



České vysoké  
učení technické  
v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Bakalářská práce

Diagnostika asynchronních motorů

Jan Berg

Vedoucí práce: Ing. Jakub Svatoš, Ph.D.  
Praha 2021



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Berg** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **484283**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Diagnostika asynchronních motorů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Diagnostic of electric motors**

Pokyny pro vypracování:

Navrhnete a realizujete diagnostický systém pro diagnostiku asynchronních motorů. Systém umožní sběr dat ze senzorů, např. pomocí DAQ, jejich následné zpracování a vyhodnocení. Sledované parametry pro diagnostiku motorů budou např. otáčky, vibrace, teplota, spotřeba apod. Součástí práce bude také rozbor ekonomických aspektů asynchronních motorů a posouzení efektivnosti investic do dražších motorů s vyšší účinností.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Voženílek P., Novotný V., Mindl P.: Elektromechanické měniče. Skripta ČVUT, 2011.
- [2] Haasz V., et al.: Elektrická měření. Přístroje a metody. Monografie ČVUT, Praha 2018.
- [3] Kreidl M., Šmíd R.: Technická diagnostika. Praha: BEN, 2006. ISBN 80-7300-158-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jakub Svatoš, Ph.D., katedra měření FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Jakub Svatoš, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Jan Berg



## Poděkování

Poděkování patří velmi vstřícnému vedoucímu práce panu Ing. Jakobovi Svatošovi, Ph.D. za veškeré odborné rady, připomínky, trpělivost a ochotu vedoucí ke zdárnému dokončení práce. Dále děkuji panu Ing. Miroslavovi Vítкови, CSc. za užitečné rady a poznámky k ekonomické části této práce. V neposlední řadě patří velké díky rodině za poskytnutí skvělého zázemí, které mi umožnilo se práci plně věnovat.





## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá návrhem diagnostiky asynchronních elektromotorů. Teoretická část rozebírá princip asynchronních elektromotorů, jejich časté poruchy, možné příčiny a měření vstupních veličin. Praktická část se věnuje realizaci a vyhodnocení měření veličin elektromotoru. Ekonomická část obsahuje porovnání efektivnosti investic do elektromotorů s různými účinnostmi.

## **Klíčová slova**

Asynchronní elektromotor, diagnostika, myDAQ, čistá současná hodnota, citlivostní analýza

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the design of diagnostic of asynchronous motors. The theoretical part comprises the principle of induction motors, their frequent failures, possible causes, and measurement of input quantities. The practical part is focused on the realization and evaluation of measurements. The economic part includes a comparison of investment in induction motors with different efficiency.

## **Keywords**

Asynchronous motor, diagnostic, myDAQ, net present value, sensitivity analysis



# Obsah

Seznam obrázků .....	XIII
Seznam tabulek .....	XIII
1 Úvod .....	1
2 Asynchronní elektromotor .....	2
2.1 Konstrukce asynchronního motoru.....	2
2.2 Princip asynchronního motoru.....	3
2.3 Dělení asynchronních motorů.....	3
2.4 Nejčastější poruchy asynchronních motorů.....	4
2.4.1 Přetížení .....	4
2.4.2 Zkrat při provozu na dvě fáze.....	5
2.4.3 Zkrat proti kostře.....	6
2.4.4 Zkrat mezi fázemi .....	6
2.4.5 Další poruchy.....	7
2.5 Frekvenční měnič .....	7
2.6 Účinnost elektromotorů.....	8
3 Měření veličin.....	9
3.1 Měření teploty .....	9
3.2 Měření proudu .....	10
3.2.1 Měření proudu pomocí úbytku napětí na odporu .....	11
3.3 Měření otáček .....	11
3.3.1 Reflexní světelná závora.....	11
3.4 Měření vibrací .....	12
3.4.1 Akcelerometr.....	12
3.5 Vibrodiagnostika .....	13
4 Sběr a vyhodnocení dat.....	14
4.1 Zapojení systému .....	14
4.1.1 Napájení PT100 .....	15
4.2 Příprava pro sběr dat .....	16
4.2.1 Prostředí LabVIEW .....	16
4.2.2 MATLAB.....	18
4.3 Průběhy a vyhodnocení vibrodiagnostiky .....	18
5 Porovnání motorů z ekonomického hlediska.....	22
5.1 Čistá současná hodnota NPV (Net Present Value) .....	22
5.2 Roční hotovostní tok RCF .....	23

5.3	Srovnání motorů dle NPV a RCF .....	23
5.3.1	Čtyřpólový motor SIEMENS, 0,55 kW .....	23
5.3.2	Čtyřpólový motor SIEMENS, 4 kW .....	24
5.3.3	Čtyřpólový motor SIEMENS, 15 kW .....	24
5.4	Citlivostní analýza .....	25
5.4.1	NPV a RCF v závislosti na diskontu .....	25
5.4.2	RCF v závislosti na době využití motoru .....	26
5.4.3	RCF v závislosti na variabilní ceně elektrické energie.....	27
6	Závěr .....	29
	Seznam zdrojů: .....	30
	Seznam příloh:.....	31

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Řez motorem.....	2
Obrázek 2 – Provoz motoru na dvě fáze v zapojení do D [1] .....	5
Obrázek 3 – Tok proudu dvou fází při zapojení do D [1].....	5
Obrázek 4 – Provoz motoru na dvě fáze v zapojení do Y [1].....	5
Obrázek 5 – Tok proudu dvou fází při zapojení do Y [1] .....	5
Obrázek 6 – Zkrat vůči kostře [1] .....	6
Obrázek 7 – Zkrat mezi fázemi [1].....	6
Obrázek 8 – Tok proudu při zkratu mezi dvěma fázemi [1] .....	6
Obrázek 9 – Rozbitá část ložiska ve vinutí [1] .....	7
Obrázek 10 – Blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu .....	7
Obrázek 11 – Požadované účinnosti v závislosti na výkonu stroje [2].....	8
Obrázek 12 - Teplotní závislosti odporových senzorů teploty [3].....	10
Obrázek 13 – Princip měření úbytku napětí na odporu.....	11
Obrázek 14 – Reflexní světelná závora .....	11
Obrázek 15 - Piezoelektrický akcelerometr .....	12
Obrázek 16 - Princip piezoelektrického akcelerometru.....	12
Obrázek 17 – Princip zpracování naměřených fyzikálních veličin.....	14
Obrázek 18 – Principiální zapojení systému.....	15
Obrázek 19 – Neinvertující zapojení operačního zesilovače.....	15
Obrázek 20 – Čelní panel.....	17
Obrázek 21 – Blokový diagram.....	17
Obrázek 22 – Sběr dat .....	18
Obrázek 23 – Měření vibrací .....	19
Obrázek 24 – Simulace výpadku napájecí fáze motoru .....	19
Obrázek 25 – FFT 1 s 50 Hz 1405 ot/min.....	20
Obrázek 26 – FFT 1 s 50 Hz 705 ot/min.....	21
Obrázek 27 – FFT 30 s 50 Hz 705 ot/min .....	21
Obrázek 28 – NPV=f(r).....	25
Obrázek 29 – RCF=f(r) .....	26
Obrázek 30 – RCF=f(doby provozu).....	27
Obrázek 31 – Bod zvratu RCF=f(doby provozu) .....	27
Obrázek 32 – RCF=f(ceny energie) .....	28
Obrázek 33 – Bod zvratu RCF=f(ceny energie).....	28

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Srovnání motorů SIEMENS 0,55 kW .....	24
Tabulka 2 – Srovnání motorů SIEMENS 4 kW .....	24
Tabulka 3 – Srovnání motorů SIEMENS 15 kW .....	24



# 1 Úvod

V dnešní době jsou asynchronní stroje nenahraditelnou částí průmyslu. Nalézt se dají téměř všude, od papírenského průmyslu přes čerpadla a ventilátory až po cirkulárky. Jejich hlavní výhodou je nízká pořizovací cena vzhledem k alternativám a tvrdá mechanická charakteristika. Dřívější nevýhoda, regulace otáček, se díky vývoji a ceně polovodičových měničů stala minulostí a asynchronní stroje vytlačily velkou část stejnosměrných motorů, dříve využívaných převážně pro snadnou regulaci otáček změnou napětí.

Abyste docílilo zvýšení životnosti stroje na maximum, je vhodné kontrolovat některé z parametrů motoru. Díky sledování teploty v čase je možné předejít tepelnému poškození vinutí a s tím spojenými náklady na převinutí, případně na nový motor. Pomocí kontroly fázových proudů se může porovnávat jejich symetrie. Jestliže se porucha objeví vlivem absence některé z napájecích fází nebo kvůli nerovnoměrnosti proudů, nachází se zde prostor na odpojení motoru od sítě a následné odstranění příčiny. Další z veličin, kterou je vhodné diagnostikovat, jsou vibrace napříč frekvenčním spektrem. Díky vibrodiagnostice se dá předejít řadě poruch. Je možné zaznamenat nesymetrii točivého elektromagnetického pole, mechanická uvolnění částí stroje, úhlovou nesouosost a nevyváženost motoru a různé defekty ložisek. Jedním z významných důvodů diagnostiky zařízení je požadavek na životnost stroje a bezproblémový chod zařízení.

Na rozdíl od století dvacátého se začíná v jednadvacátém století brát čím dál více ohledy na účinnost a úspornost elektrických strojů. Vyšší účinnost se sebou nese i vyšší technologické a materiálové požadavky na celý proces výroby motorů. Tyto požadavky se však projevují v pořizovací ceně. Je na místě zvážit, jestli snaha o stroje s co nejvyšší účinností je ekonomicky výhodná při zahrnutí předpokládané doby provozu.

Práce obsahuje tři hlavní části. První z nich se zabývá vlastním popisem asynchronních elektromotorů a důvody, proč by se měla diagnostika provádět. Jaké typy poruch se objevují, jak se jim může alespoň částečně předejít a jeden z možných způsobů, pomocí kterého se mohou diagnostiky provádět. Jaký je důvod řešit účinnost asynchronních strojů a její dělení.

Druhá část obsahuje schématický návrh obvodu pro měření parametrů asynchronního motoru, následný princip realizace a způsob vyhodnocení pomocí software LabVIEW a MATLAB.

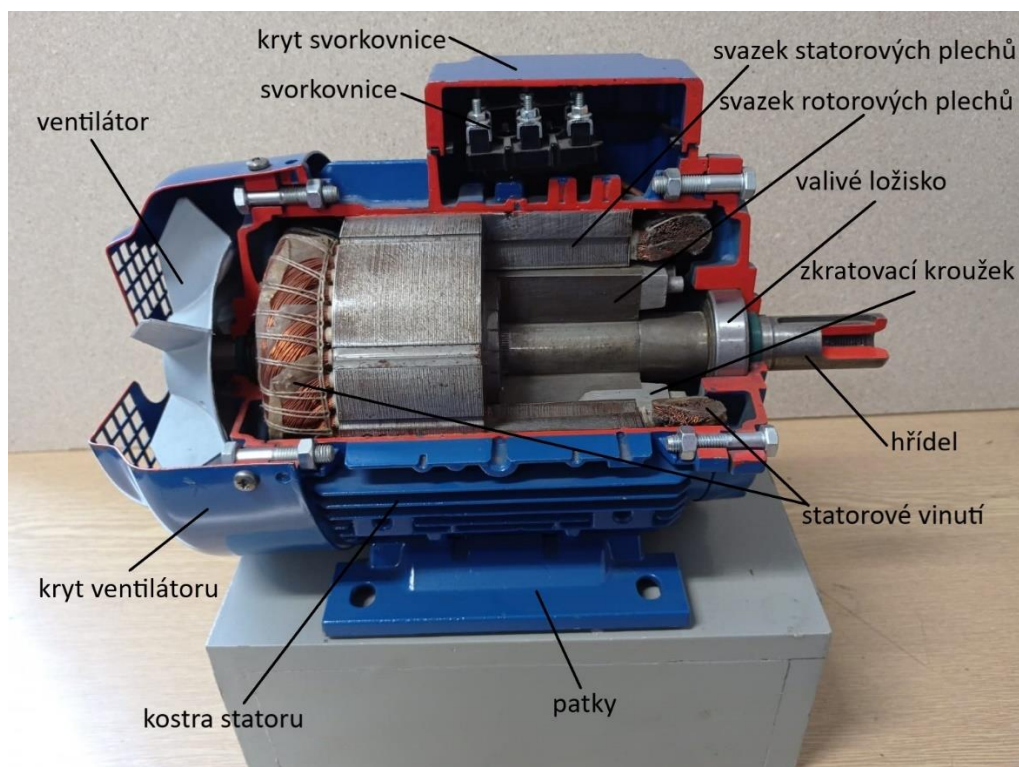
Třetí část práce řeší ekonomické aspekty elektromotorů. Porovnává efektivitu investic pomocí čisté současné hodnoty NPV a ročního ekvivalentního toku RCF motorů rozdílných výkonů s ohledem na různou průměrnou dobu provozu a účinnost daného zařízení. Dále obsahuje jednoparametrické citlivostní analýzy motorů v závislosti na řadě proměnných.

## 2 Asynchronní elektromotor

Níže popsaná část se zabývá asynchronními elektromotory. Ty patří bezpochyby mezi nejrozšířenější pohony malých a středních výkonů. Pro napájení jim stačí střídavá síť, která je přivedena v našich podmínkách téměř do každé budovy. Díky nízkým nákladům na pořízení, relativně jednoduché konstrukci stroje a tvrdé mechanické charakteristice našly využití jakožto pohony ventilátorů, dopravníkových pásů, pil, čerpadel či generátorů malých vodních i větrných elektráren. Práce se zaměřuje na nejrozšířenějšími typy elektromotorů, třífázové asynchronní stroje s kotvou nakrátko.

### 2.1 Konstrukce asynchronního motoru

Asynchronní elektromotor se skládá ze statoru a rotoru. Statorový paket je složen ze vzájemně izolovaných elektrotechnických plechů z křemíkové oceli. Ty jsou uloženy v kostře, která slouží jako nosná konstrukce statorového paketu a zaručuje souosost vůči rotoru. Ve statorovém paketu se nachází třífázové statorové vinutí, které vytváří točivé magnetické pole. Jednotlivé vývody vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici. Po stranách kostry motoru se nachází štíty, které slouží k uchycení rotoru pomocí ložisek. Rotor se skládá z hřídele, rotorových plechů a rotorového vinutí. Upevnění rotorového paketu bývá přes pero či pomocí vroubků na hřídeli. U strojů velkých výkonů je rotorový paket přichycen k hřídeli pomocí rotorové hvězdice. Na hřídeli bývá u strojů malých výkonů drážka na pero, která slouží k přichycení poháněného mechanismu. Na druhé straně hřídele se nachází ventilátor sloužící pro chlazení motoru, kryt ventilátoru a případně další modifikace, jako je brzda, snímač otáček nebo cizí chlazení.



Obrázek 1 – Řez motorem



## 2.2 Princip asynchronního motoru

Po vnitřním obvodu statorového paketu je navinuto trojfázové vinutí vzájemně pootočené o 120 °. Vývody cívek jsou ukončeny na svorkovnici. Průchodem střídavého proudu s fázovými posuny 120 ° statorovým vinutím vzniká točivé magnetické pole rotující synchronními otáčkami  $n_s$ . Magnetické pole statoru protíná vinutí rotoru. V tom se dle indukčního zákona indukuje napětí  $U_i$ . Rotorové tyče jsou po stranách spojeny kruhy nakrátko. Rotorovým vinutím začne protékat proud. Ten dle Lenzova zákona působí svými magnetickými účinky proti změně magnetického toku.

Na rotorové vinutí působí silové účinky točivého pole statoru. Dvojice sil vytvoří točivý moment působící ve směru otáčení. Rotor se roztočí. Aby se v rotorovém vinutí indukovalo napětí, musí být mezi rotorem a rotujícím magnetickým polem statoru relativní pohyb. Pokud by se rotor točil synchronními otáčkami, neindukovalo by se v něm žádné napětí a motor by měl nulový moment. Zpoždění rotoru za magnetickým polem statoru je definováno skluzem  $s$  ze vztahu

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (2.1)$$

kde  $n_s$  jsou synchronní otáčky magnetického pole statoru ( $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ) a  $n$  jsou mechanické otáčky rotoru ( $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

Synchronní otáčky se získají ze vztahu

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (2.2)$$

kde  $f$  je napájecí frekvence (Hz) a  $p$  je počet pólových dvojic (-).

Indukované napětí v rotorovém vinutí je dáno vztahem

$$U_i = 4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N \cdot k_v, \quad (2.3)$$

kde  $f$  je napájecí frekvence (Hz),  $\phi$  je magnetický tok (Wb),  $N$  je počet závitů (-) a  $k_v$  je konstanta vinutí (-).

## 2.3 Dělení asynchronních motorů

Existuje spousta kritérií, podle kterých se mohou asynchronní stroje třídit. Když se nebudou brát v potaz výjimky, tak stačí nejčastěji stroje rozdělovat podle:

statorového vinutí:    -jednofázové vinutí s pomocnou fází  
                          -třífázové vinutí

- rotorového vinutí:     -nakrátko – rotorové tyče jsou po stranách spojeny kruhy  
nakrátko  
-kroužkové – rotorové vinutí je na jedné straně spojeno do uzlu, na  
straně druhé vyvedeno na kroužky. Na ty dosedají  
kartáče spojeny s motorovým spouštěčem
- principu:             -asynchronní motor – spotřebovává elektrickou energii  
-asynchronní generátor – dodává elektrickou energii

## 2.4 Nejčastější poruchy asynchronních motorů

I když některé poruchy se předvídat nelze, v mnoha případech existuje možnost poruchám asynchronních strojů a následně opravě či nákupu nového zařízení předejít indikací poruchových stavů a časnému zásahu. Mezi časté příčiny poruch patří opotřebovaná ložiska, přetížení stroje, mezizávitové zkraty, zkraty při provozu na dvě fáze, zkraty proti kostře a zkraty mezi fázemi.

### 2.4.1 Přetížení

Průchodem střídavého proudu vinutím vzniká Jouleovo teplo

$$Q = R \cdot \int_0^T i^2(t) dt, \quad (2.4)$$

kde  $R$  je odpor vinutí ( $\Omega$ ),  $i(t)$  je okamžitá hodnota elektrického proud (A) a  $T$  je doba průchodu proudu vinutím (s).

To působí tepelnými účinky na své okolí. Při dlouhodobém průchodu proudu vyššího, než jmenovitého dochází k výraznému urychlení degradace izolačních materiálů. Ty ztrácí své izolační vlastnosti, a následně může dojít ke zkratu mezi vinutím a kostrou. Statorové vinutí se nenávratně poškodí a musí se převinout.

Tepelná degradace izolace může být způsobena dlouhodobým přetěžováním stroje, nedostatečným chlazením nebo při dlouhotrvajícím stavu, kdy je motor napájen a rotor se netočí. Tento stav nastává při každém rozběhu nebo při extrémní zátěži. Při rozběhu přímým připojením k síti se dosahuje zkratového proudu jen krátkodobě. V obou případech vinutím protéká zkratový proud

$$I_k = 5 - 7 \cdot I_N, \quad (2.5)$$

kde  $I_N$  je jmenovitý proud motoru (A).

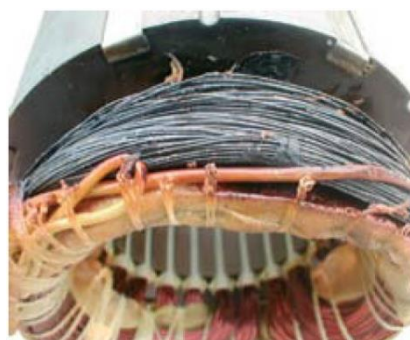
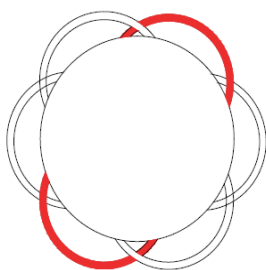
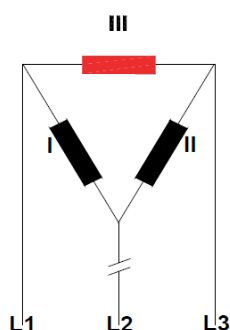
Jestliže by ochrany motoru nezareagovali, tak by byla možnost pozorovat násobně vyšší proud než jmenovitý. Zároveň by však došlo velmi rychle k tepelnému poškození vinutí.

Jakmile přetížení způsobí neúnosnou degradaci izolace, tak je jediným řešením na opravu vložení nového vinutí.

## 2.4.2 Zkrat při provozu na dvě fáze

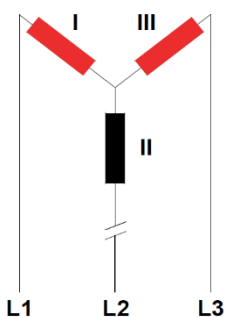
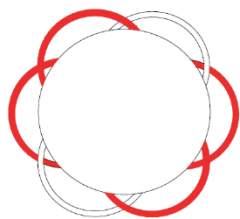
Při napájení pouze dvou fází se vinutí motoru začne tepelně namáhat. Je to poruchový stav, který i při krátkodobém provozování může zničit izolaci statorového vinutí. Chybějící fázi může obsluze naznačit fakt, že motor se nemusí vždy roztočit na požadovanou stranu.

Jestliže jsou napájeny pouze fáze L1 a L3 motoru, který je zapojen do trojúhelníku, obvod se uzavře přes cívku III, kterou bude protékat veškerý proud. Magnetické pole přestává být symetrické, motor doprovází hluk a několikanásobně zvýšené vibrace. Ty se téměř ihned společně s překročením jmenovitého proudu projeví a mohou se zaznamenat. Překročení meze maximálního dovoleného oteplení se projeví se zpožděním. Fáze je přetížena, dochází k tepelnému namáhání vodičů a degradaci izolace. Bez včasného zásahu se izolace roztaví a motor nebude následného provozu schopný.



Obrázek 3 – Tok proudu dvou fází při zapojení do D [1] Obrázek 2 – Provoz motoru na dvě fáze v zapojení do D [1]

Pokud nastane absence přívodní fáze L2 při zapojení motoru do hvězdy, obvod se uzavře přes cívku I a III. Obě cívky jsou proudově a tepelně přetěžovány, magnetické pole statoru přestává být symetrické, což má za následek hluk a zvýšené vibrace. Překročení dovoleného oteplení, nesymetrie proudů i zvýšené vibrace se mohou diagnostikovat. Jestliže se motor včas neodstaví a porucha nenapraví, brzy se vlivem degradující izolace vinutí a laku vodičů motor dostane do poruchového stavu.



Obrázek 5 – Tok proudu dvou fází při zapojení do Y [1] Obrázek 4 – Provoz motoru na dvě fáze v zapojení do Y [1]

### 2.4.3 Zkrat proti kostře

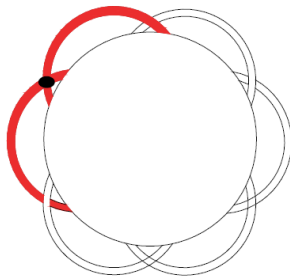
Během stárnutí a tepelného namáhání izolačního systému statorového vinutí může dojít k dotyku vinutí a statorového paketu. Nejnáchylnější jsou místa, ve kterých vodiče vcházejí do drážek. Napětí se náhle dostane na kostru a nastává nebezpečný poruchový stav. Takový typ poruchy je těžce předvídatelný za pochodu bez odstavení stroje a kontroly izolačních vlastností. U strojů velkých výkonů lze místa znovu zaizolovat. Ve většině případů motorů malých výkonů se musí statorové vinutí převinout.



Obrázek 6 – Zkrat vůči kostře [1]

### 2.4.4 Zkrat mezi fázemi

Vlivem špatného stavu izolace, vlhkosti či vodivého cizího tělesa může v čele vinutí dojít ke zkratu mezi fázemi. Tento typ poruchy má spoustu možných příčin, a proto se téměř nedá z čistě měřitelných veličin predikovat mezifázový zkrat s naprostou jistotou při provozu stroje. Statorové vinutí je nenávratně poškozeno a musí se převinout.



Obrázek 8 – Tok proudu při zkratu mezi dvěma fázemi [1]



Obrázek 7 – Zkrat mezi fázemi [1]

## 2.4.5 Další poruchy

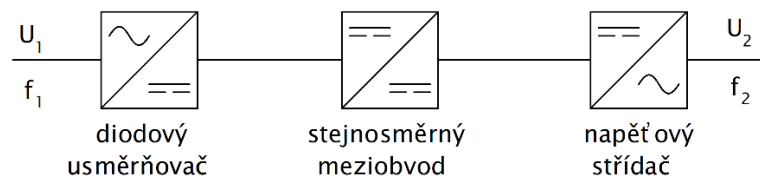
Poruchy vinutí asynchronního stroje mohou mít mnoho dalších příčin. Jedny z možných příčin jsou způsobeny cizími předměty ve vinutí, jakožto například části rozbitých ložisek, které vinutí přerušují. Vývoj poruchy se často nedá indikovat. Riziko se může snížit domazáváním ložisek, pravidelnou vibrodiagnostikou a výměnou ložisek v případě zaznamenaných rozvíjejících se poruch. Další z příčin poruch, které mohou nastat, jsou: prodřená izolace vývodů vinutí vedoucí na svorkovnici, přerušení rotorové tyče či mechanicky poškozená hřídel.



Obrázek 9 – Rozbitá část ložiska ve vinutí [1]

## 2.5 Frekvenční měnič

Aby bylo možné napájet třífázový elektromotor z jednofázové napájecí sítě a případně plynule měnit rychlost otáček, je vhodné využít frekvenční měnič. Ten nejprve konstantní napájecí napětí usměrní, ve stejnosměrném meziobvodu upraví a následně pomocí střídače a výkonových prvků z napětí stejnosměrného udělá napětí třífázové střídavé.



Obrázek 10 – Blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu

Změnou rychlosti otáček asynchronního motoru pomocí pouhé změny efektivní hodnoty napětí klesá moment stroje kvadraticky. Proto je tento způsob využíván jen pro lehké rozběhy např. ventilátorů. Daný způsob využívají softstartéry. Aby moment se snižujícím se napětím neklesal kvadraticky, ale byl konstantní, je potřeba dodržet poměr

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{konst.}, \quad (2.6)$$

kde  $U_1$  je napájecí napětí (V) a  $f_1$  napájecí frekvence (Hz).

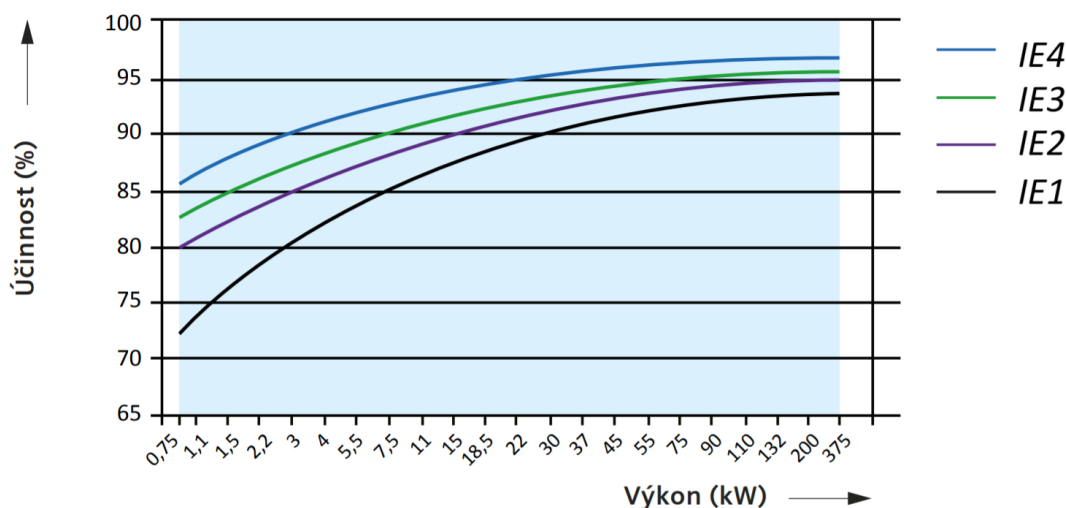
## 2.6 Účinnost elektromotorů

Snaha Evropské unie o snížení spotřeby energie a emise CO<sub>2</sub> vyústila v nařízení 640/2009 a dodatek 04/2014. Toto nařízení se zabývá energetickou účinností a spotřebou energie asynchronních elektromotorů v průmyslovém prostředí. Nařízení je platné ve všech zemích Evropské unie. Pro určení účinnosti slouží norma IEC 60034-30-1 (ČSN EN 60034-30). Hlavní novinkou v normě je určování přídatných ztrát. Dřívější paušální hodnoty přídatných ztrát jsou nahrazeny skutečně naměřenými hodnotami. Motory napájené přímo ze sítě musí mít alespoň vysokou účinnost IE3, v kombinaci s frekvenčním měničem ještě mohou být použity motory se zvýšenou účinností IE2. [2]

Třídy účinností se dělí na:

- IE1 – standardní účinnost
- IE2 – zvýšená účinnost
- IE3 – vysoká účinnost
- IE4 – velmi vysoká účinnost

Účinnost elektromotorů závisí na jmenovitém výkonu. Minimální účinnost IE3 při přímém připojení k síti musí být splněna pro elektromotory o výkonech od 0,75 kW do 375 kW.



Obrázek 11 – Požadované účinnosti v závislosti na výkonu stroje [2]

## 3 Měření veličin

Hrozící porucha se dá v mnoha případech predikovat změnou provozních veličin. Pro vyvarování se poškození elektromotoru, které může být spojené s ohrožením zdraví, s odstavením výrobní linky a s následně finančně nákladnou opravou je vhodné sledovat v čase řadu parametrů. Mezi jedny z možných snímaných veličin patří napětí a proud motoru, teplota vinutí, vibrace stroje, otáčky hřídele, vlhkost ve vinutí aj.

### 3.1 Měření teploty

Jednou z často kontrolovaných veličin motoru je teplota vinutí. Statorové vinutí je navinuto v definované třídě izolace. Jednotlivé třídy izolace zaručují různé maximální dovolené oteplení statorového vinutí. Stroje mívají často třídu izolace vyšší, než při které jsou doporučeny provozovat. Vlivem naddimenzované izolace je elektromotor schopen dosáhnout vyšší účinnosti a nachází se zde rezerva pro přetížení motoru. Při překročení hodnoty dovoleného oteplení začne izolace rychleji degradovat. Aby se mohla teplota stroje měřit, používají se v praxi buď termistory (převážně PTC) nebo odporové senzory teploty PT100 či PT1000.

PTC termistory (pozistory) jsou polovodičové odporové senzory teploty. Vyrábí se z polykrystalické feroelektrické keramiky. Jejich teplotní součinitel odporu je kladný. Průběh odporu v závislosti na teplotě nejprve mírně klesá, po překročení Curieovy teploty odpor se zvyšující se teplotou exponenciálně roste o několik řádů. Velikost Curieovy teploty závisí na chemickém složení daného termistoru. Kvůli nelineárnímu nárůstu odporu a nízké přesnosti se využívají převážně pro signalizaci překročení maximální povolené hodnoty. [3]

Princip odporových kovových teplotních sensorů je založen na teplotní závislosti odporu na teplotě, který se ve většině případů s rostoucí teplotou zvyšuje. Vhodné odporové kovové senzory teploty jsou platinové, případně měděné či niklové. Velkou výhodou platinových sensorů je jejich dlouhodobá časová stabilita a vysoká teplota tání. Čistota platiny se posuzuje dle redukovaného odporu

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \geq 1,385. \quad (3.1)$$

Platinové měřicí odpory ( $W_{100}=1,385$ ) se dělí do dvou tříd, třída A obsahuje teploty od  $-200\text{ °C}$  do  $650\text{ °C}$  a třída B teploty od  $-200\text{ °C}$  do  $850\text{ °C}$ . Běžně se používají platinové teplotní senzory s hodnotou odporu 100 či 1000  $\Omega$  při  $0\text{ °C}$ , méně často hodnoty 50, 200, 500 a 2000  $\Omega$ . Následný přepočítání odporu na teplotu je dán vztahem

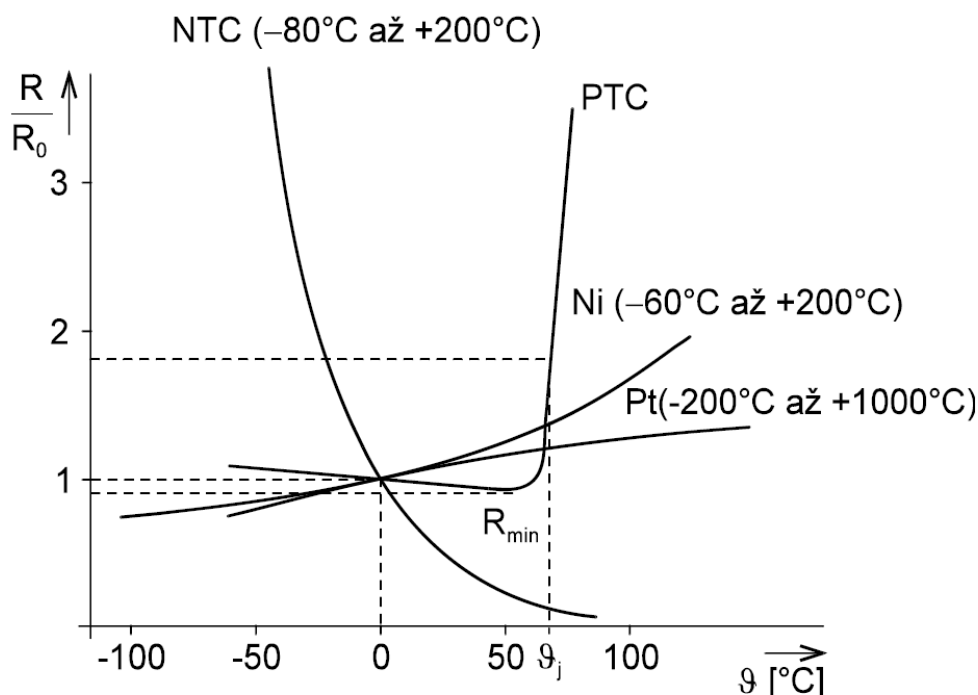
$$R(\vartheta) = R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3(\vartheta - 100)], \quad (3.2)$$

kde  $R_0$  je odpor teplotního senzoru při  $0\text{ °C}$  ( $\Omega$ ),  $A, B, C$  jsou konstanty (-) a  $\vartheta$  je teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Pro běžná měření a rozsah  $-200\text{ °C}$  až  $850\text{ °C}$  se mohou členy vyššího řádu zanedbat a konstanta  $A_{Pt} = 3,91 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ . [3]



Odporové kovové PT teplotní senzory se provádí ve variantách dvou vodičových, třívodičových a čtyřvodičových. V případě dvou vodičového senzoru se k měřenému odporu přičítá ještě odpor přívodů. V tomto případě bývá nejistota údaje do 0,5 °C. Jestliže je vyžadováno přesnější měření, musí se použít zapojení třívodičové nebo čtyřvodičové.

U elektromotorů se předpokládá maximální teplota vinutí přibližně do 120 °C. Pro měření teploty s lineární závislostí je vhodné využít kovový odporový teplotní senzor PT100.



Obrázek 12 - Teplotní závislosti odporových senzorů teploty [3]

### 3.2 Měření proudu

Pro možnost hlídat protékající proud a tím indikovat některé z možných poruch, je potřeba vybrat vhodný způsob měření. Na ten existuje řada požadavků. Kvůli nepříznivým podmínkám v České republice je potřeba se poohlížet po co nejjednodušší možné variantě, která se dá provést jednoduše a spolehlivě i mimo školní laboratoře. Pro snadné zpracování naměřených hodnot se využívá karta myDAQ, která má omezené napěťové vstupy, a proto je potřeba procházející proud převést na napětí o požadovaném rozsahu karty.

Jelikož se proud nachází v řádu jednotek ampér a více než přesnost naměřených hodnot je potřeba kontrolovat změny procházejícího proudu pro indikování nepříznivých stavů motoru, na výběr se nabízí několik možností. Mezi cenově nejdostupnější řešení patří měření pomocí proudových transformátorů a měření úbytků napětí na předřadných rezistorech.

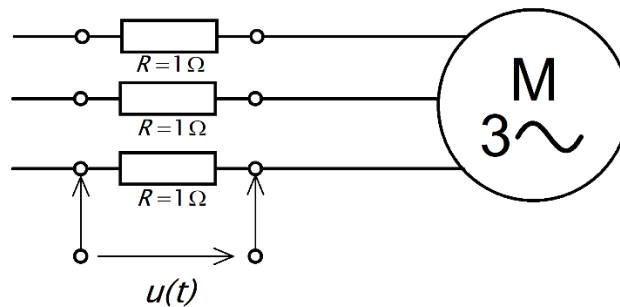


### 3.2.1 Měření proudu pomocí úbytku napětí na odporu

Převod hodnoty proudu na napětí, které je možno snímat pomocí vstupů myDAQ karty, je provedeno pomocí měření úbytku napětí na předřadném odporu. Při vhodně zvolené velikosti odporu  $1 \Omega$  odpovídá hodnota proudu rovnou hodnotě naměřeného napětí a nemusí se dále nic přepočítávat.

$$i(t) = \frac{u(t)}{R}, \quad (3.3)$$

kde  $i(t)$  je elektrický proud (A),  $u(t)$  je elektrické napětí (V) a  $R = 1 \Omega$  je odpor předřadného rezistoru ( $\Omega$ ).



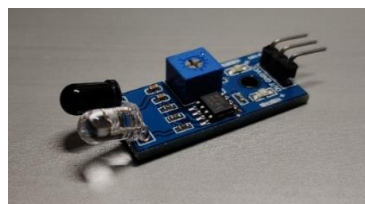
Obrázek 13 – Princip měření úbytku napětí na odporu

### 3.3 Měření otáček

Otáčky se mohou odečítat pomocí široké škály přístrojů. Principiálně se mohou měření rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. Dotykový princip odečítá rotační pohyb v ose hřídele snímací rotační částí přístroje. Při bezkontaktním měření otáček fungují měřicí přístroje na principu optickém, mechanickém, elektrodynamickém a elektromagnetickém. Při zohlednění ceny necelých 20 Kč za celý modul je v tomto případě vhodné využít pro měření otáček optickou závoru.

#### 3.3.1 Reflexní světelná závora

Princip optické závory spočívá ve vysílání infračerveného záření IR diodou (vysílačem). Při dopadu paprsku na lesklou odraznou plochu (hřídel motoru) se paprsek vrací zpátky do vedlejší IR diody (přijímače). Jestliže se paprsek odrazí, na výstupu modulu se objeví napětí + 5 V. Pohlcení paprsku se docílí zalepením hřídele motoru černou lepicí páskou. Požadované napájení senzoru je zajištěno kartou NI myDAQ. Světelná závora dodává + 5 V impulsy na digitální vstup karty.



Obrázek 14 – Reflexní světelná závora

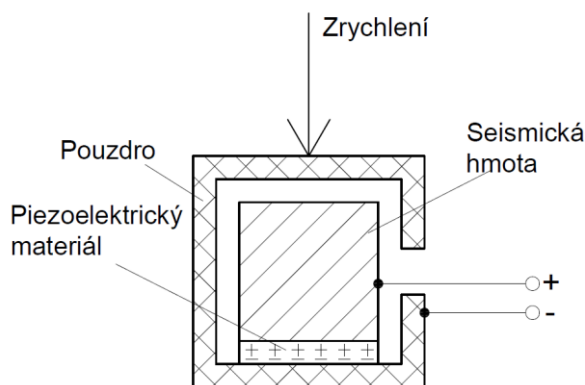
### 3.4 Měření vibrací

Díky pravidelnému měření vibrací se dá předejít postupně se rozvíjejícím mechanickým chybám a tím se dá docílit i omezení značných nákladů, které mohou nastat. K měření vibrací se používá akcelerometr. Naměřený signál se zpracuje a provede se Fourierova transformace, která převádí signál z časové oblasti do oblasti frekvenční. Z transformovaného signálu je možné některé vady indikovat. Mezi defekty odhalitelné měřením vibrací patří mechanické uvolnění částí motoru, nesouosost a nevyváženost rotoru a defekty ložisek případně ložiskových kuliček.

#### 3.4.1 Akcelerometr

Akcelerometr je zařízení, které slouží pro měření dynamického nebo statického zrychlení. Existují čtyři základní typy akcelerometrů, piezoelektrické, piezorezistivní, kapacitní a tepelné.

Piezoelektrické akcelerometry fungují na principu piezoelektrického jevu. Využívají piezoelektrický materiál, který generuje náboj úměrný mechanickému namáhání. Vnitřní elektronika senzoru přemění náboj na lépe měřitelné napětí. [4]



Obrázek 16 - Princip piezoelektrického akcelerometru



Obrázek 15 - Piezoelektrický akcelerometr

U akcelerometrů piezorezistivních se využívá křemíkové mechanické struktury. Změna odporu piezokeramiky v tomto případě odpovídá zrychlení. Akcelerometry kapacitní využívají pro měření zrychlení změnu kapacity křemíkové struktury. Tepelné akcelerometry fungují na principu přenosu tepla v plynu a snímání rozložení teploty v závislosti na vzdálenosti od topného tělíska. Teplota je měřena soustavou termočlánků, která se nachází ve vyleptaném křemíku. [4]

### 3.5 Vibrodiagnostika

Aby se předešlo poruchám způsobenými ložisky elektromotoru a s tím spojenými ekonomickými ztrátami, je vhodné pravidelně provádět diagnostiku vibrací stroje. Tím je možné signalizovat rozvíjející se defekty motoru dříve, než se projeví ve formě destrukce celého stroje. Poruchy ložisek mohou vznikat vlivem nevyváženého rotoru, vadou materiálu, uvolněnými částmi stroje, nesprávným mazáním, nesouosostí hřídele aj.

Pro naměřená data z akcelerometru se následně provádí spektrální analýza. Je potřeba spočítat a vnést do grafu poruchové frekvence motoru, které jsou charakteristické pro dané vady ložiska.

Otáčková frekvence se získá ze vztahu

$$f_{ot} = \frac{RPM}{60}, \quad (3.4)$$

kde  $RPM$  jsou otáčky hřídele za minutu ( $ot \cdot \text{min}^{-1}$ ).

Otáčková frekvence  $f_{ot}$  může vyjadřovat:

- mechanické uvolnění – sled vysokých amplitud  $f_{ot}$  nebo násobků  $\frac{f_{ot}}{2}$
- úhlovou nesouosost, nevyváženost – vysoká amplituda  $f_{ot}$
- paralelní nesouosost – amplituda  $2 \cdot f_{ot} > 50\%$  hodnoty amplitudy  $f_{ot}$

Mezi další opakovací frekvence vad ložiska, které se mohou projevit ve spektrální analýze, patří frekvence defektu na vnější a vnitřní dráze ložiska, frekvence defektu kuličky ložiska a frekvence klece ložiska.

Frekvence defektu na vnější dráze ložiska je dána vztahem

$$f_{ord} = \frac{n}{2} \cdot \frac{r}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi\right). \quad (3.5)$$

Frekvence defektu na vnitřní dráze ložiska je dána vztahem

$$f_{ird} = \frac{n}{2} \cdot \frac{r}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi\right). \quad (3.6)$$

Frekvence defektu kuličky ložiska je dána vztahem

$$f_{bd} = \frac{n}{2} \cdot \frac{r}{60} \cdot \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d}\right)^2 \cdot \cos^2\phi\right]. \quad (3.7)$$

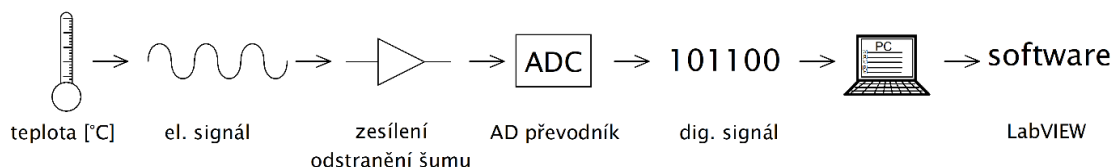
Frekvence klece ložiska je dána vztahem

$$f_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{r}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi\right), \quad (3.8)$$

kde  $n$  je počet kuliček v ložisku (-),  $r$  jsou otáčky hřídele za minutu ( $ot \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $B_d$  je průměr ložiskové kuličky (mm),  $P_d$  je průměr roztečné kružnice ložiska (mm) a  $\phi$  je stykový úhel ložiska ( $^\circ$ ). [6]

## 4 Sběr a vyhodnocení dat

Aby bylo možné docílit shromažďování data k následné analýze z měřicích zařízení, využívají tzv. Data Acquisition systémy (DAQ). Vstupní analogové signály ze senzorů jsou převedeny na signály digitální, které jsou následně zpracovávány a ukládány. Fyzikální jevy jsou zachyceny pomocí senzorů, které je převádí na měřený elektrický signál.



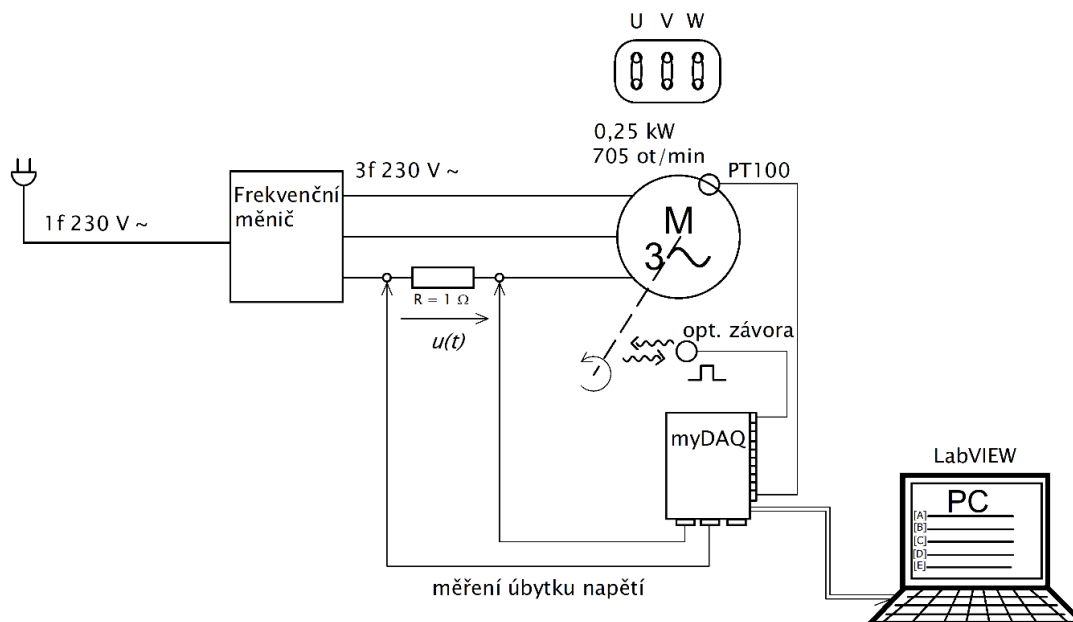
Obrázek 17 – Princip zpracování naměřených fyzikálních veličin

Kvůli nepříznivé celosvětové pandemii COVID-19 se musí měření provádět v provizorních domácích podmínkách. K tomu se zvolila karta myDAQ od firmy National Instruments. Ta se připojuje k počítači prostřednictvím USB. Jednou ze základních funkcí je digitální multimetr. Další funkce karty se získají využitím konektorů na boční straně karty, kde lze využít dvojici analogových vstupů, dvojici analogových výstupů a osm digitálních linek, které lze využít jako vstupy nebo výstupy.

Naměřená data se zpracovávají pomocí softwaru od National Instruments. Pro uživatelsky přívětivé zpracování dat je připraven grafický programovací software LabVIEW, ve kterém je připravena i spousta příkladů. Měřené veličiny se musí převést na signály s požadovanou vstupní amplitudou, jelikož karta myDAQ má omezený napěťový rozsah.

### 4.1 Zapojení systému

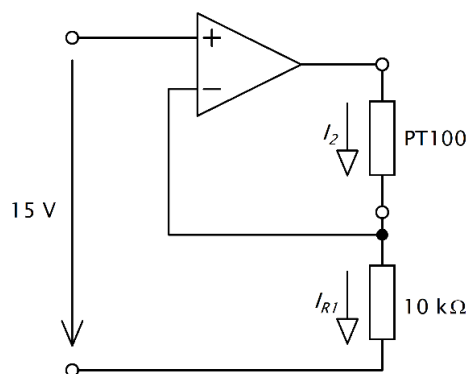
Pro napájení elektromotoru se využívá frekvenční měnič SEW EURODRIVE 1,5 kW MOVITRAC LTE, který z jednofázové napájecí sítě vytváří síť třífázovou o sdruženém napětí 230 V. Zvolený elektromotor 1LE1001-0DD32-2AA4 má jmenovitý výkon 0,25 kW. Do jedné z přívodních fází je vložen předřadný rezistor s hodnotou odporu 1  $\Omega$ , na kterém se měří úbytek napětí, ze kterého se vypočítá hodnota procházejícího proudu. Digitální pulzy z reflexní světelné závory se získávají pomocí jednoho z digitálních vstupů karty. Senzor teploty PT100 je zapojen čtyřvodičově.



Obrázek 18 – Principiální zapojení systému

#### 4.1.1 Napájení PT100

Teplotní senzor PT100 je nutné ve čtyřvodičovém zapojení napájet proudem. Analogové výstupy ze zvolené karty myDAQ nejsou schopny pracovat jako zdroj proudu. Je však možno využít stejnosměrný napěťový zdroj karty o velikosti 15 V. Za pomoci operačního zesilovače a rezistoru lze vytvořit převodník napětí → proud. K tomu je využito neinvertujícího zapojení operačního zesilovače.



Obrázek 19 – Neinvertující zapojení operačního zesilovače

Hodnota proudu protékajícího teplotním senzorem je dána vztahem

$$I_2 = I_{R1} = \frac{U_1}{R_1} = \frac{15}{10\,000} = 1,5 \text{ mA}, \quad (4.1)$$

kde  $U_1$  je stejnosměrné napájecí napětí (V),  $R_1$  je hodnota rezistoru ( $\Omega$ ) a  $I_2 = I_{R1}$  je proud procházející teplotním senzorem (A).

## 4.2 Příprava pro sběr dat

Na hřídeli elektromotoru se nachází černá lepicí páska. Ta je na třech místech přerušena z důvodu zvýšení počtu pulzů za jednu otáčku z optické závory. Díky tomu se dá docílit vyšší přesnosti měření. Digitální pulzy se čítají po dobu dvou sekund a následně se násobí konstantou 10 pro získání počtu otáček za minutu.

Proud procházející měřenou fází je získán pomocí měření úbytku napětí na rezistoru. Jelikož rezistor má hodnotu odporu  $1 \Omega$ , výsledná hodnota proudu odpovídá naměřené hodnotě úbytku napětí na předřadném rezistoru.

V programu LabView blok DAQ Assistant přepočítává hodnotu úbytku napětí na platinovém teplotním senzoru společně se zadaným protékajícím proudem z operačního zesilovače na velikost odporu senzoru. Hodnotu teploty z odporu teplotního senzoru se získají ze vztahu

$$\vartheta = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot A_{Pt}} = \frac{R - 100}{100 \cdot 3,91 \cdot 10^{-3}}, \quad (4.2)$$

kde  $R$  je hodnota odporu PT100 ( $\Omega$ ),  $R_0$  je odpor teplotního senzoru při  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\Omega$ ) a  $A_{Pt}$  je konstanta teplotního senzoru ( $\text{K}^{-1}$ ).

Zpracování a získání průběhů z akcelerometru se provádí prostřednictvím programu MATLAB.

### 4.2.1 Prostředí LabVIEW

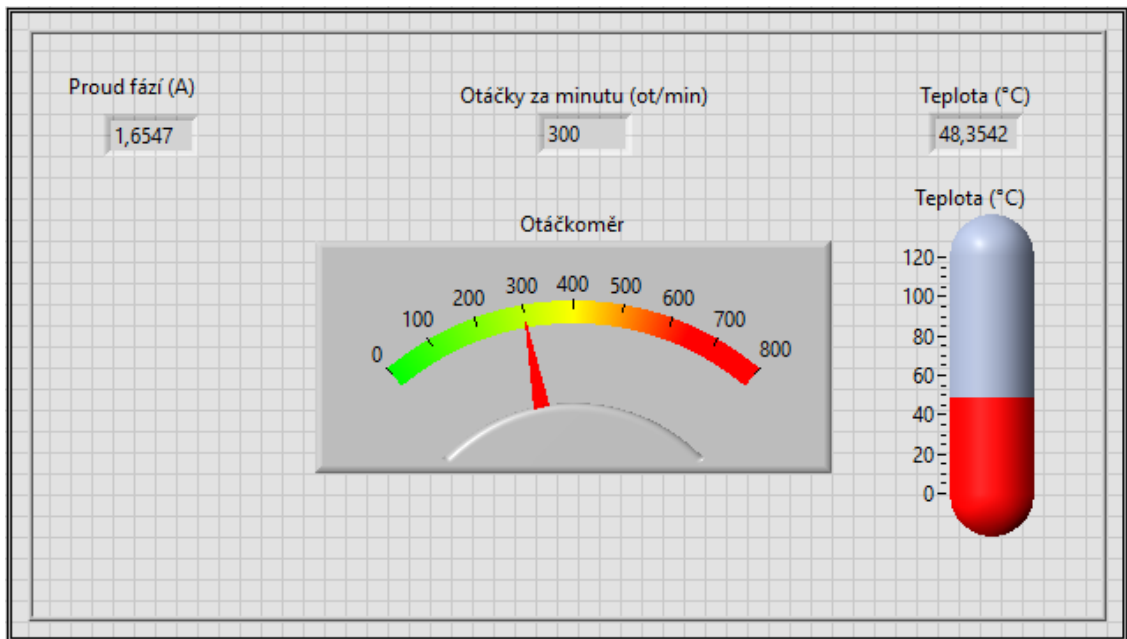
Pro sběr dat z optické závory, senzoru teploty a multimetru se využívá zařízení myDAQ. Následné vyhodnocení je zprostředkováno softwarem LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench). Jedná se o grafický programovací jazyk od firmy National Instruments.

Program se skládá ze dvou částí, z čelního panelu (Front Panel) a blokového diagramu (Block Diagram).

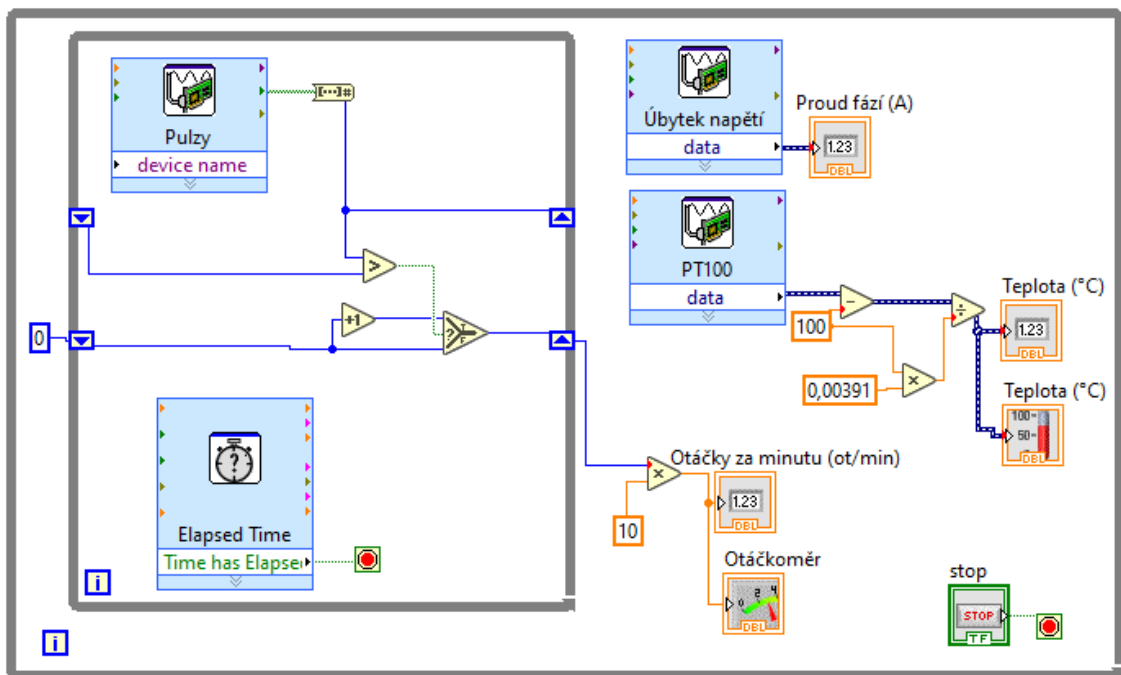
Čelní panel určuje chování a vzhled uživatelského rozhraní celé vytvořené aplikace. Nachází se zde dva typy prvků. Ovládací prvky, které operují se vstupy a indikační prvky, které operují s výstupy. Indikační prvky mohou zobrazovat naměřené výsledky v podobně grafů, číselných hodnot, indikátorů ručkových měřáků aj. Ovládací prvky slouží ke změně zadaných parametrů (tlačítka, ovladači, textovými hodnotami apod.). [5]

Blokový diagram reprezentuje grafické vyjádření kódu. Skládá se ze vzájemně propojených bloků. Jednotlivé bloky mohou reprezentovat sběr dat, zpracování dat a následné zobrazení dat na čelním panelu. Palety bloků se v obou případech vyvolají pravým kliknutím myši v prostředí programu. [5]

Pro vyvolání měřených dat se využívá bloku DAQ Assistant. Je to intuitivní průvodce, ve kterém uživatel vyhledá požadovanou měřenou veličinu z karty myDAQ, zadá případné vstupní parametry a na výstupu DAQ Assistant blok se objeví průběh snímané veličiny.



Obrázek 20 – Čelní panel



Obrázek 21 – Blokový diagram

## 4.2.2 MATLAB

Pro sběr a zpracování dat z akcelerometru se využívá softwaru MATLAB (matrix laboratory). Jedná se o skriptovací programovací jazyk.

Pro inicializaci měřicí karty a přidání akcelerometru ze vstupu karty číslo 0 se použije funkce *daq.createSession* a *addAnalogInputChannel*. Pomocí funkce *Rate* se nastaví počet vzorků za sekundu a příkaz *DurationInSeconds* určí dobu snímání. Citlivost akcelerometru se nastaví funkcí *Sensitivity*.

Ačkoliv měřené vibrace jsou veličinou spojitou, převádí se do diskrétního tvaru ve formě vektoru. Proměnná *data* vrací vektor naměřených dat z akcelerometrů a proměnná *time* vrací časovou osu měření.

```
1 - daq.getDevices
2 - %% přidání zařízení
3 -
4 - s = daq.createSession('ni');
5 - s.addAnalogInputChannel('cDAQ1Mod1', 0, 'Accelerometer');
6 -
7 - %% nastavení vzorkování + doba měření
8 - s.Rate = 2048;
9 - s.DurationInSeconds = 1;
10 -
11 - %% nastavení citlivosti akcelerometru
12 - s.Channels(1).Sensitivity = 0.098;
13 - %% sběr a vyhodnocení dat
14 - [data,time] = s.startForeground;
15 -
16 - s.release()
17 -
```

Obrázek 22 – Sběr dat

Jelikož v časové oblasti jsou jednotlivé jevy promíchány v jednom průběhu, provádí se diskrétní (rychlá) Fourierova transformace. Ta je numerickou aproximací Fourierovy transformace a převádí naměřené vzorky z oblasti časové do oblasti frekvenční, kde se nachází jednotlivé jevy od sebe odděleny. Diskrétní Fourierova transformace je reprezentovaná funkcí *fft*. Výstupem z transformace je řada komplexních čísel. Každé číslo vyjadřuje amplitudu a fázi jednotlivých naměřených vzorků. Diskrétní Fourierova transformace je dána vztahem

$$\hat{x}_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{N} k \cdot n}, \quad k \in \mathbb{Z} \cap [0, N - 1], \quad (4.3)$$

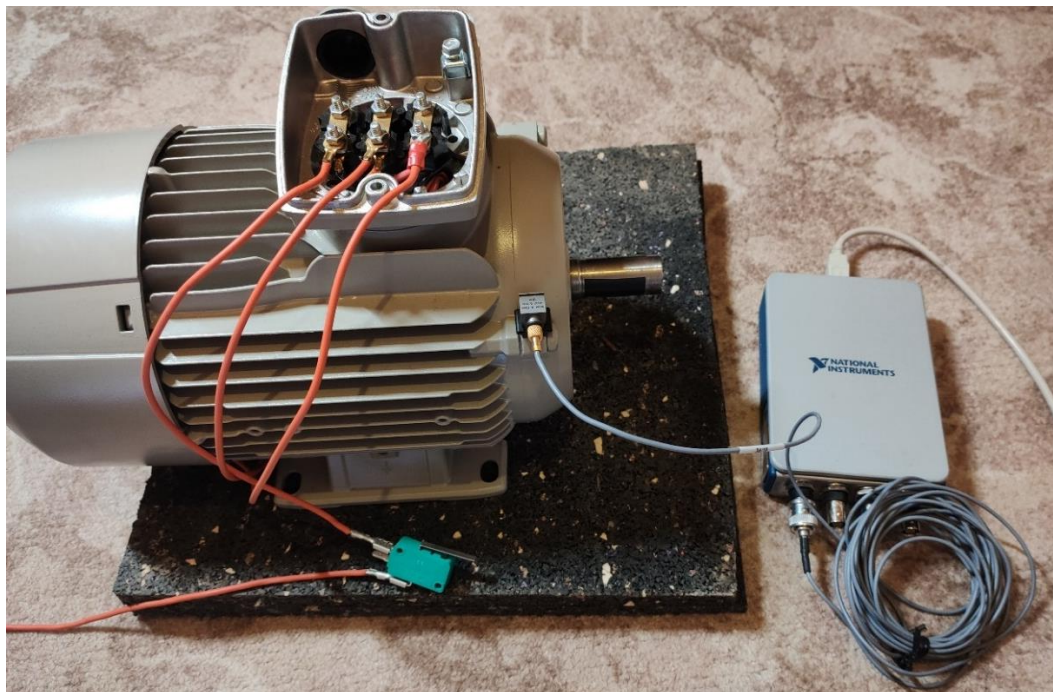
kde  $N$  je počet vzorků (-), a  $x_n$  je amplituda vstupní funkce v čase  $n$  (s).

## 4.3 Průběhy a vyhodnocení vibrodiagnostiky

Pro měření a diagnostiku vibrací se volí dva elektromotory. První elektromotor, již vyřazený z provozu, s označením 1LA7083-4AA12 o výkonu 0,75 kW a synchronních otáčkách 1500 ot/min se předpokládá, že má ložiska za hranou životnosti a defekty by se měly v diagnostice projevit. Druhý elektromotor, nový, s označením 1LE1001-0DD32-2AA4 o výkonu 0,25 kW a synchronních otáčkách 750 ot/min, se předpokládá, že je bez defektů.

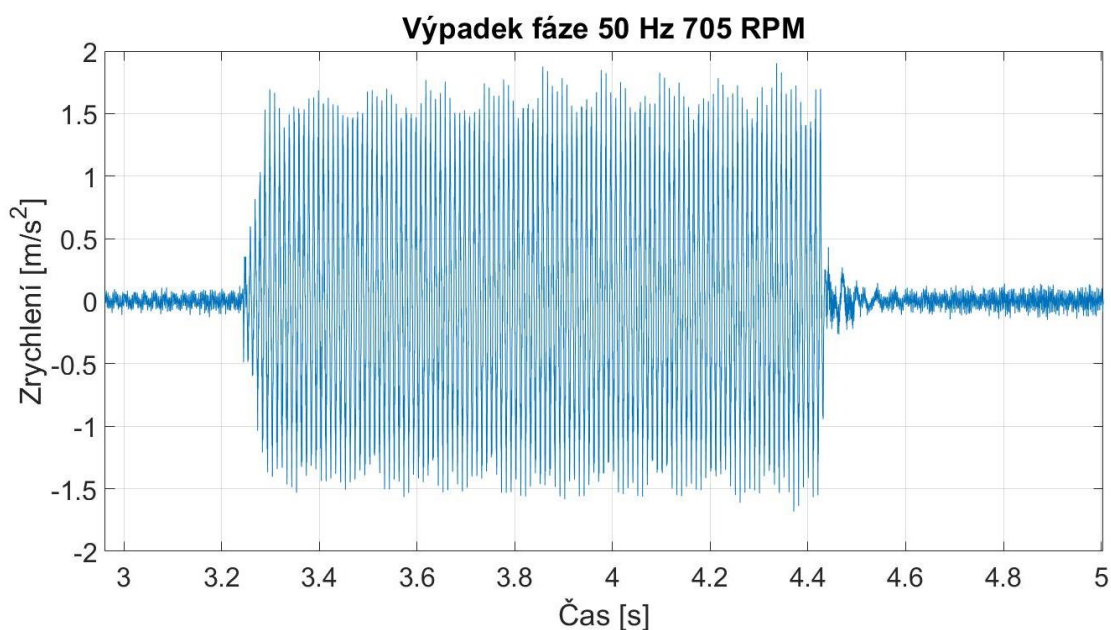


Zařízení se nachází na podložce, která slouží ke ztlumení vibrací, aby se eliminovaly náhodné rezonance. Poloha akcelerometru se zafixuje na štítu elektromotoru. Osa měření vibrací je vertikální, znázorněná šipkou na straně akcelerometru. Jelikož vibrace se šíří kostrou celého stroje, stačí použít jeden akcelerometr, který zaznamenává případné frekvence defektů obou ložisek.



Obrázek 23 – Měření vibrací

Na obrázku 24 je znázorněn průběh vibrací během simulovaného přerušení přívodní fáze mikrosplínačem. Nesymetrické točivé pole způsobí několikanásobné zvýšení vibrací celého stroje. V tomto případě by bylo destruktivní z dlouhodobého hlediska proudové zatížení motoru spíše než porucha vlivem zvýšených vibrací. Při kontinuálním měření vibrací stroje by zvýšené vibrace mohly být dostatečným indikátorem poruchy zařízení.

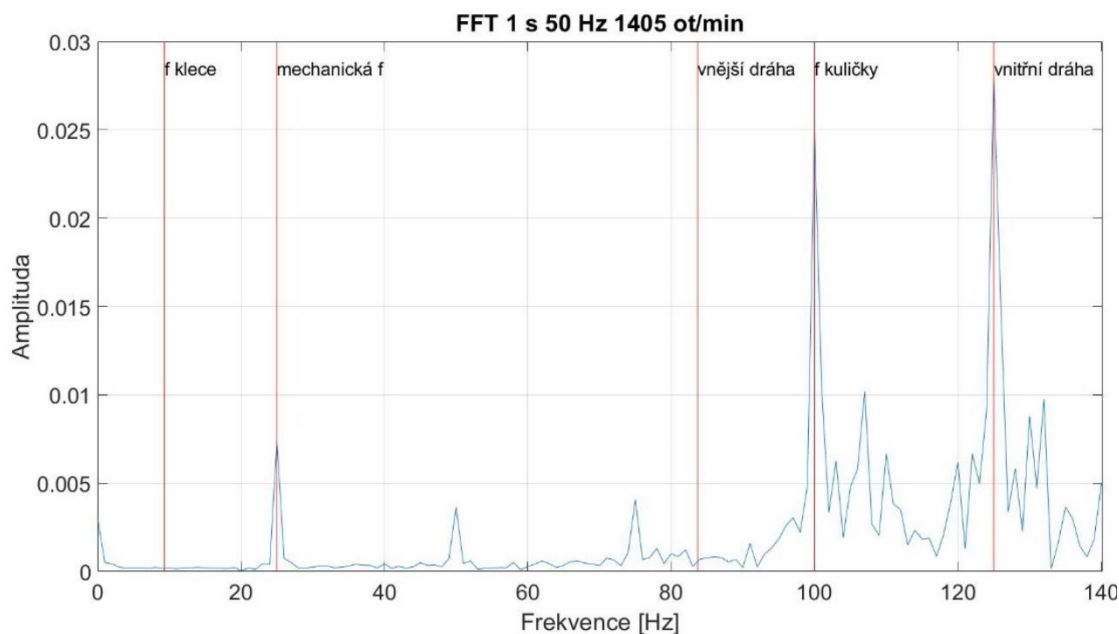


Obrázek 24 – Simulace výpadku napájecí fáze motoru

V případě vyřazeného motoru 1LA7083-4AA12 lze z Fourierovy transformace na obrázku 25 vyčíst řada defektů. Ložiska jsou za hranou životnosti. Jejich vnitřní dráha je značně poškozena a kuličky ložiska jsou v havarijním stavu. Ze subjektivního vnímání ložiska vydávají zvýšený hluk.

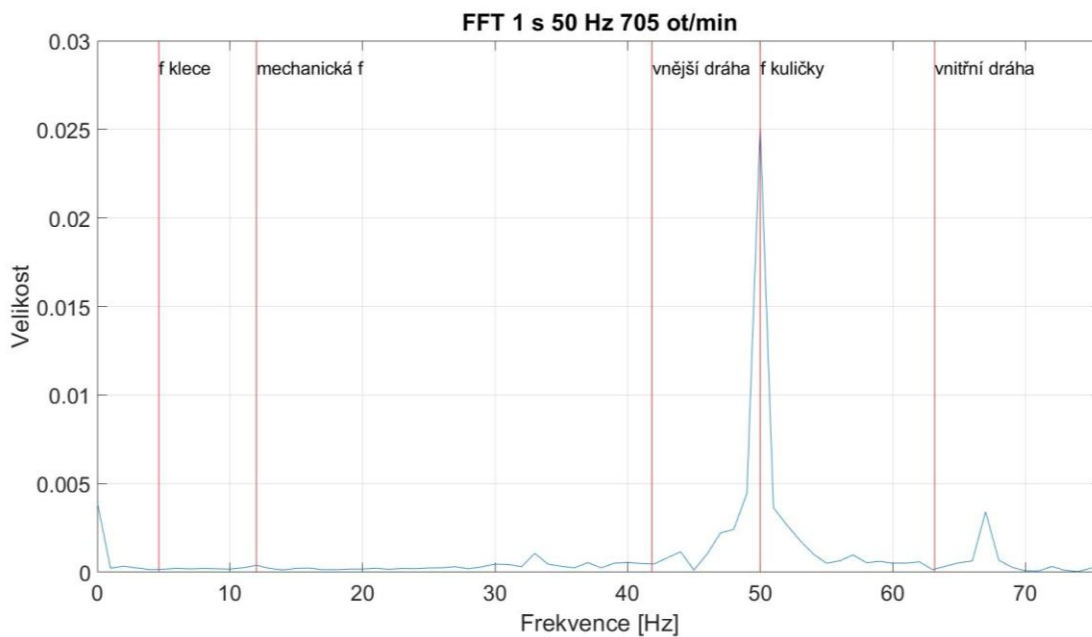
Jestliže se bude pokračovat v provozování stroje bez výměny ložisek, tak je vysoce pravděpodobné, že dojde k mechanické poruše. V lepším případě se ložiska zadřou, stroj přestane běžet, ochrana motoru vybaví a odpojí zařízení od napájení. V případě nesprávného dimenzování ochrany motoru se stroj zadře a vinutím bude protékat zkratový proud do doby, než dojde k tepelné destrukci izolace vinutí. Dalším možným scénářem je destrukce ložiska, které se může roztrít na několik částí. Tyto části ložiska mohou zasáhnout a přerušit vinutí stroje.

Při pravidelném provádění vibrodiagnostiky se mohou ušetřit značné náklady spojené s poruchami stroje a následnými opravami.



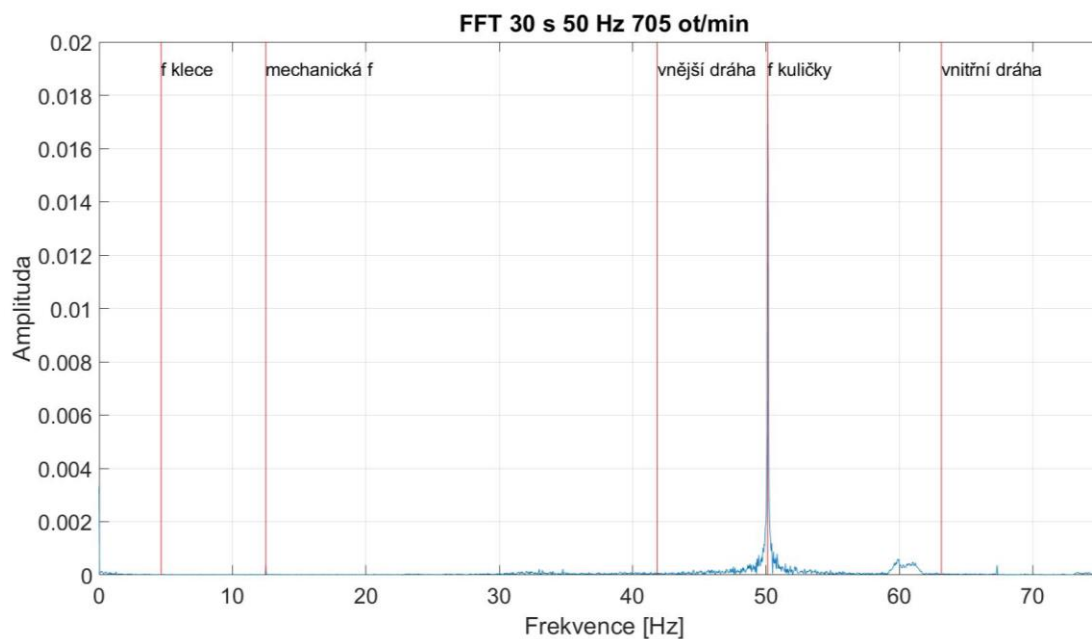
Obrázek 25 – FFT 1 s 50 Hz 1405 ot/min

Ačkoliv se nový motor s označením 1LE1001-0DD32-2AA4 předpokládá být bez závady, tak z vibrodiagnostiky zobrazené na obrázku 26 vyplývá, že ložiska zařízení jsou pravděpodobně již z výroby vadné. Optimálním řešením je v tomto případě ložiska vyměnit, než nastane havarijní stav a zařízení nebude schopné provozu.



Obrázek 26 – FFT 1 s 50 Hz 705 ot/min

Měření se prováděla po dobu jedné sekundy, deseti sekund a třiceti sekund. Výsledky Fourierovy transformace zobrazují pro rozdílné doby snímání vibrací shodné vady, v případě nového elektromotoru 1LE1001-0DD32-2AA4 se znovu projevuje defekt kuliček ložiska znázorněn na obrázku 27.



Obrázek 27 – FFT 30 s 50 Hz 705 ot/min

## 5 Porovnání motorů z ekonomického hlediska

Elektromotory mají podle použitých materiálů a rozdílné technologie různé účinnosti. Účinnější motory mívají náročnější proces výroby, obsahují větší množství dražších materiálů a s tím jsou spojené i vyšší náklady na výrobu ovlivňující výslednou prodejní cenu. Elektromotory se dle požadavků použité technologie provozují po různé dlouhou dobu. Zatímco v některých případech, například v dopravníkových pásech či ventilátorech, mohou být v provozu i 24 hodin denně, jindy jsou využity jen krátkodobě. Proto je vhodné zvážit, zdali zvolit motor dražší, s vyšší účinností, nebo vychází z ekonomického pohledu lépe motor levnější, s účinností nižší.

Aby bylo možné zvolit ekonomicky optimální variantu, je vhodné použít jednu z metod zhodnocení investic.

### 5.1 Čistá současná hodnota NPV (Net Present Value)

Pro porovnání přibližně stejně velkých investic s podobným rizikem a stejnou dobou životnosti je vhodné počítat se současnou hodnotou peněz. Čistá současná hodnota NPV je součtem diskontovaných hotovostních toků. Jelikož jsou investice vzájemně se vylučující, vybírá se varianta s minimální čistou současnou hodnotou. Jedná se o tzv. nákladové NPV, které říká, kolik finančních prostředků bude investice za určenou dobu životnosti stát. Získá ze vztahu

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1+r)^{-t}, \quad (5.1)$$

kde  $CF_t$  je hotovostní tok (cash flow) daného roku (Kč),  $T$  očekávaná doba životnosti (let) a  $r$  je diskont (%). S kriteriální podmínkou

$$NPV = \min. \quad (5.2)$$

Další způsob získání čisté současné hodnoty NPV je pomocí využití zásobitele

$$NPV = N_i + A \cdot Z, \quad (5.3)$$

kde  $N_i$  jsou investiční náklady (Kč),  $A$  jsou pravidelné konstantní náklady na variabilní složku elektrické energie (Kč) a  $Z$  je zásobitel, který je získán ze vztahu

$$Z = \frac{(1+r)^T - 1}{r(1+r)^T}, \quad (5.4)$$

kde  $r$  je diskont (%) a  $T$  je časová doba porovnání (let).

V případě dodatečných nákladů v roce  $x$  se vztah změní na tvar

$$NPV = N_i + A \cdot Z + \frac{1}{(1+r)^T} \cdot N_x, \quad (5.5)$$

kde  $T$  je počet let od investice, kdy počáteční investiční náklady vznikly (let) a  $N_x$  jsou náklady v roce  $x$  (Kč).

## 5.2 Roční hotovostní tok RCF

Ke zjištění, kolik se průměrně ročně zaplatí za danou variantu, slouží roční hotovostní tok RCF. Ten rozdělí NPV do jednotlivých let a zohlední časovou cenu peněz. Získá se ze vztahu

$$RCF = a_{Tz} \cdot NPV, \quad (5.6)$$

kde  $NPV$  je čistá současná hodnota investice (Kč) a  $a_{Tz}$  je poměrná anuita za dobu životnosti (-) získaná vztahem

$$a_{Tz} = \frac{(1+r)^{Tz} \cdot r}{(1+r)^{Tz} - 1}, \quad (5.7)$$

kde  $Tz$  je doba životnosti investice (let) a  $r$  je diskont (%).

## 5.3 Srovnání motorů dle NPV a RCF

Pro porovnání se vybrali čtyřpólové elektromotory SIEMENS. První o výkonu 0,55 kW, na které se omezení účinností nevztahuje. Dále motory o výkonech 4 kW a 15 kW, na které se nároky na minimální účinnost již vztahují. Pro zjednodušení se berou v potaz předpoklady: doba životnosti motorů je 10 let, motor je symetricky zatížen jmenovitou zátěží, počítá se s 251 pracovními dny, diskont je 3 %, meziroční nárůst cen elektrické energie se uvažuje 2,5 % a výměna ložisek stroje se provádí po 40 000 hodinách provozu. Pro porovnání se počítá se třemi různými průměrnými dobami provozu, 1 hodina, 8 hodin a 24 hodin denně po dobu 251 pracovních dní. Veškeré uvažované ceny jsou bez DPH.

Příkon motoru je dán vztahem

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{sdr} \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (5.8)$$

kde  $U_{sdr}$  je hodnota sdruženého napětí (V),  $I$  proud (A) a  $\cos \varphi$  účinník (-).

### 5.3.1 Čtyřpólový motor SIEMENS, 0,55 kW

Motor s výkonem 0,55 kW není zahrnut v nařízení 640/2009. Není nutné se zabývat motory s vyšší účinností a mohou se zahrnout i varianty s účinností IE1 a IE2. Firma SIEMENS vyrábí v tomto případě motory do účinnosti IE3. Jestliže se uvažuje jen občasné použití elektromotoru (v průměru 1 hodinu denně v pracovních dnech = 251 hodin ročně s životností 10 let, diskontem 3 % a variabilní cenou za kWh 3 Kč, která roste ročně o 2,5 %), nejlépe vychází podle tabulky 1 elektromotor s účinností IE2. Pro uvažovaný jednosměrný provoz s průměrem 8 hodin denně či třisměrný provoz s průměrnými 24 hodinami denně se vyplatí si připlatit za motor dražší s vysokou účinností IE3.

Motor	pořizovací cena (Kč)	NPV pro 1 h (Kč)	RCF pro 1 h (Kč)	NPV pro 8 h (Kč)	RCF pro 8 h (Kč)	NPV pro 24 h (Kč)	RCF pro 24 h (Kč)
1LE1002- ..., IE1	2 289	8 068	946	48 518	5 688	141 301	16 565
1LE1001- ..., IE2	2 697	7 847	920	43 895	5 146	126 616	14 843
1LE1003- ..., IE3	3 219	8 211	963	43 157	5 059	123 359	14 461

Tabulka 1 – Srovnání motorů SIEMENS 0,55 kW

### 5.3.2 Čtyřpólový motor SIEMENS, 4 kW

V případě elektromotoru o výkonu 4 kW se minimální účinnosti brát v potaz musí. Z tabulky 2 vychází NPV pro občasně použití 1 hodinu denně motoru s vysokou účinností IE3 téměř shodné s motorem se zvýšenou účinností IE2. Při zahrnutí ceny za frekvenční měnič pro splnění požadavku se motor s účinností IE2 projeví jako nejméně výhodný a optimální zůstává zvolit motor s vysokou účinností IE3. Při vyšším využití motoru je již pro požadované parametry vhodné použít motor s prémiovou účinností IE4.

Motor	pořizovací cena (Kč)	NPV pro 1 h (Kč)	RCF pro 1 h (Kč)	NPV pro 8 h (Kč)	RCF pro 8 h (Kč)	NPV pro 24 h (Kč)	RCF pro 24 h (Kč)
1LE1001-..., IE2	7 027	40 766	4 779	276 940	32 466	817 253	95 807
1LE1003-..., IE3	7 854	40 760	4 778	271 102	31 781	798 087	93 560
1LE1004-..., IE4	9 559	41 652	4 883	266 305	31 219	780 286	91 473

Tabulka 2 – Srovnání motorů SIEMENS 4 kW

### 5.3.3 Čtyřpólový motor SIEMENS, 15 kW

Pro motor s výkonem 15 kW je z tabulky 3 patrné, že optimální varianta pro použití 1 hodinu denně je motor s vysokou účinností IE3. V případě zvýšené účinnosti IE2 je sice nákladové NPV nižší, ale při započtení pořizovacích nákladů za frekvenční měnič je tato možnost zavrhnuta. Pro vyšší využití motoru je optimální použít motor s prémiovou účinností IE4.

Motor	pořizovací cena (Kč)	NPV pro 1 h (Kč)	RCF pro 1 h (Kč)	NPV pro 8 h (Kč)	RCF pro 8 h (Kč)	NPV pro 24 h (Kč)	RCF pro 24 h (Kč)
1LE1001-..., IE2	18 757	139 653	16 372	985 924	115 580	2 921 478	342 486
1LE1003-..., IE3	21 229	139 941	16 405	970 922	113 822	2 871 528	336 631
1LE1004-..., IE4	25 681	143 529	16 826	968 466	113 534	2 855 255	334 723

Tabulka 3 – Srovnání motorů SIEMENS 15 kW

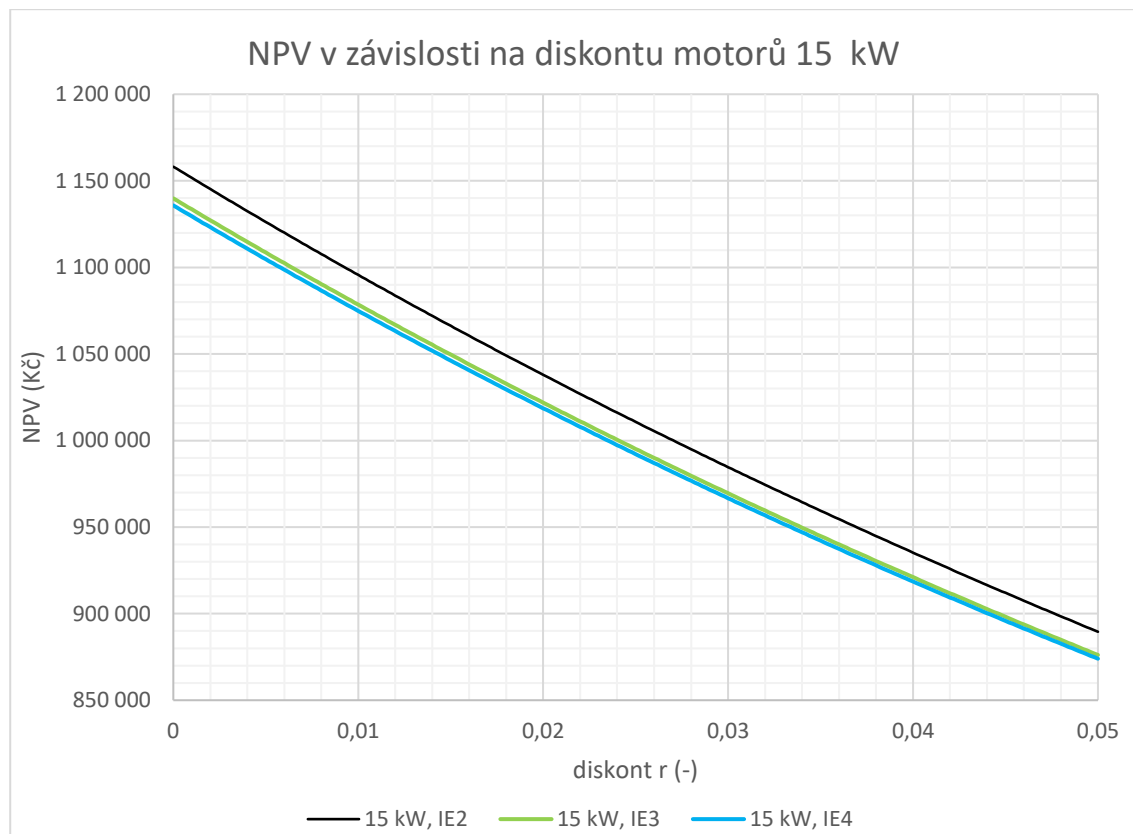


## 5.4 Citlivostní analýza

Jelikož do výpočtů vstupuje řada proměnných, které nelze určit se stoprocentní přesností, je vhodné provést jednoparametrické citlivostní analýzy na požadované proměnné. Ty zobrazí průběhy při různých hodnotách vstupních veličin a mohou vnést další pohledy na problematiku výběru optimální varianty.

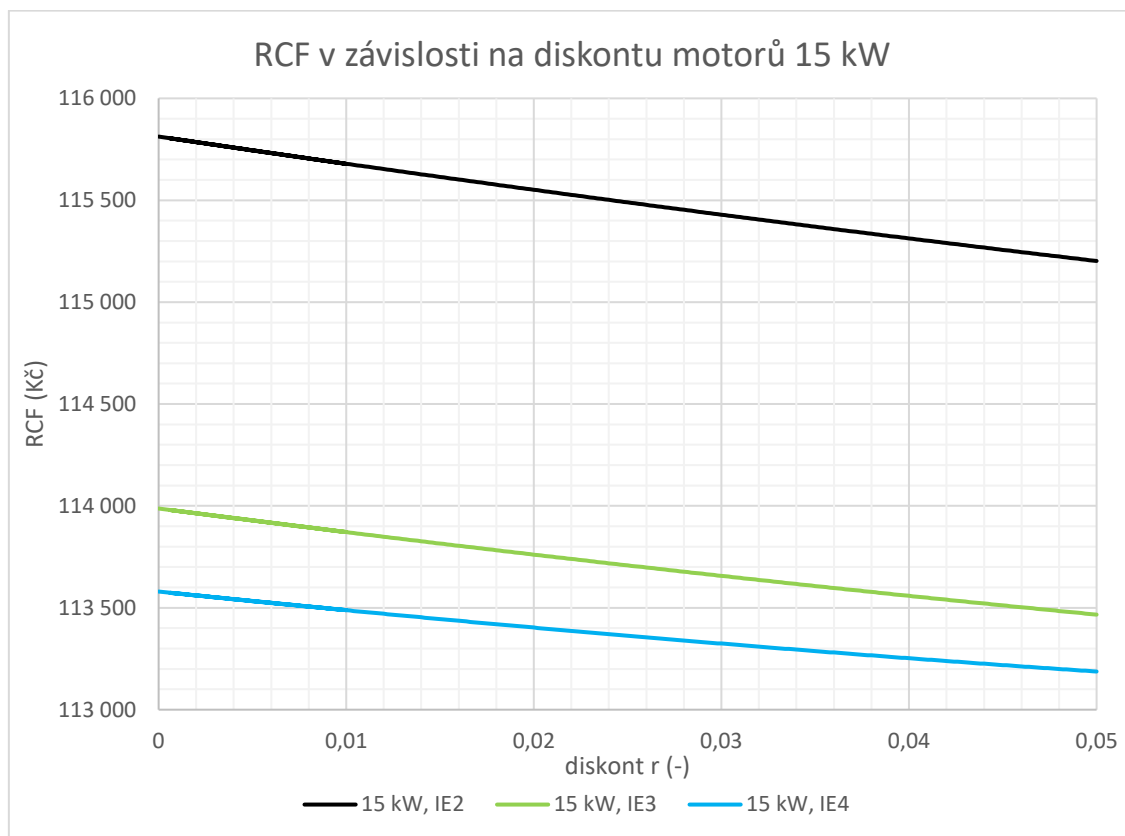
### 5.4.1 NPV a RCF v závislosti na diskontu

Jelikož se jedná o nákladové NPV, tak se předpokládá, že hodnota diskontu by měla pokrýt alespoň inflaci přibližně 2 % a přírůžku 1 %. Výsledná hodnota diskontu by se mohla pohybovat kolem 3 %. V případě uvažování průměrného chodu motoru 8 hodin denně po dobu 251 dní v roce s variabilní cenou elektrické energie 3 Kč/kWh rostoucí ročně o 2,5 %, životností 10 let a diskontem od 0 % do 5 % klesají hodnoty NPV hyperbolicky. Kritériem by však v zadaném rozmezí volilo pokaždé variantu elektromotoru s velmi vysokou účinností IE4.



Obrázek 28 –  $NPV=f(r)$

V případě RCF je tendence ročního hotovostního toku v závislosti na diskontu také klesající. Jako optimální řešení pro zadané parametry se jeví z obrázku 29 zvolit elektromotor s účinností IE4.



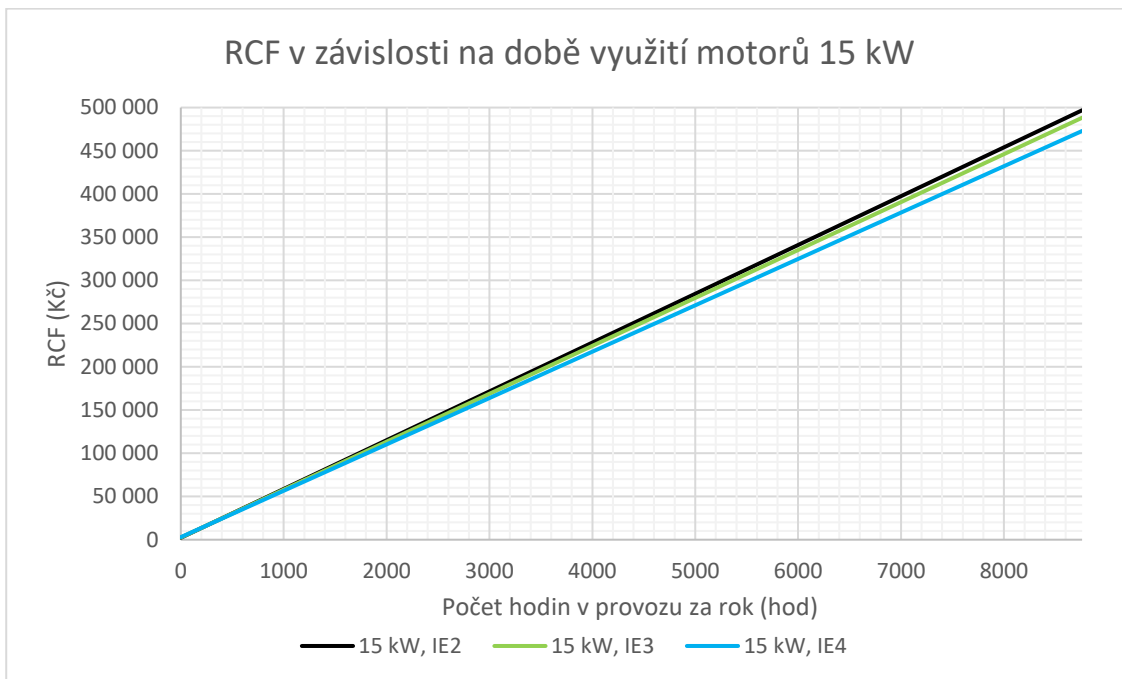
Obrázek 29 –  $RCF=f(r)$

#### 5.4.2 RCF v závislosti na době využití motoru

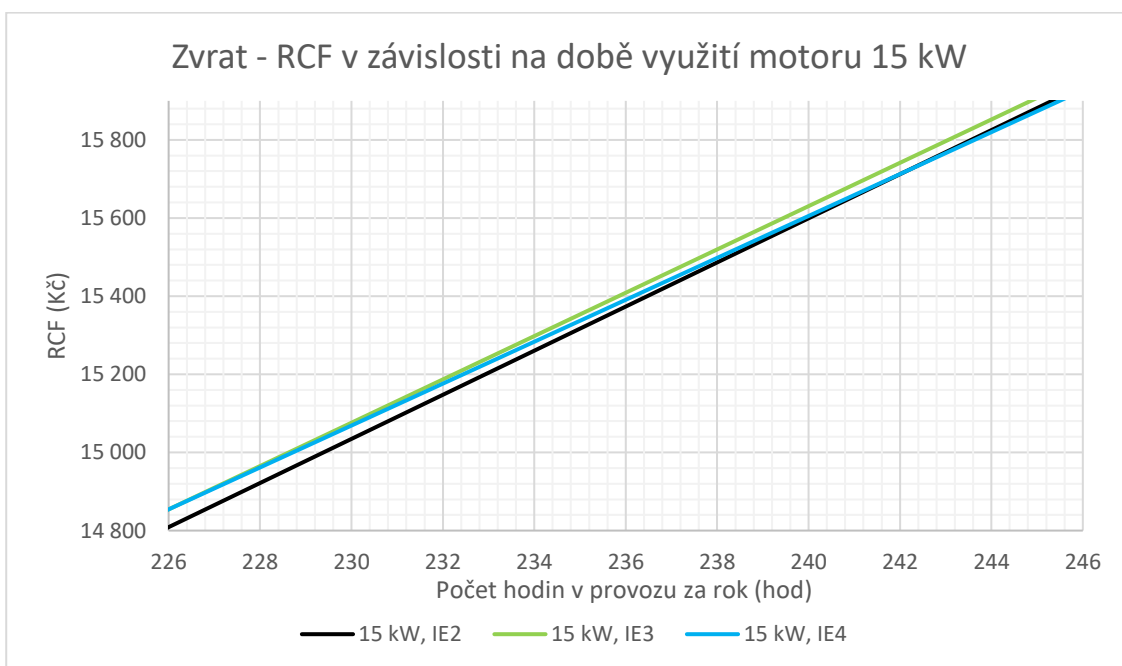
Dalším z faktorů, který silně ovlivňuje mezi výběrem investic je doba využití elektromotoru. Pro předpokládanou dobu životnosti 10 let, diskont 3 % a variabilní cenu elektrické energie 3 Kč/kWh s konstantním růstem o 2,5 % ročně lze z obrázku 31 vyčíst, že elektromotor s účinností IE4 je vhodnější volbou před motorem s účinností IE3 po průměrných 226 hodinách ročního využití stroje. V porovnání se strojem s účinností IE2 se zařízení s účinností IE4 stává optimální volbou při průměrném ročním provozu alespoň 241 hodin.

Vyšší hodnota RCF u motorů s vyšší účinností je způsobena vlivem rozdílných pořizovacích nákladů. Tyto náklady mají při zvyšujícím se využití elektromotoru čím dál nižší vliv na výslednou velikost RCF.





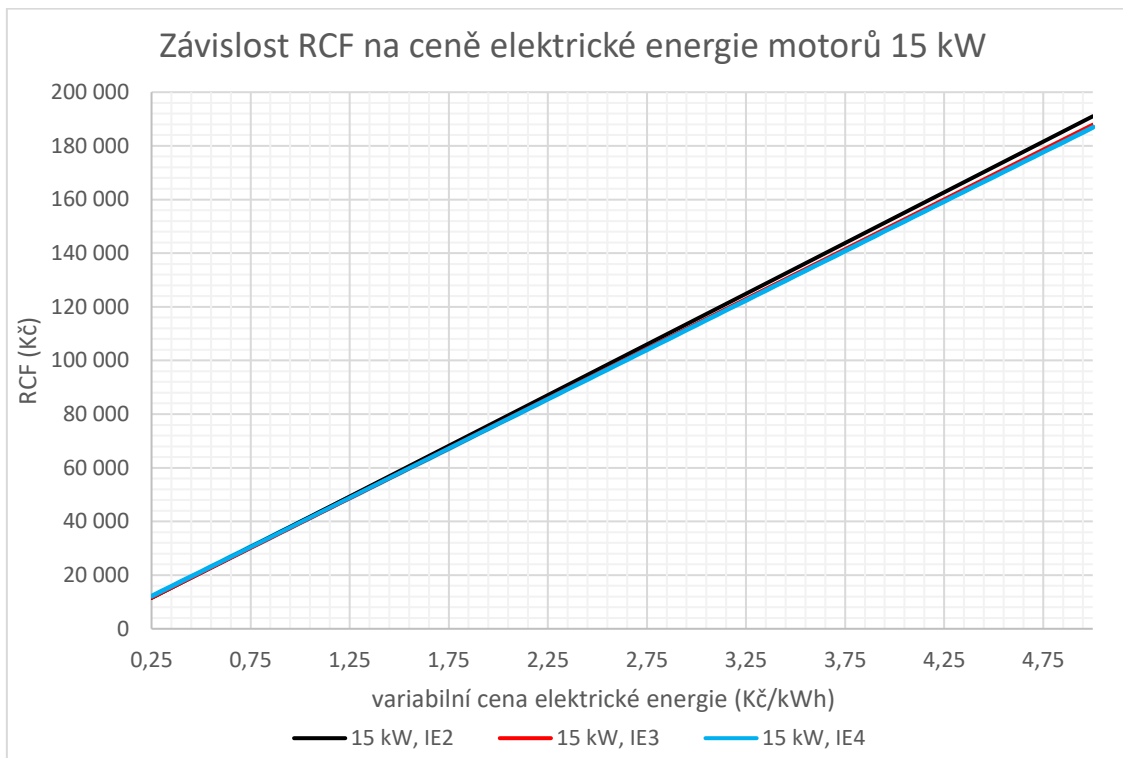
Obrázek 30 – RCF=f(doby provozu)



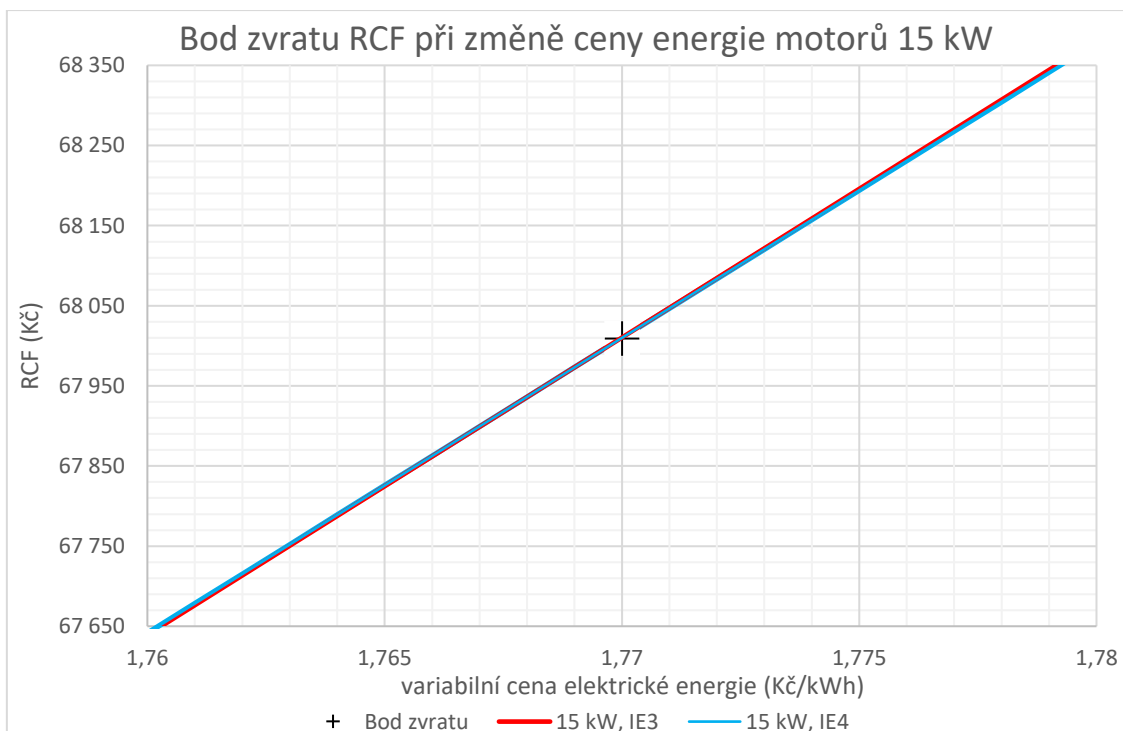
Obrázek 31 – Bod zvratu RCF=f(doby provozu)

### 5.4.3 RCF v závislosti na variabilní ceně elektrické energie

Dalším parametrem, který může ovlivnit rozhodování, je cena za elektrickou energii. Ta ovlivňuje RCF lineárně. Jelikož se předpokládá využití elektromotorů ve velkém výrobním závodě, stálá složka elektřiny se pro zjednodušení výpočtů zanedbává a počítá se jen s variabilní složkou elektrické energie. Pro předpokládanou dobu životnosti 10 let, diskont 3 %, variabilní cenu elektrické energie 3 Kč/kWh s konstantním růstem o 2,5 % a s průměrným využitím motoru 8 hodin denně lze z průběhu na obrázku 32 vyčíst, že se zvyšující se cenou elektrické energie roste RCF motoru o účinnosti IE2 s nejstrmější směrnici, zatímco motorům s vyšší účinností se RCF mění se směrnici mírnější.



Obrázek 32 – RCF=f(ceny energie)



Obrázek 33 – Bod zvratu RCF=f(ceny energie)

Z obrázku 33 vyplývá, že při ceně 1,77 Kč/kWh za variabilní složku elektrické energie se RCF varianty s účinností IE3 a IE4 střetávají. Při ceně vyšší je při zadaných předpokladech dle obrázku 32 vždy vhodné použít motor s velmi vysokou účinností IE4.

## 6 Závěr

V úvodní části práce se pojednává o možných příčinách poruchových stavů asynchronních elektromotorů, o jejich projevech a následcích. Následuje nastínění legislativy ohledně účinností v zemích Evropské unie.

Další část se zabývá rozбором principu měření a získávání hodnot procházejícího proudu, popisuje se snímání a zpracování digitálních impulzů z optické závory a zobrazuje se jeden ze způsobů napájení čtyřvodičového odporového senzoru PT100 pomocí operačního zesilovače. Následuje ukázka a popis blokového programu pro zpracování signálů z čidel pomocí softwaru LabVIEW.

V rámci práce bylo provedeno v domácích podmínkách praktické měření na asynchronním motoru, snímání otáček, měření proudu procházejícího jednou fází, měření teploty pomocí platinového teplotního senzoru, měření vibrací a simulace absence přívodní fáze. Naměřené veličiny se následně zpracovali pomocí softwaru LabVIEW a MATLAB.

V práci bylo také popsáno zohlednění výběru asynchronního elektromotoru z ekonomického hlediska. K tomu bylo využita metoda zhodnocení investic čisté současné hodnoty NPV a ročního ekvivalentního hotovostního toku RCF. Srovnávají se zde elektromotory SIEMENS se třemi různými jmenovitými výkony pro odlišné průměrné doby provozu.

Následují jednoparametrické citlivostní analýzy, které zobrazují roční ekvivalentní hotovostní tok v závislostech na řadě vstupních proměnných, které mohou rozhodování o optimální variantě účinnosti elektromotoru ovlivnit.

## Seznam zdrojů:

- [1] *SERVISNÍ MANUÁL PRO MOTORY: Všeobecné servisní informace pro standardní nízkonapěťové asynchronní motory s rotorem nakrátko. V1.4.* Siemensova 1, 155 00 Praha 13 - Stodůlky, 2016/09.
- [2] *Motory s velmi vysokou účinností – budoucnost elektropohonů: Nízkonapěťové asynchronní motory podle norem IEC pro účinnost a pro třídy účinnosti IE.* Siemensova 1, 155 00 Praha 13 - Stodůlky, 2015.
- [3] *ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01500-9.*
- [4] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické. *Automatizace.HW.cz - Elektronika v automatizaci* [online]. 2007, 14.1. 2007 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [5] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW.* Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 9788073002459.
- [6] OLEJÁROVÁ, Štefánia, Juraj RUŽBARSKÝ a Tibor KRENICKÝ. *Vibrodiagnostic Analysis.* SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Cham: Springer, 2019. ISBN 978-3-030-01736-1.

## Seznam příloh:

- [1] Příloha č. 1: Ekonomický model – citlivostní analýzy motorů
- [2] Příloha č. 2: Zdrojový kód programu pro sběr dat vibrodiagnostiky
- [3] Příloha č. 3: Zdrojový kód programu pro vyhodnocení dat vibrodiagnostiky
- [4] Příloha č. 4: Zpracování naměřených veličin elektromotoru