



Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

NÁVRH A REALIZACE ONLINE DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU

Autor práce: Bc. Jan Leffler

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.

Konzultant práce: Jaroslav Bořík

Plzeň 2020

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan LEFFLER**  
Osobní číslo: **E17N0042P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Téma práce: **Návrh a realizace online diagnostického systému**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Zásady pro vypracování

1. Uveďte používané materiály v jednotlivých konstrukčních celcích elektrických strojů.
2. Navrhněte strukturu a komponenty pro online diagnostický systém.
3. Zvolte vhodná čidla pro získání diagnostických signálů.
4. Sestavte a odzkoušejte vybrané funkční celky tohoto systému.
5. Zhodnoťte možné akce s naměřenými daty – přenos, záznam a zpracování.



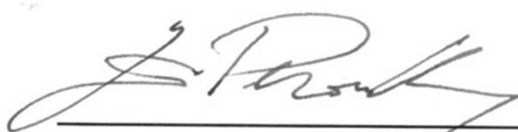
Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Mentlík V., Trnka P., okol. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN, Praha 2011.
2. Mentlík a kol., Diagnostika elektrických zařízení, BEN, Praha 2008.
3. Tavner P., Ran L, et al., Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, IET, ISBN 978-0-86341-739-9, 2008.
4. James R.E., Su Q., Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment, IET, ISBN 978-0-86341-737-5, 2008.
5. Internetové zdroje a katalogy výrobců.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



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



**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

# Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou návrhu a realizace online diagnostického systému pro monitorování diagnostických signálů. Teoretická část byla vypracována dle odborné literatury. Nejprve jsou popsány materiály pro funkční a konstrukční účely elektrických strojů a jejich vlastnosti. Dále jsou zde uvedeny různé přístupy k diagnostice a motivace k využití diagnostického procesu. Poté jsou analyzovány degradační procesy a jejich důsledky.

V části praktické se již práce zaměřuje na návrh, realizaci a testování online diagnostického systému. Fáze návrhu zahrnuje výběr týkající se senzorů a PLC modulů, zatímco fáze realizace popisuje stavbu a testování prvního funkčního systému. Poté byl navržen první soupis a rozvržení dalších nezbytných komponent pro systém aplikovatelný ve skutečném provozu v průmyslových podmínkách. V závěru práce jsou uvedeny některé možné způsoby vyhodnocování získaných dat ze senzorů.

## Klíčová slova

materiály v elektrických strojích, diagnostika, deteriorace, údržba založená na stavu zařízení, PLC, senzory, měření

# Abstract

This submitted diploma thesis deals with the problematics of the design and realization of an online diagnostic system for diagnostic signals monitoring. The theoretical part was elaborated in accordance with technical literature. First, materials for functional and construction purposes of electrical machines and their properties are described. Next, different approaches to the diagnostics and motivation for using of a diagnostic process are introduced. Then degradation processes and their effects are analyzed.

The practical part of the thesis is focused on the design, realization and testing of an online diagnostic system. The design phase includes the selection of sensors and PLC modules, while the realization phase describes assembly and testing of the first functional system. Afterwards, the first inventory and layout of further necessary components for the system applicable in real service under industrial conditions are proposed. In the end of the thesis several approaches to the evaluation of data obtained from sensors are given.

## Keywords

materials used in electrical machines, diagnostics, deterioration, condition based maintenance, PLC, sensors, measurement

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že při řešení této diplomové práce byl použit výhradně legální software.

.....  
podpis

V Plzni dne 20. května 2020

Bc. Jan Leffler

## Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval společnosti ABB za poskytnutí materiální podpory při realizaci tohoto projektu, zapůjčení PLC systému a poskytnutí odborného konzultanta pro tuto diplomovou práci. Rovněž děkuji Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni za zapůjčení komponent potřebných pro splnění některých dílčích úkolů.

Jmenovitě bych dále rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za stálou motivaci, metodické vedení práce a sdílení poznatků z oblasti materiálů a diagnostiky v elektrotechnice. Stejnou měrou bych rád poděkoval i konzultantovi této diplomové práce Jaroslavu Boříkovi za jeho odbornou pomoc a užitečné rady.

Závěrem děkuji kolegům z Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni, kolegům ve společnosti ABB, rodině, přátelům a své snoubence za zájem, podporu, spolupráci a trpělivost při mém studiu.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>16</b>
<b>1 Materiály používané v elektrických strojích</b>	<b>17</b>
1.1 Elektricky vodivé materiály . . . . .	17
1.2 Magnetické materiály . . . . .	23
1.2.1 Magneticky měkké materiály . . . . .	27
1.2.2 Magneticky tvrdé materiály . . . . .	28
1.3 Elektroizolační materiály . . . . .	30
1.3.1 Plynné elektroizolační materiály . . . . .	34
1.3.2 Kapalně elektroizolační materiály . . . . .	34
1.3.3 Pevně elektroizolační materiály . . . . .	34
1.3.4 Teplotní třídy EIS . . . . .	35
1.3.5 EIS v elektrických strojích . . . . .	35
1.4 Konstrukční materiály . . . . .	37
1.4.1 Kovové konstrukční materiály . . . . .	39
1.4.2 Alternativní konstrukční materiály . . . . .	41
1.5 Chladicí kapaliny, maziva a lepidla . . . . .	42
1.5.1 Chladicí kapaliny . . . . .	43
1.5.2 Maziva . . . . .	43
1.5.3 Lepidla . . . . .	45
1.6 Materiálová kompatibilita . . . . .	45
<b>2 Elektrotechnologická diagnostika</b>	<b>47</b>
2.1 Diagnostický proces . . . . .	47
2.2 Deteriorace a její následky . . . . .	47
2.3 Základní přístupy diagnostického procesu . . . . .	48
2.3.1 Fenomenologický a strukturální přístup . . . . .	48
2.3.2 Destruktivní a nedestruktivní přístup . . . . .	48
2.3.3 Online a offline diagnostika . . . . .	49
2.4 Údržba CBM a TBM . . . . .	50
2.5 Prostředky diagnostického procesu . . . . .	51
2.5.1 Instrumentální vybavení . . . . .	51
2.5.2 Model objektu . . . . .	51
2.5.3 Znalosti obsluhy . . . . .	52
2.5.4 Postup . . . . .	52
2.5.5 Automatizace diagnostického procesu . . . . .	52



2.6	Motivace k nasazení online diagnostického systému . . . . .	53
2.6.1	Sledování stavu v reálném čase . . . . .	54
2.6.2	Indikace zahájení údržby . . . . .	54
2.6.3	Finanční ztráty způsobené poruchami . . . . .	54
2.6.4	Možnost implementace do expertního systému . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Působící degradační mechanismy</b>	<b>56</b>
3.1	Stárnutí . . . . .	56
3.1.1	Tepelné stárnutí . . . . .	56
3.1.2	Elektrické stárnutí . . . . .	57
3.1.3	Mechanické stárnutí . . . . .	60
3.1.4	Stárnutí vlivem dalších provozních vlivů . . . . .	63
3.1.5	Synergie stárnutí . . . . .	64
3.2	Výskyt poruch elektrických strojů . . . . .	65
3.2.1	Elektrické stroje točivé . . . . .	65
3.2.2	Elektrické stroje netočivé . . . . .	67
3.2.3	Závěr analýzy . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Návrh systému</b>	<b>70</b>
4.1	Koncepce systému . . . . .	70
4.2	Volba senzorů pro získávání diagnostických signálů . . . . .	71
4.2.1	Měření teploty . . . . .	72
4.2.2	Měření elektrického proudu . . . . .	72
4.2.3	Měření relativní vlhkosti vzduchu . . . . .	73
4.2.4	Snímání pohybu . . . . .	74
4.2.5	Měření vibrací . . . . .	75
4.2.6	Měření částečných výbojů . . . . .	76
4.3	PLC systém . . . . .	78
4.3.1	CPU . . . . .	81
4.3.2	I/O karty . . . . .	82
4.3.3	Komunikační moduly . . . . .	83
4.3.4	Další moduly . . . . .	83
4.3.5	Vývojové prostředí . . . . .	84
4.4	Komunikace . . . . .	84
4.4.1	Přenos dat a distribuce napájení . . . . .	84
4.4.2	Uložiště . . . . .	85
4.4.3	Vizualizace . . . . .	85
4.5	Router . . . . .	85
4.6	Kamera . . . . .	86

<b>5</b>	<b>Realizace a testování systému</b>	<b>87</b>
5.1	Vývoj . . . . .	87
5.1.1	Vývojové prostředí . . . . .	88
5.1.2	Implementace senzorů . . . . .	89
5.1.3	Sběr diagnostických signálů . . . . .	90
5.1.4	Komunikace . . . . .	95
5.1.5	Záznam z kamery . . . . .	97
5.2	Příprava výroby . . . . .	98
5.2.1	Použité komponenty . . . . .	98
5.2.2	3D model . . . . .	98
5.2.3	Výstupy plynoucí z přípravy výroby . . . . .	99
<b>6</b>	<b>Zpracování dat</b>	<b>100</b>
6.1	Určení životnosti . . . . .	100
6.2	Modelování spolehlivosti . . . . .	101
6.3	Analýza diagnostických veličin . . . . .	103
6.3.1	Porovnání teploty a zatížení . . . . .	103
6.3.2	Otáčky . . . . .	104
6.3.3	Nesymetrie elektrického proudu . . . . .	106
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>109</b>
	<b>Použité zdroje</b>	<b>111</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>116</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>118</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$a$	[-]	operátor natočení
$a_1$	[-]	součinitel trvanlivosti
$a_2$	[-]	součinitel materiálu
$a_3$	[-]	součinitel provozních podmínek
$a_{23}$	[-]	sloučení koeficientů $a_2$ a $a_3$
$a_a$	[m/s <sup>2</sup> ]	zrychlení
$a_g$	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
$a_L$	[-]	koeficient pro úpravu životnosti ložiska
$b$	[-]	koeficient pro typ valivého elementu
$B$	[T]	magnetická indukce
$B_L$	[-]	koeficient metody a jednotek
$C_o$	[F]	elektrická kapacita vakua
$C_L$	[kN]	radiální jmenovité zatížení ložiska
$C_x$	[F]	elektrická kapacita určitého dielektrika
$d$	[m]	šířka
$\vec{D}$	[C/m <sup>2</sup> ]	vektor elektrické indukce
$e$	[-]	Eulerovo číslo
$E$	[Pa]	Youngův modul pružnosti v tahu
$\vec{E}$	[V/m]	vektor elektrické intenzity
$E_p$	[V/m]	elektrická pevnost
$f$	[Hz]	frekvence
$F$	[N]	síla
$F_Z$	[-]	poruchovost
$H$	[A/m]	intenzita magnetického pole
$i(t)$	[A]	elektrický proud v časové oblasti
$\mathbf{I}$	[A]	matice fázorů proudu
$\bar{I}_+$	[A]	sousledná složka elektrického proudu
$\bar{I}_-$	[A]	zpětná složka elektrického proudu
$\bar{I}_o$	[A]	netočivá složka elektrického proudu
$I_m$	[A]	maximální hodnota elektrického proudu
$I_{akt}$	[A]	aktuální hodnota proudového zatížení
$I_N$	[A]	jmenovité proudové zatížení
$I_{p.u.}$	[-]	elektrický proud v poměrných jednotkách
$\mathbf{I}_S$	[A]	matice fázorů souměrných složek
$\bar{I}_U$	[A]	fázor elektrického proudu fáze U
$\bar{I}_V$	[A]	fázor elektrického proudu fáze V
$\bar{I}_W$	[A]	fázor elektrického proudu fáze W
$j$	[-]	imaginární část komplexního čísla

$k$	[-]	bezpečnost
$K$	[-]	kritérium pro vyhodnocení teploty a elektrického proudu
$L$	[-]	životnost ložiska v počtu otáček
$L_{10}$	[10 <sup>6</sup> ]	základní životnost ložiska v počtu milionů otáček
$L_h$	[h]	životnost ložiska v hodinách
$L_{na}$	[10 <sup>6</sup> ]	rozšířená životnost ložiska
$\vec{M}$	[C/m]	vektor dipólového momentu
$n$	[ot/min]	rychlost otáčení
$p$	[W/kg]	ztrátové číslo
$\vec{P}$	[C/m <sup>2</sup> ]	vektor polarizace
$P_L$	[-]	dynamické ekvivalentní radiální zatížení ložiska
$\Delta P_d$	[W]	dielektrické ztráty
$\Delta P_{Fe}$	[W]	ztráty v železe
$\Delta P_h$	[W]	hysterezní ztráty
$\Delta P_p$	[W]	přídavné ztráty
$\Delta P_v$	[W]	ztráty vířivými proudy
$q$	[C]	elementární elektrický náboj
$Q$	[-]	spolehlivost
$Q_C$	[-]	celková spolehlivost
$Q_E$	[-]	spolehlivost při elektrickém namáhání
$Q_M$	[-]	spolehlivost při mechanickém namáhání
$Q_T$	[-]	spolehlivost při tepelném namáhání
$R_e$	[Pa]	mez kluzu
$R_E$	[Pa]	mez pružnosti
$R_m$	[Pa]	mez pevnosti
$R_U$	[Pa]	mez úměrnosti
$S$	[m <sup>2</sup> ]	průřez
$\mathbf{S}$	[-]	matice souměrných složek
$t$	[s]	čas
$\tan(\delta)$	[-]	ztrátový činitel
$T$	[s]	perioda signálu
$T_{akt}$	[°C]	aktuální hodnota teploty
$T_c$	[°C]	Curieova teplota
$T_N$	[°C]	jmenovitá teplota
$T_{p.u.}$	[-]	teplota v poměrných jednotkách
$u(t)$	[V]	napětí v časové oblasti
$U$	[V]	elektrické napětí
$U_{3fAV}$	[V]	střední hodnota šestipulzně usměrněného výstupu
$U_{AV}$	[V]	střední hodnota elektrického napětí
$U_m$	[V]	maximální hodnota elektrického napětí

$U_p$	[V]	průrazné elektrické napětí
$U_s$	[V]	sdružené napětí
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$\Delta V$	[m <sup>3</sup> ]	element objemu látky
$w_h$	[J]	energie ztracená v jednom m <sup>3</sup>
$\bar{x}$	[-]	aritmetický průměr
$z$	[-]	zásoba bezpečnosti
$Z_O$	[-]	hodnota odolnosti
$Z_P$	[-]	hodnota zátěže
$\gamma$	[S/m]	měrná vodivost (konduktivita)
$\delta$	[°]	ztrátový úhel
$\epsilon$	[F/m]	permitivita
$\eta$	[N · s/m <sup>2</sup> ]	dynamická viskozita
$\mu$	[H/m]	permeabilita
$\nu$	[-]	variační koeficient
$\nu_k$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita
$\nu_O$	[-]	variační koeficient odolnosti
$\nu_Z$	[-]	variační koeficient zatěžování
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$\rho$	[Ω · m]	měrný odpor (rezistivita)
$\rho_M$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota materiálu (měrná hmotnost)
$\sigma$	[-]	směrodatná odchylka
$\sigma_m$	[Pa]	mechanické napětí normálové
$\tau_m$	[Pa]	mechanické napětí tečné
$\varphi$	[°]	fázový posun
$\omega$	[rad/s]	úhlová rychlost

## Zkratky

AC	Střídavý (z angl. Alternating Current)
ASTM	Americká společnost pro testování a materiály (z angl. American Society for Testing and Materials)
CBM	Údržba dle stavu (z angl. Condition Based Maintenance)
CMS	Systém pro monitorování stavu (z angl. Condition Monitoring System)
CPU	Centrální procesorová jednotka (z angl. Central Processor Unit)
CV	Částečné výboje
DC	Stejnoseměrný (z angl. Direct Current)
EIS	Elektroizolační systém / Electrical insulation system
EMC	Elektromagnetická kompatibilita (z angl. Electromagnetic Compatibility)
ESD	Jediná podlouhlá doména (z angl. Elongated Single Domain)
FBD	Jazyk blokových schémat (z angl. Function Block Diagram)
FFT	Rychlá Fourierova transformace (z angl. Fast Fourier Transformation)
GND	Uzemnění (z angl. Ground)
I/O	Vstupně výstupní (z angl. Input/Output)
I <sup>2</sup> C	Nízkorychlostní sériová sběrnice (Inter-Integrated Circuit)
IACS	Mezinárodní žíhaný měděný standard (z angl. International Annealed Copper Standard)
IDE	Integrované vývojové prostředí (z angl. Integrated Development Environment)
INT	Celé číslo (z angl. Integer)
IP	Internetový protokol, pravidla pro přenos dat v síti (z angl. Internet Protocol)
IP	Stupeň krytí dle ČSN EN 60529 (z angl. Ingress Protection)
IR	Infračervené záření (z angl. Infrared)
LED	Elektroluminiscenční dioda (z angl. Light Emitting Diode)
MEMS	Mikroelektromechanické systémy (z angl. MicroElectroMechanical Systems)
N/A	Nepoužito (z angl. Not Applicable)
NaN	Není číslo (z angl. Not a Number)
NN	Nízké napětí
NTC	Záporný tepelný koeficient (z angl. Negative Temperature Coefficient)
PC	Osobní počítač (z angl. Personal Computer)
PTC	Kladný tepelný koeficient (z angl. Positive Temperature Coefficient)
PTFE	Polytetrafluoretylen (Teflon)
PWM	Pulzně šířková modulace (z angl. Pulse Width Modulation)
REAL	Číslo s plovoucí desetinnou čárkou (z angl. Real)
RR	Technologie Resin Rich
SCL	hodinový signál (z angl. Serial Clock)
SDA	datová linka (z angl. Serial Data)

---

SI	Mezinárodní systém jednotek (z franz. Le Systéme International d'Unités)
TBM	Údržba dle času (z angl. Time Based Maintenance)
USB	Univerzální sériová sběrnice (z angl. Universal Serial Bus)
VN	Vysoké napětí
VPI	Technologie Vacuum Pressure Impregnation
VPN	Virtuální privátní síť (z angl. Virtual Private Network)

# Úvod

Cílem této diplomové práce je návrh a realizace online diagnostického systému. Tento systém by měl zajišťovat akvizici a zpracování vybraných diagnostických signálů a měl by být připraven na případnou customizaci a rozšíření potřebné k implementaci do expertního systému. Pro provedení takového úkolu byl jako jádro online diagnostického systému zvolen PLC systém, neboť se jedná o praxí prověřené průmyslové řešení. Hlavním cílem je tedy vybrat vhodné komponenty a následně sestavit a otestovat sestavu senzorů implementovaných do PLC systému a zhodnotit možné další kroky práce s daty. Tato diplomová práce je členěna do teoretické a praktické části, přičemž každá z nich obsahuje po třech kapitolách.

Ke splnění cíle této diplomové práce je v první řadě vytvořen soubor teoretických poznatků o materiálech používaných v elektrických strojích, diagnostice v silnoproudé elektrotechnice a degradačních procesech, které v elektrických strojích probíhají. Tento teoretický základ umožňuje identifikovat klíčové diagnostické signály ve vztahu k používaným materiálům v elektrických strojích a jejich deterioraci. Rovněž je v této části diplomové práce proveden úvod do elektrotechnologické diagnostiky, základních přístupů k diagnostice a jsou zde uvedeny výhody, které z diagnostického procesu vyplývají.

Posléze následuje část praktická, ve které je řešen výběr potřebných senzorů pro snímání diagnostických veličin v návaznosti na předchozí kapitoly. Je zde provedeno představení zvoleného PLC systému a výběr jeho dílčích modulů. Dále jsou řešeny některé subsystémy, které nejsou přímo součástí PLC systému, nicméně budou v online diagnostickém systému zahrnuty. V části, která je věnována realizaci a testování první zkušební sestavy, je proveden popis implementace senzorů a konfigurace hardware i software PLC systému. Následuje volba dalších prvků, bez kterých nelze online diagnostický systém samostatně provozovat. Je vypracováno 3D rozložení těchto komponent, čímž je provedena první fáze přípravy výroby. Závěrem praktické části je zpracován úvod k některým možným způsobům, jak získaná data a probíhající měření v rámci diagnostického procesu vyhodnocovat a jaké metody je možné využít.



# 1 Materiály používané v elektrických strojích

Je účelné, aby bylo ze všeho nejdříve provedeno stručné rozdělení, popis a zhodnocení materiálů, které jsou v elektrických strojích používány, neboť tyto údaje demonstrují jak komplexním zařízením elektrický stroj je a zároveň uvádí do souvislosti důležitost sledování změn parametrů těchto materiálů a v konečném důsledku i důležitost samotného diagnostického procesu, a to jak na makroskopické, tak mikroskopické úrovni.

Rozdělení materiálů, které jsou v elektrických strojích aplikovány, je v této práci postupně provedeno od celků, které jsou pro elektrické stroje principiálně nezanedbatelné, přes konstrukční díly, až k podsystémům a materiálům, které jsou zdánlivě méně podstatné, ale přesto jsou pro správnou funkci elektrického stroje a jeho dlouhou životnost nepostradatelné.

Tato kapitola je koncipována tak, aby mimo jiné vytvořila i teoretický základ o tom, jak se jednotlivé konstrukční prvky a materiály mohou podílet na životnosti zařízení, ale i jak jsou důležité při návrhu diagnostického systému, který bude proveden v praktické části této diplomové práce.

## 1.1 Elektricky vodivé materiály

Každý elektrický stroj pro svou funkci nezbytně potřebuje vybuzení elektromagnetického pole. Toho lze v konvenčních strojích docílit připojením elektrického napětí na vinutí elektrického stroje, které je tvořeno cívkami nebo jejich skupinami. Pro docílení žádoucího účinku, kterým může být docílení silového působení či transformace proudu a napětí, je nutno navrhnout vinutí kotvy, kde vzniká indukované elektrické napětí, díky kterému je umožněna funkce stroje.

V některých částech elektrických strojů je možné některá vinutí nahradit vhodným konstrukčním provedením rotoru (například synchronní reluktanční stroj) nebo vhodným uložením permanentních magnetů (například synchronní stroj s permanentními magnety). [7]

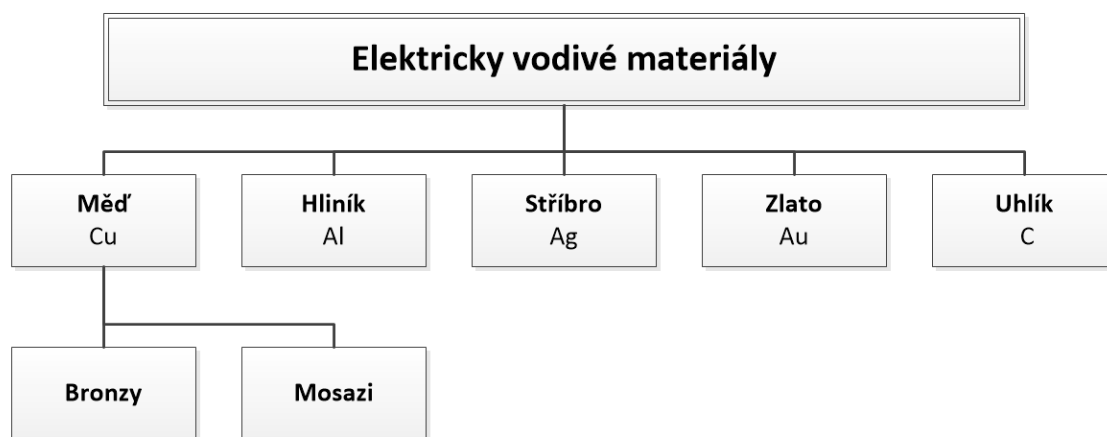
Pojmem elektrický vodič se označuje takový materiál, jehož rezistivita ( $\rho$ ) odpovídá hodnotám  $10^{-6}$  až  $10^{-8}$   $\Omega\cdot\text{m}$ , a tudíž jsou hodnoty konduktivity vysoké. Vztah mezi rezistivitou a konduktivitou je uveden v rovnici (1.1). Koncentrace nosičů elektrického náboje je o několik řádů vyšší, než je tomu u materiálů izolantů a polovodičů. Materiály, které vedou elektrický proud prostřednictvím elektronové vodivosti se označují jako vodiče první třídy. Elektrická vodivost těchto materiálů zůstává při přenosu elektrického proudu nepozměněna. Jedná se zejména o kovy. Naopak materiály, jejichž elektrická vodivost je

ovlivněna hodnotou stejnosměrného elektrického proudu, se nazývají vodiče druhé třídy. Elektrický proud jsou schopny vést kvůli značné iontové vodivosti. Do této kategorie lze řadit materiály jako roztoky a taveniny iontových solí. [1]

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (1.1)$$

Vlastnosti elektrického vodiče, které je nutno vzít v úvahu jsou následující. Jedná se o hodnotu elektrické a tepelné vodivosti, mechanické a technologické vlastnosti a nakonec o ekonomiku výroby a aplikace. Mechanickými a technologickými vlastnostmi je například tvárnost, mechanická pevnost, odolnost proti korozi nebo možnost spojování. Ekonomické aspekty se týkají ceny a dostupnosti komodit, nákladů na údržbu a případného vyřazení z provozu a recyklace. [2]

Tato sekce se zabývá elektricky vodivými materiály, které jsou v elektrických strojích významně využívány. Nejedná se pouze o kovy a slitiny, které jsou použity pro vinutí elektrických strojů, ale i pro další komponenty, které mohou být v elektrických strojích a v elektrotechnice použity za podobným účelem. Dále jsou stručně popsány nebo alespoň uvedeny některé další elektricky vodivé materiály. Přehled nejvýznamnějších a nejlépe elektricky vodivých materiálů používaných v elektrických strojích je proveden na obrázku 1.1 a dále následuje jejich charakteristika.



Obrázek 1.1: Rozdělení nejvýznamnějších elektricky vodivých materiálů

## Měď

Hojně využívaným materiálem pro elektrické vodiče je měď (Cu). Jedná se o kov charakteristické barvy, dle [1] jde o barvu červenou, dle [4] načervenalou a dle [2] je to barva růžově hnědá. Je poměrně těžký a kujný, tedy dobře tvárný. Lze jej dobře spojovat svařováním<sup>1</sup> či

<sup>1</sup>Svařování je způsob provedení nerozebíratelného spoje kovů či plastů za působení teploty, teploty a tlaku či pouze tlaku. Může být použit přídavný materiál, který splyne s materiálem původním. [12]

pájením<sup>2</sup>. Konduktivita může být ovlivněna příměsemi či mechanickým zpracováním. Rezistivita mědi je stanovena mezinárodním standardem (IACS) na  $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Teplota tání je 1083 °C a v roztaveném stavu má měď barvu mořské zelené. V oxidační atmosféře se povrch samovolně pokrývá tenkou vrstvou sloučenin, které zabraňují další korozi<sup>3</sup>. Tato vrstva charakteristicky zabarvuje povrch a označuje se jako patina či měděnka. Síra vyvolává korozi mědi, proto je nutno brát v úvahu materiálovou kompatibilitu s použitou izolací. Měděné vodiče se většinou dodávají ve formě drátů, tyčí, plátů, pasoviny či trubek. Měď je využívána ve sloučeninách s dalšími kovy. [1][2][3][4]

Měď se v oblasti elektrických strojů využívá pro vinutí statorů a rotorů elektrických strojů točivých, ať už jsou jimi motory či generátory stejnosměrné či střídavé. Jedná se jak o vinutí kotvy, tak i o vinutí budící, vinutí kompenzační, vinutí pomocných pólů či vinutí tlumící pro stroje s vyniklými póly. Rovněž se měď využívá i pro vinutí transformátorů. Měď s přísadou kadmia má zvýšenou mechanickou odolnost a je v této úpravě používána pro výrobu komutátorů. [2][5][7]

## Bronzy

Pojmem bronz se označuje slitina mědi s dalším přísadovým prvkem. Nejčastěji je jím cín a dále pak například hliník, křemík, nikl, kadmium či berylium. Název bronzu je zpravidla určen hlavní přísadou, vzniká tedy bronz cínový, hliníkový atd. Bronzy jsou dobře elektricky vodivé a mají vysokou mechanickou pevnost a tvrdost a odolávají korozi. Je možné je mechanicky zpracovávat obráběním, svařovat i pájet. [1][3][5]

Cínové bronzы obsahují do 20 % cínu. Mohou být modifikovány i fosforem, jehož množství určuje tvrdost cínového bronzu a odolnost vůči korozi. Obsah fosforu v cínovém bronzu je do 0,3 %. Dále lze rozlišovat bronzы pro tváření či odlévání. S tím jsou spojené možné další obsažené přísady. Hliníkové bronzы mají podíl do 10 % hliníku. Hliník zde upravuje pevnost a tvrdost takového bronzu. Hliníkové bronzы jsou charakteristické nejmenší hustotou a tedy i hmotností ze všech bronzů a odolávají korozi a zvýšené provozní teplotě. [3]

Odlévané výrobky z cínových bronzů mohou být v rámci elektrických strojů například sběrací kroužky elektrických motorů či generátorů. Slitina mědi s kadmíem, beryliem a fosforem se používá pro zhotovení rotorů s vinutím nakrátko pro asynchronní stroje a tlumící vinutí synchronních strojů. [3][5]

## Mosazi

Mosaz je slitinou mědi (Cu) a zinku (Zn). Tímto názvem se označuje výhradně tato kombinace. Označuje se Ms a za tímto označením je uvedeno číslo, které reprezentuje podíl mědi. Obsah mědi se v mosazích pro tváření pohybuje od 58 do 96 %. V případě

<sup>2</sup>Pájení je způsob provedení nerozebíratelného spoje kovů pomocí jiného roztaveného kovu nebo slitiny. [12]

<sup>3</sup>Materiály jsou vystavovány vlivům prostředí a teplotám, které mají za následek snížení jejich použitelnosti, spolehlivosti a životnosti. [2]

použití dalších přísad na úkor obsahu zinku se slitiny označují jako speciální, tyto jsou však v elektrotechnice zanedbatelné. S množstvím zinku v mosazi se zvyšuje pevnost v tahu (maximum při podílu 45 % zinku) a tažnost (maximální při podílu 32 % zinku). Výhodou obsahu zinku je také snížení ceny materiálu oproti čisté mědi. [1][3]

Mosazi s obsahem nad 80 % mědi se nazývají tombaky, mají dobrou elektrickou vodivost a mají tak obecně dobré uplatnění v elektrotechnice. Mosaz Ms 63 je často používána pro výrobu objímek žárovek, součástí vypínačů a dalšího instalačního materiálu. Mosaz Ms 54 je vhodná k použití coby tvrdá pájka pro spojování mědi, bronzu, mosazi či oceli. Mosaz je také využívána jako materiál s vyšší rezistivitou pro rozběhovou část rotorového vinutí asynchronních motorů s dvojitou klecí. [1][3][8]

## Hliník

Dalším často používaným materiálem pro výrobu vodičů je hliník (Al). Tento kov má bílou barvu dle [1] a [2] barvu specifikuje jako stříbrobílou. Kov je velmi dobře tvárný za tepla i za studena. Měrná vodivost hliníku je stanovena na hodnotu  $2,63 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ . Jeho nevýhodou oproti mědi je tedy nižší konduktivita (zhruba 60 % měrné elektrické vodivosti mědi), ale významnou výhodou je nižší měrná hmotnost a lepší dostupnost tohoto materiálu. Oproti mědi je hliník zhruba trojnásobně lehčí. Při zvýšení průřezu pro kompenzaci nižší vodivosti je tak hliníkový vodič stále zhruba dvakrát lehčí než měděný při stejné proudové hustotě. Další nevýhodou jsou oproti mědi horší mechanické vlastnosti. Ve spojích s tlakovým spojem (například svorkovnice) dochází k tzv. tečení za studena. Teplota tání hliníku je  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ . V běžné atmosféře (vzduch) je velmi stálý. Na povrchu materiálu se tvoří tenká vrstva oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), která zabraňuje korozi. Tato vrstva může ovšem znamenat i problém při případném spojování materiálu formou svařování či pájení. [1][2][3][4]

Hliník má technologickou výhodu ve snadné povrchové úpravě eloxováním. Tato tenká tvrdá vrstva oxidu je dobře tepelně odolná a odolává i opotřebení. [3]

V kontextu elektrických strojů točivých se hliník používá zejména k odlévání klecí nakrátko pro rotory asynchronních strojů. Zde je oproti vinutým rotorům s měděnými vodiči významná výhoda nižší hustoty hliníku, neboť takto zhotovený rotor má menší moment setrvačnosti. Při zaměření na transformátory mohou být cívky transformátoru tvořeny nejen z měděných vodičů, ale i z vodičů hliníkových. [5][6][8]

Porovnání významných vlastností mědi a hliníku, při využití coby elektrického vodiče, je provedeno v tabulce 1.1. Jak lze vidět, vlastnosti jsou vyjádřeny relativně a jsou vztaženy k hodnotám mědi. Vycházeno je ze skutečnosti, že při použití alternativního materiálu, což je zde hliník, musí být zachována proudová hustota. To znamená, že je nutno zvětšit průměr a tedy i průřez vodiče. Tento předpoklad zmíněná tabulka respektuje. [1][2]

Lze tedy konstatovat, že při adekvátním zvětšení obvodu, potažmo průřezu, vodiče lze přenést stejný elektrický proud, při snížení hmotnosti a ceny zhruba na polovinu.

Tabulka 1.1: Porovnání vlastností mědi a hliníku dle [2]

Vodič	Průměr vodiče	Plocha průřezu	Hmotnost	Mez pevnosti	Cena
Měď	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Hliník	127 %	160 %	48 %	80 %	50 %

Nevýhodou je však nižší mechanická pevnost.

Slitiny hliníku s dalšími kovy lze dále dělit na slitiny pro tvářeni a pro odlévání. Tyto slitiny jsou však častěji využívány pro konstrukční účely, než pro účely výroby vodičů. Proto budou uvedeny až v sekci, která se zabývá konstrukčními materiály. Dále lze hliník použít pro výrobu chladičů. [3][13]

### Stříbro

Jedná se o kov bílé barvy a vysokého lesku. Stříbro (Ag) je co se týče elektrické a tepelné vodivosti nejlepším ze všech. Jeho rezistivita je  $1,58 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Je dobře tvárné. Lze jej upravit do podoby tenké fólie. Oproti ostatním technickým kovům je velmi dobře chemicky odolné. Nekoroduje v suchém ani vlhkém prostředí, ale je náchylné vůči poškození sírou a sirnými sloučeninami. [1][2][3]

Použití stříbra v elektrotechnice se nachází zejména v oblasti provedení kontaktů a používá se v kombinaci s dalšími kovy. Lze jej využívat jako tvrdou pájku. [1][3]

### Zlato

Zlato (Au) je kov se žlutým zabarvením a vysokým leskem. Jeho rezistivita je  $2,12 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Je velmi dobře tvárný a lze ho dobře zpracovat do velmi tenkých fólií. Je druhým chemicky nejstálejším kovem. Má stálou a velice nízkou hodnotu přechodového odporu. Jeho mechanické vlastnosti však nejsou dobré. Je nutné jej upravit pomocí přísad, kterými je zejména stříbro, měď, nikl, platina či paladium, ale v menším zastoupení i zirkonium či chrom. [1][2][3]

Zlato je v elektrotechnice využíváno pro povrchovou úpravu kontaktů právě díky svému nízkému přechodovému odporu. Je využíváno v čisté formě nebo ve slitinách s příměsemi, které zlepšují mechanické vlastnosti zlata. [1][3]

### Uhlík

Elektrotechnický uhlík je známý a dlouho používaný elektricky vodivý materiál. V přírodě se nalézá v krystalické<sup>4</sup> či amorfní<sup>5</sup> podobě. Alternativně je nazýván grafit. Jeho mechanické vlastnosti jsou poměrně špatné, je málo pevný a je křehký. Navzdory tomu, že se jedná o nekovový prvek, vede elektrický proud a teplo. To je způsobeno jeho vrstvenou strukturou s volným valenčním elektronem. Hodnota rezistivity grafitu v krystalické

<sup>4</sup>Takovéto látky mají pravidelně uspořádanou vnitřní strukturu. [1]

<sup>5</sup>Tyto látky mají, oproti látkám krystalickým, vnitřní strukturu uspořádanou nepravidelně. [1]

podobě je uváděna v řádu  $10^{-5}$   $\Omega\cdot\text{m}$ . Pokud jde o amorfni uhlík hodnota rezistivity se pohybuje od  $10^{-5}$  do  $10^{-4}$   $\Omega\cdot\text{m}$ . Pro zvýšení vodivosti se využívají kombinace práškového grafitu a prášků dobře vodivých kovů jako je stříbro či měď. Tyto kompozity grafit-kov mají hodnotu rezistivity v rozmezí  $3\cdot 10^{-6}$  až  $10^{-8}$   $\Omega\cdot\text{m}$ . Technologie výroby také ovlivňuje velmi důležité parametry, jako je tvrdost či koeficient tření. Uhlík je možné zpracovat i v rámci polymerních kompozitů. Vznikají tak například vodivé pryže, antistatické podložky a pružné elektrické vodiče. [2]

V průmyslovém zpracování se značné množství uhlíku využívá pro výrobu kartáčů do sad sběracích souprav elektrických strojů točivých, které mají kroužky nebo komutátor. Takto je docíleno kluzného kontaktu a je zajištěn přenos elektrického proudu do nebo z rotujících částí. [2][7]

### Další elektricky vodivé materiály

Existují další elektricky vodivé materiály, které je vhodné zmínit. Nicméně nejsou pro aplikace v elektrických strojích klíčové, proto budou popsány velice stručně.

- Zinek (Zn): Jedná se o namodrale bílý, pájitelný kov. Využívá se pro úpravu ocelových komponent, výrobu mosazných slitin a tvrdých pájek. [3]
- Kadmium (Cd): Měkký, stříbřitě bílý, vlastnostmi podobný zinku, jedovatý kov. V malých koncentracích se používá jako přísada ke zvětšení mechanické pevnosti a otěruvzdornosti. Je využíván jako přísada v kombinaci s mědí při výrobě komutátorů. [3][5]
- Cín (Sn): Nejedovatý, korozi odolný kov. Využívá se pro povrchovou úpravu vodičů a pro výrobu cínových bronzů. [3]

Lze najít další kovy, které vykazují schopnost vést elektrický proud, ale tyto jsou v aplikacích v elektrických strojích tak marginální, že je již od jejich popisu upuštěno. Stále však mohou být použity v oblasti elektrotechniky, a proto jsou alespoň uvedeny. Jedná se o nikl (Ni), titan (Ti), kobalt (Co), chrom (Cr), platinu (Pt), paladium (Pd), iridium (Ir), osmium (Os), rhodium (Rh), ruthenium (Ru), wolfram (W), molybden (Mo) a tantal (Ta). [3]

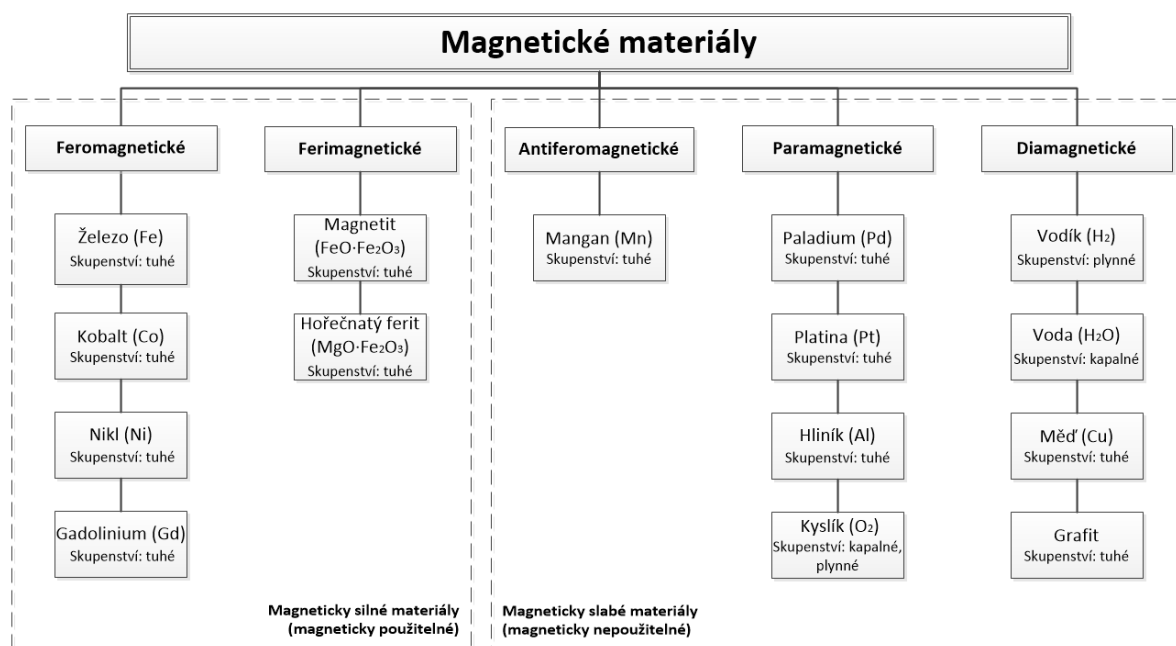
Je nutno pamatovat na skutečnost, že vlivem přenosu elektrického proudu vodičem s nenulovou rezistivitou dochází k tzv. Jouleovým ztrátám, které nelze zanedbat. Tyto ztráty se netýkají pouze samotného vinutí, ale i kluzných kontaktů (stroje s kroužky či s komutátorem). [5][6]

Dalším typem materiálů, které jsou využívány k vedení elektrického proudu jsou tzv. supravodiče. Jsou to některé kovy, slitiny, kovové sloučeniny, keramiky a organické látky, které při velmi nízkých teplotách vykazují zanedbatelný elektrický odpor. Existují takové elektrické stroje, které využívají supravodiče. [1][2][5] Tato problematika je značně komplexní a v rámci této diplomové práce nebude dále rozpracována.

## 1.2 Magnetické materiály

Jedná se o takové materiály, které jsou charakteristické svými magnetickými vlastnostmi s mnohdy nezastupitelnou funkcí. Důležité je každý takový materiál posuzovat komplexně. Důležité jsou vlastnosti fyzikální, elektrické, tepelné, ale i mechanické. Spolu s těmito často souvisí i cena materiálu a možné technologické zpracování. [3]

Magnetické vlastnosti materiálu jsou určeny elektronovým obalem atomu. Předpokladem vzniku těchto vlastností je existence magnetického momentu atomu. Výsledný magnetický moment atomu je dán součtem orbitálním magnetickým momentem elektronu a spinovým magnetickým momentem elektronu, přičemž spinový magnetický moment jádra je zanedbatelný. Magnetický moment atomu je ovlivněn i interakcemi v elektronovém obalu atomu. Pro materiály v oblasti magnetismu je z hlediska rozdělení a použitelnosti důležité definovat pět základních principů, jak reagují ve vnějším magnetickém poli. Jedná se o materiály feromagnetické, ferimagnetické, antiferomagnetické, paramagnetické a diamagnetické. Toto rozdělení spolu se zástupci těchto kategorií je zpracováno v obrázku 1.2. [1][2][3]



Obrázek 1.2: Rozdělení magnetických materiálů dle [1][2][3][4]

Proces magnetování lze rozdělit na magnetizaci spontánní, kdy je materiál magnetován prostřednictvím interakcí mezi částicemi látky (atomy či molekuly), a na magnetizaci vnějším polem. Charakteristickým parametrem je právě schopnost tyto materiály magnetovat vnějším polem. Feromagnetické a ferimagnetické materiály jsou proto svým chováním v magnetickém poli považovány za důležité. Naproti tomu antiferomagnetika, diamagnetika a paramagnetika jsou z hlediska použitelnosti marginální. [1][2][3]

Důležitým parametrem, který tyto látky charakterizuje je permeabilita. Ta je defino-

vána vztahem (1.2). Zde  $\mu_0$  představuje permeabilitu vakua, což je fyzikální konstanta rovna  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m,  $\mu_r$  značí relativní permeabilitu, která vyjadřuje poměr permeability látky a permeability vakua,  $B$  je magnetická indukce (hustota magnetického toku) a  $H$  je intenzita magnetického pole. Permeabilita určuje magnetický stav materiálu v magnetickém poli. Vyjadřuje tak změnu indukce vlivem změny intenzity magnetického pole či změnou relativní permeability. [1][3][4]

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \frac{B}{H} \quad (1.2)$$

Nepůsobí-li na feromagnetické materiály vnější magnetické pole, jsou výsledné magnetické momenty částic v každé oblasti různé a materiál se jeví jako nemagnetický. Po vložení do vnějšího pole dojde k procesu namagnetování. Po namagnetování feromagnetického materiálu tento získá jistou magnetizaci, kterou vykazuje i po vyjmutí z vnějšího pole. Orientace magnetického momentu částic takovýchto materiálů je zobrazena na obrázku 1.3a) a lze ji popsat jako paralelní souhlasnou. Magnetizace přetrvává až do  $T_c$  nebo zaniká částečně či úplně odsmagnetováním obráceně orientovaným vnějším polem. Toto pole může být pole reakce kotvy, na což je nutno myslet v průběhu návrhu točivých elektrických strojů, kterých se problematika týká. Pro popis chování magnetických materiálů (feromagnetické a ferimagnetické) se používá teorie Weissových domén, které lze vymezit jako oblasti, ve kterých se nachází atomy, ionty či molekuly (dále jen "částice") se stejně orientovaným magnetickým momentem. Rozpad materiálu na tyto domény je přítomen pro teploty nižší než je teplota Curieova ( $T_c$ ). Po překročení této teploty domény zanikají a zaniká i případný vykazovaný magnetismus materiálu. Proto je tato teplota důležitým technickým limitem pro použitelnost magnetických materiálů. Weissovy domény jsou oddělovány takzvanými Blochovými stěnami. Se změnou magnetizace těchto oblastí je spojen fenomén magnetostrikce, kterou lze rozlišovat na tvarovou či objemovou. [1][2][3][7]

Ferimagnetismus a antiferomagnetismus jsou materiálové vlastnosti, které jsou si velmi podobné. Jedná se o takové materiály, kde mají částice antiparalelní orientaci magnetických momentů. U ferimagnetických materiálů jsou však magnetické momenty orientované proti působení ostatních magnetických momentů menší a magnetizaci pouze snižují. V případě antiferomagnetických materiálů jsou však opačně orientované magnetické momenty stejně velké a materiál se tak jeví jako nemagnetický. Antiferomagnetismus se vyskytuje za teplot nižších než  $T_c$ . Orientace magnetických momentů jednotlivých částic v takovýchto materiálech je energeticky výhodnější. Problém je demonstrován na obrázku 1.3b) a 1.3c). Ferimagnetismus je tedy vlastně zvláštní případ antiferomagnetismu. [1][3]

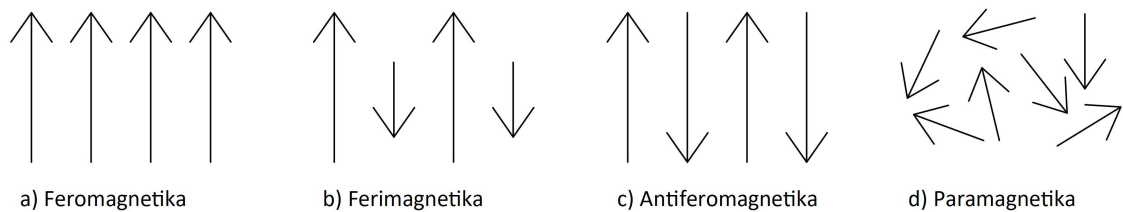
Částice paramagnetických materiálů mají magnetický moment. Směr magnetických momentů těchto částic je však orientovaný chaoticky tak, jak je to znázorněno na obrázku 1.3d). Při vložení do vnějšího pole dojde k částečnému nasměrování dle jeho působení - dojde tedy ke slabému zsmagnetování. Po zániku vnějšího magnetického pole se však orientace magnetických momentů vrátí do výchozího stavu a materiál je opět nemagnetický.



Relativní permeabilita takových materiálů je nepatrně větší než jedna. [1][3]

Diamagnetické materiály mají výsledný magnetický moment atomů nulový a nejsou tedy považovány za magnetické. Při vložení takových látek do vnějšího magnetického pole dojde k deformaci elektronového obalu a vznikne indukovaný magnetický moment, který působí proti smyslu působení tohoto vnějšího pole. Relativní permeabilita diamagnetických materiálů je jen nepatrně menší než jedna. [1][3]

Směry magnetického momentu částic jednotlivých typů materiálů jsou uvedeny v obrázku 1.3.



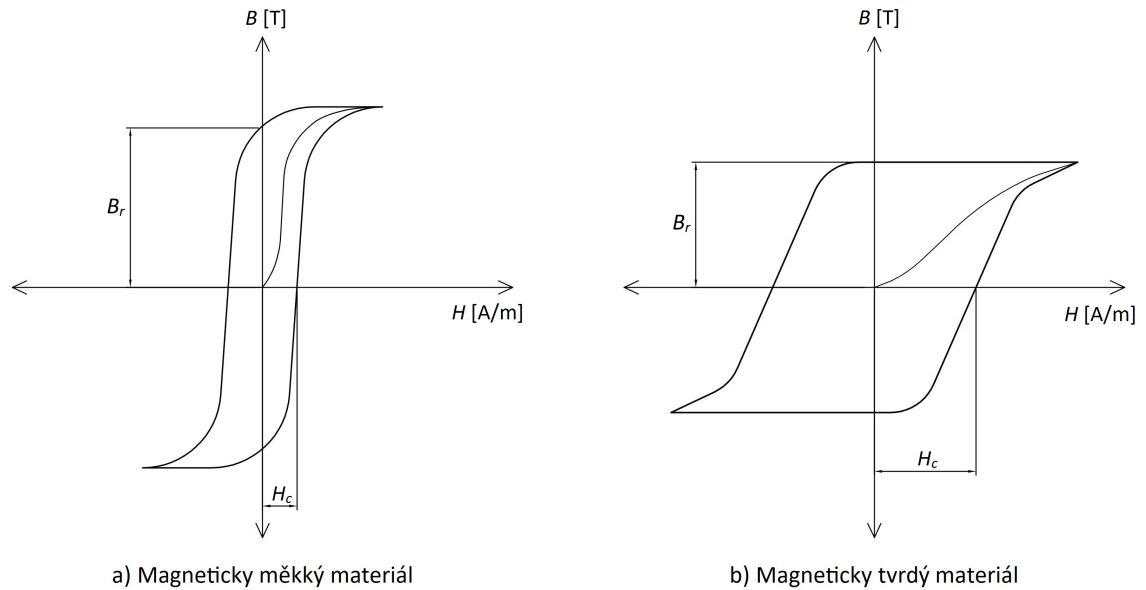
Obrázek 1.3: Orientace magnetických momentů částic v doméně materiálů dle [1]

Dalšími důležitými aspekty pro posuzování magnetických materiálů je hysterezní smyčka, koercivita a remanence. Důležitou křivkou je také křivka prvotní magnetizace (někdy nazývána panenskou křivkou), která popisuje první magnetizaci magnetického materiálu. Hysterezní smyčka včetně křivky prvotní magnetizace a lokalizace hodnot remanentní magnetické indukce a koercivity pro magneticky měkké i tvrdé materiály jsou uvedeny v obrázku 1.4. Důležitým bodem charakteristiky je oblast magnetického nasycení<sup>6</sup>, za kterou již běžně není magnetický obvod provozován. Kromě těchto základních parametrů lze diskutovat činitel pravouhlosti hysterezní smyčky a maximální součin  $(B \cdot H)_{max}$ , který reprezentuje energii uloženou v materiálu. [1][2][3]

V oblasti elektrických strojů jsou používány materiály feromagnetické a ferimagnetické, které lze v zásadě dále rozlišovat na dva typy těchto materiálů. Jedná se o materiály magneticky měkké a materiály magneticky tvrdé. Magneticky měkké materiály mají malou plochu hysterezní smyčky, malou hodnotu koercivity a vysokou hodnotu relativní permeability. Proto jsou vhodné pro konstrukci magnetických obvodů elektrických strojů. Materiály magneticky tvrdé mají naopak velkou plochu hysterezní křivky, velkou hodnotu koercivity a velký maximální součin  $(B \cdot H)_{max}$ . Z těchto důvodů jsou využívány jako materiály pro vytvoření stálého magnetického pole. [1][2][3][4]

Důležitým parametrem pro posouzení magnetického materiálu jsou bezesporu ztráty, které se projeví jako uvolněná neužitečná tepelná energie, kterou je nutno odvést. Tyto ztráty jsou souhrnně nazývány jako ztráty v železe a skládají se ze součtu ztrát hysterezních, ztrát vířivými proudy a přídavných ztrát dle rovnice (1.3). [1][2][3]

<sup>6</sup>K nasycení magnetického materiálu dojde tehdy, pokud při zvyšování intenzity magnetického pole  $H$  roste hodnota magnetické indukce  $B$  pouze minimálně. [1][2]



Obrázek 1.4: Hysterezní smyčka magneticky měkkého a tvrdého materiálu dle [3]

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v + \Delta P_p \quad (1.3)$$

Ztráty hysterezní jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. Lze je určit vztahem (1.4), kde  $f$  značí frekvenci,  $w_h$  značí energii ztracenou v jednom  $m^3$  materiálu a  $V$  reprezentuje objem materiálu.

$$\Delta P_h = f \cdot w_h \cdot V \quad (1.4)$$

Ztráty vířivými proudy vznikají uzavíráním proudů v magnetickém materiálu, který je zároveň dobře elektricky vodivý. Vznikají v důsledku indukovaného napětí a jedná se tedy o ztráty Jouleovy. Jejich omezení je dosahováno v zásadě dvěma způsoby. Jedním z nich je obecné zvýšení rezistivity. Druhým způsobem je dělení materiálu na tenké navzájem izolované vrstvy, čímž je zmenšena tloušťka a objem vzorku. Určení těchto ztrát je možné na základě vztahu (1.5). Vzhledem k výše uvedenému je zde zastoupena šířka materiálu  $d$ , a to kvadraticky. Nachází se zde konduktivita  $\gamma$ . Opět zde figuruje objem materiálu  $V$  a frekvence  $f$ , ale tentokrát frekvence přispívá ke vzniku ztrát kvadraticky. Kvadraticky se zde uplatňuje i magnetická indukce  $B$ . [1][2]

$$\Delta P_v = \frac{\pi}{6} \cdot d^2 \cdot \gamma \cdot V \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (1.5)$$

Přídavné ztráty vznikají odklonem teoretických předpokladů od reality. Jedná se o neuvážování doménové struktury při odvození vztahu pro výpočet ztrát vířivými proudy, vznik a zánik Blochových stěn a jejich interakce s poruchami ve struktuře materiálu a nerovnoměrné rozložení magnetické indukce. Tyto ztráty jsou určovány vyjádřením z rovnice (1.3). [1][2]

Pro praktické účely jsou mnohdy ztráty magnetického materiálu vyjádřeny tzv. ztrátovým číslem. To reprezentuje ztráty v železe ( $\Delta P_{Fe}$  [W]) vztažené k jednotce hmotnosti ( $m$  [kg]) použitého materiálu. Při vyjádření ztrát tímto způsobem je vždy stanovena referenční hodnota magnetické indukce a frekvence. Definiční vztah je uveden v rovnici (1.6). Ztrátové číslo běžně používaných materiálů pro magnetické obvody elektrických strojů nabývá hodnot maximálně v řádech  $10^0$  W/kg. [1][2][3]

$$p = \frac{\Delta P_{Fe}}{m} \quad (1.6)$$

### 1.2.1 Magneticky měkké materiály

Tyto materiály jsou používány pro konstrukci magnetických obvodů elektrických strojů, protože jsou charakteristické vysokými hodnotami relativní permeability. Malá plocha hysterezní křivky a nízká hodnota koercivity je dále činí vhodnými k aplikacím, kde dochází ke střídavé magnetizaci. [1][2][3]

Nejrozšířenějšími materiály jsou dle [1] a [2] v současné době následující:

- Železo;
- Nízkouhlíkové oceli;
- Slitiny železa a křemíku;
- Slitiny železa a niklu;
- Slitiny železa a kobaltu;
- Amorfni magnetické materiály;
- Magneticky měkké ferity.

Železo a hlavně nízkouhlíkové oceli jsou používány pro stavbu magnetických obvodů transformátorů a elektrických strojů točivých malých výkonů s nároky na velmi malý obsah příměsí, které mají negativní dopad na magnetické vlastnosti. Nevýhodou je malá rezistivita materiálů na bázi železa a s tím spojené vysoké ztráty vířivými proudy. [1][2]

Pro tyto elektrické stroje ve výkonových verzích je již zapotřebí použít materiál se zvýšenou rezistivitou. Jedná se o slitiny železa a křemíku (křemíkové oceli). Křemík zvyšuje měrný elektrický odpor a v důsledku toho snižuje ztráty vířivými proudy, ale je nutno uvažovat i zvýšenou tvrdost a křehkost oceli dotované křemíkem. Při vyšším obsahu křemíku se také významněji projevuje tvarová magnetostrikce a snižuje se magnetická indukce nasycení. Proto je stanovené optimální množství. Obsah křemíku pro transformátorové plechy se pohybuje od 3,2 do 4,6 % a pro dynamové plechy, které jsou více

mechanicky namáhané, je to 0,5 až 3,2 %. Pro křemíkové oceli je důležitá možnost uplatnění magnetické anizotropie<sup>7</sup>. Výhodné jsou tak magneticky orientované plechy zejména v transformátorech. Tyto jsou označovány jako plechy válcované za studena a vykazují velký elektrický odpor příčně ke směru válcování a malý magnetický odpor ve směru válcování. Naopak pro magnetické obvody strojů točivých je nutno použít magnetický materiál izotropní<sup>8</sup>. [1][2][6]

Slitiny železa a niklu se označují jako permalloye a pro oblast elektrotechniky mají značný význam. Využívají se například v transformátorech a relé pro sdělovací techniku nebo v magnetických systémech měřicích systémů. Tyto slitiny jsou dobře tvárné a vynikají svou vysokou hodnotou relativní permeability, nízkou koercivitou a nízkými hysterézními ztrátami. Spolu s čistým železem se jedná o magneticky nejměkčí materiál. Mají poměrně nízkou hodnotu nasycené magnetické indukce (0,8 T pro slitinu Fe78Ni a 1,6 T pro Fe50Ni). Pokud materiál dosahuje vyšší nasycené indukce, je to vykoupeno vyšší hodnotou koercivity a nižší relativní permeabilitou. Jsou značně citlivé vůči nevhodnému mechanickému zpracování. [1][2]

Slitiny železa a kobaltu se vyznačují vysokou hodnotou nasycené indukce, která může být při obsahu 35 % kobaltu až 2,43 T. Jedná se však o slitinu špatně tvárnou a za účelem zlepšení se proto přidává vanad nebo chrom. Tyto slitiny mají vysokou  $T_c$ . Své uplatnění nachází v oblastech, kde nákupní cena kobaltu není překážkou. Nejpoužívanější slitinou je Permendur 49Co49Fe2V. [1][2]

Amorfní magnetické materiály, někdy také označovány jako magnetická skla, jsou kvůli své nekystalické struktuře naprosto odlišné od ostatních magneticky měkkých materiálů. Jejich nespornou výhodou je vysoká rezistivita a spolu s jejich zpracovatelností do podoby tenkých pásků jsou ztráty vířivými proudy v těchto materiálech minimální. Ztrátové číslo takových materiálů je řádově v  $10^{-1}$ .

Magneticky měkké ferity jsou ferimagnetické látky, které vznikají spojením oxidů niklu, zinku, manganu, hořčíku, kobaltu nebo kadmia se skupinou  $Fe_2O_3$ . Jedná se o materiály vytvořené práškovou metalurgií. Jsou křehké, tvrdé a téměř neobrobitelné. Magneticky měkké ferity jsou charakteristické menší hodnotou nasycené magnetické indukce. Jejich výhodou ale je, že je lze snadno magnetovat, rychle přemagnetovat a vyznačují se velkou rezistivitou. Proto jsou vhodné pro aplikace, kde tvoří magnetický obvod vysokofrekvenčních transformátorů. [1][2]

## 1.2.2 Magneticky tvrdé materiály

Jak již bylo řečeno, budící magnetický tok lze vytvořit i permanentními magnety a nahradit tak vinutí, které by mělo právě takovou úlohu. Důležitými vlastnostmi je remanence (která je zachována po namagnetování), koercivita (nutná k zmagnetování), Curieova

<sup>7</sup>V magneticky anizotropních materiálech může docházet k magnetizaci v určitém směru snáze než ve směru jiném. [1][2]

<sup>8</sup>Magneticky izotropní materiál má magnetizaci ve všech směrech stejnou. [2]

teplota  $T_c$  nebo maximální součin  $(B \cdot H)_{max}$ . Dále je důležitým parametrem i měrná hmotnost. [1]

Nejvýznamnější permanentní magnety jsou vyrobeny z následující magneticky tvrdých materiálů:

- Magneticky tvrdé ferity;
- Slitiny s kovy vzácných zemin;
- Slitiny typu AlNiCo.

Magneticky tvrdé ferity se vyznačují komplikovanou krystalickou strukturou, kde krom oxidů barya, stroncia nebo olova figuruje šesterečná sekce  $6 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Takovéto magnety mohou být vyhotoveny pomocí práškové metalurgie jako magnety izotropní nebo anizotropní, které jsou lisované v magnetickém poli. Teplota  $T_c$  takovýchto magnetů je  $450^\circ\text{C}$  a hustota je  $4500 \text{ kg/m}^3$ . Vzhledem k ferimagnetickým vlastnostem je remanentní indukce poměrně nízká a navíc s rostoucí teplotou klesá. Výhodou těchto magnetů je však jejich nízká cena. Výhodné může být i spojení ferimagnetického prášku vhodným pojivem a vytvořit tak pružný či ohebný permanentní magnet. [1][2]

Naproti tomu permanentní magnety na bázi slitin s kovy vzácných zemin jsou velmi silnými a drahými magnety. Vyrábějí se práškovou metalurgií při působení magnetického pole. Jedná se o křehké a tvrdé materiály. Mezi nejvýznamnější zástupce patří samarium-kobaltové magnety (SmCo) či neodymové magnety (NdFeB). Namísto samaria je možné použít i jiné prvky ze skupiny lanthanoidů, protože samarium je poměrně nedostatkové. Kobalt lze částečně nahrazovat mědí či železem. Neodymové magnety mají původ ve snaze vytvořit alternativu k magnetům založeným na samariu. Neodymium má ve vzácných zeminách častější výskyt než samarium a je tím pádem i cenově dostupnější. Permanentní magnety na bázi vzácných zemin dosahují velkého maximálního součinu  $(B \cdot H)_{max}$  a mají vysokou hodnotu koercivity. [1][2]

Permanentní magnety na bázi slitin typu AlNiCo mohou být zhotoveny odléváním nebo procesy práškové metalurgie. Tento typ magnetů je tvrdý a křehký, a proto jsou obrobitelné pouze broušením. Základním prvkem těchto magnetů je hliník (Al), nikl (Ni) a často je přítomen i kobalt (Co). Za účelem zlepšení magnetických a technologických vlastností jsou coby přísady přidávány i následující prvky: měď (Cu), titan (Ti) nebo niob (Nb). Co se týče síly těchto magnetů, AlNiCo magnety se nachází někde mezi ferity a magnety na bázi slitin s kovy vzácných zemin. [1][2]

Dále existují magneticky tvrdé slitiny CuNiFe, CuNiCo, PtCo. Tyto slitiny jsou dobře tvářitelné za tepla i za studena a před vyvržením je lze obrábět. Tyto výhody mohou být použity při výrobě magnetů specifických tvarů a jejich nasazení se nachází v aplikacích, kde se objevují vyšší nároky na mechanické vlastnosti. Magnety zhotovené ze slitin CuNiFe mají střední velikost  $(B \cdot H)_{max}$  a magnety na bázi PtCo mají vysoké hodnoty

$(B \cdot H)_{max}$ , ale jejich cena je také významně vysoká, a proto jsou spíše používány magnety na bázi kovů vzácných zemin. Dalším zástupcem magnetických tvrdých materiálů mohou být slitiny FeCrCo, které mají strukturu i vlastnosti podobné magnetům vyrobeným ze slitin typu AlNiCo. Mezi odlišné vůči jmenovaným lze řadit magneticky tvrdé materiály ESD. Jedná se o kompozitní materiály zhotovené elektrolytickým vyloučením částic FeCo a jejich následným paralelním uspořádáním v pojivu. S pomocí těchto materiálů lze vyrobit tvarově přesné magnety. [1][2]

### 1.3 Elektroizolační materiály

V této problematice je nutno rozlišovat několik základních pojmů. Materiály označované jako dielektrika jsou takové materiály, které jsou schopny vytvořit a uchovat vlastní vnitřní elektrické pole. Jedná se tedy o schopnost polarizace ve vnějším elektrickém poli. Izolant je takový materiál, který vyplňuje prostor mezi částmi s různým elektrickým potenciálem, což je zároveň primární úkol EIS. Každý izolant se dokáže ve vnějším poli polarizovat, a vytvořit tak vnitřní elektrické pole. Každé dielektrikum však nedovede oddělit dvě místa s různým elektrickým potenciálem. Navzdory různým podobným vlastnostem však konkluzí zůstává, že každý izolant je dielektrikum, ale každé dielektrikum nemusí nutně být izolant. Dielektrikum je proto obecnější pojem. Vzájemný vztah je znázorněn na obrázku 1.5. Izolátor je již technologicky provedený výrobek z izolačního materiálu. Elektroizolační systém (EIS) se skládá z elektroizolačních materiálů, případně již z hotových izolátorů. EIS je nepostradatelnou součástí všech elektrických strojů. [1][2][9][10]

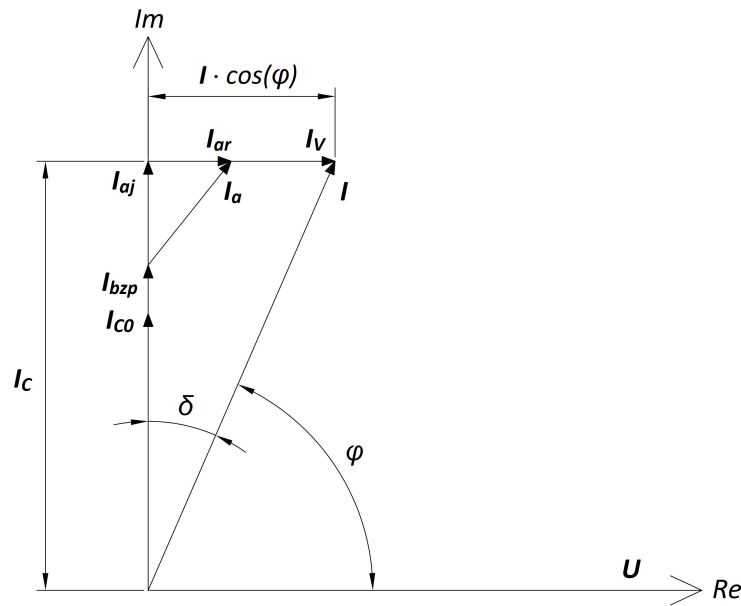


Obrázek 1.5: Vztah mezi pojmy "dielektrikum" a "izolant" dle [9]

Mezi nejdůležitější parametry pro posuzování dielektrika, resp. izolace, patří následující:

- Polarizace;
- Permittivita;
- Elektrická pevnost;
- Ztrátový úhel;
- Rezistivita.

Některé z těchto parametrů obsahuje fázorový diagram reálného dielektrika, který je uveden na obrázku 1.6.



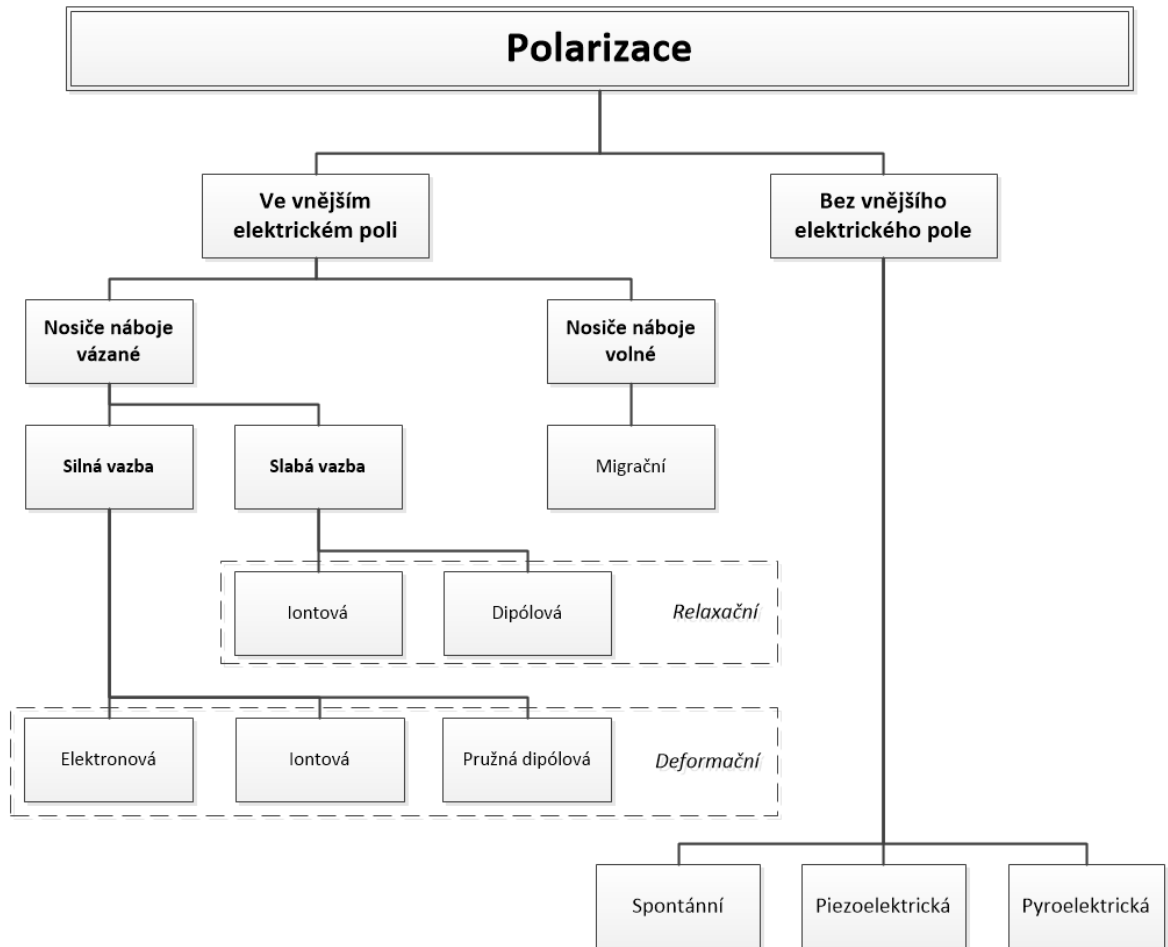
Obrázek 1.6: Fázorový diagram reálného dielektrika dle [9]

Dle [9] je polarizace  $\vec{P}$  klíčovým dějem, který v dielektriku probíhá, a popsán je pomocí rovnice (1.7). Zde  $\Delta\vec{M}$  značí dipólový moment v elementu objemu látky  $\Delta V$ . Polarizace lze dělit na polarizace v přítomnosti elektrického pole a polarizace spontánní. Dále lze polarizace materiálů za přítomnosti pole dělit na takové, kde jsou nosiče náboje vázány nebo jsou volné. Pokud jsou v objemu materiálu nosiče náboje<sup>9</sup> volné, jedná se o polarizaci migrační. S touto polarizací je spojena polarizace objemová a polarizace prostorovým nábojem. Materiály se strukturálně vázanými nosiči náboje mohou vykazovat polarizace ztrátové (relaxační) při slabé vazbě nosičů náboje a bezztrátové (deformační) při silné vazbě nosičů náboje. Přehled polarizací je uveden v obrázku 1.7. Některé polarizační procesy mohou být velmi důležité i pro diagnostické procesy. Například pozorování absorpčního proudu v čase a s tím spojené určování polarizačního indexu. [1][9][10]

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{M}}{\Delta V} \quad (1.7)$$

Obecný vztah pro definici permitivity se nachází v rovnici (1.8). Permitivita sestává ze součinu relativní permitivity a permitivity vakua, která je stanovena na  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m. Při rovnoběžném uspořádání elektrod a homogenním poli lze elektrickou indukci  $D$  a elektrickou intenzitu  $E$  dosazovat přímo dle velikosti bez uvažování směru působení. [1][9]

<sup>9</sup>Nosičem náboje jsou takové částice, které nesou elementární náboj  $q$ . Mohou jimi být elektrony či ionty. [9]



Obrázek 1.7: Rozdělení typů polarizací dle [9]

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = \frac{\vec{D}}{\vec{E}} \quad (1.8)$$

Relativní permitivita určuje míru změny kapacity dielektrika  $C_x$  oproti dielektriku, které při stejných rozměrech tvoří vakuum  $C_0$ . Tato skutečnost je zachycena v rovnici (1.9). Izolační materiály mají hodnoty relativní permitivity v řádech  $10^0$ . [9]

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1.9)$$

Jedním z nejdůležitějších parametrů elektrické izolace vůbec je elektrická pevnost  $E_p$ . Ta určuje, při jakém průrazném napětí  $U_p$  dojde k průrazu. Elektrická pevnost je definována vztahem (1.10). Průraz je ztráta izolační schopnosti, která vede k prudkému nárůstu elektrického proudu vlivem ztráty izolačního odporu. V případě pevných izolantů je poškození nenávratné a v případě plyných a kapalných izolačních materiálů se jedná o přeskok, který může krátkodobě či trvale zhoršit vlastnosti izolantu. [1][9]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1.10)$$

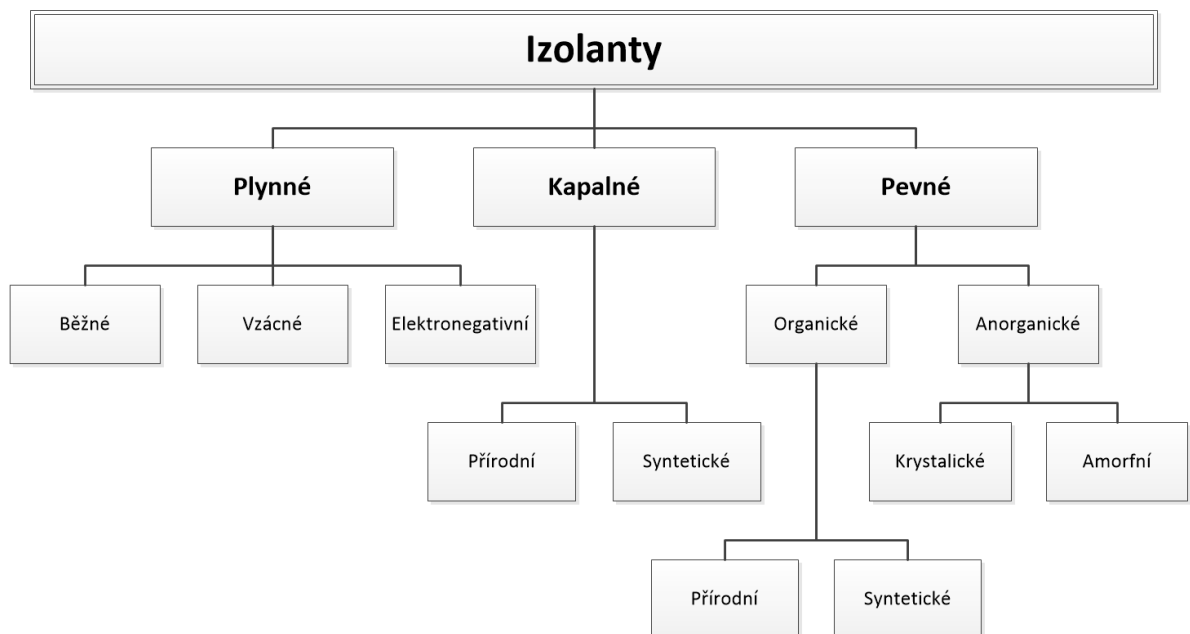


Z fázorového diagramu uvedeného na obrázku 1.6 plyne, že kromě fázového posunu  $\varphi$  zde figuruje jako doplněk do  $90^\circ$  úhel  $\delta$ . Tento úhel se nazývá ztrátový úhel. Reprezentuje ztráty v dielektriku, které jsou uváděny jako hodnota funkce tangens tohoto úhlu. Hodnota  $\tan(\delta)$  se nazývá ztrátový činitel. Dielektrické ztráty  $\Delta P_d$  jsou určovány dle vztahu (1.11). Figuruje zde právě ztrátový činitel  $\tan(\delta)$  a dále je to napětí  $U$ , kapacita  $C_x$  a úhlová rychlost  $\omega$ , v níž je obsažena frekvence  $f$ . Dielektrické ztráty se zvyšují i s rostoucí teplotou, protože ta usnadňuje pohyb nosičů náboje obsažených v materiálu. Tyto ztráty jsou nežádoucí, neboť ztrátové teplo je příčinou stárnutí izolace. [1][9][10]

$$\Delta P_d = \tan(\delta) \cdot U^2 \cdot C_x \cdot \omega \quad (1.11)$$

Pojem rezistivita a konduktivita byl již uveden v souvislosti s materiály, které jsou elektricky dobře vodivé. Izolanty jsou těmito hodnotami rovněž popisovány. S tím rozdílem, že požadované vlastnosti izolačních materiálů určují, že měrná vodivost musí být co nejnižší a rezistivita tím pádem, pokud možno, co nejvyšší. Ideální izolant neobsahuje žádné volné nosiče náboje, a tak nevzniká elektrický proud. Skutečné izolanty však nulovou konduktivitu nevykazují a existuje tzv. vodivostní proud. Kvalitní izolanty dosahují rezistivity až  $10^{12} \Omega \cdot m$ . Pro pevné izolanty je navíc uváděna i rezistivita vnitřní a povrchová. [1][3][9] Mimo elektrické vlastnosti EIS mohou být stejně důležité i vlastnosti mechanické, protože EIS je často při provozu vystaven značnému mechanickému namáhání. Je zapotřebí brát v úvahu působení statických a dynamických sil. [1]

Materiály EIS lze dělit dle skupenství a dle prvků, ze kterých je materiál složen. Toto rozdělení je zpracováno v obrázku 1.8.



Obrázek 1.8: Dělení izolanů dle [1]

### 1.3.1 Plynné elektroizolační materiály

Tato kategorie mezi dalšími vyniká nejnižšími hodnotami relativní permitivity, dielektrických ztrát a v nezionizovaném stavu mají nejmenší konduktivitu. Jejich výhodou je rovnoměrné zaplnění prostoru aplikace a regenerace po přeskoku. Z běžných plynů je jako elektroizolační nejběžněji používaný vzduch. Dále je používán vodík, dusík a oxid uhličitý. Vodík má oproti vzduchu výhodu ve 14 násobně menší hustotě a v 7 násobně vyšší tepelné vodivosti. Dusík se v transformátorech používá jako inertní atmosféra v transformátorech s EIS typu olej-papír. Ze vzácných plynů jsou to inertní plyny - helium, neon, argon, krypton a xenon. Skvělé vlastnosti má elektronegativní fluorid sírový ( $\text{SF}_6$ ), který je zároveň nejpoužívanějším z této skupiny. Má 2,3 násobně lepší přestup tepla a téměř trojnásobně vyšší elektrickou pevnost než vzduch. Dielektrické ztráty jsou v podstatě neměřitelné. Je nepolární, bezbarvý, bez zápachu, nehořlavý (do tlaku 50 kPa). Používá se v zapouzdřených rozvodnách a v suchém typu transformátorů jako izolační a chladicí médium. [1][9]

### 1.3.2 Kapalně elektroizolační materiály

V elektrotechnice se kromě elektroizolačních vlastností kapalných izolantů využívá i poměrně vysoká tepelná vodivost a viskozita, a proto jsou zároveň využívány jako chladiva. Značnou výhodou kapalných izolantů je, že jsou rovněž schopny obnovit elektroizolační schopnosti. Zde ovšem již dochází k hromadění produktů vzniklých po přeskoku, které omezují jejich životnost a zhoršují elektrické a izolační vlastnosti. Dle obrázku 1.8 jsou děleny dle původu na přírodní a syntetické. Přírodní se dále dělí na rostlinné a minerální. Rostlinné oleje lze poté ještě členit na nevysýchavé a vysýchavé, u kterých dochází k souběžné oxidaci a polymeraci. Minerální oleje se získávají destilací a rafinací ropy. Svě vlastnosti mohou značně měnit vlivem prostředí, ve kterém je EIS, ve kterém jsou obsaženy, provozován. Zásadní vliv má teplota, záření, vlhkost, pohlcování nečistot a oxidace. Oxidaci lze zabránit aplikováním vrstvy plynu, který by olej oddělil od atmosféry s kyslíkem, nebo aplikací inhibitoru<sup>10</sup>. Nevýhodou minerálních olejů je možná kontaminace okolí při havárii a jejich hořlavost. Syntetické oleje jsou méně hořlavou či nehořlavou alternativou k olejům minerálním. Syntetické oleje mohou být silikonové nebo na bázi organických esterů, fluorovaných sloučenin či kapalin vzniklých polymerací polybutylenu. [1][9][10]

### 1.3.3 Pevné elektroizolační materiály

Na rozdíl od plyných a kapalných izolantů nemají pevné izolanty schopnost regenerace a po průrazu dochází k nevratnému poškození struktury. Pevné izolanty jsou velmi rozmanitou skupinou elektroizolačních materiálů. V první řadě lze rozlišovat, zda se jedná o materiál anorganický či organický. Mezi anorganické materiály krystalické patří azbest

<sup>10</sup>Inhibitor je přísada, která prodlužuje životnost oleje. [1]

a slída. Pro svou zdravotní závadnost bylo od používání azbestu upuštěno a významnou je tedy slída a slídové výrobky. Slída se vyskytuje jako hořečnatá (flogopit) a draselná (muskovit). Hojně jsou využívány mikanity, kde jsou slídové lístky v nepozměněné formě, a materiály z rekonstruované slídy (remikanity) ve formě slídového papíru. Důležitými pevnými izolanty jsou polykrystalické keramiky. Zástupci amorfních anorganických izolantů jsou křemičitá a boritá skla. Organické elektroizolační materiály mohou mít původ přírodní či syntetický. Přírodní jsou pryskyřice jako je šelak, kalafuna či jantar. Dále jimi může být dřevo, papír či přírodní kaučuk. Syntetickými elektroizolačními materiály jsou makromolekulární látky s velmi univerzálním použitím v této oblasti. Struktura takovýchto látek může být amorfní i krystalická. Další obsáhlou skupinou pevných elektroizolačních materiálů jsou kompozity. [1][9]

Pevné elektroizolační materiály jsou z hlediska posuzování degradačních procesů těmi nejsložitějšími. To je způsobeno tím, že se v elektrotechnických aplikacích vyskytuje značné množství různých druhů dle modifikací základních materiálů a kombinací různých složek kompozitů. Není tedy snadné najít veškeré interakce mezi použitými materiály a degradačními procesy.

### 1.3.4 Teplotní třídy EIS

EIS je také možné dělit podle tzv. teplotních tříd. Ty jsou v technické praxi velmi důležité, protože určují použitelnost daných materiálů pro izolaci stroje, který byl jistým způsobem navržen a má tedy určené ztráty a provozní teplotu, které musí EIS odolávat. V tabulce 1.2 jsou tyto třídy uvedeny. [7][9]

Tabulka 1.2: Teplotní třídy dle [7]

Teplotní třída	Původní značení	Hot spot teplota	Dovolené oteplení
90	Y	90	-
105	A	105	60
120	E	120	75
130	B	130	80
155	F	155	100
180	H	180	125
200	-	200	-
220	-	220	-
250	-	250	-

### 1.3.5 EIS v elektrických strojích

Různé elektrické stroje mají svá technologická specifika při postupu výroby EIS. Elektrické stroje točivé pro nízká napětí (NN) mají v drážkách vsypávané vinutí, kde jsou jednotlivé vodiče izolovány tenkou vrstvou, kterou je zpravidla lak. Vyložení drážky je provedeno

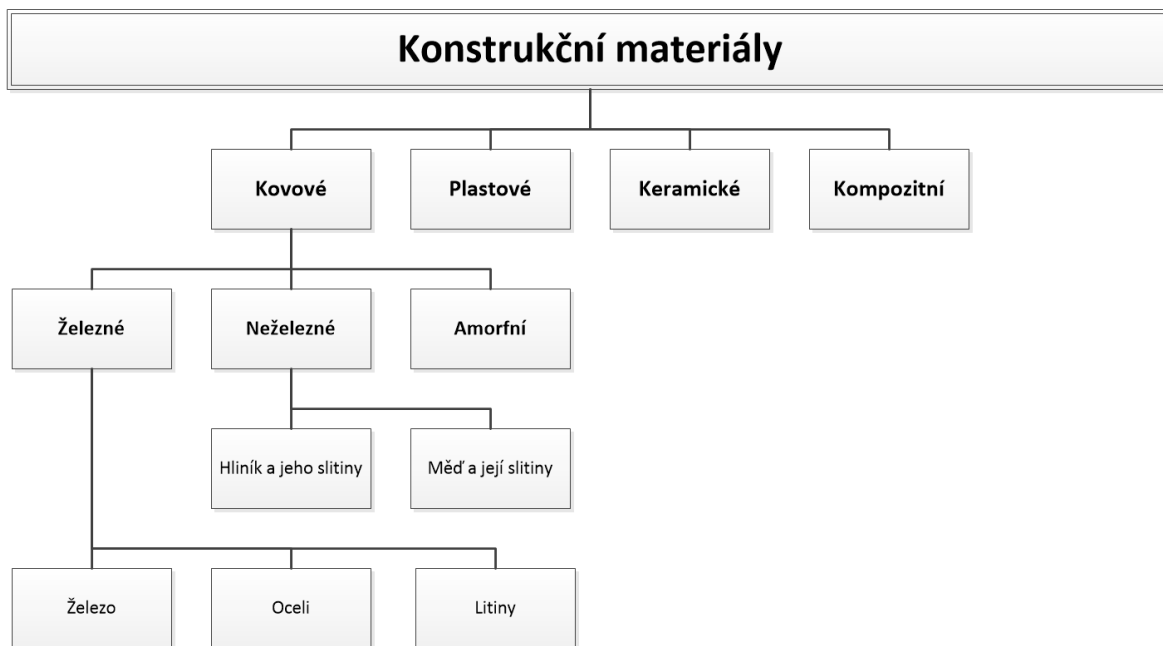
materiály, kterými jsou drážková lepenka nebo různé kompozitní materiály. Vinutí je po založení do takto upravené drážky impregnováno pryskyřicí, a to máčením, zaplavením nebo zakapáváním. [9]

Vysokonapěťové točivé stroje pro napětí vyšší než 3 kV mají statorové vinutí zhotovené formou předzpracovaných statorových tyčí. Drážka je opět vyložena drážkovou izolací a nachází se zde další možné vrstvy a výplně. Nejdůležitějším je však technologie izolace statorových tyčí, která je prováděna technologií, při níž kompozit již obsahuje pryskyřici (Resin Rich - RR), nebo je využito vakuově tlakové impregnace (Vacuum Pressure Impregnation - VPI). V technologii RR je využíván tříslóžkový kompozit. Nosnou složkou bývá skleněná tkanina, izolační funkci plní kalcinovaný slídový papír a kompozit již obsahuje 30 až 40 % epoxidové pryskyřice coby pojiva. Tyče ovinuté tímto kompozitem jsou následně vytvrzovány ve speciálních přípravcích. V porovnání s VPI je největší výhodou takového EIS možná opravitelnost a menší náročnost na vybavení. Nevýhodou je nižší homogenita vyrobeného EIS. Alternativou je technologie VPI. Využíván je zde savý elektroizolační materiál, který se skládá opět ze tří složek. Nosným komponentem je skleněná tkanina, polyesterové rouno nebo polyimidová fólie. Jako elektroizolační bariéra je zde použit nekalcinovaný slídový papír. Pojivo se zde vyskytuje maximálně do 7 % a jedná se o epoxidové, polyesterové nebo silikonové pryskyřice bez obsahu rozpouštědel. Proces výroby začíná sušením. Poté je stator se založeným připraveným vinutím vložen do impregnační nádoby, kde je aplikováno vakuum pro odstranění zbytků těkavých látek a vlhkosti a následuje zaplavení impregnačním materiálem ode dna nádoby. Po odstranění podtlaku je zaveden přetlak. Po vyprázdnění impregnační nádoby a odkapání impregnace se stator přemístí do prostoru určenému k sušení, kde je sušen nejdříve za pozměněných tlakových podmínek. Vytvrzování probíhá při normálním tlaku a proudění teplého vzduchu. Tento způsob je podstatně náročnější na vybavení, ale je dosahováno vysokého stupně homogenity EIS a úspory materiálu o až 6 % vlivem možného zkrácení cívek. Z důvodů velkých rozměrů může být však problém tímto způsobem připravovat EIS pro výkonné generátory. Obě tyto technologie umožňují výrobu takového EIS, který obsahuje minimum mezer. Pro stroje pro jmenovité statorové napětí vyšší než 6 kV je používána ještě vrstva, která mění rozložení elektrického pole a omezuje tak koronové výboje. Tato je ovinuta jako poslední a nachází se tak mezi povrchem statorové tyče a statorovými pakety. [7][9][26]

Transformátory jsou vyráběny jako suché, zalévané a s EIS olej-papír. Suché transformátory jsou takové, kde je izolačním médiem vzduch nebo SF<sub>6</sub>. Izolační vzdálenosti jsou přiměřeně velké vzhledem k použitému izolačnímu plynu. V takovýchto transformátorech není přistoupeno k použití tekutého impregnantu. Zalévané transformátory mají cívky zalité pryskyřicí. Případně může být u těchto transformátorů použita technologie RR nebo VPI. Transformátory s EIS olej-papír využívají jako hlavní izolační médium elektroizolační olej, který zároveň plní funkci chladiwa. Dále jsou použity materiály jako papír, lepenky a kompozity. Takové transformátory nejsou limitovány z hlediska dosažitelných výkonů či napětí. [9]

## 1.4 Konstrukční materiály

Neméně důležitými materiály, které jsou použity při stavbě elektrických strojů, jsou materiály konstrukční. Převážně jsou využívány kovové materiály, ale mohou to být i alternativní modernější materiály, a to plastové, keramické a kompozitní. Rozdělení konstrukčních materiálů je uvedeno v obrázku 1.9. [2]



Obrázek 1.9: Dělení konstrukčních materiálů dle [2]

Důležitými parametry pro posouzení kovového konstrukčního materiálu jsou:

- Fyzikální;
- Fyzikálně-chemické;
- Mechanické;
- Technologické.

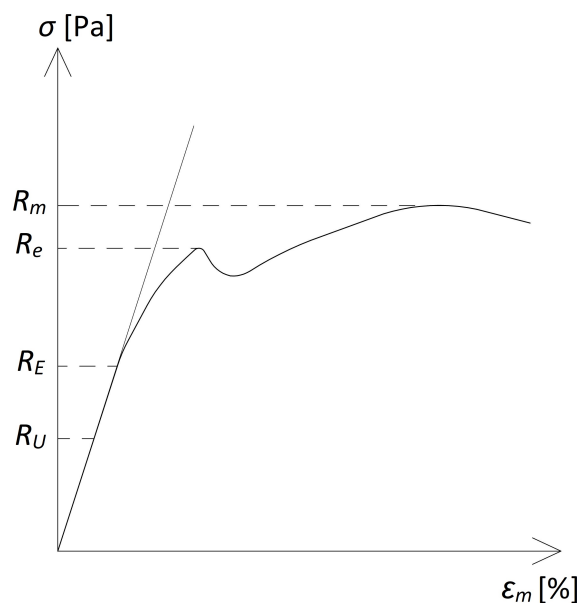
Fyzikální vlastnosti jsou například: magnetické vlastnosti, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, tepelná a elektrická vodivost. Mezi fyzikálně-chemické lze řadit elektrochemické, emisní a korozní vlastnosti. Obzvláště důležitými vlastnostmi jsou vlastnosti mechanické a technologické. Mechanickými vlastnostmi je pružnost, pevnost, tvrdost, houževnatost, křehkost, plastická deformace, elastická deformace, žárupevnost, žáruvzdornost a odolávání tečení, lomu a únavě materiálu. Technologické vlastnosti určují, jakým způsobem může být konstrukční materiál zpracován. Jde tedy o tvárnost, obrobitelnost, svařitelnost či slévatelnost. [1][2]

Lze si tedy povšimnout, že některé důležité vlastnosti konstrukčních materiálů jsou důležité i pro ostatní typy funkčních systémů materiálů, jakými jsou elektrické vodiče, magnetické materiály, permanentní magnety nebo EIS.

Pro posuzování konstrukčního materiálů je jedním z nejdůležitějších parametrů mechanická pevnost. Ta může být vyjádřena mezi pevnosti v tahu  $R_m$ . Aplikované mechanické zatížení způsobuje deformaci materiálu. Tuto deformaci lze rozdělit na elastickou a plastickou. Elastická deformace je vratná a plastická deformace nevratná. Mechanické zatížení lze vyjádřit jako mechanické napětí normálové  $\sigma_m$ , případně  $\tau_m$  pro mechanické napětí tečné (smykové). Normálové mechanické napětí je určeno jako síla  $F$  působící na určitý průřez materiálu  $S$  dle vztahu (1.12). [2]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1.12)$$

Průběh deformace  $\epsilon_m$  v závislosti na tomto zatěžování je vyjádřen tzv. tahovým diagramem, který je uveden v obrázku 1.10. Takto by mohl vypadat tahový diagram měkké oceli. Nachází se zde několik různých mezí. Kromě zmínění meze pevnosti v tahu  $R_m$  se jedná o mez úměrnosti  $R_U$ , mez pružnosti  $R_E$  a mez kluzu  $R_e$ . [1][2]



Obrázek 1.10: Tahový diagram měkké oceli dle [1] a [2]

Důležitým fyzikálním zákonem v oblasti mechanického namáhání je Hookův zákon. Ten popisuje vztah mezi mechanickou deformací a mechanickým napětím lineární funkcí. Tento je uveden ve vztahu (1.13). Platí pouze v oblasti od nulového mechanického namáhání tahem do meze úměrnosti  $R_U$ . Je takto definován Youngův modul pružnosti v tahu  $E$ , což je významný mechanický parametr. Jedná se v podstatě o míru pružnosti materiálu, která vyjadřuje, jak velké mechanické namáhání musí být aplikováno pro dosažení určité deformace. Za mezí úměrnosti se nachází oblast, která trvá až k mezi pružnosti  $R_E$ . Zde stále nedochází k plastickým deformacím materiálu. Za touto mezí již dochází k mě-

řitelným trvalým deformacím až do meze kluzu  $R_e$ . Za mezí kluzu již dochází k výrazným plastickým deformacím, až dojde k přetržení materiálu v bodě, který je označován jako mez pevnosti  $R_m$ . [1][2]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_m} \quad (1.13)$$

Vyjma tahových zkoušek jsou realizovány i zkoušky statickým namáháním tlakem, ohybem, krutem či stříhem. Kromě statického namáhání jsou prováděny i zkoušky rázové a zkoušky cyklickým mechanickým namáháním. [1]

### 1.4.1 Kovové konstrukční materiály

Nejdéle používanými a nejrozšířenějšími materiály jsou materiály kovové na bázi železa. Jedná se tedy o železo samotné, oceli a litiny. Kromě těchto materiálů lze použít i kovové materiály neželezné a amorfni.

#### Oceli

Dle obsahu uhlíku lze materiály na bázi železa dělit na technicky čisté železo (uhlík do 0,03 %) a oceli (uhlík do 2 %). Jak již bylo uvedeno, železo je využíváno zejména pro své magnetické vlastnosti. Čisté železo má vysoké náklady na výrobu, a proto je přistoupeno k použití ocelí či litin coby konstrukčních materiálů. Obsah uhlíku v oceli nad 2 % má za následek ztráty pružnosti. Vlastnosti uhlíkových ocelí lze ovlivnit technologickými postupy, kterými jsou zejména žíhání a kalení. Žíháním se dosahuje dobré houževnatosti, ale menší pevnosti. Kalením je zvýšena pevnost a tvrdost materiálu. [1][2]

Oceli konstrukční tvářené mohou být vyráběny v obvyklé jakosti nebo jako ušlechtilé oceli, které se vyznačují větší čistotou, tedy nízkým obsahem uhlíku a přípustným obsahem fosforu a síry. Prochází důkladnou výrobou a kontrolou. Oceli mohou být zúšlechťovány legováním. Tyto legury mohou být mangan, chrom, molybden, nikl, hliník, niob, olovo, vanad, bismut, křemík, zirkon a další. Podle celkového obsahu těchto legujících přísad se rozdělují na nízko, středně, výše a vysoce legované. Legováním se dosahuje vyšší pevnosti, tvrdosti, houževnatosti, korozivzdornosti, žárupevnosti a žáruvzdornosti. Konstrukční oceli tvářené se využívají pro výrobu plechů statoru generátorů s hladkým rotorem, svorníky pro stahování magnetických obvodů, hřídele a malé rotory. [1][2]

Konstrukční oceli pro odlévání složitých tvarů se používají opět v uhlíkovém i slitinovém provedení. S obsahem uhlíku do 0,25 % se jedná o oceli dobře spojitelné svařováním. Tento typ ocelí se používá v oblasti elektrických strojů například pro stahovací kruhy, ložiskové stojany, pánve a tělesa ložisek a pro kostry asynchronních motorů. Z ocele mohou být vyráběny i sběrací kroužky strojů, kde je nutno použití kluzného kontaktu. [1][5]

Existují i typy ocelí s určitými speciálními fyzikálními, tepelnými, elektrickými nebo magnetickými vlastnostmi. Z těchto jsou v elektrických strojích významné nemagnetické

oceli, které se používají v částech strojů, kde nejsou svými mechanickými vlastnostmi dostačující jiné používané materiály (měď a hliník). Nejčastěji je lze nalézt jako nemagnetické obruče umístěné na rotoru turbogenerátorů, které tvoří kruhy nakrátko tlumiče. [1]

## Litiny

Slitiny s obsahem uhlíku od 2 do 4 % se nazývají litiny. Vysoký obsah uhlíku má za následek ztrátu pružnosti a litiny jsou tedy materiály křehké. Jsou rovněž více zastoupeny příměsí jako mangan, křemík, fosfor a síra. Litiny se vyznačují poměrně nízkou cenou a jsou hojně využívány právě jako konstrukční materiál. Proto jsou jejich nejdůležitějšími vlastnostmi právě ty technologické a mechanické.

Bílé litiny jsou charakteristické svou křehkostí, tvrdostí a špatnou obrobitelností. Obrábět je lze pouze broušením. Konstrukčně zajímavější jsou litiny grafitické. Ty lze dále dělit na litiny šedé, tvárné a temperované. Šedé litiny jsou nejrozšířenějším slévárenským materiálem a ve srovnání s ocelí mají výrazně nižší pevnost v tahu, krutu i ohybu, ale pevnost v tlaku a tvrdost není výrazně odlišná. Výrobky ze šedé litiny mohou být pouzdra ložisek a další strojní součásti. Tvárné litiny jsou již houževnatější, a proto svými mechanickými a technologickými vlastnostmi tvoří vhodnou materiálovou alternativu k ocelím. Opět se využívají k výrobě strojních součástí, ale pro obecně horší slévateľnost, než mají šedé litiny, je použití omezenější. Temperovaná litina je tvořena dlouhodobým žháním neupravených odlitků bílé litiny. Je vhodná k aplikacím ve středně namáhaných konstrukčních částech. Je dobře obrobitelná, odolává korozi a je poměrně levným materiálem. Litiny je možné, podobně jako oceli, modifikovat pomocí legur. Litiny tak získávají lepší mechanické vlastnosti nebo speciální fyzikální vlastnosti. Může se jednat například o austenitické litiny s přísadou manganu. [1]

## Hliník a jeho slitiny

Čistý hliník nemá z konstrukčního hlediska tak velký význam, neboť je značně měkký a má malou pevnost v tahu. Ke konstrukčním aplikacím není v čisté formě vhodný ani kvůli své tendenci k tečení za studena při působení tlaku. Výhodou však zůstává přirozené pokrývání povrchu oxidem hliníku, který zamezuje korozi. Problémem může být styk s jiným kovem, kdy dochází k elektrochemické korozi. Tomu lze zabránit úpravou povrchu eloxováním. Významnějšími jsou z hlediska použitelnosti tepelně zpracované hliníkové slitiny a hliník tvářený za studena. [2]

Nejvýznamnější tvářenou hliníkovou slitinou je dural (Duralumin). Tato slitina kromě hliníku obsahuje zhruba 4 % mědi a případně další příměsí, kterými jsou nejčastěji hořčík nebo mangan. Dural má ve vytvrzeném stavu pevnost i přes 400 MPa. Důležitým využívaným prvkem v těchto slitinách je zinek, který ve správné koncentraci s dalšími příměsami (mangan, hořčík, měď) může zvýšit pevnost slitiny až na 580 MPa. [2]

Ve slévárenských slitinách hliníku se uplatňuje legování křemíkem. Nejvýznamnějším



je silumin s obsahem zhruba 12 % křemíku a pevností zhruba 200 MPa. Taková slitina je značně křehká. Tato vlastnost může být zlepšena dalšími přísadami, kterými jsou opět mangan, hořčík nebo měď. [2]

Mimo využití hliníku coby elektrického vodiče je rovněž často přistoupeno k jeho použití k výrobě hliníkových chladičů. Jedná se zejména o oblast elektroniky a výkonové elektroniky, ale mohou to být chladiče pro obecné použití, například v tepelném výměníku v chladicím okruhu uzavřeného elektrického stroje. Výhodou je již zmíněná snadná povrchová úprava k zakonzervování takového výrobku. Hliník díky své tepelné vodivosti snadno přijme ztrátové teplo od jeho zdroje formou kondukce<sup>11</sup> a posléze jej předává volnou či nucenou konvekcí<sup>12</sup> do okolí. Zmíněné vlastnosti hliníku dovolují odlévat takové tvary, kdy je výrazně zvýšena plocha chladiče, a tím je dosaženo lepšího efektu konvekce. [6][8][13]

## Měď a její slitiny

Obecné vlastnosti mědi a jejích slitin (bronzy a mosazi) byly uvedeny v sekci, která se zabývala vodivými materiály. Pro doplnění jsou níže uvedena i použití těchto slitin coby konstrukčních materiálů.

Křemíkové bronzy (Si do 5 %) jsou velmi pevné a rovněž odolávají korozi. Beryliové bronzy (Be do 2,5 %) lze pro svou pevnost a pružnost srovnávat s oceli. Některé typy bronzů se mohou používat pro mechanicky namáhané konstrukční prvky, jako jsou například pružiny nebo pera. [3]

Mosazi k odlévání obsahují 58 až 63 % mědi a výrobky zhotovené formou odlitků se provádějí jako armatury či různé držáky. Mosaz může být využita i k výrobě chladičů. [1][2]

## Amorfní kovové materiály

K amorfní struktuře dochází velmi rychlým ochlazením roztavených kovů. Materiál je vyhotoven ve formě tenkých pásků a používá se jako zpevňovací konstrukční vrstva. Kovová skla mohou dosahovat vysoké mechanické pevnosti, která je 2000 až 3000 MPa. Amorfní struktura je však tepelně nestabilní a při zahřátí zhruba na polovinu teploty tavení může dojít k přechodu ke struktuře krystalické. [2]

### 1.4.2 Alternativní konstrukční materiály

Kromě kovových materiálů existuje celá řada jiných alternativních materiálů, které mohou stejně dobře plnit požadavky na konstrukční materiál. Níže bude uveden popis a někteří zástupci plastových, keramických a kompozitních konstrukčních materiálů.

<sup>11</sup>Přenos tepla vedením. Jedná se o přestup tepla mezi pevným tělesem a jiným pevným tělesem. [13]

<sup>12</sup>Přenos tepla prouděním. Jedná se o přestup tepla mezi pevným tělesem a kapalinou či plynem. [13]

## Plasty

Coby konstrukční materiál se v elektrotechnice polymerní materiály používají pro své výhodné dielektrické vlastnosti zejména k výrobě plastových krytů a izolací vodičů či kabelů, které mohou ale plnit i funkci nosnou. Lze také využít dobré kluzné vlastnosti a odolnost oproti opotřebení pro výrobu ozubených kol či ložisek. [2]

## Keramika

Ideální vlastnosti těchto materiálů jsou dány rovnoměrným rozložením přísad, pórovitostí, homogenností zrn a charakterem hranic zrn. Na rozhraních dochází ke koncentraci nečistot a poruch struktury a vznikají zde mikrotrhliny, které nakonec vedou k lomu materiálu. Konstrukční keramické materiály jsou charakteristické velkou tvrdostí a pevností i při vysokých teplotách, malou tepelnou roztažností, vysokou otěruvzdorností a odolností vůči vysokoteplotní korozi. Nevýhodou oproti kovovým materiálům je jejich křehkost a problematické spojování. V elektrotechnice se často využívají jako nosné a mechanicky pevné izolátory. Jako zástupce této kategorie lze uvést například korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), oxid zirkoničitý ( $\text{ZrO}_2$ ), silikon karbid ( $\text{SiC}$ ) nebo aluminiumtitanát ( $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ). [2]

## Kompozity

Vlastnosti kompozitních materiálů nejsou prostým součtem vlastností dílčích komponent, ale jsou určeny jejich synergií. Minimálním počtem pro vícesložkový materiál jsou dva komponenty. Jedná se o matici, která plní roli pojiva, a o výztuž, která zpravidla plní funkci, která je od materiálu očekávána. Kompozity nemusí plnit pouze funkci EIS, ale může se jednat i o kompozity konstrukční. Významnými v oblasti konstrukčních materiálů jsou kompozity s polymerní maticí, která má kromě skvělých mechanických vlastností i dobrou korozivzdornost. Technologie zpracování je již dobře prozkoumána, lze ji vyrobit z dostupných surovin a lze ji snadno zpracovávat do požadovaných tvarů. Jako ztužovací komponenty jsou často využívána vlákna oceli, wolframu, hliníkových či titanových slitin, boru, skla, uhlíku či jiných polymerních látek. Třetí komponentou může být použito plnivo. Tím je dosahováno tvarové stálosti, zvýšení provozní teploty, modulu pružnosti, zlepšení povrchových vlastností a zpracovatelnosti. Plnivo může přispívat k nehořlavosti kompozitu. Negativním dopadem použití plniv může být snížení pevnosti či houževnatosti a zvětšení hustoty. Plnivem mohou být skleněné kuličky, částice kovů, kaolin, slída nebo další polymery. [2]

## 1.5 Chladicí kapaliny, maziva a lepidla

V reálném provozu zařízení je zapotřebí použít další materiály a média, které zabezpečují provoz v souladu s pokyny výrobce nebo které je nutno aplikovat z důvodů, které vznikají

vlivem provozu. Takovými prvky mohou být chladicí média, maziva, pasty a případně lepidla. Jelikož jsou tyto materiály pro provoz zařízení nezanedbatelné, bude jim v této diplomové práci rovněž věnována pozornost.

### 1.5.1 Chladicí kapaliny

V mnohých provezech se nachází elektrické stroje navržené tak, že dokážou své ztrátové teplo odvést pomocí konstrukčních prvků a do okolí je předat volnou či nucenou konvekcí. To ovšem v mnohých případech nestačí a je nutno přistoupit k aktivnímu způsobu chlazení prostřednictvím rozvodu chladicí kapaliny k povrchům, kde má probíhat tepelná výměna. Způsobů, jak zařízení chladit, je více a s odlišnými způsoby jsou spojena i odlišná chladicí média. [8]

Mezi důležité vlastnosti chladicího média patří funkčnost, cena, chemická stabilita, teplota tuhnutí, teplota varu, hustota, viskozita, údržba chladicího systému, bezpečnost, toxicita, hořlavost a možné dopady na životní prostředí. Chlazení lze v zásadě rozlišovat na přímé a nepřímé. [8]

Jedním z přímých způsobů může být sprejové chlazení, při kterém dochází k rozprašování kapaliny na povrchy, které jsou určené k ochlazování, a po kontaktu dojde k odpaření spolu s odebráním tepla povrchu. Tento systém musí obsahovat zachycovací nádrž, filtraci, čerpadlo, chladič, soustavu ventilů a trysky pro rozstřík, které jsou pro tento typ chlazení klíčové. Kvůli riziku elektrického průrazu jsou používány elektroizolační kapaliny, a těmi nejčastěji používanými jsou minerální oleje. [8]

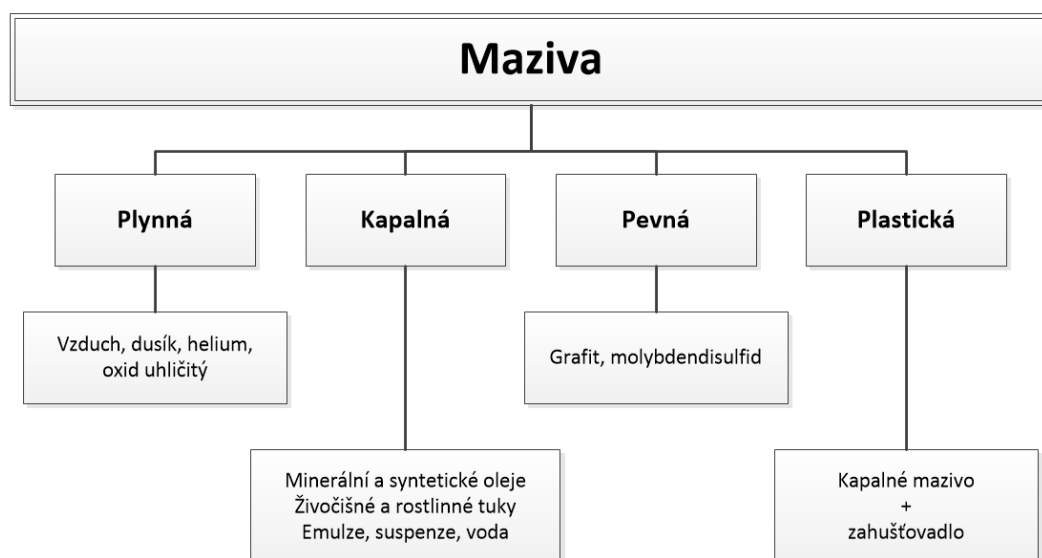
Lze použít chlazení ponořením do média, které dovede plnit chladicí funkci. Tento přístup lze ovšem použít pouze u transformátorů s izolačním systémem olej-papír nebo u pomaluběžných elektrických strojů točivých, pokud to ztráty třením rotujících částí v chladicím médiu dovolují. [8][9]

Nepřímé chlazení prakticky vždy sestává ze dvou či více okruhů, a tak chladivo nepřichází do kontaktu se zdroji tepla. Je tedy vždy použito chladičů, výměníků tepla či ochlazovacích desek coby komponentů, jejichž prostřednictvím chladicí médium předává teplo odebrané v zařízení do okolí. Skutečnost, že chladicí médium nepřijde do kontaktu s aktivními prvky, kterými mohou být vodiče vinutí, je výhodná z hlediska možnosti použití chladiva bez elektroizolačních vlastností, což je například voda a nemrznoucí směs. Jde například o vodu ředěný etylenglykol, propylenglykol, metanol či etanol. [8]

Techniky vedení chladiv a technologické řešení chlazení je obsáhlá problematika týkající se konstrukce a je dobře zpracována ve zdrojích, které se jí zabývají. Jedná se například o [5][8][7].

### 1.5.2 Maziva

Maziva mohou být plynná, kapalná, pevná a plastická. Přehled rozdělení maziv je proveden v obrázku 1.11. [11]



Obrázek 1.11: Rozdělení maziv dle [11]

Plynná maziva jsou využívána v extrémních podmínkách, kde jsou vysoké otáčky a teplota a docházelo by k rozkladu či odpaření kapalných maziv. Výhodou jejich nasazení je eliminace kontaminace olejem, což může být pro některé provozy klíčové. Mezi tyto patří vzduch, dusík, helium nebo oxid uhličitý. [11]

Kapalná maziva jsou napříč všemi provozy těmi nejrozšířenějšími. Důležitým parametrem kapalných maziv je viskozita. Je jí určena tloušťka mazací vrstvy, zatížitelnost, ztráty třením a tím pádem i vznik tepla a opotřebení. V ložiscích s olejovým hospodářstvím určuje i průtok oleje. Viskozita se mění s teplotou a tlakem. Na základě viskozity jsou kapalná maziva vybírána. Viskozita se dělí na dynamickou<sup>13</sup>  $\eta$  a kinematickou  $\nu_k$ , kde kinematická viskozita je definována vztahem dynamické viskozity vůči hustotě maziva  $\rho_M$  dle vztahu (1.14). Kapalná maziva jsou minerální a syntetické oleje, živočišné a rostlinné tuky, emulze, suspenze či voda. Stálost vlastností a odolnost vůči opotřebení kapalných maziv může být zajištěna přidáním aditiv, kterými jsou nejčastěji organické sloučeniny. [11]

$$\nu_k = \frac{\eta}{\rho_M} \quad (1.14)$$

Pevná maziva se využívají při vyšších teplotách a v aplikacích, kde by mohlo být mazivo vlivem odstředivé síly odebráno od lubrikovaných ploch. Mají větší součinitel smykového tření a horší odvod tepla než ostatní typy maziv. Nejpoužívanějšími pevnými mazivy je grafit a molybdensulfid (Molyka). Aplikují se jako prášek, pasta či kluzný lak, který vzniká spojením s plastovým materiálem. Jako pevná maziva mohou být použity i jiné kovy. [11]

<sup>13</sup>Dynamická viskozita představuje sílu potřebnou k posunutí vrstvy o ploše 1 m<sup>2</sup> vůči vrstvě vzdálené 1 m, a to v horizontálním směru o vzdálenost 1 m. [10]

Plastická maziva se jsou složena zhruba z 80 % kapalným mazivem a dále zahušťovadly, případně i přísadami a plnidly. Zahušťovadlem bývá nejčastěji mýdlo vytvořené ze živočišných či rostlinných tuků nebo syntetických mastných kyselin s hydroxidovými skupinami kovů. Požadavkem na tento typ maziv je tepelná a mechanická stálost, odolnost proti tvrdnutí, těsnost, vysoká únosnost, přilnavost a ochrana ošetřeného materiálu před korozi. [11]

### 1.5.3 Lepidla

Lepené spoje nabízí zajímavou a poměrně moderní alternativu k ostatním, více konvenčním, způsobům spojování materiálu. Při použití správného lepidla je lepený spoj pevný v tahu i ve smyku, ale může docházet k odlupování. Proto je vhodné kombinovat lepený spoj například se spojením nýtovým. Pro posuzování lepidel se rozlišuje počet složek lepidla, přičemž nejvýhodnější jsou lepidla jednosložková, ale nejvíce se však používají dvou a více složková. Dále může být rozlišováno, zda se jedná o lepidlo disperzní, kdy je rozpouštědlo lepidla vsáknuto, nebo roztoková, kdy je rozpouštědlo odpařeno. Vytvrzování může probíhat za určitých teplot či tlaků. [12]

Používaná lepidla jsou následující:

- Epoxidová - ke spojování kovů, kovů se dřevem, skla, keramiky, reaktoplastů, betonu s kovy;
- Fenolformaldehydová - ke spojování dřeva, skla;
- Modifikovaná fenolformaldehydová - ke spojování kovů, kovů se dřevem, brzdového obložení;
- Syntetický kaučuk - ke spojování pryží, pryží s kovy, materiálů s různou délkovou roztažností;
- Polyesterová - ke spojování sklolaminátu, dřeva, keramiky, kovů;
- Akrylová a metakrylová - ke spojování kovů, reaktoplastů, keramik.

Výhodou je rychlá aplikovatelnost a možnost jednoduchých oprav či spojování různorodých materiálů. Nevýhodou lepidel je sklon tvořených spojů ke stárnutí a obtížná kontrola stavu takových spojů. Lepidla obecně nejsou odolná vůči zvýšené provozní teplotě. [12]

## 1.6 Materiálová kompatibilita

Problematikou chemické a materiálové kompatibility konstrukčních i jiných látek se široce zabývají například americké normy ASTM. Ve více než 140 zemích je rozšířeno více než 12500 ASTM norem. Na webových stránkách ASTM je možné normy dělit dle kategorií.

V těchto kategoriích lze nalézt normy přímo ve vztahu ke konkrétním materiálům nebo dle jejich průmyslových aplikací. Normy se týkají různých zkoušek materiálů, ale i možných interakcí s dalšími materiály. [17]

## 2 Elektrotechnologická diagnostika

Z předchozí kapitoly plyne, že je žádoucí znát charakter a případně i stav jednotlivých materiálů a dílčích podsystémů, jelikož určují vlastnosti celého zařízení. K zajištění kompaktnosti této práce bude tedy v následující kapitole shrnut úvod do elektrotechnologické diagnostiky, a to zejména prostřednictvím seznámení se základními přístupy a metodami. Dále bude v návaznosti na toto uvedení proveden výběr přístupu, kterým bude postupováno, a motivace k jeho využívání.

### 2.1 Diagnostický proces

Diagnostika je nezastupitelnou disciplínou v procesu získávání relevantních informací, na jejichž základě lze rozhodovat o dalším postupu. Obecně se takto diagnostika stává nástrojem pro určení stavu. Jelikož stav a životnost zařízení úzce souvisí s použitými materiály a technologickými postupy, jedná se o diagnostiku elektrotechnologickou. [10]

Tato práce se zaměřuje na diagnostiku technickou a konkrétně v oboru elektrotechnika, čímž je rovněž definován pojem elektrotechnologická diagnostika. Objektem pro určení stavu se tak stávají elektrotechnická zařízení od slaboproudých aplikací (elektronika) až k aplikacím silnoproudým (energetika a elektrické stroje). Tato diplomová práce se však zaměřuje na aplikace silnoproudé.

### 2.2 Deteriorace a její následky

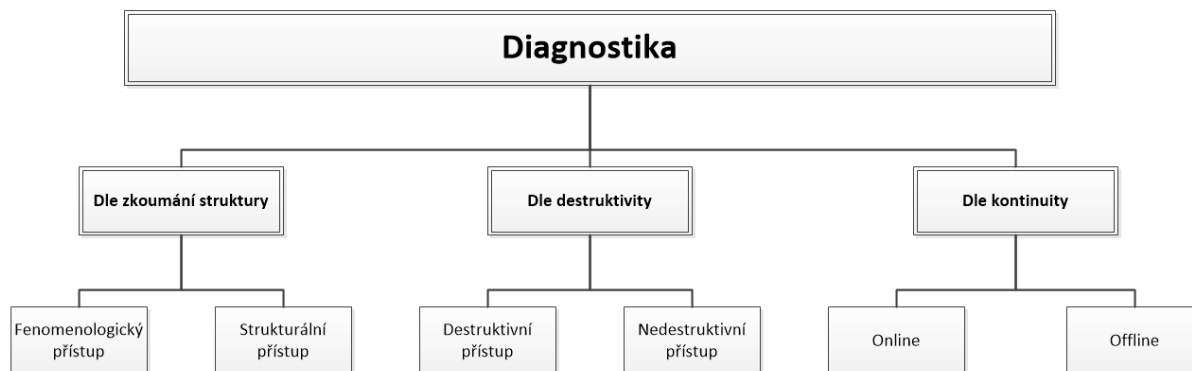
Pojem deteriorace lze vymezit jako postupné a nevratné zhoršování vlastností určitého objektu. Je následkem jednoho či více faktorů s možnými interakcemi. Tyto faktory nepříznivě působí na sledovaný objekt a určují tak jeho životnost. Obdobnými výrazy, které jsou v daných souvislostech užívány, jsou zejména degradace a stárnutí. Popsání tohoto procesu zhoršování je pro diagnostický proces klíčové, neboť délka a způsob stárnutí, kterému je materiál schopen odolávat, určuje mimo možnosti aplikace tohoto materiálu i vznik a implementaci diagnostických metod. Postupné zhoršování materiálových vlastností, které přímo určují i bezproblémový chod celého objektu, je při dosažení mezních hodnot příčinou poruchy. Dle druhu působícího degradačního činitele lze sledovat například tepelné, elektrické či mechanické stárnutí. [10]

Zmíněné degradační procesy budou podrobně popsány v následující kapitole.

## 2.3 Základní přístupy diagnostického procesu

V diagnostice lze obecně přistoupit ke sledovanému systému v jeho různém stavu, provozu, umístění a také v různém čase, a tedy i různém stupni zestárnutí. Proto je nutné zvolit správný přístup, diagnostické veličiny a nakonec vhodnou metodu. Pokud je vše provedeno správně, je možné vyvodit závěry o současném stavu objektu. [9][10]

Následující část popisuje základní přístupy provádění diagnostického procesu dle dělení zobrazeného na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Základní přístupy provádění diagnostiky dle [10]

### 2.3.1 Fenomenologický a strukturální přístup

V první řadě je nutné rozhodnout, jaký je záměr při sledování objektu. Fenomenologický přístup je takovým, kde je objekt pouze členem, který nějakým způsobem upravuje vstupní signály, a výstupní signály (reakce) jsou podrobeny analýze. Strukturální přístup naproti tomu umožňuje nahlédnout přímo do struktury objektu. Výsledkem porovnání obou postupů je konstatování, že strukturální přístup je výhodnější kvůli získaným vydatnějším informacím a výsledkům s menším rozptylem mezi jednotlivými šetřeními. Nevýhodou je však vysoká pořizovací cena aparatury a nutnost obsluhy speciálně proškoleným personálem. Fenomenologický přístup je obecně jednodušší a v tomto průmyslovém odvětví je s ním více zkušeností, protože je déle a častěji využíván. [9][10]

### 2.3.2 Destruktivní a nedestruktivní přístup

Dalším způsobem, jak rozlišit zvolený postup, je posouzení, zda je metoda destruktivní či nedestruktivní. Destruktivní zkoušky umožňují získat výsledky s vysokou výpovědíschopností. Nevýhodou je pak logicky vysoká spotřeba experimentálních vzorků při opakovaných měřeních. Nedestruktivní metody naproti tomu ponechávají měřený objekt nepoškozen, a tak je možné jejich zopakování. Lze je tedy nasadit do měření v reálném čase i do měření profylaktických. Jejich použití se nachází v oblasti jmenovitých hodnot s mož-



nými odchylkami. Nelze se tedy pohybovat v mezních hodnotách měřeného diagnostického signálu nebo dokonce za nimi. [9][10]

### 2.3.3 Online a offline diagnostika

Diagnostický systém lze rozlišit také na pracovní režim z pohledu získávání informací v čase. Jedná se o online a offline diagnostický systém. Online diagnostický systém lze využít pro sledování diagnostických signálů v neomezeném pracovním režimu sledovaného objektu. V tomto případě lze proces označit jako monitorování. Rovněž lze tento způsob diagnostického přístupu považovat za diagnostiku funkční. Druhou možností je diagnostika testovací - tedy offline diagnostický systém. Toto šetření obvykle neprobíhá za provozu a jedná se například o profylaktická měření určená časovým plánem. [9][10][19]

Nevýhodou offline přístupu je nutnost vyjmout elektrické zařízení z provozu po dobu potřebných zkoušek. To je spojeno s provozními ztrátami způsobené přerušenu nebo sníženou dodávkou elektrické energie. Například velký generátor připojený k parní turbíně musí během servisního intervalu nepřetržitě pracovat 3 až 4 roky. Výkonný transformátor v kritické pozici v energetické síti potřebuje 3 až 6 měsíců příprav, než bude vyjmut z provozu. Další nevýhodou je absence monitorování aktuálního stavu. Může tak dojít k poruše mezi servisními intervaly. Dalším praktickým důsledkem je skutečnost, že při offline testování zařízení není možné aktivovat provozní úroveň elektrického, mechanického a chemického stárnutí, kterého je dosaženo při provozu. Samotné metody pro offline testování jsou náročné logisticky, časově a je nutno zajistit všechna bezpečnostní opatření a potřebnou aparaturu. Online diagnostika může být náročnější na systém měření a uložení pro naměřené hodnoty, čímž se může značně zvýšit i finanční náročnost diagnostického systému. Měření mohou být méně přesná a některá jsou problematická. Například s online měřeními částečných výbojů jsou spojeny jisté problémy. Při jejich zvukové detekci může být problém s provozním hlukem zařízení. [26]

Nespornou výhodou monitorování je i fakt, že jej lze snadno rozšířit na úroveň základní ochrany zařízení formou sledování a vyhodnocení měřených veličin. Lze pak sledovat varování generované systémem a plánovat odstávky nejvhodnějším způsobem, což má za následek kratší dobu mimo provoz a nižší náklady na servis. Dalším pohledem na záležitost implementace online diagnostického systému mohou být úspory vzniklé vlivem zaměstnání menšího počtu pracovníků. Nezanedbatelná část ročních investic je vynaložena na údržbu. Například pro oblast dodávky elektrické energie se jedná o 80 % ročních investic. Pro lepší plánování údržby je využito výsledků profylaktických měření nebo diskontinuálního sledování zařízení. Při plánované údržbě je na základě těchto z provozu získaných informací možné dosáhnout značných úspor, neboť průměrně pouze 60 % servisních zásahů lze považovat za opodstatněné. To lze označit za pokrok, nicméně taková strategie pro údržbu vyžaduje vysoce kvalifikovaný personál. Rovněž je obecně odhadováno, že pouze 10 % vyměněných komponent je na konci své životnosti. Je tedy zřejmé,

že je výhodné nasazení nepřetržitého monitorování klíčových technologických prvků. To vede k nesporným výhodám, jakými jsou vyšší účinnost provozu, menší ztráty způsobené selháním zařízení, snížené náklady na výměnu komponent. [27]

## 2.4 Údržba CBM a TBM

Předchozí rozdělení a popis online a offline přístupu zároveň popisuje i možné strategie v oblasti údržby. Do značné míry také určuje, kdy bude započat servis zařízení. Správa zařízení, s nímž je způsob údržby spjatý, je v cizojazyčné literatuře uváděna jako Asset Management. Jedním způsobem, jak zařízení spravovat, je přístup zvaný Condition Based Maintenance (CBM), což představuje údržbu zařízení na základě stavu. Druhý způsob Time Based Maintenance (TBM) značí časově plánovanou údržbu. Přístup CBM využívá výhod online diagnostiky a při správné funkci diagnostického systému stanovuje stav sledovaného zařízení. Údržba dostane pokyn k akci při překročení stanoveného limitu hodnoty, která popisuje aktuální stav. Je považována za nejhodnotnější přístup, jelikož minimalizuje nevyužitou dobu života zařízení, eliminuje katastrofické poruchy a dovoluje pracovníkům logistiky počítat s dodacími lhůtami, týkajícími se servisu. Přístup TBM je řízen časovým plánem, což může mít vlivem dlouhých servisních intervalů fatální následky. Naopak při příliš krátkých zvolených intervalech mohou být náklady na údržbu značné. Přístup je tedy založen na servisní historii a zkušenostech obsluhy. [22][23]

Rozdělení přístupů k údržbě v rámci správy zařízení je zobrazeno na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Různé přístupy k údržbě zařízení

Mimo tyto dva hlavní přístupy existují i další, které je vhodné zmínit, neboť se rovněž používají. Dle článku společnosti ABB [24] lze rozlišovat nápravnou údržbu (Corrective Maintenance), preventivní údržbu (Preventive Maintenance), údržbu založenou na míře rizika (Risk Based Maintenance) a údržbu založenou na stavu zařízení (Condition Based Maintenance). Nápravná údržba je charakterizována jako soubor operací, které následují po detekci anomálií na zařízení. Přístup vychází z předpokladu, že ztráty způsobené poruchovým stavem zařízení jsou nižší než investice nutné pro sestavení programu údržby. Někdy je také označována jako údržba při poruše (Breakdown Maintenance). Preventivní údržba má již stanovené intervaly nebo předepsaná kritéria, při kterých bude prováděna. Je tak obdobou výše zmíněného TBM. Někdy je označována jako údržba s pevným ča-

sovým intervalem (Fixed Time Maintenance). Údržba založená na míře rizika sestavuje vhodný program údržby na základě integrovaných analýz a periodických měření a testů. Jedná se tedy v podstatě o mezistupeň mezi TBM a CBM. Jelikož již využívá plánování údržby na základě získaných informací, je tudíž někdy označována jako plánovaná údržba (Planned Maintenance). Údržba založená na aktuálním stavu je zde popsána tak, že sleduje stav zařízení a vyhodnocuje postup deteriorace a úroveň pravděpodobnosti poruchy. Tento přístup dlouhodobě umožňuje snižovat náklady spojené s údržbou, minimalizovat výskyt závažných poruch a optimalizuje ekonomické řízení zdrojů. [23][24][27]

Například ve studii [25] je zaveden ještě jeden možný způsob, a to proaktivní přístup. Tento se zaměřuje na sledování parametrů prostředí a kořenovou příčinu selhání zařízení ještě před jeho uvedením do provozu. Tyto údaje mohou být využity jako zpětná vazba pro výrobce zařízení, které může být před instalací modifikováno vzhledem k možným deterioračním faktorům na konkrétním pracovišti.

Dělení, popis a název jednotlivých přístupů k údržbě se mohou napříč různými zdroji mírně lišit, podstata však zůstává stejná.

## 2.5 Prostředky diagnostického procesu

Mimo základní přístupy diagnostického procesu je nutno zmínit další úzce spjaté aspekty, které mají vliv na kvalitu diagnostických systémů.

### 2.5.1 Instrumentální vybavení

Jedná se o množinu zařízení, která jsou pořízena za účelem měření - snímání diagnostických veličin. Přitom nemusí jít pouze o senzory a měřidla samotná. Může se jednat i o zdroje napájení, převodníky, použitý měřicí systém, vřazení počítače do systému měření, přívodní vodiče, kontakty a prostředky zajišťující správně připojení k objektu. [9][10][21]

### 2.5.2 Model objektu

Tento model by měl splňovat funkci simulace reálného objektu. Může být fyzický či matematický. Fyzickým modelem může být samotné reálné zařízení nebo jeho zmenšená či zjednodušená kopie plnící stejnou funkci. Tento postup je používán například pro rozměrné energetické systémy, jak je tomu například v publikaci [28]. Matematický model obsahuje matematické rovnice, které umožňují modelovat odezvu systému. Tento model lze snadno vyjádřit programem, a proto je možná implementace do komplexnějšího diagnostického systému nebo využití jako součást expertního systému. [9][10][19]

Model lze dále dělit na analytický, parametrický, logický a topologický. Analytický model se vyznačuje používáním algebraických rovnic pro statický model či diferenciál-

ních rovnic pro modely dynamické. Analytické lze dále rozlišovat jako modely procesního chování a modely struktury, modely statické a dynamické, deterministické a stochastické (stacionárně i nestacionárně), parametrické a neparametrické nebo jako lineární a nelineární. Parametrické modely jsou analytickými modely, kde jsou odhadem určeny základní fyzikální vazby, a poté je stanoven matematický popis. V tomto popisu figurují koeficienty (parametry), jejichž hodnoty se určí experimentálně. Logický model charakterizuje objekt pomocí logických vazeb subsystémů. Topologický model se využívá u takových systémů, kde by předchozí zmíněné modely byly příliš náročné pro popis. Je tvořen orientovaným grafem, který zachycuje stavy, příčiny a důsledky. [19]

### 2.5.3 Znalosti obsluhy

Zde se jedná o pracovníky s odpovídající kvalifikací a znalostmi, které je nutno k obsluze příslušného diagnostického systému přiřadit. Je tak zajištěna náležitá úroveň výstupů diagnostického procesu. [10]

### 2.5.4 Postup

Postup samotného procesu neřeší pouze použité vybavení a metody, ale uvádí je také do časového kontextu, přičemž je nutné respektovat hospodárnost jednotlivých kroků. V tomto smyslu lze například některá měření sdružit do stejného časového intervalu a provést je najednou, čímž bude dosaženo úspory času a případně i zdrojů potřebných pro provedení obou zkoušek, kdyby byly prováděny separátně. Nelze opomenout i další organizační postupy, jejichž vlivem je zajištěna bezpečnost a ochrana zdraví pracovníků, požární ochrana a ochrana životního prostředí. [9][10][21]

### 2.5.5 Automatizace diagnostického procesu

Jedním z významných způsobů, jak automatizovat diagnostiku je návrh a aplikace expertního systému. Expertní systém je definován jako program, který dokáže napodobit rozhodovací proces skutečného lidského experta při řešení složitých problémů. Využívá znalostí, které jsou explicitně vyjádřeny pomocí vhodného programu. Skládá se z několika částí. [19][20]

Dle [19] a [20] tyto systémy sestávají z následujících částí - modulů:

- Báze znalostí;
- Báze dat;
- Řídící (interferenční) mechanismus;
- Vysvětlovací (komunikační) modul;

- Aktuální model.

V modulu báze znalostí jsou uloženy znalosti jednoho nebo celé skupiny lidských expertů v dané problematice. Modul báze dat obsahuje hodnoty veličin charakterizující aktuální stav objektu sledování a lze je získat měřením, analýzou pomocí externích programů a rozpravou s uživatelem či obsluhou objektu. Řídící modul obsahuje program, který určuje strategii využívání báze znalostí, plní komunikační funkci mezi bází dat a bází znalostí. Zároveň provádí komunikaci mezi bází znalostí a uživatelem expertního systému. Komunikační modul lze označit i jako modul vysvětlovací. Má za úkol uživatelsky přívětivě zprostředkovat uživateli informace popisující chování systému ve všech pracovních režimech. Aktuální model je souborem popisujícím aktuální stav spolu s poznatkami o objektu, které jsou v daném časovém okamžiku platné. Na počátku uvedení do funkce využívá vstupní hodnoty a poznatky. Tyto jsou vlivem chodu aktualizovány prostřednictvím nových zjištění získaných pomocí měření. [19][20]

Expertní systémy mohou být dle [19] děleny následujícím způsobem:

- Diagnostické;
- Generativní;
- Hybridní.

Cílem diagnostických expertních systémů je zejména výsledek diagnostického procesu, kterým je zjištění stavu a eventuální detekce či lokalizace poruchy, případně obojího. Průběžně probíhá monitoring a vyhodnocení dat s cílem určit vhodný okamžik servisního zásahu. Generativní expertní systém plní funkci plánování na základě počátečního stavu a formulovaného cíle. Navrhuje vhodné konfigurace objektů ve sledovaném zařízení. Může predikovat vývoj nadcházejících událostí na základě modelu v časové doméně. Hybridní expertní systém tedy sdružuje úkoly obou předchozích. [19][20]

Dále lze rozlišovat, zda jde o expertní systém univerzální nebo systém dedikovaný, tedy připravený již pro konkrétní aplikaci. [19]

Nelze však opomenout další způsoby, kterými lze diagnostický proces automatizovat. Za zmínku jistě stojí kupříkladu využití rozpoznávání a vyhodnocování příznaků, statistické metody klasifikace nebo neuronové sítě a fuzzy systémy. Tyto postupy jsou popsány například v [19].

## 2.6 Motivace k nasazení online diagnostického systému

Vybrán byl online diagnostický systém, který využívá principy fenomenologického přístupu a nedestruktivní měření. Takto koncepčně uspořádaný diagnostický systém umožní sledovat stav zařízení a indikovat zahájení činnosti údržby.

Je neméně důležité zhodnotit důležitost a účelnost takto navrženého diagnostického řešení. Lze tak lépe chápat přínosy a výhody plynoucí z jeho provádění.

### 2.6.1 Sledování stavu v reálném čase

Monitoring skýtá nespornou výhodu ve faktu, že je konkrétní zařízení pod neustálým dohledem. Odpovědný personál má tedy při správné činnosti diagnostického systému neustále dostupné údaje o provozních parametrech. Toho může být dosaženo například prostřednictvím vizualizace měření.

### 2.6.2 Indikace zahájení údržby

Jak bylo výše uvedeno, včasným zásahem údržby je možno odklonit poruchu zařízení a vyhnout se tak značným finančním i technologickým problémům, které plynou z možného přechodu zařízení ze stavu provozuschopného do stavu poruchového. Je tedy nutné porovnat pořizovací cenu online diagnostického systému a případné finanční ztráty způsobené nevhodně naplánovanou údržbou.

Finance však nejsou jediným rizikem, které při poruše hrozí. Je nutno zvážit i prostředí, ve kterém zařízení pracuje, neboť jeho porucha může ohrozit bezpečí a zdraví osob v okolí, může rovněž znamenat riziko z hlediska požární prevence a riziko případného znečištění životního prostředí při havárii. Vlivem přechodu do neprovozuschopného stavu může například dojít i k přerušení dodávky energie pro důležitá odběrná místa.

Další skutečností, která může vést k nasazení systému pro sledování stavu zařízení může být legislativní úprava, která toto vyžaduje z hlediska dříve zmíněné bezpečnosti, čímž se nejedná o odpovědný přístup zodpovědného managementu, ale o zákonnou povinnost. Mimo právní požadavky může jít například i o výhodnější podmínky pojistné smlouvy.

Všechny tyto skutečnosti je nutné vzít v úvahu a zvážit důležitost monitoringu a včasné údržby potenciálně inkriminovaného elektrického zařízení.

### 2.6.3 Finanční ztráty způsobené poruchami

Je velice obtížné kvantifikovat finanční náročnost odstranění poruch určitého zařízení, neboť cena nápravných opatření se významně liší v závislosti na skutečnosti, jak moc je v daných geografických podmínkách rozvinut průmysl a konkurence společností zajišťujících odborný servis.

Mimo tyto makroskopické parametry spojené s lokalitou, kde zařízení pracuje, je nutno také uvažovat, jak je konkrétní zařízení v provozu důležité, zda je zálohované jiným zařízením, jak je samo o sobě komplikované, a tím pádem náročné na opravu.

V neposlední řadě je finanční náročnost opravných prací také určena samotnou závažností a rozsahem konkrétní poruchy.

Obecně lze konstatovat, že s poruchou znemožňující provoz klíčového zařízení jsou spojené značné finanční ztráty způsobené nutností řešit problém technicky, logisticky a případně i legislativně, a to vše v přijatelném čase.

Konkrétní náklady na odstranění poruch a znovuuvedení zařízení či celé technologie do provozu lze určit pouze při znalostech konkrétních okolností a parametrů.

#### **2.6.4 Možnost implementace do expertního systému**

Neméně podstatnou výhodou je možnost implementace výsledků měření online diagnostického systému do expertního systému, který již obsahuje rozhodovací algoritmy a může značnou část diagnostického procesu zautomatizovat. V trendech posledních dní a v duchu čtvrté průmyslové revoluce je to výhoda nezanedbatelná.

## 3 Působící degradační mechanismy

Pro správný výběr senzorů je nejprve nutné stanovení působících vlivů na sledovaný objekt a jejich lokalizace. Princip a progresse deteriorace tak nutně musí souviset s použitým materiálem. Tato část práce se proto bude věnovat rozboru působení jednotlivých degradačních mechanismů, diskuzi a zhodnocení jejich závažnosti, což přispěje k výběru těch klíčových.

S tímto rozbohem je rovněž úzce spjato určení, které části elektrického stroje jsou náchylné k poškození při zvýšeném vystavení určitému degradačnímu mechanismu. Na základě této analýzy bude vyhodnocena potřeba sledování jednotlivých vlivů v reálném čase a s tím spojená kvalita snímání diagnostických signálů.

Tato kapitola tedy poslouží zejména jako podklad pro výběr komponent navrhovaného online diagnostického systému a pro orientaci v procesech stárnutí elektrických strojů.

### 3.1 Stárnutí

V předchozí kapitole bylo stručně shrnuto, co to je proces stárnutí, jaké jsou jeho následky a jaké jsou degradační faktory, které tento proces způsobují. V této části bude přistoupeno k podrobnějšímu popisu.

Při studiu problematiky napříč vybranou literaturou [9][10][18][26][27] lze konstatovat, že nejchoulostivějším subsystémem ve spolehlivostním řetězci elektrického stroje je elektroizolační systém (EIS). Je vhodné připomenout, že EIS není jedinou součástí náchylnou k poškození vlivem degradačních procesů, které není nikdy možné zcela eliminovat. Nicméně výše zmíněné publikace se věnují zejména problematice stárnutí EIS.

Poškození EIS je signifikantním přispěvatelem k selhání celého elektrického točivého stroje. Studie v oblasti průmyslu uvádí, že celá jedna třetina selhání točivých elektrických strojů je způsobena ztrátou funkce, kterou plní EIS statorového vinutí. Z tohoto důvodu je nutné věnovat stárnutí EIS zvláštní pozornost. Finální selhání se projeví jako průraz EIS. Tomuto důsledku však předchází jiné mechanismy, kterými je tepelné, mechanické, elektrické stárnutí a stárnutí vlivem namáhání okolím. EIS je tedy vystaven různým degradačním procesům, které mohou působit individuálně či současně. [18][27]

#### 3.1.1 Tepelné stárnutí

Tepelné stárnutí se vyskytuje za podmínek, kdy je teplota EIS dostatečně vysoká, aby způsobila degradaci elektrických a mechanických vlastností EIS. Cyklické změny teploty rovněž vyvolávají mechanické namáhání, které vede k postupnému zhoršení vlastností, a to dokonce i v případech, kdy teplota není sama o sobě dost vysoká, aby způsobila poškození



EIS. Například cyklické změny teploty mohou vést ke ztrátě vazby mezi mědí a izolací ve vinutí elektrických točivých strojů jako důsledek ohřevu a ochlazování vodičů. [27]

Typickými projevy tepelného namáhání je zmenšení fyzických rozměrů, vytvrnutí, spontánní popraskání, ztráta mechanické pevnosti, zkřehnutí, ztráta barvy a v extrémních případech zuhelnatění. [27]

Limitní teploty pro jednotlivé třídy jsou uvedeny v první kapitole této diplomové práce v rámci popisu jednotlivých materiálů.

### 3.1.2 Elektrické stárnutí

Výskyt tohoto typu stárnutí je způsoben aplikováním elektrického namáhání izolace, které způsobuje degradaci. I když mohou přechodná DC napětí způsobovat stárnutí, jsou to právě zejména AC napětí, která je nutno uvažovat. Mohlo by být poznamenáno, že materiály pro izolaci zařízení jsou namáhány napětím, které je velmi vzdálené od hodnot, při nichž by došlo k průrazu. V důsledku tohoto tvrzení se tedy elektrické stárnutí obvykle objeví jako výsledek přítomnosti nedokonalosti materiálu. Tyto nedokonalosti mohou být například vzduchové mezery vzniklé nedokonalou impregnací. Tyto jsou zdrojem částečných výbojů. [27]

#### Částečné výboje

Detekce částečných výbojů je v oblasti diagnostiky důležitou metodou. Částečné výboje jsou jedním z typů elektrických výbojů a mohou se vyskytovat v pevném, kapalném i plyném EIS. Jsou to takové výboje, které nezpůsobují průraz izolace, ale pouze ji částečně překlenují. Takovéto výboje se obvykle objevují jako impulzy s velmi krátkou dobou trvání (výrazně menší než 1 mikrosekunda). Částečné výboje působí na EIS degradačními faktory elektrickými, erozivními, tepelnými a chemickými, a negativně se tak podílejí na snížení životnosti a spolehlivosti EIS. [10]

Dle literatury [10] lze rozlišit tři druhy částečných výbojů dle lokace výskytu:

- Vnější částečné výboje - nacházejí se v plynech v okolí elektrod;
- Vnitřní částečné výboje - nacházejí se v plynech a v jejich okolí se nachází pevný či kapalný izolant;
- Povrchové částečné výboje - nacházejí se v okolí elektrod na rozhraní plynného a pevného izolantu.

Vnější částečné výboje se nacházejí na elektrodách s ostrými hranami či s malými poloměry zaoblení. Vnitřní výboje se vyskytují například v plyných kavitách pevného či kapalného EIS. Povrchové částečné výboje se mohou nacházet například na průchodkách transformátorů či na tyčích statorového vinutí točivých elektrických strojů. V případě tyčí

statorového vinutí se jedná o výstup z drážkové části statoru do oblasti čel vinutí. Mimo místo vzniku částečných výbojů lze i rozlišovat jejich typ dle jejich výskytu na křivce napětí elektrického stroje. Jsou rozlišovány typy A až O a klasifikovány jsou dle četnosti, amplitudy a fázového posunu. Pomocí určení typu částečných výbojů lze určit i místo jejich působení. Některé typy jsou charakteristické pro určitý typ materiálu. [10]

Obecně vzato se deteriorace vlivem částečných výbojů objeví vlivem aplikování nedokonale vyrobené izolace se vzduchovými mezerami nebo vlivem tepelného a mechanického stárnutí EIS během provozu. Přímý náraz výbojů na povrch izolace způsobuje dekompozici pevné izolace. [27]

### Vytvoření vodivé cesty

K tomuto jevu dochází vznikem vodivých nebo karbonizovaných cest na povrchu izolace. Tyto jsou způsobeny právě vlivem namáhání AC napětím. Pokud povrch izolace zachycuje prach a vlhkost, může se v jistém okamžiku stát vodivým. Tento vodivostní elektrický proud může být dostatečně velký, aby upozadil efekt kapacitních proudů. To má za následek změnu rozložení napětí, která byla původně udávána právě kapacitami při čistém povrchu izolace a která nyní závisí na změně vodivosti povrchu. Vrstva znečištění není rovnoměrně rozložena a procházející vodivostní proud způsobuje vysušování, které je nejrychlejší v oblastech s nejvyšší rezistivitou. Toto vysychání způsobuje další nárůst rezistivity a v těchto oblastech se tyto účinky takto stupňují až může dojít ke vzniku vysušeného pásma přes celou izolaci. Většina napětí, původně rozloženého po povrchu izolace, se objeví právě na tomto vysušeném pásmu. Při takto změněných podmínkách může dojít k přeskoku v oblasti tohoto vysušeného pásma. To může mít v zásadě tři možné následky. Prvním je takový, kdy se přeskok nezmění v kontinuální výboj a rychle zanikne. Druhou možností je, že se výboj stabilizuje a přeskok přeroste v elektrický oblouk. Tento elektrický oblouk značně degraduje EIS a případně další konstrukční části v jeho blízkosti a může přerůst do takových rozměrů, kdy přemostí izolaci a způsobí průraz, což je třetím možným důsledkem. [27]

### Přechodná napětí

Přechodná napětí nebo rázová napěťová vlna mohou vzniknout z různých příčin. Těmito mohou být úder blesku, činnost spínání elektrických zařízení, poruchy, napájení elektrického stroje výkonovou elektronikou. Obvykle je EIS dimenzován tak, aby odolal vlivům rázové vlny po úderu blesku nebo vlivem spínání. Avšak rychlá přechodná napětí, které vznikají například v aplikacích elektrických pohonů nebo při provozu vzduchem izolovaných rozvodných zařízení, jsou známým původcem poruch kvůli nerovnoměrnému rozložení napětí, které je způsobeno napěťovými rázy s prudkým nárůstem. To je důvodem, proč musí být ve fázi návrhu elektrického stroje uvažováno, v jakých podmínkách bude spolu s EIS pracovat. Právě přechodná napětí mohou způsobit selhání zařízení, která jsou

v provozu již několik let a byla vystavena tepelným, elektrickým, mechanickým degradačním faktorům a provozním vlivům okolí.

### **Elektrické namáhání v NN a VN strojích**

Jak bylo již v projevech elektrického stárnutí výše uvedeno, pro aplikace s nízkonapětovými (NN) motory jsou v současné době dostupná zařízení výkonové elektroniky, kterými jsou například nepřímé frekvenční měniče. Tyto mohou v rámci elektrického pohonu upravovat rychlost otáčení motoru. Vlivem jejich nasazení je nezbytná důslednost při návrhu EIS i pro NN motory. Důvodem je odhalení přítomnosti částečných výbojů v aplikacích s frekvenčním měničem, který je řízen pomocí PWM. Výbojový test mezizávitové izolace, který definuje norma IEEE 522-2004, je založen na testování izolace závitů v cívce vsypávaného vinutí. Avšak tento postup nemusí nutně prokázat integritu vinutí vůči méně strmým, ale častějším napěťovým pulzům. Nápor na EIS je určen poměrem napětí a frekvence, dobou nárůstu impulzu, šířkou impulzu, profilem zatížení (duty cycle), překmitů a možnými rezonancemi. Eliminace těchto nepříznivých vlivů spojených s PWM řízením je možná zahrnutím sinusových filtrů, ale jejich velikost a cena může vést k zamítnutí této možnosti vylepšení. [26]

Vysokonapěťové (VN) točivé stroje již nemají vsypávané vinutí, ale vinutí o obdélníkovém průřezu. Technologie a rozměry vinutí vedou k prodloužení čel statorového vinutí, a s tím je spojena nutnost použití dalších konstrukčních prvků, jakými jsou například izolační kruhy, podpěry, bandáže pro vyvázání a pružiny. Tyto prvky tvoří podporu čel vinutí a slouží k zamezení přenášení vibrací. EIS vinutí VN strojů je již komplikovanější a obsahuje více různých vrstev plnící různé funkce. Izolační systém lze rozdělit do tří hlavních oblastí. První izolace drážkové části. Tato odděluje cívku vinutí od magnetického obvodu stroje. Z technologických důvodů se mezi izolovaným vodičem a jádrem statoru nachází drobná vzduchová mezera. Při namáhání elektrickým polem může dle popisu Paschenova zákonem dojít v nestíněných částech k přeskočení. Exponované oblasti se nachází na koncích paketů statorových plechů, resp. na okrajích radiálních chladících kanálů. Riziko vzniku částečných výbojů lze eliminovat aplikací souvislé polovodivé vrstvy. Další oblastí je mezizávitová izolace. Tato část EIS je citlivá na napěťovou rázovou vlnu způsobenou nevhodným spínáním podpůrných zařízení, jakým může být například vakuový vypínač, nebo použitím přívodních kabelů s nevhodně zvolenou délkou. Třetí oblastí je lokace, kde statorové vinutí vystupuje z drážky do čel vinutí. Je zde nutno opět uvažovat problematiku rozložení elektrického pole. Eliminovat tento problém je možné opět správným ovinutím vrstvou polovodivé pásy. Mimo uvedené problémy mohou být vlivem špatné výroby v elektroizolačním materiálu dutiny, ve kterých vznikají částečné výboje. [26]

Při náhledu do problematiky transformátorů a tlumivek je nutné zohlednit značné množství faktorů, které jí ovlivňují. Jedná se zejména o složitost vinutí, metody chlazení, potřebu efektivních upínacích technik za účelem odolání účinkům zkratových proudů a sil

působících při přepravě, lokaci a upevnění propojovacích vodičů, provedení průchodek a přepínače odboček a sledování stavu vlastních elektroizolačních materiálů. Všechny tyto záležitosti ovlivňují elektrické pole, závažnost degradačních faktorů v izolačních strukturách, napětí v ustáleném stavu, ale i důsledky rázů vlivem atmosférického výboje či spínání. EIS s postupem času přirozeně stárne, ale rychlost stárnutí může být ovlivněna správnou a dobře plánovanou údržbou. Dnes je již možno využívat rozsáhlý monitoring, který je v souvislosti se správnou údržbou důležitým nástrojem. [26]

### Paschenův zákon

Lze konstatovat, že nejrozšířenějším izolačním prostředkem na této planetě je vzduch. Mimo tuto skutečnost lze prohlásit, že vzduch je hojně využíván i k chlazení elektrických strojů a zařízení. Proto je vhodné uvést jeden z nejzákladnějších popisů změn elektrické pevnosti vzduchu.

Při popisu elektrické pevnosti vzduchu, a tedy i částečných výbojů, je důležitá znalost Paschenova zákona, z něhož plyne, že pokud je možné upravit tlak vzduchu nebo jiného chladicího média na vyšší hodnotu, může být docíleno snížení výbojové činnosti uvnitř stroje vlivem vyšší elektrické pevnosti. Je však důležitým poznatkem, že kontinuální zvyšování tlaku při stejných rozměrech nevede ke stále větší elektrické pevnosti. Dle Paschenova zákona totiž existuje jistá hodnota tlaku, kdy je elektrická pevnost nejnižší. [7][9][26]

### 3.1.3 Mechanické stárnutí

Tento degradační proces je hlavním přímým nebo nepřímým přispěvatelem ke zhoršení vlastností pro mnoho EIS. Principiálně se jedná o důsledek relativního pohybu komponent izolačního systému, které mají vliv na mechanické vlastnosti EIS. Původem jsou mechanické a elektromagnetické síly, rezonance, nedostatečné ukĺínování a zafixování konstrukčních či funkčních prvků, ohýbání, abraze a další faktory okolí. [27]

### Vibrace

Vibrace lze definovat jako mechanické kmitání, což je dynamický děj, při kterém hmotné body či celá tuhá tělesa vykonávají pohyb kolem své rovnovážné polohy. Vznik vibrací je podmíněn budící silou, a to interní či externí. [19]

V elektrických strojích točivých lze dle [27] sledovat vibrace jako:

- Odezvu statorového jádra na elektromagnetické síly mezi statorem a rotorem;
- Odezvu čel statorového vinutí na elektromagnetické síly;
- Dynamické chování rotoru v ložiscích, pokud se rotor otáčí;
- Odezvu hřídelových ložisek uchycených v konstrukci stroje na vibrace přenášené od rotoru.

Síly působící na magnetické jádro statoru jsou důsledkem interakcí mezi magnetickým tokem ve vzduchové mezeře a elektrickým proudem ve vinutí statoru. Svou roli zde hraje i interakce mezi rozptylovým tokem a elektrickým proudem v čelech vinutí. Je tedy zjevné, že přesný charakter vznikajících sil bude dán funkcí proudového rozložení a geometrie vzduchové mezery a oblasti čel vinutí. [27]

Z hlediska mechanického poškození lze opět posuzovat výstup statorového vinutí z drážky. Mimo zmíněné potenciální výbojové procesy je zde vrstva izolace vystavena projevům mechanickým. Vlivem vibrací může dojít k poškození vrstvy elektroizolačního materiálu nebo případně aplikované polovodivé vrstvy. Důsledkem může být rovněž vznik prachu z takto poškozovaného materiálu, který může vázat vlhkost a další nečistoty obsažené v prostředí nebo v chladícím médiu. Tím se výrazně zhoršují elektroizolační vlastnosti EIS. Pohyb čel statorového vinutí je způsoben seismickou excitací cívek prostřednictvím pohybu celého stroje, který je způsoben prostředím nebo elektromagnetickými silami, které vznikají jako důsledek elektrického proudu ve vinutí statoru. [26][27]

Odezva rotoru je dána skutečností, zda lze rotor považovat za tuhý či pružný. Existuje zde několik variant, jak lze rotor posuzovat. Tuhý či krátký rotor lze považovat za jedinou hmotnost působící v ložiscích. Jedná se o rotory strojů pracujících do 70 % kritických otáček. Kritické otáčky způsobují s vlastní frekvencí soustrojí mechanickou rezonanci, při které značně narůstá amplituda vibrací. Je vhodné pamatovat na možný vliv násobků vlastní frekvence. Stroje, které mají pracovní otáčky v oblasti nadkritické, se označují jako stroje s pružným rotorem. Jedná se zejména o rotory dvou-pólových strojů s dlouhým hladkým rotorem. [21][27]

Dále lze rozlišovat odezvu transverzální (příčnou) a torzní (kroucením). Transverzální odezva je způsobena statickou nevyvážeností u tuhých rotorů a v případě pružných rotorů se zde nachází i nevyváženost dynamická. Pro snížení přídatného namáhání ložisek je nutné rotor vyvážit pomocí vhodně zvoleného postupu. Torzní oscilace se projevují vlivem proměnlivého zatížení poháněného objektu či vlivem změn v elektrickém zatížení v případě generátoru (například vlivem zkratu v elektrické síti). Tyto torzní oscilace jsou výrazné zejména u turbogenerátorů, jelikož mají značnou délku a malý poloměr. Poruchy v elektrické síti jsou obzvláště důležité, neboť byly shledány jako původce omezení životnosti hřídele vlivem únavy materiálu. [21][27]

Rotorové vibrace jsou přenášeny do statoru skrze magnetický tok ve vzduchové mezeře a současně přes uložení ložisek. Přenášení vibrací do uložení ložisek v ložiskových štítech či stojanech je zapotřebí zohlednit jak pro valivá, tak i kluzná ložiska. [27]

Selhání ložisek s valivými elementy je běžnou poruchou malých točivých strojů. Díky své konstrukci s velmi tenkou vrstvou maziva umožňují sledování frekvence vibrací, které jsou přenášeny valivými elementy, pomocí akcelerometru připevněného přímo na uložení ložiska. Charakteristické frekvence se pro jednotlivá ložiska liší v závislosti na použitých valivých elementech. Kluzná ložiska je prostřednictvím vibrací mnohem obtížnější sledovat. Vlivem podpory hřídele ve filmu maziva je amplituda snímaných vibrací velmi

malá. [27]

Lze tedy v souvislostech vysledovat, že jednotlivé způsoby vzniku, vlivu a přenášení vibrací se do značné míry navzájem ovlivňují.

Pohybující se části zařízení vytváří vibrace. Vibrují tak například i konstrukční části na povrchu zařízení, a tak se tyto vibrace šíří dál prostorem formou hluku. Termínem hluk se označuje nežádoucí zvuk ve slyšitelném pásmu. Toto pásmo se nachází v rozmezí frekvencí 20 Hz až 20 kHz. [19]

Hluk je vhodné v kontextu s měřením vibrací zmínit. Hluk jako takový nemusí být vnímán jako klíčový parametr, který charakterizuje technické zařízení z hlediska jeho funkčnosti - schopnosti konat práci. Nicméně existují aplikace, kde zákazník požaduje snížení hlučnosti. To může být způsobeno požadovanou úrovní komfortu například pro osoby, které se zařízením přicházejí do styku, ale může se jednat i o dodržení závazných limitů definovaných legislativou České republiky v oboru bezpečnosti a ochrany zdraví při práci (zákon č. 309/2006 Sb.), a konkrétně pak v oboru hygieny práce. Při pomnutí tohoto aspektu se lze o změně úrovně hluku bavit i jako o indikátoru poruchy zařízení, což už je z hlediska diagnostiky relevantní parametr. Lokalizací specifického zvuku lze pak i lokalizovat případnou poruchu.

Pokud pomíneme hluk vytvořený výše popsanými mechanickými interakcemi v elektrických strojích točivých, lze popsat další příčinu hluku, která je charakteristická pro elektrické stroje netočivé. Z důvodů uvedených v popisu magnetických materiálů je magnetický obvod výkonových transformátorů zpravidla dělen na vzájemně izolované plechy, a to z důvodu omezení ztrát vířivými proudy. Vrstvy takto děleného magnetického obvodu mění vlivem procházejícího střídavého magnetického toku svůj tvar. Tento jev se nazývá magnetostrikce. Projevem je nízkofrekvenční zvuk zejména o frekvenci třetího a pátého násobku základní harmonické magnetického toku. Tento hluk nijak neohrožuje sluch, nicméně může být nepříjemný. Omezením těchto zvukových projevů je v principu zamezení přenášení hluku z plechů na nádobu transformátoru, ze které se dále šíří do okolí. [1][2][14]

Omezení hluku může být obecně různorodé. Lze aplikovat protihlukové zástěny, aktivní tlumení, vysadit v přijatelné vzdálenosti od zařízení hustou vegetaci nebo zkrátka vhodně umístit zařízení například za provozní budovu, která by mohla plnit stejnou funkci jako protihluková zástěna, nebo zařízení umístit daleko od lokací, kde by mohl být hluk značně nežádoucí. Omezení hluku lze realizovat i formou aplikace reflexních tlumičů hluku magnetostrikce (tzv. hluchých kolen) v transformovně. Další možností jsou přímo konstrukční opatření jako stažení plechů magnetického obvodu, a tím pádem omezení mechanických rezonancí, či použití takových slitin kovů a provedení plechů pro magnetické obvody, které mají nízké hodnoty magnetostrikce či zvlněný tvar namísto rovného. [15][16]

Mimo vlastní zařízení a jeho funkci lze považovat za zdroj hluku i pomocné systémy, jakými jsou například ventilátory nebo čerpadla. [15]

## Tření

Tření je takový jev, který vzniká při pohybu dvou těles, která jsou ve vzájemném kontaktu. Vzniká tzv. třecí síla, která působí proti pohybu. Při působení tření se zhruba třetina mechanické energie změní na teplo a dochází k opotřebením třecích ploch. To vede ke snaze tření eliminovat. Toho lze docílit například použitím ložisek a maziv. [11]

V rámci sledování vibrací bylo uvedeno, že tento postup není příliš informativně vydatný při sledování kluzných ložisek. Pokud je mazivo kluzných ložisek dodáváno prostřednictvím olejového hospodářství, je možné aplikovat tzv. tribodiagnostiku. Jedná se o analýzu oleje, který je používán jako mazivo pro tento typ ložisek. Lze takto stanovit stav třecích ploch ložiska a maziva samotného. Při činnosti tohoto typu ložiska vznikají otěrové částice. Režim a míra opotřebením se stanovuje pomocí četnosti a velikosti těchto částic. Jako metodu lze použít spektrální analýzu oleje, pomocí které lze stanovit obsah kovových otěrových částic v syntetických i ropných mazacích olejích. Další metodou je ferrografie, což je velmi citlivá metoda. Tato metoda umožňuje separaci kovových ferromagnetických otěrových částic od maziva a dalšího znečištění. Výsledkem je tzv. ferrogram. Velkou výhodou této metody je absence přípravy vzorků před samotnou analýzou. [10]

### 3.1.4 Stárnutí vlivem dalších provozních vlivů

Mimo zmíněné degradační vlivy založené na působení fyzikálních jevů je nutno uvažovat i další vlivy, a to vlivy provozní. Některé z těchto vlivů je možné považovat za příčinu degradačních procesů, které jsou již popsány výše.

## Kontaminace

Kontaminace EIS vodou, olejem či chemickými sloučeninami může způsobit mechanickou a elektrickou degradaci. Tepelné namáhání může také postupovat vyšší rychlostí, pokud je v okolí vzduch. Oproti tomu v relativně inertní atmosféře, jakou je například vodík, může tepelné stárnutí probíhat pomaleji. [27]

Následky přítomnosti vlhkosti a vody jsou dobře známy. Nejčastějším degradačním důsledkem je zhoršení elektrických vlastností izolačního materiálu a obecná tendence ke zhoršení mechanických vlastností. Různé EIS na tento typ kontaminace reagují různým způsobem. Starší EIS založené na organických materiálech a lacích jsou více citlivé na zhoršování mechanických vlastností vlivem absorpce vody než modernější EIS založené na anorganických materiálech a syntetických pryskyřicích, jakými jsou například epoxidové pryskyřice. Avšak polyesterové materiály mohou ztratit své elektrické a mechanické vlastnosti při provozu ve vlhkých podmínkách. Hydrolýza je proces, při kterém vlhkost narušuje chemické vazby izolačního materiálu. Což může vést k delaminaci a riziku poruchy vlivem vystavení porušené izolace tepelnému, elektrickému nebo mechanickému namáhání. [27]

Dalšími nečistotami, které mohou EIS kontaminovat jsou oleje, kyseliny, zásadité sloučeniny nebo rozpouštědla. Tyto mohou rovněž ničit izolační materiál a pojiva. Organické materiály jsou obecně považovány opět za citlivější vůči tomuto způsobu degradace. [27]

Nelze opomenout prašnost prostředí. Jak bylo výše zmíněno, vrstva prachu v kombinaci s vlhkostí může vytvářet vodivé cesty na povrchu izolace. [27]

## Radiace

Mnoho zařízení pracuje v radioaktivním prostředí. Jedná se například o VN pohony pro dopravu chladiva reaktoru v primárním okruhu, kde již může být úroveň radioaktivity značná. Pokud má být životnost aplikovaného EIS dostatečná, je nutno jej zhotovit z materiálů, které lépe odolávají radiaci. Vhodnými materiály jsou keramiky, mikanity a skla. Naproti tomu organické materiály jsou vysoce náchylné vůči ionizačnímu záření. Polymerní materiály, jako jsou například polyamidy, pak dovedou odolávat vyšším dávkám radiace bez degradace. Principem stárnutí je interakce gama paprsků a neutronů s izolačním materiálem, jejímž výsledkem je produkce elektronů, které mohou izolaci poškozovat. [27]

## Mikroorganismy

Tento degradační vliv se týká zejména EIS na bázi organických materiálů. Jisté organismy jej mohou využívat coby zdroj energie. Jedná se především o bakterie a plísně. Tento degradační vliv může působit s působením povětrnostních vlivů. [10]

## Povětrnostní vlivy

Tyto vlivy mohou mít za následek změnu teploty okolí, proudění vzduchu či vlhkosti prostředí vlivem srážek. Mohou unášet nečistoty a mechanické částice, které působí erozivně na konstrukční části zařízení, EIS nevyjímaje. Tento proces umožňuje další pronikání nečistot a agresivních látek. [10]

### 3.1.5 Synergie stárnutí

V provozním prostředí je elektrický stroj typicky vystaven dvěma či více degradačním mechanismům. Interakce mezi těmito namáháními mohou být velice složitým problémem a mohou vyústit v neočekávané následky. Tato značná provázanost jednotlivých vlivů je jedním z důvodů, kdy je většina izolačních materiálů, systémů či komponent vystavena postupnému působení jednotlivých degradačních vlivů. Vícefaktorové stárnutí elektroizolačního materiálu se snaží zahrnout všechny vlivy provozních podmínek EIS. K tomuto postupu je přistoupeno jen v některých případech a je nezbytná pokročilá analýza získaných výsledků. Pochopení důsledků působení synergie degradačních faktorů je klíčem k návrhu online diagnostického systému, neboť dle významnosti vlivů a jejich interakcí



bude přistoupeno k volbě senzorů pro měření diagnostických veličin spolu s interpretací získaných dat. [27]

Jak již bylo uvedeno, v reálném provozu prakticky nelze hovořit o situaci, ve které by zařízení bylo vystaveno jedinému vlivu, který by způsoboval jeho deterioraci. Tato skutečnost se promítá jak do oblasti určování stavu pomocí modelů stárnutí, tak i při realizaci experimentů, kde se sada vzorků vystaví kombinaci těchto vlivů. V důsledku to znamená, že pro modelování spolehlivosti je nutno uvažovat superpozici všech působících vlivů a pro popis sledovaného objektu matematickým modelem, který zohledňuje určitý typ stárnutí nebo jejich kombinaci, je nutno empirickým postupem zjistit příslušné materiálové konstanty. [18]

Z praktického hlediska v kontextu VN strojů dochází k selhání EIS ve středně velkých VN točivých strojích převážně kombinací tepelného a elektrického stárnutí. Pro větší jednotky převažuje kombinace elektrického a mechanického stárnutí. [26]

## 3.2 Výskyt poruch elektrických strojů

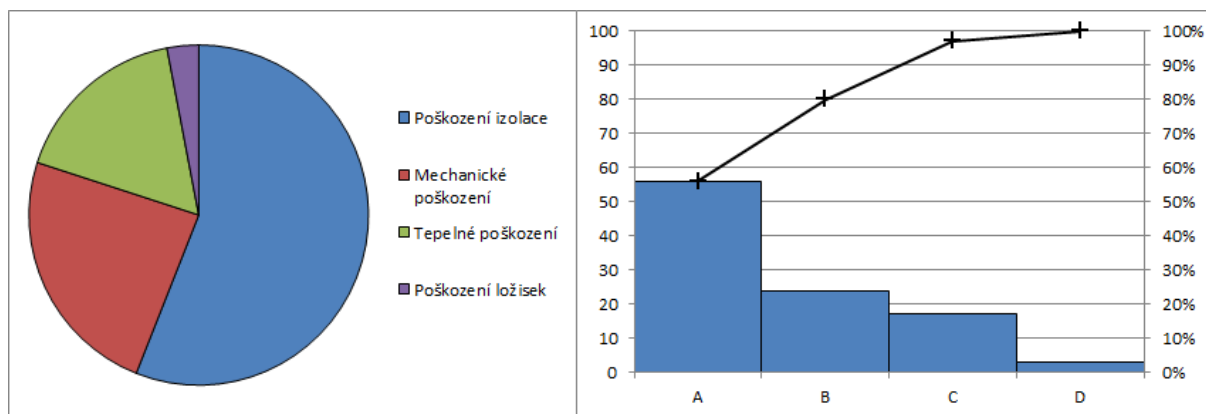
Jak již bylo řečeno v úvodu, v rámci přípravy diagnostického systému je vhodné provést rozvalu, jaké části elektrických strojů jsou vzhledem k jejich životnosti kritické ve smyslu deteriorace a jaké degradační mechanismy v zařízení probíhají. Teoretické předpoklady budou tedy porovnány s výsledky dvou studií, které se zabývají reálnými poruchami elektrických strojů. Studie [29] se zabývá poruchami hydroalternátorů a studie [30] se zaměřuje na transformátory v rozvodnách a blokové transformátory.

### 3.2.1 Elektrické stroje točivé

Studie [29] se ve svém úvodu odkazuje na šetření (CIGRE, 2003), které uvádí, že 56 % poruch hydrogenerátorů je zapříčiněna právě poruchou EIS. Tato skutečnost je zachycena v tabulce 3.1 a znázorněna i s Paretovým diagramem v obrázku 3.1. Spolu s mechanickým poškozením tak poškození izolace tvoří z hlediska Paretova pravidla relevantní většinu. V tomto případě však nelze opomíjet ani zbylé poruchy vlivem tepelného poškození a poškození ložisek, které v daném souboru porouchaných strojů mají svůj podíl. Tato studie uvádí do souvislosti poruchy dle příčiny vrcholové události, kterou je porucha.

Tabulka 3.1: Příčiny poruch hydroalternátorů dle [29]

Příčina	Třída v histogramu	Relativní četnost
Poškození izolace	A	56 %
Mechanické poškození	B	24 %
Tepelné poškození	C	17 %
Poškození ložisek	D	3 %

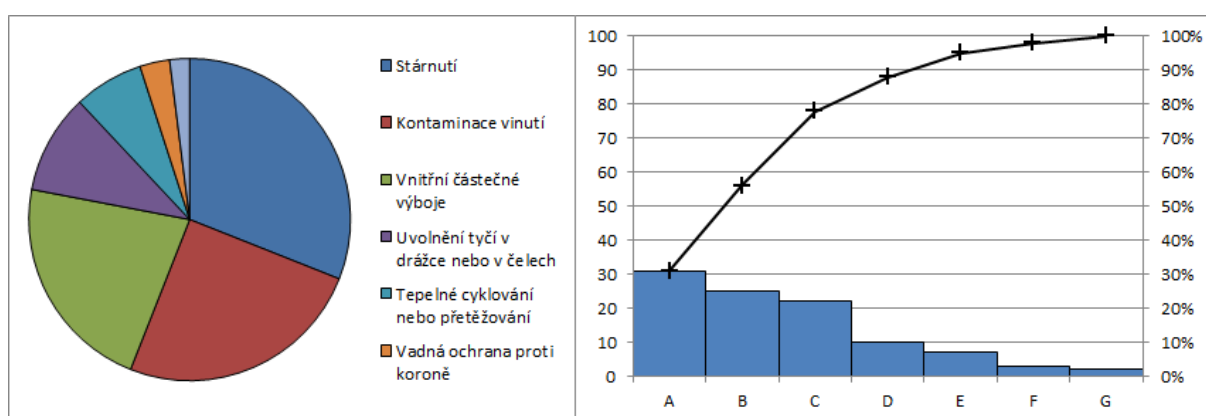


Obrázek 3.1: Graf příčin poruch hydroalternátorů a Paretův diagram dle [29]

Se zaměřením na poruchy EIS, které samy o sobě tvoří více než polovinu poruch, bylo ve studii [29] přistoupeno ke sledování jednotlivých příčin. Příslušné relativní četnosti příčin poruch EIS jsou zaznamenány v tabulce 3.2 a interpretovány v obrázku 3.2 opět včetně Paretova diagramu.

Tabulka 3.2: Příčiny poruch EIS hydroalternátorů dle [29]

Příčina	Třída v histogramu	Relativní četnost
Stárnutí	A	31 %
Kontaminace vinutí	B	25 %
Vnitřní částečné výboje	C	22 %
Uvolnění tyčí v drážce nebo v čelech	D	10 %
Tepelné cyklování nebo přetěžování	E	7 %
Vadná ochrana proti koruně	F	3 %
Přepětí	G	2 %



Obrázek 3.2: Graf poruch EIS hydroalternátorů a Paretův diagram dle [29]

Lze zde sledovat, že nejvíce poruch je způsobeno přirozeným stárnutím izolace, neboť i bez zvýšené teploty či dalších degradačních činitelů je EIS dimenzován na určitou dobu života. Dalšími velice výraznými příčinami poruch EIS je kontaminace vinutí spolu s částečnými výboji. Je tedy evidentní, že stav prostředí, ve kterém zařízení pracuje, je velmi

důležitý, a pokud je možné jej monitorovat, je vhodné to provést. Jak již bylo uvedeno, částečné výboje jsou věcí danou dimenzováním EIS, výrobou a konstrukcí zařízení. Při sledování výbojové činnosti je však možné zavčas odhalit blížící se poruchu. Sledování je rovněž vhodné, pokud to konstrukce, podmínky a finanční rozpočet umožňují.

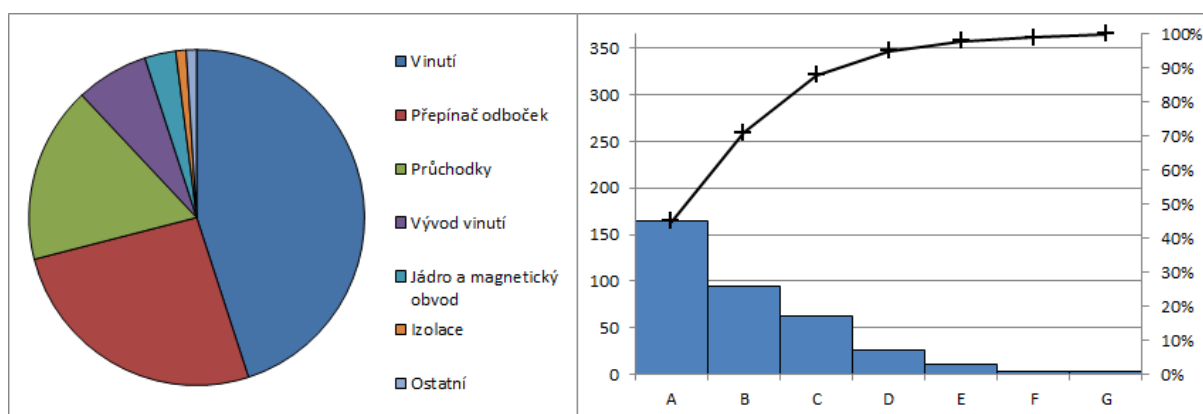
### 3.2.2 Elektrické stroje netočivé

Oproti údajům ve studii [29] se studie [30] zabývá výskytem poruch transformátorů tím způsobem, že sleduje lokalitu jejich výskytu a nikoliv jejich příčinu. Lokalitou je zde v podstatě míněn konstrukční či funkční prvek. V této studii byly vyhodnoceny příčiny poruch 364 transformátorů v rozvodnách a 82 blokových transformátorů. Jde pouze o údaje v prozatímní zprávě, neboť sběr dat a činnost pracovní skupiny WG A2.37 nebyly u konce.

V tabulce 3.3 jsou uvedena data týkající se poruch transformátorů, které byly nasazeny v provozu v rozvodnách. Je zde zároveň provedeno rozdělení míst poruch do tříd a tyto třídy jsou použity v grafické interpretaci v obrázku 3.3 podobně, jako tomu bylo v části této diplomové práce, která se zabývala poruchami hydroalternátorů.

Tabulka 3.3: Lokality poruch transformátorů v rozvodnách dle [29]

Příčina	Třída v histogramu	Četnost	Relativní četnost
Vinutí	A	164	45 %
Přepínač odboček	B	95	26 %
Průchodky	C	62	17 %
Vývod vinutí	D	25	7 %
Jádro a magnetický obvod	E	11	3 %
Izolace	F	4	1 %
Ostatní	G	4	1 %



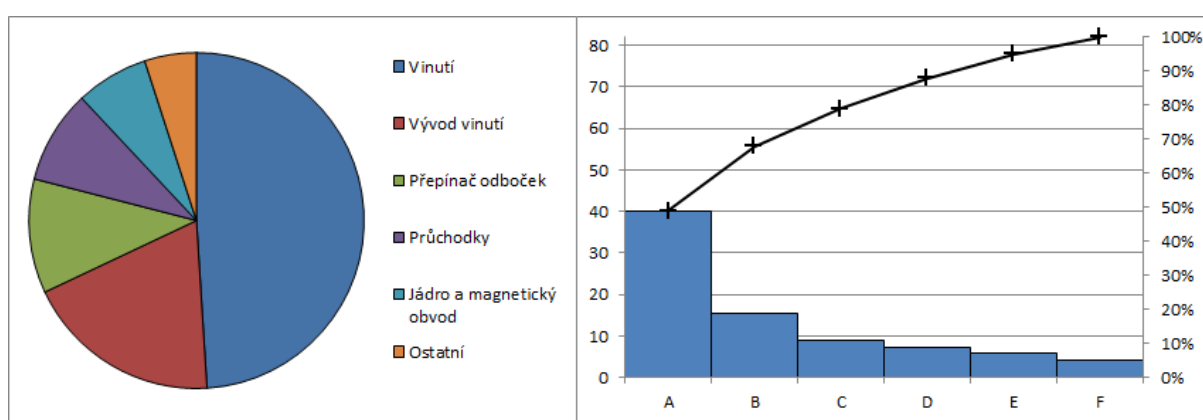
Obrázek 3.3: Graf poruch transformátorů v rozvodnách a Paretův diagram dle [29]

Stejným způsobem jsou zpracovány údaje pro blokové transformátory. Jak si lze z tabulky 3.4 a následně z obrázku 3.4 povšimnout, lokality poruch na obou typech transformátorů jsou do značné míry stejné. Mění se četnost poruch napříč jednotlivými zařízeními

z hlediska místa poruchy. Pro blokové transformátory se stejně jako pro transformátory v rozvodnách nejčastěji vyskytuje porucha přímo na vinutí transformátoru, ale je pro ně například častější porucha na vývodech vinutí a nikoliv v přepínači odboček.

Tabulka 3.4: Lokality poruch blokových transformátorů dle [29]

Lokalita	Třída v histogramu	Četnost	Relativní četnost
Vinutí	A	40	49 %
Vývod vinutí	B	16	19 %
Přepínač odboček	C	9	11 %
Průchodky	D	7	9 %
Jádro a magnetický obvod	E	6	7 %
Ostatní	F	4	5 %



Obrázek 3.4: Graf poruch blokových transformátorů a Paretův diagram dle [29]

Vzhledem k těmto datům je evidentní, že místo poruchy bude značně záviset na provozu zařízení. Lze například očekávat, že v rámci nasazení transformátoru v rozvodně bude nutné často přepínat odbočky a regulovat tak napětí v síti, čímž dojde k rychlejšímu opotřebení přepínače odboček. Tým již v této zprávě uvažuje záležitosti jako je čas po který bylo zařízení před poruchou provozováno. Naneštěstí tato průběžná zpráva neanalyzuje konkrétní příčiny selhání v jednotlivých subsystémech, a tak není přesně popsán proces poruchy v konkrétní části transformátoru a způsob využívání konkrétních transformátorů. V roce 2015 vydalo CIGRE dokončenou studii Transformer Reliability Survey.

Studie [30] se hned v úvodu průběžné zprávy odkazuje na skutečnost, že se již dvě pracovní skupiny CIGRE pokoušely o vyhodnocení příčin poruch transformátorů, ale neúspěšně. Důvodem byly nekompletní a nekompatibilní odpovědi. Základem úspěchu je tedy sběr takových dat, která jsou vzájemně kompatibilní a lze je uvádět do souvislosti napříč celými roky průběhu studie.

### 3.2.3 Závěr analýzy

V obou případech byla provedena analýza základním nástrojem pro řízení jakosti, kterým je v tomto případě Paretova analýza. Stručně shrnuto se jedná o využití Paretova pravidla

(80/20) a seřazený histogram s vyjádřenou křivkou kumulativní četnosti. Při provedení bylo postupováno dle metodiky uvedené v [20].

V případě této diplomové práce a v elektrotechnologické diagnostice obecně je důležitým poznatkem, který z těchto studií plyne, že nejnáchylnější částí elektrických strojů je právě EIS. Což jako informace samo o sobě nestačí a bylo by nutno přistoupit ke studiu mnoha dalších podobně orientovaných studií a do závěrů zahrnout i podíl jednotlivých degračních faktorů a ne pouze skutečnost, kde nastal stav, kdy není dále možné zařízení provozovat. Tyto údaje není možné získat pouze vyplněním dotazníku spolu s určením vrcholové události. Sběr dat v reálném čase je pro takové šetření tedy velmi důležitý.

Nicméně studie [29][30] potvrzují tvrzení ve zdrojích [9][10][26][27] o významné citlivosti EIS jako prvku ve spolehlivostním řetězci. Je tedy podložen závěr, že je tento subsystém z diagnostického hlediska velmi důležitý, a je vhodné sledovat hodnoty veličin, které způsobují jeho deterioraci. Údaje studie [30] korespondují s literaturou [26], kde je uvedena problematika konstrukčních provedení a funkčních částí transformátorů.

Problematika konstrukčních provedení a jejich vlivů na vlastnosti zařízení je hojně diskutována v další literatuře, která je rovněž uvedena v některých částech této diplomové práce. Vydatnými prameny jsou například: [7][8][26][27].

## 4 Návrh systému

Předcházející kapitola pojednávala o vlivu působících degradačních mechanismů v elektrických strojích. Na základě stanovení významných degradačních činitelů a jejich popisu je v této kapitole přistoupeno k samotnému výběru vhodných systémových komponent pro snímání diagnostických signálů.

Postupováno je od výběru klíčových prvků přes koncept systému, kde jsou shrnuty požadované funkce systému a jejich provázanost, až k výběru a popisu konkrétních prvků a subsystémů.

Zhodnoceny jsou zejména technické náležitosti, a s tím spjatá kvalita použitých komponent. Uveden je rovněž účel jednotlivých částí systému v souvislosti s jeho zamýšleným využíváním.

### 4.1 Koncepce systému

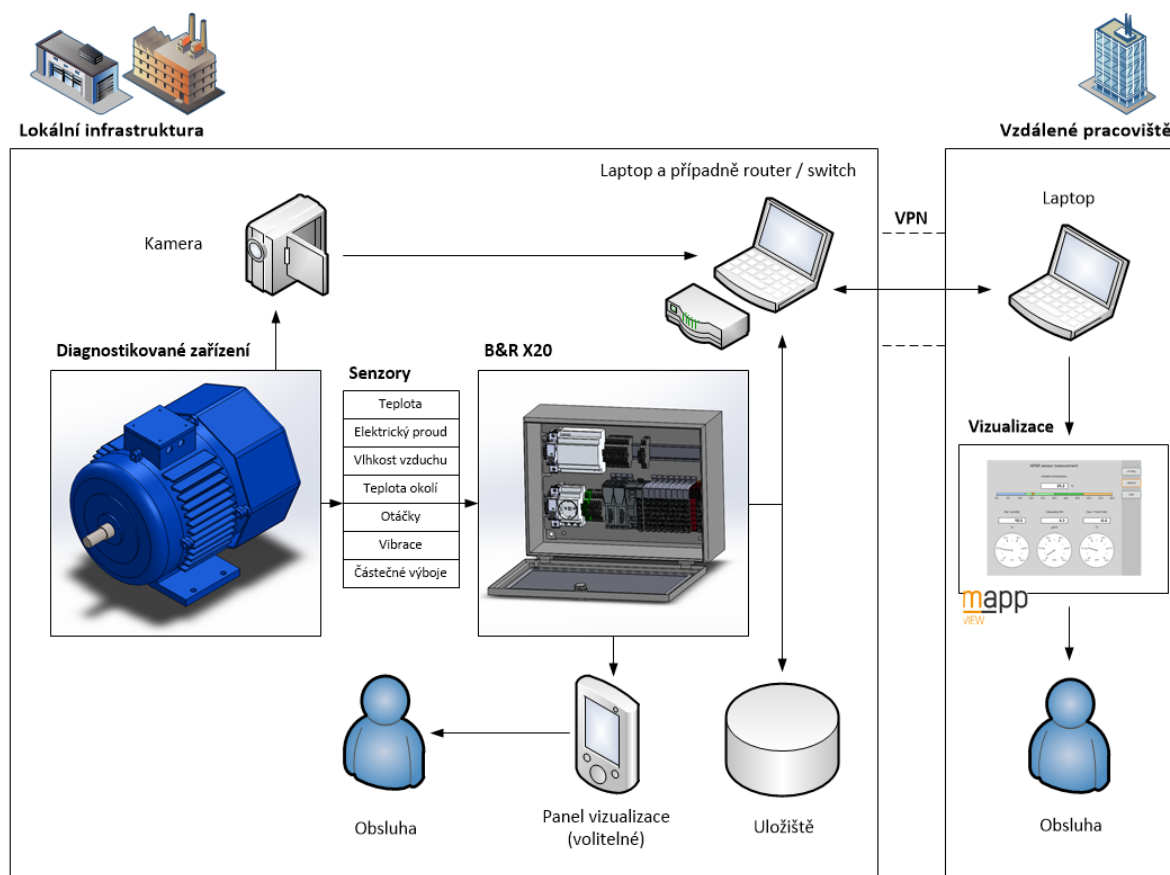
Navrhovaný online diagnostický systém by měl být komplexním zařízením, které v první řadě zajišťuje akvizici diagnostických signálů. Jedná se o sběr signálů pomocí senzorů připojených k analogovým či digitálním vstupním kartám zvoleného PLC systému, který je základem pro online diagnostický systém navrhovaný v této diplomové práci. Senzorový výstup může být ve standardním rozmezí výstupního proudu (0-20 mA, 4-20 mA) či napětí (0-10 V), čehož je dosaženo pomocí integrovaného převodníku, případně mohou být výstupní signály senzorů digitální nebo je senzor připraven pro přenos měřených hodnot průmyslovou sběrnici. Lze použít i takové senzory, pro které je nutné použít takovou vstupní kartu, která disponuje vhodným převodníkem, a převod výstupního signálu nastavit. Získaná data mohou být dále vizualizována na panelu obsluhy, zálohována a zpracována.

Tento online diagnostický systém je koncipován tak, aby pracovník mohl sledovat hodnoty měřených veličin v reálném čase, případně sledovat trendy těchto dat, či s jistým zpožděním data sledovat a dále vyhodnocovat ze vzdáleného pracoviště. Systém lze dále doplnit prediktivními modely a určovat tak zbytkovou životnost zařízení na základě vstupních dat.

Mimo systém měření se senzory je do návrhu systému zahrnuto i pozorování objektu kamerou, která bude pořizovat videozáznam zařízení. To má důvody bezpečnostní i praktické. Tento vizuální záznam dovede poskytnout okamžitou informaci, co se v daném čase se zařízením dělo. Například při náhlém přerušení měření lze snadno ověřit, zda bylo zařízení relokováno či zda je podrobena profylaxi. Vždy tak lze rychle vizuálně zhodnotit, zda je přijatelné v daných podmínkách zařízení provozovat, a to i bez fyzické přítomnosti pracovníka.

V koncepci systému rovněž figuruje uložště. To zde zastupuje prvek, který slouží k ukládání dat ve formě výpisů do souboru, ke kterým lze později přistupovat jako k záloze v případě selhání nebo z důvodu podrobnější analýzy dat.

Celý návrh online diagnostického systému včetně výše zmíněných funkcionalit a vzájemných vazeb je vyobrazen na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Koncept navrhovaného online diagnostického systému

## 4.2 Volba senzorů pro získávání diagnostických signálů

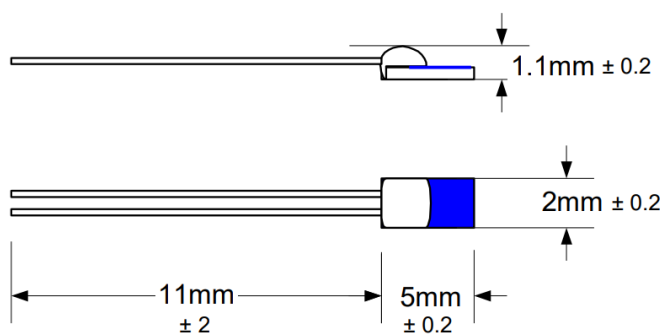
Tato sekce se zabývá výběrem senzorů, které je nutno zakoupit a implementovat do měřicího systému, aby bylo docíleno sběru důležitých a relevantních diagnostických signálů. Vzhledem k značnému množství degradačních procesů, jejich interakcím a určité míře dosažitelnosti stanovených cílů byly v této verzi systému vybrány senzory pro sledování pouze vybraných vlivů. V budoucnu není vyloučené možné rozšíření.

Informace o příslušných komponentech byly získány z datových listů, které jsou dostupné na webových stránkách příslušných výrobců či distributorů. Některé grafické materiály jako fotodokumentace komponent či výkres s rozměry byly rovněž převzaty z těchto webových stránek. Pokud tak bylo učiněno, je tato skutečnost v popisu příslušného obrázku uvedena.

### 4.2.1 Měření teploty

Z předchozí kapitoly vyplývá, že nejdůležitějším deterioračním procesem ke sledování je stárnutí vlivem tepelného namáhání. Proto je prioritou získávat informaci o průběhu hodnot teploty v zařízení, a to pokud možno z co nejvíce míst a co nejblíže ke zdroji, aby nebyla teplota zkreslována úbytky teploty na jednotlivých vrstvách. Toho lze obecně dosáhnout vhodným rozmístěním vhodně zvolených teplotních senzorů.

Pro tento účel byly zvoleny senzory TT-PT1000A-2050-11-AUNI. Jedná se o PTC termistor PT1000 pro rozsah měření  $-40$  až  $300$  °C, s maximální hodnotou teploty  $400$  °C a s třídou přesnosti A. Je dodáván pouze s krátkými přívodními vodiči. Provedení senzoru umožňuje dobré založení do různých prostor, což je v rámci vývoje důležitou vlastností. Výhodou je nízká cena a snadné připojení do PLC systému. Třída přesnosti A reprezentuje toleranci  $0,06$  při  $0$  °C. Číslo v označení PT1000 vyjadřuje hodnotu elektrického odporu bez zatížení měřicím proudem při teplotě  $0$  °C. Výrobce dále uvádí dobrou odolnost senzoru při vložení do elektrického pole. Tato odolnost je zajištěna keramickou povrchovou úpravou čidla. Dále je jako parametr uvedena velmi dobrá odolnost vůči nárazům a vibracím. Rozměry čidla včetně tolerancí jsou uvedeny na obrázku 4.2. [33]



Obrázek 4.2: Termistor TEWA TT-PT1000A-2050-11-AUNI, převzato z [33]

Alternativními často využívanými postupy pro měření teploty založené na jiném principu je například měření pomocí termočláňkových senzorů a bezkontaktní měření pomocí termovize.

### 4.2.2 Měření elektrického proudu

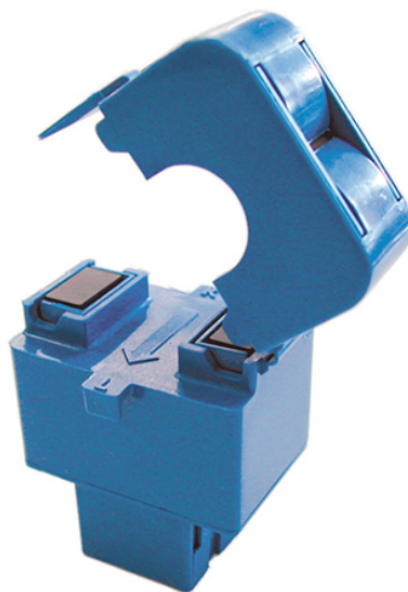
Toto měření je nositelem informace o proudovém zatěžování sledovaného elektrického stroje, ale skýtá i další data, ze kterých lze v rámci diagnostického procesu vyvozovat další závěry. Lze totiž posuzovat, zda je zatížení elektrického stroje v korelaci s měřenou teplotou zařízení a jeho okolí. Lze tak například včasné identifikovat závadu na chladícím systému.

Pro účely měření elektrického proudu byly zvoleny tři proudové senzory výrobce LEM typu AT 50 B10. Tyto umožňují snadnou montáž a rychlé umístění přívodních vodičů elektrického stroje do geometrie senzoru. Podoba tohoto senzoru je zachycena v obrázku



4.3. Měření proudu je možné do jmenovité efektivní hodnoty 50 A (AC). Pomocí integrovaného převodníku senzor snímaný elektrický proud interpretuje jako standardní analogový výstup 0-10 V. Rozmezí pracovních teplot je výrobcem uvedeno -20 až 60 °C s krytím IP40. Přesnost je uvedena jako 1,5 %. [34]

Při zajištění vysoké vzorkovací frekvence by mohlo být těmito senzory například možné sledovat rozběhové proudy asynchronních motorů malých výkonů nebo obecně elektrická zařízení s elektrickým proudem nepřesahujícím efektivní hodnotu 50 A (AC). Nespornou výhodou těchto senzorů je i jejich parametr výstupu, který je již připraven pro standardní vstupní karty PLC systémů, a není tak nutno navrhovat příslušný převodník. [34][40]



Obrázek 4.3: Proudový senzor LEM AT 50 B10, převzato z [34]

Pokud by se objevil požadavek na měření rozběhových proudů větších strojů či větších jmenovitých proudů, lze vybrat jiné senzory s větším proudovým rozsahem. Výrobce LEM disponuje produktovým portfoliem, které je schopné tyto požadavky do značné míry pokrýt. [34]

Pokud by i tak proudový rozsah senzorů nebyl dostačující, bylo by nutno přistoupit k implementaci měřících proudových transformátorů za účelem měření elektrického proudu. Tento způsob je stále hojně využívaným průmyslovým řešením a výrobci PLC systémů tomu přizpůsobují svou produktovou nabídku. [40]

### 4.2.3 Měření relativní vlhkosti vzduchu

Při provozu i skladování je kromě teploty samotné i poměrně důležitým údajem informace o relativní vlhkosti prostředí. Vlhkost se při provozu může dostávat do zařízení například spolu s chladícím vzduchem, a zhoršovat tak pracovní podmínky prostředí pro EIS.

Za účelem sledování relativní vlhkosti byl vybrán senzor APAR typ AR252/RS485 zobrazený na obrázku 4.4. Výrobce nabízí k prodeji i takové verze tohoto senzoru, které

například obsahují prodloužené čidlo pro měření nebo display pro vizualizaci naměřených hodnot. Nabídka obsahuje verze se standardním napěťovým nebo proudovým výstupem nebo přenosem výsledků pomocí průmyslové sběrnice. Vybraný senzor předává výsledky pomocí standardní průmyslové sběrnice RS-485, a je tedy možné využít protokol Modbus RTU. Toto řešení je na rozdíl od analogového přenosu dat nenáchylné na možná rušení. Rozsah pro měření teploty je uveden od  $-20$  do  $80$  °C a rozsah pro měření relativní vlhkosti je 0 až 100 %. Krytí senzoru je IP40. Vodiče pro komunikaci a napájení 12 až 36 V DC jsou do senzoru přivedeny průchodkou se závitem. Tato průchodka se při dotažení závitu utěsňuje, a proto může tento senzor pracovat i v prostředí s vysokou vzdušnou vlhkostí. Toto zařízení kromě měření relativní vlhkosti a teploty okolí vrací vypočtenou hodnotu rosného bodu. [36]

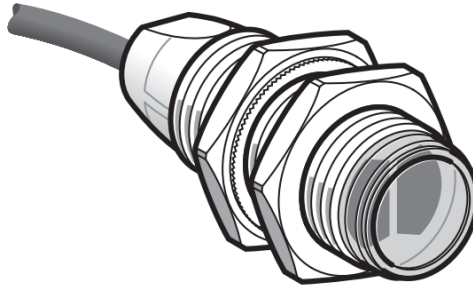


Obrázek 4.4: Senzor APAR AR252/RS485, převzato z [36]

#### 4.2.4 Snímání pohybu

Pro tento úkol bylo zvoleno fotoelektrické (princip light-on) pulzní čidlo od výrobce Panasonic typ CY-121A-P se standardním digitálním výstupem. Tento senzor je zobrazen v obrázku 4.5. Princip light-on znamená, že se na digitálním výstupu senzoru objeví logický stav zapnuto v momentě příjmu odrazu od pohybujícího se prvku. Invertovaný digitální výstup by vracel senzor typu light-off. Čidlo by mohlo být použito pro čítání počtu otevření revizního otvoru nebo jako prostá optická závora. Výrobce nabízí další příslušenství v podobě reflexních prvků či aretačního zařízení zajišťujícího neměnnou pracovní pozici senzoru. Produkty řady CY-100 mají stupeň krytí IP67 a lze je provozovat v teplotách od  $-25$  do  $55$  °C. Rozsah napájení je od 12 do 24 V DC. Dosah senzoru CY-121A-P je deklarován na 100 mm. [35]

Pro rychlé čítání impulzů při snímání otáček by bylo zapotřebí zvolit vhodný funkční PLC modul, který dokáže reagovat v požadované rychlosti na impuls zachycený senzorem



Obrázek 4.5: Senzor Panasonic CY-121A-P, převzato z [35]

při každé otáčce, a dále by bylo nutné zakoupení čidla otáček s adekvátní rychlostí snímání. Tyto komponenty jsou kvůli vyšším nárokům, které jsou na ně kladeny, finančně náročnějšími. Konfigurace funkčního modulu s připojeným senzorem by však probíhala obdobným způsobem. Čidla otáček mohou podobně jako senzory pohybu fungovat na principu optickém, indukčním, kapacitním, magnetickém či ultrazvukovém. [32][40]

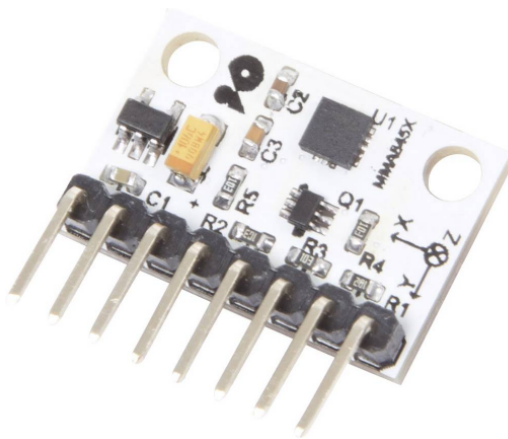
#### 4.2.5 Měření vibrací

V návaznosti na předchozí kapitolu, kde bylo řečeno, že vibrace jsou rovněž důležitým degradačním faktorem elektrických strojů, je tedy v logickém sledu uvedeno, jak je možné získat údaje o jejich velikosti. Vibrace lze chápat nejen jako degradační faktor, ale i jako veličinu, která může indikovat poruchu či zhoršující se stav. Zde je vhodné podotknout, že jediným relevantním údajem nemusí být pouze velikost vibrací, ale stejně či více důležitým údajem může být trend jejich vývoje. To znamená, že pro online diagnostický systém může být rovněž velmi důležité sledovat vývoj amplitudy vibrací v čase.

Klasickým přístupem pro měření vibrací v elektrických strojích je tříosý akcelerometr. Konvenční akcelerometry pro snímání vibrací fungují například na elektrodynamickém či piezoelektrickém principu. Rovněž lze sledovat akustickou emisi způsobenou vibracemi. Tento způsob může být značně náročný vzhledem ke skutečnosti, že může být aplikován v prostředí, které je zarušené hlukem produkovaným okolním provozem. Dalším problémem může být skutečnost, že veškerá akustická emise nepochází pouze ze zdroje, kterým je chvění ploch a konstrukčních prvků elektrického stroje, ale může se jednat i o turbulentní proudění chladicího média. [21]

Hlavní úsilí při získávání údajů o vibracích bude však nasměřováno k vývoji vlastního subsystému pro měření vibrací. V první fázi bude využita vývojová platforma Arduino UNO s MEMS senzorem. Tento typ senzoru vibrací obsahuje například součástka MMA8452Q od výrobce MAKERFACTORY, která je v ČR distribuována prodejcem Conrad Electronic Česká republika. Zmíněná součástka je uvedena v obrázku 4.6.

Tyto senzory mají oproti konvenčním akcelerometrům zanedbatelnou cenu, a bylo by tak možné signifikantně snížit finanční náročnost měření a vyhodnocování vibrací.



Obrázek 4.6: Součástka MMA8452Q, převzato z [37]

Je nutno objektivně vyhodnotit přesnost a technické limity této alternativy. Vhodným postupem by byla komparace získaných dat s referenčním měřením pomocí konvenčního systému měření vibrací.

Použitím tohoto senzoru tedy dochází k odklonu od prvotní koncepce a vzniká samostatný subsystém pro měření vibrací. Nevýhodou je nutnost obsluhovat jej z jiného uživatelského prostředí, což je nahrazeno zmíněnou nízkou finanční náročností.

#### 4.2.6 Měření částečných výbojů

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, částečné výboje mohou mít různé příčiny. Kromě této skutečnosti mohou mít rovněž ale i různé projevy. Je možné je detekovat pomocí metod založených na elektrickém principu projevů částečných výbojů nebo přistoupit k použití metod detekce pomocí neelektrických veličin. [10]

##### Elektrické projevy

Metody spojené s detekcí elektrických projevů částečných výbojů lze v zásadě dělit na přímé a nepřímé. V rámci přímých metod jsou částečné výboje snímány pomocí vazebního členu, kterým je vhodná impedance, a vhodného obvodu. Nepřímé metody jsou založeny na senzorech, které jsou schopny zachytit elektromagnetický projev částečných výbojů. Patří sem měření pomocí induktivně vázané sondy, diferenciální elektromagnetické sondy, drážkové kapacitní sondy, kapacitního či induktivního snímače nebo LEMKE sondy. Specifika a popis těchto zmíněných měření a senzorů je popsán například v [10].

##### Chemické projevy

Jednou z možností zjištění přítomnosti částečných výbojů je detekce chemických produktů, které při nich vznikají. Při částečném výboji v dutině izolace či na povrchu elektroizolačního materiálu se jedná o rozklad vzduchu a vzniká ozon. Detekcí ozonu v chladícím vzduchu lze tedy usuzovat výbojovou činnost uvnitř stroje. Je rovněž možné analyzovat

přítomnost dalších chemických produktů, jakými jsou například vodík, methan, ethylen, acetylen nebo propylen. Dle výskytu lze usuzovat nejen na typ částečného výboje, ale porovnáním poměrů lze případně i určit typ závady elektrického stroje. [10]

Nicméně čidlo pro detekci ozonu je relativně drahé a k jeho implementaci by došlo pravděpodobně při sledování stavu vysokonapěťových výkonných alternátorů. Proto nebude v této verzi projektu zahrnuto do systému. Eventuální rozbor dalších chemických produktů je záležitostí strukturálního přístupu elektrotechnologické diagnostiky a tyto metody jsou zpravidla pro online diagnostický systém nevhodné.

### **Akustické projevy**

Částečné výboje lze také sledovat dle akustické emise, kterou způsobují. Měřit lze vhodnými mikrofony ve slyšitelném pásmu frekvencí nebo v oblasti ultrazvuku. Ultrazvukové projevy jsou v případě průmyslového prostředí vhodnějšími ke sledování, protože mají vyšší směrovost a jsou charakterističtější pro částečné výboje spíše než pro okolní akustické pozadí. Obecně lze postupovat buďto hledáním zdroje hluku pomocí jednoho mikrofonu nebo rozmístěním několika mikrofonů a hledáním zdroje zvuku pomocí vhodného matematického aparátu softwarovým způsobem. Druhý ze zmíněných způsobů měření lze s výhodou využít v případě, kdy je pomocí online diagnostického systému sledován transformátor. [10]

### **Optické projevy**

Částečné výboje se v oblasti záření projevují ve viditelných vlnových délkách, v infračerveném (IR) a ultrafialovém (UV) pásmu. V prvním případě lze, pokud to konstrukce zařízení dovoluje, sledovat zařízení konvenční kamerou. Pro ultrafialovou oblast je nutno použít speciální UV kameru. Ta může být konstruována například tak, že kombinuje snímání viditelného spektra a UV projevy částečných výbojů. Tak lze interpretovat výbojovou činnost ve viditelném prostředí. Výbojová činnost je rovněž doprovázena tepelnými účinky, které mohou být zachyceny citlivou termovizní kamerou. [10]

### **Shrnutí ČV**

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, částečné výboje vznikají v EIS NN strojů při napájení pomocí výkonové elektroniky nebo ve VN elektrických strojích. Některé z výše uvedených metod je možné zahrnout do online diagnostického systému. Je však nutné podotknout, že online sledování částečných výbojů je poměrně nákladné, komplikované, a proto by k němu bylo přistoupeno v případě konsenzu potenciálních investorů, a to z důvodů důležitosti konkrétního sledovaného zařízení. Proto v současné verzi online diagnostického systému není ke sledování částečných výbojů přistoupeno. To se ovšem nevyklučuje s eventuálním offline diagnostickým šetřením ve fázi testování sledovaného zařízení před nasazením do provozu nebo v rámci profylaktických měření.

Problematika částečných výbojů je skutečně komplexní záležitostí, která je předmětem celých kapitol či dokonce celých literárních pramenů a příspěvků na odborných konferencích.

### 4.3 PLC systém

V této části bude nejdříve popsán PLC systém jako technický prvek a posléze bude proveden popis jednotlivých modulů, z nichž každý plní různé funkce. Rovněž je provedeno velmi stručné porovnání více dostupných PLC systémů a systémů pro monitorování zařízení.

PLC či také programovatelný automat je průmyslové technické zařízení, které je možno vybavit sadou instrukcí - programem. Tento program je vytvořen uživatelem dle jeho individuálních potřeb za určitým účelem. Takto naprogramované PLC s příslušnými perifériemi je schopné automatizovaně obsluhovat uživatelem zvolenou technologii. Tou může být například přepínání cest v oběhovém systému médií, jako jsou kapaliny či plyny, pomocí příslušných aktuátorů nebo snímání různých signálů s využitím příslušných senzorů za účelem monitoringu či diagnostiky, ale i obsluha regulačních smyček a vyhodnocování získaných signálů. PLC systém mimo provádění logických operací dovede obsluhovat i analogové vstupy a výstupy. Je tedy zřejmé, že v automatizovaném procesu figurují vysoké nároky na spolehlivost a bezpečnou funkci zařízení. Proto jsou v průmyslu nasazované PLC systémy konstruovány s důrazem na spolehlivou funkci a odolnost vůči rušení. Jejich poruchovost lze prohlásit za zanedbatelnou a nebo alespoň výrazně pod úroveň poruchovosti obsluhovaných periferních zařízení, jakými jsou senzory a akční členy, nebo pro funkci další nezbytná zařízení jako svorkovnice, relé, stykače či tlačítkové spínače. [41]

Již na počátku byl pro vývoj online diagnostického systému zvolen PLC systém X20 od společnosti B&R. Tento byl poskytnut v rámci spolupráce se společností ABB. Pro úplnost však byla provedena rychlá rešerše týkající se ostatních PLC systémů, které jsou v současné době na trhu dostupné. Porovnány byly i některé základní vlastnosti. Některé obrázky a zejména pak technické údaje a další specifikace byly převzaty z webových stránek společností, které daná zařízení a jejich dílčí prvky vyvíjejí.



Obrázek 4.7: PLC systémy Siemens Simatic S7-1200, ABB AC500 a B&R X20 [38][39][40]

Všichni zmínění výrobci nabízí poměrně rozsáhlý výběr komponent pro PLC systém,

jako jsou CPU, I/O karty, komunikační moduly a příslušenství. Všechny systémy umožňují rychlou a snadnou montáž na DIN lištu, což je pro provedení montáže elektrické výzbroje v rozvaděcích standardní řešení. Ve fázi volby systému je i dobrou taktikou zvážit, v jakém prostředí bude PLC systém provozován. Všichni tři výrobci nabízejí své produkty ve víceméně standardním krytí pro relativně bezpečné prostředí. Všichni zmínění výrobci však nabízejí stejné systémy v provedení se zvýšeným krytím IP či se zvýšenou odolností vůči vnějším vlivům, jako jsou zvýšené vibrace, vysoká relativní vlhkost či provedení pro výbušné prostředí. [38][39][40]

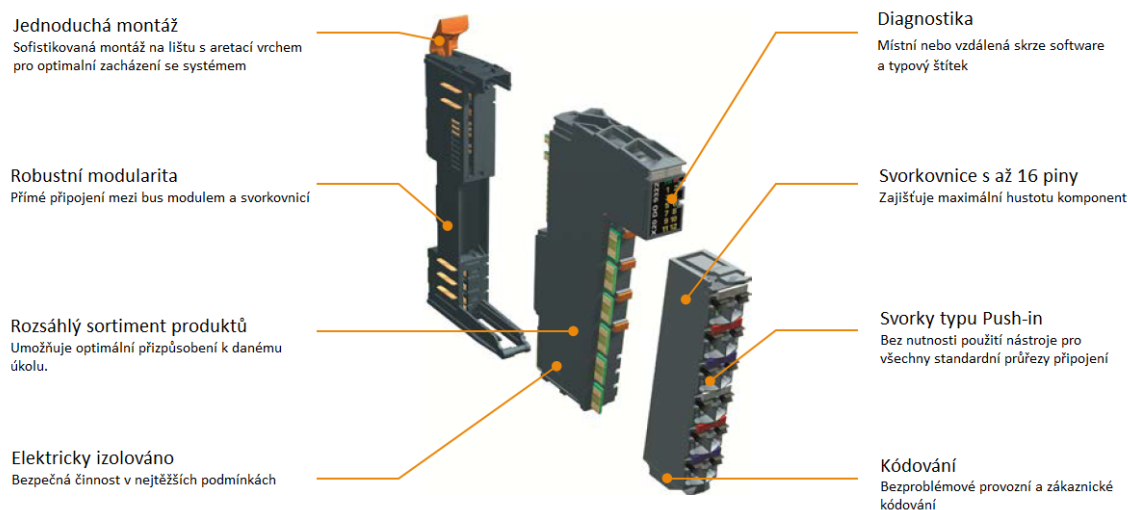
Zmínění výrobci dodávají i své CMS. Tyto systémy mohou být provedeny na základě PLC systému daného výrobce nebo byly vyvinuty jako samostatný systém. Účelem této práce je však systém pro online diagnostiku navrhnout, a vytvořit tak vlastní CMS. Zakoupit tedy hotové řešení není cenově efektivní a neobsahuje zamýšlenou vlastní invenci.

Pro úplnost je vhodné alespoň ve stručnosti tyto CMS představit. Například SIPLUS CMS1200 je systém určený pro připojení 4 akcelerometrů za účelem snímání vibrací a jednoho čidla pro snímání otáčivé rychlosti. Siemens nabízí další dva CMS systémy, a to SIPLUS CMS2000 a SIPLUS CMS4000. SIPLUS CMS2000 umožňuje připojení až dvou modulů pro měření vibrací či dvou modulů pro měření teploty. SIPLUS CMS4000 umožňuje připojení kompaktnějších senzorů s jejich příslušnými konektory. AC500 Condition Monitoring CMS je oproti zmíněným více univerzální a umožňuje šestnáct analogových měření o rychlosti padesát tisíc vzorků za sekundu a převod vstupního signálu pomocí 24bit ADC. Společnost B&R rovněž nabízí svůj CMS ve formě modulu pro systém X20, a to pod označením X20CM4810. Obsahuje čtyřkanálové měření a analyzování vibrací, nastavitelnou filtraci signálu a FFT. Výrobci spolu s CMS dodávají i software potřebný pro analýzu měřených dat. [38][39][40]

V návaznosti na tuto diplomovou práci je však dobré podotknout, že všechny zmíněné CMS jsou zaměřeny hlavně na snímání mechanických veličin, kterými jsou zejména vibrace, a s tím spojené vyhodnocování. Některé systémy umožňují i připojení dalších měření (SIPLUS CMS2000, SIPLUS CMS4000 či AC500 Condition Monitoring CMS). Obecně lze ale prohlásit, že univerzálnost řešení těchto výrobců v návaznosti na zmíněné produkty je omezená. Naproti tomu v této práci navrhovaný online diagnostický systém bude zaměřen na klíčové diagnostické signály elektrických strojů.

Jak již bylo uvedeno, vybrán byl systém B&R X20, a to na základě svých předností a jeho dostupnosti na pracovišti, kde se nachází i konzultant této diplomové práce. Mezi přednosti tohoto PLC systému se řadí jeho vysoká úroveň modularity, relativně dobrá dostupnost a atraktivní design. Zmíněná propracovaná modularita souvisí s velkou výhodou systému X20, kterou je nárůst hustoty komponent o 50 %. To znamená, že při zachování prostoru se zvýší hustota elektrické výzbroje dvojnásobně bez nutnosti omezení svorkovnic. Systém X20 je tak i ergonomicky optimalizovaný. Vysoký stupeň modularity dále souvisí s rozsáhlou nabídkou komponent od výrobce B&R, a tím pádem s flexibilitou systému. Zákazník tak může zakoupit ty komponenty, které skutečně potřebuje, a to

v požadovaném provedení. Nemusí být například omezen hotovými verzemi potřebných komponentů, ale jednoduše si ho může upravit dle svých představ. Příkladem může být volba vhodných svorkovnic s požadovaným počtem svorek pro konkrétní funkční modul. Zde je vhodné podotknout, že i toto provedení má jisté limity a nelze sestavit jakékoliv kombinace. Systém B&R X20 obsahuje také značné množství indikačních LED, které informují o stavu zařízení, podobně jako systém AC500 od společnosti ABB či S7-1200 od společnosti Siemens. Jak bylo zmíněno, výrobce k systému X20 umožňuje dokoupit panely vizualizace, a to v kombinaci s PC.



Obrázek 4.8: Funkce systému B&R X20, převzato z [40]

Na obrázku 4.8 je vyobrazeno, že se systém skládá v podstatě ze tří hardwarových úrovní. První úroveň je takzvaný "bus" modul, který zajišťuje rozvod napájení a komunikaci jednotlivých komponent s CPU jednotkou prostřednictvím interní sběrnice X2X. Druhou úrovní je modul elektroniky. Lze jej také označit jako funkční modul. Může to být například komponent napájení pro zařízení na výstupu či AD převodník pro měřené signály. Poslední úrovní jsou svorkovnice pro připojení signálových vodičů. V nabídce je více různých variant. Jak již bylo zmíněno, lze si tak vybrat svorkovnici, která vyhovuje připojení zamýšleného zařízení k funkčnímu modulu. Svorkovnice jsou dodávány v provedení, které umožňuje snadnou montáž a připojení vodičů standardních průřezů bez použití nástroje. Nespornou výhodou je bezproblémová údržba. Při výměně funkčního bloku zůstává zapojení i se svorkovnicí nezměněné a po výměně je opět připojeno jako celek. Tyto tři vrstvy jsou oddělitelné, a tak zajišťují značnou míru konfigurovatelnosti, dle zamýšleného využití.

Rakouská společnost B&R prošla v roce 2017 akvizicí společností ABB, a je zde tak zaručena kontinuita vyvíjeného úsilí a důrazu na kvalitu a spolehlivost celého produktového portfolia spolu se silnou vazbou na požadavky jednotlivých průmyslových odvětví. Rovněž tak společnost ABB rozšíří prostřednictvím produktů společnosti B&R sortiment produktů v sektoru průmyslové automatizace a vylepší své postavení na trhu. [40][42]



### 4.3.1 CPU

Centrální procesorová jednotka zajišťuje PLC systému "inteligenci". Tato jednotka tedy obsahuje mikroprocesor, a vykonává tak sadu instrukcí obsažených v programu a zajišťuje tak správnou funkci modulů, které jsou k centrální jednotce připojeny. S tím je spojena i funkce komunikace s těmito moduly a případně s nadřazeným systémem, kterou centrální jednotka, případně komunikační modul, zajišťuje. Dle typu CPU jednotky může být komunikace s příslušnými funkcemi a konektory pro průmyslové sběrnice integrována nebo mohou být tyto funkce obsaženy v komunikačním modulu. CPU v podstatě obsahuje dva typy pamětí. Jednou je paměť stálá a druhou je paměť operační. V prvním případě je prostor paměti vyplněn programem, který je do zařízení nahrán při uvádění do provozu. Tento program vykonává operace tak, jak byly naprogramovány uživatelem. Druhá část paměti je využívána dynamicky. To znamená, že se mění dle potřeb programu tak, jak uživatel stanovil. Jsou v ní obsaženy například údaje časovače a čítače nebo komunikační, časové či jiné systémové proměnné. [41]

Výkonnost CPU pak obecně lze porovnávat různě. Mohlo by to být například dle doby vykonávaných instrukcí. Lze tak porovnávat dobu potřebnou pro vykonání jedné instrukce. Někdy může být pro porovnání použita i doba pro vykonání jednoho tisíce instrukcí. Je však dobré podotknout, že takový údaj může být značně zavádějící, neboť ne všechny instrukce jsou stejně náročné, co se týče výpočetního výkonu CPU. Proto je vhodnější PLC systém v tomto ohledu posuzovat dle skutečných aplikací, kde je implementován, či dle doby řešení typových úloh. [41]

V současné době jsou procesory co do rychlosti porovnávány zejména dle frekvence procesoru a doby trvání nejkratšího cyklu. Dalšími klíčovými parametry mohou být: velikost mezipaměti cache L1 a L2, velikost operační paměti, velikost flash paměti, možnost rozšíření paměti paměťovou kartou, integrované I/O a případně místa pro připojení průmyslových sběrnic. [40]

Kompaktní CPU X20CP0484 je v podstatě v této situaci a v této kategorii produktů systému X20 tou nejlepší volbou. Disponuje operační pamětí 256 MB DDR3 SDRAM a obsahuje procesor ARM Cortex-A9 s frekvencí 667 MHz s cache L1<sup>1</sup> 32 kB pro data a 32 kB pro instrukce, cache L2<sup>2</sup> 512 kB. Dále je zde eMMC<sup>3</sup> flash paměť 2 GB. CPU již v této kompaktní verzi disponuje několika druhy rozhraní. Jsou jimi dva porty USB 1.1/2.0 a dvě místa pro připojení sběrnice s koncovkou RJ-45. Jednu z těchto lze používat jako rozhraní pro připojení do sítě, kde se nachází i PC s vývojovým prostředím, ze kterého je posléze stažen kompilovaný program. Druhý port je pak připraven pro využití sběrnice Powerlink. Dle výrobce nemá být teplota prostředí, ve kterém se modul používá, mimo interval -25 až 60 °C pro horizontální polohu instalace modulu a -25 až 50 °C

<sup>1</sup>Cache L1 - mezipaměť umístěná uvnitř procesoru.

<sup>2</sup>Cache L2 - mezipaměť umístěná v pouzdře procesoru.

<sup>3</sup>eMMC je označení pro vestavěnou multimediální paměťovou kartu (z angl. embedded multimedia memory card).

pro polohu vertikální. Relativní vlhkost prostředí by měla být zachována v intervalu 5 až 95 %. Modul lze provozovat v nadmořské výšce do 2000 metrů bez omezení. Stupeň krytí je pro standardní provedení IP20. Značnou výhodou tohoto kompaktního CPU modulu jsou malé rozměry a poměrně vysoký výpočetní výkon. [40]

Limitace parametrů okolního prostředí, ve kterém jsou další komponenty systému X20 provozovány, je prakticky identická jako pro CPU modul.

### 4.3.2 I/O karty

Základním dělením vstupně výstupních modulů je dělení na moduly analogové a digitální. Pro binární vstupní moduly lze mezi parametry rozlišovat, zda se například jedná o vstupy stejnosměrné či střídavé, velikost vstupního napětí a jeho polaritu. Pro binární výstupy je situace obdobná. Je dobré zmínit, že existují i kombinované binární moduly, kde se nachází určitý počet vstupů a určitý počet výstupů. V některých situacích tak lze ušetřit cenný prostor v rozvaděči s PLC systémem. Pro analogové moduly pak hraje významnou roli integrovaný ADC. Univerzální analogové moduly mohou být pro zcela obecné použití a pro různé úrovně analogových či proudových vstupů či výstupů, ale na trhu lze zakoupit analogové moduly pro kontrétní použití. Jsou to například moduly pro měření teploty termočlánky, moduly pro měření teploty termistory pro konkrétní počet vodičů pro zapojení termistoru. Jsou zde například implementovány funkce, jako jsou linearizace, potlačení rušivé složky signálu či převod signálu na jednotky. Tyto moduly ztrácejí možnost univerzálního použití, ale jsou optimalizovány pro svou konkrétní zamýšlenou funkci. Binární i analogové moduly mohou mít integrované galvanické oddělení, což zvyšuje odolnost systému proti rušení a zároveň má za následek zvýšení bezpečnosti systému. [41]

Nejdůležitějšími funkčními moduly jsou vstupní karty systému X20 s převodníky. Pro současnou verzi navrhovaného online diagnostického systému jsou to X20AI2622, X20AT4222 a X20DM9324. Všechny zmíněné mají v základní verzi standardní stupeň krytí IP20 a jsou určeny pro provozní teplotu od -25 do 60 °C při horizontální montáži a -25 do 50 °C při montáži vertikální, při relativní vlhkosti vzduchu 5 až 95 %, pokud nedochází ke kondenzaci. Do nadmořské výšky 2000 m je lze provozovat bez omezení. Izolační napětí mezi funkčním modulem a bus modulem je minimálně 500 V (efektivní hodnota). Tyto společné údaje a následující specifikace jednotlivých funkčních modulů jsou vyjmuty z parametrů uvedených na webových stránkách společnosti B&R a v příslušných datových listech.

- X20AI2622: 2 kanály pro vstup, rozlišení převodníku 12 bitů pro analogový napěťový vstup 0 až 10 V nebo analogový proudový vstup 0 až 20 mA či 4 až 20 mA, volba dle volby svorek vstupů funkčního modulu. Doba převodu pro oba vstupy je 300  $\mu$ s.
- X20AT4222: 4 kanály pro vstup, rozlišení převodníku 16 bitů pro měření termis-

tory PT100 nebo PT1000 ve dvou či třívodičovém připojení. Doba převodu prvního kanálu 20 ms a doba převodu zbylých kanálů 40 ms.

- X20DM9324: 8 kanálů pro digitální vstup a 4 kanály pro digitální výstup, jednovodičové připojení. Doba přechodu ze stavu 1 do stavu 0 a naopak je menší než 300  $\mu$ s.

### 4.3.3 Komunikační moduly

Důležitou vlastností PLC systému je komunikace se vzdálenými I/O kartami, s podřazenými i nadřazenými systémy, s počítači i s operátorskými zařízeními, jako jsou panely vizualizace. Tímto je docíleno schopnosti vytvořit distribuovaný PLC systém. [41]

Jak bylo zmíněno, v praxi je často nutné použít průmyslové sběrnice. Ty je zapotřebí správně připojit k CPU modulu nebo ke komunikačnímu modulu, který je s CPU spojen. Komunikační modul může být do systému zahrnut v případě, kdy je nutná expanze pro komunikaci ve složitějších distribuovaných PLC systémech, ale může se jednat i o senzory, jejichž výstupy jsou přenášeny právě pomocí průmyslové sběrnice s příslušným komunikačním protokolem.

Při výběru rozšiřujícího komunikačního modulu je důležitá podpora připojení požadovaného konektoru průmyslové sběrnice, kterou je zamýšleno použít pro příslušný komunikační protokol.

V rámci této diplomové práce nejde o distribuovaný PLC systém a senzor s průmyslovou sběrnicí je připojen jiným způsobem. Rozšiřující komunikační moduly zde tedy nejsou využity.

### 4.3.4 Další moduly

Dalším klíčovým funkčním modulem je X20PS9600, který zajišťuje napájení CPU a rozvod napájení pro další funkční moduly prostřednictvím integrované sběrnice X2X. [40]

Dalšími moduly, které je možno do PLC systému zahrnout, mohou být například panely vizualizace, PC či dokonce kombinace obojího. To nabízí například společnost B&R pod označením Panel PC a dodává je s různými specifikacemi a v různých velikostech. Tato zařízení jsou vyobrazena na obrázku 4.9. Dále to jsou moduly pro regulaci a ovládání konkrétních pohonů, karty s osciloskopickými funkcemi pro rychlé děje, měřicí karty pro vibrodiagnostiku, měřicí karty pro specifická měření či speciální moduly pro fuzzy regulaci. [38][39][40][41]

Zde je vhodné podotknout, že v rámci konkurenceschopnosti většina výrobců nabízí rozsáhlý sortiment komponent, kterým lze PLC systém značně rozšířit a přizpůsobit pro konkrétní aplikaci. Nabídka je tak skutečně rozmanitá.



Obrázek 4.9: Panel PC, převzato z [40]

### 4.3.5 Vývojové prostředí

Vývojové prostředí je nezbytným nástrojem, díky kterému může uživatel vytvořit svůj program. Mimo to je v tomto prostředí program i zkoušen a laděn. V současnosti se ve většině případů využívá PC standardu, kdy je vývojové prostředí zakoupeno a dodáno formou softwaru, ve kterém jsou zmíněné operace prováděny. Po fázi vývoje se uživatelské PC připojí k CPU a program se zkompiluje a nahraje do trvalé paměti CPU. Někteří výrobci umožňují i zakoupení softwaru, kde je možné PLC systém simulovat, a dosáhnout tak značné míry optimalizace programu ještě před jeho nahráním a testováním v reálném PLC systému. To skýtá výhodu zejména v předpřípravě programu a ve značném snížení rizika poškození technologie, které by mohlo nastat při spuštění vadného programu v reálném technologickém procesu, kde je PLC systém implementován. [41]

Každý výrobce nabízí ke svým PLC systémům i vývojové prostředí, v němž je možné vytvořit program, který bude danou technologií obsluhovat. [38][39][40]

V případě společnosti B&R jde o software Automation Studio. Při realizaci předmětu této diplomové práce byla použita verze Automation Studio V 4.5.2.102. [40]

## 4.4 Komunikace

V této diplomové práci tvoří pojem komunikace souhrn funkcí, které zabezpečují přenos informace od snímaných diagnostických veličin k příslušným modulům PLC systému, do vývojového prostředí, do uložště a zejména k uživateli prostřednictvím vizualizace.

### 4.4.1 Přenos dat a distribuce napájení

Je nutné zajistit komunikaci mezi jednotlivými moduly, CPU modulem a zároveň s PC, na kterém je nainstalováno vývojové prostředí. Rovněž je nutno zajistit správnou komunikaci s příslušnými subsystemy či senzory.

Již bylo uvedeno, že se nejedná o distribuovaný PLC systém. Z tohoto důvodu bude následující popis soustředěn na komunikaci mezi PLC systémem, tj. jednotlivými moduly,

a vývojovým prostředím. Nahrání kompilovaného programu do PLC je možné pomocí připojení CPU modulu do stejné sítě s PC nebo virtuální PC stanicí, kde je nainstalováno vývojové prostředí. Toho je možné dosáhnout pomocí portu RJ-45 na kompaktním CPU modulu. Přenos dat a zároveň rozvod napájení z napájecího modulu je pro CPU a další moduly zajištěn propojením pomocí integrované sběrnice X2X, která se nachází na "bus" úrovni komponent, která je zobrazena na obrázku 4.8. Po zhruba třiceti funkčních modulech se doporučuje znovu připojit další napájecí modul. Je rovněž možné zakoupit X2X 100 m kabel, pro propojení vzdálených komponent systémů X20, X67 a XV. [40]

#### 4.4.2 Uložiště

Tuto část online diagnostického systému lze chápat různými způsoby. Obecně lze říci, že se jedná o prvek, na kterém lze ukládat data o měření, která mohou být později analyzována. Toho může být dosaženo rozdílnými prostředky. Může se jednat o server, PC, flash disk, paměťovou kartu a případně i o vnitřní paměť CPU modulu, pokud není omezený prostor pro data v rozporu s požadavky na velikost paměti.

#### 4.4.3 Vizualizace

Zde se nabízí dvě hlavní možnosti, jak měřené hodnoty zobrazovat. První uvažovanou byla aplikace panelu PC s relativně velkou dotykovou obrazovkou (ukázka takových zařízení je uvedena v obrázku 4.9). Druhou, snadněji dostupnou, variantou je pak využití software produktu B&R mapp View.

Využití mapp View umožňuje vizualizovat měření a případně další informace pomocí integrovaného web serveru v CPU modulu, a to bez nutnosti dokoupení dalšího hardware, protože tuto vizualizaci lze zobrazit ve webovém prohlížeči po zadání nastavené IP adresy. Konfigurace, tvorba a rozložení grafických prvků jsou prováděny v rámci zmíněného vývojového prostředí Automation Studio. K této vizualizaci lze přistupovat z jakéhokoli zařízení s webovým prohlížečem, pokud se nachází ve stejné síti jako PLC systém. V případě vzdáleného pracoviště je možné do lokální sítě s PLC přistupovat prostřednictvím VPN. Tato situace je zahrnuta v koncepci celého systému v obrázku 4.1.

V této diplomové práci byla tedy vizualizace vytvořena prostřednictvím mapp View. Tudíž nebylo nezbytné pořízení panelu vizualizace či panelu PC, a proto mohlo být od jejich zakoupení upuštěno.

### 4.5 Router

Router, též směrovač, je zde prvkem, který lze v rámci tohoto online diagnostického systému považovat ve své podstatě pouze za volitelný. Reálná situace může vypadat tak, že PLC systém, který je klíčovým v navrhovaném online diagnostickém systému, je připojen

přímo k zařízení na kterém se nachází vývojové prostředí (PC) a ve kterém lze zobrazit i vizualizaci. Není tedy nutné navrhovat více či méně složitou síťovou infrastrukturu se vzdáleným přístupem z jiných zařízení. V případě realizace vzdálených přístupů by mohlo být využito lokální sítě, do které lze vstupovat přes virtuální PC stanici nebo pomocí VPN přes fyzicky připojené PC.

S výhodami lze router využít jako zařízení, které má více RJ-45 portů, a sdružit tak více zařízení v rámci jedné sítě. Tato funkce může být snadno vynahrazena využitím levnějšího switchu (síťového přepínače).

## 4.6 Kamera

Přenos obrazu a případný záznam z kamery není přímo provázán s PLC systémem, a proto lze tuto část online diagnostického systému považovat za zcela autonomní. Na trhu se spotřební elektronikou je rozmanitá nabídka těchto zařízení. Lze vybírat ze zařízení, která je možné připojit jako USB zařízení nebo jako zařízení síťové, a to bezdrátově či pomocí datového kabelu. Lze rovněž vybírat mezi kamerami, které snímají obraz ve viditelném spektru nebo ve spektru infračerveném.

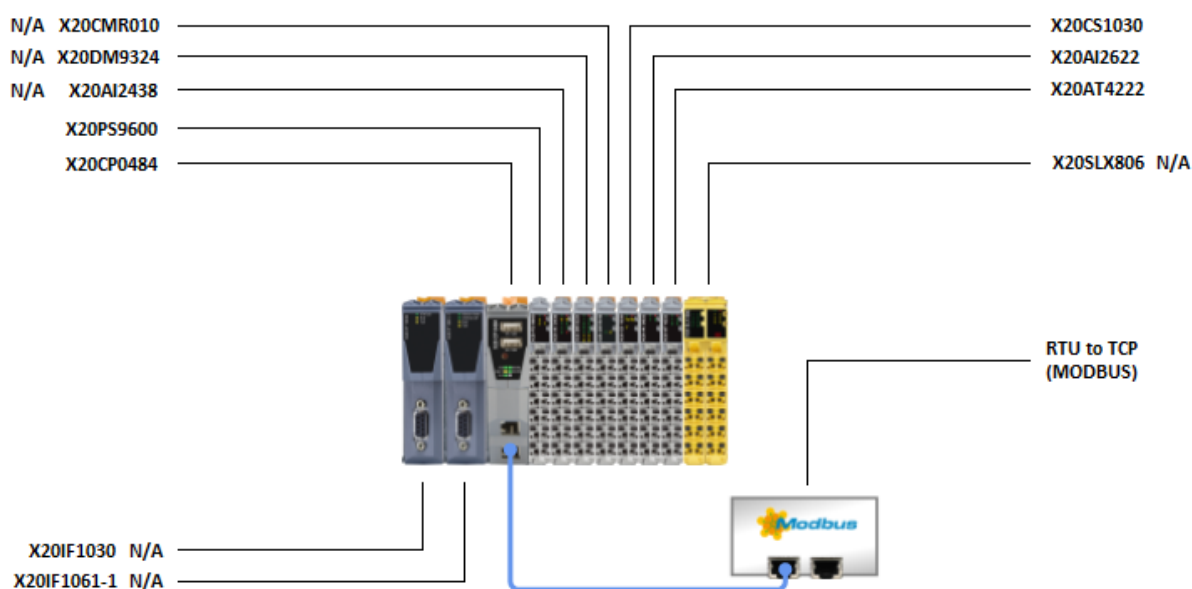
## 5 Realizace a testování systému

Pro ověření správné funkce online diagnostického systému bylo provedeno několik testů dle dostupné dokumentace. Jedná se zde o sestavu komponent, která byla v rámci vývoje tohoto online diagnostického systému sestavena, oživena a testována v prostředí testovacího pracoviště společnosti ABB s.r.o.

Kromě této vývojové a zkušební fáze byla v rámci diplomové práce započata i fáze výrobní, a to ve stádiu návrhu první verze výrobní dokumentace. Bylo vytvořeno 3D rozvržení komponent, výkres základních rozměrů a schéma zapojení. Rovněž bylo vybráno některé příslušenství. Jedná se o první návrh, který bude pravděpodobně modifikován a rozšířen dle potřeb.

### 5.1 Vývoj

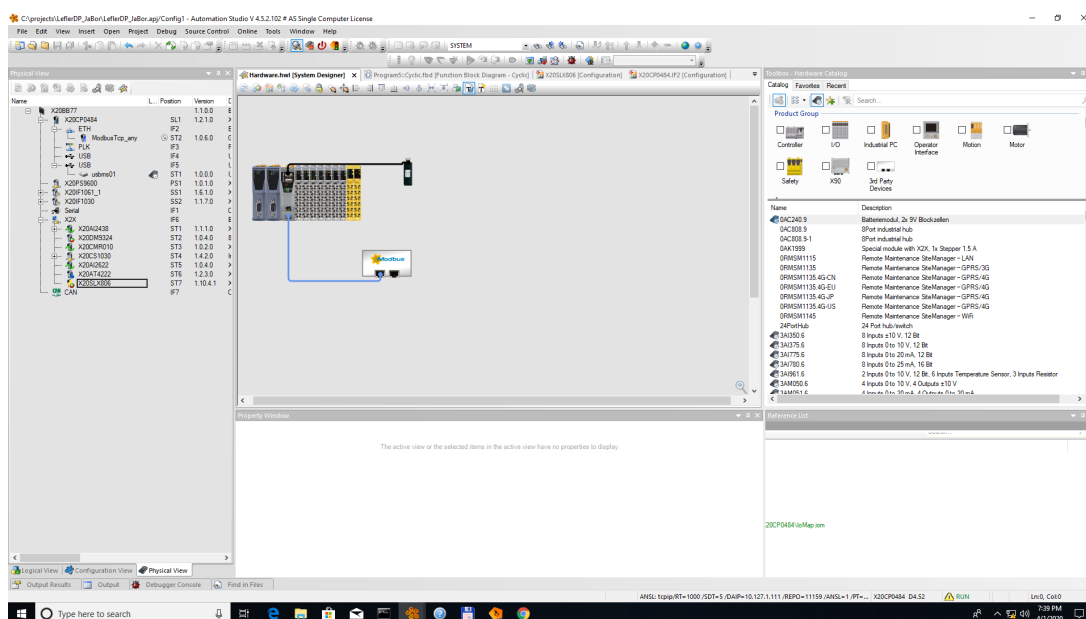
Jádro online diagnostického systému, kterým je PLC systém, bylo přizpůsobeno k účelům navrhovaného online diagnostického systému. K dispozici již byl systém B&R X20 s několika dalšími moduly. Na obrázku 5.1 je zobrazeno rozvržení PLC systému, ke kterému byly v průběhu vývoje připojovány senzory. Na této sestavě byly prováděny i funkční testy po ukončení fáze vývoje. K dispozici byly i takové I/O karty a komunikační moduly, které nebylo nutné použít. Tyto jsou ve zmíněném přehledu označeny zkratkou N/A.



Obrázek 5.1: Sestava všech komponent B&R X20 ve vývojové fázi

### 5.1.1 Vývojové prostředí

Ve fázi návrhu bylo vývojové prostředí spíše marginální, ale situace se zcela mění ve fázi realizace, kde je nezbytným a nejdůležitějším nástrojem. Ve vývojovém prostředí Automation Studio V 4.5.2.102 se lze v podstatě pohybovat ve třech vývojových úrovních. První z nich je fyzická úroveň, druhou je konfigurační a třetí je úroveň logická. Ve fyzické úrovni jsou přidávány systémové komponenty a lze odsud přistupovat k jejich nastavení. V konfiguraci se připravuje kompilace vytvořených instrukcí pro hardware a případných vytvořených uživatelských programů, ale také nastavení připojení k PLC systému. V logické úrovni se tvoří uživatelské programy. Přepínání těchto úrovní se při výchozím nastavení nachází v oblasti vlevo dole. Vývojové prostředí je zobrazeno v obrázku 5.2 a je přepnuto do zobrazení fyzické úrovně.



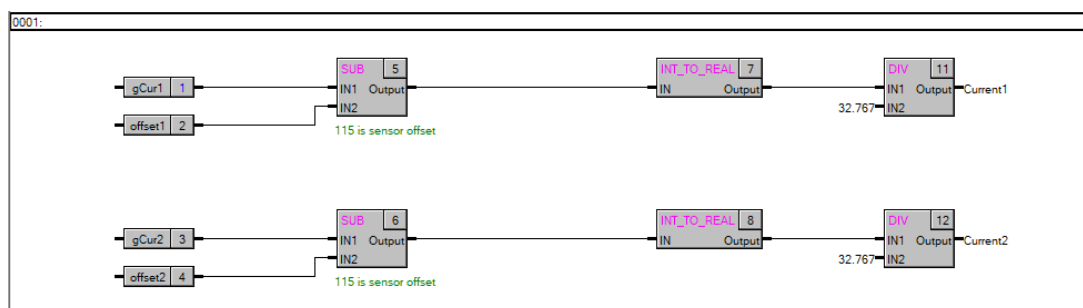
Obrázek 5.2: Vývojové prostředí Automation Studio V 4.5.2.102

Celý proces nastavení PLC systému a jeho funkcionalit vyžaduje jisté množství času a dle konkrétních operací se mohou jednotlivé kroky lišit. Pracovní postup pro zprovoznění PLC by mohl být tedy obecně a stručně popsán následujícím způsobem. V první řadě je nutno ve vývojovém prostředí vytvořit nový projekt, nastavit jeho adresář na disku osobního počítače, kde je vývojové prostředí spuštěno, a zvolit hardware komponenty, které jsou fyzicky k PLC systému připojeny. Výhodou je, že při připojení PLC systému je i v této fázi možné identifikovat, které komponenty jsou již na interní sběrnici X2X připojeny, a není tak nezbytné komponenty ručně vkládat z knihovny. V dalším kroku je nutno připojit senzory k příslušným I/O kartám. Po připojení je přistoupeno ke konfiguraci I/O karet. Tato konfigurace se pro každou kartu může více či méně lišit. Obecně je zde pro měřicí karty nutno například nastavit typ senzoru a k měřicímu kanálu přiřadit rozsah a druh veličiny. Rovněž lze upravit parametry vstupního filtru, pokud je zapotřebí měnit výchozí nastavení. Po této konfiguraci je nutné nastavení I/O mapování.



Zde je přiřazena procesní proměnná, do které je měřená hodnota zapisována.

Po nastavení hardwaru je nutné přistoupit k sestavení základních instrukcí. Pro jednoduché operace, jako je měření, lze použít například FBD program. Úkoly, které je nutné splnit, jsou zejména přetypování proměnné z celočíselného datového typu (INT) na datový typ s plovoucí desetinnou čárkou (REAL), aby mohla být měřená hodnota ve vizualizaci či v jiných částech systému zobrazována v desetinném formátu. Případně je nutno nastavit offset senzoru a provést přepočítání snímané hodnoty na hodnotu skutečnou. Ukázka takového uživatelského programu je uvedena v obrázku 5.3. Pro nastavení ukládání měření byl program sestaven pomocí jazyka ANSÍ C. Všechny vytvořené uživatelské PLC programy lze nalézt v přílohách A.



Obrázek 5.3: FBD uživatelský program pro zpracování signálu ze senzorů LEM

### 5.1.2 Implementace senzorů

Obecně bylo pro elektrické připojení napájení a výstupů senzorů použito dvou vodičů v krouceném provedení. Jednalo se o měděné vodiče s průřezem 0,2 mm<sup>2</sup>. Konkrétní postupy a specifika implementace jednotlivých senzorů jsou popsány níže.

#### Termistory PT1000

Pro zajištění tepelného styku byla použita teplovodivá pasta a případně zajištění kaptonovou páskou. V první verzi tohoto online diagnostického systému je uvažováno dvojvodičové zapojení, jelikož jsou vzdálenosti pro připojení malé, není kompenzace vlivu odporu přívodních vodičů považována za nezbytnou. Nicméně do vstupní karty PLC systému lze připojit i trojvodičové zapojení termistoru a zmíněnou kompenzaci realizovat.

#### Proudové senzory LEM

Tyto senzory jsou do PLC systému připojeny pouze prostřednictvím dvou vodičů, které zajišťují předání výstupního signálu 0 až 10 V. Senzory jsou samobuzeny a není tedy nutné připojovat napájení. Konstrukční provedení umožňuje tyto senzory v rámci vývoje jednoduše položit nebo případně zaháknout či vyvázat stahovacími páskami.

## Fotoelektrický senzor

Toto čidlo je připojeno prostřednictvím tří vodičů. Dva zajišťují požadované napájení a třetí přenos digitálního signálu. Z důvodu zabezpečení neměnné pracovní polohy byla pořízena i aretační sestava coby originální doplněk. Tento prvek by mohl být alternativně navržen a vytištěn na 3D tiskárně.

## Senzor APAR

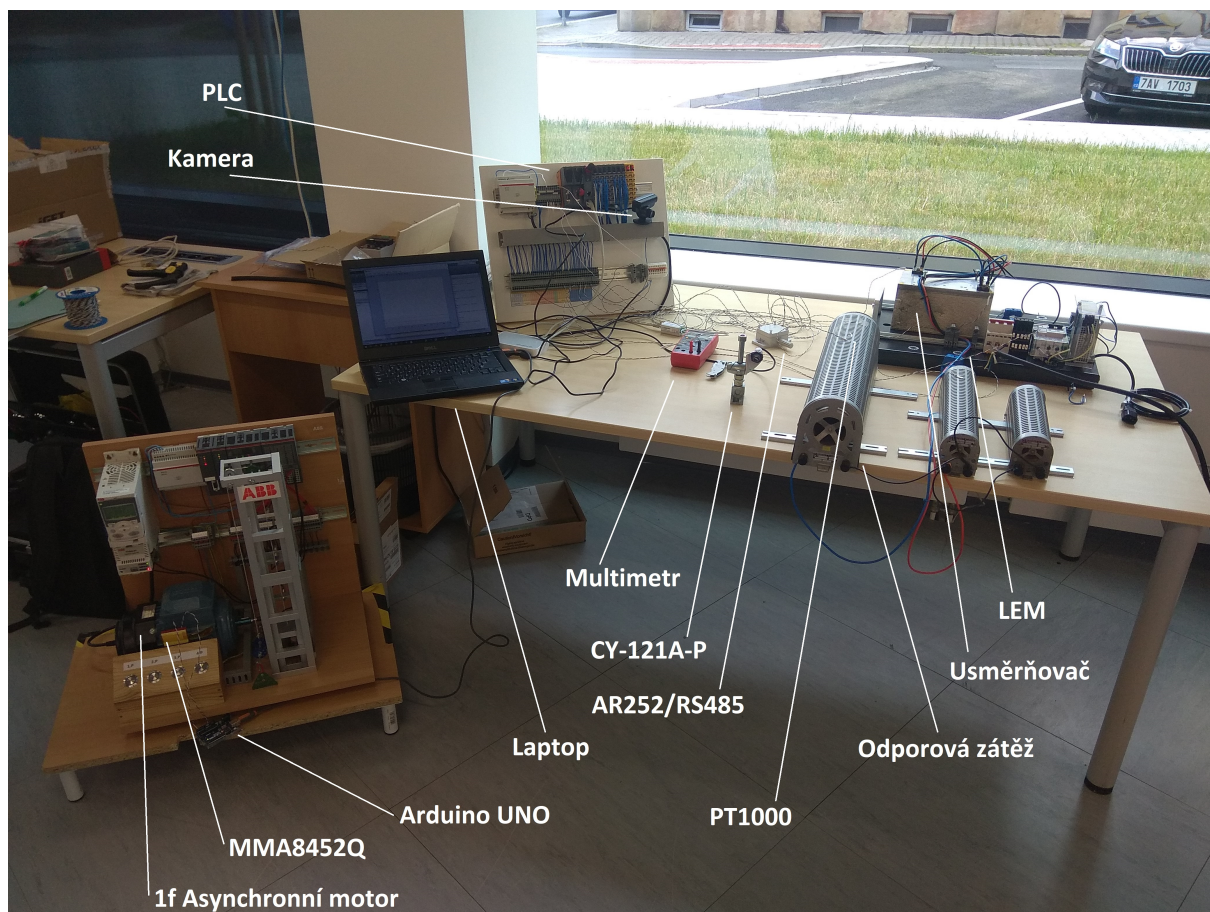
Tento senzor se sdruženým měřením relativní vlhkosti a teploty okolí byl opatřen a implementován ve verzi s připojením na sběrnici RS-485, kde lze přenášet data protokolem Modbus RTU. Z praktických důvodů byl použit převodník na protokol Modbus TCP, který byl v rámci oživení a testování systému pohodlnějším i z hlediska připojení pomocí datového kabelu s koncovkou RJ-45. Připojení mohlo být tedy z převodníku realizováno rovnou do CPU modulu tohoto PLC systému. Konfigurace jednotlivých kanálů byla tedy provedena nikoliv na měřící kartě, jako tomu bylo v případě ostatních senzorů, ale přímo v samotném CPU modulu.

## Senzor MMA8452Q

Tříosý MEMS akcelerometr MMA8452Q byl v rámci realizace zkušební sestavy připojen k vývojové platformě Arduino UNO pomocí nepájivého kontaktního pole a vodičů, které jsou popsány v úvodu této kapitoly. Bylo zapotřebí zajistit přívod napájení 3,3 V a dále připojit uzemnění (GND) a piny (SCL a SLA) pro sériovou komunikaci prostřednictvím sběrnice I<sup>2</sup>C. Piny SCL a SDA senzoru MMA8452Q jsou připojeny k analogovým vstupům vývojové desky Arduino UNO. Arduino UNO je poté připojeno prostřednictvím USB kabelu s koncovkami USB A a USB B. Tím je zajištěno napájení vývojové desky a zároveň přenos dat získaných z MEMS akcelerometru do PC.

### 5.1.3 Sběr diagnostických signálů

Jednotlivé senzory byly po nastavení příslušných hardware komponent PLC systému vždy odzkoušeny. Takto byly provedeny jednotlivé dílčí zkoušky všech částí měřícího systému. Pro stav, ve kterém online diagnostický systém pracuje podobně jako v reálném nasazení, byl proveden souhrnný test. Pro souhrnný test bylo využito zařízení navržené v rámci bakalářské práce [43]. Jedná se o třífázový neřízený usměrňovač. Výhodou je, že toto zařízení není velké a bylo jej možné snadno dopravit do testovacích prostor společnosti ABB s.r.o. Druhou značnou výhodou, že je možné zařízení zatěžovat pomocí odporové zátěže, která je v rámci společnosti rovněž dostupná. Sestava pro závěrečné testování je zachycena v obrázku 5.4. Další fotodokumentace se nachází v přílohách H.



Obrázek 5.4: Sestava pro závěrečné testování

### Měření teploty

Údaje o teplotě byly při souhrnném testování získávány prostřednictvím termistorů PT1000 a informace o okolní teplotě byla získávána senzorem AR232/RS458. Dva ze čtyř termistorů byly umístěny na chladič usměrňovače v oblasti blízko obou diodových můstků. Dva zbylé termistory byly umístěny v blízkosti rezistorů, které tvořily zátěž. Senzor AR 232/RS458 byl umístěn v dostatečné vzdálenosti od zdrojů tepla, aby měřil skutečnou teplotu okolí v dané místnosti. Obdržené údaje o teplotách byly kontrolovány pomocí multimetru, který byl vybaven termočláňkovou sondou. Takto byla ověřena správnost měření.

### Měření elektrického proudu

Dostupná hardware konfigurace PLC systému disponovala modulem pro analogové měření X20AI2622, ke kterému bylo možné připojit dva LEM AT 50 B10 senzory s analogovým napěťovým výstupem 0-10 V. Tyto senzory byly nejprve umístěny tak, aby byl měřen vstupní a výstupní proud zdroje napájení pro PLC systém. V rámci této dílčí zkoušky bylo nutné provést převod signálu senzoru na hodnotu vyjadřující proud. Analogový napěťový signál byl v I/O modulu integrovaným ADC převeden na číslo v datovém formátu

INT. Tento údaj bylo nutné kalibrovat na hodnotu skutečného proudu. Další nezbytnou operací bylo odečtení offset hodnoty, kterou senzor předával do PLC systému, když byl proud v obvodu nulový. Tato kalibrace měření byla dosažena pomocí kontrolního měření multimetrem, který byl sériově zapojen do měřeného obvodu, tedy jako ampérmetr.

V prostorách společnosti ABB byly k dispozici takové rezistory, jejichž kombinací bylo možné složit zátěž, která příliš nezatěžuje usměrňovač a zároveň vlivem elektrického proudu tepelně nepoškodí jednotlivé rezistory. Při provádění finální zkoušky byl sledován výstupní proud usměrňovače, který byl pomocí Ohmova zákona určen jako poměr střední hodnoty usměrněného napětí a odporové zátěže na hodnotu 4,39 A. Střední hodnota obecného průběhu je definována vztahem 5.1 a střední hodnota výstupního napětí pro šesti-pulzní usměrnění je určena vztahem 5.2. Pro maximální hodnotu napětí  $U_m$  ve vztahu 5.2 je nutno uvažovat maximální hodnotu sdruženého napětí. LEM senzor po úpravách příslušného programu měřil výstupní proud a získané přepočtené hodnoty v ustáleném stavu kolísaly mezi 3,9 a 4,7 A. Měření a výpočet byly ověřeny simulací celého obvodu freeware nástrojem LTspice XVII. Obvod sestavený pro simulaci, výsledný průběh výstupního proudu usměrňovače v simulaci a skutečné schéma zapojení lze nalézt v přílohách E.

$$U_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (5.1)$$

$$U_{3fAV} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} U_m \sin(\omega t) dt \Rightarrow \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_s \quad (5.2)$$

## Snímání pohybu

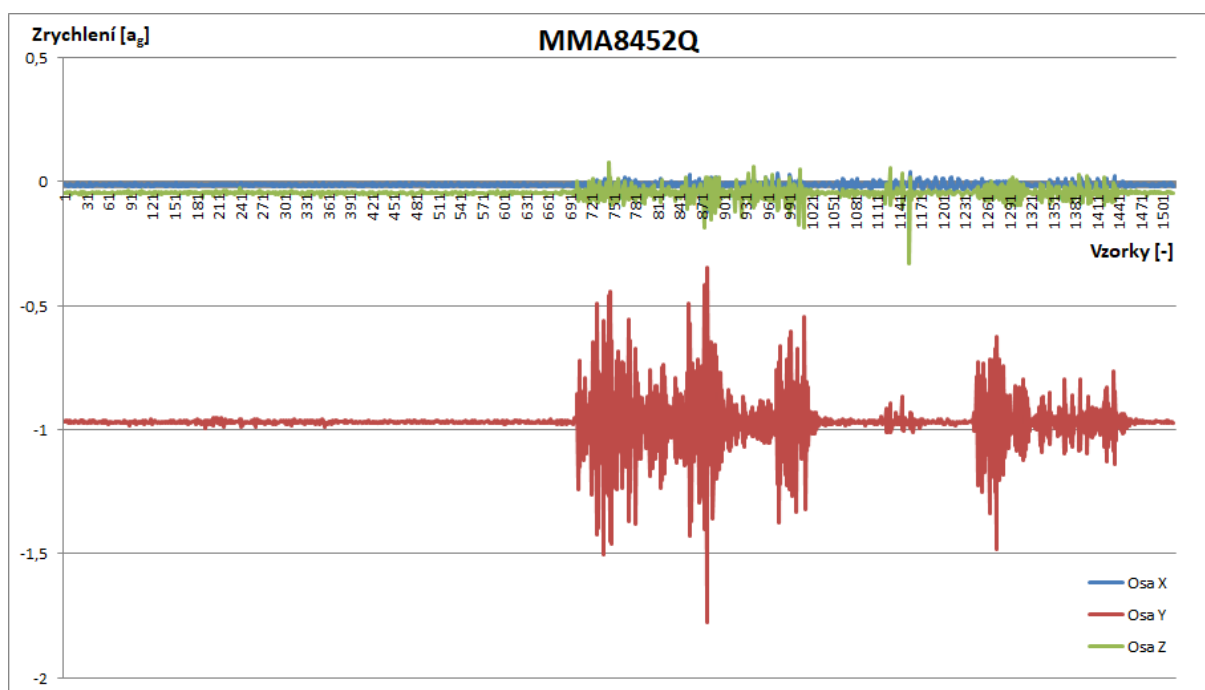
Fotoelektrický senzor byl testován prostým pohybem předmětu před senzorem ve vzdálenosti deklarované výrobcem. Byl vytvořen uživatelský program, který od zvoleného počtu pulzů odečítá každý jeden pulz získaný senzorem. Takto lze sledovat počet zbývajících pulzů. V případě implementování senzoru otáček s digitálním výstupem lze takto určovat zbývajících počet otáček na základě určení životnosti ložiska. Detailněji je problematika životnosti ložisek řešena v následující kapitole.

## Měření vibrací

Po provedení připojení senzoru MMA8452Q, které je popsáno výše, je nutno vytvořit sadu instrukcí, která by po kompilaci a nahrání do procesoru vývojové platformy Arduino UNO zajišťovala měření vibrací v osách X, Y a Z. Prvním krokem bylo stažení knihovny pro zmíněný senzor. Tato knihovna již obsahuje předepsané instrukce pro některé konkrétní úkoly, které je možné s tímto senzorem vykonávat. Zvolen a mírně modifikován byl program pro základní čtení údajů. Program obsahuje příkaz pro zahrnutí použitých knihoven, nastavení modulační rychlosti a výpis měření pro jednotlivé osy. Modifikace

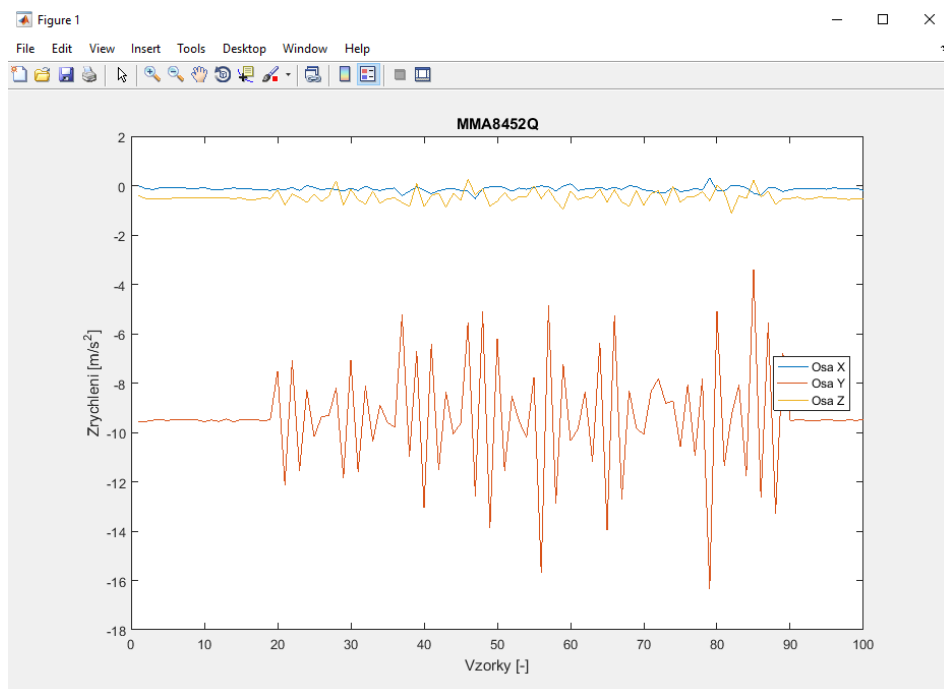
spočívala zejména v odstranění výpisu úvodní zprávy o zahájení měření a doplnění oddělovacích symbolů na vhodná místa. Tímto byla zajištěna možnost číst data kontinuálně od začátku a pomocí oddělovacích symbolů bylo možné měřená data separovat pro měření vibrací v ose X, Y a Z. Vibrace jsou ze senzoru sledovány prostřednictvím hodnoty zrychlení, které je vyjádřeno v násobcích zrychlení gravitačního. Pro vyjádření v jednotkách SI jsou získané hodnoty pouze násobeny konstantou 9,81. Záporné hodnoty zrychlení jsou zapříčiněny orientací senzoru v prostoru.

Jelikož bylo toto měření realizováno v rámci subsystému, který je oddělen od PLC, bylo nutno provést některé další kroky pro zpracování získaných dat. Prvním způsobem, jak data číst, je prosté otevření sériového monitoru (serial monitor) v IDE. Zde lze aktivovat zapisování dat s časovou značkou. Nicméně při výchozím nastavení modulační rychlosti není v lidských možnostech vypisované údaje sledovat. Proto bylo přistoupeno k instalaci freeware Tera Term, konkrétní verze 4.105. Tento software je schopen přistupovat k údajům, které přicházejí ze zvoleného USB portu. Lze rovněž nastavit zapisování těchto dat do souboru ve formátu .txt nebo .csv a tento soubor posléze zpracovat a vykreslit v softwaru MATLAB nebo MS Excel. Ukázka výsledku takového postupu je uvedena v obrázku 5.5. Toto řešení bylo realizováno a testováno pro možnost, kdy není dostupná licence pro software MATLAB a je nutno postupovat alternativně například pomocí volně dostupného freeware Tera Term a tabulkového editoru MS Excel, který je v software výbavě běžných osobních počítačů zastoupen výrazně hojněji než software MATLAB. Pokud by však bylo možné MATLAB použít, byla vytvořena funkce, která čte údaje z USB portu a využívá for cyklus s určeným počtem opakování. Tato funkce pomocí příslušných příkazů zapíše získaná data do matice, do souboru a následně je vykreslí v grafu.



Obrázek 5.5: Profylaktické měření vibrací senzorem MMA8452Q v prostředí MS Excel

Obě zmíněná řešení jsou však dle rozdělení uvedeném v obrázku 2.1 v souladu s offline přístupem k diagnostickému procesu. Proto byla vytvořena MATLAB funkce, která obsahuje neustále se opakující while cyklus, do kterého je vnořen další while cyklus, který má již určený počet opakování. Takto je vytvořena sekvence 100 vzorků, které jsou iterativně vykreslovány, a lze takto sledovat úroveň vibrací v reálném čase, což je v souladu s online diagnostickým přístupem. Výsledek je uveden v obrázku 5.6. Problémem byla skutečnost, že při zahájení měřící sekvence se na sériové komunikaci objeví v matici prvek, který není číslem (NaN). Tento problém byl ošetřen použitím funkce "isnan" s následným příkazem, který na pozici NaN prvků zapíše nulu. Další překážkou byl zápis prázdného prvku na čtvrtou pozici v měření v osách X, Y a Z. Po takové události následovala neshoda rozměrů matic a nebylo možné provést další příkazy ve funkci. Tato neshoda byla eliminována včleněním funkce "numel", která vrací počet prvků v matici, resp. vektoru, a tento údaj sloužil jako argument pro podmínku "if". Pokud nebyl počet prvků v načtené matici, resp. vektoru, číslo 3, byla celá sada získaných vzorků přepsána na nulové hodnoty ve vektoru o požadovaném rozměru. Vzhledem k vykreslení 100 vzorků v jedné sekvenci nejsou jednotky nulovaných měření považovány za důležité a bylo tak dosaženo vytvoření stabilní MATLAB funkce pro sledování vibrací.



Obrázek 5.6: Monitorování vibrací senzorem MMA8452Q v prostředí MATLAB

První funkční test trval 4 hodiny a bylo provedeno zhruba 2450 iterací, ve kterých byla vždy vykreslena sekvence 100 vzorků získaných z USB portu. Během této doby nedošlo k selhání MATLAB funkce ani hardware sestavy. Druhý funkční test již probíhal v testovacím prostoru společnosti ABB, kde byl senzor uchycen kaptonovou páskou k chladicímu žebříku jednofázového asynchronního motoru. Toto testování trvalo 25 minut a bylo provedeno zhruba 490 iterací. Opět nedošlo k selhání MATLAB funkce ani hardware sestavy.

Pro dlouhodobější testování by byl modifikován i způsob uchycení senzoru pomocí magnetické čočky se závitem a případně 3D tištěné platformy. Rovněž by byl vytvořen kabel s konektorem pro potřebná připojení senzoru. Je vhodné uvést, že toto měření je orientační a slouží k monitorování úrovně vibrací, nikoliv k jejich přesnému měření a určení přesného průběhu. Program pro Arduino UNO a MATLAB funkce jsou uvedeny v přílohách B a C.

#### 5.1.4 Komunikace

Princip provedení komunikace byl již nastíněn v předchozí kapitole. Níže je tedy popsáno, jak byla provedena se zaměřením na detaily. Je zde rovněž popsáno, jak bylo kromě záznamu a přenosu dat postupováno i při ukládání a vizualizaci měření, což lze označit jako komunikaci mezi online diagnostickým systémem a obsluhou.

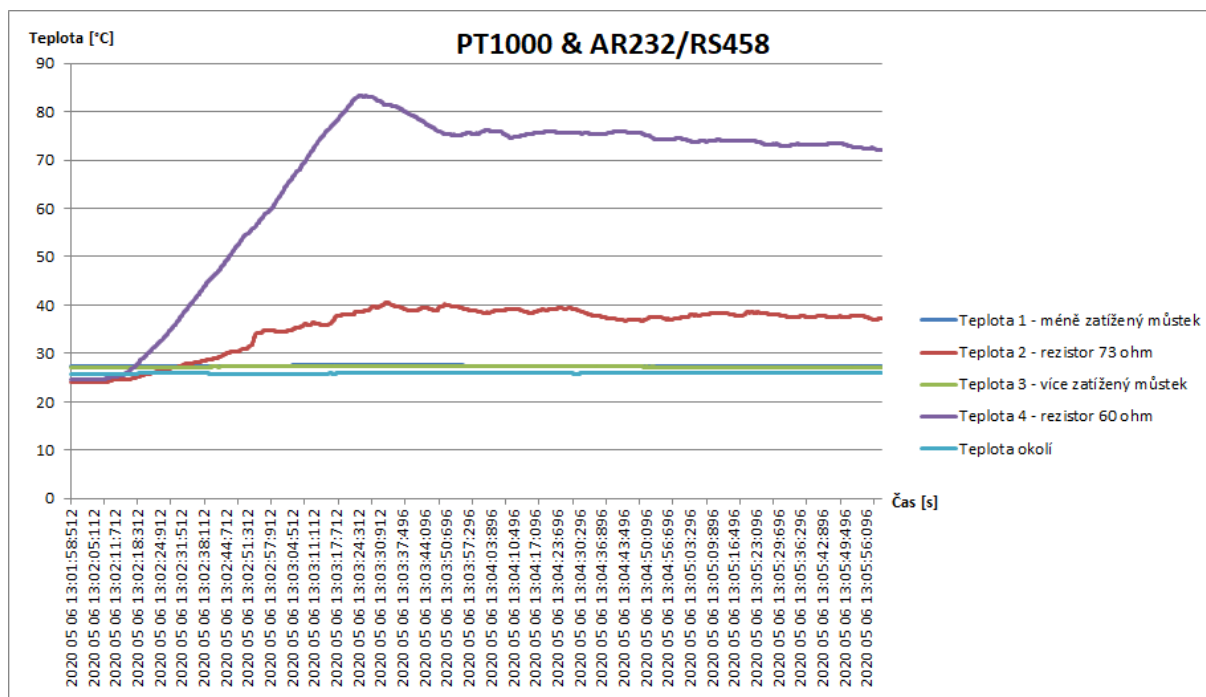
#### Přenos dat a distribuce napájení

Nezbytné kroky byly provedeny v souladu s úvahou v předchozí kapitole, která se zabývala návrhem online diagnostického systému. Pomocí integrované sběrnice X2X je zajištěno datové spojení funkčních měřících modulů s CPU modulem. Připojení PLC do lokální sítě je provedeno standardním datovým kabelem s koncovkou RJ-45 připojenou k přístupovému bodu na jedné straně a k CPU modulu na straně druhé. Po tomto připojení je funkční komunikace pro předávání dat z PLC a nahrávání kompilované sady instrukcí do PLC.

#### Uložiště

Pro ověření správné funkce zapisování měření do souboru bylo vybráno měření teploty pomocí senzorů PT1000 a měření teploty okolí pomocí senzoru AR232/RS458. Jednotlivé vzorky byly zapisovány dle přiřazení příslušného programu pro čtení signálů ze senzorů k příslušnému cyklu procesoru s předdefinovanou dobou trvání, což v tomto případě bylo 100 ms. To znamená, že každých 100 ms byla do souboru uložena hodnota procesní proměnné, do které byl ukládán údaj o měření. Získané údaje byly dle provedeného nastavení zapisovány do textového souboru .csv, který se nachází na FTP serveru CPU modulu PLC systému. Vykreslení zmíněného souboru je uvedeno v obrázku 5.7.

Program pro zapisování hodnot byl vytvořen v jazyce ANSI C a je uveden v příloze A.5. Podobný program je možné vytvořit například i pomocí ladder diagramu. Počátek zapisování byl inicializován manuálně změnou parametru proměnné funkce pro zapisování. Lze tedy stávající řešení modifikovat například ošetřením, kdy dojde k zahájení a ukončení zápisu dat. Další modifikací by mohlo být nastavení ukládání měření do souboru, který by byl vytvořen na fyzickém paměťovém zařízení, kterým je například flash disk, který by byl připojen v USB portu CPU modulu PLC systému. V rámci této diplomové práce již k řešení těchto operací nebylo přistoupeno.



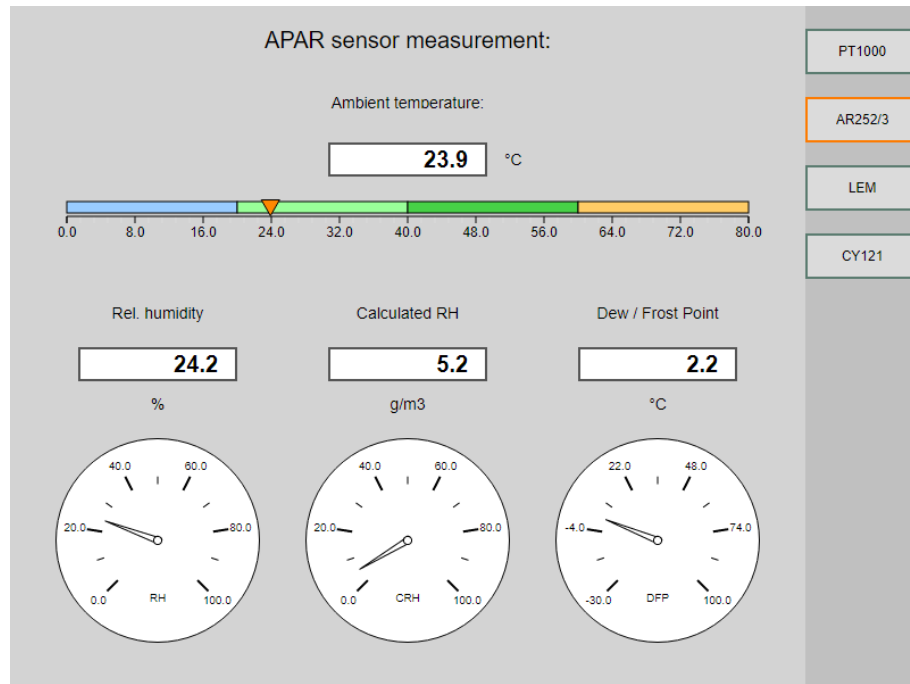
Obrázek 5.7: Vizualizace zápisu měření teplot vykreslená v prostředí MS Excel

## Vizualizace dat

Pro přístup k měřeným hodnotám senzorů je nutno provést připojení k PC s vývojovým prostředím pomocí vzdáleného přístupu ve stejné síti nebo fyzicky toto PC obsluhovat. Ve vývojovém prostředí lze měřené hodnoty sledovat. Nicméně takové řešení není příliš uživatelsky přívětivé. Proto byla vytvořena vizualizace, která se nachází na web serveru PLC systému a může být dle příslušné IP adresy zobrazována v prohlížeči PC, který je v této síti připojen.

Tato vizualizace byla vytvořena ve vývojovém prostředí Automation Studio a bylo zde nutno provést několik zásadních kroků. V první řadě je vytvořena postranní nabídka, která slouží jako navigační panel pro přepínání mezi jednotlivými měřeními. Dále je vytvořen vlastní obsah jednotlivých vizualizací konkrétních měření. V knihovně objektů zde figurují prvky, kterými lze data interpretovat. Jedná se o různé měřicí grafiky od jednoduchého vypsání číselné hodnoty, přes radiální a lineární ukazatele, až po případné vykreslení průběhu. Pro správné předávání dat do této vizualizace je nutné správně nastavit konfigurační soubor, který je modifikován po každém přidání grafického prvku. Poté je rovněž důležité zajistit správnou provázanost měřené hodnoty, která se nachází v procesní proměnné, pro konkrétní vizualizační objekt a nastavení správného rozsahu na tomto prvku. Po těchto krocích je nutno v sekci CPU povolit web server a nastavit IP adresu, a zajistit tak, aby konfigurační soubor předal vizualizaci na určenou IP adresu, která je posléze zobrazena prostřednictvím webového prohlížeče. Ukázka vizualizace měření pomocí čidla APAR je uvedena v obrázku 5.8. Zbylé stránky vizualizace mapp View jsou uvedeny v přílohách D.

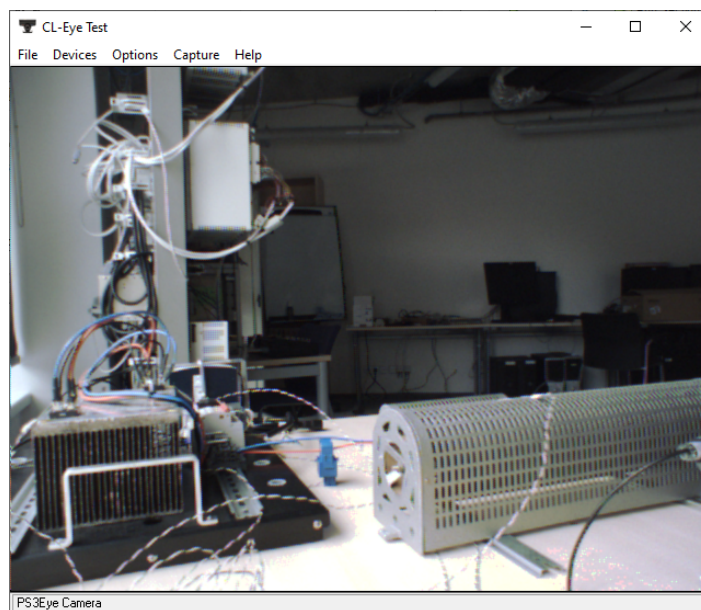




Obrázek 5.8: Vizualizace měření pomocí senzoru APAR AR252/RS485

### 5.1.5 Záznam z kamery

Oproti koncepci (obrázek 4.1) nebyla použita kamera, kterou lze připojit jako síťové zařízení, ale kamera PS3Eye, která byla připojena k PC pomocí USB portu. To bylo způsobeno skutečností, že tato kamera byla v době realizace dostupná a bylo možné jí okamžitě použít. Posléze stačilo v PC nainstalovat příslušný ovladač tohoto zařízení a kameru umístit tak, aby objektiv zabíral požadovanou oblast. Snímání obrazu objektivem kamery je zobrazeno v obrázku 5.9.



Obrázek 5.9: Záznam z kamery PS3Eye

## 5.2 Příprava výroby

Z fáze sestavení základních prvků systému a odzkoušení základních funkcí plynou první poznatky podstatné pro výrobu. V první řadě je nutno rozmístit komponenty v prostoru rozvaděče vhodným způsobem a vypracovat výrobní dokumentaci.

### 5.2.1 Použité komponenty

Kromě PLC systému, který je pouze jádrem online diagnostického systému, je nutné implementovat i další komponenty, kterými je zdroj pro napájení napětím 24 V, jištění, svorkovnice a rozvaděč, kde bude celý systém umístěn.

Výčet klíčových funkčních prvků včetně základní specifikace:

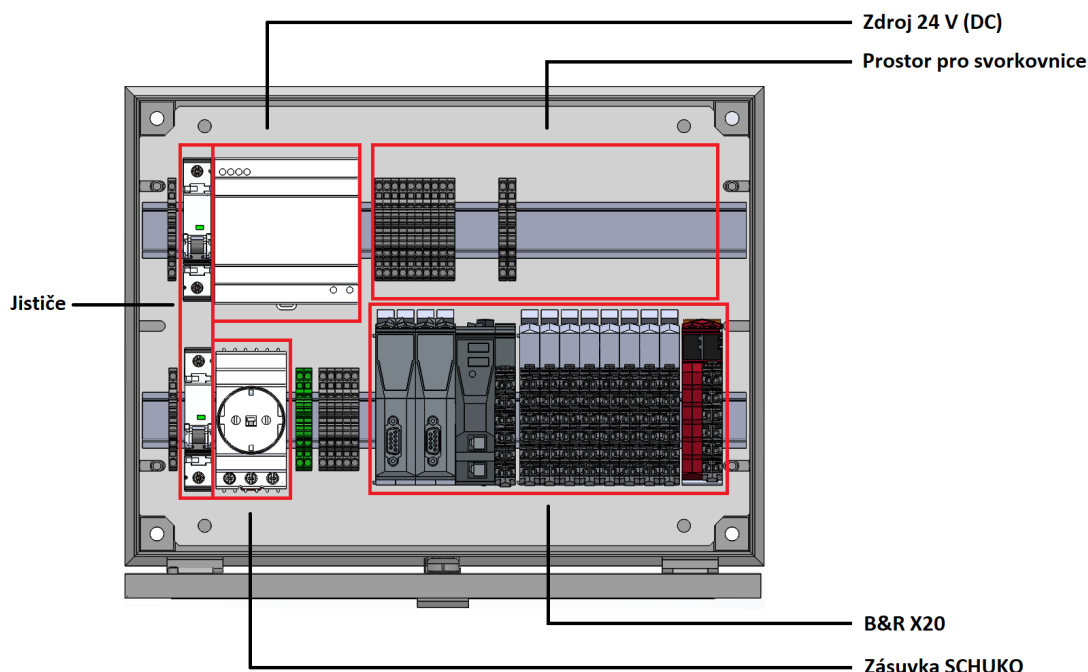
- Rozvaděč - BG 1577.530, IP65, ocelový plech, průhledné polykarbonátové okno v dveřích (Rittal);
- Zdroj 24 V - CP-D 24/4.2, vstup 100 až 240 V (AC) nebo 120 až 375 V (DC), výstup 24 V (DC) a 4.2 A (ABB);
- Jistič - LTN-16B-1, jmenovitý proud 16 A, jmenovité pracovní napětí 230 V (AC) nebo 72 V (DC), vypínací charakteristika B (OEZ);
- Zásuvka - ZSF-06, jmenovitý proud 16 A, jmenovité napětí 230 V (AC), stupeň krytí IP20, jednofázová, typ SCHUKO (OEZ);
- Svorkovnice - 280-519, dvouvrstvá, průřez vodiče až 2,5 mm<sup>2</sup>, proudové zatížení až 20 A (WAGO).

Kromě samotného sestavení klíčových funkčních prvků je rovněž důležité provést průchodky pro přívody napájecích vodičů a signálových vodičů od senzorů, aniž by byl snížen deklarovaný stupeň krytí IP.

### 5.2.2 3D model

Trendem v posledních letech je vyhotovení 3D modelu navrhovaného zařízení, což skýtá několik praktických výhod. V první řadě lze snadno konstruovaný celek prohlížet a zkoumat v libovolném pohledu. Tato skutečnost je spojena s možností optimalizace ergonomie zařízení vhodným rozložením komponent. V dvoudimenzionálním výkresu mnohokrát nejsou některé aspekty pro praktickou manipulaci evidentní, a proto může být výhodné zhotovit 3D model. Ze 3D modelu je možné poměrně snadno vytvořit i 2D výkresy s příslušnými kótami. V 3D modelu nejsou zaneseny průchodky pro napájecí vodiče a signálové vodiče senzorů, které se nacházejí na diagnostikovaném zařízení. Tyto budou doplněny dle konkrétního počtu potřebných vodičů a budou objednány spolu s rozvaděčem, aby

byl zabezpečen deklarovaný stupeň krytí IP. Rozložení komponent s popisem je uvedeno v obrázku 5.10. Další pohledy a výkres rozvaděče se základními rozměry se nachází v přílohách této diplomové práce (přílohy E a příloha F). Modely jednotlivých komponent jsou veřejně dostupné v databázích nebo na webových stránkách výrobců jednotlivých komponent.



Obrázek 5.10: Navržený online diagnostický systém s popisem komponent

### 5.2.3 Výstupy plynoucí z přípravy výroby

Kromě sestavení samotného rozvaděče je zapotřebí vytvořit dokumentaci pro zapojení všech komponent systému a řešit skutečné umístění senzorů pro sledování diagnostických signálů, což je možné až po obdržení technické specifikace konkrétní zakázky. Na přání zákazníka je totiž možné PLC systém rozšiřovat, a doplnit tak další měření.

Po složení, zapojení a odzkoušení prvního ze série výrobků je před uvedením do ostřejého provozu nutno provést EMC zkoušky celé sestavy včetně senzorů a přívodů, a to dle platných norem řady ČSN EN 55000 pro ověření absence nepřijatelného rušení do okolí a dále dle norem řady ČSN EN 61000 kvůli deklarování EMC odolnosti. Je nutné zaměřit se i na skutečnost, že součástí online diagnostického systému jsou rovněž senzory a metalická spojení mezi nimi a systémem měření. Proto je nutno řešit i otázku rušení, které do systému může vstoupit právě prostřednictvím tohoto spojení, a zkreslovat tak měřené hodnoty. Pro potlačení možných vlivů na analogové měření by byla nutno přijmout nápravná opatření nebo se více zabývat použitím měření pomocí řešení, které nejsou v oblasti EMC citlivá. Jedná se o použití průmyslových sběrnic a komunikačních protokolů, jakým je například MODBUS nebo Profibus.

## 6 Zpracování dat

Po zajištění přenosu měřených údajů a jejich případného logování, čímž se zabírala část kapitoly předchozí, je namístě zhodnotit, jaké další operace mohou být s těmito výsledky měření provedeny. Zpracování dat je možné provést pomocí modelů stárnutí, modelování spolehlivosti nebo některými dalšími postupy analýzy diagnostických veličin, které využívají matematických operací nebo statistické nástroje. Všechny tyto postupy vedou k jednomu cíli, a tím je určení stavu zařízení. Níže budou uvedeny některé vybrané konkrétní procesy, jak může být tohoto cíle dosaženo.

### 6.1 Určení životnosti

Životnost je takovou vlastností zařízení, kdy zařízení plní svou funkci až do mezního stavu, za kterým to již není možné. Životnost je zpravidla deklarována ve vztahu k provozním a servisním podmínkám a může být vyjádřena časově počtem hodin, množstvím pracovních cyklů, počtem uskutečněných otáček atp. Proces určení životnosti zařízení lze chápat jako postup, kterým je dosaženo určení doby života zařízení či příslušného podsystému. Postupy se liší dle množství zohledněných degradačních faktorů, jejich interakcí, a tedy i výběrem modelu. [18]

Jde tedy o matematické a fyzikální modely. Matematické modely jsou těmi nejjednoduššími a uvažují pouze vliv jednoho degradačního činitele a vychází přímo z empirického zjištění tohoto vlivu na životnost. Fyzikální modely naproti tomu sledují životnost v závislosti na působení více degradačních faktorů současně a vycházejí z jejich fyzikálního působení. Může se jednat o modely poloempirické nebo čistě fyzikální. Přehled modelů pro určení životnosti je uveden v obrázku 6.1. [18]

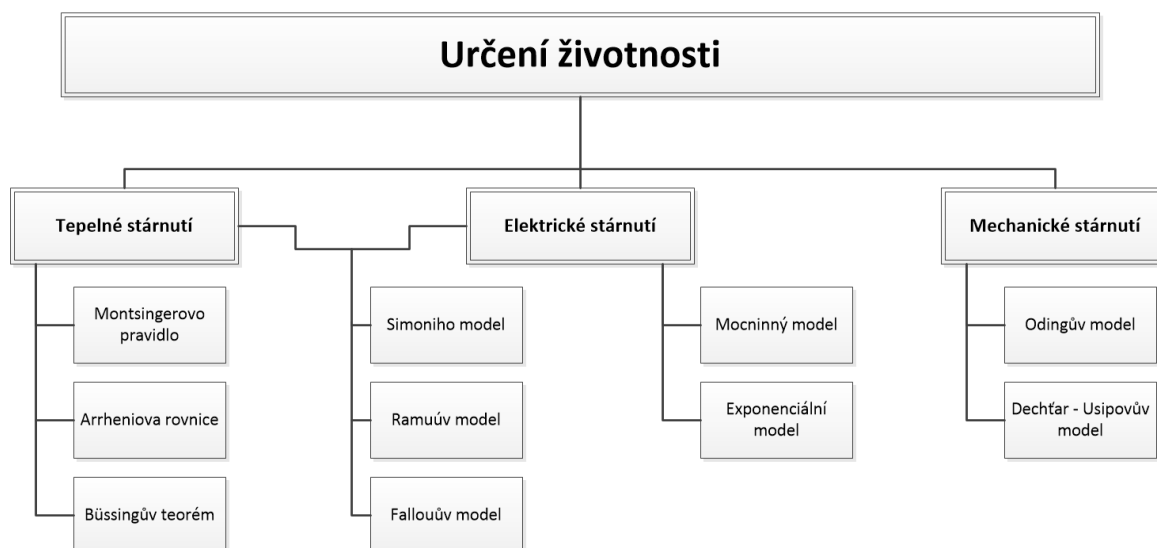
Jedním postupem by tedy bylo zjištění hodnoty materiálových konstant a spolu s nominální hodnotou degradačního faktoru je dosazovat do příslušné matematické závislosti, a určovat tak dobu života objektu. Materiálové konstanty jsou zjišťovány empiricky pomocí vhodně navržených experimentů. [10][18]

Dalším způsobem je použití fyzikálních modelů, které kombinují více degradačních faktorů, což je například dle 6.1 Simoniho, Ramuův nebo Fallouův model. [10][18]

Alternativním přístupem k oboum předchozím může být použití matematických vztahů určených čistě z podstaty probíhajících degradačních procesů. Tento postup neobsahuje empiricky zjištěné členy. Jedná se například o Crineův model. [10][18]

Matematické rovnice popisující příslušné modely a jejich detailnější popis jsou uvedeny například v literatuře [10][18].

Nominální hodnota degradačního faktoru je určena při dimenzování zařízení či jeho subsystému při vývoji. Provozní hodnota degradačního faktoru se může vlivem způsobu



Obrázek 6.1: Modely pro určení životnosti dle [10] a [18]

provozu v čase měnit. Zde je vhodné upozornit na dříve uvedenou vazbu mezi diagnostickým procesem a návrhem zařízení spolu s technologií výroby a způsobem provozu. Pokud by byly experimentálně určeny materiálové konstanty příslušného materiálu nebo aktivační energie degradačního procesu pro fyzikálně založený model spolu s určením životnosti a životnostní křivkou, mohla by být získaná matematická závislost rychlosti stárnutí implementována do modelu stárnutí, a určovat tak zbývající dobu života zařízení v závislosti na aktuálních hodnotách degradačního činitele. Vycházeno je tak z úvahy o životnosti nejcitlivějšího prvku ze spolehlivostního řetězce.

## 6.2 Modelování spolehlivosti

Spolehlivost  $Q$  je opět definována jako vlastnost zařízení. Vyjádření spolehlivosti určuje, s jakou pravděpodobností dovede zařízení plnit svou funkci ve stanoveném čase při nepozměněných provozních podmínkách. Spolehlivost lze dělit na inherentní (vlastní) a provozní. Vlastní spolehlivost je určena ve stavu, kdy je zařízení uvedeno do provozu a případná deteriorace ještě neproběhla. Provozní spolehlivost je naproti tomu definována pro konkrétní čas, po který zařízení v provozních podmínkách již pracovalo. Vhodnou poznámkou je zde, že popisovaným objektem nemusí být nutně celé zařízení, ale může se jednat o pouhé subsystémy nebo dokonce konkrétní prvky. [18]

Určování inherentní spolehlivosti probíhá na základě znalosti statistických parametrů zatěžování  $\nu_Z$  (variační koeficient zatěžování) a odolnosti vůči tomuto zatížení  $\nu_O$  (variační koeficient odolnosti). Takto lze definovat zásobu bezpečnosti  $z$ . Může se jednat o tepelné, elektrické či mechanické zatížení. Jak plyne z rovnice (6.1), pro tento výpočet je také nutno stanovit bezpečnost  $k$ . [18]

$$z = \frac{k - 1}{\sqrt{\nu_Z^2 - k^2 \cdot \nu_O^2}} \quad (6.1)$$

Variační koeficient  $\nu$  je obecně určen jako poměr směrodatné odchyly  $\sigma$  a aritmetického průměru  $\bar{x}$  dle rovnice (6.2). [18]

$$\nu = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (6.2)$$

Bezpečnost vyjadřuje možné cílené předimenzování zařízení a je vyjádřena jako poměr hodnoty odolnosti vůči zatížení  $Z_O$  a hodnoty působícího zatížení  $Z_P$ . Tento vztah je uveden v rovnici (6.3). Dále zde figurují variační koeficienty působícího zatížení a odolnosti zařízení vůči tomuto zatížení. [18]

$$k = \frac{Z_O}{Z_P} \quad (6.3)$$

Vypočtenou zásobu bezpečnosti  $z$  lze použít pro určení poruchovosti  $F_Z$ . To je provedeno pomocí integrované funkce hustoty pravděpodobnosti, což je funkce distribuční. Doplnkem k poruchovosti  $F_Z$  je pak spolehlivost  $Q$  dle rovnice (6.4). [18]

$$Q = 1 - F_Z \quad (6.4)$$

Po stanovení celkové spolehlivosti zařízení  $Q_C$  ve vztahu k jednotlivým zatížením je nutno provést jejich správnou syntézu. Ta je obecně dána vztahem (6.5). Jedná se o součin dílčích spolehlivostí při uvažování konkrétních degradačních činitelů. Je to tedy spolehlivost při tepelném namáhání  $Q_T$ , elektrickém namáhání  $Q_E$  a mechanickém namáhání  $Q_M$ . [18]

$$Q_C = Q_T \cdot Q_E \cdot Q_M \quad (6.5)$$

S určenými časy doby života lze v některých případech pomocí statistických rozdělení pravděpodobnosti odhadovat spolehlivost zařízení v časové oblasti. Z časového určení, jak dlouho by mělo zařízení pracovat, se tedy stává vyjádření, s jakou pravděpodobností bude v určitém čase zařízení provozuschopné. Problém je takto přesunut z oblasti nejcitlivějšího prvku spolehlivostního řetězce do makroskopické oblasti, kde je již sledováno celé zařízení. S tímto jsou spojeny parametry jako bezporuchovost, intenzita poruch, opravitelnost, pohotovost atp. Je však nutné provést sledování, jehož výstupy jsou zmíněné parametry, které jsou ve výpočtu použity. Tímto postupem je určována provozní spolehlivost. [18]

Oba tyto postupy lze implementovat do expertního systému, který bude na základě vložených naprogramovaných rozhodovacích procesů vyhodnocovat stav zařízení automaticky bez nutnosti účasti lidské obsluhy. Je tak logickým konstatováním, že pro správnou funkci expertního systému je nezbytná báze znalostí a báze dat nutných pro rozhodování. [18][20]

Více informací včetně přístupu k výpočtu je uvedeno například v literatuře [18].

## 6.3 Analýza diagnostických veličin

Mimo určení odhadované doby života a modelů ve spolehlivostních úvahách je možné analyzovat výsledky měření diagnostických veličin spolu s jejich konsekvencemi. Obecně vzato lze mluvit o technických těžkostech, které postihují sledované zařízení, jeho subsystemy nebo konkrétní součásti.

### 6.3.1 Porovnání teploty a zatížení

Pro potenciální odhalení závady na chladícím systému nebo signifikantní změny provozních podmínek může posloužit porovnání teploty zařízení a proudového zatížení prostřednictvím sledování kritéria  $K$ , které je zavedeno v rovnici (6.6).

$$K = \frac{T_{p.u.}}{I_{p.u.}} \quad (6.6)$$

Nejdříve je ale nutno definovat zcela jasným a univerzálním způsobem kritérium teploty  $T_{p.u.}$  a kritérium elektrického proudu  $I_{p.u.}$ . Toho je dosaženo pomocí poměrných jednotek, které jsou definovány jako poměr aktuální hodnoty ( $T_{akt}$  a  $I_{akt}$ ) k hodnotě jmenovité ( $T_N$  a  $I_N$ ). Příslušné vztahy jsou uvedeny v rovnicích (6.7) a (6.8).

$$T_{p.u.} = \frac{T_{akt}}{T_N} \quad (6.7)$$

$$I_{p.u.} = \frac{I_{akt}}{I_N} \quad (6.8)$$

Při reálném provozu tedy tato definovaná kritéria mohou nabývat různých hodnot. Jejich přehled spolu se vzniklými vztahy je definován v tabulce 6.1. Je nutno vzít v potaz ustálenou hodnotu konkrétních kritérií. V přechodných stavech nemusí být určení stavu jednoznačné.

Tabulka 6.1: Kritéria porovnání teploty a elektrického proudu a související nastalé stavy

Hodnota kritéria	Stav
$T_{p.u.} > 1$	Přehřívání zařízení
$T_{p.u.} = 1$	Jmenovitá teplota
$T_{p.u.} < 1$	Zařízení má nižší teplotu než jmenovitou
$I_{p.u.} > 1$	Proudové přetěžování
$I_{p.u.} = 1$	Jmenovité proudové zatížení
$I_{p.u.} < 1$	Neúplné proudové využití
$K > 1$	Možná závada chlazení
$K = 1$	Poměrné hodnoty teploty a proudu jsou stejné
$K < 1$	Podmínky pro chlazení jsou velmi dobré

Je nutno podotknout, že zmíněný výpočet je pouze porovnáním v daném časovém okamžiku. V praxi by mělo značný význam hodnotu kritéria  $K$  a hodnot, ze kterých je vypočteno, porovnávat s nastavenými limity a v případě dosažení definované hranice zajistit notifikaci, která by upozornila údržbu. Toto kritérium by mělo být správně nastaveno z hlediska velikosti a notifikace by měla brát v úvahu časový interval, kdy je parametr  $K$  mimo dovolené meze. Bylo by tak zamezeno zbytečnému alarmu v případě přechodných stavů. To může být například zapříčiněno tím, že různá zařízení mají různou tepelnou kapacitu, a tedy i různou časovou konstantu ohřevu své geometrie. Teplota zařízení bude stoupat mnohem pomaleji než hodnota elektrického proudu. Při dosažení nastaveného limitu by měla být rovněž porovnána hodnota teploty okolí kvůli možnému oteplení, které by zhoršilo podmínky pro chlazení, a nemuselo by se tudíž nezbytně jednat o poruchu sledovaného zařízení. Tyto rozhodovací struktury jsou vhodné pro implementování do expertního systému, který by je vykonával automaticky.

### 6.3.2 Otáčky

Diagnostikovaným objektem by mohl být elektrický točivý stroj menších výkonů, který bude pravděpodobně vybaven ložisky s valivými elementy. Proto bude následující obsah věnován zejména těmto ložiskům. Některé parametry, vlastnosti a jejich degradace mohou souviset i s ložisky kluznými.

Pro úplnost je dobré zmínit, že valivá ložiska sestávají z několika konstrukčních součástí, přičemž jednou z nich jsou právě valivé elementy. Tvar těchto elementů se může při výpočtech projevit změnou jistých koeficientů. Lze říci, že jsou vyráběna valivá ložiska kuličková či válečková, ale například i soudečková ložiska. Různé typy jsou vhodné pro různé aplikace a nesprávná volba typu ložiska může vést k jeho urychlenému opotřebením, a případně i zničení.

Exportovaná data měření rychlosti otáčení lze použít jako vstupy pro určování zbytkové životnosti ložisek točivého elektrického stroje. Ložiska mají totiž určitou životnost v závislosti na několika různých parametrech. Mezi tyto patří například právě rychlost otáčení, radiální a axiální zatížení ložiska, usazení ložiska, použité materiály či provozní podmínky. Je pochopitelné, že ve všech typech ložisek je nutné zajistit dostatek maziva, správný typ maziva a zabránit kontaminaci maziva. [8][11]

Následující rovnice popisují dobu života ložiska. První z nich se nazývá rovnice životnosti ložiska (6.9) a je hojně využívána výrobcí ložisek. Ve zmíněné rovnici  $L$  představuje životnost ložiska,  $C_L$  je radiální jmenovité zatížení ložiska, přičemž tato hodnota je uvedena v rozměrové normě ložisek či v katalogu výrobce.  $P_L$  je dynamické ekvivalentní radiální zatížení ložiska,  $B_L$  je člen, který závisí na zvolené metodě a jednotkách zvolených pro výpočet, a  $n$  je rychlost otáčení. Koeficient  $a_L$  upravuje životnost ložiska a koeficient  $b$  se rovná 3 pro kuličkové ložisko, tedy ložisko s bodovým stykem, a  $10/3$  pro válečkové ložisko, tedy ložisko s valivými elementy s úsečkovým stykem. [8][11]



$$L = a_L \cdot \left(\frac{C_L}{P_L}\right)^b \cdot \frac{B_L}{n} \quad (6.9)$$

Rovnici základní trvanlivosti lze zapsat následujícím způsobem (6.10), kde  $L_{10}$  je základní trvanlivost stanovena v počtu  $10^6$  otáček. Další parametry se určují podobně jako v předchozí rovnici (6.9). Termín "základní trvanlivost" je uveden v normě ČSN 02 4607 - Valivá ložiska, Dynamická únostnost a trvanlivost (ISO 281-93 - Rolling bearings, Dynamic load ratings and rating life). [11]

$$L_{10} = \left(\frac{C_L}{P_L}\right)^b \quad (6.10)$$

Tyto rovnice po výpočtu vyjadřují dobu provozu, kterou dosáhne sada ložisek ve stejných podmínkách při spolehlivosti 90 %. [8][11]

Pokud má být trvanlivost ložiska vyjádřena v hodinách ( $L_h$ ), upraví se zmíněné rovnice na následující tvar (6.11), kde je za neznámou  $n$  dosazen počet otáček za minutu. Určená trvanlivost platí pro konstantní rychlost otáčení. [11]

$$L_h = \left(\frac{C_L}{P_L}\right)^b \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (6.11)$$

Mimo zatížení a počet otáček je nutno uvažovat další aspekty, které mají vliv na životnost ložiska. Rovnice zohledňující tyto další faktory se nazývá rovnice rozšířené trvanlivosti (6.12). S její pomocí lze spočítat dobu provozu se spolehlivostí jinou než 90 % a lze uvažovat další provozní podmínky. Rozšířená trvanlivost se značí  $L_{na}$ . V následující rovnici se vykytují další koeficienty, jejichž význam je následující. Činitel  $a_1$  se nazývá součinitel trvanlivosti pro spolehlivost jinou než 90 % a je určován ze strojnických tabulek,  $a_2$  je součinitel materiálu a jeho hodnota se zpravidla volí rovna 2,  $a_3$  značí součinitel provozních podmínek, který je určen viskózním poměrem maziva a je určován pomocí strojnických tabulek. Součinitele  $a_2$  a  $a_3$  jsou na sobě navzájem závislé, a proto se někdy mohou označovat jako jeden společný koeficient  $a_{23}$ .

$$L_{na} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10} \quad (6.12)$$

Z výše uvedených rovnic (6.9), (6.10) a (6.11) je tedy patrné, že životnost ložiska přímo závisí na rychlosti otáčení a počtu uskutečněných otáček.

Pro modelování spolehlivosti ložiska je možné použít Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti. Tímto rozdělením lze aproximovat jiná rozdělní pomocí změny koeficientu tvaru. Pomocí distribuční funkce lze určit pravděpodobnost selhání ložiska v určitém čase. [8][18][20][44]

Účely tohoto měření mohou dále napomáhat diagnostickému procesu. Měření otáčivé rychlosti stroje může být v mnohých situacích dobrým kontrolním prvkem. Jako příklad lze uvést měření vibrací, při němž lze sledovat amplitudu mechanických kmitů v závislosti

na velikosti otáčivé rychlosti.

Lze také kontrolovat nárůst otáček při rozběhu stroje v souvislosti s měřením rozběhového proudu. Takto je možné sledovat vývoj rozběhového proudu během celého rozběhu a usuzovat tak, zda nedošlo k nasycení snímače proudu zvýšeným proudem během rozběhu stroje. [10]

Mohl by být vytvořen jednoduchý model životnosti ložisek, kde by při konstantních provozních podmínkách byl po každé otáčce odečten impulz ze senzoru otáček od vypočtené životnosti ložiska, která by byla vyjádřena v počtu otáček. Pokud by sledovaný elektrický točivý stroj nepodléhal pracovnímu režimu s častými rozběhy a zastavováním, mohla by být životnost ložiska vyjádřena i v počtu hodin a od tohoto údaje by mohl být jednoduše odečten čas, po který bylo zařízení v provozu. Samozřejmě lze tyto výpočty provést i v případě, kdy nejsou zachovány konstantní otáčky nebo jsou přítomny rozběhy a zastavování stroje v rámci pracovních cyklů, ale jednotlivé parametry, ze kterých je životnost vypočtena, budou pozměněny a přesnost určení životnosti se může zhoršit.

### 6.3.3 Nesymetrie elektrického proudu

Pokud bude měřicí systém vybaven třemi senzory LEM, lze sledovat průběhy elektrického proudu třífázového elektrického stroje ve všech fázích. Z tohoto měření lze určovat obsah zpětné a netočivé složky proudu, které vznikají při nesymetrické zátěži (generátor) či nesymetrickém napájení (motor). Tato metoda se nazývá metodou souměrných složek a principiálně jde o rozložení nesouměrné třífázové soustavy na tři soustavy souměrné. Nyní se tato metoda používá především k určení míry nesymetrie soustavy. Zmíněná analýza má tedy význam zejména pro energetické účely z pohledu vlastností sítě, případně vlastností samotného zařízení. Lze tak například s její pomocí odhalit poruchu v síti, kterou by mohl být zkrat či rozpojení v jedné či ve více fázích. Při těchto havarijních stavech jsou nesymetrie značné. Při určení míry nevyváženosti tak lze v třífázovém systému navrhnout symetrizační obvod jako protiopatření. [45]

Níže uvedená soustava rovnic (6.13) v maticovém zápisu popisuje výpočet fázorů fázových proudů ( $\bar{I}_U$ ,  $\bar{I}_V$ ,  $\bar{I}_W$ ), pokud jsou známy jednotlivé složky popisující nesymetrii. Tyto složky jsou následující: sousledná složka  $\bar{I}_+$ , zpětná složka  $\bar{I}_-$  a netočivá složka  $\bar{I}_0$ .

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_U \\ \bar{I}_V \\ \bar{I}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_+ \\ \bar{I}_- \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Výše uvedený zápis (6.13) lze přehledněji zapsat následujícím způsobem maticově (6.14).

$$\mathbf{I} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{I}_S \quad (6.14)$$

Kde  $\mathbf{I}$  se nazývá matice fázorů proudu,  $\mathbf{I}_S$  je poté maticí fázorů souměrných složek

proudu a  $\mathbf{S}$  je matice souměrných složek. [45]

V praxi však nastává situace, kdy je sledován reálný průběh fázových proudů, a cílem je matematický popis nesymetrie určit. Pokud mají být pro známé průběhy fázových proudů nesymetrii popisující složky kvantifikovány, musí být použita inverzní operace k předchozímu výpočtu (6.14). Tvary matic fázorů proudu zůstávají zachovány a je tak nutno použít inverzní matici  $\mathbf{S}^{-1}$  k matici  $\mathbf{S}$  dle rovnice (6.15).

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{I} \quad (6.15)$$

Úplný zápis je pak uveden ve vztahu (6.16), který se nachází níže.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_+ \\ \bar{I}_- \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_U \\ \bar{I}_V \\ \bar{I}_W \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

Nutností je samozřejmě převedení okamžitých hodnot fázových proudů z časové oblasti do oblasti komplexních čísel na fázory, aby bylo možné výše uvedené vztahy použít. Následně je uveden obecný matematický zápis časových průběhů fázových proudů v třífázové síti, kde  $i(t)$  je časový průběh příslušného fázového proudu,  $I_m$  je amplituda příslušného fázového proudu,  $t$  značí čas,  $\omega$  je úhlová rychlost otáčení fázoru a  $\varphi$  znamená fázový posun. Úhel natočení fázorů jednotlivých fází je vyjádřen ve stupních. Zápis platí pro nesymetrickou trojfázovou síť, a tudíž respektuje různé amplitudy fázových proudů a jejich různé fázové posuny. [46]

$$i_U(t) = I_{Um} \sin(\omega t + \varphi_U)A \quad (6.17)$$

$$i_V(t) = I_{Vm} \sin(\omega t + \varphi_V - 120^\circ)A \quad (6.18)$$

$$i_W(t) = I_{Wm} \sin(\omega t + \varphi_W + 120^\circ)A \quad (6.19)$$

Fázové proudy v symetrické síti jsou navzájem posunuty o  $120^\circ$  a jsou zapsány jako fázory v komplexní rovině následujícím způsobem uvedeným níže. [46]

$$\bar{I}_U = I \quad (6.20)$$

$$\bar{I}_V = I \angle -120^\circ = a^2 \cdot I \quad (6.21)$$

$$\bar{I}_W = I \angle +120^\circ = a \cdot I \quad (6.22)$$

Kde operátor  $a$  se nazývá operátor natočení a je definován následujícím způsobem. [46]

$$\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (6.23)$$

$$\bar{a}^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (6.24)$$

Což pro jednotkový vektor znázorňuje natočení v komplexní rovině o  $+120^\circ$  a  $-120^\circ$ .

Jak je vidět v rovnicích (6.13) a (6.16), operátor natočení  $a$  figuruje i v matici symetrických složek  $\mathbf{S}$  a v matici k ní inverzní  $\mathbf{S}^{-1}$ , díky nimž je možné celou analýzu nevyváženosti třífázového systému matematicky elegantně provést.

Ve výše uvedených rovnicích je tedy uvedeno, že pro analýzu proudů včetně jednotlivých složek nesymetrie je nutno měřit všechny tři fázové proudy.

Obecně lze metodou souměrných složek analyzovat nejen fázory proudu, ale i fázory napětí. [45]

Analýzou rozběhového proudu lze zjišťovat stav elektrického stroje. Jak již bylo řečeno, metoda je vhodná pro asynchronní stroje a stroje synchronní, které lze rozbíhat asynchronním rozběhem. Synchronní stroje s asynchronním rozběhem musí být vybaveny vhodně dimenzovaným tlumícím vinutím sestávajícím z tyčí umístěných v pólech rotoru a jejich vzájemným propojením kruhem. Reálná provedení tohoto vinutí se liší dle konstrukce rotoru strojů s vyniklými póly a strojů s hladkým rotorem. Tato metoda dokáže určit přítomnost porušení symetrie rotorového vinutí, kterým je ve výše zmíněných případech vinutí rotoru asynchronního stroje či tlumící vinutí synchronního stroje dimenzované pro asynchronní rozběh. Mohlo by se tak jednak o porušení tyče vinutí v rotoru, o přerušení spojení tyče tlumícího vinutí či porušení kruhu nakrátko. Použití metody se nehodí pro mechanismy, kde jsou výše zmíněné elektrické stroje součástí aplikace, kde se vyskytuje proměnlivý zátěžný moment. Pro velké točivé stroje by bylo nutno pro měření použít měřících transformátorů proudu. Pokud rozběh probíhá kratší dobu než 2 s, je nutno přistoupit k prodloužení doby rozběhu. [10]

Nelze než zmínit skutečnost, že pro rychlé přechodové děje je nutno nastavit vysokou vzorkovací frekvenci, a v případě zmíněných matematických metod i použít pokročilejší matematické operace. To může mít za následek dosažení technických limitů používaného PLC systému nebo některých použitých modulů.

## 7 Závěr

Hlavní cíl práce, kterým byl výběr senzorů a komponent PLC systému, sestavení a otestování zkušební verze online diagnostického systému a následné zhodnocení dalších možných akcí se získanými daty, byl splněn v plném rozsahu. Ke splnění tohoto cíle byl vytvořen poměrně rozsáhlý teoretický úvod, který se zabýval materiály v elektrických strojích, silnoproudou diagnostikou a degradačními procesy.

V první kapitole teoretické části byly jmenovány materiály, které se využívají k výrobě funkčních a konstrukčních částí elektrických strojů, kde se nachází vodivé, magnetické, dielektrické a konstrukční materiály, a byla provedena i jejich charakteristika a případně byly uvedeny některé další technologicky relevantní informace. Byla zde zmíněna i provozní média, kterými jsou chladicí kapaliny nebo maziva, a byla uvedena i lepidla, coby materiál pro lepené spoje.

Následovala kapitola, kde byla uvedena definice diagnostiky a deteriorace. V návaznosti na tyto definice byl vytvořen přehled různých přístupů k diagnostice a údržbě zařízení. Byly uvedeny prostředky diagnostického procesu a motivace k jeho využívání.

Ve třetí kapitole bylo přistoupeno k popisu degradačních procesů v elektrických strojích. Tento popis spočíval ve výčtu faktorů, které nepříznivě působí na životnost elektrických strojů nebo jejich součástí. Tyto faktory byly nejprve popsány samostatně ve smyslu jejich vzniku, projevů a možných důsledků. Výčet degradačních faktorů byl ukončen popisem jejich vzájemného působení. Závěrem této kapitoly byla provedena stručná analýza výsledků dvou studií, jež potvrdily informace obsažené v odborné literatuře. Jedna ze studií se věnovala problematice točivých strojů a druhá se věnovala strojům netočivým.

V další kapitole bylo již přistoupeno k aplikaci získaných poznatků. Proběhla volba senzorů pro měření diagnostických veličin a byl popsán zvolený PLC systém včetně svých modulů. Jsou zde rovněž uvedena další zařízení, která byla do online diagnostického systému zahrnuta.

Pátá kapitola byla věnována realizaci a testování online diagnostického systému, který byl sestaven na základě výstupů z kapitoly předchozí. Je zde popsána implementace jednotlivých senzorů a konfigurace hardware i software prvků PLC systému společně s tvorbou uživatelských programů. Dále jsou zde popsány tvorba a testování subsystému pro monitoring vibrací, závěrečné testování online diagnostického systému a první fáze přípravy výroby, která obsahuje 3D rozvržení komponent potřebných pro samostatnou činnost tohoto systému v provozu.

Poslední kapitola obsahuje některé možné způsoby, jak se získanými daty a probíhajícími měřeními nakládat. Je zde proveden přehled modelů stárnutí, s jejichž pomocí lze určovat životnost zařízení. Dále se zde nachází úvod do určování provozní spolehlivosti sledovaných zařízení, společně se základními matematickými popisy. Nakonec je přistou-

peno k rozboru jednotlivých diagnostických signálů jako takových. Byl proveden návrh stavové tabulky zachycující poměr teploty zařízení a elektrického proudu, byly uvedeny vztahy, s jejichž pomocí lze sestavit jednoduchý model stárnutí pro valivá ložiska, a byl uveden matematický aparát pro sledování proudových nesymetrií.

Závěrečným zhodnocením je tedy konstatování, že hlavní cíl práce byl beze zbytku splněn a bylo přistoupeno k plnění některých dalších úkolů. V teoretické části to byl zmíněný úvod do problematiky silnoproudé diagnostiky a deteriorace elektrických strojů. V části praktické se jednalo o vizualizace měření prostřednictvím nástroje mapp View nebo ukládání měřených dat na FTP server obsažený v modulu kontroleru PLC systému. Kromě dílčích zkoušek při sestavování a konfiguraci byla provedena i závěrečná zkouška, při níž byly využity všechny funkcionality online diagnostického systému současně.

# Použité zdroje

- [1] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [2] LIPTÁK, Jan a SEDLÁČEK, Josef. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03191-8.
- [3] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-190-X.
- [4] BEATY, H. Wayne. *Electrical engineering materials reference guide*. New York: McGraw-Hill, c1990. ISBN 0-07-004196-2.
- [5] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. Přeložil Petr VOŽENÍLEK. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988.
- [6] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. Řada elektrotechnické literatury.
- [7] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a HRABAVCOVÁ, Valeria. *Design of rotating electrical machines*. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 9780470695166.
- [8] TONG, Wei. *Mechanical design of electric motors*. Boca Raton: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4200-9143-4.
- [9] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [10] MENTLÍK, Václav et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.

- [11] ŘEŘÁBEK, Antonín. *Stavba a provoz strojů 2: pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-21-0.
- [12] ŘEŘÁBEK, Antonín. *Stavba a provoz strojů 1: pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2006. ISBN 80-86960-02-1.
- [13] FUKÁTKO, Tomáš a FUKÁTKO, Jaroslav. *Teplo a chlazení v elektronice II*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-199-3.
- [14] BARRON, Randall F. *Industrial noise control and acoustics*. New York: Marcel Dekker, c2003. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 151. ISBN 082470701X.
- [15] HRON, Jakub. *Ekonomika provozu a výměny transformátorů*. Praha, 2006. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Vašíček, CSc.
- [16] SVOBODA, Michal. *Magnetostrikce a její dopady na elektrická zařízení*. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Michal Svoboda.
- [17] ASTM International. *Standards & Publications* [online]. ASTM: ©1996-2020 [cit. 1.4.2020]. Dostupné z: <https://www.astm.org/Standard/standards-and-publications.html>
- [18] MENTLÍK, Václav. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-412-5.
- [19] KREIDL, Marcel a ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.
- [20] TŮMOVÁ, Olga a PIRICH, Dušan. *Nástroje řízení jakosti a základy technické diagnostiky*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2003. ISBN 80-7043-247-0.
- [21] SKALA, Bohumil. *Měření a zkoušení elektrických zařízení: využití počítače pro řízení experimentů a sběr dat*. Vydání: 2., upravené. Plzeň: Západočeská univerzita



v Plzni, 2015. ISBN 978-80-261-0546-6.

- [22] FANGXING, Li and BROWN, R. E. A cost-effective approach of prioritizing distribution maintenance based on system reliability. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 2004, vol. 19, no. 1, 439-441 [cit. 29.2.2020]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1256413>
- [23] HADDAD, Gilbert; SANDBORN, Peter A.; PECHT, Michael G. An Options Approach for Decision Support of Systems With Prognostic Capabilities. *IEEE Transactions on Reliability* [online]. 2012, vol. 61, no. 4, 872-883 [cit. 29.2.2020]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6324403>
- [24] ABB. *4 types of maintenance strategy, which one to chose?* [online]. ABB: ©2020. [Cit. 29.2.2020] Dostupné z: <https://new.abb.com/news/detail/1797/abb-completes-acquisition-of-br>.
- [25] JEZZINI, Ali, AYACHE, Mohammad, ELKHANSA, Lina, MAKKI, Bassem and ZEIN, Maya, 2013. Effects of predictive maintenance(PdM), Proactive maintenance(PoM) & Preventive maintenance(PM) on minimizing the faults in medical instruments. In: *2013 2nd International Conference on Advances in Biomedical Engineering*. Tripoli, IEEE, s. 53-56. ISBN 978-1-4799-0251-4.
- [26] JAMES, R. E. a SU, Q. *Condition assessment of high voltage insulation in power system equipment*. 1st pub. London: Institution of Engineering and Technology, 2008. xii, 276 s. IET power and energy series; 53. ISBN 978-0-86341-737-5.
- [27] TAVNER, Peter J. et al. *Condition monitoring of rotating electrical machines*. 1st pub. London: Institution of Engineering and Technology, 2008. xxii, 282 s. IET power and energy series; 56. ISBN 978-0-86341-739-9.
- [28] MELIOPOULOS, A.P. Sakis, COKKINIDES, George J., MOHAGHEGHI, Salman, DAM, Q. Binh, ALAILEH, Ramiz H. and STEFOPOULOS, Giorgos K., 2009. A laboratory setup of a power system scaled model for testing and validation of EMS applications. In: *2009 IEEE Bucharest PowerTech*. Bucharest, IEEE, s. 1-8. ISBN 978-1-4244-2234-0.

- [29] BRÜTSCH, Rudolf; TARI, Makoto; FRÖHLICH, Klaus; WEIERS, Tilman; VOGELANG, Ruben. Insulation Failure Mechanisms of Power Generators [Feature Article]. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2008, vol. 24, no. 4, 17-25 [cit. 29.2.2020]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4581636>
- [30] TENBOHLEN, Stefan, JAGERS, Janine, GEBAUER, Johannes, MÜLLER, Pascal, LAPWORTH, John, YUKIYASU, Shirasaka, DESAI, Bhavin, McINTOSH, Anne, BASTOS, Gilson and BO, L. Transformer reliability survey: Interim report. *Electra*. 2012, 46-49. ISSN 1286-1146.
- [31] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřící obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [32] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-114-4.
- [33] Tewa Temperature Sensors. *Tewa Temperature Sensors*. [online]. [Cit. 30.3.2020]. Dostupné z: <https://tewa-sensors.com>
- [34] LEM. *LEM* [online]. [Cit. 30.3.2020]. Dostupné z: <https://www.lem.com>
- [35] Panasonic. *Industrial Devices & Solutions* [online]. ©Panasonic Corporation. [Cit. 30.3.2020]. Dostupné z: <https://www3.panasonic.biz>
- [36] APAR. *APAR* [online]. [Cit. 30.3.2020]. Dostupné z: <https://www.apar.pl>
- [37] Conrad Electronic Česká republika. *Conrad.cz* [online]. [Cit. 30.3.2020]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz>
- [38] Siemens. *Siemens* [online]. Siemens: ©1996–2020. [Cit. 30.3.2020]. Dostupné z: <https://new.siemens.com>
- [39] ABB. *ABB* [online]. ABB: ©2020. [Cit. 30.3.2020]. Dostupné z: <https://new.abb.com>

- [40] B&R. *B&R* [online]. B&R: ©2020. [Cit. 30.3.2020]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com>
- [41] ŠMEJKAL, Ladislav a MARTINÁSKOVÁ, Marie. *PLC a automatizace*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-58-9.
- [42] ABB. Press release. *ABB completes acquisition of B&R*. [online]. 6.7.2017. [Cit. 30.3.2020] Dostupné z: <https://new.abb.com/news/detail/1797/abb-completes-acquisition-of-br>
- [43] LEFFLER, Jan. *Návrh usměrňovače* Plzeň, 2017. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
- [44] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [45] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-164-0.
- [46] BENEŠOVÁ, Zdeňka a LEDVINOVÁ, Marcela. *Základy elektrických obvodů v příkladech*. 3., dopl. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. ISBN 978-80-261-0432-2.

# Seznam obrázků

1.1	Rozdělení nejvýznamnějších elektricky vodivých materiálů . . . . .	18
1.2	Rozdělení magnetických materiálů dle [1][2][3][4] . . . . .	23
1.3	Orientace magnetických momentů částic v doméně materiálů dle [1] . . . . .	25
1.4	Hysterezní smyčka magneticky měkkého a tvrdého materiálu dle [3] . . . . .	26
1.5	Vztah mezi pojmy "dielektrikum" a "izolant" dle [9] . . . . .	30
1.6	Fázorový diagram reálného dielektrika dle [9] . . . . .	31
1.7	Rozdělení typů polarizací dle [9] . . . . .	32
1.8	Dělení izolantů dle [1] . . . . .	33
1.9	Dělení konstrukčních materiálů dle [2] . . . . .	37
1.10	Tahový diagram měkké oceli dle [1] a [2] . . . . .	38
1.11	Rozdělení maziv dle [11] . . . . .	44
2.1	Základní přístupy provádění diagnostiky dle [10] . . . . .	48
2.2	Různé přístupy k údržbě zařízení . . . . .	50
3.1	Graf příčin poruch hydroalternátorů a Paretův diagram dle [29] . . . . .	66
3.2	Graf poruch EIS hydroalternátorů a Paretův diagram dle [29] . . . . .	66
3.3	Graf poruch transformátorů v rozvodnách a Paretův diagram dle [29] . . . . .	67
3.4	Graf poruch blokových transformátorů a Paretův diagram dle [29] . . . . .	68
4.1	Koncept navrhovaného online diagnostického systému . . . . .	71
4.2	Termistor TEWA TT-PT1000A-2050-11-AUNI, převzato z [33] . . . . .	72
4.3	Proudový senzor LEM AT 50 B10, převzato z [34] . . . . .	73
4.4	Senzor APAR AR252/RS485, převzato z [36] . . . . .	74
4.5	Senzor Panasonic CY-121A-P, převzato z [35] . . . . .	75
4.6	Součástka MMA8452Q, převzato z [37] . . . . .	76
4.7	PLC systémy Siemens Simatic S7-1200, ABB AC500 a B&R X20 [38][39][40] . . . . .	78
4.8	Funkce systému B&R X20, převzato z [40] . . . . .	80
4.9	Panel PC, převzato z [40] . . . . .	84
5.1	Sestava všech komponent B&R X20 ve vývojové fázi . . . . .	87
5.2	Vývojové prostředí Automation Studio V 4.5.2.102 . . . . .	88
5.3	FBD uživatelský program pro zpracování signálu ze senzorů LEM . . . . .	89
5.4	Sestava pro závěrečné testování . . . . .	91
5.5	Profylaktické měření vibrací senzorem MMA8452Q v prostředí MS Excel . . . . .	93
5.6	Monitorování vibrací senzorem MMA8452Q v prostředí MATLAB . . . . .	94
5.7	Vizualizace zápisu měření teplot vykreslená v prostředí MS Excel . . . . .	96

---

5.8	Vizualizace měření pomocí senzoru APAR AR252/RS485 . . . . .	97
5.9	Záznam z kamery PS3Eye . . . . .	97
5.10	Navržený online diagnostický systém s popisem komponent . . . . .	99
6.1	Modely pro určení životnosti dle [10] a [18] . . . . .	101

# Přílohy

## Seznam příloh

Příloha A.1 - PLC uživatelský program FBD - úprava vstupních hodnot ze senzorů PT1000 a uložení do procesní proměnné

Příloha A.2 - PLC uživatelský program FBD - úprava vstupních hodnot ze senzoru AR232/RS458 a uložení do procesní proměnné

Příloha A.3 - PLC uživatelský program FBD - úprava vstupních hodnot ze senzorů LEM a uložení do procesní proměnné

Příloha A.4 - PLC uživatelský program FBD - načítání pulzů ze senzoru CY-121A-P a odečítání od zvoleného počtu

Příloha A.5 - PLC uživatelský program ANSI C - zapisování vybraných procesních proměnných do souboru

Příloha B.1 - Arduino UNO program - čtení měřených hodnot ze senzoru MMA8452Q

Příloha C.1 - MATLAB funkce - čtení měřených hodnot ze senzoru MMA8452Q - řešení pro profylaxe

Příloha C.2 - MATLAB funkce - čtení měřených hodnot ze senzoru MMA8452Q - řešení pro monitorování

Příloha D.1 - Vizualizace mapp View - PT1000

Příloha D.2 - Vizualizace mapp View - AR232/RS485

Příloha D.3 - Vizualizace mapp View - LEM

Příloha D.4 - Vizualizace mapp View - CY-121A-P

Příloha E.1 - LTspice XVII - simulovaný obvod

Příloha E.2 - LTspice XVII - výstupní proud usměrňovače

Příloha E.3 - Schéma zapojení pro finální testování

Příloha F.1 - 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - otevřený rozvaděč

Příloha F.2 - 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - uzavřený rozvaděč

Příloha F.3 - 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - otevřený rozvaděč - upravená průhlednost

Příloha F.4 - 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - uzavřený rozvaděč - upravená průhlednost

Příloha F.5 - 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - nárys - otevřený rozvaděč

Příloha F.6 - 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - nárys - uzavřený rozvaděč

Příloha F.7 - 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - bokorys - uzavřený rozvaděč - upravená průhlednost

Příloha F.8 - 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - půdorys - uzavřený rozvaděč - upravená průhlednost

Příloha G.1 - Výkres základních rozměrů sestaveného online diagnostického systému

Příloha H.1 - Fotodokumentace - Arduino UNO a senzor MMA8452Q

Příloha H.2 - Fotodokumentace - Senzor MMA8452Q připevněný k chladicímu žeburu jednofázového asynchronního motoru

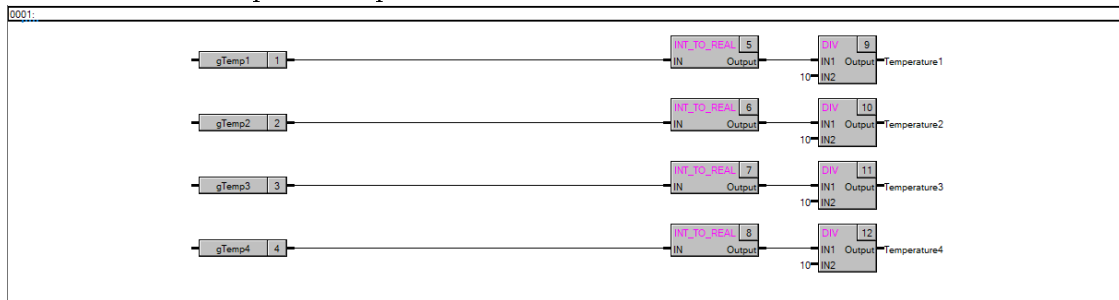
Příloha H.3 - Fotodokumentace - Testování monitorování vibrací

Příloha H.4 - Fotodokumentace - Dostupný hardware PLC systému B&R X20

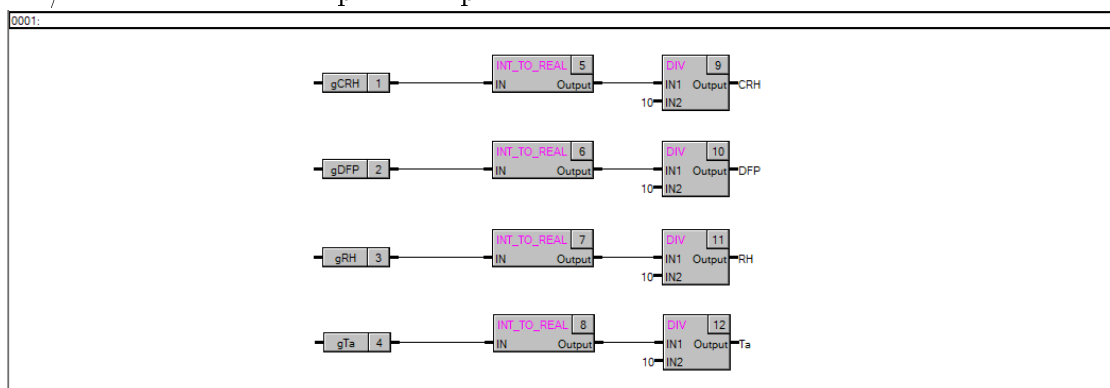
Příloha H.5 - Fotodokumentace - Odporová zátěž pro finální testování

Příloha H.6 - Fotodokumentace - Sestava pro finální testování měření PLC systémem

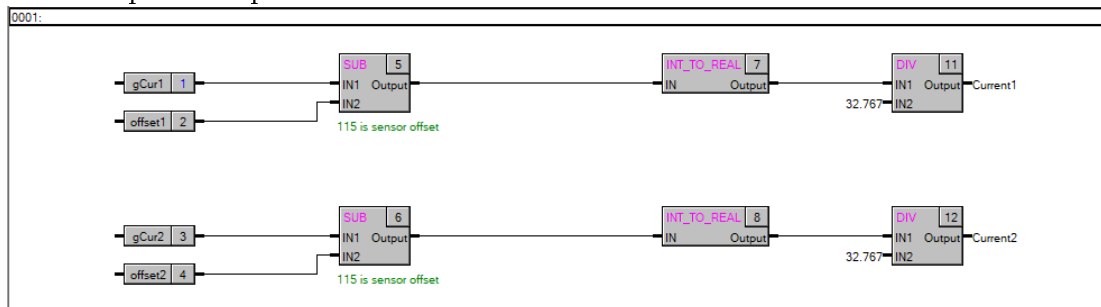
**Příloha A.1** PLC uživatelský program FBD - úprava vstupních hodnot ze senzorů PT1000 a uložení do procesní proměnné



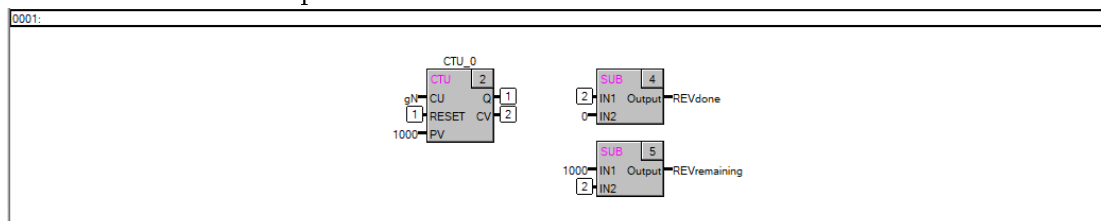
**Příloha A.2** PLC uživatelský program FBD - úprava vstupních hodnot ze senzoru AR232/RS458 a uložení do procesní proměnné



**Příloha A.3** PLC uživatelský program FBD - úprava vstupních hodnot ze senzorů LEM a uložení do procesní proměnné



**Příloha A.4** PLC uživatelský program FBD - načítání pulzů ze senzoru CY-121A-P a odečítání od zvoleného počtu





## Příloha A.5 PLC uživatelský program ANSI C - zapisování vybraných procesních proměnných do souboru

```
#include <bur/plctypes.h>

#ifdef _DEFAULT_INCLUDES

#include <AsDefault.h>

#endif

/* TRUE/FALSE definition for more pleasant code reading */

#define FALSE 0

#define TRUE !FALSE

void _INIT ProgramInit(void)

{

    /* filling string variables */

    brsstrcpy((UDINT)&PvName, (UDINT)&"Temperature1");

    brsstrcpy((UDINT)&PvName1, (UDINT)&"Temperature2");

    brsstrcpy((UDINT)&PvName2, (UDINT)&"Temperature3");

    brsstrcpy((UDINT)&PvName3, (UDINT)&"Temperature4");

    brsstrcpy((UDINT)&PvName4, (UDINT)&"Ta");

    brsstrcpy((UDINT)&DevName, (UDINT)&"CF");

    /* linking mapp components and enabling FBs */

    DataRec.MpLink = (MpComIdentType*)&gDataRecorder_1;

    DataRec.Enable = TRUE;

    DataRegPar.MpLink = (MpComIdentType*)&gDataRecorder_1;

    DataRegPar.Enable = TRUE;

    DataRegPar1.MpLink = (MpComIdentType*)&gDataRecorder_1;

    DataRegPar1.Enable = TRUE;

    DataRegPar2.MpLink = (MpComIdentType*)&gDataRecorder_1;

    DataRegPar2.Enable = TRUE;

}
```

```
DataRegPar3.MpLink = (MpComIdentType*)&gDataRecorder_1;

DataRegPar3.Enable = TRUE;

DataRegPar4.MpLink = (MpComIdentType*)&gDataRecorder_1;

DataRegPar4.Enable = TRUE;

}

void _CYCLIC ProgramCyclic(void)
{
    /* FB configuration */

    DataRec.DeviceName = (STRING*)&DevName;

    DataRec.RecordMode = mpDATA_RECORD_MODE_TIME;

    DataRegPar.PVName = (STRING*)&PvName;

    DataRegPar1.PVName = (STRING*)&PvName1;

    DataRegPar2.PVName = (STRING*)&PvName2;

    DataRegPar3.PVName = (STRING*)&PvName3;

    DataRegPar4.PVName = (STRING*)&PvName4;

    /* calling FBs */

    MpDataRecorder(&DataRec);

    MpDataRegPar(&DataRegPar);

    MpDataRegPar(&DataRegPar1);

    MpDataRegPar(&DataRegPar2);

    MpDataRegPar(&DataRegPar3);

    MpDataRegPar(&DataRegPar4);

}
```

```
void _EXIT ProgramExit(void)
{
    /* disabling FBs to unlink mpLink*/
    DataRec.Enable = FALSE;
    DataRegPar.Enable = FALSE;
    DataRegPar1.Enable = FALSE;
    DataRegPar2.Enable = FALSE;
    DataRegPar3.Enable = FALSE;
    DataRegPar4.Enable = FALSE;
    /* calling FBs */
    MpDataRecorder(&DataRec);
    MpDataRegPar(&DataRegPar);
    MpDataRegPar(&DataRegPar1);
    MpDataRegPar(&DataRegPar2);
    MpDataRegPar(&DataRegPar3);
    MpDataRegPar(&DataRegPar4);
}
```

**Příloha B.1** Program pro Arduino UNO - čtení měřených hodnot ze senzoru MMA8452Q

```
#include <Wire.h>           // Must include Wire library for I2C

#include "SparkFun_MMA8452Q.h"

// Click here to get the library: http://librarymanager/All#SparkFun\_MMA8452Q

MMA8452Q accel;           // create instance of the MMA8452 class

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  Wire.begin();

  if (accel.begin() == false) {

    Serial.println("Not Connected. Please check connections and read the hookup guide.");

    while (1);

  }

}

void loop() {

  if (accel.available()) { // Wait for new data from accelerometer

    // Acceleration of x, y, and z directions in g units

    Serial.print(accel.getCalculatedX(), 3);

    Serial.print(",");

    Serial.print(accel.getCalculatedY(), 3);

    Serial.print(",");

    Serial.print(accel.getCalculatedZ(), 3);

    Serial.println();

  }

}
```

## Příloha C.1 MATLAB funkce - čtení měřených hodnot ze senzoru MMA8452Q - řešení pro profylaxe

```
% MEMS_mereni_for - profylakticke reseni v1.2 2020

clear
clc
delete(instrfind)

%gravitacni zrychleni
g = 9.81;

%% n - delka vzorkovani urcena pomoci tic-toc
%10 = cca 2 s
%100 = cca 5 s
%1000 = cca 25 s

n = 100;

s = serial('COM3','BaudRate',9600);
s.ReadAsyncMode = 'continuous';
fopen(s);

for i=1:n

    R = fscanf(s);
    row = regexp(R, ',', 'split');
    data_raw(i,:) = row;

end

data_raw([1],:) = [];
data = str2double(data_raw)*g

%rozdeleni do jednotlivych vektoru do workspace
Xdata=data(:,1);
Ydata=data(:,2);
Zdata=data(:,3);

%vykresleni mereni
plot(data)

%logovani mereni
csvwrite('MEMS_matlab_for_log.csv',data)
```

## Příloha C.2 MATLAB funkce - čtení měřených hodnot ze senzoru MMA8452Q - řešení pro monitorování

```
%% MEMS_mereni_while - online reseni v2.5 2020

%{
"serial" prikazy jsou kompatibilni s MATLAB 2016
pro verzi 2019 se používají příkazy "serialport" (lze použít "flush")
%}

%% pro ukončení snímání vibrací použijte v command window "ctrl+c" !!!
%% pro ukončení přístupu na seriovou komunikaci použijte příkaz
"fclose(s)"

clear
clc

g = 9.81; %gravitační zrychlení
n = 100; %počet vzorků v iteraci (sekvenci měření)
iter = 0; %indexování pro iterace (sekvence měření)

while 1

    %% pro ukončení snímání vibrací použijte v command window "ctrl+c"

    %zpráva do command window o počtu iterací a aktivní sekvenci
    mereni
    iter = iter + 1;

    disp('MEMS měření vibrací je zahájeno.')
    disp('Iterace:')
    disp(iter)

    %% inicializace sekvence měření:

    delete(instrfind) %převzme přístup k seriovému portu
    i = 1;

    s = serial('COM3','BaudRate',9600); %nastaví čtení z usb portu
    s.InputBufferSize = 32; %nastaví velikost vstupního zásobníku
    s.ReadAsyncMode = 'continuous'; %rezim čtení dat
    fopen(s); %otevře přístup na usb port

    data_raw = fscanf(s); %nacte data z usb portu

    %rozdělí data do 3 vektorů
    data_str = regexp(data_raw, ',', 'split');

    %přetypuje ze stringu na double a přečte na SI jednotky
    data_prep = str2double(data_str)*g;
```

```
%pokud prijde po seriove komunikaci ruseni, vynuluje cely radek,  
%aby sekvence mohla pokracovat + signalizace do command window  
if numel(data_prep) ~= 3  
data_prep = [0,0,0];  
disp 'Byla vynulovana sada vzorku XYZ v iteraci:'  
disp(iter)  
disp 'Sada vzorku:'  
disp(i)  
end  
  
TF_data_prep = isnan(data_prep);  
data_prep(TF_data_prep) = 0; %vynuluje chybne nactene NaN prvky  
  
data(i,:) = [i, data_prep]; %zapise na i-ty radek data  
  
%data v jednotlivych vektorech do workspace  
x_base = data(:,1);  
Xdata = data(:,2);  
Ydata = data(:,3);  
Zdata = data(:,4);  
  
%% vzorkovani, vizualizace a ulozeni jedne iterace (sekvence mereni)  
vibraci  
  
while i<n  
  
i = i+1;  
  
data_raw = fscanf(s);  
data_str = regexp(data_raw, ',', 'split');  
data_prep = str2double(data_str)*g;  
  
%pokud prijde po seriove komunikaci ruseni, vynuluje cely radek,  
%aby sekvence mohla pokracovat + signalizace do command window  
if numel(data_prep) ~= 3  
data_prep = [0,0,0];  
disp 'Byla vynulovana sada vzorku XYZ v iteraci:'  
disp(iter)  
disp 'Sada vzorku:'  
disp(i)  
end  
  
TF_data_prep = isnan(data_prep);  
data_prep(TF_data_prep) = 0; %vynuluje nactene NaN prvky  
  
data(i,:) = [i, data_prep]; %zapis vozorku iterace do matice
```

```
%data v jednotlivých vektorech do workspace
x_base = data(:,1);
Xdata = data(:,2);
Ydata = data(:,3);
Zdata = data(:,4);

%zapis vzorku aktualni sekvence mereni do csv
csvwrite('MEMS_matlab_while_log.csv',data)

%vykresleni aktualni sekvence mereni
plot(x_base,Xdata,x_base,Ydata,x_base,Zdata)

%{
%popisky grafu, zpomaluji vykresleni while cyklem
title('MMA8452Q')
xlabel('Vzorky [-]')
ylabel('Zrychleni [m/s^2]')
legend({'Osa X', 'Osa Y', 'Osa Z'},'Location','east')
%}

drawnow

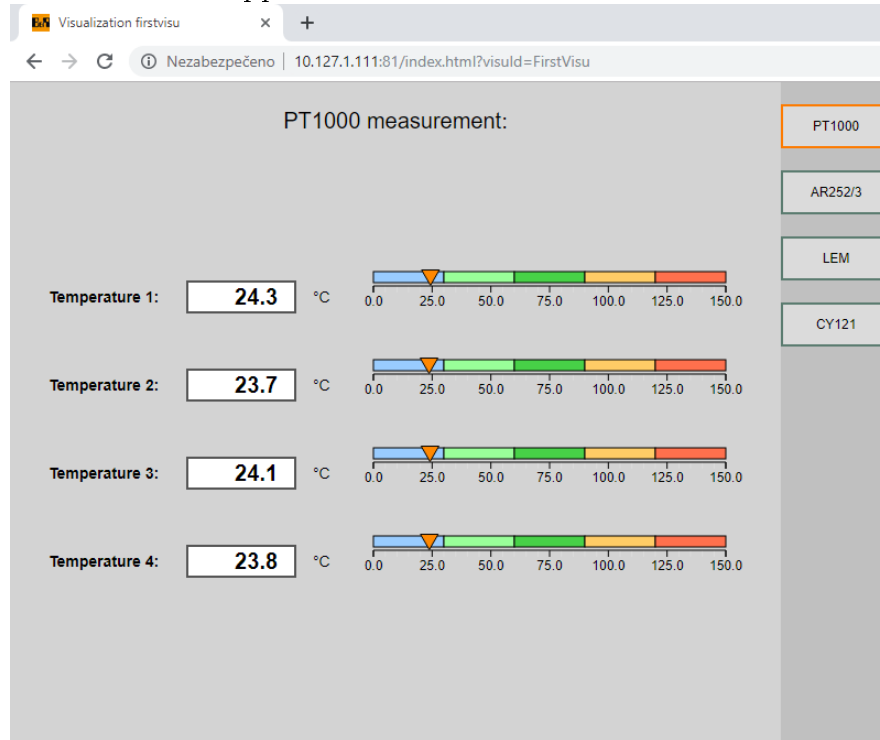
end

%uzavre pristup na usb port, coz vyprazdni i buffery
fclose(s);

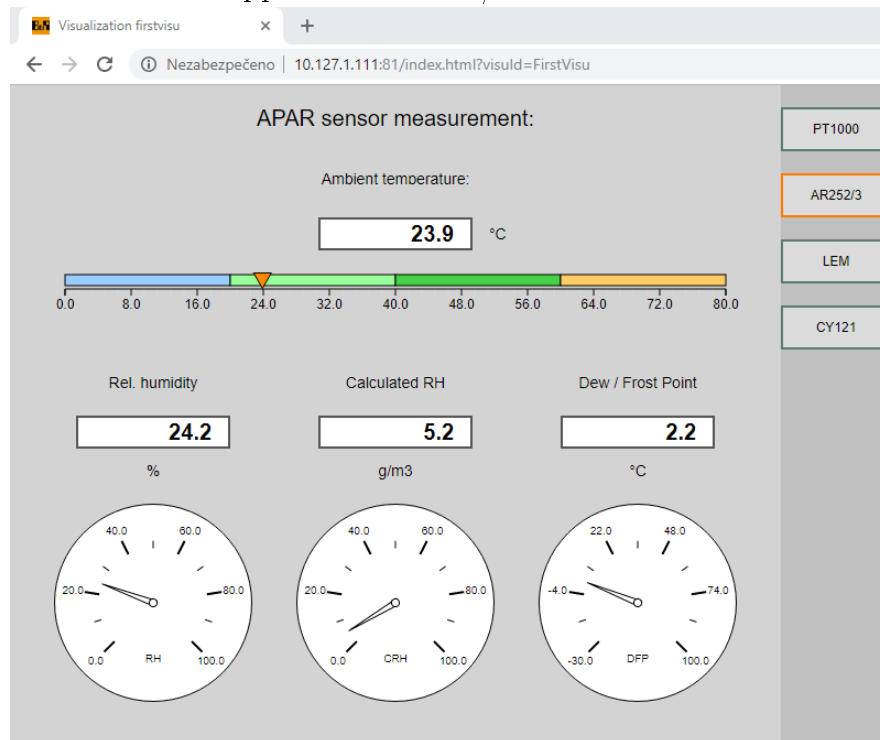
end
```



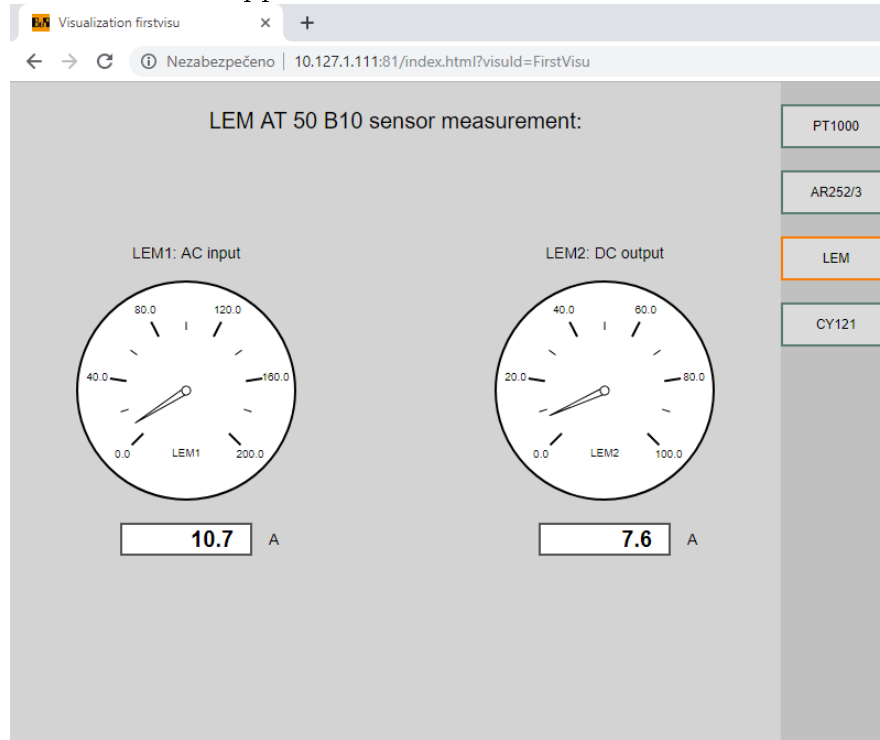
### Příloha D.1 Vizualizace mapp View - PT1000



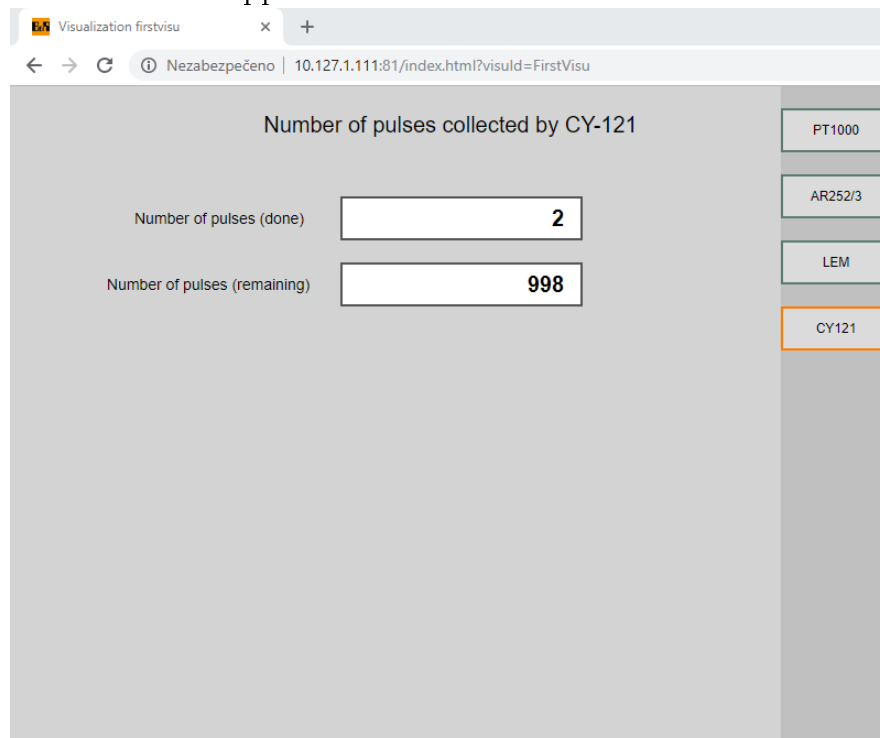
### Příloha D.2 Vizualizace mapp View - AR232/RS485



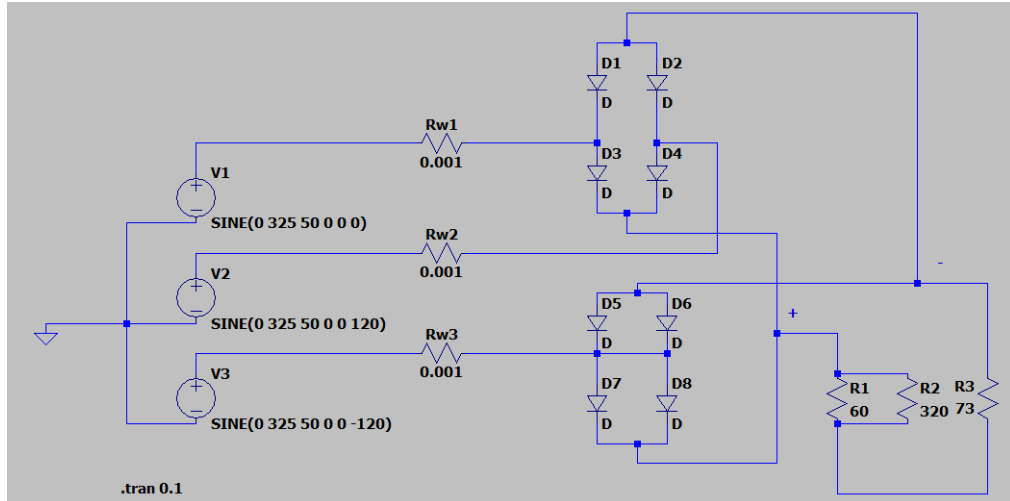
### Příloha D.3 Vizualizace mapp View - LEM



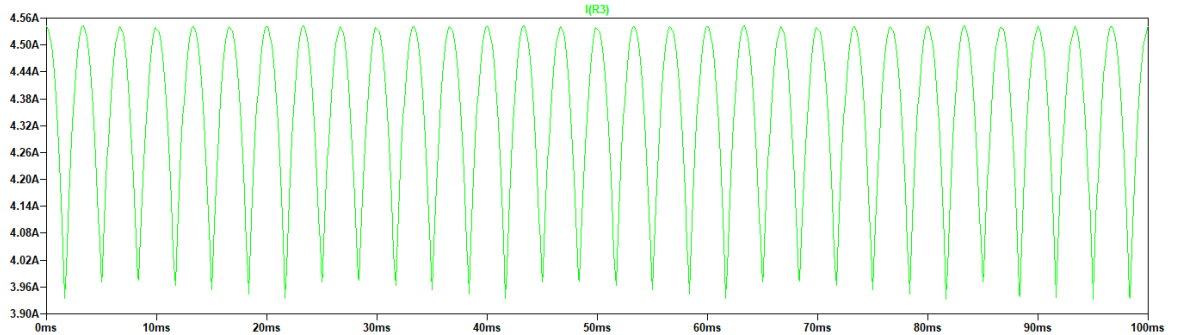
### Příloha D.4 Vizualizace mapp View - CY-121A-P



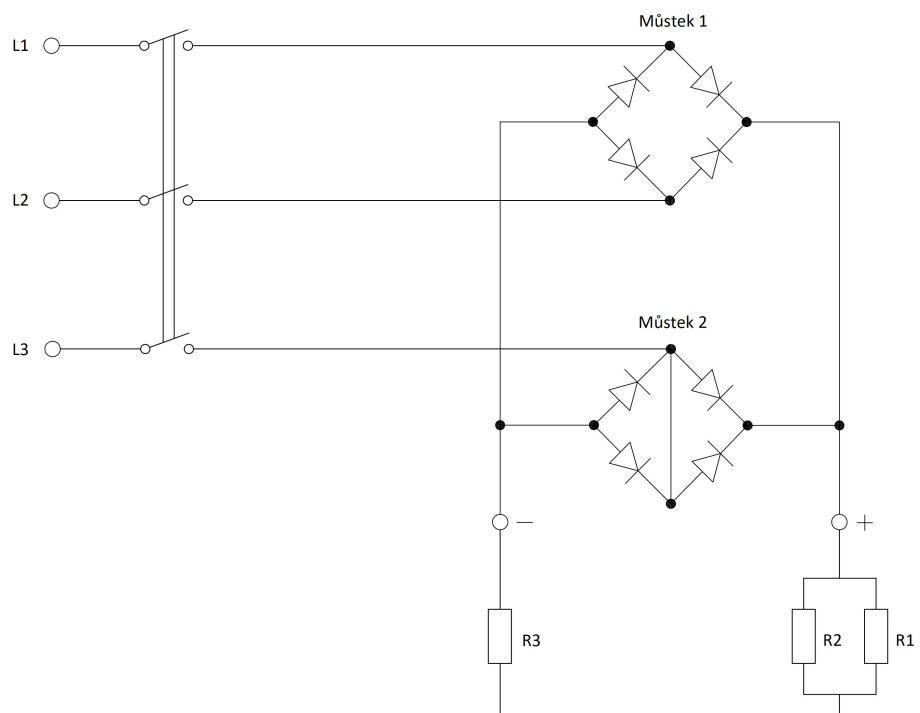
**Příloha E.1** LTspice XVII - simulovaný obvod



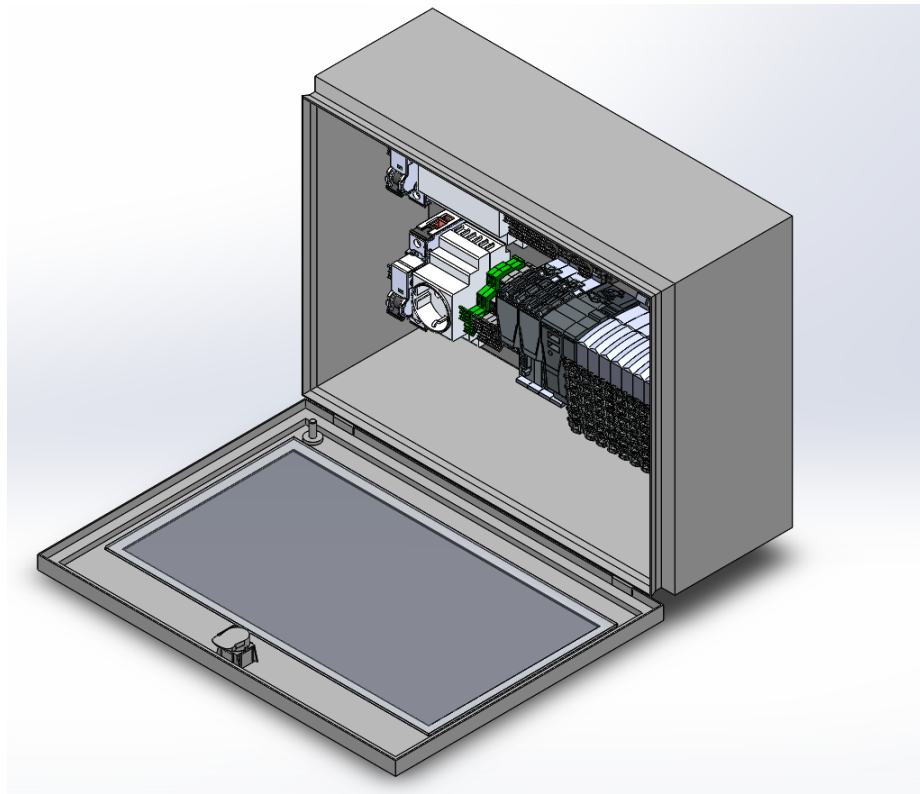
**Příloha E.2** LTspice XVII - výstupní proud usměrňovače



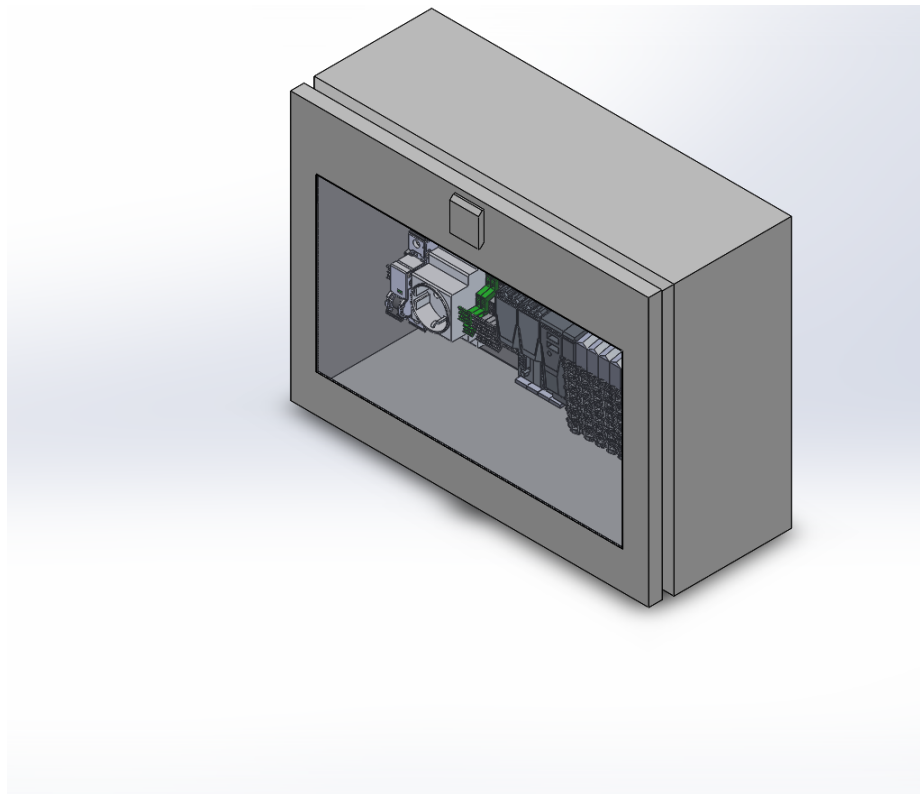
**Příloha E.3** Schéma zapojení pro finální testování



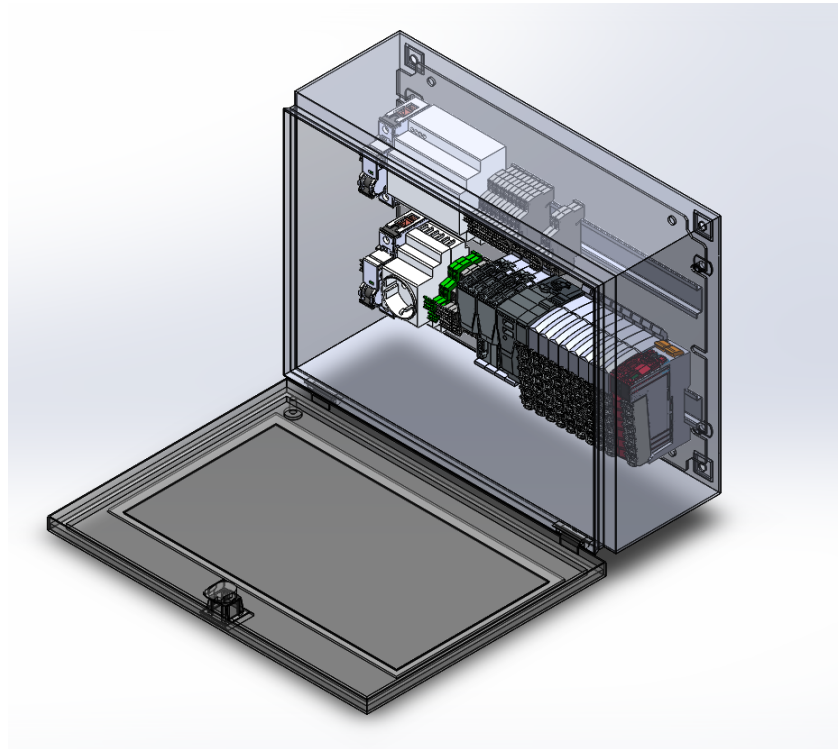
**Příloha F.1** 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - otevřený rozvaděč



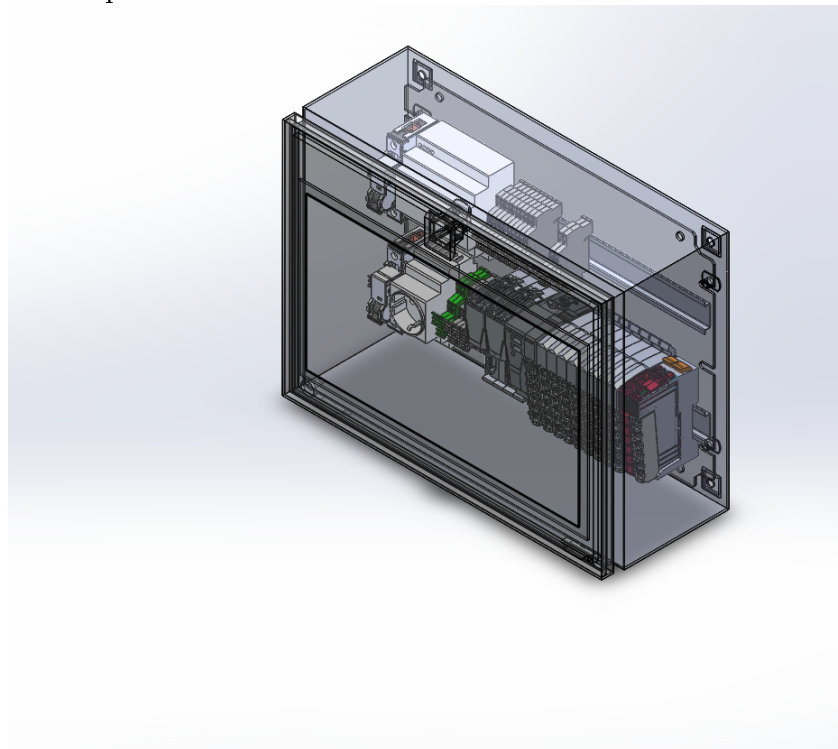
**Příloha F.2** 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - uzavřený rozvaděč



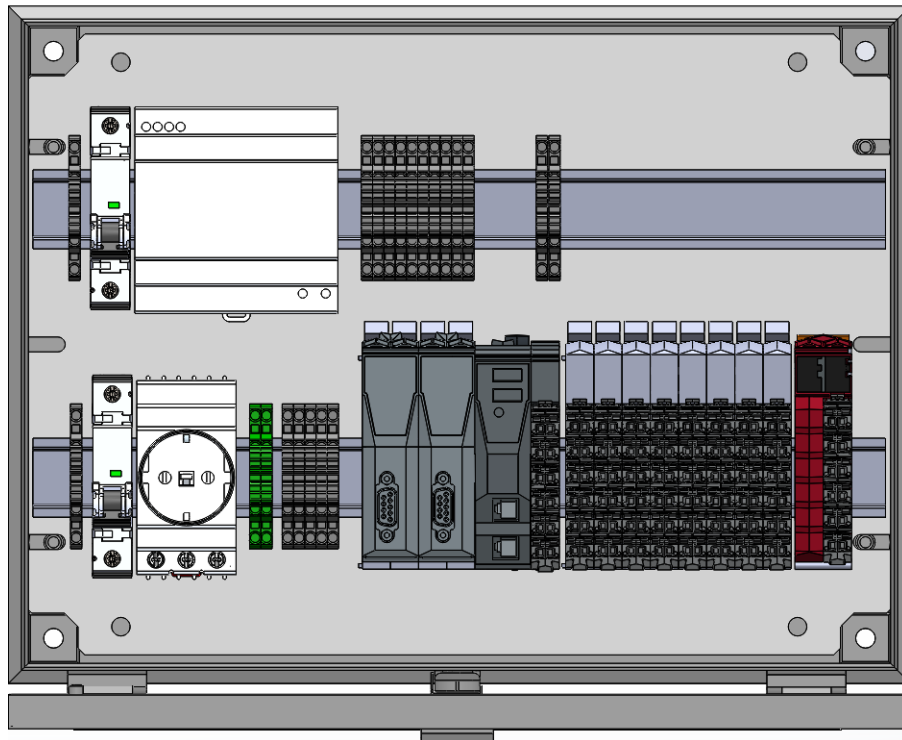
**Příloha F.3** 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - otevřený rozvaděč - upravená průhlednost



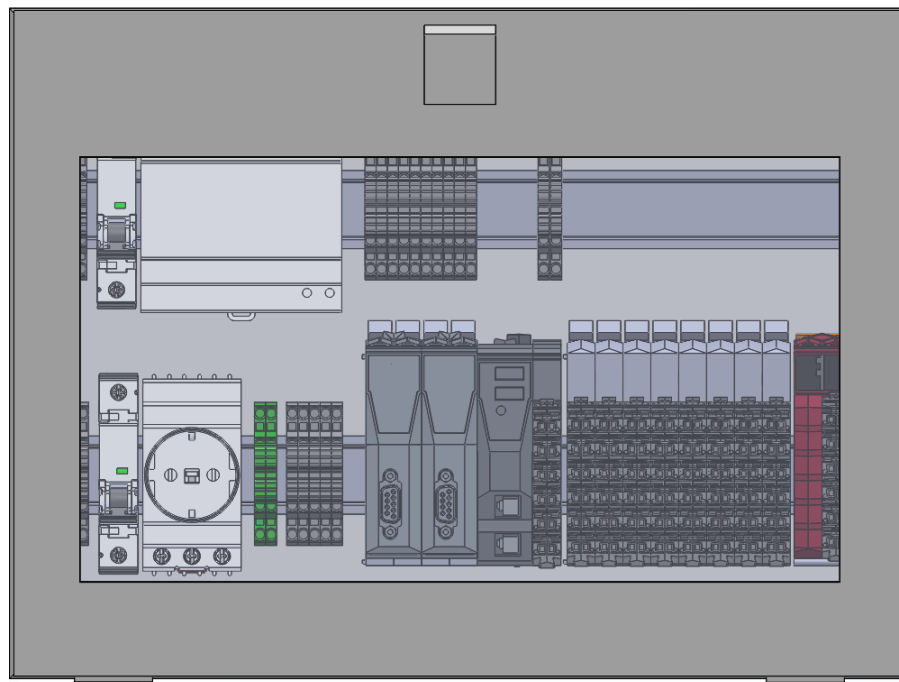
**Příloha F.4** 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - uzavřený rozvaděč - upravená průhlednost



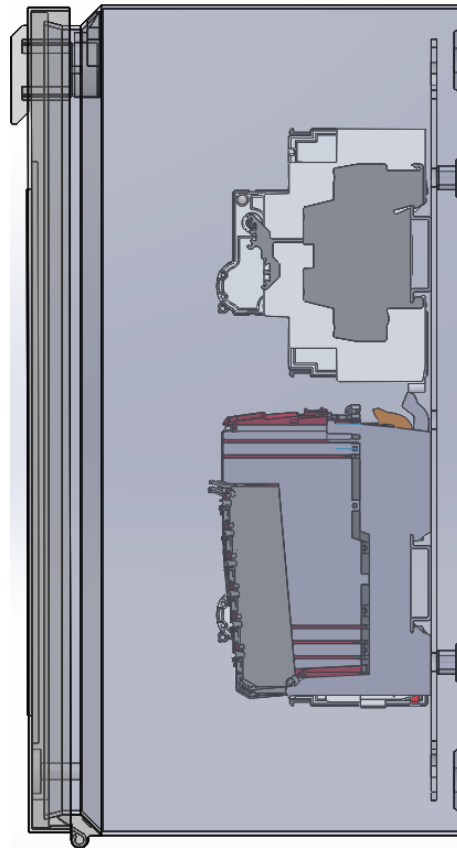
**Příloha F.5** 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - nárys - otevřený rozvaděč



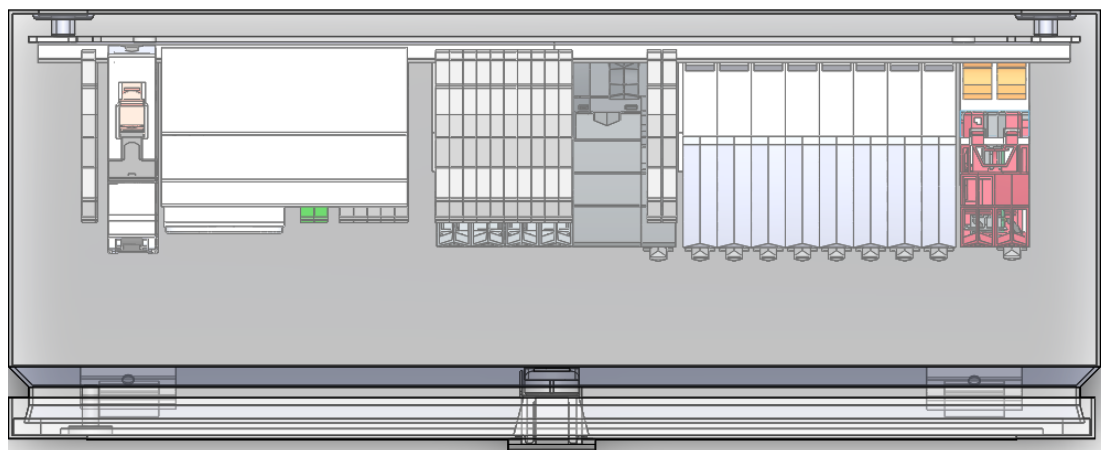
**Příloha F.6** 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - nárys - uzavřený rozvaděč



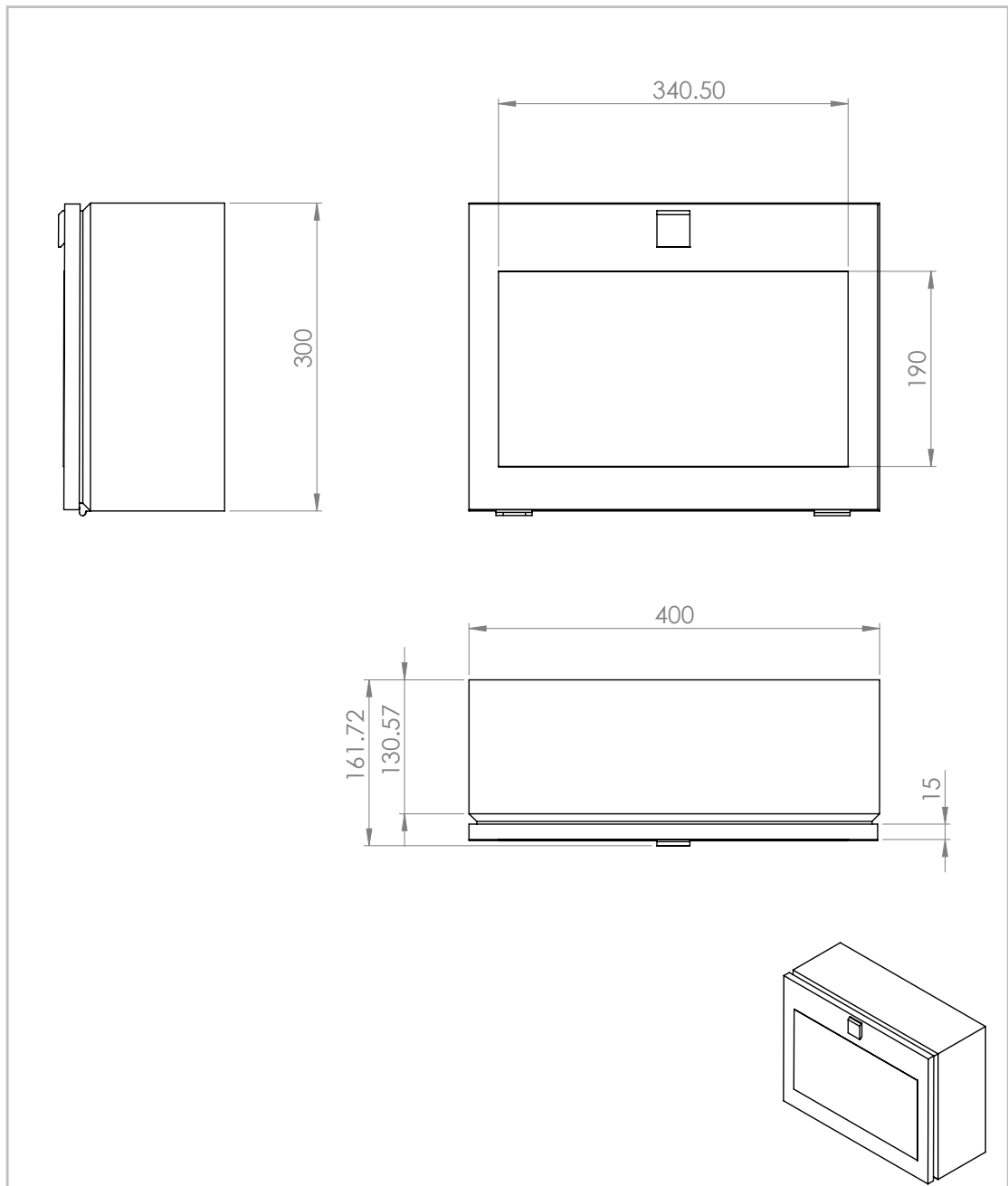
**Příloha F.7** 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - bokorys - uzavřený rozvaděč - upravená průhlednost



**Příloha F.8** 3D model rozložení komponent online diagnostického systému - půdorys - uzavřený rozvaděč - upravená průhlednost

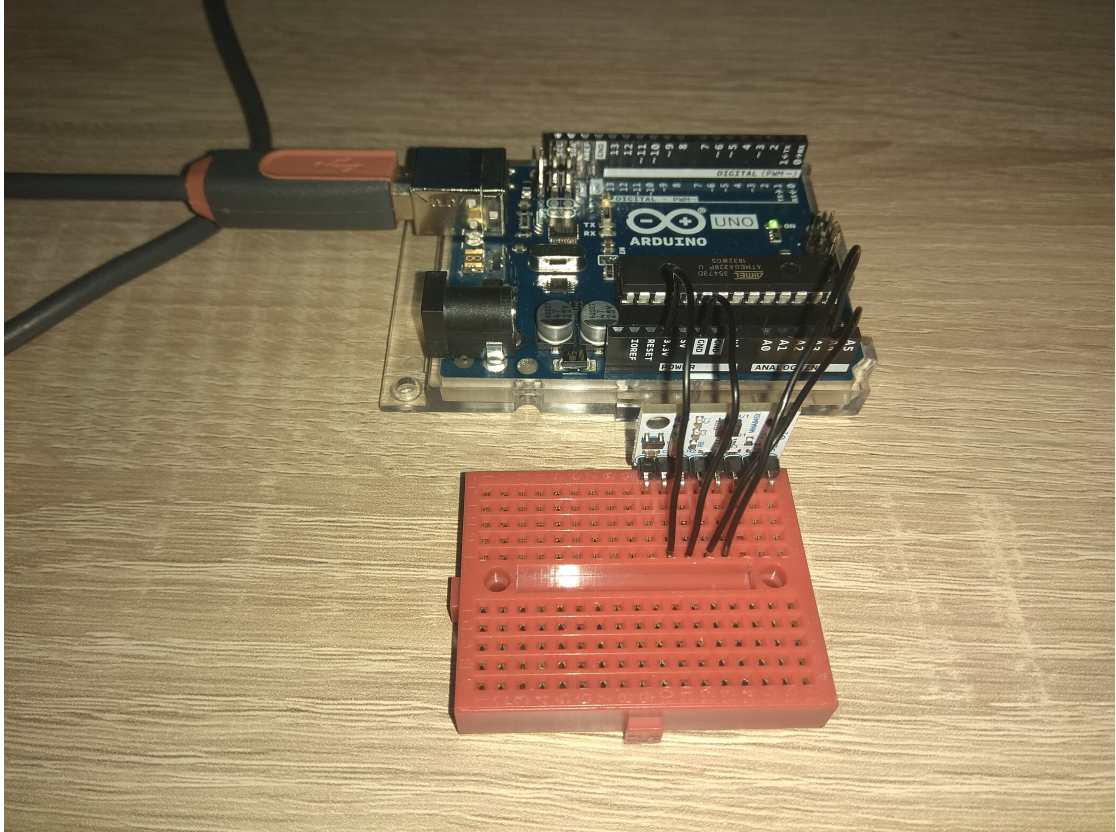


**Příloha G.1** Výkres základních rozměrů sestaveného online diagnostického systému

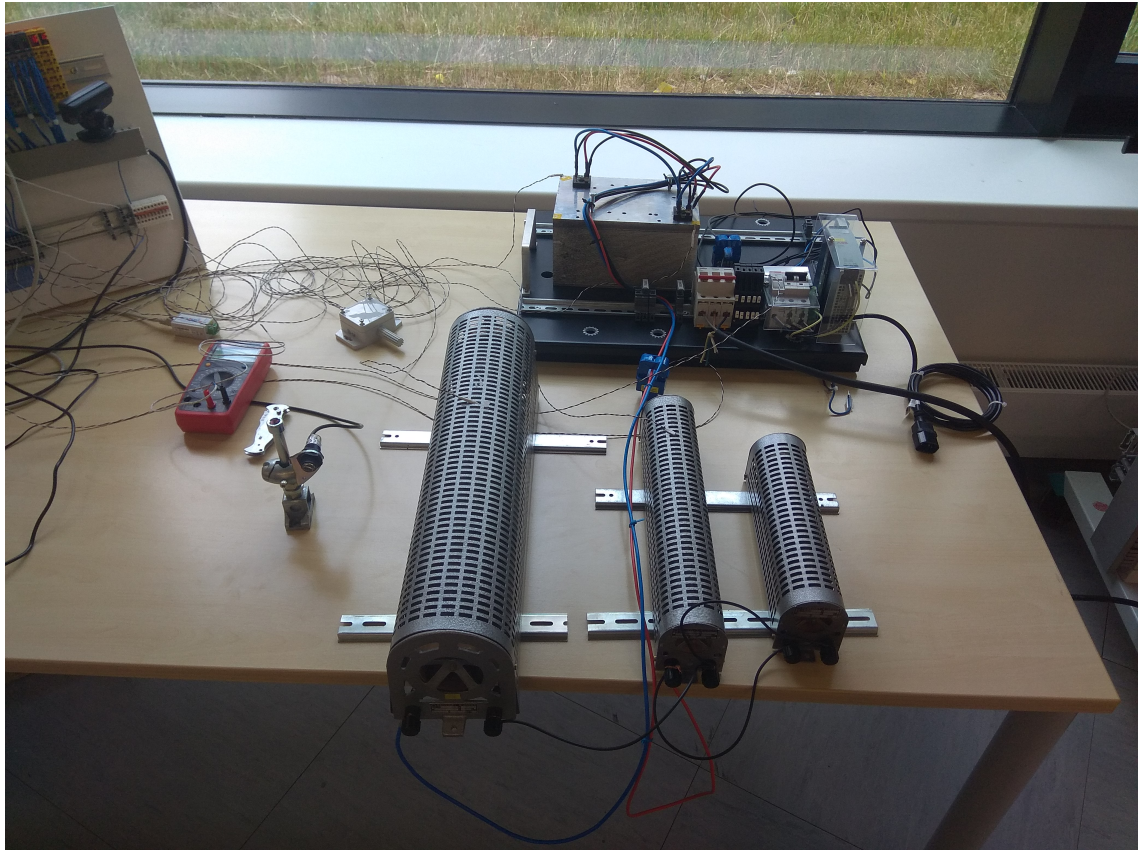


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION 1.0	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:  DP Jan Leffler	
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A								MATERIAL:		DWG NO. ODS_1.0	
										A4	
								WEIGHT:		SCALE:1:5 SHEET 1 OF 1	



**Příloha H.1** Fotodokumentace - Arduino UNO a senzor MMA8452Q**Příloha H.2** Fotodokumentace - Senzor MMA8452Q připevněný k chladicímu žebříku jednofázového asynchronního motoru

**Příloha H.3** Fotodokumentace - Testování monitorování vibrací**Příloha H.4** Fotodokumentace - Dostupný hardware PLC systému B&R X20

**Příloha H.5** Fotodokumentace - Odporová zátěž pro finální testování**Příloha H.6** Fotodokumentace - Sestava pro finální testování měření PLC systémem