

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra výkonové elektroniky a strojů

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přesnost řízení asynchronního pohonu

Autor práce: **Bc. Miroslav Škrlant**  
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**

---

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2022/2023

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav ŠKRLANT**  
Osobní číslo: **E21N0020K**  
Studijní program: **N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Přesnost řízení asynchronního pohonu**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

### Zásady pro vypracování

1. Provedte rešerši možného doplňkového vybavení asynchronního pohonu (chlazení, snímač otáček / polohy, brzda).
2. Uveďte používané druhy snímačů otáček a specifikujte jejich vlastnosti.
3. Provedte měření na asynchronním pohonu v otevřené / uzavřené smyčce s ohledem na dynamické stavy.
4. Vyhodnoťte naměřené údaje a zhodnoťte požadavky aplikací na zpětnou vazbu dle druhu pohonu.



Doc. Ing. Karel Hošek, Ph.D.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Zdeněk Fiedler, Ph.D.

V Plzni dne: 11. 12. 2022

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**  
Rozsah grafických prací: **min. 10**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Katalog motorů Siemens.
2. Katalog měniče G-120 Siemens.
3. Manuál SW Starter.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**  
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

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

  
**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

## **Abstrakt**

V této diplomové práci je provedena rešerše možného doplňkového vybavení asynchronních pohonů. U doplňkového vybavení pohonů je odůvodněno při jakých aplikacích je vhodné jej použít. Zvláštní pozornost je zde věnována snímačům otáček a opodstatnění jejich použití při řízení pohonu pomocí frekvenčního měniče. V rámci diplomové práce bylo provedeno měření přesnosti regulace otáček frekvenčním měničem při použití zpětné vazby ze snímače otáček a bez snímače. V závěru práce je vyhodnocení naměřených údajů a shrnutí za jakých podmínek je zpětné vazby potřeba využívat.

## **Klíčová slova**

Asynchronní stroj, přesnost řízení rychlosti, zpětná vazba, snímač otáček

## **Abstract**

This thesis is divided into two parts. The first part presents results of various additions to asynchronous drives. For every type of addition, specific conditions for its use are provided. Specific parts of these additions are sensors for rotation, and their specific functions during the speed regulation of asynchronous drives by frequency converters. The second part of this thesis involves measuring the quality of speed regulation and comparing speed regulators with and without speed feedback. The results of this thesis recommend accessories for asynchronous drives for specific use.

## **KeyWords**

Asynchronous drive, quality of speed regulator, feedback, rotation sensor

## **Poděkování**

Upřímně děkuji vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za odborné konzultace, podporu a cenné podněty a připomínky poskytované v průběhu zpracování této práce. Další poděkování patří paní Mgr. Daně Vondráškové za přečtení diplomové práce a opravu gramatiky.

# Obsah

Úvod .....	- 1 -
1 Doplnkové vybavení asynchronního pohonu .....	- 2 -
1.1 Brzda .....	- 2 -
1.1.1 Brzdění pohonu snižováním kmitočtu .....	- 2 -
1.1.2 Stejnoseměrné a kompaundní brzdění pohonu .....	- 3 -
1.1.3 Mechanické brzdění pohonu .....	- 4 -
1.2 Chlazení pohonu .....	- 6 -
1.2.1 Vlastní chlazení pohonu .....	- 7 -
1.2.2 Cizí chlazení pohonu .....	- 7 -
1.3 Snímače teploty ve vinutí .....	- 8 -
1.3.1 Teplotní spínač .....	- 8 -
1.3.2 PTC .....	- 8 -
1.3.3 Teplotní snímač Pt100 a Pt1000 .....	- 9 -
1.4 Anti-kondenzační ohřev .....	- 10 -
1.5 Snímače otáček .....	- 11 -
1.5.1 IRC snímač .....	- 11 -
1.5.2 Snímač Sinus/Kosinus .....	- 13 -
1.5.3 Tachodynamo .....	- 14 -
1.5.4 Tachogenerátor .....	- 15 -
1.5.5 Resolver .....	- 15 -
1.5.6 Otáčkové relé – ALNICO .....	- 15 -
2 Měření na asynchronním pohonu .....	- 17 -
2.1 Konfigurace pohonu a zapojení .....	- 17 -
2.2 Měření při konstantních otáčkách .....	- 22 -
2.2.1 Měření při konstantních jmenovitých otáčkách pohonu .....	- 22 -
2.2.2 Měření při konstantních otáčkách – malá rychlost .....	- 23 -
2.2.3 Měření při konstantních otáčkách – velmi malá rychlost .....	- 24 -
2.2.4 Shrnutí údajů naměřených při konstantních otáčkách pohonu .....	- 25 -
2.3 Měření při rozběhu na jmenovité otáčky .....	- 27 -

2.4	Měření při změně zatížení pohonu.....	- 29 -
	Zhodnocení a závěr.....	I
	Literatura .....	II
	Přílohy .....	III



## Seznam symbolů a zkratek

$M_N$	Nm	jmenovitý moment
$M_{MAX}$	Nm	maximální moment
$U_N$	V	jmenovité napětí
$I_N$	A	jmenovitý proud
$P_N$	W	jmenovitý výkon
$f_N$	Hz	jmenovitý kmitočet
$n_N$	$\text{min}^{-1}$	jmenovitá rychlost otáčení
$n_{MAX}$	$\text{min}^{-1}$	maximální rychlost otáčení
$P_{K1}$	W	vstupní výkon převodovky
$M_{K2}$	Nm	výstupní moment převodovky
$n_1$	$\text{min}^{-1}$	vstupní otáčky převodovky
$n_2$	$\text{min}^{-1}$	výstupní otáčky převodovky
$\Delta v$	$\text{min}^{-1}$	odchylka požadované a skutečné rychlosti otáčení
$V_p$	$\text{min}^{-1}$	požadovaná rychlost otáčení
$V_s$	$\text{min}^{-1}$	skutečná rychlost otáčení
$\Delta v_{prum}$	$\text{min}^{-1}$	průměrná odchylka požadované a skutečné rychlosti otáčení
$t_1, t_2$	s	časový interval měření

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá přesností řízení pohonu s asynchronním motorem a možnostmi doplňkového vybavení. V praxi se při navrhování konfigurace elektrického pohonu často dostáváme do střetu názorů ohledně způsobu řízení a nutného vybavení pohonu. Obvykle bývá ve specifikaci daného zařízení, že pohon je řízen frekvenčním měničem, ale už je na uvážení a zkušenostech daného konstruktéra v jakém režimu pohon bude řízen a používán. Vzhledem k tomu, že mnohé pohony na strojním zařízení pro průmyslové použití nepracují v dynamickém režimu častých změn otáček a zatížení, je patrné, že nebude potřeba je vybavovat některým doplňkovým vybavením, jako jsou snímače otáček, brzdy, externí ventilátor. Cílem této diplomové práce je najít rozlišení aplikací, kde je již potřebné použít pohony s některým dalším doplňkovým vybavením. Každé takové doplňkové vybavení pohonu má vliv na cenu, náročnost provedení kabeláže, zapojení a rozměry pohonu. V manuálech pohonů a frekvenčních měničů nacházíme různé informace a doporučení, jimiž je dobré se řídit, ovšem ne vždy je to ekonomicky a funkčně efektivní. V rámci zpracování této diplomové práce je provedena řada měření na pohonech s asynchronními stroji. Z naměřených dat budou vyhodnoceny rozdíly mezi požadovanou rychlostí a skutečnou rychlostí otáčení pohonu při různých možnostech nastavení frekvenčního měniče, či použití zpětné vazby z čidla otáček.

# 1 Doplňkové vybavení asynchronního pohonu

Jako doplňkové vybavení asynchronního pohonu považujeme zařízení a komponenty, jenž nám zajišťují lepší vlastnosti fungování pohonu, rozšíří oblast použití nebo pomohou odhalit nebezpečné a poruchové stavy.

- Brzda + signalizace aktivace brzdy
- Externí chlazení
- Snímač otáček
- Snímač teploty ve vinutí

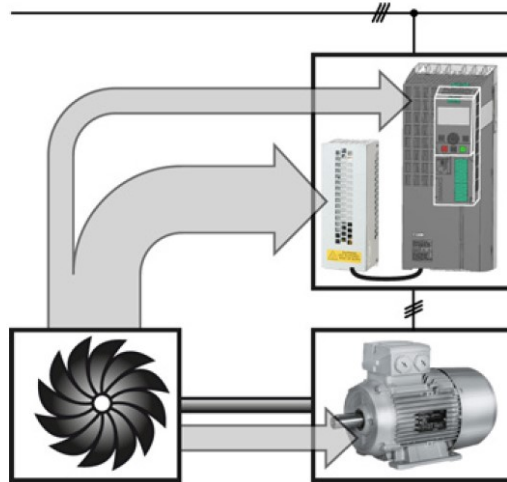
## 1.1 Brzda

K brzdění pohonů se dostáváme, pokud se odebíraný mechanický výkon z pohonu dostane do záporných hodnot. V praxi to znamená, že mechanická energie je do pohonu dodávána a je větší, než jsou ztráty v pohonu. Podle principu můžeme brzdění rozdělit na elektrické a mechanické. Další mechanickou možností k zajištění nežádoucího otáčení motoru je konstrukční uspořádání motoru a samosvorné převodovky s převodovým poměrem, který nedovolí přenést moment opačným směrem.

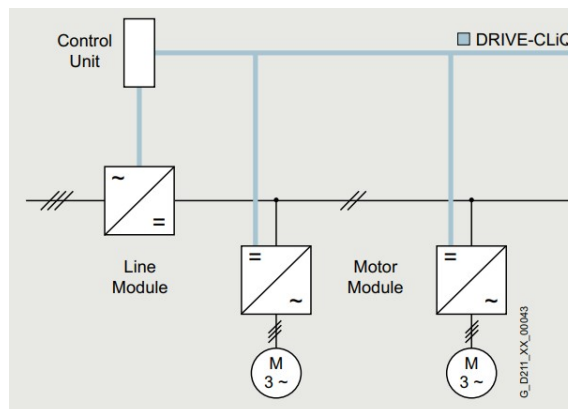
### 1.1.1 Brzdění pohonu snižováním kmitočtu

Při brzdění snižováním kmitočtu dochází k tomu, že pohon má větší otáčky, než je odpovídající generovaný kmitočet z frekvenčního měniče. Tím v asynchronním pohonu dostává skluz rotoru do záporných hodnot a pohon funguje jako generátor. Generovaná energie se dostává do frekvenčního měniče, kde se podílí na napájení stejnosměrného meziobvodu, jehož napětí tím začne stoupat. U základních typů frekvenčních měničů - např. GS120 Siemens, jsou vyvedeny svorky pro připojení brzdových odporů, čímž přebytečnou brzdovou energii měníme na teplo. (Obr. 1 Brzdění do odporu) V případě aplikací, kde je nutné pravidelné brzdění, je efektivnější použít frekvenční měnič vyšší řady – např. S120 Siemens, jehož konfigurace umožňuje připojit více frekvenčních měničů na jeden stejnosměrný meziobvod. (Obr. 2 Více pohonů na jedné stejnosměrné sběrnici) Touto konfigurací můžeme využít energii získanou brzděním na pohánění jiného motoru. V případě, že jiný pohon s odpovídajícím výkonem nemáme, můžeme konfiguraci frekvenčního měniče doplnit o „active line module“, což je více kvadrantový usměrňovač s možností rekuperace energie do sítě. Mezi hlavní výhody brzdění pohonu snižováním kmitočtu patří definované brzděné chování, kterým je možné dosáhnout konstantního

brzdného momentu. Pohon není nadměrně tepelně zatěžován. Brzdění sníženým kmitočtem je v praxi nejpoužívanější způsob brzdění u dynamických aplikací. Z hlediska řízení a následných možností zpracování energie je možné jej použít i pro náročné aplikace s častým nebo dlouhodobým brzděním (odvíjecí stanice, jeřáby, trakční pohony, dopravníky). Maximální brzdňý výkon je omezen na 100% jmenovitého výkonu měniče nebo dle možností přetěžování měniče v dané konfiguraci, kde jsme omezeni velikostí přetížení a dobou brzdění. (1) (2)



Obr. 1 Brzdění do odporu (SIEMENS, SINAMICS G120 low voltage inverters – 2014)

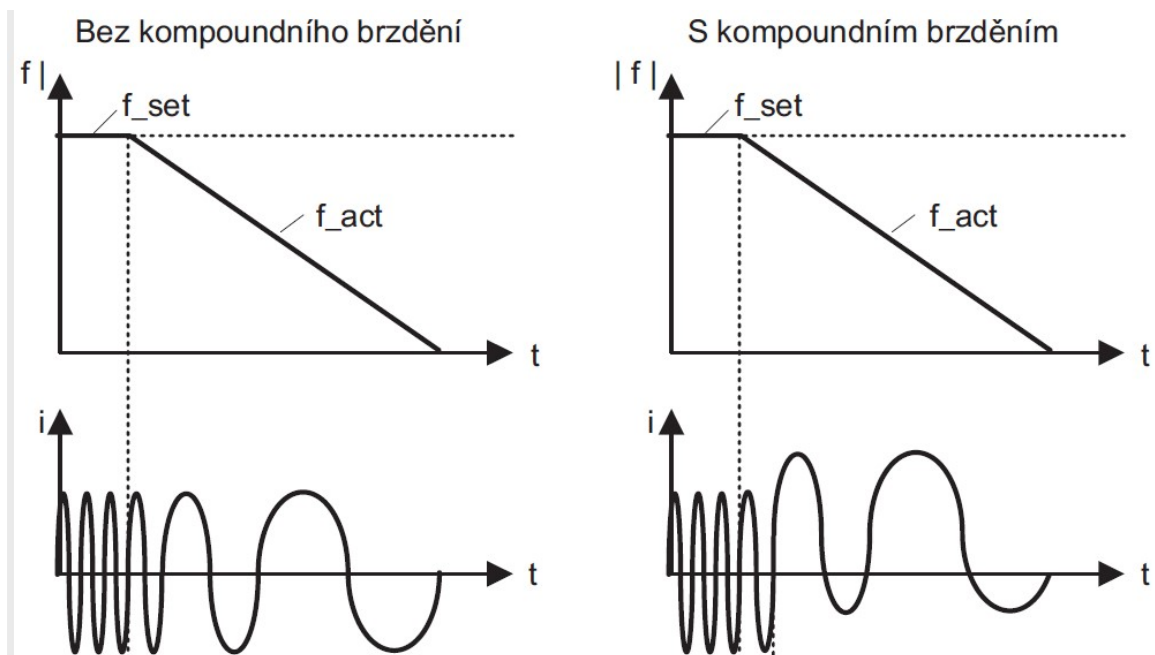


Obr. 2 Více pohonů na jedné stejnosměrné sběrnici (SIEMENS, SINAMICS G120 low voltage inverters – 2014)

### 1.1.2 Stejnosměrné a kompaundní brzdění pohonu

Stejnosměrné brzdění pohonu se při řízení pohonu frekvenčním měničem příliš nepoužívá, jeho použití je spíš v případě, kde je pohon v provozu bez frekvenčního měniče. V případě aplikace pohonu s frekvenčním měničem je při brzdění pohonu

stejnoseměrným proudem veškerá brzdná energie přeměňována na teplo v motoru, frekvenční měnič není zatěžován brzdou energií. Brzdový moment při použití stejnosměrné brzdy není konstantní, je závislý na otáčkách pohonu. Při aplikaci s frekvenčním měničem je možné použít tzv. kompaundní brzdění, které je kombinací stejnosměrného brzdění a brzdění snižováním kmitočtu. (Obr. 3 Porovnání průběhů proudu při brzdění snižováním kmitočtu a kompaundním brzděním) V tomto režimu brzdění máme možnost definovaného brzděného chování, měnič nemusí zpracovávat brzdou energii. Brzdá energie se ztrácí jako teplo v motoru, je nutné při návrhu aplikace počítat s velkým zahříváním motoru během brzdění. Tyto způsoby brzdění se v praxi používají pro občasná brzdění či zastavování pohonů.



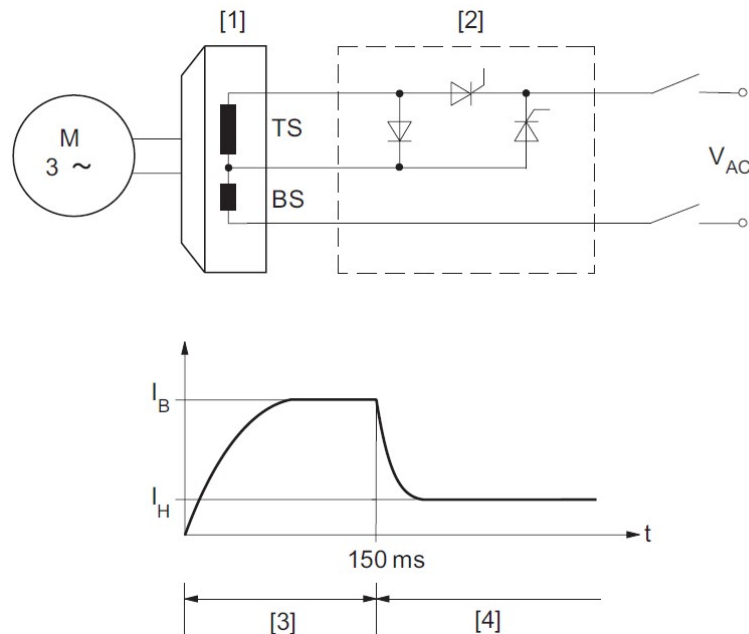
Obr. 3 Porovnání průběhů proudu při brzdění snižováním kmitočtu a kompaundním brzděním (SIEMENS, SINAMICS G120 low voltage inverters – 2014)

### 1.1.3 Mechanické brzdění pohonu

Mechanické brzdy se u pohonů zpravidla používají jako přídržné brzdy pro zabránění otáčení motoru, nebo k bezpečnému zastavení pohonu v případě vypnutí, nebo výpadku napájení stroje. Mechanická brzda v pohonu bývá zpravidla umístěna na straně, kde není vyveden hřídel, před ventilátorem. Ovládání a fungování brzdy je závislé na dané aplikaci a úrovni bezpečnosti zařízení. Z pohledu bezpečnosti se brzdy konstruují tak, aby v případě výpadku napájecích energií došlo automaticky k zabrzdění pomocí přítlačných pružin. Účinky brzdy a brzdá síla je dána konstrukcí a mechanickým seřízením

přítlačných pružin. Odbrzdnění se provádí pomocí elektromagnetů, nebo v případě servisu lze pohon odbrzdit i manuálně. Z pohledu ovládání brzdy jsou dvě varianty, jak brzdu ovládat. První variantou je připojení ovládacích cívek brzdy rovnou ke svorkám vinutí motoru. V případě, že je motor ovládán stykačem a mechanicky to vyhovuje vlastnostem zařízení, je toto nejsnazší řešení ovládání brzdy. V případě řízení motoru frekvenčním měničem, nebo softstartérem, je zapotřebí provést ovládání brzdy externím přívodem.

Základními požadavky na brzdy pohonů jsou brzdňý moment, rychlost aktivace brzdy, rychlost odbrzdění. Brzdňý moment je zajištěn mechanicky počtem a silou přítlačných pružin. Rychlost odbrzdění je závislá na rychlosti nabuzení elektromagnetů, které uvolňují přítlak brzdňého kotouče. Pro zvýšení rychlosti odbrzdění je možné použít kombinaci dvou cívek elektromagnetu. (Obr. 4 Systém dvou cívek ovládání brzdy) Na samotné odbrzdění jsou zapojeny cívky tak, aby měly větší výkon. Po odbrzdění dochází k přepnutí cívek na nižší výkon, jenž slouží pro udržení brzdy v odbrzděném stavu. Tímto řešením dosáhneme snížení času potřebného pro rozběh stroje, snížení tepelných ztrát na cívkách brzdy, zvýšení spínací frekvence, delší životnost brzdy.



Obr. 4 Systém dvou cívek ovládání brzdy (SEW, CATALOG AC Motors – 11/2019)

BS Akcelerační cívka

TS Přidržná cívka

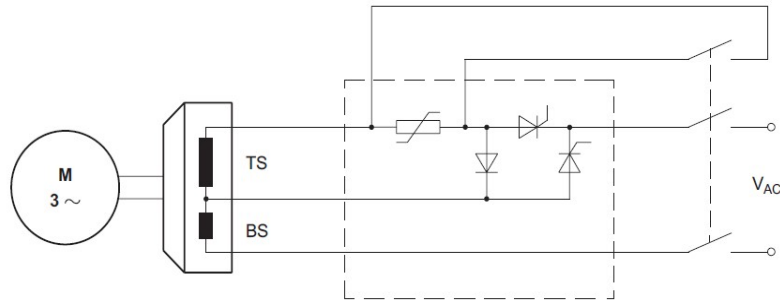
[1] Brzda

[2] Řídící obvod brzdy

[3] Čas odbrzdění

[4]	Přidrž – brzda odbrzděná
$I_B$	Akcelerační proud
$I_H$	Přidržný proud

Pro zvýšení rychlosti zabrzdění je zapotřebí co nejrychleji odebrat energii z cívek elektromagnetu. Z těchto důvodů je možné do obvodu zařadit vypínatelný varistor, který se ovládá společně s napájecím napětím vinutí cívek brzdy. (Obr. 5 Zařazení varistoru do obvodu řízení brzdy)

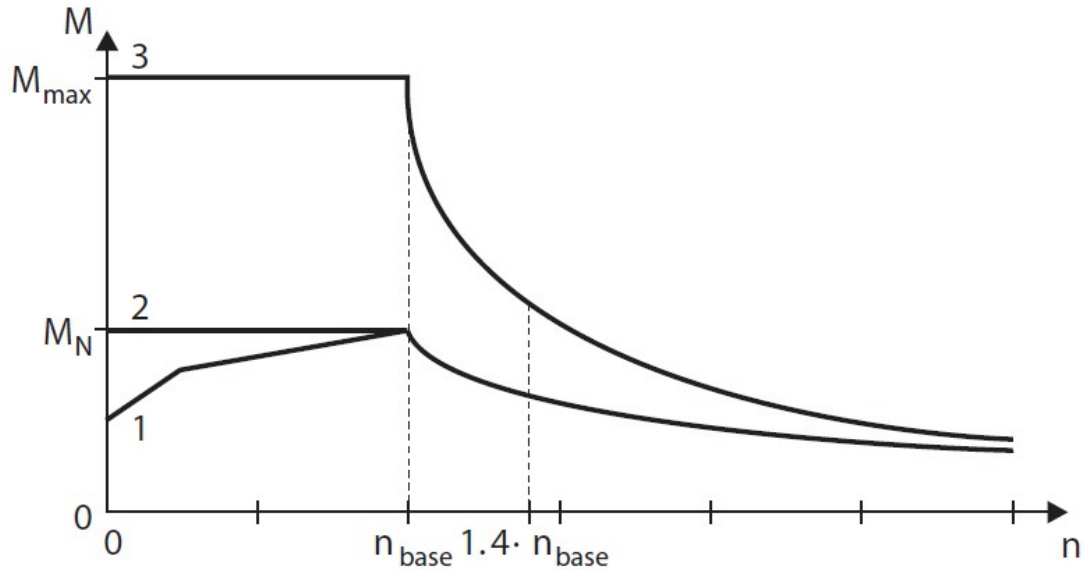


Obr. 5 Zařazení varistoru do obvodu řízení brzdy (SEW, CATALOG AC Motors – 11/2019)

Dalším možným vybavením konfigurace brzd pohonů jsou snímače a jejich vyhodnocení. Nejčastěji využívané signály jsou pro aktuální stav brzdy – zabrzděno / odbrzděno. Také je možné aplikovat měření tloušťky brzdového obložení, hlídání časů zabrzdění a odbrzdění a podobně. Tyto údaje jsou vhodné zejména u aplikací, kde se předpokládá prediktivní údržba a online sledování stavu výrobního celku.

## 1.2 Chlazení pohonu

Volbu typu chlazení pohonu je potřeba řešit v závislosti na způsobu použití daného pohonu. V katalogovém listu výrobce pohonů najdeme graf pro doporučený způsob chlazení. (Obr. 6 Rozdělení druhu chlazení)



Obr. 6 Rozdělení druhu chlazení (SEW, CATALOG AC Motors – 11/2019)

$M_N$	Jmenovitý moment pohonu
$M_{MAX}$	Maximální moment pohonu
$n_{BASE}$	Jmenovité otáčky pohonu
1	Vlastní chlazení pohonu – je dostačující pokud se pohon používá v oblasti pod touto křivkou
2	Cizí chlazení pohonu
3	Křivka maximálního momentu pohonu

### 1.2.1 Vlastní chlazení pohonu

Vlastním chlazením pohonu je myšleno chlazení ventilátorem namontovaným na hřídeli a upevněném na motoru. Takto konfigurované pohony se používají zejména při použití pohonu bez frekvenčního měniče při jmenovitém zatížení. V případě použití s frekvenčním měničem je třeba brát v úvahu používaný rozsah otáček a zatížení pohonu. V případě některých malých pohonů, nebo pohonů pro speciální použití není ventilátor namontován vůbec a pohon je chlazen pouze tepelným vyzařováním na svém povrchu.

### 1.2.2 Cizí chlazení pohonu

Cizím chlazením pohonu se rozumí provedení pohonu tak, aby chlazení nebylo závislé na zatížení a otáčkách pohonu. Vzduchem chlazené pohony mají instalován ventilátor s nezávislým pohonem, čímž dochází k efektivnímu chlazení pohonu i při velmi malých otáčkách nebo kontinuálně během přerušovaného chodu. Cizí chlazení pohonu lze také provádět pomocí vody. V případě chlazení pohonu vodou je pohon konstruován tak,



že statorovými plechy je veden vodní okruh, jenž zajišťuje jejich chlazení. Otevírání ventilu chladicí vody se provádí podobnou logikou spínání, jako u vzduchového externího chlazení. Vodou chlazený pohon má v katalogovém listu předepsaný potřebný průtok vody i maximální tlak. Pohony vodou chlazené bývají vybavené anti-kondenzačním ohřevem vinutí, jenž se spouští, pokud je nebezpečí kondenzace vlhkosti ve vinutí vlivem studené chladicí vody ve vodním okruhu. Toto nebezpečí vzniká především při delších odstávkách, pokud je vodní okruh napojen na centrální chladicí systém. (3)

### 1.3 Snímače teploty ve vinutí

V souvislosti s chlazením pohonu a monitorování jeho provozního stavu je také možnost vybavení pohonu snímačem teploty ve vinutí. Teplotní snímač se připojuje jako zpětná vazba do frekvenčního měniče a dle nastavení parametrů můžeme nastavit reakci frekvenčního měniče na situaci:

- Informativní hodnota, v případě překročení limitní teploty frekvenční měnič sepne signalizaci varování a pohon funguje na plný výkon dál.
- Omezení výkonu pohonu snížením otáček na předdefinovanou hodnotu výkonu.
- Frekvenční měnič sepne signalizaci poruchy na pohonu a automaticky dojde k zastavení pohonu.

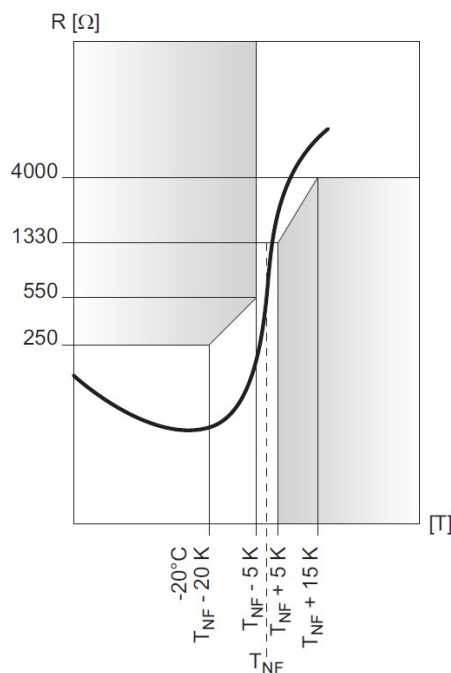
#### 1.3.1 Teplotní spínač

Teplotní spínač je na principu bimetalového kontaktu. Jedná se především o preventivní ochranu motoru proti přehřátí. Při dosažení kritické teploty dojde k rozepnutí kontaktu bimetalu. Hysterezní teplota k opětovnému sepnutí bimetalového kontaktu bývá kolem 40°C. Výhodou bimetalového kontaktu je, že nepotřebuje další zařízení na vyhodnocení signálu, je možnost jím spínat přímo digitální vstup, nebo pomocné relé až do ovládacího napětí 250V. (3)

#### 1.3.2 PTC

PTC snímače se v pohonech používají jako ochrana motoru proti přehřátí. PTC snímače se používají se spínací charakteristikou od 130°C do 170°C – dle vlastností a limitních provozních teplot použitého pohonu. Jedná se o termistor s pozitivní teplotní charakteristikou, kde při běžné provozní teplotě  $R = 20 \Omega - 500\Omega$ . Pokud dojde k ohřátí snímače nad limitní teplotu, dojde ke zvýšení odporu snímače  $R > 4k\Omega$  dle charakteristiky. (Obr. 7 Odporová charakteristika PTC snímače) Měření odporu PTC

snímače se provádí při  $U \leq 2,5V$ , nebo  $I < 1mA$ . Pro zvětšení teplotní ochrany se používají 3 PTC snímače umístěné ve statorovém vinutí motoru, zapojené do série s vývody vyvedenými do svorkovnice motoru. (3)

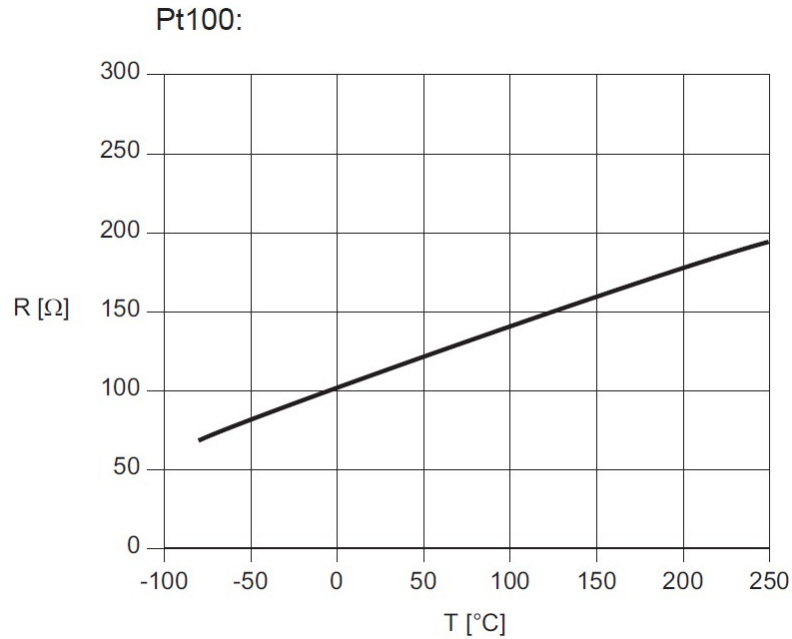


Obr. 7 Odporová charakteristika PTC snímače (SEW, CATALOG AC Motors – 11/2019)

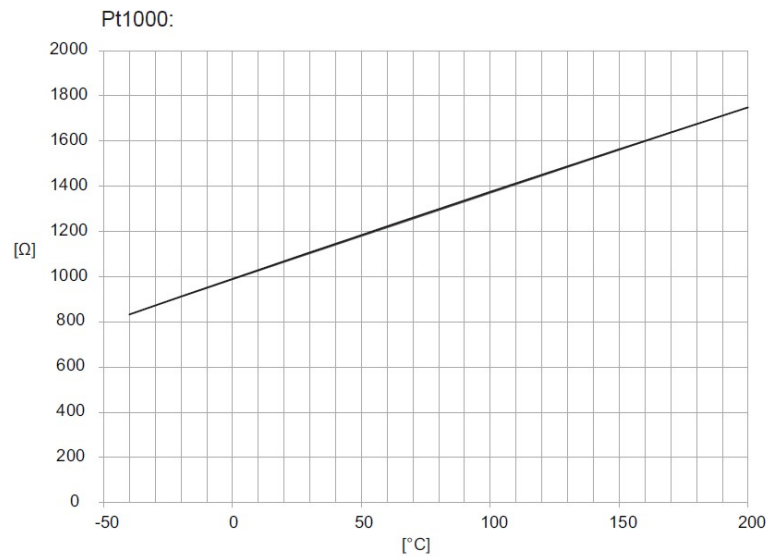
$T_{NF}$  Nominální teplota snímače ( $^{\circ}K$ )

### 1.3.3 Teplotní snímač Pt100 a Pt1000

Teplotní snímače Pt100 a Pt1000 jsou snímače určené k měření teploty ve statorovém vinutí motoru, přičemž vyhodnocení a případné nastavení spínacích teplot, varování či poruchy nastavujeme až ve frekvenčním měniči, popřípadě v jiném vyhodnocovacím zařízení. Platinových snímačů se využívá pro jejich lineární teplotní charakteristiku. Teplotní charakteristika snímače Pt100 (Obr. 8 Teplotní charakteristika snímače Pt100). Teplotní charakteristika snímače Pt1000 (Obr. 9 Teplotní charakteristika snímače Pt1000). Dle konfigurace motoru se instaluje 1, 3 nebo i více snímačů do statorového vinutí motoru. Vývody snímačů jsou vyvedeny do hlavní svorkovnice motoru. Abychom dosáhli lineární měřicí charakteristiky a neovlivnění snímače měřícím proudem, musí být dodržena podmínka  $I_{TEST} < 3 mA$ . (3)



Obr. 8 Teplotní charakteristika snímače Pt100 (SEW, CATALOG AC Motors – 11/2019)



Obr. 9 Teplotní charakteristika snímače Pt1000 (SEW, CATALOG AC Motors – 11/2019)

#### 1.4 Anti-kondenzační ohřev

Anti-kondenzační ohřev se používá jako opatření proti vznikající kondenzaci vlhkosti ve vinutí pohonu v případě vypnutého stroje. Podle výrobců se doporučuje, pokud je motor umístěn v prostředí, kde se může pohybovat okolní teplota pod 0°C. Při těchto teplotách hrozí kondenzace vlhkosti ve vinutí pohonu ve vypnutém stavu. V případě zapnutí pohonu s vlhkostí ve vinutí hrozí poškození izolace a je zvýšené riziko průrazu

izolace. Anti-kondenzační ohřev se používá i v případech, kdy je stator pohonů chlazen vodou o teplotě výrazně nižší, než je teplota okolního prostředí. Anti-kondenzační ohřev se zapíná, pokud je pohon vypnutý, tudíž vinutí stroje není ohříváno ztrátami ve stroji. Výkony topných těles se pohybují od 28 do 150W, dle velikosti stroje. (3)

## 1.5 Snímače otáček

Snímače otáček asynchronních pohonů jsou zpravidla umístěny na hřídeli rotoru ze strany ventilátoru. Jedná se o kontaktní měření, při čemž je hřídel snímače pevně spojena s hřídelí rotoru pohonu a pouzdro snímače je spojeno reakčním ramenem se statorovou částí pohonu. Základní požadavky pro tyto snímače jsou mechanická, teplotní a klimatická odolnost, spolehlivost měření ve velkém spektru otáček a EMC odolnost. Obvykle se používá inkrementální magnetický nebo optický způsob snímání s výstupními hodnotami TTL, HTL nebo sin/cos. Použití snímače s absolutním odměřováním je vhodné spíše pro procesní měření, nikoliv jako zpětná vazba do regulátoru rychlosti pohonu. Opodstatnění použití snímače otáček je uvedeno v literatuře (4) v kapitole 6.3.1:

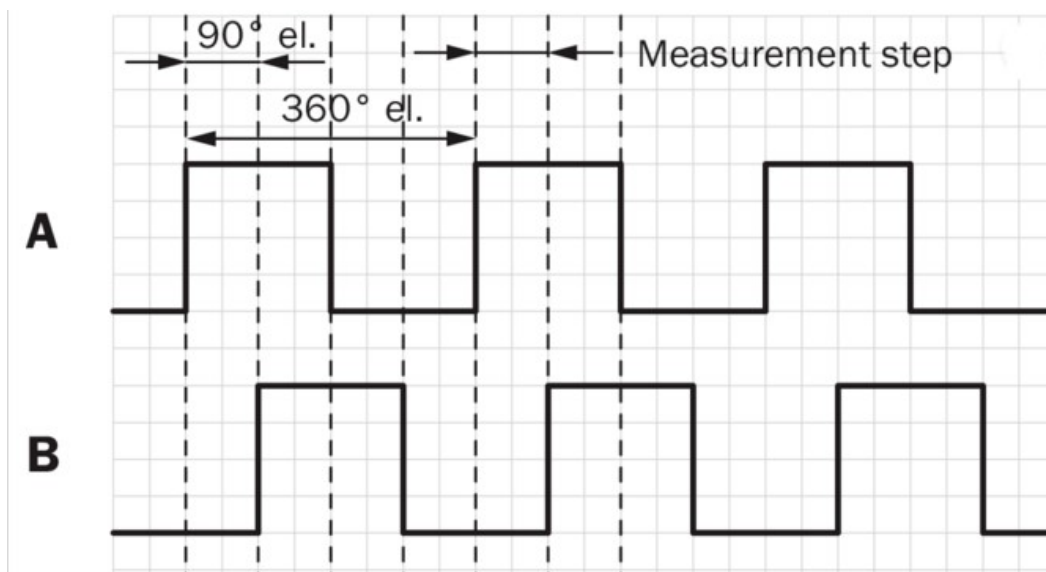
*„Snímač otáček na motoru umožňuje konstantní otáčky při různých zatíženích a zlepšuje dynamiku řízení obzvláště při malých otáčkách. V jednotlivých případech poskytuje použití snímače otáček následující výhody:*

- *Počet otáček se je možné regulovat až na 0 Hz (tj. klid)*
- *Stabilní regulační chování v celém rozsahu otáček*
- *Konstantní krouticí moment ve jmenovitém rozsahu otáček*
- *Ve srovnání s regulací otáček bez snímače je dynamické chování u motorů se snímačem otáček podstatně lepší, jelikož počet otáček se měří přímo a používá se pro vytváření modelu proudových komponent  $i_d$  a  $i_q$ .*“

### 1.5.1 IRC snímač

Nejpoužívanějšími snímači otáček asynchronních pohonů jsou inkrementální optické nebo magnetické snímače (Obr. 12 Inkrementální rotační snímač 6FX2001-2HB02 - SIEMENS). IRC snímače disponují velkou rozlišovací schopností a v porovnání s jinými typy snímačů a příznivou cenou. Standardní používaná citlivost snímačů je 100 – 2048 impulsů na otáčku v napět'ovém provedení HTL nebo TTL. (5) Signál z IRC snímačů je tvořen třemi signály, přičemž signály A a B jsou od sebe vzájemně posunuty o 90° (Obr. 10 Signály rozhraní IRC snímače) a signál C je tvořen jedním impulsem za 1 mechanickou otáčku snímače. Při zapojení všech 3 signálových kanálů (A, B, C) tím dostáváme do řídicí

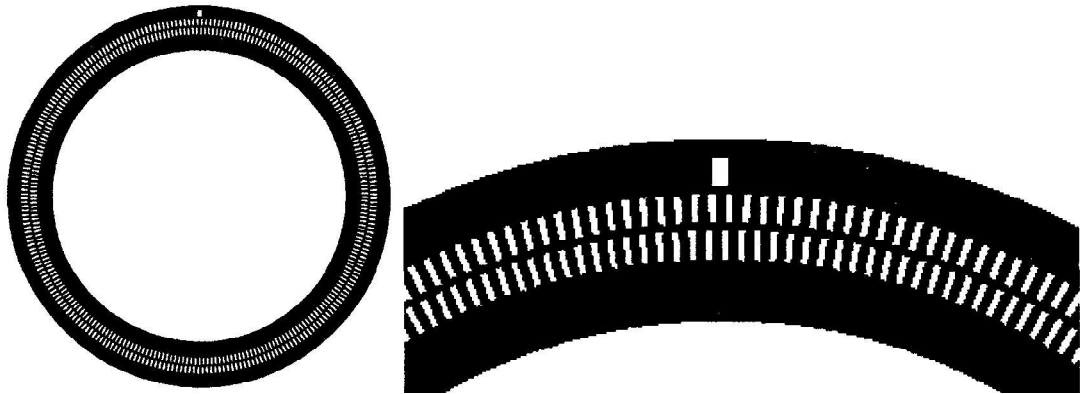
části frekvenčního měniče informace dostatečné pro výpočet a zjištění aktuální rychlosti otáčení, směru otáčení a kontrolní „C“ puls pro každou otáčku pohonu. Snímače se signálovou úrovní HTL jsou používány i na pohonech v těžkém průmyslu. Vzhledem k tomu, že kabelová trasa napájení pohonů a signálů z čidel otáček bývá stejná, je nutné zajistit oddělení těchto kabelů na kabelových lávkách (polohou, oddělovacími přepážkami) a řádně provést stínění těchto kabelů z důvodu EMC rušení signálu z čidla. V praxi se pro lepší odolnost proti EMC rušení používají symetrické signálové kanály a ve vyhodnocovacím zařízení (frekvenčním měniči) se napět'ové úrovně jednotlivých signálů dopočtou z rozdílu  $A - AN$  a  $B - BN$ . Bohužel s takto nekódovaným digitálním snímačem nelze přenášet bezpečné informace rychlosti otáčení v kategorii SIL2 a SIL3.



Obr. 10 Signály rozhraní IRC snímače

Princip činnosti inkrementálního optického senzoru je popsán v literatuře (6) kapitola 17. „Na (Obr. 11 Vzor snímacího kotouče ) je zobrazen příklad kódového kotouče optického IRC snímače a jeho detail. Optické značky na obvodu kotouče tvoří vzor průhledných a neprůhledných plošek, které při otáčení kotouče přerušují světelný paprsek snímáný např. fotodiodou. Napětí diod je zpracováno komparátorem a signál je dále tvarován jednoduchou TTL logikou pro zlepšení strmosti hran. Údaj o poloze je relativní: počet detekovaných impulsů udává změnu polohy. V praxi je po zapnutí napájení nutno inicializovat výchozí polohu např. tak, že snímáný pohon dojde do referenční nebo výchozí polohy, což je detekováno jiným senzorem. Od tohoto okamžiku se počítá údaj z IRC snímače vztážený k referenční poloze. V tom může napomoci též tzv. indexový signál (jeden impuls na otáčku), zde značen jako výstup IRC snímače R. Na rozdíl od absolutních senzorů polohy tedy IRC snímače nemohou poskytnout úplnou informaci okamžitě po

*zapnutí. Další nevýhodou je možnost postupné akumulace chyb v údajích o poloze, pokud dojde k chybnému přečtení některé značky (např. vinou elmag. rušení). Proto je vhodné občas opakovat návrat do referenční polohy i během provozu senzoru.“*



Obr. 11 Vzor snímacího kotouče (PLATIL, RIPKA, Sensory a převodníky – ČVUT 2004)

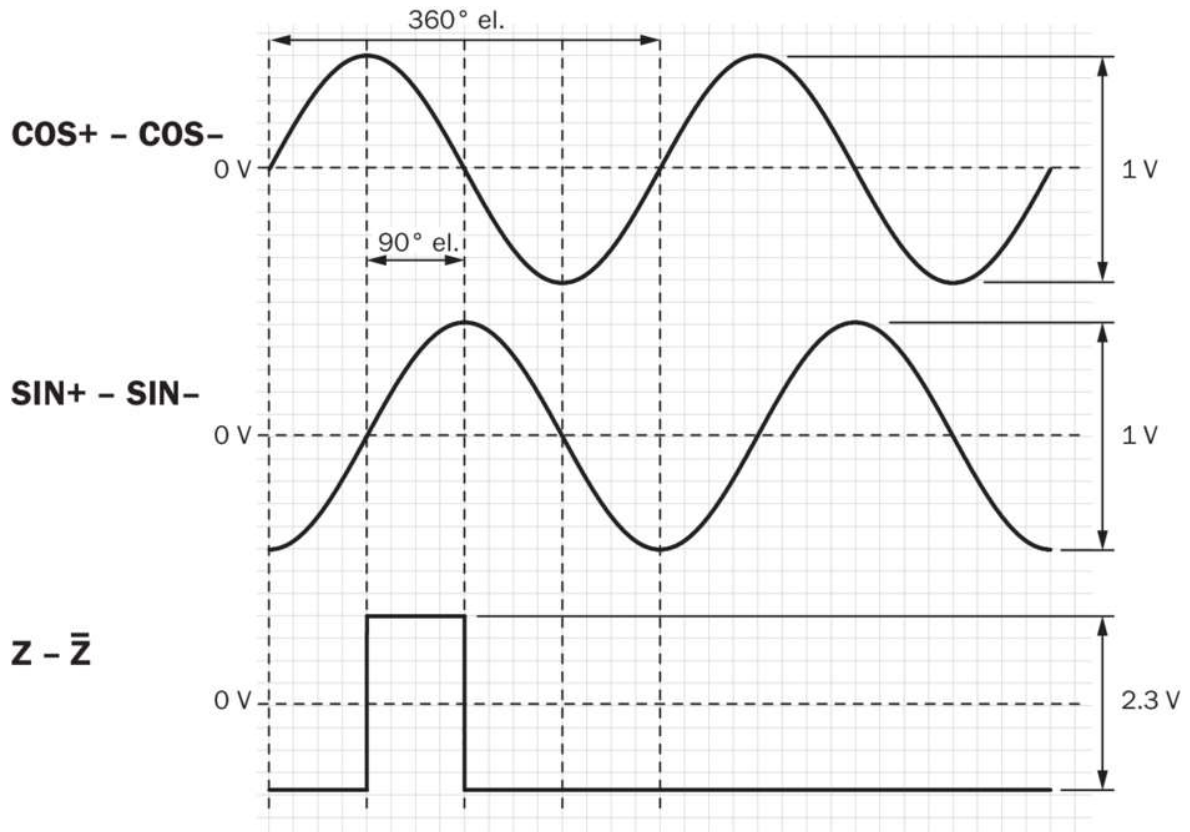


Obr. 12 Inkrementální rotační snímač 6FX2001-2HB02 - SIEMENS

### 1.5.2 Snímač Sinus/Kosinus

V případě, že potřebujeme dosáhnout bezpečného provedení snímání otáček pohonu, používají se snímače s označením Sinus/Kosinus. Těmito snímači dokážeme snímat otáčky a přenést signál s bezpečnostní kategorií Sil 2 a v některých případech jsou i s certifikací Sil 3. Toho je potřeba zejména v průmyslových aplikacích, kde je nutné zajistit bezpečný provoz pohonu s omezením rychlosti otáčení v definovaném rozsahu SSL (Safety Speed Limit) či dodržení bezpečných náběhových / doběhových ramp. Jejich použití také často vidáme u servopohonů. Rotační snímače Sinus/Kosinus kódují informace o poloze pomocí kombinace sinusového a kosinusového signálu. (Obr. 13 Signály rozhraní SIN/COS po

diferenci) Zpravidla se používá 512 nebo 1024 period signálu na mechanickou otáčku snímače. Pro větší odolnost proti EMC rušení jsou signály obvykle přenášeny symetricky. Rotační snímače Sinus/Kosinus disponují větším rozsahem provozních otáček a přesností snímání než resolver. (7) (8)



Obr. 13 Signály rozhraní SIN/COS po diferenci

### 1.5.3 Tachodynamo

Tachodynamo je analogový rotační snímač rychlosti, jenž se dnes v průmyslovém použití téměř nevyskytuje. Používá se v některých domácích spotřebičích – pračky, myčky na nádobí apod. Lze jej použít jako otáčkoměr, ale nikoliv pro přesné odměřování polohy či rychlosti. Výstupem tachodynamu je napěťový analogový signál s rozsahem např.  $20\text{ V}/1000\text{ ot/min}$ . Zařízení, jenž vyhodnocuje signál z tachodynamu, musí mít velký vstupní odpor, aby nedocházelo ke zkreslení. Další nevýhodou tachodynamu je snadné rušení měřeného signálu, tudíž další možnost zkreslení. (7)

### 1.5.4 Tachogenerátor

Tachogenerátor je analogový rotační snímač rychlosti, jenž funguje na principu synchronního stroje s permanentními magnety. Z měřeného signálu se vyhodnocuje kmitočet. Oproti tachodynamu není tolik náchylný na rušení signálu a velký vstupní odpor vyhodnocovacího zařízení. Zvýšit citlivost tachogenerátoru lze zvýšením počtu magnetických párů, ovšem z mechanického hlediska a provedení nedosahujeme přesností jako u IRC nebo Sin/Cos snímačů. (7)

### 1.5.5 Resolver

Resolver je analogový rotační snímač, jehož výstupem jsou dva amplitudově modulované signály vstupního nosného signálu. Praktické provedení vypadá tak, že máme elektrické točivé zařízení, které má na rotoru umístěno budící vinutí, jenž je napájeno napětím s nosným kmitočtem (2 – 10 kHz). Na statoru jsou umístěna 2 vinutí vzájemně posunuta o 90°. Vlivem otočením rotoru se změní vzájemná indukčnost vinutí statoru a rotoru, tudíž dochází k odlišnosti velikosti napětí, jež je indukované ve statorovém vinutí. Při plynulém otáčení rotoru pozorujeme dvě sinusové obálky nosného signálu vzájemně posunuté o 90°. Vyhodnocení se provádí digitalizací naměřeného signálu po odečtení nosného kmitočtu. (7)

### 1.5.6 Otáčkové relé – ALNICO

Otáčkové relé se na nových aplikacích již řadu let nepoužívá, ovšem v dřívějších dobách bylo velmi využíváno zejména v průmyslových aplikacích na obráběcích strojích. Dle konkrétního provedení otáčkového relé je možné použití jako čidlo nulových otáček – zpravidla využívané při brzdění pohonu protiproudem nebo jako čidlo dosažených otáček pro přepínání stykačové kombinace při rozběhu pohonu Y D. Konstrukce otáčkového relé se skládá z rotorové části a statorové části s magnetem. Rotorová část je složena podobně jako rotor asynchronního stroje z rotorových plechů a hliníkového závitu nakrátko. Tvar rotoru je uzpůsoben tak, že z jedné strany a po obvodu obepíná statorový magnet. Statorový magnet bývá ze slitiny hliníku, niklu a kobaltu (AlNiCo). Statorový magnet je umístěn na hřídelce, na které má omezení rotace pouze na několik stupňů. Otáčením rotoru dochází k vychýlení statorového magnetu ve směru otáčení rotoru. Na konci statorové hřídelky je umístěna páčka, která spíná mikrospínače umístěné z čela otáčkového relé. Dle



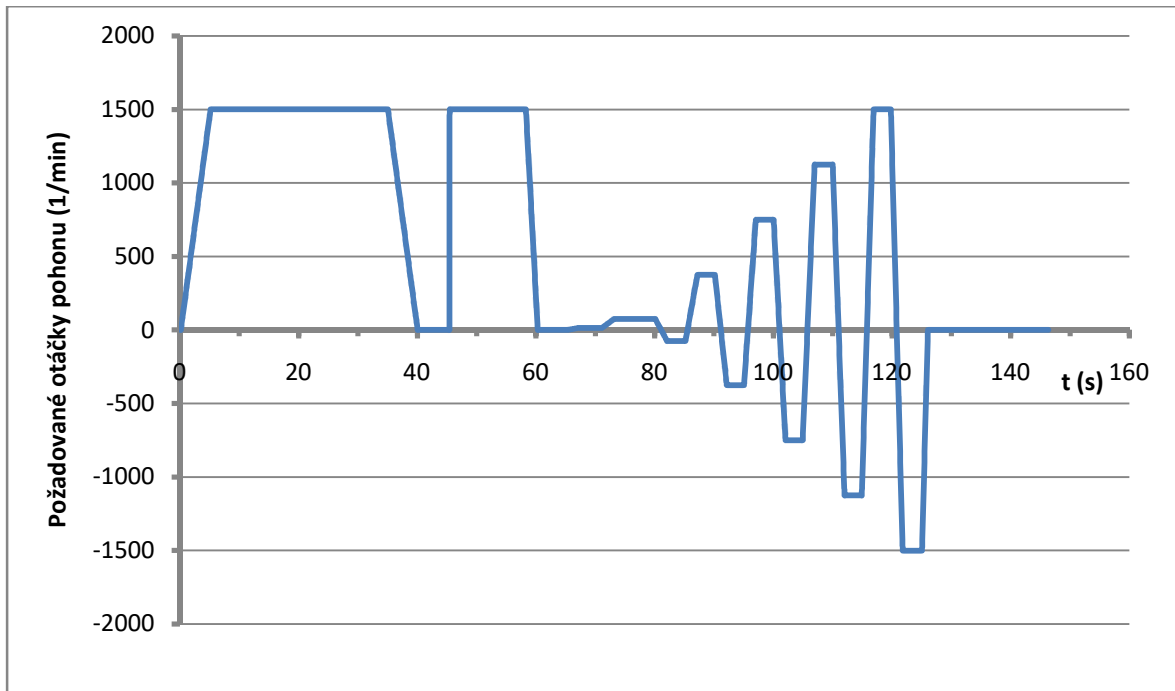
polohy mikrospínačů a zpětných pružin je dána konfigurace otáčkového relé jako snímač nulových otáček, hlídání směru otáčení nebo jako snímač dosažených otáček. (9)

## 2 Měření na asynchronním pohonu

### 2.1 Konfigurace pohonu a zapojení

Cílem měření na asynchronním pohonu bylo naměřit data, jimiž by bylo možno porovnat kvalitu regulátoru otáček frekvenčního měniče v závislosti na způsobu regulace a vybavení pohonu. Pro měření byl použit frekvenční měnič od výrobce Siemens z řady G120. Schéma zapojení frekvenčního měniče a pohonu je uvedeno v příloze. (Obr. 24 Schéma zapojení měřeného motoru a frekvenčního měniče) Pro dosažení odpovídající opakovatelnosti měření při různém nastavení byly otáčky frekvenčního měniče řízeny pomocí PLC, v němž byl naprogramován měřicí cyklus. Komunikace frekvenčního měniče a PLC je provedena po průmyslové komunikační síti PROFINET. Použitý komunikační telegram vychází z předdefinovaného telegramu č.352, PZD 6/6. Tento telegram je dostatečný pro většinu běžných aplikací, umožňuje komunikovat stavové slovo oběma směry, požadovanou rychlost, skutečnou rychlost a odebíraný proud motorem. Pro potřeby provozu stroje je komunikační protokol doplněn o komunikaci digitálních vstupů a výstupů z důvodu signalizace a řízení pomocných obvodů stroje. Měřicí cyklus (Obr. 14 Měřicí cyklus) je navržen tak, aby z měření bylo možné samostatně zpracovávat:

- Běh pohonu v konstantních jmenovitých otáčkách stroje v čase  $t_1 = 5s$  až  $t_2 = 35s$
- Skokovou změnu rychlosti 0 – 100% v čase  $t = 45s$
- Konstantní velmi malé otáčky v čase  $t_1 = 68s$  až  $t_2 = 71s$
- Konstantní malé otáčky v čase  $t_1 = 73s$  až  $t_2 = 80s$
- Cyklické rozbíhání a reverzování pohonu v čase  $t_1 = 80s$  až  $t_2 = 125s$



Obr. 14 Měřicí cyklus

Při měření se změnou zatížení bylo ovládání mechanické brzdy stroje řízeno pomocí časovače v PLC , aby bylo dosaženo shodného času při každém měření. Naměřené otáčky byly snímány pomocí IRC snímače umístěného na rotoru měřeného pohonu. Snímač otáček byl přímo zapojen do frekvenčního měniče. Za pomoci softwarového nástroje STARTER bylo prováděno nastavování, měření a záznam dat v průběhu měření. Měření bylo prováděno při nastavení řídicí konfigurace frekvenčního měniče:

- Vektorové řízení se zpětnou vazbou z IRC snímače
- Vektorové řízení bez zpětné vazby
- Skalární řízení pohonu bez zpětné vazby s lineární charakteristikou (U/f)

Konfigurace a parametry frekvenčního měniče:

Výkonová jednotka - řada: PM240-2 SIEMENS

Výkonová jednotka – typ: 6SL3210-1PE31-5AL0

Vstupní parametry výkonové jednotky:

Napájecí napětí: 380V – 480V  $\pm 10\%$

Frekvence napájecího napětí: 47 – 63 Hz

Jmenovitý odebíraný proud: 140A (LO), 117A (HO)

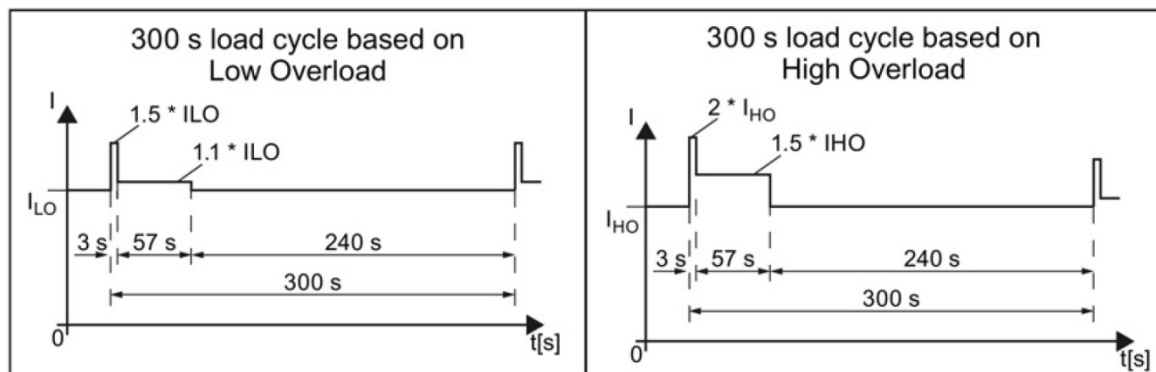
Výstupní parametry výkonové jednotky:

Výstupní napětí: 3AC 0V –  $U_{IN}$

Jmenovitý výkon: 75kW (LO), 55kW(HO)

Výstupní frekvence:	0 – 550 Hz při regulaci U/f 0 – 200 Hz při vektorové regulaci
Jmenovitý výstupní proud:	145A (LO), 110A (HO)
Frekvence impulzů:	2kHz
Účinnost:	98%
Účinník $\lambda$ :	0,95
Účinník $\cos \varphi$ :	0,99
Integrovaný vstupní filtr třídy A	
Ztrátový výkon:	1,79 kW

Výkonová jednotka frekvenčního měniče je konfigurována pro režim provozu HO (High Overload). Režim HO umožňuje při délce cyklu 300s přetížení 150% po dobu 57s a přetížení 200% po dobu 3s. Touto konfigurací se výkonová jednotka frekvenčního měniče přibližuje možnostem přetěžování asynchronního pohonu. Limitní možnosti přetěžování frekvenčního měniče v obou konfiguracích jsou zobrazeny na (Obr. 15 Možnost zatížení frekvenčního měniče v konfiguraci HO a LO).



Obr. 15 Možnost zatížení frekvenčního měniče v konfiguraci HO a LO (SIEMENS, SINAMICS G120 low voltage inverters – 2014)

Řídící jednotka - řada:	CU250S-2PN	SIEMENS
Řídící jednotka – typ:	6SL3246-0BA22-1FA0	
Komunikace:	PROFINET, EtherNet/IP	
Druhy regulace:	U/f – lineární / kvadratická / s nastavitelnými parametry U/f – s regulací toku (FCC) U/f – ECO lineární / kvadratický Vektorová regulace bez snímače Vektorová regulace se snímačem	

Regulace točivého momentu bez snímače

Regulace točivého momentu se snímačem

Motor:	1PH8184-1HF15-1AA2-Z	SIEMENS
$U_N$	335V Y	
$I_N$	116A	
$P_N$	51 kW	
$\cos \varphi$	0,80	
$f_N$	50,6 Hz	
$n_N$	1500 $\text{min}^{-1}$	
$n_{MAX}$	5000 $\text{min}^{-1}$	
Teplotní snímač ve vinutí	PT1000	
ENCODER HTL 1024 S/R		
Převodovka:	X4TS180e/HU/B	SEW-EURODRIVE
$P_{K1}$	51 kW	
$M_{K2}$	27433 Nm	
$n_1$	1485 $\text{min}^{-1}$	
$n_2$	17 $\text{min}^{-1}$	

Použitý měřicí a softwarový nástroj:

STARTER – Drive ES SIEMENS

Verze: V5.3.0.1

Pro porovnání kvality regulátoru byly měřeny hodnoty požadované rychlosti do rychlostního regulátoru a skutečná rychlost pohonu. Požadovaná rychlost pohonu byla čtena z parametru frekvenčního měniče r60 „Speed setpoint before the setpoint filter“. Skutečná rychlost otáčení pohonu byla odečítána z parametru frekvenčního měniče r61[0] „Actual speed unsmoothed, Encoder 1“. Výhodou parametru r61[0] je, že z něho lze číst hodnoty z rotačního snímače i v případě, že tyto hodnoty nejsou využívány pro regulaci otáček. Přepínání režimu regulace byla prováděna přepínáním parametru p1300[0] mezi měřeními. Ostatní parametry frekvenčního měniče byly nastaveny dle štítkových hodnot pohonu. Nastavení parametrů regulátoru bylo provedeno automaticky při parametrizaci měniče. Automatickou parametrizací regulátoru vektorového řízení byly vypočteny parametry uvedené v (Tabulka 1 Parametry nastavení frekvenčního měniče při identifikaci

pohonu v režimu "Standsteel"). Měření parametrů pohonu bylo provedeno v režimu „standstill“, při kterém je prováděno pouze statické měření vlastností pohonu.

Tabulka 1 Parametry nastavení frekvenčního měniče při identifikaci pohonu v režimu "Standsteel"

r331[0]	Actual motor magnetizing current/short-circuit current	49.796	Arms
p341[0]	Motor moment of inertia	0.428225	kgm <sup>2</sup>
p342[0]	Ratio between the total and motor moment of inertia	1.000	
p360[0]	Motor magnetizing inductance	11.45362	mH
p1460[0]	Speed controller P gain adaptation speed lower	5.179	
p1461[0]	Speed controller Kp adaptation speed upper scaling	100.0	%
p1462[0]	Speed controller integral time adaptation speed lower	160.00	ms
p1463[0]	Speed controller Tn adaptation speed upper scaling	100.0	%
p1464[0]	Speed controller adaptation speed lower	0.00	rpm
p1465[0]	Speed controller adaptation speed upper	1518.00	rpm
p1470[0]	Speed controller encoderless operation P-gain	5.129	
p1472[0]	Speed controller encoderless operation integral time	161.6	ms
p1496[0]	Acceleration precontrol scaling	0.0	%
r1968	Speed_ctrl_opt dynamic factor actual	0.00000	%
r1973	Rotating measurement encoder test pulse number determined	0	

Při měření byla nastavena rozběhová a doběhová rampa 2s. Měření bylo prováděno na pohonu pro míchací dvouválec gumárenských směsí. Mechanickou zátěží pohonu byla převodovka a jeden válec míchacího stroje bez zátěže materiálem. Stroj je vybaven elektro-pneumaticky ovládanou mechanickou brzdou, která byla po celou dobu měření otáčkové regulace v režimu manuálního odbrzdění. K měření při změně zatížení byla využívána elektro-pneumaticky ovládaná mechanická brzda k provádění změny zatěžovacího momentu. Pomocí časovače v řídicím PLC byla řešena opakovatelnost změn zatížení pohonu při různých nastavení řízení otáček frekvenčního měniče. Kvalita regulace byla posuzována z hlediska těchto vypočtených parametrů:

- Odchylka požadované a skutečné hodnoty otáček

$$\Delta v = v_p - v_s$$

$\Delta v$  - odchylka požadované a skutečné rychlosti otáčení pohonu (min<sup>-1</sup>)

$v_p$  - požadovaná rychlost otáčení pohonu, parametr r60

$v_s$  - skutečná rychlost otáčení pohonu, r61[0]

- Průměrná chyba rychlosti otáčení

$$\Delta v_{PRUM} = \frac{\sum_{t_1}^{t_2}(\Delta v)}{n * (t_2 - t_1)}$$

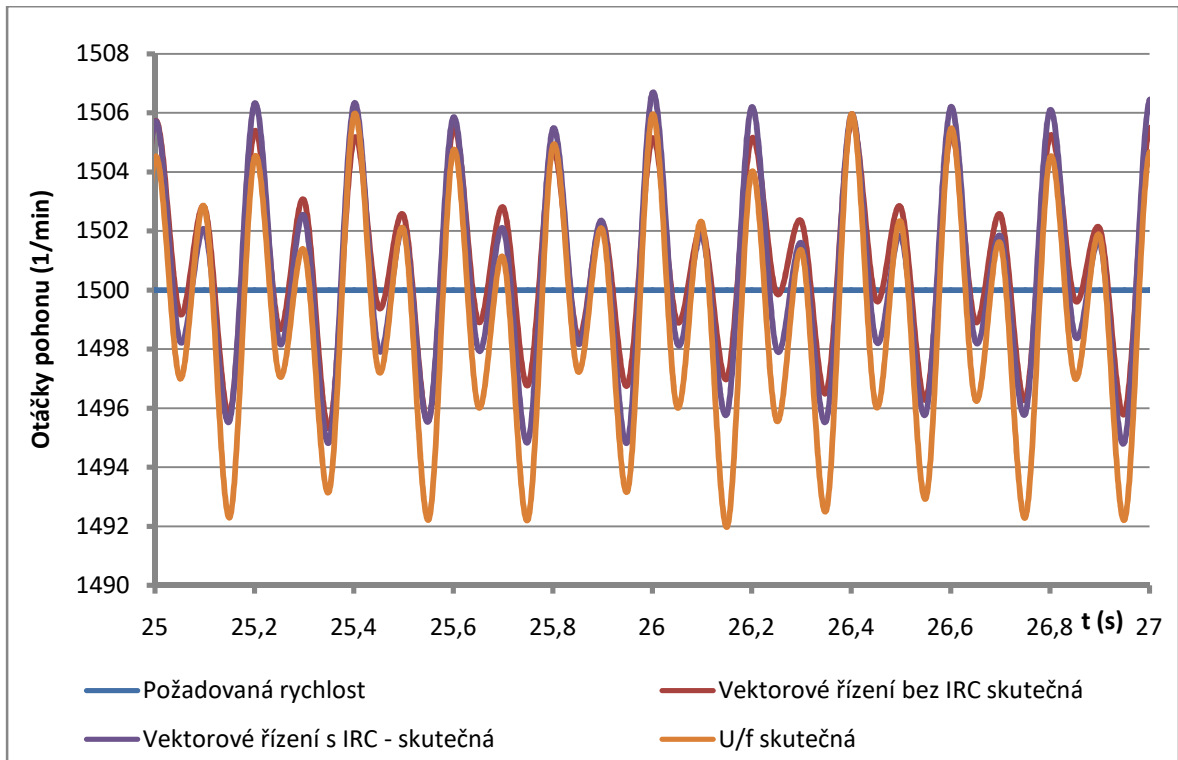
$\Delta v_{prum}$	- průměrná hodnota rozdílu požadované a skutečné rychlosti otáčení pohonu v daném časovém úseku ( $\text{min}^{-1}$ )
$\Delta v$	- odchylka požadované a skutečné rychlosti otáčení pohonu ( $\text{min}^{-1}$ )
n	- počet údajů rychlosti / 1s (-)
$t_1, t_2$	- časový interval výpočtu průměrných hodnot (s)

- Maximální odchylka požadované a skutečné rychlosti otáčení pohonu
- Doba jedné periody odchylky rychlosti při konstantních otáčkách pohonu

## 2.2 Měření při konstantních otáčkách

### 2.2.1 Měření při konstantních jmenovitých otáčkách pohonu

Měření bylo prováděno v ustáleném stavu při jmenovitých otáčkách pohonu  $1500 \text{ min}^{-1}$ . Z grafu naměřených hodnot (Obr. 16 Porovnání požadovaných a skutečných otáček pohonu při různých režimech regulace – jmenovité otáčky pohonu) vidíme, že rozdíly v chování pohonu vektorovým řízením s IRC a bez IRC ve zpětné vazbě jsou pouze minimální. Z naměřených hodnot byly vypočítány průměrné odchylky skutečné a požadované hodnoty. Vektorovému řízení pohonu bez IRC snímače ve zpětné vazbě odpovídá průměrná odchylka  $0,377 \text{ min}^{-1}$  a maximální odchylka  $2,6 \text{ min}^{-1}$  od požadované hodnoty. Vektorovému řízení pohonu s IRC snímačem ve zpětné vazbě odpovídá průměrná odchylka  $0,273 \text{ min}^{-1}$  a maximální odchylka  $3,4 \text{ min}^{-1}$  od požadované hodnoty. V případě skalárního řízení regulátoru bez zapojení zpětné vazby otáček se dostáváme na průměrnou odchylku  $1,11 \text{ min}^{-1}$  a maximální odchylku  $7,5 \text{ min}^{-1}$  od požadované hodnoty. Z těchto údajů je vidět, že při konstantních jmenovitých otáčkách a konstantní zátěži pohonu je rozdíl mezi vektorovým řízením pohonu se zpětnou vazbou a bez zpětné vazby téměř zanedbatelný. V praktickém použití je zapotřebí vzít v úvahu, zda je nutné pohon snímačem otáček vybavovat s ohledem na cenu a zvýšenou náročnost kabeláže.

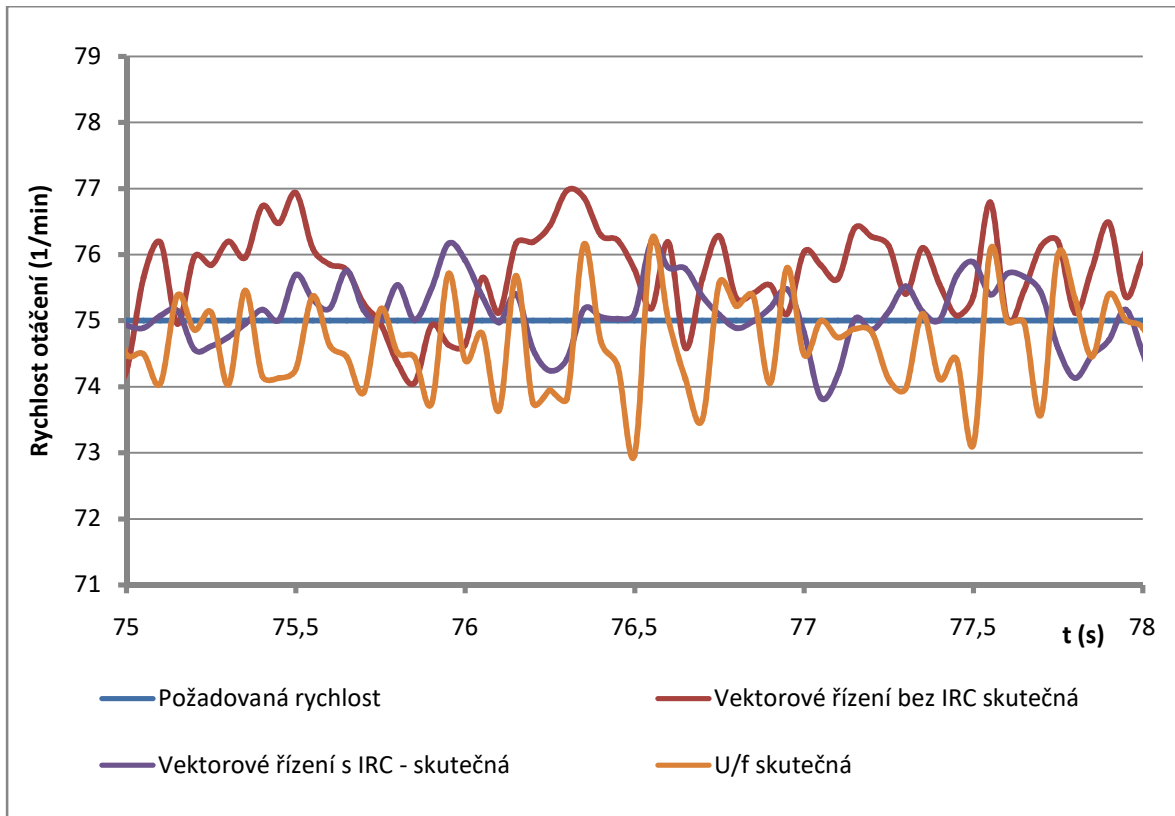


Obr. 16 Porovnání požadovaných a skutečných otáček pohonu při různých režimech regulace – jmenovité otáčky pohonu

### 2.2.2 Měření při konstantních otáčkách – malá rychlost

Měření bylo prováděno v ustáleném stavu při požadovaných otáčkách  $75 \text{ min}^{-1}$ . Na grafu (Obr. 17 Porovnání požadovaných a skutečných otáček pohonu při různých režimech regulace – otáčky pohonu  $75 \text{ min}^{-1}$ ) jsou vidět průběhy otáček při jednotlivých způsobech nastavení otáčkového regulátoru. Již pouhým pohledem na jednotlivé průběhy je vidět rozdíl mezi použitím otáčkového čidla u vektorové regulace otáček. Vektorovému řízení pohonu bez IRC snímače ve zpětné vazbě odpovídá průměrná odchylka  $0,68 \text{ min}^{-1}$  a maximální odchylka  $0,9 \text{ min}^{-1}$  od požadované hodnoty. Vektorovému řízení pohonu s IRC snímačem ve zpětné vazbě odpovídá průměrná odchylka  $0,01 \text{ min}^{-1}$  a maximální odchylka  $1,2 \text{ min}^{-1}$  od požadované hodnoty. V případě skalárního řízení regulátoru bez zapojení zpětné vazby otáček se dostáváme na průměrnou odchylku  $0,34 \text{ min}^{-1}$  a maximální odchylku  $2,0 \text{ min}^{-1}$  od požadované hodnoty. Při použití čidla otáček se dostáváme na přesnější a celkově stabilnější průběh otáček pohonu. Ovšem i přes viditelné rozdíly je přesnost regulátoru otáček v mnohých aplikacích dostatečná.

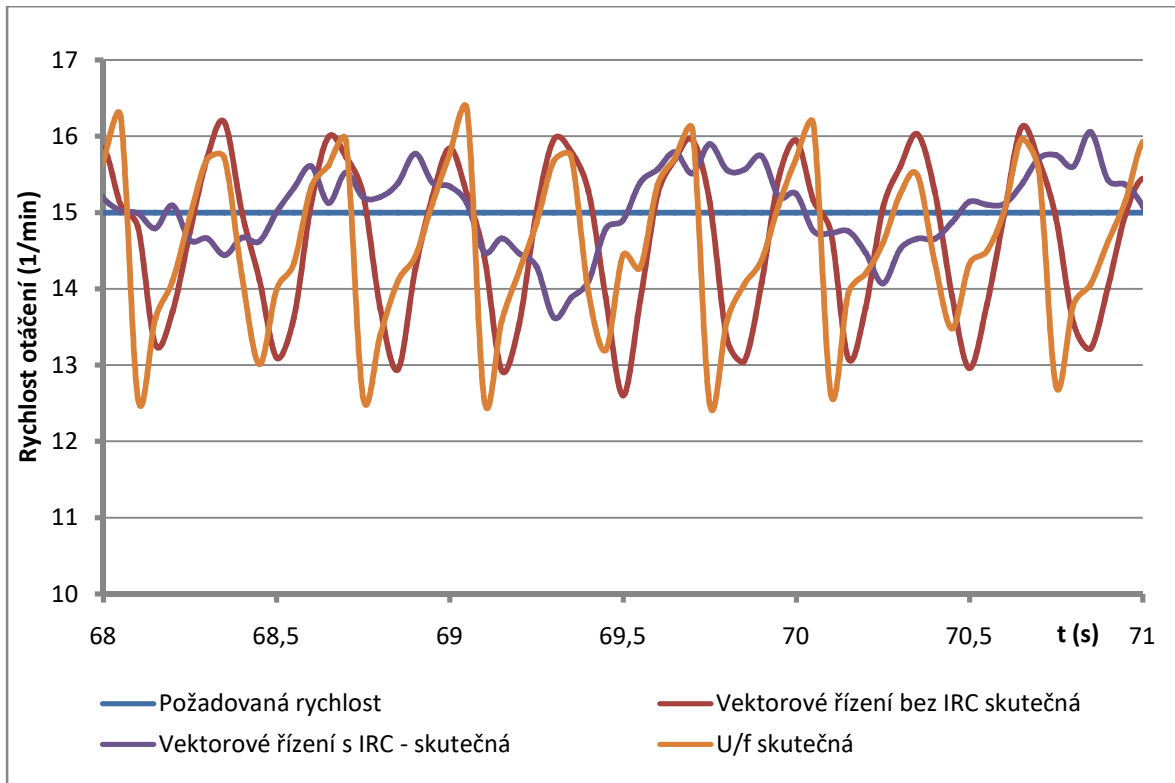




Obr. 17 Porovnání požadovaných a skutečných otáček pohonu při různých režimech regulace – otáčky pohonu  $75\text{min}^{-1}$

### 2.2.3 Měření při konstantních otáčkách – velmi malá rychlost

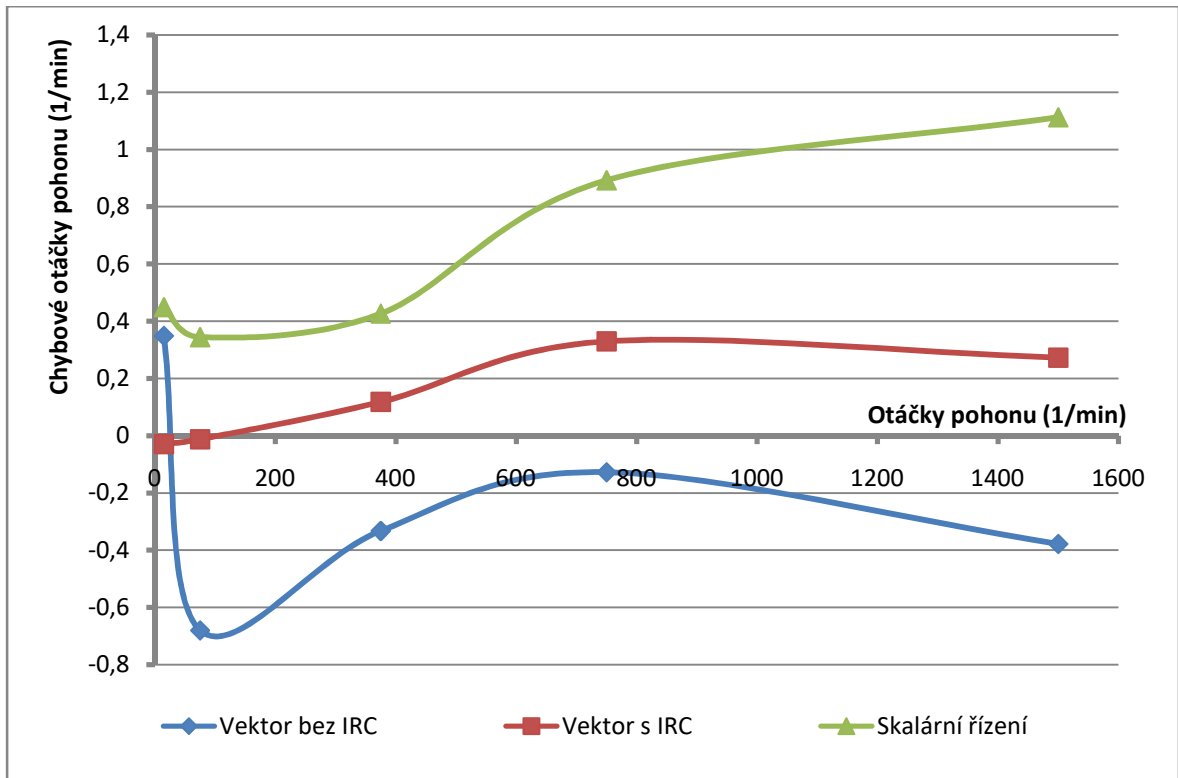
Měření bylo prováděno v ustáleném stavu při požadovaných otáčkách  $15\text{min}^{-1}$ . Z grafu naměřených hodnot (Obr. 18 Porovnání požadovaných a skutečných otáček pohonu při různých režimech regulace – otáčky pohonu  $15\text{min}^{-1}$ ) jsou viditelné podstatné rozdíly v průběhu rychlostí otáček pohonu. Vektorovému řízení pohonu bez IRC snímače ve zpětné vazbě odpovídá průměrná odchylka  $0,34\text{min}^{-1}$  a maximální odchylka  $2,4\text{min}^{-1}$  od požadované hodnoty. Vektorovému řízení pohonu s IRC snímačem ve zpětné vazbě odpovídá průměrná odchylka  $0,03\text{min}^{-1}$  a maximální odchylka  $1,4\text{min}^{-1}$  od požadované hodnoty. V případě skalárního řízení regulátoru bez zapojení zpětné vazby otáček se dostáváme na průměrnou odchylku  $0,45\text{min}^{-1}$  a maximální odchylku  $2,5\text{min}^{-1}$  od požadované hodnoty. U hodnot vektorového řízení s IRC snímačem ve zpětné vazbě jsou výrazně menší rozdíly maximálních a minimálních odchylek od požadované hodnoty. Perioda kmitů rychlosti kolem požadované hodnoty je u vektorové regulace s IRC ve zpětné vazbě cca 3x menší.



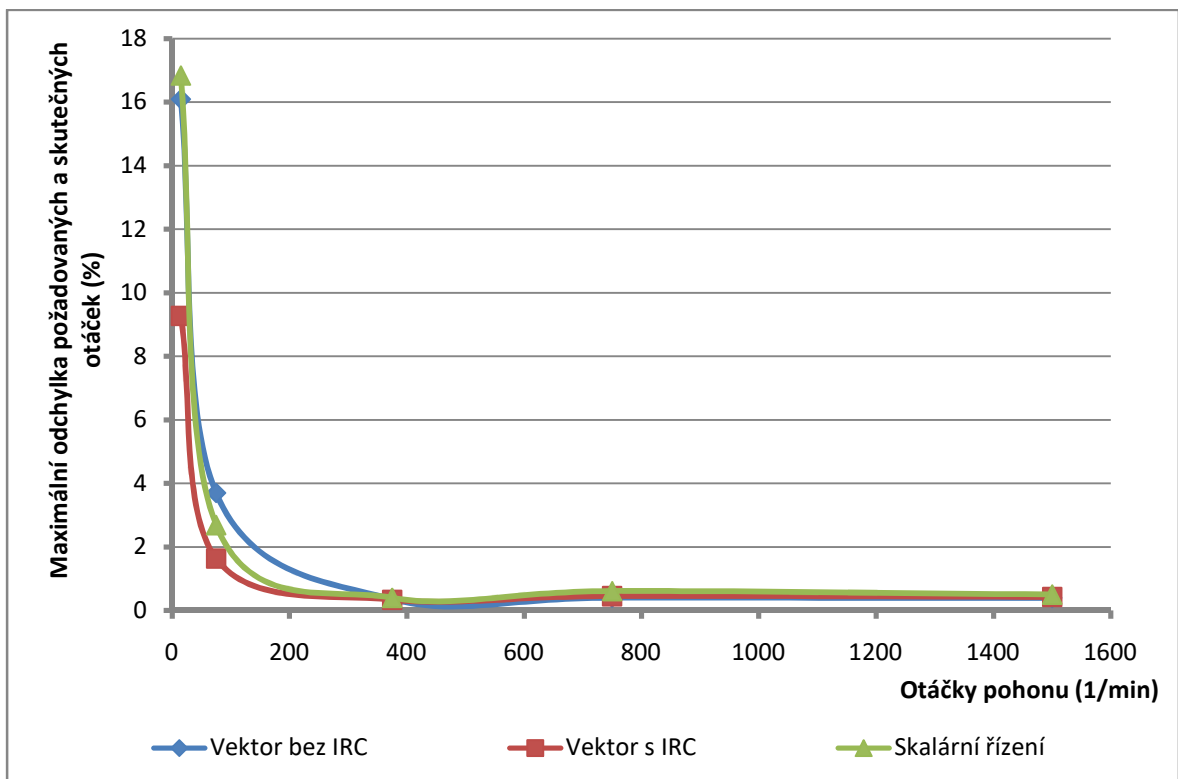
Obr. 18 Porovnání požadovaných a skutečných otáček pohonu při různých režimech regulace – otáčky pohonu  $15\text{min}^{-1}$

#### 2.2.4 Shrnutí údajů naměřených při konstantních otáčkách pohonu

Naměřené a vypočtené hodnoty provozu asynchronního pohonu při ustálených otáčkách a neměnné zátěži jsou zpracovány do grafů (Obr. 19 Chybové otáčky pohonu v ustáleném stavu v závislosti na otáčkách pohonu) a (Obr. 20 Maximální chybové otáčky pohonu v ustáleném stavu v závislosti na otáčkách pohonu). Z vypočtených a odvozených hodnot vyplývá, že již od 10% jmenovitých otáček pohonu mají všechny 3 způsoby regulace velmi podobné výsledky. U velmi malých otáček je patrné, že dochází k lepší regulaci z pohledu amplitudy výkyvu rychlosti otáčení při použití vektorové regulace se snímačem otáček ve zpětné vazbě. Taktéž tyto výkyvy rychlostí mají výrazně menší periodu kmitu a umožňují tím plynulejší chod poháněné mechaniky.



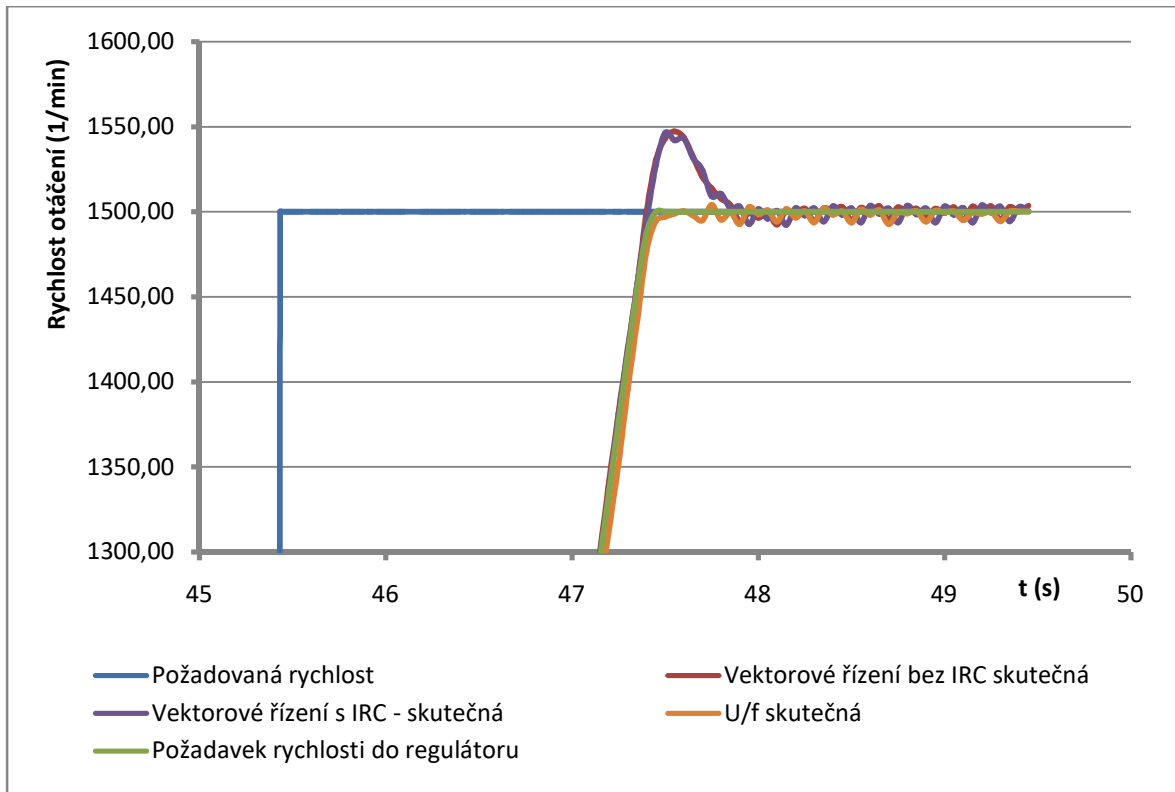
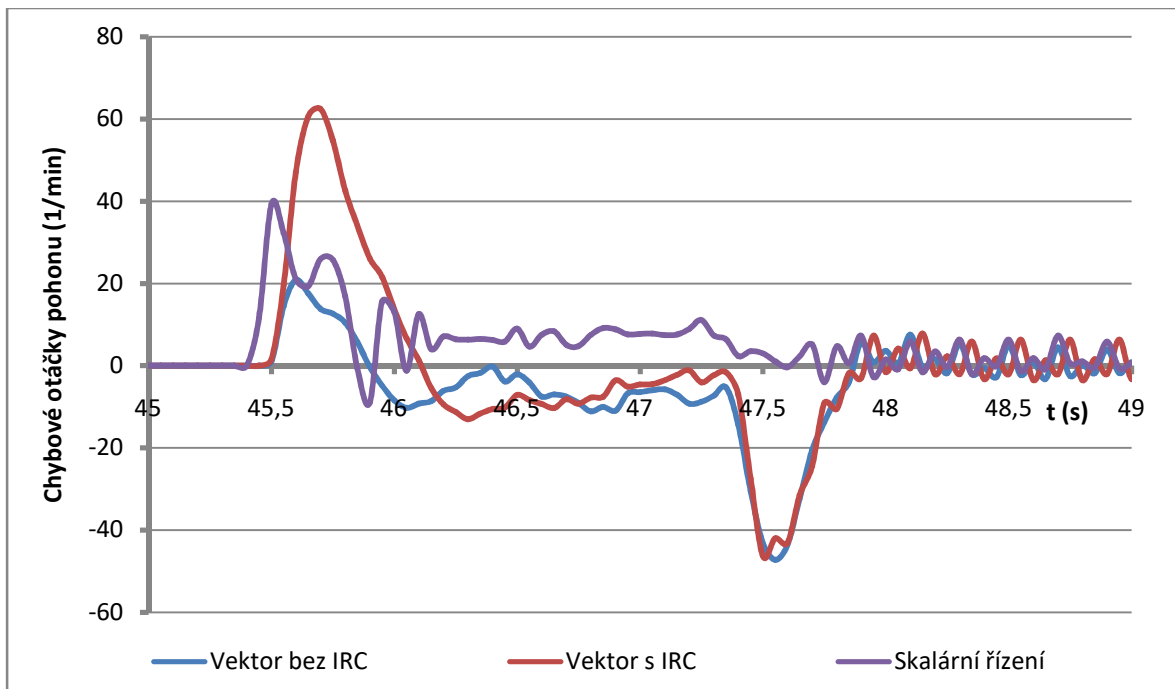
Obr. 19 Chybové otáčky pohonu v ustáleném stavu v závislosti na otáčkách pohonu



Obr. 20 Maximální chybové otáčky pohonu v ustáleném stavu v závislosti na otáčkách pohonu

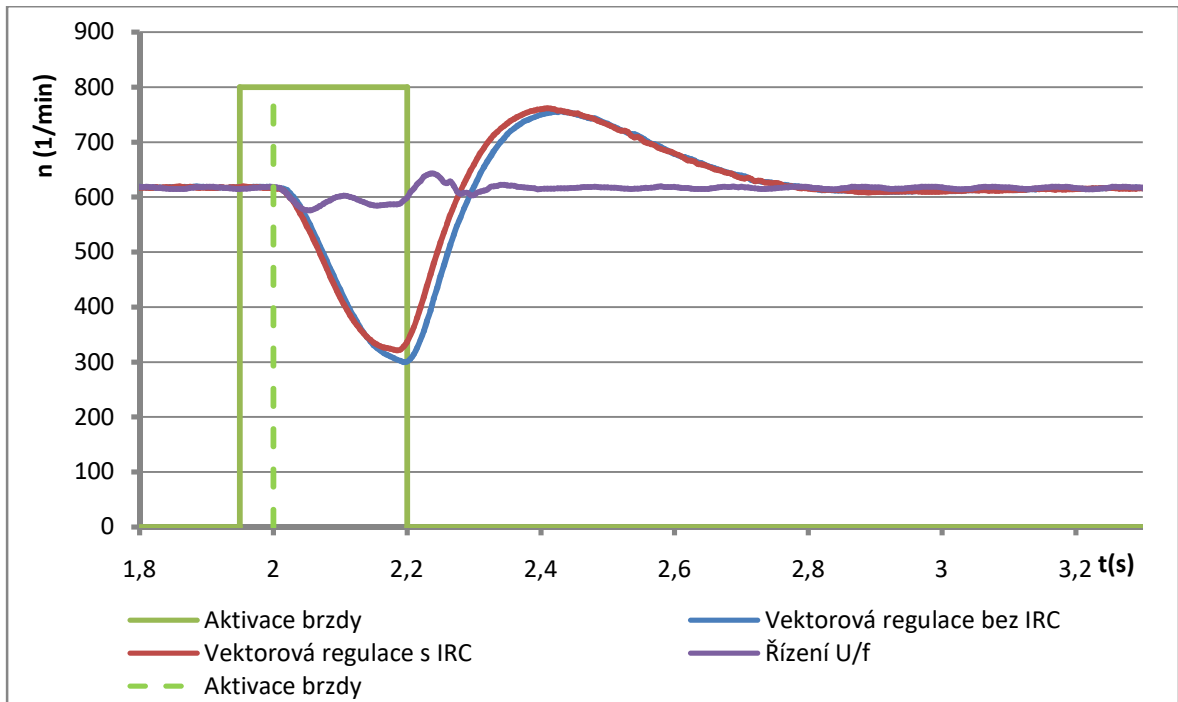
### 2.3 Měření při rozběhu na jmenovité otáčky

Měření při rozběhu na jmenovité otáčky bylo součástí měřícího cyklu (Obr. 14 Měřící cyklus), kde v čase  $t = 45,5\text{s}$  dochází ke skokové změně požadované rychlosti z řídicího PLC  $0 \text{ min}^{-1} \rightarrow 1500 \text{ min}^{-1}$ . Frekvenční měnič má nastavenou rampu rozběhu na hodnotu 2s. (Obr. 21 Odezva na požadavek skokové změny rychlosti  $0 \rightarrow 1500 \text{ min}^{-1}$ ) Modře je zaznamenána požadovaná hodnota otáček z řídicího PLC. Zeleně je pak vidět požadovaná hodnota otáček do otáčkového regulátoru po započtení rozběhové rampy. Na tomto rozběhu je vidět, že všechny sledované způsoby regulace rozběh téměř kopírují. Rozběh se liší až v chování po dosažení požadovaných otáček, kde vektorové regulátory zpracovávají odezvu na překmit skutečné rychlosti od požadované. Oproti tomu skalární řízení pracuje bez překmitu, jelikož pracuje dle předem vypočítaných hodnot a parametrů. Úroveň odchylky v jednotlivých bodech rozběhu je patrná z grafu. (Obr. 22 Odchylky požadovaných a skutečných otáček pohonu při různých režimech regulace při rozběhu pohonu  $0 \rightarrow 1500 \text{ min}^{-1}$  po rozběhové rampě 2s) První částí rozběhu je definována jako doba utržení, to znamená doba, než se dá mechanika do pohybu. Tato doba trvá cca 0,1 s, je při ní vidět narůstající odchylka od požadované hodnoty, během níž narůstá momentotvorná složka vektorové regulace, dokud není dosaženo potřebného momentu pro uvedení mechaniky do pohybu. Po uvedení mechaniky do pohybu následuje snížení odchylky a lineární zrychlení na požadované otáčky. Po dosažení požadovaných otáček a dorovnání překmitu dochází ke stabilizaci na požadovaných otáčkách.

Obr. 21 Odezva na požadavek skokové změny rychlosti 0 → 1500 min<sup>-1</sup>Obr. 22 Odchytky požadovaných a skutečných otáček pohonu při různých režimech regulace při rozběhu pohonu 0 → 1500 min<sup>-1</sup> po rozběhové rampě 2s

## 2.4 Měření při změně zatížení pohonu

Měření při změně zatížení pohonu bylo prováděno při konstantních požadovaných otáčkách pohonu  $617 \text{ min}^{-1}$ , což z pohledu stroje a výrobní technologie znamená rychlost míchání  $8,9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Volba těchto otáček byla zvolena z důvodu omezení mechanického výkonu na brzdě během měření a skutečnosti, že podobných rychlostí otáček pohonu se využívá při plnění stroje materiálem na začátku míchacího procesu. Při začátku výroby a prvním plnění stroje materiálem dochází k velkým změnám zatížení stroje, zejména pokud se jedná o studenou či nehomogenní směs. Změna zatížení byla prováděna sepnutím mechanické – elektro-pneumaticky ovládané brzdy umístěné na hřídeli pohonu před převodovkou. Brzda byla spínána na dobu  $t = 250 \text{ ms}$ . Vzhledem k tomu, že se jedná o elektricky řízenou pneumatickou brzdu, je zpoždění akčních členů přibližně  $50 \text{ ms}$ . Naměřené průběhy rychlostí otáček jsou zaznamenány do grafu (Obr. 23 Změna zatížení pohonu). Z naměřených údajů je patrné, že při použití vektorového řízení je odchylka požadované a skutečné rychlosti mnohonásobně větší než u skalárního řízení. Aktivací zpětné vazby snímače otáček bylo dosaženo mírného zlepšení a rychlejší odezvy, ovšem je patrné, že na tak velké změny záběrového momentu nejsou parametry vektorového regulátoru otáček nastaveny. Skalární řízení se v tomto případě ukázalo jako nejstabilnější řešení k udržení stálých otáček. Je zapotřebí ale zmínit, že parametry vektorového regulátoru byly nastaveny automaticky při měření pohonu frekvenčním měničem v režimu „Standsteel“.



Obr. 23 Změna zatížení pohonu

## Zhodnocení a závěr

V diplomové práci je provedena rešerše doplňkového vybavení asynchronních pohonů, přičemž jsou u každé části vybavení popsány způsoby provedení a jejich použití. Větší pozornost jsem věnoval snímačům otáček, jelikož jejich použití může mít podstatný vliv na provoz pohonu z pohledu přesnosti řízení a regulace.

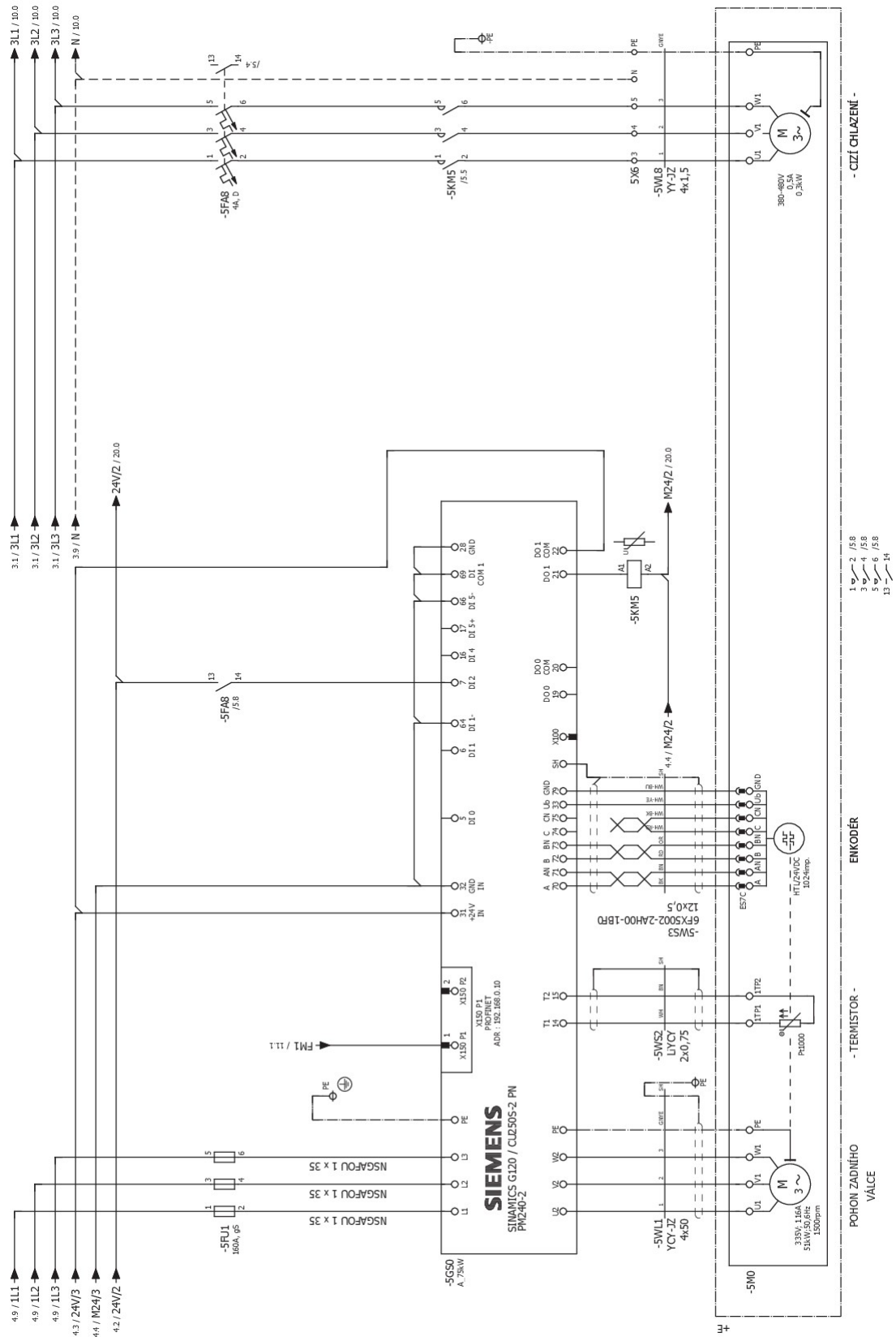
Další částí diplomové práce bylo provedení měření přesnosti řízení a regulace otáček. Měření jsem prováděl při třech způsobech řízení frekvenčního měniče a to při vektorovém řízení se zpětnou vazbou z inkrementálního čidla, vektorové řízení bez zpětné vazby otáček a při skalárním řízení bez zpětné vazby otáček. Měření jsem prováděl při konstantních otáčkách, při změně požadovaných otáček a při změně zátěže pohonu. Z naměřených a vypočtených údajů vyplývá, že největší rozdíly v kvalitě regulace rychlosti pohonu jsou při velmi malých otáčkách a při velkých změnách rychlosti a zatížení pohonu. Při použití pohonu v rozmezí otáček od 10% do 100% jmenovitých otáček je rozdíl vektorové regulace pohonu se zpětnou vazbou z čidla otáček a bez zpětné vazby téměř zanedbatelný. Při nižších otáčkách se regulace bez zpětné vazby projevuje větším kolísáním rychlosti otáčení. Tento jev se z hlediska technologického může jevit v některých aplikacích zanedbatelný. Z pohledu technického řešení strojního zařízení může docházet k většímu opotřebování mechanických prvků, jako jsou spojky, převody, mechanické uložení. Kolísání rychlosti otáček může mít vliv i na hlučnost a vibrace soustrojí.



## Literatura

1. **SIEMENS.** *SINAMICS G120 low voltage inverters - operating instructions.* 04/2014.
2. —. *SINAMICS S120 and SIMOTICS Catalog News D21.4 N.* 2017.
3. **SEW.** *CATALOG AC Motors, DRN63 - 315, DR2S56 - 80, DR2L71 - 80.* 11/2019.
4. **SIEMENS.** *SINAMICS G120 Řídící jednotky a výkonové díly.* 10/2008.
5. **doc.Ing. Jaroslav Novák, CSc.** Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (2. část). *ELEKTRO časopis pro elektrotechniku.* 07 2006.
6. **Ing. Platil, Antonín, Ph.D. a Prof. Ing. Ripka, Pavel, CSc.** *SENZORY A PŘEVODNÍKY.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004.
7. **ATAS elektromotory Náchod a.s.** *Katalog produktů.* 2022.
8. **LARM a.s.** *Katalog produktů.* 2022.
9. **EST.** *Otáčkové relé - Návod pro použití a údržbu.* Ledec nad Sázavou : autor neznámý, 2004.
10. **SIEMENS.** *SIMOTICS M-1PH8 Main Motor Configuration manual.* 2012.
11. **JAVŮREK, Jiří.** *Regulace moderních elektrických pohonů.* Praha : Grada Publishing a.s., 2003.
12. **Pavel, GAJDŮŠEK.** Přehled metod řízení asynchronních motorů. *www.elektrorevue.cz.* [Online] [Citace: 05. 09 2022.] <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05020/index.html>.
13. **SIEMENS.** *SINAMICS S120 Getting Started with the STARTER Commissioning Tool.* 03/2006.
14. **SICK.** *DFS60 HIGH RESOLUTION, PROGRAMMABLE ENCODERS - PRODUCT INFORMATION.* - : SICK AG, 2017.
15. **Václav, Bartoš.** *Elektrické stroje.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2001.

Přílohy



Obr. 24 Schéma zapojení měřeného motoru a frekvenčního měniče

# SIEMENS



Figure similar

## Data sheet for SIMOTICS M-1PH8

Article No. : 1PH8184-1HF15-1AA2

Client order no. :  
Order no. :  
Offer no. :  
Remarks :

Item no. :  
Consignment no. :  
Project :

### Engineering data

		P <sub>N</sub> [kW]	M <sub>N</sub> [Nm]	I <sub>N</sub> [A]	U <sub>N</sub> [V]	f <sub>N</sub> [Hz]	n <sub>N</sub> [rpm]	M <sub>max</sub> [Nm]	I <sub>max</sub> [A]	n <sub>max</sub> [rpm]	M <sub>0</sub> [Nm]	I <sub>0</sub> [A]	η	cos φ	I <sub>μ</sub> [A]
Y	ALM 400V	60.0	327.0	120.0	390	58.9	1,750	925	300.0	5,000	327.0	120	0.944	0.790	64.0
	BLM/SLM 400V	51.0	325.0	116.0	335	50.6	1,500	925	300.0	5,000	325.0	116	0.940	0.800	63.0
	ALM/BLM/SLM 480V	68.0	325.0	118.0	450	67.2	2,000	925	300.0	5,000	325.0	118	0.947	0.780	65.0

### Mechanical data

Motor type	Squirrel cage asynchronous motor
Shaft height	180
Cooling	Forced ventilation NDE -> DE
Vibration severity grade	A
Shaft and flange accuracy	N
Degree of protection	IP55
Design acc. to Code I	IM V15 with A450 flange
Temperature monitoring	Pt1000 temperature sensor in the stator winding
Color	Standard (Anthracite RAL 7016)
Type of the bearing	Standard
Shaft end	Feather key with full key balancing
Encoder system	Incremental encoder HTL 1024 S/R, max. encoder speed = 9000 rpm

<sup>1)</sup> at a rated frequency of 2 kHz and a speed range of up to 5000 rpm

### Physical constants

Thermal time constant	22 min
Moment of inertia	4,890 kgcm <sup>2</sup>
Weight (approx.)	350 kg

### Connection

Type of electrical connection	Terminal box
Position of the connection	NDE top
Power connection	right
Signal connection	DE
Terminal box designation	1XB7322-P05

### Cooling data and sound pressure level

Airflow, min.	0.17 m <sup>3</sup> /s
Sound pressure level L <sub>pA</sub> (1m) motor + external fan operation 50 Hz rated load, tolerance + 3dB	73 dB <sup>1)</sup>
Air discharge	axial
Pressure drop	550 Pa

### External fan

#### Max. power consumption

1 AC 200 ... 277 V (±10%) 50/60 Hz ±10%	1.1 ... 1.3 A
---	---------------

Technical data are subject to change! There may be discrepancies between calculated and rating plate values.

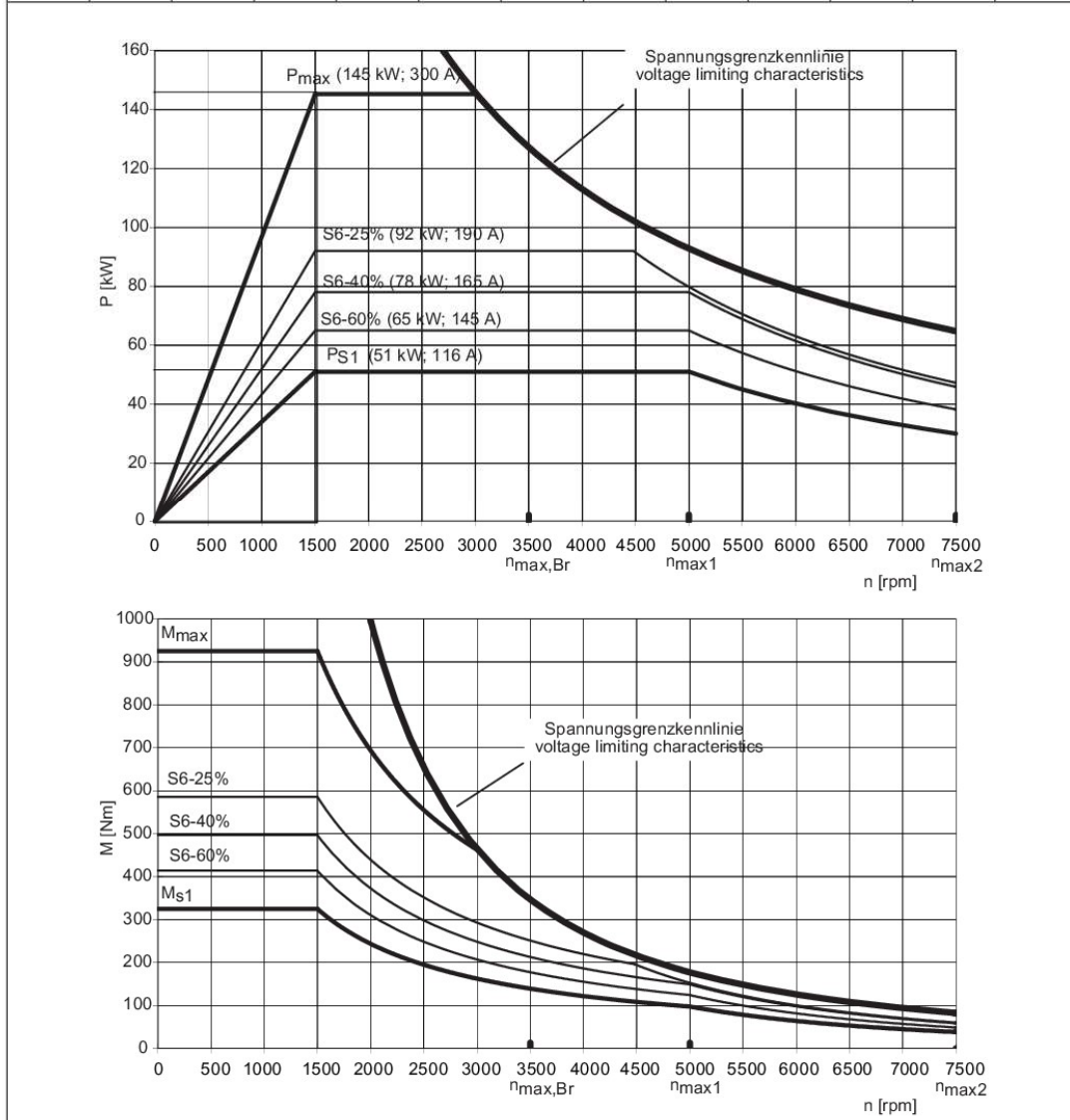
Page 1 of 1

Generated: Wed Nov 9 14:58:12 CET 2022

Obr. 25 Katalogový list měřeného pohonu 1PH8184-1HF15-1AA2 SIEMENS

Table 4- 169 SINAMICS, 3-ph. 400 VAC, Smart/Basic Line Module, (SLM/BLM), 1PH8184-□□F□□, (IP55)

$n_{rated}$ [rpm]	$P_{rated}$ [kW]	$M_{rated}$ [Nm]	$I_{rated}$ [A]	$n_{max1}$ [rpm]	$n_{max2}$ [rpm]	$n_{max3}$ [rpm]	$n_{max, Br}$ [rpm]	$n_2$ [rpm]	$M_{max}$ [Nm]	$I_{max}$ [A]	$M_0$ [Nm]	$I_0$ [A]
1500	51	325	116	5000	7500	-	3500	5000	925	300	325	116



Obr. 26 Zatěžovací charakteristiky pohonu

# SIEMENS

## Údajový list pro systém SINAMICS Řídící jednotka CU250S-2 PN Data sheet for SINAMICS Control unit CU250S-2 PN



Podobné zobrazení  
Figure similar

Obj. č. : **6SL3246-0BA22-1FA0**  
Article No. :

Č. zakázky zákazníka :  
Client order no. :  
Č. zakázky Siemens :  
Order no. :  
Č. nabídky :  
Offer no. :  
Poznámka :  
Remarks :

Č. položky :  
Item no. :  
Č. komentáře :  
Consignment no. :  
Projekt :  
Project :

Elektrické údaje Electrical data	
<b>Provozní napětí nad</b> Operating voltage via	
Výkonový modul The Power Module	= 24 V
Externí napájení External power supply	= 20 ... 29 V
Odebíraný proud, max. Max. power consumption	2,00 A
Ztrátový výkon Power loss	12,00 W

Komunikace Communication	
Komunikace Communication	PROFINET, EtherNet/IP PROFINET, EtherNet/IP

Vstupy / výstupy Inputs / outputs	
<b>Digitální vstupy - standardní</b> Standard digital inputs	
Počet Number	15
Úroveň spínání: 0→1 Switching level: 0→1	11 V
Úroveň spínání: 1→0 Switching level: 1→0	5 V
<b>Digitální vstupy Fail Safe</b> Fail-safe digital inputs	
Počet Number	3 (Využití 2 x standardní DI) 3 (Use of 2 x DI Standard)
<b>Digitální výstupy</b> Digital outputs	
<b>jako reléový přepínací kontakt</b> as relay changer	
Počet Number	2
Výstup (ohmická zátěž) Output (resistive load)	= 30 V, 0,5 A
<b>jako reléový spínací kontakt</b> as relay make contact	
Výstup (ohmická zátěž) Output (resistive load)	= 30 V, 0,5 A
<b>Analogové / digitální vstupy</b> Analog / digital inputs	
Počet Number	2 (Diferenční vstup) 2 (Differential input)
<b>Analogové výstupy</b> Analog outputs	
Počet Number	2 (Výstup vztažený k určitému potenciálu) 2 (Non-isolated output)

# SIEMENS

## Údajový list pro systém SINAMICS Řídící jednotka CU250S-2 PN Data sheet for SINAMICS Control unit CU250S-2 PN

Obj. č. : 6SL3246-0BA22-1FA0  
Article No. :

Druh regulace Closed-loop control techniques		Normy Standards	
Uff lineární / kvadratická / s nastavitelnými parametry Vff linear / square-law / parameterizable	Ano Yes	Shoda s požadavky norem Compliance with standards	CE, UL, cUL, RCM, SEMI F47 CE, UL, cUL, RCM, SEMI F47
Uff s regulací toku (FCC) Vff with flux current control (FCC)	Ano Yes	Značka CE CE marking	Směrnice pro zařízení nízkého napětí 2014/35/EU Low-voltage directive 2014/35/EC
Uff ECO lineární/kvadratický Vff ECO linear / square-law	Ano Yes		
Vektorová regulace, bezsnímačová Sensorless vector control	Ano Yes		
Vektorová regulace, se snímačem Vector control, with sensor	Ano Yes		
Regulace točivého momentu, bezsnímačová Encoderless torque control	Ano Yes		
Regulace točivého momentu, se snímačem Torque control, with encoder	Ano Yes		
Požadavky na okolní prostředí Ambient conditions			
<b>Teplota okolního prostředí</b> Ambient temperature			
Provoz Operation	-10 ... 50 °C (14 ... 122 °F)		
Skladování Storage	-40 ... 70 °C (-40 ... 158 °F)		
<b>Relativní vlhkost vzduchu</b> Relative humidity			
Provoz, max. Max. operation	95 %		
Připojení Connections			
<b>Signálový kabel</b> Signal cable			
Průřez připojení Conductor cross-section	0,05 ... 1,50 mm <sup>2</sup> (AWG 28 ... AWG 16)		
Mechanické parametry Mechanical data			
Druh krytí Degree of protection	typ IP20 / UL open IP20 / UL open type		
Čistá hmotnost Net weight	0,61 kg (1,34 lb)		
<b>Rozměry</b> Dimensions			
Šířka Width	73,0 mm (2,87 in)		
Výška Height	199,0 mm (7,83 in)		
Hloubka Depth	67,0 mm (2,64 in)		

Technické změny vyhrazeny! Mohou existovat rozdíly mezi údajovým listem a typovým štítkem.  
Technical data are subject to change! There may be discrepancies between calculated and rating plate values.

Strana 2 z 2

Vygenerovaný / Generated Sun Nov 13 21:32:23 CET 2022

Obr. 28 Katalogový list řídicí jednotky frekvenčního měniče

# SIEMENS

## Údajový list pro systém SINAMICS Výkonový modul PM240-2

Data sheet for SINAMICS Power module PM240-2

Obj. č. : 6SL3210-1PE31-5AL0  
Article No. :



Podobné zobrazení  
Figure similar

Č. zakázky zákazníka :  
Client order no. :  
Č. zakázky Siemens :  
Order no. :  
Č. nabídky :  
Offer no. :  
Poznámka :  
Remarks :

Č. položky :  
Item no. :  
Č. komentáře :  
Consignment no. :  
Projekt :  
Project :

### Jmenovité parametry Rated data

#### Vstup

Input

Počet fází Number of phases	3 Střídavé
Síťové napětí Line voltage	380 ... 480 V ±10 %
Síťová frekvence Line frequency	47 ... 63 Hz
Jmenovitý proud (LO) Rated current (LO)	140,00 A
Jmenovitý proud (HO) Rated current (HO)	117,00 A

#### Výstup

Output

Počet fází Number of phases	3 Střídavé
<b>Jmenovité napětí</b> Rated voltage	<b>400V IEC</b> <b>480V NEC 1)</b>
Jmenovitý výkon (LO) Rated power (LO)	75,00 kW      100,00 hp
Jmenovitý výkon (HO) Rated power (HO)	55,00 kW      75,00 hp
Jmenovitý proud (LO) Rated current (LO)	145,00 A
Jmenovitý proud (HO) Rated current (HO)	110,00 A
Výstupní proud, max. Max. output current	220,00 A
Frekvence impulzů Pulse frequency	2 kHz
Výstupní frekvence při vektorové regulaci Output frequency for vector control	0 ... 200 Hz
Výstupní frekvence při regulaci U/f Output frequency for V/f control	0 ... 550 Hz

#### Schopnost snášet přetížení

Overload capability

Low Overload (LO) Low Overload (LO)	1,1 x jmenovitý výstupní proud (tzn. přetížení 110%) po dobu 57 s při délce cyklu 300 s; 1,5 x jmenovitý výstupní proud (tzn. přetížení 150%) po dobu 3 s při délce cyklu 300 s 1.1 x rated output current (i.e. 110 % overload) for 57 s with a cycle time of 300 s 1.5 x rated output current (i.e. 150 % overload) for 3 s with a cycle time of 300 s
High Overload (HO) High Overload (HO)	1,5 x jmenovitý výstupní proud (tzn. přetížení 150%) po dobu 57 s při délce cyklu 300 s; 2 x jmenovitý výstupní proud (tzn. přetížení 200%) po dobu 3 s při délce cyklu 300 s 1.5 x output current rating (i.e., 150 % overload) for 57 s with a cycle time of 300 s 2 x output current rating (i.e., 200 % overload) for 3 s with a cycle time of 300 s

### Všeobecná technická data General tech. specifications

Účinník $\lambda$ Power factor $\lambda$	0,95
Úhel skluzu $\cos \phi$ Offset factor $\cos \phi$	0,99
Účinnost $\eta$ Efficiency $\eta$	0,98
Úroveň akustického tlaku LpA (1 m) Sound pressure level (1m)	68 dB
Ztrátový výkon Power loss	1,79 kW
Třída filtru (integrovaného) Filter class (integrated)	Třída A Class A

# SIEMENS

## Údajový list pro systém SINAMICS Výkonový modul PM240-2

Data sheet for SINAMICS Power module PM240-2

Obj. č. : 6SL3210-1PE31-5AL0  
Article No. :

Požadavky na okolní prostředí Ambient conditions		Mechanické parametry Mechanical data	
Chlazení Cooling	Interní chlazení vzduchem Internal air cooling	Druh krytí Degree of protection	typ IP20 / UL open IP20 / UL open type
Spotřeba chladícího vzduchu Cooling air requirement	0,153 m <sup>3</sup> /s (5,403 ft <sup>3</sup> /s)	Konstrukční velikost Frame size	FSF
Instalační nadmořská výška Installation altitude	1 000 m (3 280,84 stop)	Čistá hmotnost Net weight	63,00 kg (138,89 lb)
Teplota okolního prostředí Ambient temperature		Rozměry Dimensions	
Provoz LO Operation LO	-20 ... 40 °C (-4 ... 104 °F)	Šířka Width	305 mm (12,01 in)
Provoz HO Operation HO	-20 ... 50 °C (-4 ... 122 °F)	Výška Height	708 mm (27,87 in)
Doprava Transport	-40 ... 70 °C (-40 ... 158 °F)	Hloubka Depth	357 mm (14,06 in)
Skladování Storage	-40 ... 70 °C (-40 ... 158 °F)	Normy Standards	
Relativní vlhkost vzduchu Relative humidity		Shoda s požadavky norem Compliance with standards	UL, cUL, CE, C-Tick (RCM), SEMI F47 UL, cUL, CE, C-Tick (RCM), SEMI F47
Provoz, max. Max. operation	95 % relativní vlhkost, kondenzace nepřipustná 95 % RH, condensation not permitted	Značka CE CE marking	Směrnice pro zařízení nízkého napětí 2006/95/EG Low-voltage directive 2006/95/EC
Připojení Connections			
Na straně sítě Line side			
Provedení Version	Šrouby M10 M10 bolt		
Průřez připojení Conductor cross-section	35,00 ... 120,00 mm <sup>2</sup> (AWG 2 ... AWG -3)		
Na straně motoru Motor end			
Provedení Version	Šrouby M10 M10 bolt		
Průřez připojení Conductor cross-section	35,00 ... 120,00 mm <sup>2</sup> (AWG 2 ... AWG -3)		
Mezlobvod (pro brzdny rezistor) DC link (for braking resistor)			
Provedení Version	Šroubovací svorky Screw-type terminals		
Průřez připojení Conductor cross-section	25,00 ... 70,00 mm <sup>2</sup> (AWG 4 ... AWG -1)		
Délka kabelu Cable length	10 m (32,81 stop)		
Připojení PE PE connection	Šrouby M10 M10 screw studs		
Délka vedení k motoru, max. Max. motor cable length			
Stíněný Shielded	300 m (984,25 stop)		
Nestíněný Unshielded	450 m (1 476,38 stop)		

Technické změny vyhrazeny! Mohou existovat rozdíly mezi údajovým listem a typovým štítkem.  
Technical data are subject to change! There may be discrepancies between calculated and rating plate values.

Strana 2 z 3

Vygenerovaný / Generated Thu Feb 9 13:50:37 CET 2023

Obr. 30 Katalogový list výkonové jednotky frekvenčního měniče



# SIEMENS

## Údajový list pro systém SINAMICS Výkonový modul PM240-2

Data sheet for SINAMICS Power module PM240-2

Obj. č. : 6SL3210-1PE31-5AL0  
Article No. :

### Ztráty měniče podle normy IEC61800-9-2\* Converter losses to IEC61800-9-2\*

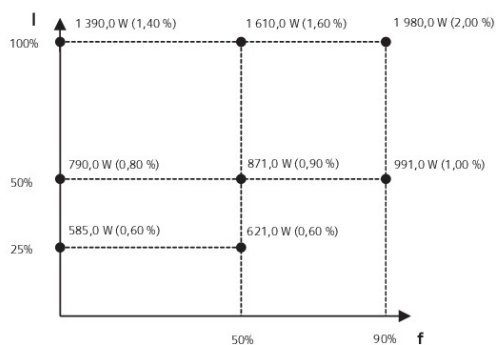
Třída účinnosti  
Efficiency class

IE2

Porovnání s referenčním měničem (90%  
/ 100%)

42,30 %

Comparison with the reference converter (90%  
/ 100%)



Procentuální hodnoty udávají ztráty vzhledem ke jmenovitému výkonu měniče.  
The percentage values show the losses in relation to the rated apparent power of the converter.

Diagram ukazuje ztráty pro body (podle normy IEC61800-9-2) proudů (I) tvořících relativní moment prostřednictvím relativní frekvence staratoru motoru (f).  
Hodnoty platí pro základní provedení měniče bez volitelných doplňků/komponentů.

The diagram shows the losses for the points (as per standard IEC61800-9-2) of the relative torque generating current (I) over the relative motor stator frequency (f). The values are valid for the basic version of the converter without options/components.

\* vypočítané hodnoty  
\*converted values

<sup>1)</sup>Hodnota výstupního proudu a údaje o výkonu platí pro rozsah napětí od 440 V do 480 V.  
The output current and HP ratings are valid for the voltage range 440V-480V

Obr. 31 Katalogový list výkonové jednotky frekvenčního měniče



Obr. 32 Frekvenční měnič použitý při měření



Obr. 33 Asynchronní motor použitý při měření