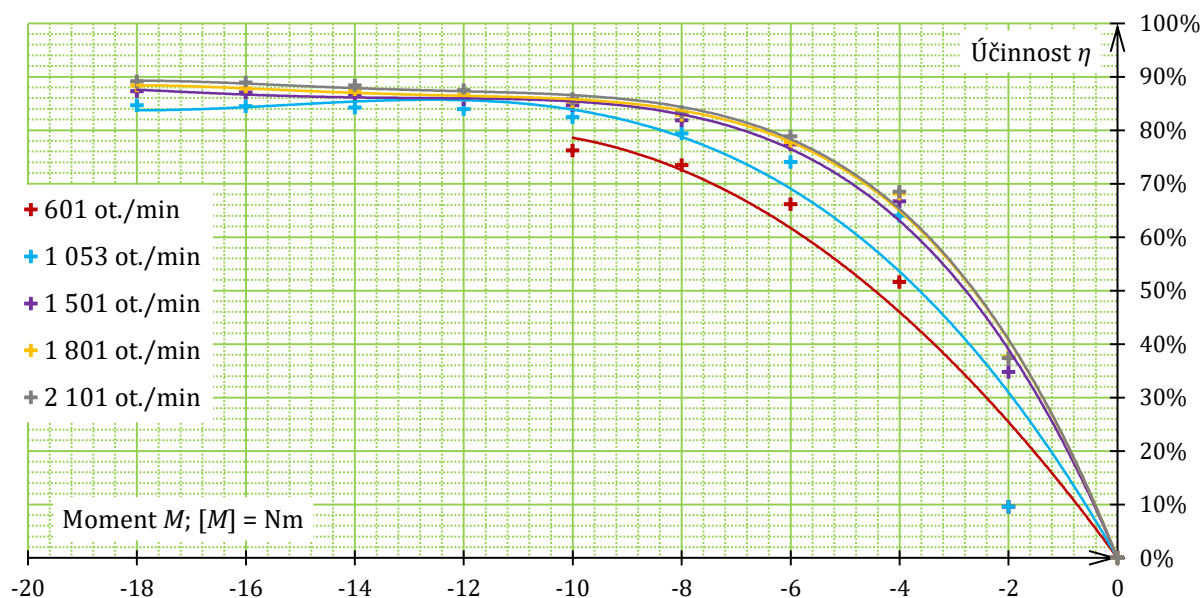
Obrázek 39 – SynRM KSB při měření na dynamometru v laboratoři KEEZ

5.1.2 Zatěžování SynRM ABB

Postupem srovnatelným s částí 5.1.1 bylo provedeno i měření se SynRM ABB. Příloha F (od strany 99) tedy uvádí pětici tabulek se získanými hodnotami. Každá sada dat odpovídá jedné zvolené žádané hodnotě otáček (a tedy i frekvenci). Sloupce obsahují vyvíjený moment, aktuální otáčky, mechanický výkon (tři veličiny z displeje dynamometru), proud a výkon udávaný LCP měniče, sdružené napětí, proud jednou fází, elektrický výkon (tři veličiny odečtené z výkonového analyzátoru) a konečně ztráty a účinnost (po výpočtech dle vztahů (7), (8)).

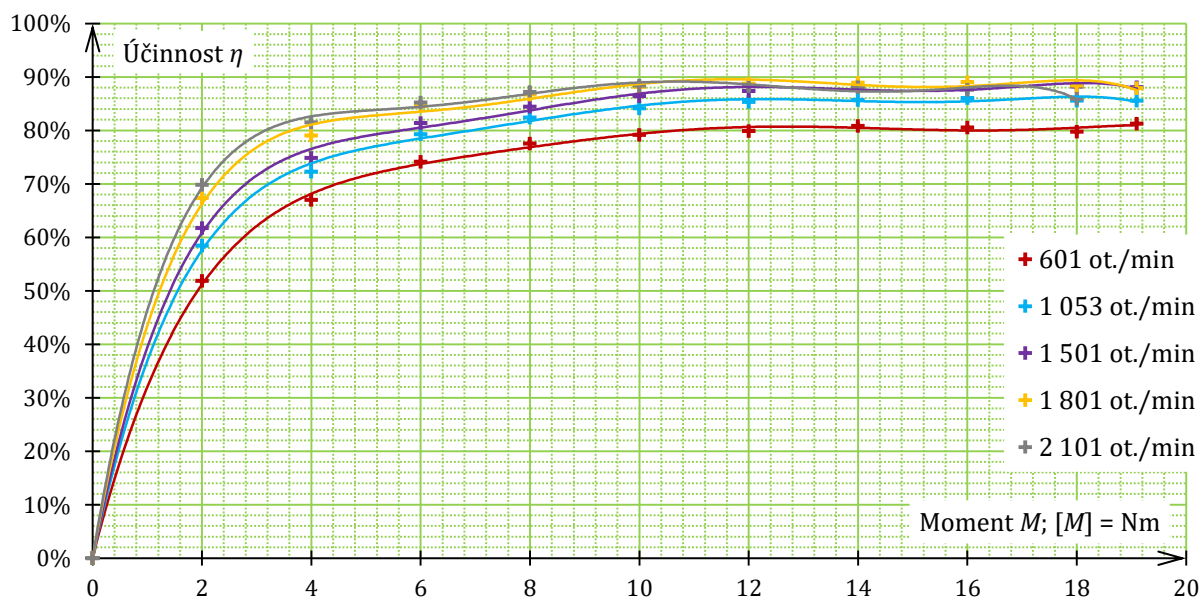
Také v případě stroje ABB byla věnována pozornost ověření tvrdosti mechanické charakteristiky (u SynRM očekáváme, že budou jeho otáčky konstantní v celém přípustném rozsahu zatěžovacího momentu). Ve všech pěti prověřovaných případech lze říci, že tomuto kritériu motor vyhověl, u některých hodnot momentu byla naměřena rychlost o $1 \text{ ot.} \cdot \text{min}^{-1}$ vyšší než ve zbytku momentového rozsahu. Toto zjištění nejen potvrzuje teoretický předpoklad tvrdosti charakteristiky, ale vypovídá také o spolehlivosti výpočtu modelu SynRM, který frekvenční měnič při zpětnovazební regulaci otáček provádí.

První z grafů, které popisují měření se SynRM při jeho zatěžování, zachycuje závislost účinnosti na brzděném momentu (v režimu generátoru). Stejně jako v případě stroje KSB bylo i zde při nejnižší frekvenci 20 Hz dosaženo momentu jen 10 Nm, což je zřejmé i z následujícího obrázku. Ostatní křivky navíc končí u hodnoty 18 Nm, protože dále účinkovala momentová ochrana měniče.



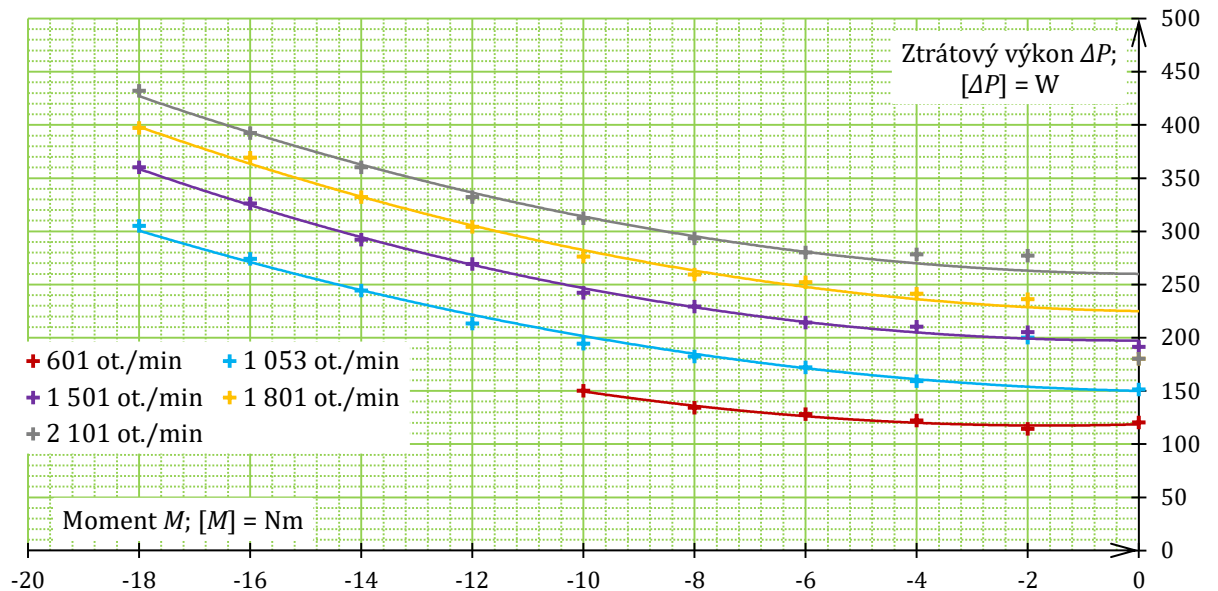
Obrázek 40 – Účinnost SynRM ABB v generátorickém režimu

Naopak v motorickém režimu bylo zpravidla dosahováno jmenovité oblasti, totiž momentu 19,1 Nm. Výjimku tvořilo měření při frekvenci 70 Hz, jak ukazuje i obrázek níže.



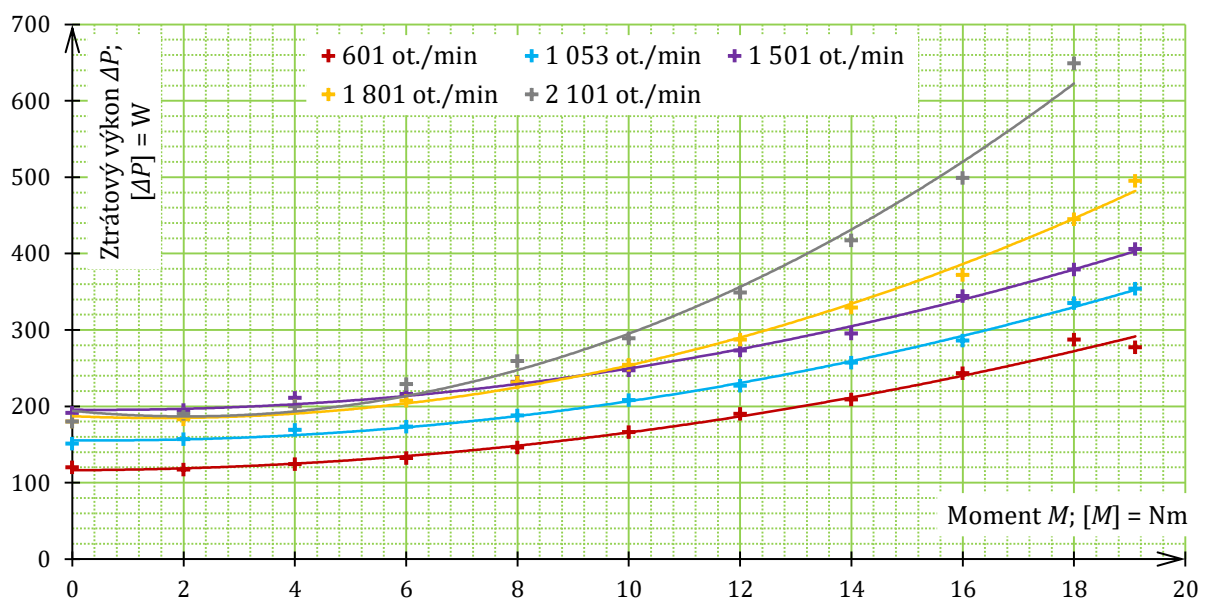
Obrázek 41 – Účinnost SynRM ABB v motorickém režimu

Křivky ztrátového výkonu stroje ABB v režimu generátoru jsou v zásadě ekvidistantní – zvýšení frekvence napětí o 10 Hz (a tedy rychlosti o 300 ot. \cdot min⁻¹) znamená i zvýšení ztrát o zhruba 35 W. Podrobněji ukazuje závislost následující obrázek:



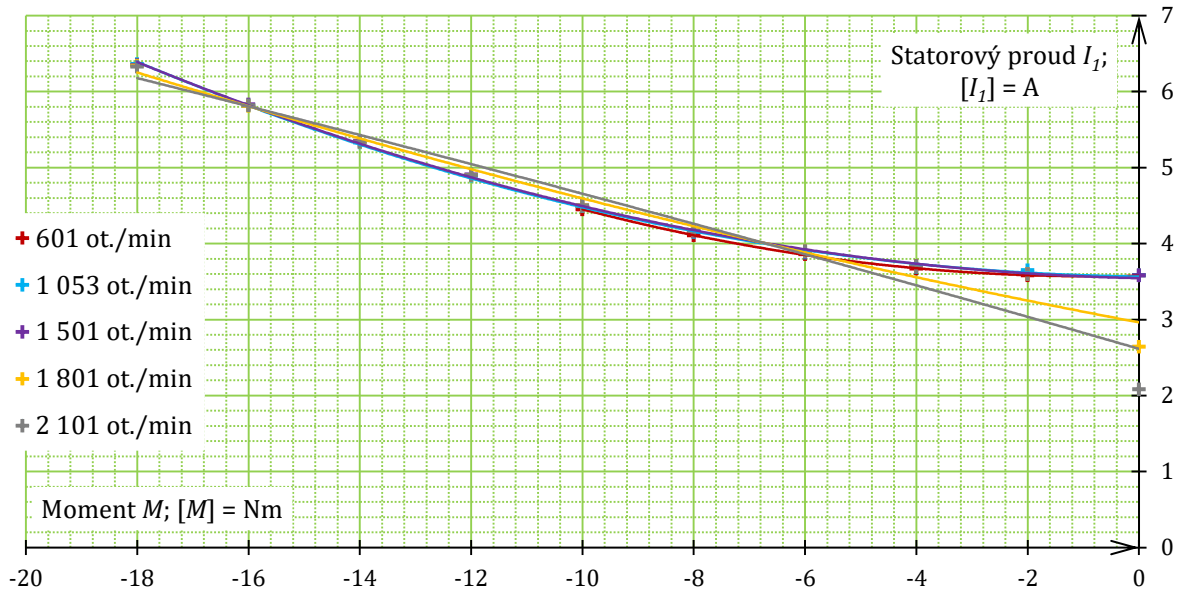
Obrázek 42 – Ztráty SynRM ABB v generátorickém režimu

V motorickém režimu jsou ztráty při nižším zatížení při různých frekvencích téměř totožné. V oblasti na 10 Nm však výrazně roste ztrátový výkon při frekvenci napětí 70 Hz, a to až k 650 W při 18 Nm.



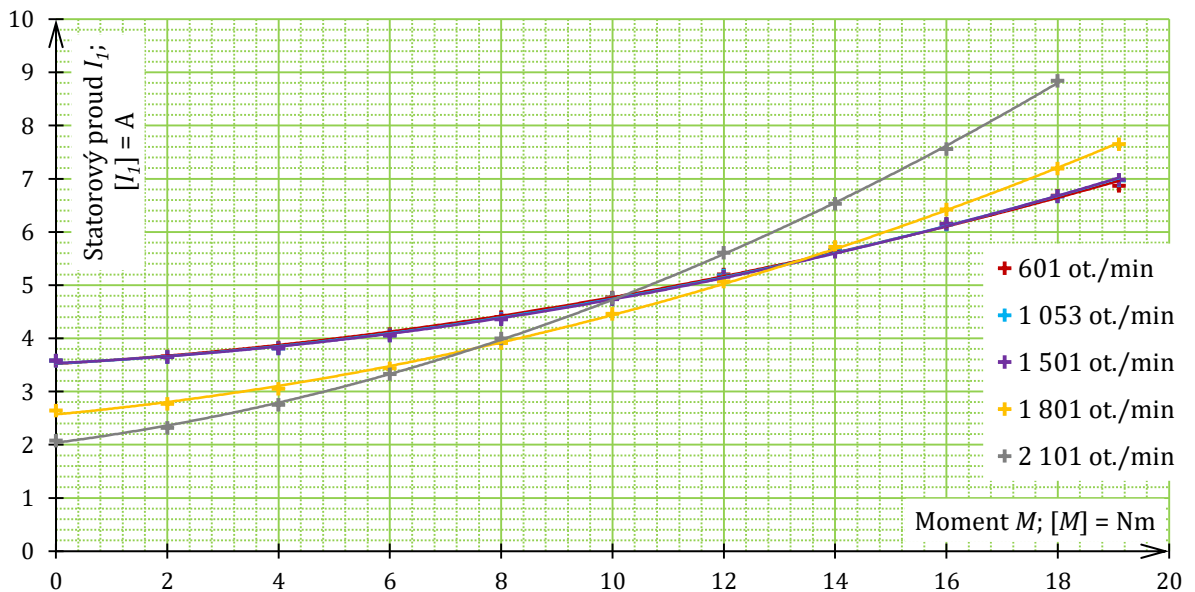
Obrázek 43 – Ztráty SynRM ABB v motorickém režimu

Při provozu SynRM ABB v režimu generátoru a pohledu na závislost proudu a momentu je, co se tvaru křivek týká, zřejmá značná podobnost se strojem KSB. Porovnáme-li však číselné hodnoty, teče vinutím motoru ABB proud přibližně o 1 A menší. Také to ukazuje následující obrázek.



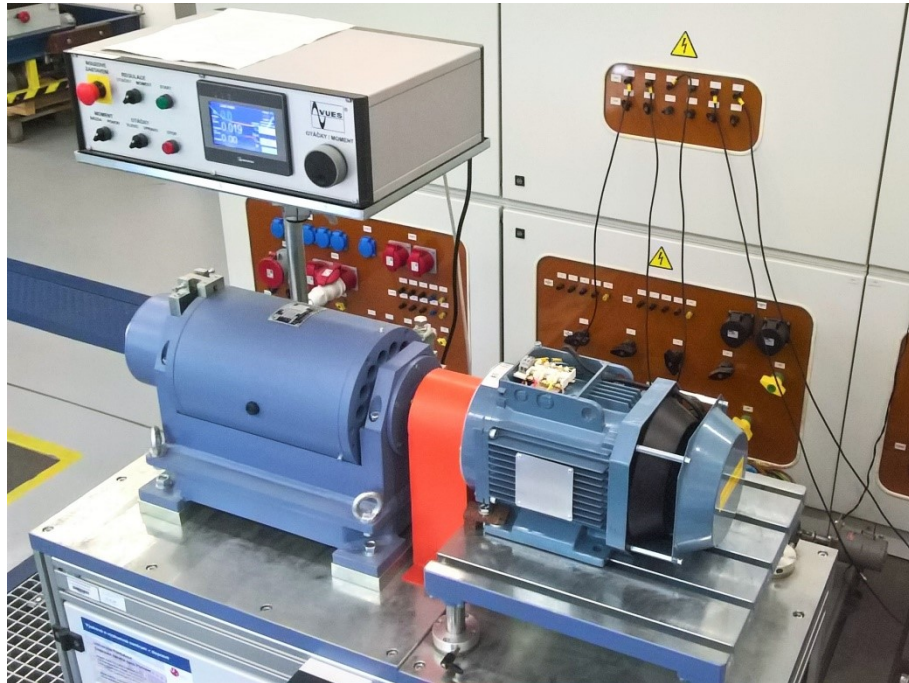
Obrázek 44 – Proud SynRM ABB v generátorickém režimu

Vyneseme-li do grafu závislost proudu na momentu SynRM ABB v motorickém režimu, zjistíme, proč nebylo při frekvenci 70 Hz dosaženo jmenovitého momentu 19,1 Nm. Už při 18 Nm totiž teče napájecími vodiči proud přes 8,8 A.



Obrázek 45 – Proud SynRM ABB v motorickém režimu

Řízení motoru při rychlosti zhruba $2\,100\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ již probíhá v režimu odbuzování, tedy při snížené tokotvorné složce proudu i_d . Momentotvorná složka i_q se však zřejmě zvětšuje natolik, že dochází ke značnému překročení jmenovité hodnoty proudu, která je zde 7,1 A.



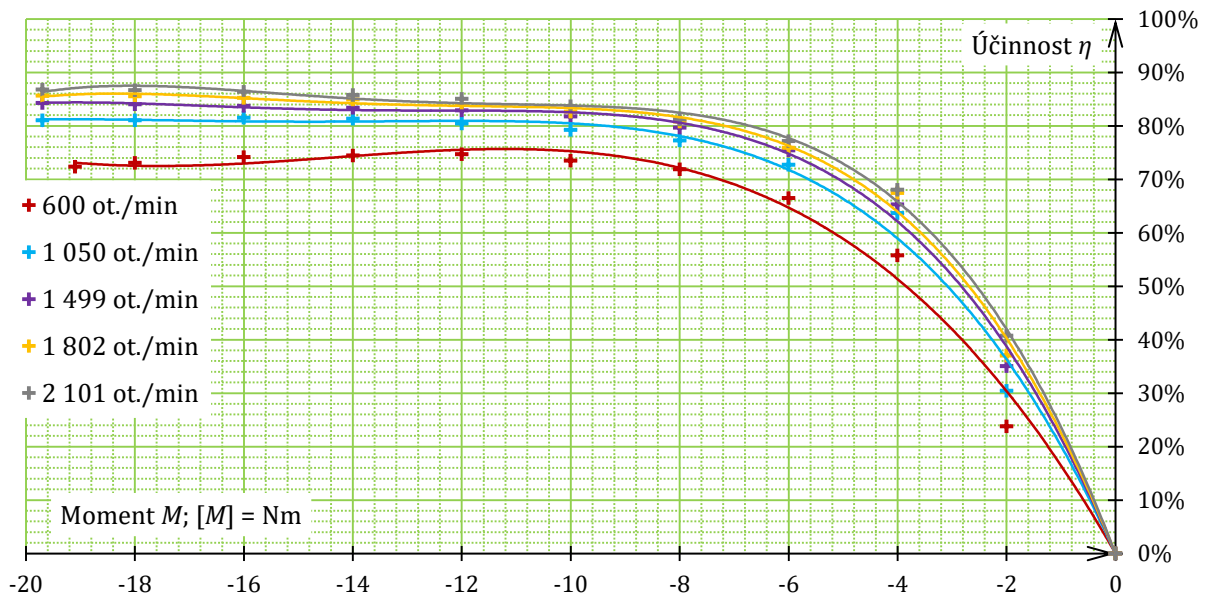
Obrázek 46 – SynRM ABB při měření na dynamometru v laboratoři KEEZ

5.1.3 Zatěžování ASM Siemens

Jako třetí do postupu měření se zatěžováním elektromotorů vstoupil ASM Siemens. Ten má stejný jmenovitý výkon jako oba SynRM, tedy 3 kW, a v laboratoři KEEZ bývá provozován zpravidla s frekvenčním měničem Siemens Simovert VC. Z důvodu sjednocení podmínek se SynRM však tentokrát pro jeho napájení posloužil rovněž výše popsáný přípravek s měničem Danfoss. Pro jeho obsluhu to znamená změnu některých parametrů v menu, přede všemi č. 1-10 Konstrukce motoru.

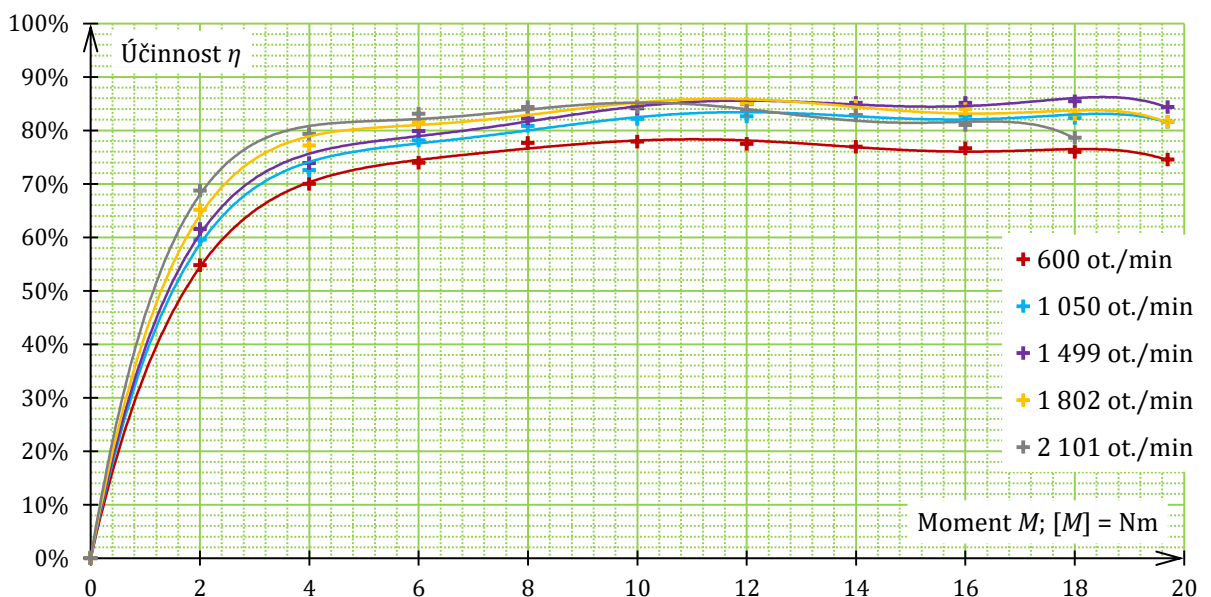
K měření samotnému bylo přistoupeno podle pravidel stejných jako u obou SynRM. Pětice tabulek s výsledky je uvedena v závěru práce (Příloha G, od strany č. 102). Každá sada dat odpovídá jedné zvolené žádané hodnotě otáček (a tedy i frekvenci), která byla nastavena vždy v režimu naprázdno a dále při zatěžování ponechána tak, jak ji měnič svou regulační smyčkou určil. Sloupce obsahují zleva tři veličiny z displeje dynamometru, proud a výkon udávaný LCP měniče, dále tři veličiny odečtené z výkonového analyzátoru a konečně ztráty a účinnost (po výpočtech dle vztahů (7), (8)).

Vzhledem ke skluzu, který souvisí s principem ASM, má tento stroj nižší jmenovité otáčky, které při stejném výkonu znamenají vyšší jmenovitý moment než u SynRM. Proto byla zvolena nejvyšší absolutní hodnota momentu 19,7 Nm. Následující obrázek vychází z měření v režimu generátoru a zachycuje průběh účinnosti v závislosti na brzděném momentu.



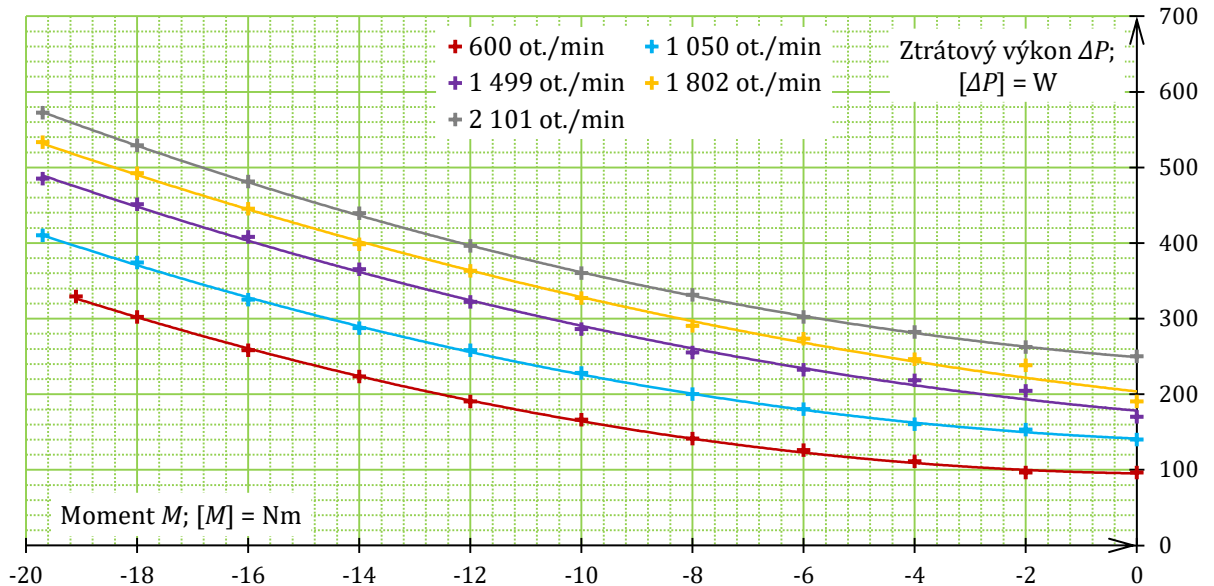
Obrázek 47 – Účinnost ASM Siemens v generátorickém režimu

Rovněž v motorickém režimu bylo měření prováděno až k momentu 19,7 Nm, jak ukazuje následující obrázek. Výjimkou byl případ s frekvencí 70 Hz (rychlost přibližně 2 100 ot. · min⁻¹), u nějž je zajímavý také pokles účinnosti už při zatížení přibližně 12 Nm.



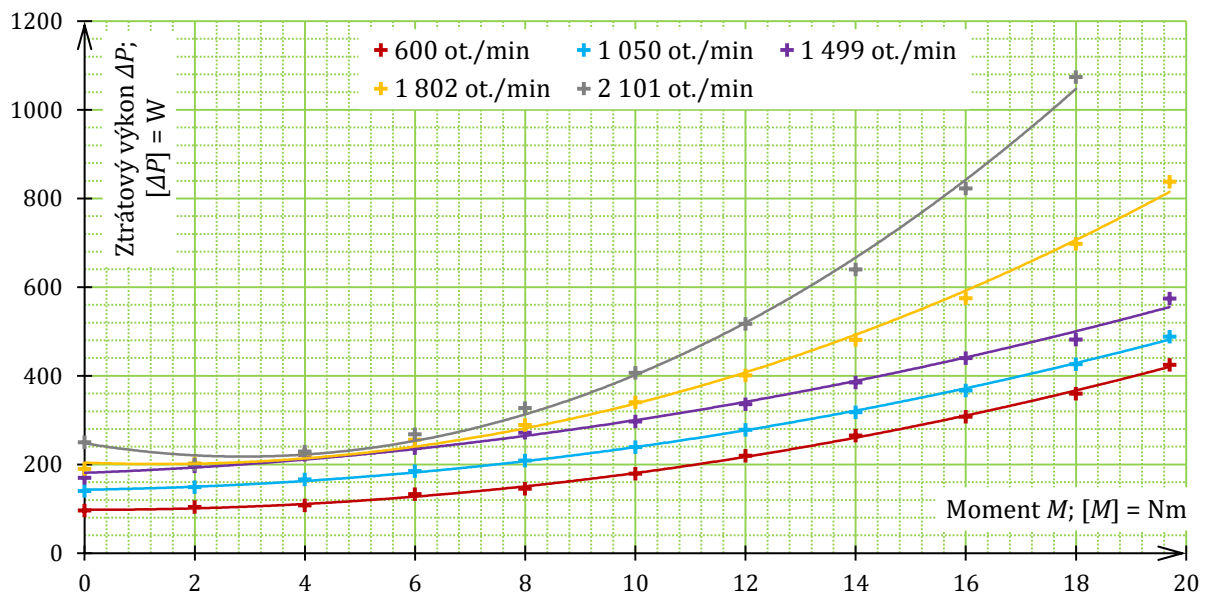
Obrázek 48 – Účinnost ASM Siemens v motorickém režimu

Křivky ztrátového výkonu ASM v režimu generátoru jsou tvarově velmi podobné těm, jež byly uvedeny u SynRM. Největší jsou ztráty při nejvyšším zatížení a nejvyšší rychlosti, jak je zřejmé i následujícího obrázku.



Obrázek 49 – Ztráty ASM Siemens v generátorickém režimu

Při zkoumání závislosti ztrátového výkonu na momentu ASM v motorickém režimu lze za nejzajímavější jistě považovat opět křivku pro rychlost 2 100 ot. \cdot min⁻¹. Ta totiž nabývá svého minima 200 W při zatížení 2 Nm (nikoliv při chodu naprázdno) a při nejvyšším momentu 18 Nm překračuje hodnotu 1 kW, jak uvádí i následující obrázek.



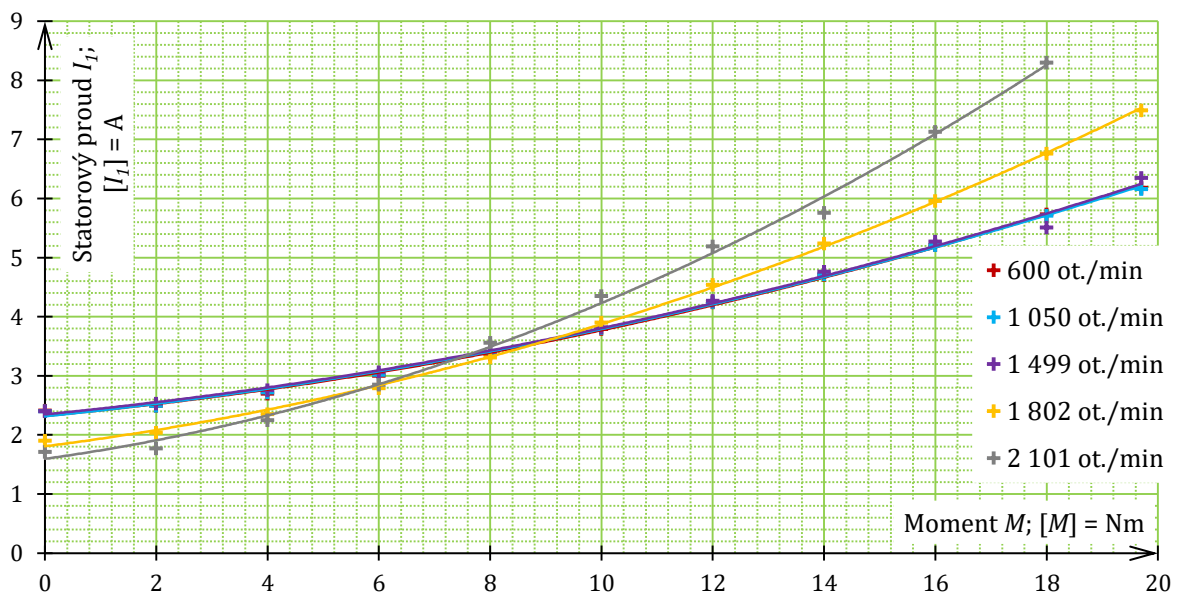
Obrázek 50 – Ztráty ASM Siemens v motorickém režimu

Z dalšího obrázku lze zjistit, že proud ASM v režimu generátoru roste téměř lineárně s rostoucím brzdícím momentem, ale téměř nezávisí na zvolené rychlosti stroje. Zároveň se jeho hodnota i při největším brzdícím zatížení drží pod 6 A (na rozdíl od týchž závislostí u SynRM).



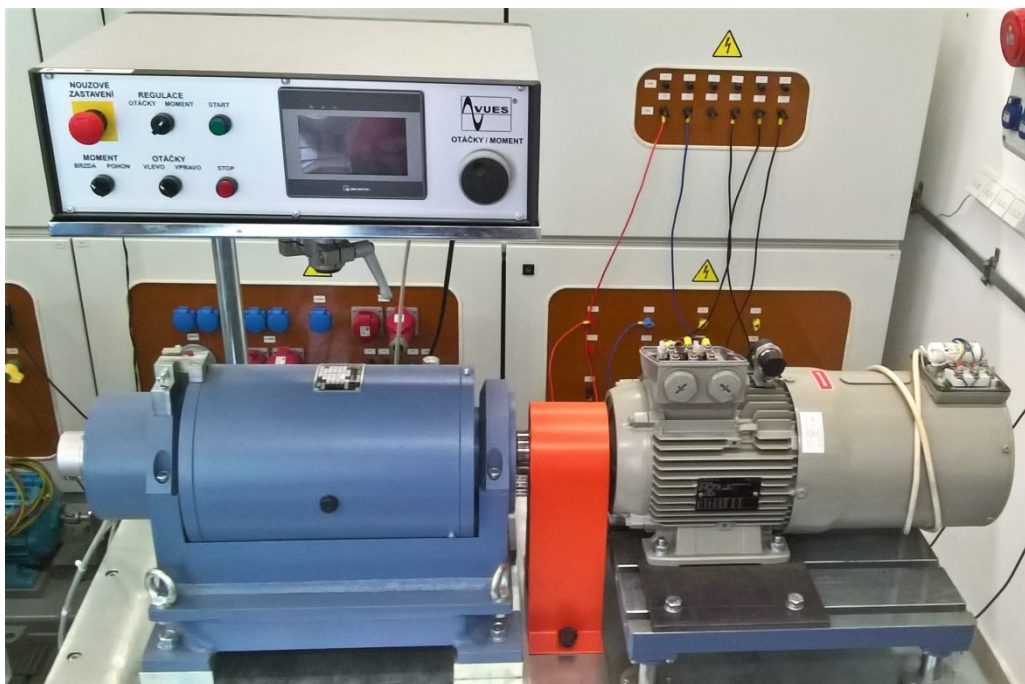
Obrázek 51 – Proud ASM Siemens v generátorickém režimu

Při pohledu na graf závislost proudu na momentu ASM v motorickém režimu zjistíme, proč nebylo při nejvyšší frekvenci dosaženo jmenovitého momentu 19,7 Nm. Už při 18 Nm totiž tekl napájecími vodiči proud 8,3 A, zatímco jmenovitá hodnota je 6,2 A.



Obrázek 52 – Proud ASM Siemens v motorickém režimu

Dle přirozené mechanické charakteristiky asynchronního stroje jeho otáčky v motorickém režimu se zvyšujícím se zatěžovacím momentem klesají. V režimu generátoru pak křivka plynule pokračuje, takže se zvyšujícím se brzdým momentem otáčky ASM rostou. Tomuto předpoklad neodpovídají hodnoty otáček odečtené z dynamometru při postupném zatěžování stroje – ve většině sledovaných případů je sklon pomyslné křivky mechanické charakteristiky opačný. To je patrně dáno nedokonalostí výpočtu modelu ASM, který měnič provádí zpětnovazební regulaci otáček bez čidla.



Obrázek 53 – ASM Siemens při měření na dynamometru v laboratoři KEEZ

5.1.4 Pracovní charakteristiky

Dalším typem charakteristik, k jejichž prověření bylo v rámci měření s elektromotory na dynamometru přistoupeno, byly charakteristiky pracovní. V nich jako nezávisle proměnná vystupuje rychlost stroje (příp. reprezentovaná jako frekvence napájecího napětí). V závislosti na ní byly odečítány hodnoty zatěžovacího momentu, mechanického výkonu (oboje dle displeje dynamometru) a sdruženého napájecího napětí (dle výkonového analyzátoru). Měření bylo provedeno jen v motorickém režimu a důležitým parametrem byla konstantní (jmenovitá) hodnota statorového proudu stroje, přičemž v reálu byla tato udržována dostavováním zatěžovacího momentu na dynamometru.

Pro nezávisle proměnnou veličinu byl zvolen základní krok 10 Hz (odpovídá 300 ot.·min⁻¹), měření probíhalo v rozsahu od 20 do 70 Hz (přibližně 600 až 2 100 ot.·min⁻¹).

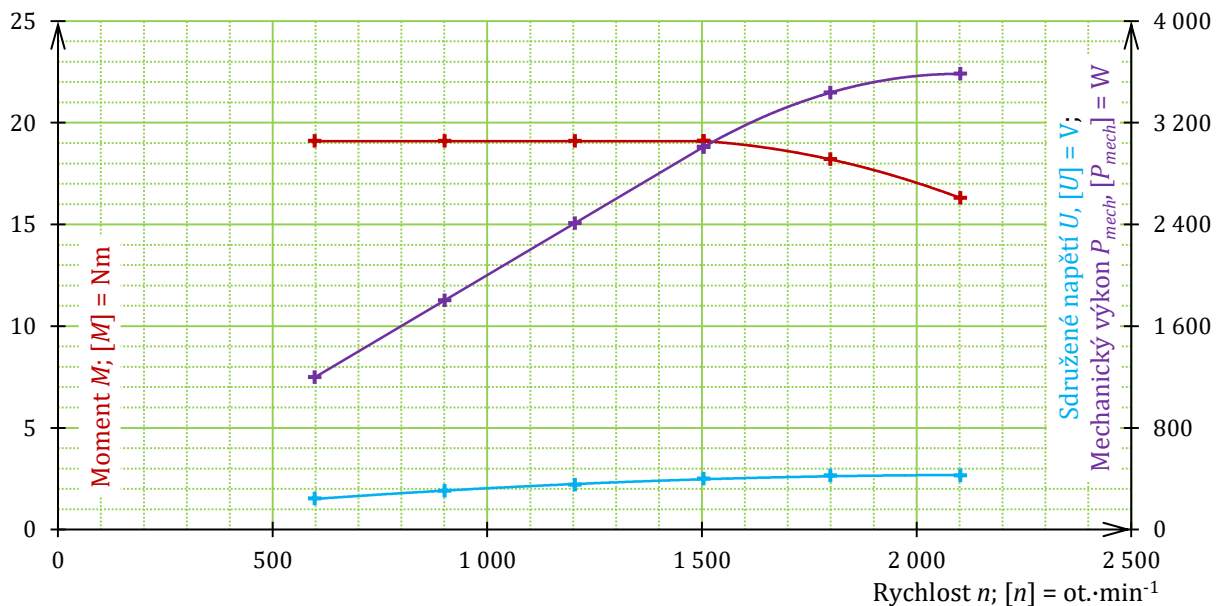
Hodnoty získané pro SynRM KSB uvádí následující tabulka, přičemž jmenovitý proud tohoto motoru je nevyšší ze všech tří strojů.

Tabulka 17 – Pracovní charakteristiky SynRM KSB

Jmenovitý satorový proud motoru $I_n = 7,8 \text{ A}$				
$f; [f] =$ = Hz	$n; [n] =$ = ot. \cdot min $^{-1}$	$M; [M] =$ = Nm	$U_{sdr};$ [U_{sdr}] = V	$P_{mech};$ [P_{mech}] = W
20	598	19,1	244	1 197
30	901	19,1	303	1 803
40	1 204	19,1	352	2 409
50	1 504	19,1	400	3 009
60	1 799	18,2	425	3 437
70	2 102	16,3	425	3 585

Ačkoliv z tabulky dat nemusí být charakter závislosti momentu a výkonu na první pohled zřejmý, po vynesení do grafu je nanejvýš jasné rozdělení rozsahu otáček na oblast zvyšování napětí a oblast odbuzování. Zatímco od 600 do 1 500 ot. \cdot min $^{-1}$ je moment stroje konstantní, při vyšších rychlostech začíná klesat, stejně jako je tomu např. při odbuzování stejnosměrného cize buzeného motoru.

Mechanický výkon stroje je dán součinem jeho momentu a mechanické úhlové rychlosti. Je-li tedy moment konstantní a otáčky rostou, lineárně s nimi roste i mechanický výkon stroje. Následně, v oblasti odbuzování, a tedy i snižování momentu, se růst mechanického výkonu zpomalí.



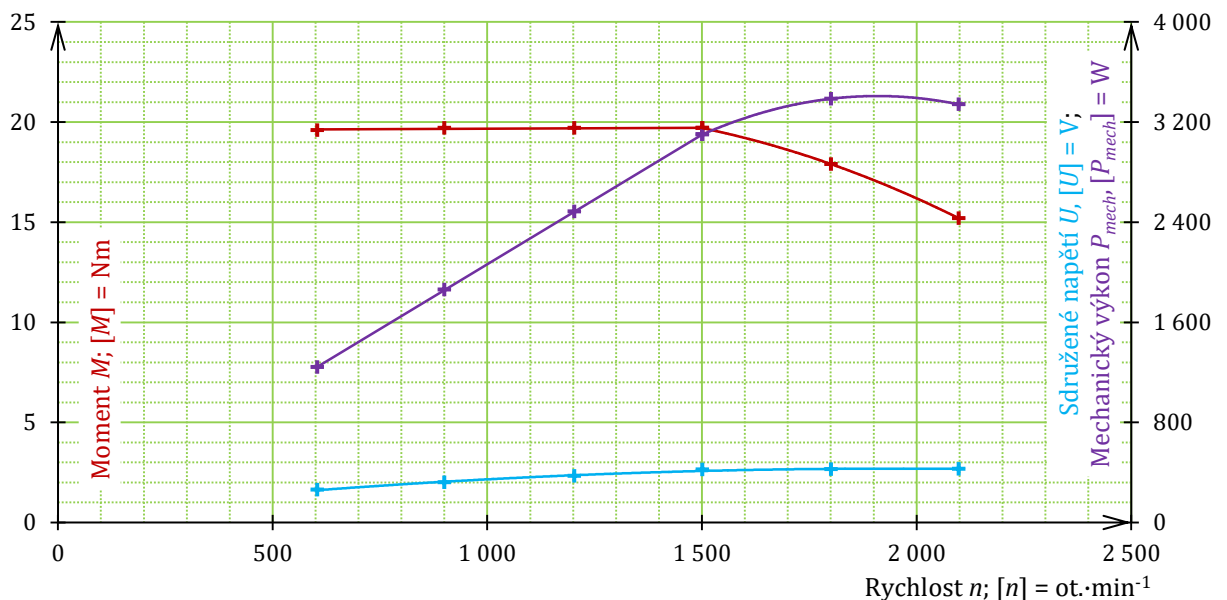
Obrázek 54 – Pracovní charakteristiky SynRM KSB

Následně bylo srovnatelné měření provedeno pro SynRM ABB. Získané hodnoty otáček, momentu, napětí a mechanického výkonu uvádí následující tabulka, přičemž hodnota proudu oproti předchozímu stroji klesla o 0,7 A.

Tabulka 18 – Pracovní charakteristiky SynRM ABB

Jmenovitý statorový proud motoru $I_n = 7,1$ A				
$f; [f] =$ = Hz	$n; [n] =$ = ot. \cdot min $^{-1}$	$M; [M] =$ = Nm	$U_{sdr};$ [U_{sdr}] = V	$P_{mech};$ [P_{mech}] = W
20	604	19,6	262	1 242
30	900	19,7	320	1 860
40	1 203	19,7	371	2 484
50	1 501	19,7	424	3 101
60	1 801	17,9	426	3 387
70	2 098	15,2	427	3 342

Ze zaznamenaných hodnot jednoznačně vyplývá, že až do jmenovitých 50 Hz (přibližně 1 500 ot. \cdot min $^{-1}$) měnič zvyšuje napájecí napětí motoru. Následně přejde do už zmíněného režimu odbuzování, protože je v zásadě dosaženo maximální napětí dané především napětí kondenzátorů ve stejnosměrném meziobvodu přístroje, a tedy i napětím sítě na vstupu měniče. Tuto i zbylé závislosti pro SynRM ABB uvádí následující obrázek.



Obrázek 55 – Pracovní charakteristiky SynRM ABB

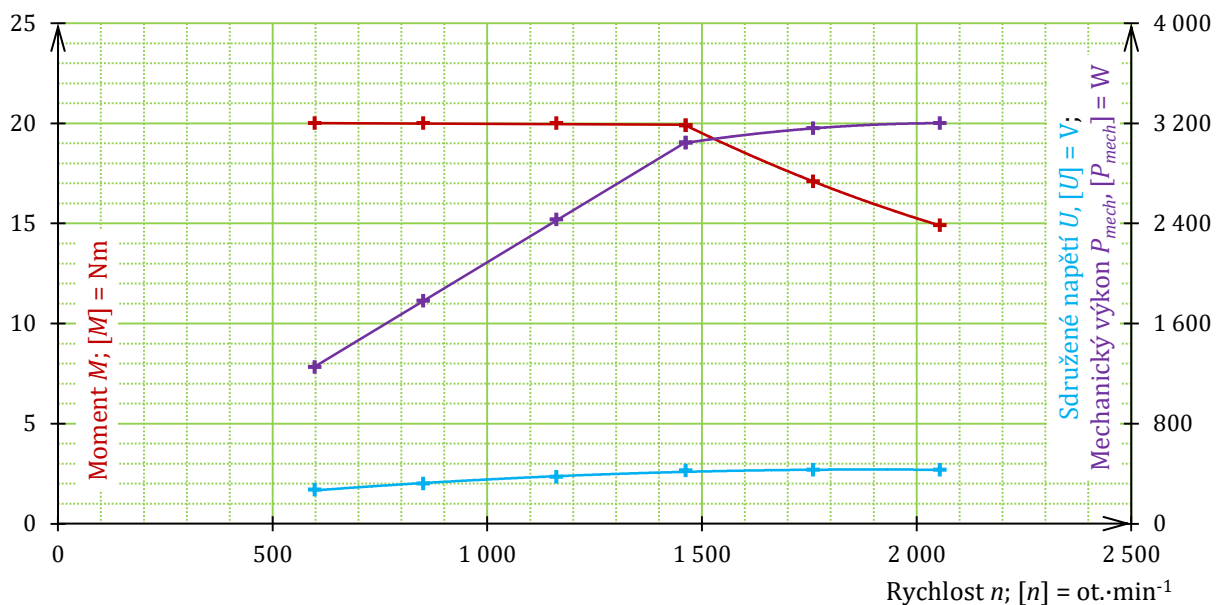
Pracovní charakteristiky byly prověřeny také u ASM Siemens. Ten se oproti SynRM vyznačuje existencí skluzu, jeho otáčky nejsou pevně dány frekvencí napájecího napětí, a tak i jeho řízení frekvenčním měničem může probíhat odlišným způsobem. Tyto skutečnosti se do

následující tabulky hodnot promítly na první pohled – otáčky stroje se od synchronních liší v jednotlivých bodech o 40 ot. \cdot min⁻¹ i více. Jmenovitý proud ASM je nejmenší ze tří prověřovaných strojů.

Tabulka 19 – Pracovní charakteristiky ASM Siemens

Jmenovitý statorový proud motoru $I_n = 6,2$ A				
$f; [f] =$ = Hz	$n; [n] =$ = ot. \cdot min ⁻¹	$M; [M] =$ = Nm	$U_{sdr};$ [U_{sdr}] = V	$P_{mech};$ [P_{mech}] = W
20	598	20	270	1 251
30	851	20	321	1 781
40	1 161	20	374	2 431
50	1 462	19,9	425	3 044
60	1 759	17,1	429	3 160
70	2 054	14,9	430	3 202

Rovněž v grafu závislosti momentu, napětí a mechanického výkonu na otáčkách ASM jsou zřejmé dvě oblasti, popsané u SynRM. Přechod do režimu odbuzování nastává při frekvenci 50 Hz (resp. při rychlosti necelých 1 500 ot. \cdot min⁻¹) a napětí 425 V, jak ukazuje i následující obrázek.



Obrázek 56 – Pracovní charakteristiky ASM Siemens

Při pohledu na pracovní charakteristiky všech tří strojů lze konstatovat, že momentově nejtvrďší je SynRM KSB, u nějž moment klesl k 16,3 Nm při zhruba 2 100 ot. \cdot min⁻¹. Pokles u SynRM ABB i u ASM byl výraznější, a to přibližně k 15 Nm. Další zhodnocení získaných dat nabídne část 5.2.

5.1.5 Použité napájecí, regulační a měřicí přístroje, elektrické stroje

Prověřovány byly SynRM KSB a ABB (údaje dle částí 2.2.1 a 2.3.1), jako jejich napájecí a řídicí přístroj byl využit frekvenční měnič Danfoss VLT FC-302 (údaje dle části 2.1.1) s připojeným brzdovým odporníkem 3x 35 Ω sériově.

Posledním elektrickým strojem byl třífázový ASM s kotvou nakrátko Siemens 1LE1001-1AB53-4AH4-Z: napájecí napětí 3x 400 V s frekvencí 50 Hz, zapojení do trojúhelníku, jmenovitý proud 6,2 A, příkon 3 kW, účinník 0,82, jmenovitá účinnost 85,5 % (třída účinnosti IE2), jmenovité otáčky 1 455 ot. \cdot min⁻¹, rozsah provozních teplot -20 °C až 40 °C, hmotnost 28 kg, krytí IP55.

Elektrické veličiny byly měřeny výkonovým analyzátozem Fluke Norma 5000: šířka pásma do 3 MHz, 3 až 6 kanálů, vstupní napětí 0,3 V až 1 000 V, napájecí napětí 230 V stř.

Rozhraní dynamometru pro obsluhu tvoří řídicí jednotka VUES M350: napájecí napětí 230 V s frekvencí 50 Hz, odebíraný proud 0,13 A, příkon 30 VA, krytí IP 20.

Dynamometr provádí zatěžování pomocí asynchronního stroje VUES ASD6000: napájecí napětí 3x 360 V s frekvencí 47 až 165 Hz, odebíraný proud 12 A, výkon 7 kW, krytí IP 23, rozsah rychlosti 0 až 10 000 ot. \cdot min⁻¹.



Obrázek 57 – Měřicí pracoviště s výkonovým analyzátozem a měničem Danfoss

5.2 Porovnání prověřovaných strojů

5.2.1 Porovnání naměřených charakteristik

Na základě hodnot naměřených v části 5.1 lze říci, že účinnost prověřovaných strojů obecně roste s frekvencí napájecího napětí (rychlostí motoru) a zatížením. Při nižších rychlostech je zároveň účinnost vyšší v motorickém režimu, ale např. při frekvenci 70 Hz (přibližně 2 100 ot. \cdot min⁻¹) a zatížení 18 Nm je u všech strojů dosahováno vyšší účinnosti v režimu generátoru.

SynRM KSB dosáhl nejvyšší účinnosti v motorickém režimu, tedy téměř 90 % při rychlosti 1 800 ot. \cdot min⁻¹ a jmenovitém momentu 19,1 Nm. V režimu generátoru vykazoval tentýž stroj účinnost dokonce 90,4 %, a to při rychlosti 2 100 ot. \cdot min⁻¹ a jmenovitém zatížení. SynRM ABB poskytl nejvyšší účinnost v motorickém režimu 89 % – při rychlosti 1 800 ot. \cdot min⁻¹ a zatížení 16 Nm. Při generátorickém brzdění pak bylo dosaženo účinnosti 89,1 % při nejvyšší frekvenci a momentu 18 Nm. ASM Siemens dosáhl účinnosti v režimu motoru přes 85 % při jmenovité frekvenci 50 Hz a momentu 18 Nm, zároveň je zajímavé, že u tohoto stroje v motorickém režimu je vždy účinnější předposlední bod (s momentem 18 Nm) než poslední (se jmenovitým momentem 19,7 Nm). V režimu generátoru pak byl nalezen nejúčinnější bod (86,8 %) při nejvyšší frekvenci 70 Hz a momentu 19,7 Nm.

Při porovnání vyjmenovaných bodů se z hlediska účinnosti jeví jako nejdokonalejší SynRM KSB. Pro průmyslové provozování však může být důležitější účinnost stroje ve jmenovitém bodě (jmenovité zatížení a frekvence, tedy i rychlost), příp. v určitém běžném provozním rozsahu. I z tohoto posouzení by však patrně vyšel jako nejvýhodnější SynRM KSB, což koresponduje s deklarovanou třídou účinnosti IE4 (o dvě třídy vyšší než u obou zbylých strojů).

Ztrátový výkon, který se maří uvnitř elektromotoru, bychom při hospodárném provozu zpravidla požadovali co nejmenší. Z naměřených charakteristik by tak jako nejvýhodnější vycházelo provozování strojů při velmi malém zatížení, jedná se ale zjevně o zcestnou úvahu (při malém zatížení jsou malé ztráty, ale i malý mechanický výkon a účinnost, většinu energie bychom tak promařili), a lépe je volit např. optimální bod z hlediska účinnosti. Porovnat však můžeme např. ztrátový výkon strojů v motorickém režimu při jmenovité frekvenci a zatížení, nebo i při nejvyšší rychlosti a nejvyšším dosaženém momentu, který byl většinou nižší než jmenovitý.

Ve jmenovitém bodě (přibližně $1\,500\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, $19,1\text{ Nm}$) SynRM KSB dosahovaly ztráty 376 W . Pro stroj ABB byla dopočtena hodnota 406 W a pro ASM pak 574 W (při momentu $19,1\text{ Nm}$). Zaměříme-li se na bod s nejvyšší rychlostí (přibližně $2\,100\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a 18 Nm), získáváme hodnoty 480 W pro SynRM KSB, 649 W pro SynRM ABB a $1\,074\text{ W}$ pro ASM Siemens. I toto porovnání tak hovoří nejvíce ve prospěch SynRM společnosti KSB.

Štítková hodnota proudu SynRM KSB je $7,8\text{ A}$. V generátorickém režimu tekl vinutím tohoto stroje proud nejvýše $7,55\text{ A}$, a to při frekvenci 35 Hz a nejvyšším zatížení $19,1\text{ Nm}$. Naopak v motorickém režimu zpravidla docházelo i k překračování jmenovité hodnoty – při jmenovitém momentu $19,1\text{ Nm}$ byl naměřen proud $7,89\text{ A}$ (rychlost $1\,500\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$), $8,12\text{ A}$ (rychlost $1\,800\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$), ale i $9,2\text{ A}$ (rychlost $2\,100\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$).

V generátorickém režimu SynRM ABB byl naměřen proud nejvýše $6,36\text{ A}$, a to při frekvenci 35 Hz a nejvyšším zatížení $19,1\text{ Nm}$. V motorickém režimu byla jmenovitá hodnota $7,1\text{ A}$ překročena až při frekvencích 60 a 70 Hz – při jmenovité rychlosti $1\,500\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a nejvyšším zatížením tekl jednou fází proud $6,98\text{ A}$.

Pro ASM Siemens je jmenovitá hodnota proudu $6,2\text{ A}$. Přibližně takovýto proud tekl vinutím stroje při frekvencích 20 a 35 Hz a jmenovitém zatížení. Pro jmenovitý bod (50 Hz , $19,7\text{ Nm}$) byl naměřen proud $6,35\text{ A}$ a pro vyšší rychlosti tato hodnota ještě rostla.

Zajímavé srovnání jistě nabízí také získané pracovní charakteristiky tří prověřovaných strojů. Při jejich měření byl udržován jmenovitý proud vinutí a u SynRM KSB to také v oblasti do $1\,500\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ včetně znamenalo vyvinutí jmenovitého momentu $19,1\text{ Nm}$. SynRM ABB překročil jmenovitou hodnotu momentu o $0,6\text{ Nm}$ a ASM (se jmenovitými $19,7\text{ Nm}$) o $0,3\text{ Nm}$. Jakmile však byla překročena jmenovitá hodnota frekvence a bylo prověřováno chování při rychlostech přibližně $1\,800$ a $2\,100\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, nejstrměji začal klesat moment vyvíjený ASM (až k $14,9\text{ Nm}$). O něco méně poklesl moment SynRM ABB (na $15,2\text{ Nm}$) a konečně nejstabilněji se choval SynRM KSB (s minimem momentu $16,3\text{ Nm}$).

Průběhy křivek momentu se také jednoznačně promítly do závislosti mechanického výkonu na otáčkách. Výkon SynRM KSB při jmenovité rychlosti dosáhl jmenovité hodnoty a nadále rostl až na $3\,585\text{ W}$. SynRM ABB vykazoval při jmenovité rychlosti výkon zhruba $3\,100\text{ W}$ (o 100 W více, než uvádí štítek), nejvýše pak $3\,342\text{ W}$ při asi $2\,100\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Výkon ASM Siemens rostl nejméně nad jmenovitou hodnotu – jen o 202 W . Za nejkorektnější lze

z hlediska pracovních charakteristik snad považovat chování SynRM KSB, i když SynRM ABB dosáhl při jmenovité rychlosti vyššího momentu, a tedy i mechanického výkonu.

5.2.2 Porovnání dalších vlastností strojů

V této části práce je uvedena tabulka, která shrnuje význačné vlastnosti zkoumaných elektrických strojů. Její první sloupec uvádí sledovaný parametr, druhý až čtvrtý sloupec hodnotu tohoto parametru postupně pro všechny tři stroje, pátý sloupec označení nejvýhodnějšího stroje (z hlediska daného řádku) a šestý případnou poznámku.

Tabulka 20 – Porovnání vybraných vlastností SynRM a ASM

Parametr	SynRM KSB	SynRM ABB	ASM Siemens	Nejlépe	Poznámka
Pořizovací cena	10 002 Kč	653,20 € 16 330 Kč	13 960 Kč	KSB	různá příplatková výbava
Příplatková výbava	PTC	PTC, IRC	Pt100, ventilátor	ABB	
Hmotnost	30 kg	23 kg	28 kg	ABB	ASM vč. ventilátoru cizího chlazení
Třída účinnosti	IE4	IE2	IE2	KSB	
Účinnost při 100% zatížení	90,4 %	85,5 %	85,5 %	KSB	štítková hodnota
Účinnost při 100% zatížení	88,9 %	88,1 %	84,4 %	KSB	naměřená hodnota při 50 Hz, motor
Splňuje účinnost	NE	ANO	NE	ABB	porovnání štítkové a naměřené hodnoty
Účinnost při 75% zatížení	90,3 %	–	–	KSB	štítková hodnota
Účinnost při 72% zatížení	88,4 %	88,2 %	85,1 %	KSB	naměřená hodnota při 50 Hz, motor
Účinnost při 50% zatížení	89,9 %	–	–	KSB	štítková hodnota
Účinnost při 52% zatížení	86,9 %	86,4 %	84,1 %	KSB	naměřená hodnota při 50 Hz, motor
Jmenovitý proud	7,8 A	7,1 A	6,2 A	–	štítková hodnota
Jmenovitý proud	7,89 A	6,98 A	6,35 A	–	naměřená hodnota při 50 Hz, motor
Proud naprázdno	4,24 A	3,57 A	2,7 A	–	naměřená hodnota při 50 Hz

Parametr	SynRM KSB	SynRM ABB	ASM Siemens	Nejlépe	Poznámka
Odchylka při zatěžování	+	+	+ / -	KSB	tvrdost mechanické charakteristiky, 50 Hz
	1 ot. · min ⁻¹	2 ot. · min ⁻¹	5 ot. · min ⁻¹		
Nejvyšší moment	19,1 Nm	19,7 Nm	20 Nm	ASM	z pracovní charakteristiky, I_n
Nejnižší moment	16,3 Nm	15,2 Nm	14,9 Nm	KSB	z pracovní charakteristiky, I_n
Nejvyšší mech. výkon	3 585 W	3 342 W	3 202 W	KSB	z pracovní charakteristiky, I_n
Rozdíl indukčností	295 mH	147 mH	–	KSB	$L_d - L_q$

Z uvedené tabulky je zřejmé, že v popsáných oblastech se jako nejvýhodnější jeví SynRM KSB. Ale např. jeho cena je jistě ovlivněna absencí příplatkové výbavy, kterou zbylé dva stroje disponují.

Z hlediska účinnosti deklarované i odměřené nabízí nejpříznivější hodnoty rovněž SynRM KSB. Až na jeden případ (generátorický režim s frekvencí 70 Hz) však nikdy nebylo dosaženo výrobcem udávaných 90,4 %. S přihlédnutím ke katalogovým údajům lze toto dost možná připsat využití jiného typu frekvenčního měniče, než výrobce KSB nabízí. Důvodem rozdílů mezi účinnostmi SynRM může být provedení jejich magnetických obvodů.

Je-li však v porovnání zařazen i ASM, důvodem jeho menší účinnosti jsou i Joulovy ztráty v elektrickém obvodu rotoru nakrátko. Jak bylo zmíněno v části 1.3.2, tato položka u SynRM principiálně nepřichází v úvahu stejně jako rotorové ztráty v železe v ustáleném stavu, kdy se rotor SynRM nachází v synchronismu se statorovým točivým polem.

Do výpočtu účinnosti ASM nebyla zahrnuta energie spotřebovaná motorem ventilátoru jeho cizího chlazení, která by přispěla ke snížení získaných hodnot účinnosti. Při zkoumání katalogů výrobců (Siemens či ABB) je však jasné, že i oni nabízí motory, a to ASM i SynRM ve vyšší třídě účinnosti IE4, v dnešních podmínkách i IE5. [17]

5.3 Vzorová zadání měření se SynRM pro studenty KEEZ

Studenti KEEZ se mohou na svých cvičeních, v předmětech věnovaných elektrickým strojům, pohonům či regulaci pohonů, principiálně zabývat kterýmkoliv ze zde uvedených

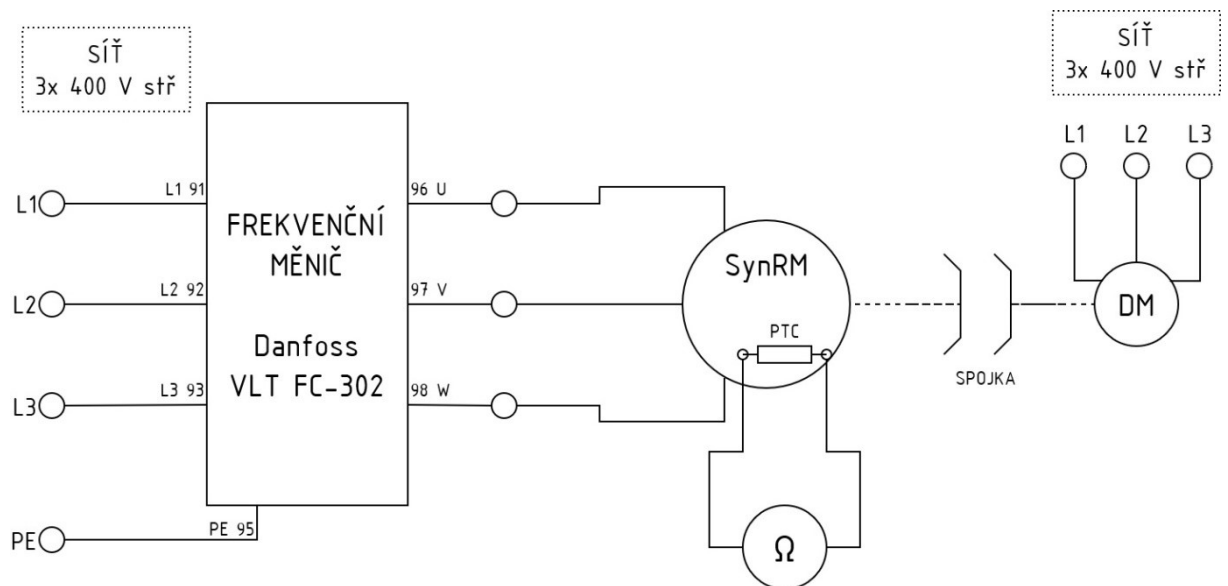
měření, příp. s adekvátní úpravou rozsahu dané úlohy – především vzhledem k časové náročnosti. Avšak pro podmínky pracoviště se SynRM lze jistě upravit i některá cvičení, která jsou v současnosti prováděna s využitím ASM, příp. dvojice ASM. Návrhy dvou takovýchto zadání jsou uvedeny v následujících odstavcích, přičemž je využito např. PTC čidel teploty uvnitř SynRM.

5.3.1 Oteplovací charakteristika motoru při napájení z frekvenčního měniče

Pro synchronní reluktanční motor napájený z přípravku s průmyslovým frekvenčním polovodičovým měničem zvolte na dynamometru konstantní hodnotu zatížení a proměřte oteplovací charakteristiku, tedy závislost:

$$\vartheta = f(t)$$

Parametry napájení zvolte srovnatelné se sítí, tedy frekvenci 50 Hz. Situaci pozorujte a hodnoty zapisujte nejméně po dobu 60 minut. Následně získaná data porovnejte s měřením na asynchronním motoru.



Obrázek 58 – Schéma zapojení pro měření oteplovací charakteristiky SynRM

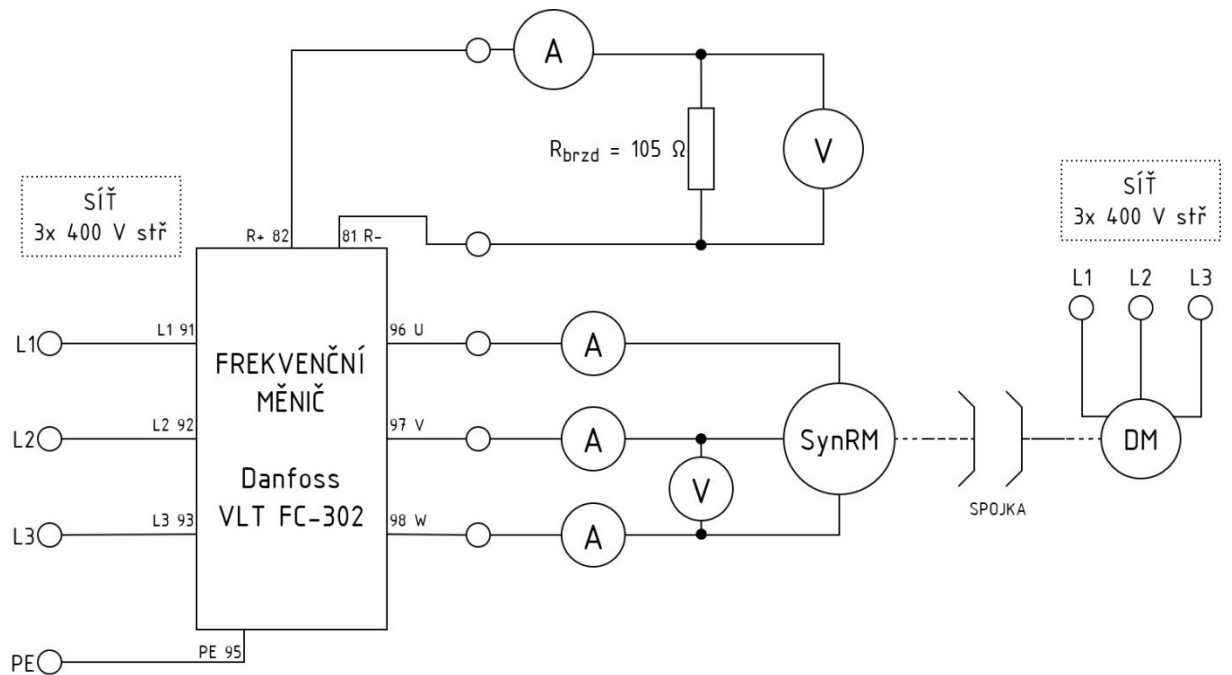
5.3.2 Zatěžování SynRM

Proveďte napájení synchronního reluktančního motoru z frekvenčního měniče při frekvencích 40 Hz a 60 Hz. Při zatěžování stroje zaznamenejte časové průběhy napětí a proudu v napájecích vodičích stroje:

$$u, i = f(t)$$

Dále prověřte závislosti otáček, sdruženého napětí, fázového proudu a stejnosměrného napětí a proudu v obvodu brzdného odporníku na brzdém (příp. hnacím) momentu, tedy funkce:

$$n, U_{sdr}, I_1, U_{ss}, I_{ss} = f(M_B \vee M_H)$$



Obrázek 59 – Schéma zapojení pro měření při zatěžování SynRM

6 NÁMĚT K DALŠÍMU VYBAVENÍ PRACOVIŠTĚ

Ze šesti výstupních signálů IRC čidla, jímž je osazen SynRM ABB, dokáže frekvenční měnič Danfoss zpracovávat dva – kanál A a B. Pro potřeby práce v laboratoři KEEZ tedy může být užitečné vyřešení způsobu napájení IRC, přenosu signálů A a B z IRC na vstupy měniče a odečítání hodnoty elektrického odporu na svorkách PTC. Zmíněné požadavky může vyřešit malá krabička určená k připevnění na žebrování skříně motoru ABB, do níž budou vstupovat dva kabely (po jednom z IRC a PTC) a na níž bude umístěna jednak vidlice konektoru D-SUB, jednak dvojice banánkových zdírek. Devítipinový D-SUB konektor umožní společně s propojovacím kabelem přivedení napájení do IRC (ze svorek měniče č. 13 a 20) a signálů z IRC (na vstupy měniče č. 32 a 33). Zdíčky pro banánky o průměru 4 mm umožní připojení digitálního multimetru ve funkci ohmmetru, pomocí něhož bude možné odečítat aktuální hodnotu odporu PTC, z níž lze jednoznačně určit teplotu uvnitř SynRM.



Obrázek 60 – Krabička zamýšlená pro montáž na SynRM ABB. Převzato z [33]

Ačkoliv úprava přímo na motoru ABB nebyla v době sepisování této práce provedena, v laboratoři KEEZ je pro toto doplnění či rozšíření pracoviště se SynRM připraven materiál, jež uvádí Tabulka 21. Rovněž v rámci přípravku s měničem Danfoss je pro zmiňované použití připraven výstup z ovládacího panelu ve formě D-SUB zásuvky. Určení čtyř z devíti jejích pinů je zřejmé z obrázku krabičky na straně 95. Zachycuje jej i Tabulka 22, přičemž nepopsané piny č. 4 a 6 až 9 jsou nevyužité.

Tabulka 21 – Součásti pro montáž rozhraní IRC a PTC na SynRM ABB

Součást	Popis	Počet	Zdroj
Zdířka panelová	pro banánek 4 mm, černá	2 ks	[26]
Montážní sada	šroubky pro konektor D-SUB / Canon	1 ks	[31]
Prodlužovací sériový kabel	CAN 9pinový, vidlice / zásuvka, 5m	1 ks	[34]
D-SUB konektor	CAN 9pinový, vidlice	1 ks	[35]
Kovová krabička	46 x 77 x 86 mm, černá	1 ks	[33]
Kabelová průchodka	vnitřní ø6,4 mm, PVC, černá	2 ks	[36]

Tabulka 22 – Využití pinů konektoru D-SUB

Pin D-SUB konektoru	Význam vodiče	Svorka měniče	Barva vodiče
1	+24 V (D)	13	rudá
2	IRC kanál A	32, připojení přes přepínač s polohami IRC – 0 – 1	bílo-oranžová
3	IRC kanál B	33 připojení přes přepínač s polohami IRC – 0 – 1	bílo-žlutá
5	GND (D)	20	černá

7 ZÁVĚR

První část této práce přináší shrnutí základních principů platných pro SynRM, jejich konstrukci, napájení a řízení. Popsány jsou také společné a rozdílné vlastnosti při porovnání s dalšími typy elektrických strojů. Přitom toto srovnání v zásadě hovoří ve prospěch SynRM, ačkoliv jsou tyto daleko méně známy i rozšířeny.

Dále jsou zmíněny některé údaje týkající se konkrétního vybavení, jež bylo pořízeno pro potřeby laboratoře KEEZ. V žádném případě ale nebyla podrobně popsána práce s menu parametrů frekvenčního měniče Danfoss, které nabízí nepřehledné množství funkcí. Ty mohou sloužit jednak k nastavení chování měniče samotného (způsob ovládání, rozložení údajů zobrazovaných na panelu LCP), jednak k řízení pohonu s různými typy elektromotorů (od nejjednodušších způsobů zadání žádané hodnoty otáček až po komplexní PID regulátory), ale i zobrazování diagnostických informací.

Jedna z částí popisuje také jednoduchá měření provedená se zkoumanými SynRM „na stole“. Jde např. o obligátní prověření chodu naprázdno, ale i poněkud netradiční metodu zjišťování statického momentu SynRM. Při ní posloužily jako laboratorní pomůcky i akátová tyč a mincíř ve funkci siloměru.

Dále je popsán návrh přípravku, do nějž byl osazen frekvenční měnič Danfoss společně s externím ovládacím pultem – plastovou krabičkou s ovládacími a indikačními prvky pro digitální i analogové vstupy a výstupy měniče. Přípravek je z podstaty frekvenčního měniče samozřejmě možno použít i spolu s dalšími typy elektromotorů, jejichž napájení a řízení přístroj od společnosti Danfoss podporuje, např. včetně PMSM.

Při sestavování této práce však byl přípravek provozován pouze se SynRM a ASM. Takto totiž bylo provedeno srovnávací měření účinnosti strojů společně s ověřením tvrdosti mechanických charakteristik. Z porovnání vychází jako nejvýhodnější SynRM společnosti KSB, který je však už z výroby zařazen o dvě třídy účinnosti výše než zbylé dva stroje. Zajímavé výsledky by jistě mohlo přinést srovnatelné měření na výkonově větších strojích. Jednak se u nich očekává vyšší jmenovitá účinnost při zařazení do těže IE třídy, jednak by posouzení mohlo vyznít relevantněji i vzhledem k trakčním aplikacím.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Škoda 15T. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_15T
- [2] ŘIHÁK, Michal. *Přehledová studie pohonných jednotek pro trakční techniku*. Pardubice, 2019. Ročníkový projekt I. Univerzita Pardubice, Doprvní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě. Vedoucí práce Jaroslav Novák.
- [3] ŘIHÁK, Michal. *Příprava ke zprovoznění pohonu se synchronním reluktančním motorem*. Pardubice, 2020. Ročníkový projekt II. Univerzita Pardubice, Doprvní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Jaroslav Novák.
- [4] Low voltage High output synchronous reluctance motors: Catalog | November 2014. In: *ABB Library* [online]. Zurich: ABB Asea Brown Boveri, 2020 [cit. 2020-01-28].
- [5] PAVELKA, Jiří, Jiří JAVŮREK a Zdeněk ČEŘOVSKÝ. *Elektrické pohony*. Praha: České vysoké učení technické, 2001.
- [6] ABB drives for HVAC: Catalog ACH580, 0.75 to 500 kW, 1 to 700 hp. In: *ABB Library* [online]. Zurich: ABB Asea Brown Boveri, 2020 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/23a4d028077c4cc48bc0cb5f1f52bfd2/ACH580_for_HVAC_catalog_3AUA0000186691_RevF_EN.pdf
- [7] MATYSKA, Pavel. Synchronní reluktanční motory v regulovaných pohonech: XXXIII. konference o elektrických pohonech. In: *HomeN (servery.homen.WebHome): XWiki* [online]. Ostrava: CIT, VŠB-TUO Ostrava, c2015-2019 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~ste37/Elektricke%20pohony%202018/09%20-%20!!!%20Synchronn%C3%AD-reluktan%C4%8Dn%C3%AD-motory.pdf>
- [8] NOVÁK, Jaroslav. *Regulace momentu synchronního motoru s permanentními magnety*. TechSim, 2019.

- [9] Návod k používání: Danfoss VLT® AutomationDrive FC 301/302. In: *Danfoss* [online]. Praha: Danfoss s.r.o., 2019 [cit. 2019-10-17]. Dostupné z: <http://files.danfoss.com/download/Drives/MG33AR48.pdf>. Verze MG33AR48.
- [10] Příručka programátora měniče FC 300. In: *Danfoss* [online]. Praha: Danfoss s.r.o., 2019 [cit. 2019-10-17]. Dostupné z: http://files.danfoss.com/download/Drives/doc_MG33M248.pdf. Verze MG.33.M2.48.
- [11] Servis a podpora – potřebujete pomoc?. *Danfoss* [online]. Praha: Danfoss, 2020 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.danfoss.com/cs-cz/service-and-support/>
- [12] Synchronous Reluctance Motor KSB SuPremE Generations B and C: Type Series Booklet. In: *KSB products – our pumps and valves: KSB* [online]. Frankenthal: KSB SE, c2017-2018 [cit. 2020-01-16].
- [13] Synchronní reluktanční motor bez magnetů, kompatibilní s IEC: KSB. *Výrobky KSB – naše čerpadla a armatury: KSB* [online]. Frankenthal: KSB SE, 2018 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://products.ksb.com/cs-cz/vyrobky/cerpadla-a-cerpaci-systemy/ovladaci-regulacni-a-diagnosticke-syste/regulace-cerpadel/drives-motors/ksb-supreme-28886>
- [14] Synchronní reluktanční motor KSB SuPremE: Návod k obsluze/montáži. In: *Výrobky KSB – naše čerpadla a armatury: KSB* [online]. Frankenthal: KSB SE, 2018 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: https://shop.ksb.com/ims_docs/00/00215A9B05B61EDA859982161847ABFD.pdf
- [15] Katalog D 81.1 SIMOTICS (2016): Katalog nízkonapěťových trojfázových asynchronních motorů SIMOTICS o výkonu 0,09 do 200kW. In: *Siemens Česká republika* [online]. Praha: Siemens, c1996-2019 [cit. 2019-06-11]. Dostupné z: http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/technika_pohonu/motory/nizkonapetove_standardni_motory/D81_1-2016_cz.pdf
- [16] Synchronous reluctance motors: Process performance motors (IEC Low voltage motors). *ABB Group: Leading digital technologies for industry* [online]. Zurich: ABB Asea Brown Boveri, 2020 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/synchronous->

reluctance-motors

- [17] Low voltage IE5 Synchronous reluctance motors: CATALOG | DECEMBER 2019. In: *ABB Library* [online]. Zurich: ABB Asea Brown Boveri, 2020 [cit. 2020-01-28].
Dostupné z:
https://library.e.abb.com/public/0310acb5bc0c492999b51c711ff94cd9/IE5%20SynRM%20motors_9AKK107743%20EN%2012-2019_High-quality.pdf
- [18] SERIE 59. *Hohner Automáticos: Incremental & Absolute Encoders* [online]. Breda: Hohner Automáticos, 2020 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z:
<https://www.encoderhohner.com/product/serie-59/>
- [19] Industrial terminal, red, glossy: Industrial terminals. In: *Ritel Ltd.* [online]. Degersheim: Ritel Ltd., 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.ritel.ch/pi/en/78/Industrial-terminal-red-glossyl.html>
- [20] D-Sub konektor CAN 9 Z. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z:
<https://www.gme.cz/konektor-can-9-z>
- [21] Krabíčka plastová Z33A PS černá (KP23). In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20].
Dostupné z: <https://www.gme.cz/krabicka-plastova-kp23-z-33a>
- [22] *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/>
- [23] Potenciometr PC16MLK005. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z:
<https://www.gme.cz/pc16mlk005>
- [24] Přístrojový knoflík plastový: průměr 18,8mm, osa 6mm, pojistný šroubek K16-2. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/pristrojovy-knoflik-k16-2>

- [25] Zdířka panelová 4mm červená: 24.246.1. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/zdirka-panelova-4mm-cervena-24-246-1>
- [26] Zdířka panelová 4mm černá: 24.246.2. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/zdirka-panelova-4mm-cerna-24-246-2>
- [27] Páčkový spínač MTS-102. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/packovy-spinac-mts-102>
- [28] Páčkový spínač MTS-103. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/packovy-spinac-mts-103>
- [29] LED 5mm: studená bílá, 3800mcd, 40°, difúzní 504WM2E-W2-1P. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/led-5mm-cool-white-3800-40-diff>
- [30] Objímka pro LED 5mm: plast, černý RTC-51. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/lcd500>
- [31] Montážní sada pro konektory DSUB: CTB-EP. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/ctb-ep>
- [32] Spojovací materiál a kotevní technika. *KUTIL.cz: Vše pro dům, dílnu a zahradu* [online]. Pardubice: Železářství KUTIL, c2016-2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.kutil.cz/spojovaci-material-a-kotevni-technika/>
- [33] Kovová krabička AH301. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/ah301>

- [34] Prodlužovací sériový kabel 9M/9F, 5m. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/kabel-seriovy-9m-9f-5-m>
- [35] D-Sub konektor CAN 9 V. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/konektor-can-9-v>
- [36] Kabelová průchodka 6,4mm: PVC, černá GM-1006. In: *GM electronic: elektronické součástky, komponenty* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., c1990-2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/gumova-pruchodka-kss-gm-1006>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Principiální náčrt konstrukce statoru a rotoru SynRM. [2]	13
Obrázek 2 – Vyobrazení SynRM společnosti ABB. Převzato z [6]	14
Obrázek 3 – Závislost momentu SynRM na elektrickém zátěžném úhlu.....	15
Obrázek 4 – Snímek statoru ASM společnosti ABB. Převzato z [6]	17
Obrázek 5 – Štítek se základními údaji polovodičového měniče Danfoss	19
Obrázek 6 – SynRM KSB SuPremE 100L pro pracoviště KEEZ	26
Obrázek 7 – SynRM ABB M3AL 100 LB 4 pro pracoviště KEEZ	28
Obrázek 8 – Schéma obvodu pro měření odporu vinutí Ohmovou metodou [3]	30
Obrázek 9 – Schéma obvodu pro určení impedance vinutí Ohmovou metodou [3].....	31
Obrázek 10 – Pracoviště pro měření Ohmovou metodou na SynRM ABB	32
Obrázek 11 – Indukčnost u SynRM KSB v závislosti na úhlu natočení [3].....	33
Obrázek 12 – Indukčnost u SynRM ABB v závislosti na úhlu natočení [3]	34
Obrázek 13 – Zapojení pracoviště pro měření na SynRM naprázdno [3]	35
Obrázek 14 – Ovládací a indikační panel LCP měniče Danfoss VLT FC-302 před oživením	36
Obrázek 15 – Závislost napětí a proudu na otáčkách SynRM KSB (chod naprázdno) [3]	37
Obrázek 16 – Závislost napětí a proudu na otáčkách SynRM ABB (chod naprázdno) [3].....	38
Obrázek 17 – Schéma zapojení pro měření statického momentu SynRM [3].....	39
Obrázek 18 – Závislost statického momentu na úhlovém natočení rotoru SynRM KSB [3]...	40
Obrázek 19 – Pracoviště pro měření statického momentu SynRM KSB [3].....	41
Obrázek 20 – Závislost statického momentu na úhlovém natočení rotoru SynRM ABB [3] ..	42
Obrázek 21 – Pracoviště pro měření na SynRM ABB naprázdno [3]	43
Obrázek 22 – Předepsaný způsob montáže měniče Danfoss VLT FC-302. Převzato z [9]	47
Obrázek 23 – Schéma silového zapojení přípravku s měničem Danfoss	48
Obrázek 24 – Panelová zdířka Ritel pro vyvedení napájecích vodičů. Převzato z [19]	48
Obrázek 25 – Schéma řídicích obvodů přípravku s měničem Danfoss	49
Obrázek 26 – D-SUB zásuvka zvolená jako rozhraní pro připojení IRC. Převzato z [20]	50
Obrázek 27 – Páčkový spínač pro obsluhu digitálních vstupů měniče. Převzato z [27]	51
Obrázek 28 – Nálepka s popisem ovládacích a indikačních prvků	52
Obrázek 29 – Nálepka se základními údaji frekvenčního měniče Danfoss.....	53
Obrázek 30 – Sestavená lišta se svorkami pro vodiče elektromotoru a brzdového odporníku	53
Obrázek 31 – Pracoviště při sestavování přípravku s měničem Danfoss	54
Obrázek 32 – Schéma zapojení pro měření se SynRM a ASM na dynamometru	56

Obrázek 33 – Účinnost SynRM KSB v generátorickém režimu	58
Obrázek 34 – Účinnost SynRM KSB v motorickém režimu.....	58
Obrázek 35 – Ztráty SynRM KSB v generátorickém režimu	59
Obrázek 36 – Ztráty SynRM KSB v motorickém režimu	59
Obrázek 37 – Proud SynRM KSB v generátorickém režimu	60
Obrázek 38 – Proud SynRM KSB v motorickém režimu.....	60
Obrázek 39 – SynRM KSB při měření na dynamometru v laboratoři KEEZ	61
Obrázek 40 – Účinnost SynRM ABB v generátorickém režimu.....	62
Obrázek 41 – Účinnost SynRM ABB v motorickém režimu	62
Obrázek 42 – Ztráty SynRM ABB v generátorickém režimu	63
Obrázek 43 – Ztráty SynRM ABB v motorickém režimu	63
Obrázek 44 – Proud SynRM ABB v generátorickém režimu.....	64
Obrázek 45 – Proud SynRM ABB v motorickém režimu	64
Obrázek 46 – SynRM ABB při měření na dynamometru v laboratoři KEEZ.....	65
Obrázek 47 – Účinnost ASM Siemens v generátorickém režimu	66
Obrázek 48 – Účinnost ASM Siemens v motorickém režimu.....	66
Obrázek 49 – Ztráty ASM Siemens v generátorickém režimu.....	67
Obrázek 50 – Ztráty ASM Siemens v motorickém režimu	67
Obrázek 51 – Proud ASM Siemens v generátorickém režimu	68
Obrázek 52 – Proud ASM Siemens v motorickém režimu.....	68
Obrázek 53 – ASM Siemens při měření na dynamometru v laboratoři KEEZ	69
Obrázek 54 – Pracovní charakteristiky SynRM KSB.....	70
Obrázek 55 – Pracovní charakteristiky SynRM ABB	71
Obrázek 56 – Pracovní charakteristiky ASM Siemens.....	72
Obrázek 57 – Měřicí pracoviště s výkonovým analyzátozem a měničem Danfoss	73
Obrázek 58 – Schéma zapojení pro měření oteplovací charakteristiky SynRM	78
Obrázek 59 – Schéma zapojení pro měření při zatěžování SynRM	79
Obrázek 60 – Krabice zamýšlená pro montáž na SynRM ABB. Převzato z [33]	80

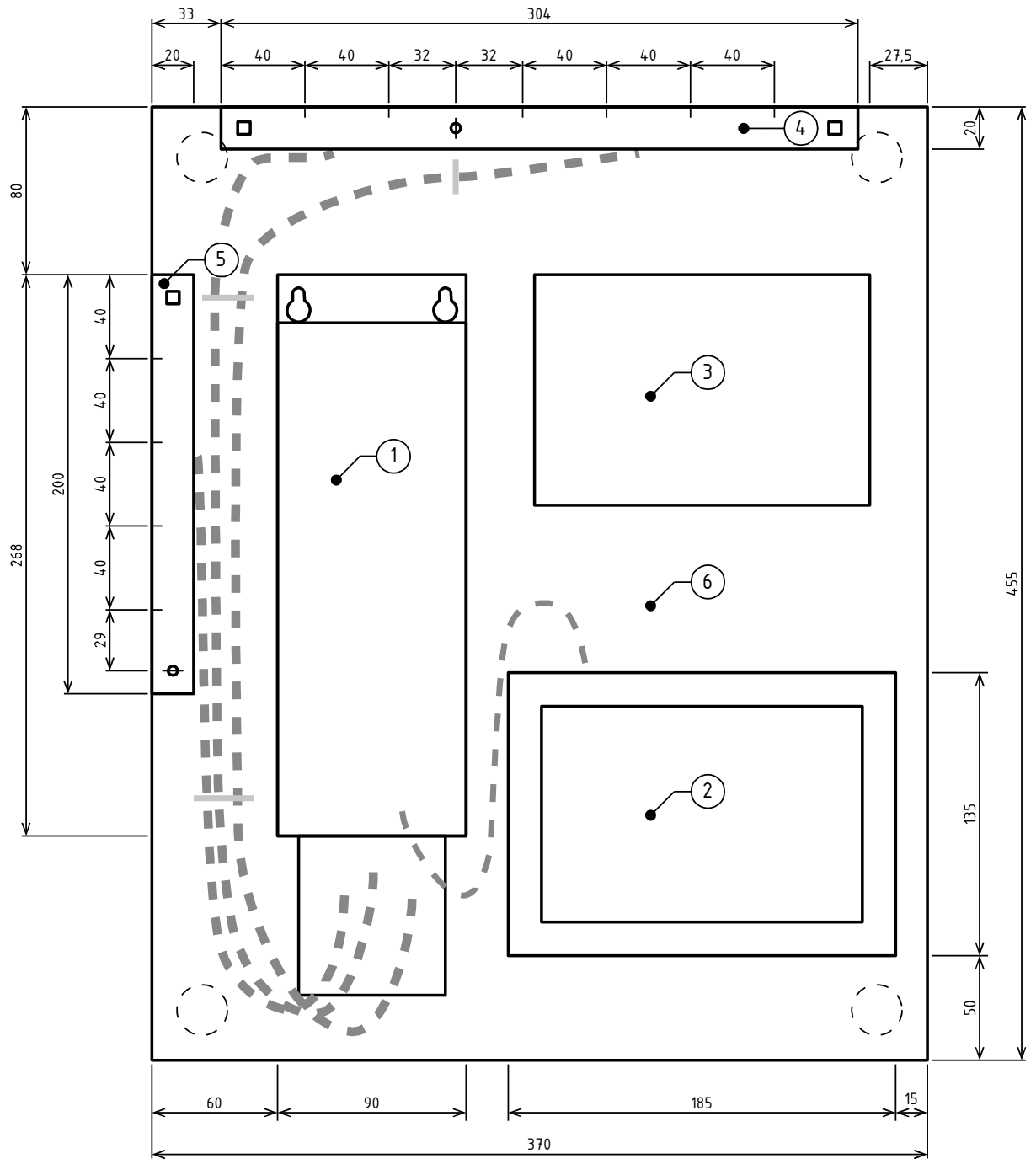
SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Štítkové hodnoty polovodičového měniče Danfoss [3].....	20
Tabulka 2 – Svorcky digitálních vstupů a výstupů měniče Danfoss. Sestaveno na základě [9] a [10].....	21
Tabulka 3 – Svorcky analogových vstupů a výstupů měniče Danfoss. Sestaveno na základě [9] a [10].....	22
Tabulka 4 – Základní možnosti pro nastavení parametru 5-19. Sestaveno na základě [10].....	23
Tabulka 5 – Štítkové hodnoty SynRM KSB [3].....	25
Tabulka 6 – Štítkové hodnoty SynRM ABB.....	27
Tabulka 7 – Základní údaje IRC čidla Hohner na SynRM ABB.....	29
Tabulka 8 – Hodnoty získané při měření odporu vinutí SynRM [3].....	31
Tabulka 9 – Hodnoty získané při měření a výpočtu indukčnosti vinutí SynRM KSB [3].....	33
Tabulka 10 – Hodnoty získané při měření a výpočtu indukčnosti vinutí SynRM ABB [3].....	34
Tabulka 11 – Měření na SynRM KSB naprázdno [3].....	37
Tabulka 12 – Měření na SynRM ABB naprázdno [3].....	38
Tabulka 13 – Hodnoty statického momentu SynRM KSB [3].....	40
Tabulka 14 – Hodnoty statického momentu SynRM ABB [3].....	42
Tabulka 15 – Kusovník součástí pro ovládací panel přípravku.....	51
Tabulka 16 – Kusovník spojovacího materiálu pro sestavení přípravku.....	54
Tabulka 17 – Pracovní charakteristiky SynRM KSB.....	70
Tabulka 18 – Pracovní charakteristiky SynRM ABB.....	71
Tabulka 19 – Pracovní charakteristiky ASM Siemens.....	72
Tabulka 20 – Porovnání vybraných vlastností SynRM a ASM.....	76
Tabulka 21 – Součásti pro montáž rozhraní IRC a PTC na SynRM ABB.....	81
Tabulka 22 – Využití pinů konektoru D-SUB.....	81

PŘÍLOHY

Příloha A – Půdorysný náčrt přípravku s obrysy osazených komponentů	92
Příloha B – Půdorysný náčrt podkladové desky přípravku.....	93
Příloha C – Fotografie přípravku po jeho sestavení	94
Příloha D – Náčrt a fotografie zapojení komponentů uvnitř ovládací krabičky	95
Příloha E – Hodnoty naměřené při zatěžování SynRM KSB	96
Příloha F – Hodnoty naměřené při zatěžování SynRM ABB.....	99
Příloha G – Hodnoty naměřené při zatěžování ASM Siemens.....	102

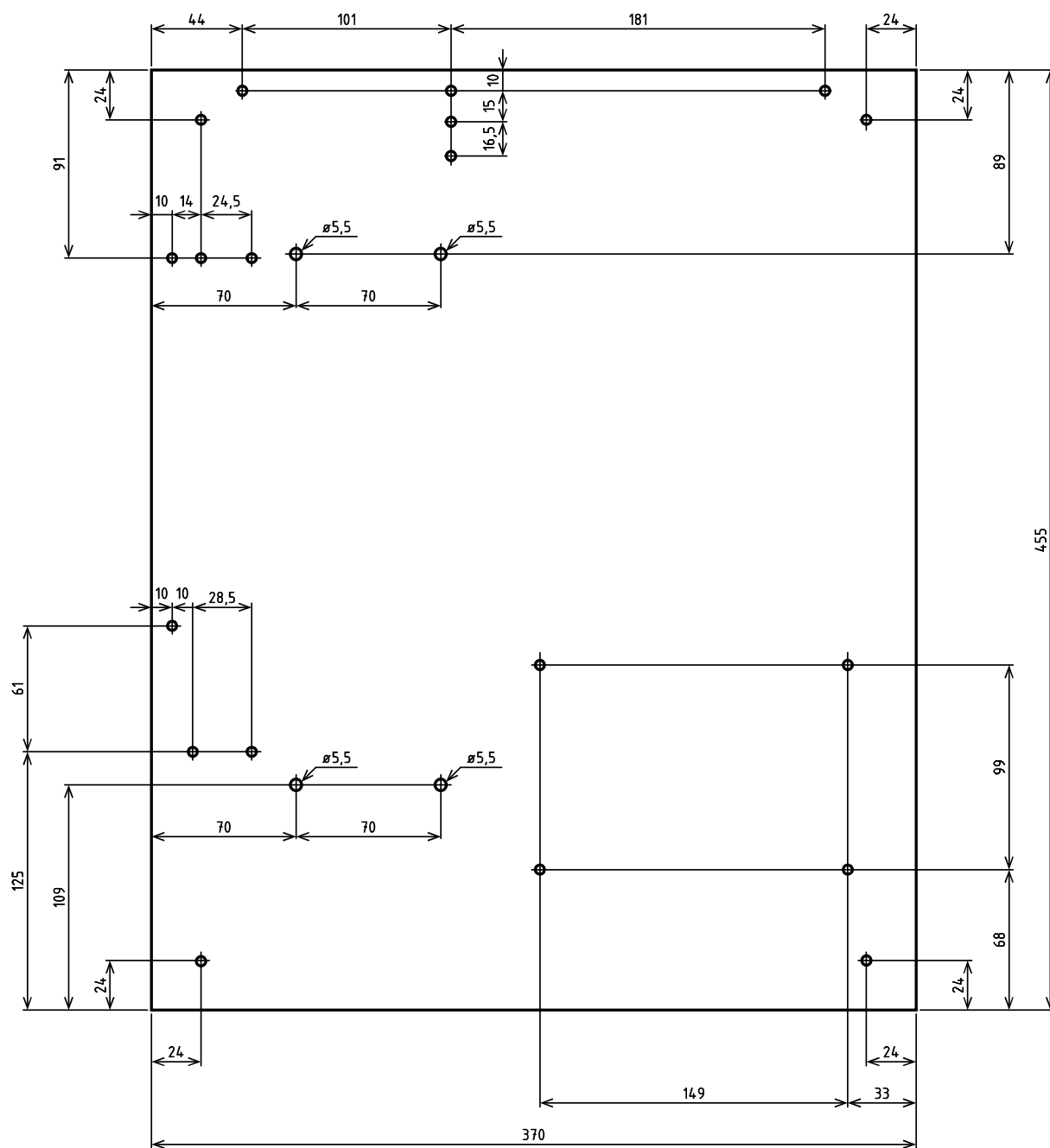
Příloha A – Půdorysný náčrt přípravku s obrysy osazených komponentů



OZNAČENÍ KOMPONENT POZICEMI

- 1 - FREKVENČNÍ MĚNIČ DANFOSS VLT FC-302
- 2 - KRABÍČKA S OVLÁDACÍMI A INDIKAČNÍMI PRVKY
- 3 - NÁLEPKA SE ZÁKLADNÍMI ÚDAJI
- 4 - LIŠTA VÝSTUPNÍCH SVOREK
- 5 - LIŠTA VSTUPNÍCH SVOREK
- 6 - PODKLADOVÁ DŘEVĚNÁ DESKA
- - SILOVÉ KABELY
- - OVLÁDACÍ KABEL
- - STAHOVACÍ PÁSKA

Příloha B – Půdorysný náčrt podkladové desky přípravku

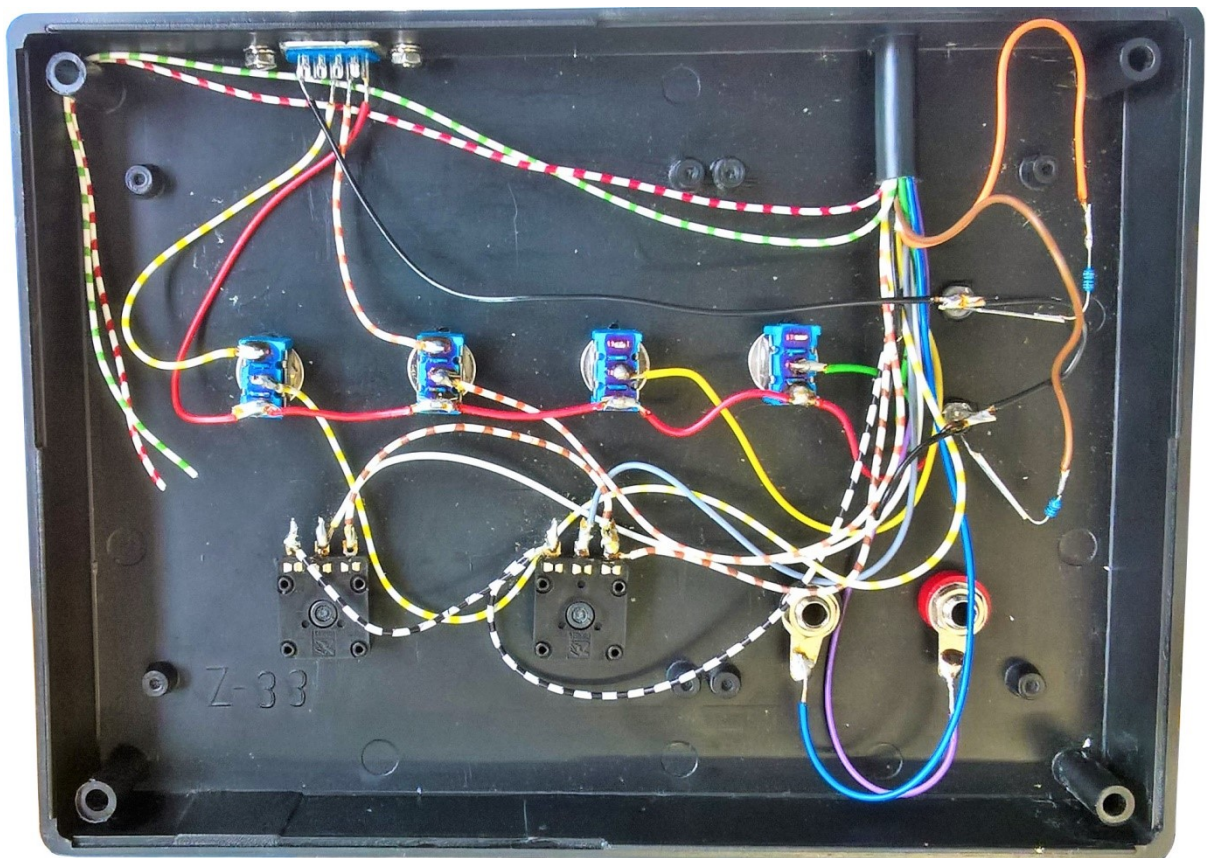
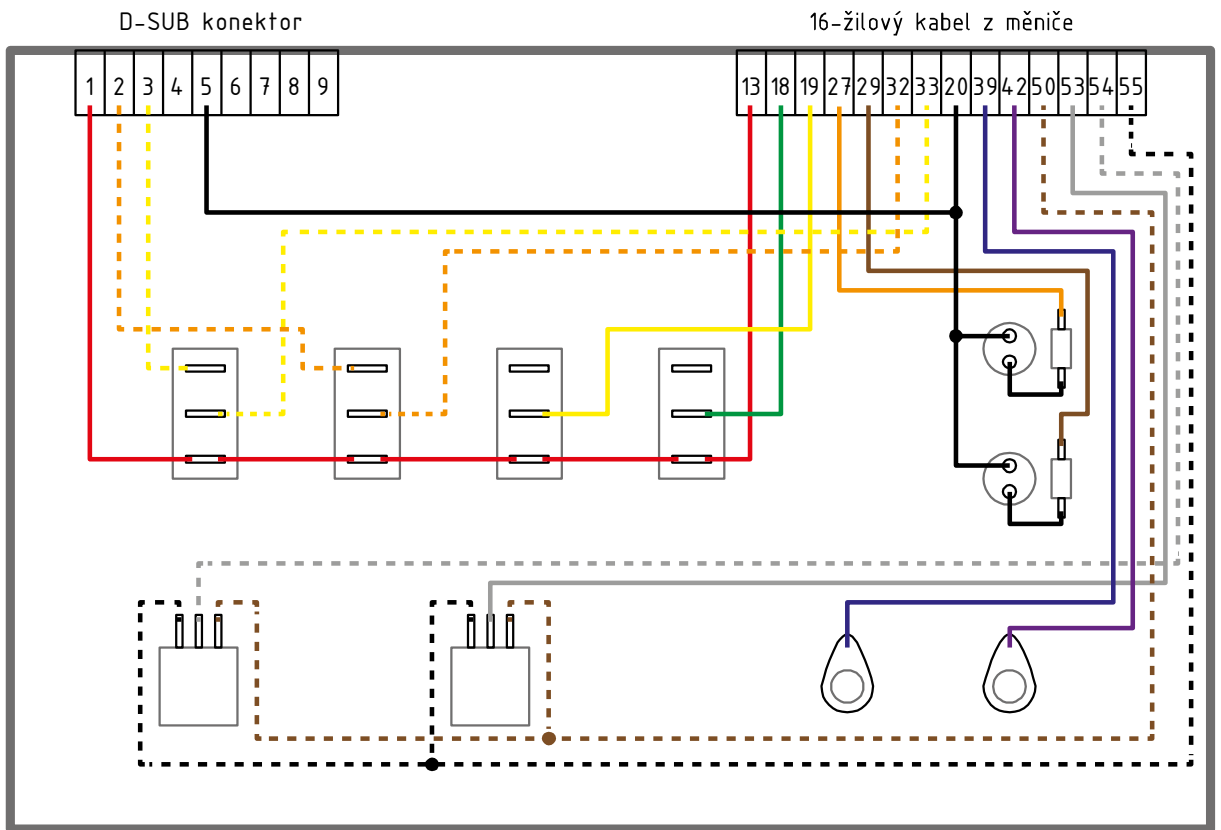


NEOZNAČENÉ DÍRY $\varnothing 4,5$

Příloha C – Fotografie přípravku po jeho sestavení



Příloha D – Náčrt a fotografie zapojení komponentů uvnitř ovládací krabičky



Příloha E – Hodnoty naměřené při zatěžování SynRM KSB

Zatěžování SynRM KSB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 20$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-10	601	-630	4,94	-480	240	5,54	-469	161	74,4%
-8	601	-503	4,78	-320	252	4,82	-369	134	73,4%
-6	601	-378	4,53	-220	256	4,53	-254	124	67,2%
-4	601	-252	4,30	-110	260	4,34	-133	119	52,8%
-2	601	-126	4,18	0	233	4,25	-14	112	11,1%
0	601	0	4,20	120	234	4,23	110	110	0,0%
2	601	126	4,30	250	234	4,32	241	115	52,3%
4	601	252	4,48	390	234	4,51	372	120	67,7%
6	601	378	4,75	520	235	4,78	508	130	74,4%
8	601	504	5,12	670	235	5,13	649	145	77,7%
10	601	630	5,50	820	236	5,54	780	150	80,8%
12	601	755	6,00	960	238	6,00	935	180	80,7%
14	601	882	6,48	1 120	239	6,50	1 090	208	80,9%
16	601	1 008	6,98	1 290	241	7,02	1 240	232	81,3%
18	601	1 133	7,49	1 460	243	7,57	1 400	267	80,9%
19,1	601	1 202	7,91	1 540	245	7,89	1 490	288	80,7%

Zatěžování SynRM KSB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 35$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-19,1	1 050	-2 100	7,53	-1 720	358	7,55	-1 790	310	85,2%
-18	1 050	-1 979	7,20	-1 620	359	7,23	-1 690	289	85,4%
-16	1 050	-1 759	6,54	-1 430	360	6,67	-1 500	259	85,3%
-14	1 050	-1 538	6,08	-1 260	361	6,14	-1 300	238	84,5%
-12	1 050	-1 319	5,60	-1 060	363	5,65	-1 110	209	84,2%
-10	1 050	-1 099	5,20	-880	366	5,23	-910	189	82,8%
-8	1 050	-880	4,82	-680	368	4,86	-710	170	80,7%
-6	1 050	-660	4,54	-480	371	4,57	-500	160	75,8%
-4	1 050	-439	4,32	-260	374	4,36	-283	156	64,5%
-2	1 050	-220	4,21	-60	357	4,25	-67	153	30,5%
0	1 050	0	4,20	150	326	4,23	148	148	0,0%
2	1 050	220	4,28	370	324	4,32	370	150	59,5%
4	1 050	440	4,45	590	323	4,49	600	160	73,3%
6	1 050	660	4,73	830	322	4,76	830	170	79,5%
8	1 050	880	5,05	1 060	322	5,11	1 060	180	83,0%
10	1 050	1 100	5,46	1 290	322	5,52	1 300	200	84,6%
12	1 050	1 319	5,90	1 540	322	5,98	1 540	221	85,6%
14	1 050	1 540	6,45	1 800	323	6,48	1 780	240	86,5%
16	1 050	1 759	6,98	2 050	324	7,01	2 030	271	86,7%
18	1 050	1 980	7,50	2 290	326	7,57	2 290	310	86,5%
19,1	1 050	2 100	7,80	2 450	328	7,88	2 430	330	86,4%

Zatěžování SynRM KSB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 50$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-19,1	1 501	-3 003	7,48	-2 610	466	7,53	-2 650	353	88,2%
-18	1 501	-2 830	7,17	-2 450	466	7,21	-2 500	330	88,3%
-16	1 501	-2 517	6,63	-2 180	466	6,67	-2 210	307	87,8%
-14	1 501	-2 202	6,11	-1 900	466	6,15	-1 920	282	87,2%
-12	1 501	-1 887	5,63	-1 620	468	5,68	-1 640	247	86,9%
-10	1 501	-1 572	5,20	-1 330	469	5,25	-1 340	232	85,2%
-8	1 501	-1 258	4,84	-1 040	471	4,88	-1 050	208	83,5%
-6	1 501	-943	4,55	-780	473	4,59	-740	203	78,5%
-4	1 501	-629	4,34	-500	475	4,39	-431	198	68,5%
-2	1 501	-314	4,22	-130	479	4,25	-115	199	36,6%
0	1 501	0	4,20	160	405	4,23	90	90	0,0%
2	1 501	315	4,28	480	402	4,31	508	193	62,0%
4	1 501	629	4,45	800	399	4,48	828	199	76,0%
6	1 501	944	4,71	1 120	398	4,74	1 150	206	82,1%
8	1 501	1 258	5,04	1 450	396	5,08	1 480	222	85,0%
10	1 501	1 572	5,46	1 790	396	5,49	1 810	238	86,9%
12	1 501	1 886	5,92	2 120	395	5,96	2 150	264	87,7%
14	1 501	2 201	6,41	2 450	396	6,47	2 490	289	88,4%
16	1 501	2 515	6,95	2 800	396	7,01	2 830	315	88,9%
18	1 501	2 830	7,53	3 150	398	7,58	3 180	350	89,0%
19,1	1 501	3 004	7,81	3 340	400	7,89	3 380	376	88,9%

Zatěžování SynRM KSB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 60$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-19,1	1 801	-3 603	7,46	-3 210	520	7,51	-3 230	373	89,6%
-18	1 801	-3 397	7,16	-3 020	519	7,21	-3 040	357	89,5%
-16	1 801	-3 017	6,78	-2 680	519	6,66	-2 690	327	89,2%
-14	1 801	-2 641	6,11	-2 330	518	6,15	-2 330	311	88,2%
-12	1 801	-2 264	5,63	-1 980	519	5,68	-1 980	284	87,5%
-10	1 801	-1 887	5,21	-1 640	520	5,25	-1 630	257	86,4%
-8	1 801	-1 509	4,85	-1 280	522	4,89	-1 270	239	84,2%
-6	1 801	-1 132	4,55	-930	523	4,59	-900	232	79,5%
-4	1 801	-756	4,34	-560	526	4,38	-530	226	70,1%
-2	1 801	-378	4,23	-190	529	4,26	-150	228	39,7%
0	1 801	0	3,83	160	438	3,87	198	198	0,0%
2	1 801	378	3,94	530	435	3,97	578	200	65,4%
4	1 801	755	4,16	930	432	4,20	969	214	77,9%
6	1 801	1 132	4,48	1 320	431	4,52	1 350	218	83,9%
8	1 801	1 509	4,87	1 700	429	4,91	1 750	241	86,2%
10	1 801	1 886	5,33	2 100	428	5,37	2 150	264	87,7%
12	1 801	2 263	5,84	2 500	426	5,89	2 550	287	88,7%
14	1 801	2 642	6,41	2 910	426	6,47	2 960	318	89,3%
16	1 801	3 018	7,00	3 330	425	7,08	3 360	342	89,8%
18	1 801	3 396	7,63	3 730	425	7,74	3 790	394	89,6%
19,1	1 801	3 603	8,05	3 970	425	8,12	4 010	407	89,9%

Zatěžování SynRM KSB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 70$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-19,1	2 100	-4 203	7,44	-3 810	568	7,50	-3 800	403	90,4%
-18	2 101	-3 961	7,14	-3 560	567	7,19	-3 570	391	90,1%
-16	2 101	-3 521	66,00	-3 170	566	6,65	-3 160	361	89,7%
-14	2 101	-3 083	6,11	-2 760	566	6,15	-2 750	333	89,2%
-12	2 101	-2 642	5,63	-2 340	566	5,67	-2 320	322	87,8%
-10	2 101	-2 202	5,21	-1 920	567	5,25	-1 910	292	86,7%
-8	2 101	-1 762	4,85	-1 520	568	4,88	-1 480	282	84,0%
-6	2 101	-1 322	4,55	-1 100	570	4,59	-1 050	272	79,4%
-4	2 101	-881	4,34	-670	572	4,38	-620	261	70,4%
-2	2 101	-441	4,22	-230	575	4,26	-180	261	40,8%
0	2 101	0	3,18	150	445	3,20	200	200	0,0%
2	2 101	440	3,34	600	440	3,38	657	217	67,0%
4	2 101	880	3,67	1 040	436	3,70	1 100	220	80,0%
6	2 101	1 321	4,12	1 500	433	4,16	1 560	239	84,7%
8	2 101	1 760	4,67	1 970	429	4,62	1 990	230	88,4%
10	2 101	2 200	5,34	2 440	427	5,37	2 490	290	88,4%
12	2 101	2 640	6,06	2 940	426	6,10	2 960	320	89,2%
14	2 101	3 082	6,82	3 410	425	6,88	3 450	368	89,3%
16	2 101	3 520	7,67	3 900	425	7,74	3 940	420	89,3%
18	2 101	3 960	8,60	4 380	424	8,66	4 440	480	89,2%
19,1	2 101	4 202	9,14	4 690	425	9,20	4 730	528	88,8%

Příloha F – Hodnoty naměřené při zatěžování SynRM ABB

Zatěžování SynRM ABB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 20$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-10	601	-630	4,40	-440	267	4,45	-480	150	76,2%
-8	601	-504	4,08	-350	271	4,11	-370	134	73,4%
-6	601	-378	3,80	-220	275	3,86	-250	128	66,1%
-4	601	-252	3,65	-110	278	3,67	-130	122	51,6%
-2	601	-126	3,51	0	248	3,58	-12	114	9,5%
0	601	0	3,58	110	249	3,58	120	120	0,0%
2	601	126	3,60	250	250	3,66	243	117	51,9%
4	601	252	3,80	380	250	3,83	376	124	67,0%
6	601	378	4,06	510	251	4,08	510	132	74,1%
8	601	504	4,36	680	251	4,40	650	146	77,5%
10	601	630	4,71	800	252	4,77	796	166	79,1%
12	601	755	5,12	940	253	5,20	945	190	79,9%
14	601	881	5,67	1 110	254	5,66	1 090	209	80,8%
16	601	1 007	6,03	1 260	255	6,15	1 250	243	80,6%
18	601	1 133	6,65	1 460	257	6,68	1 420	287	79,8%
19,1	601	1 203	6,91	1 550	258	6,87	1 480	277	81,3%

Zatěžování SynRM ABB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 35$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-18	1 053	-1 985	6,30	-1 620	376	6,36	-1 680	305	84,6%
-16	1 053	-1 764	5,80	-1 440	379	5,82	-1 490	274	84,5%
-14	1 053	-1 544	5,28	-1 260	382	5,33	-1 300	244	84,2%
-12	1 053	-1 323	4,81	-1 070	385	4,89	-1 110	213	83,9%
-10	1 053	-1 104	4,45	-890	388	4,49	-910	194	82,4%
-8	1 053	-882	4,12	-690	391	4,15	-700	182	79,4%
-6	1 053	-662	3,85	-480	395	3,88	-490	172	74,0%
-4	1 053	-441	3,62	-280	398	3,69	-282	159	63,9%
-2	1 053	-221	3,57	-70	399	3,65	-21	200	9,5%
0	1 053	0	3,55	140	346	3,58	151	151	0,0%
2	1 053	221	3,60	370	345	3,65	378	157	58,5%
4	1 053	441	3,77	590	344	3,81	610	169	72,3%
6	1 053	662	4,02	830	343	4,06	835	173	79,3%
8	1 053	882	4,33	1 060	342	4,37	1 070	188	82,4%
10	1 053	1 102	4,70	1 300	342	4,75	1 310	208	84,1%
12	1 053	1 323	5,12	1 550	342	5,18	1 550	227	85,4%
14	1 053	1 543	5,60	1 790	342	5,65	1 800	257	85,7%
16	1 053	1 764	6,11	2 040	343	6,14	2 050	286	86,0%
18	1 053	1 985	6,61	2 310	343	6,67	2 320	335	85,6%
19,1	1 053	2 106	6,96	2 460	345	6,97	2 460	354	85,6%

Zatěžování SynRM ABB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 50$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-18	1 501	-2 830	6,30	-2 450	485	6,35	-2 470	360	87,3%
-16	1 501	-2 516	5,78	-2 170	486	5,83	-2 190	326	87,0%
-14	1 501	-2 202	5,32	-1 890	488	5,35	-1 910	292	86,7%
-12	1 501	-1 889	4,84	-1 620	491	4,91	-1 620	269	85,8%
-10	1 501	-1 572	4,45	-1 320	493	4,50	-1 330	242	84,6%
-8	1 501	-1 259	4,11	-1 040	496	4,16	-1 030	229	81,8%
-6	1 501	-944	3,87	-760	499	3,89	-730	214	77,3%
-4	1 501	-630	3,66	-450	502	3,71	-420	210	66,7%
-2	1 501	-314	3,56	-150	505	3,60	-109	205	34,7%
0	1 501	0	3,53	160	429	3,58	191	191	0,0%
2	1 501	315	3,60	480	427	3,65	510	195	61,8%
4	1 501	629	3,77	800	425	3,81	840	211	74,9%
6	1 501	944	4,02	1 130	423	4,05	1 160	216	81,4%
8	1 501	1 258	4,33	1 450	422	4,36	1 490	232	84,4%
10	1 501	1 573	4,72	1 800	421	4,74	1 820	247	86,4%
12	1 501	1 887	5,12	2 130	420	5,16	2 160	273	87,4%
14	1 501	2 205	5,56	2 450	420	5,63	2 500	295	88,2%
16	1 502	2 516	6,10	2 800	420	6,15	2 860	344	88,0%
18	1 502	2 831	6,62	3 170	421	6,67	3 210	379	88,2%
19,1	1 502	3 004	6,91	3 400	422	6,98	3 410	406	88,1%

Zatěžování SynRM ABB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 60$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-18	1 801	-3 397	6,29	-2 970	539	6,34	-3 000	397	88,3%
-16	1 801	-3 019	5,77	-2 650	540	5,81	-2 650	369	87,8%
-14	1 801	-2 642	5,27	-2 320	542	5,34	-2 310	332	87,4%
-12	1 801	-2 264	4,85	-1 970	544	4,90	-1 960	304	86,6%
-10	1 801	-1 886	4,46	-1 620	546	4,50	-1 610	276	85,4%
-8	1 801	-1 509	4,14	-1 260	549	4,17	-1 250	259	82,8%
-6	1 801	-1 132	3,84	-900	552	3,90	-880	252	77,7%
-4	1 801	-756	3,65	-550	555	3,70	-515	241	68,1%
-2	1 801	-378	3,55	-180	558	3,60	-142	236	37,6%
0	1 801	0	2,61	140	446	2,64	180	180	0,0%
2	1 801	378	2,74	520	441	2,77	561	183	67,4%
4	1 801	755	3,03	910	437	3,05	955	200	79,1%
6	1 801	1 133	3,40	1 300	435	3,44	1 340	207	84,6%
8	1 801	1 509	3,87	1 700	432	3,91	1 740	231	86,7%
10	1 801	1 886	4,41	2 100	429	4,46	2 140	254	88,1%
12	1 801	2 263	5,01	2 510	426	5,07	2 550	287	88,7%
14	1 801	2 641	5,68	2 920	427	5,72	2 970	329	88,9%
16	1 801	3 018	6,38	3 380	427	6,42	3 390	372	89,0%
18	1 801	3 395	7,14	3 780	426	7,19	3 840	445	88,4%
19,1	1 801	3 605	7,60	4 020	425	7,65	4 100	495	87,9%

Zatěžování SynRM ABB									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 70$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-18	2 101	-3 962	6,27	-3 530	589	6,33	-3 530	432	89,1%
-16	2 101	-3 522	5,77	-3 150	589	5,82	-3 130	392	88,9%
-14	2 101	-3 080	5,28	-2 740	591	5,34	-2 720	360	88,3%
-12	2 101	-2 642	4,86	-2 330	593	4,90	-2 310	332	87,4%
-10	2 101	-2 202	4,46	-1 920	595	4,50	-1 890	312	85,8%
-8	2 101	-1 763	4,13	-1 500	597	4,17	-1 470	293	83,4%
-6	2 101	-1 320	3,86	-1 080	600	3,90	-1 040	280	78,8%
-4	2 101	-882	3,67	-650	603	3,70	-604	278	68,5%
-2	2 101	-442	3,56	-220	606	3,60	-165	277	37,3%
0	2 101	0	2,06	150	447	2,08	180	180	0,0%
2	2 101	440	2,28	600	441	2,32	630	190	69,8%
4	2 101	880	2,73	1 040	437	2,75	1 080	200	81,5%
6	2 101	1 321	3,30	1 500	433	3,33	1 550	229	85,2%
8	2 101	1 761	3,97	1 970	431	4,00	2 020	259	87,2%
10	2 101	2 201	4,73	2 380	428	4,76	2 490	289	88,4%
12	2 101	2 641	5,57	2 930	427	5,61	2 990	349	88,3%
14	2 102	3 083	6,47	3 440	427	6,53	3 500	417	88,1%
16	2 102	3 521	7,50	3 990	427	7,56	4 020	499	87,6%
18	2 102	3 961	8,77	4 550	426	8,84	4 610	649	85,9%

Příloha G – Hodnoty naměřené při zatěžování ASM Siemens

Zatěžování ASM Siemens									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 20$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-19,1	595	-1 189	5,39	-810	256	5,49	-860	329	72,3%
-18	595	-1 122	5,23	-770	257	5,23	-820	302	73,1%
-16	596	-998	4,73	-710	260	4,73	-740	258	74,1%
-14	596	-873	4,32	-610	262	4,37	-650	223	74,5%
-12	597	-750	3,90	-530	266	3,95	-560	190	74,7%
-10	597	-626	3,58	-440	268	3,56	-460	166	73,5%
-8	598	-501	3,16	-350	271	3,20	-360	141	71,9%
-6	598	-376	2,92	-250	274	2,89	-250	126	66,5%
-4	599	-251	2,56	-150	276	2,61	-140	111	55,8%
-2	600	-126	2,41	-30	247	2,46	-30	96	23,8%
0	600	0	2,39	90	249	2,41	96	96	0,0%
2	601	126	2,47	220	250	2,49	230	104	54,8%
4	602	252	2,69	360	252	2,70	360	108	70,0%
6	602	378	2,99	510	254	3,00	511	133	74,0%
8	603	505	3,34	660	256	3,37	650	145	77,7%
10	603	631	3,77	820	258	3,79	810	179	77,9%
12	603	758	4,20	980	260	4,24	978	220	77,5%
14	604	885	4,65	1 160	263	4,71	1 150	265	77,0%
16	604	1 012	5,16	1 340	265	5,21	1 320	308	76,7%
18	605	1 140	5,70	1 520	267	5,73	1 500	360	76,0%
19,7	604	1 245	6,10	1 680	269	6,18	1 670	425	74,6%

Zatěžování ASM Siemens									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 35$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-19,7	1 047	-2 160	5,54	-1 710	382	5,60	-1 750	410	81,0%
-18	1 047	-1 974	5,17	-1 570	383	5,21	-1 600	374	81,1%
-16	1 047	-1 755	4,73	-1 400	385	4,76	-1 430	325	81,5%
-14	1 048	-1 537	4,29	-1 230	388	4,33	-1 250	287	81,3%
-12	1 048	-1 318	3,89	-1 050	390	3,91	-1 060	258	80,4%
-10	1 049	-1 098	3,46	-860	392	3,52	-870	228	79,2%
-8	1 049	-880	3,13	-680	394	3,15	-680	200	77,3%
-6	1 049	-660	2,79	-490	396	2,84	-480	180	72,7%
-4	1 049	-440	2,56	-290	397	2,58	-280	160	63,6%
-2	1 050	-220	2,42	-80	399	2,43	-67	153	30,5%
0	1 050	0	2,38	120	345	2,40	140	140	0,0%
2	1 051	220	2,46	350	345	2,49	369	149	59,6%
4	1 051	440	2,69	590	346	2,72	606	166	72,6%
6	1 052	661	3,00	830	347	3,02	846	185	78,1%
8	1 052	881	3,36	1 070	348	3,39	1 090	209	80,8%
10	1 052	1 101	3,76	1 320	349	3,81	1 340	239	82,2%
12	1 052	1 322	4,23	1 590	350	4,25	1 600	278	82,6%
14	1 053	1 542	4,67	1 850	351	4,72	1 860	318	82,9%
16	1 053	1 763	5,15	2 130	352	5,21	2 130	367	82,8%
18	1 053	1 984	5,66	2 400	354	5,71	2 410	426	82,3%
19,7	1 053	2 172	6,10	2 640	355	6,16	2 660	488	81,7%

Zatěžování ASM Siemens									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 50$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-19,7	1 495	-3 085	5,54	-2 580	489	5,61	-2 600	485	84,3%
-18	1 496	-2 821	5,14	-2 370	490	5,21	-2 370	451	84,0%
-16	1 496	-2 508	4,71	-2 110	492	4,76	-2 100	408	83,7%
-14	1 497	-2 195	4,29	-1 850	494	4,32	-1 830	365	83,4%
-12	1 497	-1 882	3,86	-1 580	496	3,90	-1 560	322	82,9%
-10	1 497	-1 566	3,46	-1 300	497	3,51	-1 280	286	81,7%
-8	1 497	-1 255	3,12	-1 020	499	3,16	-1 000	255	79,7%
-6	1 498	-942	2,81	-740	500	2,84	-710	232	75,4%
-4	1 498	-628	2,56	-450	502	2,60	-410	218	65,3%
-2	1 499	-314	2,41	-140	504	2,44	-110	204	35,0%
0	1 499	0	2,38	160	427	2,40	170	170	0,0%
2	1 500	314	2,51	480	427	2,53	510	196	61,6%
4	1 500	628	2,73	820	427	2,76	850	222	73,9%
6	1 501	943	3,04	1 150	427	3,06	1 180	237	79,9%
8	1 502	1 258	3,39	1 480	428	3,41	1 530	272	82,2%
10	1 503	1 573	3,79	1 820	427	3,82	1 870	297	84,1%
12	1 503	1 894	4,19	2 180	426	4,27	2 230	336	84,9%
14	1 504	2 205	4,70	2 550	426	4,76	2 590	385	85,1%
16	1 505	2 520	5,22	2 910	425	5,27	2 960	440	85,1%
18	1 505	2 838	5,82	3 300	425	5,51	3 320	482	85,5%
19,7	1 505	3 106	6,29	3 650	424	6,35	3 680	574	84,4%

Zatěžování ASM Siemens									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 60$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-19,7	1 799	-3 713	5,55	-3 180	543	5,60	-3 180	533	85,6%
-18	1 799	-3 392	5,14	-2 900	545	5,20	-2 900	492	85,5%
-16	1 799	-3 015	4,69	-2 590	547	4,74	-2 570	445	85,2%
-14	1 800	-2 638	4,25	-2 250	548	4,31	-2 240	398	84,9%
-12	1 800	-2 263	3,84	-1 920	550	3,89	-1 900	363	84,0%
-10	1 800	-1 887	3,46	-1 580	551	3,50	-1 560	327	82,7%
-8	1 800	-1 510	3,09	-1 250	553	3,15	-1 220	290	80,8%
-6	1 801	-1 133	2,79	-900	554	2,84	-860	273	75,9%
-4	1 801	-756	2,56	-550	555	2,59	-510	246	67,5%
-2	1 801	-378	2,41	-190	557	2,45	-140	238	37,0%
0	1 802	0	1,88	140	450	1,90	190	190	0,0%
2	1 803	378	2,01	540	444	2,04	580	202	65,2%
4	1 803	755	2,32	960	440	2,35	978	223	77,2%
6	1 804	1 134	2,75	1 340	438	2,79	1 390	256	81,6%
8	1 805	1 511	3,26	1 760	436	3,31	1 800	289	83,9%
10	1 805	1 890	3,84	2 180	433	3,90	2 230	340	84,8%
12	1 806	2 269	4,48	2 630	431	4,54	2 670	401	85,0%
14	1 806	2 649	5,16	3 090	430	5,24	3 130	481	84,6%
16	1 806	3 025	5,88	3 560	430	5,96	3 600	575	84,0%
18	1 805	3 402	6,68	4 040	429	6,76	4 100	698	83,0%
19,7	1 803	3 722	7,41	4 500	428	7,49	4 560	838	81,6%

Zatěžování ASM Siemens									
Frekvence napětí na výstupu měniče $f = 70$ Hz									
$M; [M] =$ $= \text{Nm}$	$n; [n] =$ $= \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$P_{mech};$ $[P_{mech}] = \text{W}$	$I_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{A}$	$P_{m\acute{e}ni\acute{c}h};$ $[P_{m\acute{e}ni\acute{c}h}] = \text{W}$	$U_{sdr};$ $[U_{sdr}] = \text{V}$	$I_1;$ $[I_1] = \text{A}$	$P_{el};$ $[P_{el}] = \text{W}$	$\Delta P;$ $[\Delta P] = \text{W}$	η
-19,7	2 099	-4 332	5,53	-3 770	593	5,58	-3 760	572	86,8%
-18	2 100	-3 959	5,13	-3 430	594	5,18	-3 430	529	86,6%
-16	2 100	-3 521	4,69	-3 060	596	4,73	-3 040	481	86,3%
-14	2 100	-3 079	4,25	-2 670	597	4,28	-2 640	439	85,7%
-12	2 100	-2 646	3,84	-2 290	598	3,87	-2 250	396	85,0%
-10	2 100	-2 200	3,45	-1 870	600	3,48	-1 840	360	83,6%
-8	2 101	-1 761	3,09	-1 480	601	3,13	-1 430	331	81,2%
-6	2 101	-1 322	2,78	-1 070	602	2,81	-1 020	302	77,2%
-4	2 101	-882	2,55	-650	603	2,58	-600	282	68,0%
-2	2 101	-442	2,40	-240	605	2,43	-180	262	40,7%
0	2 101	0	1,49	150	475	1,71	250	250	0,0%
2	2 102	440	1,74	610	446	1,77	640	200	68,8%
4	2 103	881	2,20	1 070	442	2,25	1 110	229	79,4%
6	2 104	1 322	2,80	1 550	438	2,85	1 590	268	83,1%
8	2 105	1 763	3,51	2 040	434	3,56	2 090	327	84,4%
10	2 105	2 203	4,28	2 560	431	4,35	2 610	407	84,4%
12	2 104	2 643	5,12	3 110	430	5,19	3 160	517	83,6%
14	2 102	3 080	6,03	3 690	430	5,76	3 720	640	82,8%
16	2 099	3 517	7,03	4 310	429	7,13	4 340	823	81,0%
18	2 094	3 946	8,20	4 980	428	8,30	5 020	1074	78,6%