

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Online monitoring izolačních systémů točivých strojů  
velkých výkonů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Oldřich ROZSÍVAL**  
Osobní číslo: **E13B0335P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Online monitoring izolačního systému točivých strojů velkých výkonů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište významné diagnostické veličiny v diagnostice točivých strojů. Blíže charakterizujte veličiny vhodné pro online měření.
2. Popište systém pro online monitoring izolačního systému točivých strojů, charakterizujte jeho účel, provedení a specifika aplikace.
3. Zpracujte stručný přehled současných monitorovacích systémů dostupných na trhu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V.; Pihera, J.; Polanský, R.; Prosr, P.; Trnka, P. - Diagnostika elektrických zařízení, BEN - technická literatura, 2008
2. Hammer M. - Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů, BEN - technická literatura, 2009
3. elektronické informační zdroje, databáze IEEE Xplore

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Svoboda  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013  
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Předmětem této bakalářské práce je online monitorování izolace točivých strojů. Popsány jsou zde jednotlivé veličiny, které se k posuzování stavu izolace používají, z nichž některé je možné využít i pro monitorování online. Dále je popsán online monitorovací systém pro měření veličin spojených s izolací stroje bez nutnosti stroj odstavit z provozu. Poslední částí je zpracovaný přehled monitorovacích systémů pro stroje s popisem jednotlivých prvků, které jsou dostupné na trhu.

## **Klíčová slova**

Diagnostika, on-line, off-line, izolační odpor, polarizační index, ztrátový činitel, kapacita, zvýšené napětí, frekvenční analýza proudu, částečné výboje, ozón, teplota, vibrace, hluk, monitorovací systém, expertní systém

## **Abstract**

The subject of this thesis is the insulation online monitoring of rotating machinery. Described are various variables which are used to assess the state of insulation, some of which can also be used for online monitoring. Also described is the online monitoring system for measuring variables related to insulation machine without the need to put the machine out of order. Last part contains an overview of monitoring systems for machines with a description of the individual elements, which are available on the market.

## **Key words**

Diagnostics, on-line, off-line, insulation resistance, polarization index, dissipation factor, capacity, higher voltage, frequency analysis of the current, partial discharge, ozone, temperature, vibration, noise, monitoring system, expert system

## **Prohlášení**

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Svobodovi, za svěření tématu bakalářské práce a omluvil se za nedostatečný přístup ke konzultacím.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>1 VELIČINY PRO DIAGNOSTIKU TOČIVÝCH STROJŮ.....</b>	<b>13</b>
1.1 VIZUÁLNÍ KONTROLA .....	13
1.2 IZOLAČNÍ ODPOR .....	14
1.2.1 Způsob měření.....	14
1.3 POLARIZAČNÍ INDEX.....	15
1.4 ZÁVISLOST IZOLAČNÍHO ODPORU NA STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ.....	16
1.4.1 Způsob měření.....	16
1.5 ZTRÁTOVÝ ČINITEL TG $\Delta$ , KAPACITA A ČASOVÁ KONSTANTA.....	17
1.5.1 Způsob měření.....	17
1.6 TIP-UP KAPACITA.....	18
1.6.1 Způsob měření.....	18
1.7 ZVÝŠENÉ NAPĚTÍ.....	18
1.7.1 Způsob měření.....	19
1.8 FREKVENČNÍ ANALÝZA PROUDU A ROZPTYLOVÉHO MAGNETICKÉHO POLE .....	19
1.8.1 Způsob měření.....	20
1.9 ANALÝZA ROZBĚHOVÉHO PROUDU .....	20
1.9.1 Způsob měření.....	21
1.10 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....	21
1.10.1 Měření částečných výbojů galvanickou metodou off-line .....	21
1.10.2 Měření částečných výbojů galvanickou metodou on-line.....	22
1.10.3 Senzory pro online měření.....	23
1.10.4 Elektrická rušení při online měření.....	23
1.10.5 Online monitoring generátorů a VN motorů.....	23
1.11 OZÓN V CHLADICÍM VZDUCHU .....	24
1.11.1 UV fotometrie .....	24
1.11.2 Kolorimetrie .....	24
1.12 TEPLOTA .....	24
1.12.1 Bodové senzory na vinutí statoru .....	25
1.12.2 Senzory na vinutí rotoru .....	25
1.13 VIBRACE ČEL VINUTÍ.....	25
1.14 VIBRACE LOŽISEK .....	26
1.14.1 Způsob měření .....	26
1.15 HLUK .....	27
1.15.1 Způsob měření .....	27
<b>2 SYSTÉM ONLINE MONITORINGU IZOLAČNÍHO SYSTÉMU .....</b>	<b>28</b>
2.1 ÚČEL MONITOROVACÍCH SYSTÉMŮ.....	28



2.2	PROVEDENÍ MONITOROVACÍCH SYSTÉMŮ .....	29
2.2.1	<i>Báze znalostí</i> .....	30
2.2.2	<i>Řídicí mechanismus</i> .....	31
2.2.3	<i>Báze dat</i> .....	31
2.2.4	<i>Uživatelské rozhraní</i> .....	31
2.3	ROZDĚLENÍ EXPERTNÍCH SYSTÉMŮ .....	31
2.3.1	<i>Charakter řešené úlohy</i> .....	31
2.3.2	<i>Prioritně využívané reprezentace znalostí</i> .....	33
2.3.3	<i>Využívání heuristických znalostí</i> .....	33
<b>3</b>	<b>PŘEHLED MONITOROVACÍCH SYSTÉMŮ NA TRHU .....</b>	<b>34</b>
3.1	ABB – MONITOROVACÍ SYSTÉM MCM800 .....	34
3.2	ALSTOM – MONITOROVACÍ SYSTÉM AMODIS .....	34
3.2.1	<i>AMODIS PAMOS</i> .....	34
3.2.2	<i>AMODIS ROMON</i> .....	35
3.3	AURA – MONITOROVACÍ SYSTÉMY MPS A MMPS .....	35
3.3.1	<i>MPS</i> .....	35
3.3.2	<i>MMPS</i> .....	36
3.4	GE – MONITOROVACÍ SYSTÉM 3500 SERIES .....	36
3.5	IFM – MONITOROVACÍ SYSTÉM OCTAVIS .....	37
3.6	SKF – MONITOROVACÍ SYSTÉMY MULTILOG IMx A F-LINK .....	37
3.6.1	<i>Multilog IMx</i> .....	37
3.6.2	<i>F-LINK</i> .....	37
3.7	OMICRON – MONITOROVACÍ SYSTÉM OMS600 .....	37
3.8	VUES – MONITOROVACÍ SYSTÉM M225 .....	38
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>39</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>40</b>

## Seznam symbolů a zkratek

$R_{izt}$ .....	izolační odpor v čase $t$ [ $\Omega$ ]
$U$ .....	měřící napětí [V]
$I_t$ .....	proud v čase $t$ [A]
$i_c$ .....	kapacitní proud [A]
$i_v$ .....	vodivý proud [A]
$i_s$ .....	svodový proud [A]
$i_a$ .....	absorpční proud [A]
$R_{iz15}$ .....	izolační odpor v čase 15s [ $\Omega$ ]
$R_{iz60}$ .....	izolační odpor v čase 60s [ $\Omega$ ]
$R_{iz600}$ .....	izolační odpor v čase 600s [ $\Omega$ ]
$Pi_{60}$ .....	minutový polarizační index [-]
$Pi_{600}$ .....	desetiminutový polarizační index [-]
$Pi_{600}$ .....	desetiminutový polarizační index [-]
$\tau_{600}$ .....	desetiminutová časová konstanta [-]
$C$ .....	kapacita [F]
$U_{fn}$ .....	jmenovité fázové napětí [V]
$C_{lv}$ .....	kapacita při nízkém měřicím napětí [F]
$C_{hv}$ .....	kapacita při vysokém měřicím napětí [F]
$U_f$ .....	fázové napětí [V]
$U_s$ .....	sdržené napětí [V]
$f_1$ .....	frekvence sítě [Hz]
$f_{x1}$ .....	frekvence postranního pásma [Hz]
$f_{x2}$ .....	frekvence postranního pásma [Hz]
$s$ .....	skluz [-]
$n_s$ .....	synchronní otáčky stroje [ot.]
$n$ .....	skutečné otáčky stroje [ot.]
$f_{ot}$ .....	otáčková frekvence stroje [Hz]

## Seznam obrázků

OBR. 1.1 ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU STATOROVÉHO VINUTÍ [1] .....	15
OBR. 1.2 ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU ROTOROVÉHO VINUTÍ [1].....	15
OBR. 1.3 ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO Činitele [1] .....	17
OBR. 1.4 SCHÉMA ZAPOJENÍ FREKVENČNÍ ANALÝZY PROUDU [1] .....	20
OBR. 1.5 MĚŘENÍ OFF-LINE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ GALVANICKOU METODOU [1] .....	22
OBR. 1.6 MĚŘENÍ ON-LINE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ GALVANICKOU METODOU [1].....	22
OBR. 2.1 SCHÉMA SYSTÉMU ON-LINE DIAGNOSTIKY [1].....	29
OBR. 2.2 STRUKTURA EXPERTNÍHO SYSTÉMU [4].....	30
OBR. 2.3 DIAGNOSTICKÝ EXPERTNÍ SYSTÉM [4] .....	32
OBR. 2.4 PLÁNOVACÍ EXPERTNÍ SYSTÉM [4] .....	32
OBR. 3.1 SCHÉMA MONITOROVACÍHO SYSTÉMU ALSTOM AMODIS PAMOS [7] .....	35
OBR. 3.2 SCHÉMA MONITOROVACÍHO SYSTÉMU ALSTOM AMODIS ROMON [8] .....	35
OBR. 3.3 SCHÉMA MONITOROVACÍHO SYSTÉMU AURA MPS [9].....	36

## Úvod

Tato práce se zabývá problematikou diagnostiky izolačního systému točivých strojů o velkých výkonech. Pomocí diagnostiky se posuzuje aktuální ale i možný budoucí stav, ze kterého se určí provozuschopnost stroje a dá se tak včas předejít jeho možnému zničení.

V první části textu jsou rozepsány jednotlivé veličiny, podle kterých se dá posoudit stav izolace stroje, přičemž některé z těchto metod vyžadují odstavení stroje z provozu a jeho odpojení. Některé z veličin se dají měřit na stroji v provozu, jsou tak vhodné pro průběžné monitorování a na základě jejich aktuálních hodnot nebo vývoje se dá stanovit stav stroje bez nutnosti ovlivnění provozu.

V druhé části textu je popsán systém pro monitorování online. Jaký je účel využití těchto systémů. Popsány jsou jednotlivé části tohoto systému a naznačený způsob dělení podle specifických vlastností.

Ve třetí části je sepsán stručný přehled monitorovacích systémů od jednotlivých výrobců spolu s popisem částí, které každý monitorovací systém obsahuje.

# 1 Veličiny pro diagnostiku točivých strojů

Pro velké točivé stroje je prioritní bezporuchový chod. Při provozu stroje je přítomno elektrické, chemické, mechanické nebo dokonce i kombinace těchto namáhání, které má za následek stárnutí jednotlivých částí stroje. Diagnostika má za úkol odhalit následky těchto namáhání pomocí měření nebo sledování jednotlivých diagnostických veličin a včas tak poukázat na vznikající poruchy, které mohou vést ke zničení stroje. [1]

Diagnostická metoda vhodná k posouzení vlastností se určuje podle těchto kritérií: [2]

- Metoda měření se musí týkat sledované vlastnosti
- Informace získaná měřením musí být průkazná
- Namáhání během měření by mělo odpovídat provoznímu namáhání
- Nedestruktivní zkoušky jsou upřednostňovány před destruktivními
- Provedením zkoušky samotné by nemělo být způsobena zřejmá degradace

## 1.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola je využívána jako nejjednodušší způsob zhodnocení stavu izolace vinutí statoru a celého izolačního systému. Kontrola probíhá obzvláště v místech, kde se předpokládá projev mechanického, tepelného a chemického namáhání. Tato namáhání se na izolaci projevují různými následky a lze tedy rozlišit, o jaký druh namáhání se jedná. V místech, kde není přímá viditelnost, se používá technický endoskop. [1]

Vlivem tepelného namáhání dochází ke změně objemu izolace stroje, což má za následek viditelné uvolnění klínů v drážkách. Působením výbojové činnosti dochází k místnímu ohřevu a tedy tepelnému namáhání, jehož působení je poté zřejmé poškození izolace v místech působení. Během výbojové činnosti také dochází ke vzniku ozónu, který má negativní vliv na izolaci. Mechanické vlivy jako chvění mají za následek například uvolňování klínů, aj. [1]

Nevýhodami provádění vizuální kontroly jsou dlouhá odstavení stroje z provozu, kdy je potřeba stroj odstavit mimo provoz a rozebrat jej. K inspekci je třeba experta, který dokáže přesně odhalit případné viditelné vady stroje. Po provedení inspekce je možnost nesprávného sestavení stroje a možnost vzniku poruchy. Požadavek na vizuální inspekci je tedy většinou v případech neuspokojivých informací z diagnostických zkoušek nebo monitorování stroje. [3]

## 1.2 Izolační odpor

Izolační odpor je jednou ze základních vlastností, pomocí které se stanoví vlastnosti vinutí strojů. Izolační systém si lze vyjádřit jako dielektrikum kondenzátoru, kde je jednou elektrodou vinutí stroje, které měříme, a druhá elektroda je jádro stroje se všemi uzemněnými částmi. [2]

### 1.2.1 Způsob měření

Pro měření se používají zdroje stejnosměrného napětí. Izolační odpor se určuje v časech od přiložení měřicího napětí, jimiž jsou 15, 60, 120 až 600 s. [1]

Měřenou veličinou je proud tekoucí obvodem, ze kterého se následně izolační odpor určí pomocí Ohmova zákona: [3]

$$R_{izt} = \frac{U}{I_t} [\Omega] \quad (1.1)$$

$U$  – stejnosměrné měřicí napětí [V]

$I_t$  – proud změřený v čase  $t$  [A]

Proud tekoucí obvodem při přiloženém napětí se skládá z několika složek, jimiž jsou

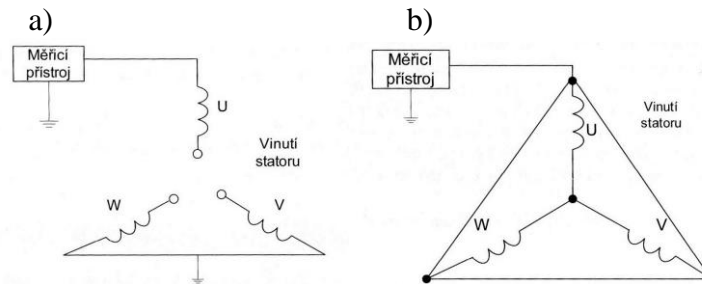
- Kapacitní proud  $i_c$  – v momentě přiložení stejnosměrného napětí teče nejprve vysoký nabíjecí proud, který postupně exponenciálně klesá. Tento proud téměř nemá diagnostický význam a izolační odpor je měřen až poté, co tento proud odezní až téměř do nulové hodnoty.
- Vodivý proud  $i_v$  – vzniká díky elektronům a iontům tekoucím přes izolaci mezi vinutím a jádrem. Vyskytuje se v případě navlhlé, znečištěné nebo poškozené izolace.
- Svodový proud  $i_s$  – konstantní stejnosměrný proud, způsobený vodivým znečištěním na povrchu vinutí.
- Absorpční proud  $i_a$  – vyvolaný polarizací dielektrika, který zaniká v řádu minut.

$$I_t = i_c + i_v + i_s + i_a [A] \quad (1.2)$$

Měřený proud je součtem těchto částí. Jednotlivě je však měřit nelze. [3]

### 1.2.1.1 Měření na statorovém vinutí

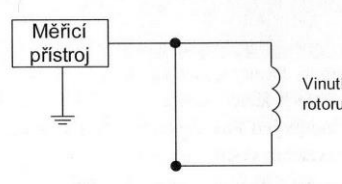
Před samotným měřením je potřeba vybit elektrický náboj ve vinutích pomocí jejich zkratování. Při samotném měření se konce vinutí nechají rozpojené a neměřené fáze se uzemní. Kladný pól zdroje se připojí ke kostře stroje, která je uzemněná a záporný pól se připojí k měřenému vinutí. [1]



Obr. 1.1 Zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí [1]  
a) rozpojený uzel b) spojený uzel

### 1.2.1.2 Měření na rotorovém vinutí

Pro měření je možnost stroj ponechat smontovaný, nebo rotor vyjmout. Smontovaný stroj musí být zajištěn proti spuštění. Před měřením je třeba odpojení zemní ochrany a budicího vinutí. Měření se provádí na magnetových kolech, přívodních pásech a sběracích kruzích. [1]



Obr. 1.2 Zapojení pro měření izolačního odporu rotorového vinutí [1]

## 1.3 Polarizační index

Zkouška polarizačního indexu je založena na skutečnosti, že ve vyhovující izolaci s časem izolační odpor roste. Z naměřených a vypočtených hodnot izolačního odporu se stanoví hodnota polarizačního indexu. Jedná se o poměr izolačních odporů změřených v daných intervalech. Určuje se tak polarizační index minutový nebo desetiminutový podle následujících vztahů: [1]

$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} [-] \quad (1.3)$$

$$p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} [-] \quad (1.4)$$

$R_{iz15}$  – izolační odpor 15 s od připojení měřicího napětí [ $M\Omega$ ]

$R_{iz60}$  – izolační odpor 60 s od připojení měřicího napětí [ $M\Omega$ ]

$R_{iz600}$  – izolační odpor 600 s od připojení měřicího napětí [ $M\Omega$ ]

Pro rotor se uvažuje pouze hodnota minutového polarizačního indexu. V případě polarizačního indexu přesahující hodnotu 2 se absorpční proud ustaluje dlouhou dobu a poukazuje to na dobrý stav izolace. V případě hodnoty blížíící se 1 je izolace ve špatném stavu, způsobeném navlhnutím nebo znečištěním. [1]

## 1.4 Závislost izolačního odporu na stejnosměrném napětí

Měřením změny izolačního odporů v závislosti na čase při konstantním stejnosměrném měřicím napětí roste odpor až k ustálené mezi dané vodivostním proudem. Při určování závislosti na napětí je izolační odpor do určitých hodnot konstantní a poté začne postupně klesat až k téměř nulové hodnotě, než dojde k průrazu izolace. Hodnota, ve které začne odpor klesat a také strmost tohoto poklesu je závislá na stavu izolace. V případě špatného stavu izolace odchází k poklesu už v nižších hodnotách a pokles je také strmější. Na základě pokusů se pokoušelo odhadnout průrazného napětí, díky nečekaným průrazům v některých případech však předpoklady nemají obecnou platnost. [2]

### 1.4.1 Způsob měření

Na vstup měřené fáze se přiloží měřicí napětí, přičemž zbylé fáze jsou uzemněny a konce vinutí jsou rozpojeny. Měřicí napětí se zvyšuje po stupních a měří se nabíjecí proud do momentu, kdy se ustálí. Po tomto momentu teče pouze izolační proud. Nevýhodou měření je dlouhý interval ustalování nabíjecího proudu po každé změně měřicího napětí. Tento interval dosahuje desítek minut. Výsledný odpor je odpočten pomocí Ohmova zákona. Měření se provádí až do hodnoty napětí, kdy je prokazatelný pokles izolačního odporu. Při měření se však nesmí přesáhnout hodnoty zkušebního napětí izolace. [1,2]



## 1.5 Ztrátový činitel $\tan \delta$ , kapacita a časová konstanta

Ztrátový činitel je tangens úhlu mezi fází úhlu proudu ideálního dielektrika bez ztrát a reálného zkoušeného izolantu. Fázový posun reálného izolantu je způsoben přítomností činné složky. Mezi hlavní příčiny se řadí izolační odpor, který by ideálně byl nekonečný, ale dosahuje reálné hodnoty, polarizační proud dielektrika a výrazná činná složka částečných výbojů. S menším úhlem  $\delta$  se bude izolant více blížit ideálnímu dielektriku, proto se pomocí ztrátového činitele posuzuje jakost izolace. [2]

Při měření kapacity se porovnávají kapacity změřené při frekvencích 2 Hz a 50 Hz nebo při teplotě vinutí 20°C a 80°C. Dvouteplotní měření se provádí na stroji, který byl právě odstaven z provozu a stále má provozní teplotu. [1]

### 1.5.1 Způsob měření

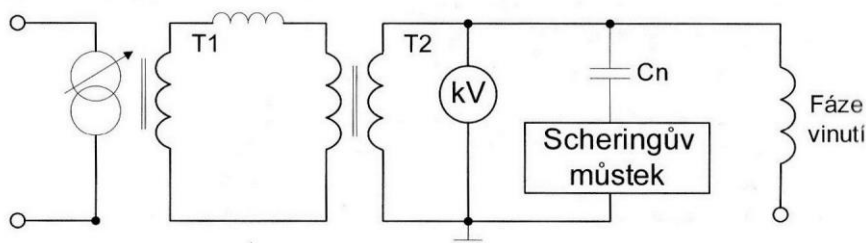
Na vstup měřené fáze se přiloží měřící napětí, vstupy ostatních fází se uzemní. Konce vinutí zůstanou rozpojeny. Ztrátový činitel je měřen v závislosti na napětí, kdy se měří od 0,2  $U_n$  po krocích až do hodnoty jmenovitého napětí. Časová konstanta se počítá pro odstranění vlivu specifických vlastností stroje, jako druh stroje, napětí a výkon. Počítá se desetiminutová časová konstanta podle: [1]

$$\tau_{600} = R_{iz600} \cdot C_{0,2Ufn} [-] \quad (1.5)$$

$R_{iz600}$  – izolační odpor změřený po 600 s [M $\Omega$ ]

$C$  – změřená kapacita při 0,2 $U_{fn}$  [ $\mu$ F]

$U_{fn}$  – jmenovité fázové napětí [V]



Obr. 1.3 Zapojení pro měření ztrátového činitele [1]

## 1.6 Tip-up kapacita

V izolačním systému dochází vlivem degradačního ke vzniku vzduchových mezer, ve kterých při dosažení dostatečného napětí dochází k výbojové činnosti. V důsledku tohoto působení se ionizuje plyn a díky vysoké vodivosti se jeví jako zkrat. Tímto zkratem se zmenší izolační vzdálenosti mezi vinutím a jádrem, což má za následek nárůst kapacity. Ke znatelnému nárůstu dochází v případě velkého množství takových mezer u celého vinutí. [3]

### 1.6.1 Způsob měření

Měření se provádí při nízkém a vysokém napětí. Během měření nízkým napětím je kapacita tvořena pevnou izolací i vzduchovou mezerou. V případě vysokého napětí je díky vodivé vzduchové mezeře kapacita tvořena pouze pevnou izolací. Ovlivňujícím faktorem je vrstva karbidu křemíku, který má napěťově závislý odpor. Při nízkém napětí izoluje a s vysokým napětím se chová jako uzemněný plech a mění hodnotu kapacity. Pro potlačení této skutečnosti se sleduje změna kapacity během času.

Měřené vinutí je připojeno ke střídavému zdroji napětí a kapacita je snímána pomocí Scheringova můstku a transformátorového poměrového můstku. Zbývá vinutí se uzemní. Nejprve se změří kapacita  $C_{lv}$  při nízkém napětí při  $0.2 U_f$  a poté při vysokém napětí  $0.6 U_s$  kapacita  $C_{hv}$ . Rozdíl kapacit se dopočte:

$$\Delta C = \frac{C_{hv} - C_{lv}}{C_{lv}} \quad (1.6)$$

Hodnota rozdílu  $\Delta C$  se obvykle vyjadřuje v procentech. U moderních izolací by měla být hodnota nižší než 1% a u starších izolací nižší než 4%. [3]

## 1.7 Zvýšené napětí

Pomocí zkoušek zvýšeným napětím se ověřuje průrazné napětí izolace statoru. Stroje se navrhují tak, aby průrazné napětí izolace bylo oproti provoznímu napětí mnohonásobně vyšší. Degradací izolačního systému se průrazné napětí postupně snižuje. Pokud dojde k jeho poklesu pod hodnotu provozního napětí, dojde k průrazu izolace a jejímu zničení. Aktuální velikost průrazného napětí se nedá přímo změřit, aniž by došlo k nenávratnému poškození izolace. Měří se pouze zvýšeným napětím, to nám určí, jestli by v blízké době mohlo k průrazu dojít. [2]

Pro měření se používá buď střídavé napětí o síťové frekvenci 50 Hz, stejnosměrné napětí, nebo někdy i střídavé napětí o frekvenci 0.1 Hz. Hlavním rozdílem mezi těmito měřeními je způsob rozložení napětí v dielektriku. Střídavé napětí se rozloží na vinutí v poměru kapacit a odpovídá tak provozním podmínkám. Stejnosměrné napětí se rozloží v poměru odporů. K měření pomocí střídavého napětí je potřeba zdroje s velkým výkonem, zatímco pro měření stejnosměrným napětím je potřeba zdroj s malým výkonem v řádu stovek VA. Měření pomocí stejnosměrného napětí se používá v případech, kdy není možné provést zkoušku střídavým napětím. [2]

### 1.7.1 Způsob měření

Při měření se neměřená vinutí vodivě spojí s kostrou stroje a se zemí spolu s ostatními částmi stroje. Jeden pól měřícího napětí se připojí na měřenou fázi a druhý je připojen ke kostře stroje. Připojené měřící napětí je o velikosti poloviny zkušební napětí. To se postupně zvyšuje až na hodnotu, která je určena podle provozní hodnoty stroje. Po uplynutí zkušební doby se napětí sníží na třetinovou hodnotu a odpojí. Náboj vzniklý během zkoušky se vybijí spojením s uzemněnou kostrou. [1]

Izolace vyhovuje, jestli během zkoušky nedojde k průrazu. Díky předpokládané degradaci izolace se při další zkoušce uvažuje nižší zkušební napětí. Toto napětí však nesmí být menší, než je provozní napětí stroje. Jelikož se jedná o zkoušku s možnou destrukcí izolace, používá se pouze u strojů, kde by průraz během normálního provozu měl mnohem větší dopad než průraz způsobený během zkoušky. [2]

## 1.8 Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole

Toto měření je používané pro asynchronní stroje a stroje s asynchronním rozběhem. Vlivem konstrukčních nebo provozních příčin mohou u asynchronních strojů nastat nesymetrie v elektrickém a magnetickém obvodu. Následkem toho jsou rušivá magnetická pole ve vzduchové mezeře stroje, které mají od magnetického pole stroje odlišnou synchronní rychlostí otáčení. Tento nerovnovážený systém se skládá ze sousledného, zpětného a nulového. [1]

Vlivem nesouměrnosti působí proti směru točení stroje zpětná soustava. Ve statorovém proudu a rozptylovém magnetickém poli se objeví postranní frekvenční pásma, což jsou přídatné frekvenční složky v okolí první harmonické a otáčkových frekvencí. Charakter těchto pásem závisí na příčině poruchy, jejich velikost je přímo úměrná nesymetrii. [1]

### 1.8.1 Způsob měření

Měření se provádí za normálního provozu stroje bez změny provozních hodnot. U strojů vysokého napětí se měří průběh napájecího pomocí měřicího transformátoru proudu, který je připojen na měřenou fázi. Pomocí naměřených hodnot a štítkových údajů se dopočtou frekvence postranních pásem: [1]

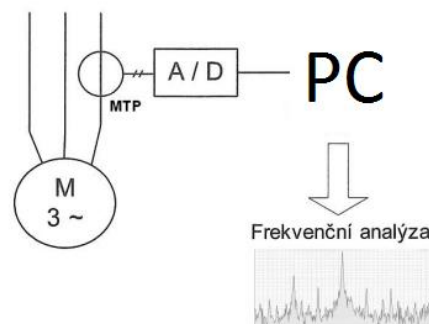
$$f_{X1} = f_1 - 2 \cdot f_1 \cdot s \quad (1.7)$$

$$f_{X2} = f_1 - 2 \cdot f_1 \cdot s \quad (1.8)$$

V rovnici představuje  $f_1$  frekvenci sítě,  $s$  je skluz během měření. [1]

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s} \quad (1.9)$$

Otáčky během měření jsou  $n$ , synchronní otáčky  $n_s$ . Z hodnoty skutečných otáček se dopočte otáčková frekvence fot. Odečtem rozdílů amplitud síťové frekvence a postranních pásem a zároveň síťové frekvence a otáčkové frekvence  $f_{ot}$  z frekvenčního spektra se vyhodnotí měření. [1]



Obr. 1.4 Schéma zapojení frekvenční analýzy proudu [1]

### 1.9 Analýza rozběhového proudu

Rozběhovým proudem rozumíme změnou proudu, ke které dochází po připojení stroje k napájecímu napětí. Metoda se využívá u asynchronních strojů a menších synchronních strojů, které mají asynchronní rozběh. Měření se dá zjistit nesymetrie rotorového obvodu, díky které dochází ke vzniku přídatných magnetických polí ve vzduchové mezeře. Projevem těchto polí je zákmit proudu přibližně v polovině rychlosti otáček stroje. U velkých

synchronních strojů s asynchronním rozběhem jsou zákmity vždy přítomné. Posuzování stavu je provedeno porovnáním s referenčním měřením, provedeném na stroji, které je prokazatelně bez vady. [1]

### 1.9.1 Způsob měření

Měření se provádí pomocí měřicího transformátoru proudu připojeného k fázi rozbíhajícího se stroje. U strojů s rozběhem kratší než 2 s se spuštění stroje prodlouží snížením napájecího napětí. Odfiltrováním první harmonické složky změřeného proudu pomocí dolnoproustného filtru získáme informaci o přítomnosti zákmitů v rozběhovém proudu. [1]

## 1.10 Částečné výboje

Během výroby izolačních systémů může dojít ke vzniku míst s nehomogenními vlastnostmi v izolačním materiálu. V celé tloušťce izolačního systému tak vznikají náhodně umístěné mikroskopické dutinky. Další příčinou vzniku těchto dutinek je působení velkého tepleného namáhání. Působením elektrického pole vznikají v těchto dutinkách výboje. Ty tvoří proudový impuls šířící se vinutím statoru s dobou trvání několik nanosekund. Tyto impulsy lze monitorovat během normálního provozu stroje buď periodicky, nebo průběžně. K monitorování impulsů jsou používány tyto součásti: [3]

- Senzory a snímače – zpravidla vysokonapěťové kondenzátory nebo vysokofrekvenční proudové transformátory spojené se zemí. Pomocí těchto senzorů se odliší vysokofrekvenční signály částečných výbojů od napětí síťového kmitočtu a jeho harmonických.
- Elektronika převádějící impulsy z analogové do digitální podoby, nejčastěji analyzátoři velikosti pulsu. Analyzátoři fáze pulsu se používají pro sledování místa výskytu částečného výboje se zohledněním střídavého cyklu síťové frekvence.
- Technikou zpracování signálu se informace upraví na ovladatelnou úroveň a odliší se signál od rušení. Zpracování signálu určí typ procesu poruchy izolace.

### 1.10.1 Měření částečných výbojů galvanickou metodou off-line

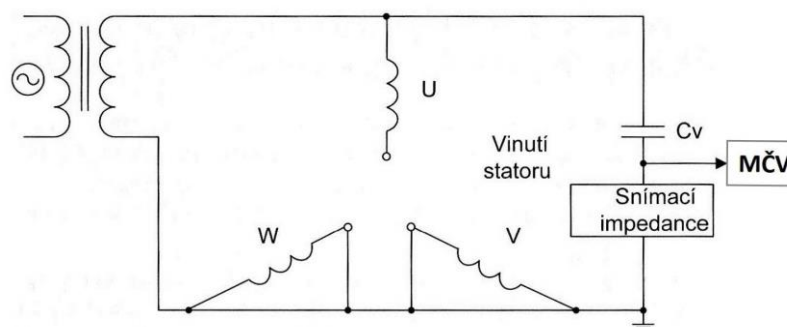
Měření se provádí na stroji odstaveném mimo provoz. Na měřené fázi je postupně zvyšováno napětí do hodnoty jmenovitého napětí. Jestliže výbojová činnost přesáhne limitní mez, stanoví se zapalovací napětí výbojů. Jmenovité napětí se nechá působit 30 minut

z důvodu ustálení amplitud a četností výbojů. Po uplynutí doby se napětí snižuje po krocích a měří se zdánlivý náboj spolu s dalšími parametry. [1]

Na schématu zapojení pro měření je MČV měřič částečných výbojů a  $C_v$  vazebním kondenzátorem. Měřené vinutí je na konci rozpojené a začátek je spojen s měřícím obvodem. Nejvíce měřenou veličinou je maximální velikost amplitudy částečného výboje. V závislosti na druhu měřícího zařízení může být vyjádřena v pikokulombech milivoltech, miliampérech nebo decibelech. [1]

Přesnost měření je závislá především na velikosti vnitřní nehomogenity, kapacitě vinutí a indukčnosti mezi místem výbojové činnosti a měřícím zařízením. U vinutí s velkou kapacitou se většina impulsů zkratuje a na svorky dojde jen malé množství. S delší vzdáleností měřícího místa od místa měření se snižuje amplituda měřeného impulsu. [1]

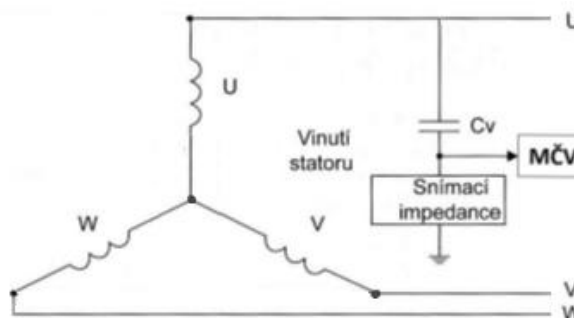
Off-line diagnostika částečných výbojů se využívá k porovnání jednotlivých vinutí, může ale i sloužit k porovnání strojů. [1]



Obr. 1.5 Měření off-line částečných výbojů galvanickou metodou [1]

### 1.10.2 Měření částečných výbojů galvanickou metodou on-line

Galvanická metoda je rozšířený způsob sledování výbojových činností strojů během jejich provozu. Stejně jako u off-line se sleduje zdánlivý náboj, počet výbojů a jejich střední proud a hlavně vývoj výbojové činnosti během provozu stroje. [1]



Obr. 1.6 Měření on-line částečných výbojů galvanickou metodou [1]

### 1.10.3 Senzory pro online měření

Jedním z prvních senzorů pro online monitorování byl vysokofrekvenční proudový transformátor, který se umístil okolo kabelu spojujícího střed vinutí stroje se zemí. Působením částečných výbojů v izolaci dochází k vytvoření proudových impulsů, které jsou tímto transformátorem měřeny. Pro dosažení lepšího měření výbojové činnosti se vysokofrekvenční transformátory připojují na každou fázi stroje. [1]

Nejrozšířenějšími senzory jsou vysokonapěťové kondenzátory, které se připojí na svorky všech fází stroje. Jejich účelem je snímání pouze vysokofrekvenčních pulsů vzniklé činností částečných výbojů a zabránění průchodu složky napětí o síťovém kmitočtu 50 Hz. Používané kondenzátory mají kapacitu 80 pF. Jejich důležitou vlastností je odolnost proti průrazu, jelikož jsou připojeny na vysoké napětí. Pokud by došlo k jejich průrazu, mělo by to za následek vznik zemního spojení. [1]

K měření jsou také používány antény a snímače umístěné přímo uvnitř stroje. Mezi nejpoužívanější patří kapacitní drážkové sondy. [1]

### 1.10.4 Elektrická rušení při online měření

Při online měření je potřeba uvažovat elektrická rušení, která při offline měření nejsou tolik výrazná. Pro získání vhodné informace je potřeba tato rušení oddělit. Mohou být způsobeny korónou přenosového vedení, jiskřením na elektrických kontaktech nebo sběracích kroužcích a přechodovými ději pohonů s pulsními měniči. Pro odlišení se používá měřících metod nebo názorů expertů vyplývajících ze zkušeností. [1]

### 1.10.5 Online monitoring generátorů a VN motorů

K odlišení informace o činnosti částečných výbojů a elektrického rušení se na každé fázi umístí dva senzory. Těmito senzory jsou měřeny časy příchodů signálu na senzor. Porovnáním těchto časů se odliší elektrické rušení od výbojové činnosti. Vnější rušení se odliší blízkými časy příchodu. Toto rušení může být způsobeno možnou poruchou elektrických kontaktů. Vnitřní rušení odlišit nelze. Příchozí signály s různými časy se vyhodnotí a stanoví se místo výskytu částečných výbojů. [1]

## 1.11 Ozón v chladicím vzduchu

Plyn  $O_3$ , zvaný ozón, je výsledkem působení částečných výbojů ve vzduchu nebo teplotního namáhání izolace stroje, během kterého je vzduch ionizován. Monitorování ozónu je jednoduché a k jeho provedení není potřeba motor odstavit či měnit jeho provozní parametry. K jeho stanovení se používá UV fotometrie nebo kolorimetrie. [1]

### 1.11.1 UV fotometrie

U této metody se vyzařuje UV záření v pásmu 254 nm. Ozón má schopnost UV záření absorbovat. K určení koncentrace v měřeném plynu se provádí porovnání s měřením na referenčním vzorku plynu, který žádný ozón neobsahuje. Vyhodnocení množství ozónu určí v ppm podle následujícího vztahu: [1]

$$\frac{I}{I_0} = e^{-K.L.C} \quad (1.10)$$

I – koncentrace měřeného vzorku

$I_0$  – koncentrace v referenčním plynu

$K = 308 \text{ cm}^{-1}$  (při  $0^\circ\text{C}$ , tlaku 1 atm na vlnové délce 254 nm)

L – délka měřicí kyvety v cm

C – koncentrace v ppm

### 1.11.2 Kolorimetrie

Jedná se o velmi jednoduchou metodu, kterou lze využít i za provozu stroje. Je založena na využití roztoku, který ozón absorbuje a následně s ním reaguje. Dochází k odbarvení modrého roztoku indiga, z něhož se za pomoci kalibrační křivky stanoví množství ozónu ve vzorku. Koncentrace se udává v ppm, její hodnota je poměr množství ozónu v objemu vzorku k objemu vzorku bez ozónu. Nesleduje se jen hodnota, ale i průběh vývoje množství ozónu, jelikož je jeho tvorba ovlivněna různými hledisky, jako jsou vlhkost vzduchu nebo napětí, při kterém je stroj provozován. [1]

## 1.12 Teplota

Dlouhodobým provozem stroje na vyšších teplotách způsobuje degradaci izolace a její následné selhání. Průběh degradace izolace je závislý na teplotě, při které je stroj provozován



a na délce trvání této teploty. S vyšší teplotou a jejím delším trváním dochází k většímu poškození izolace. U velkých točivých strojů se ke sledování teploty používají teplotní čidla, umístěná ve statorovém vinutí. Ve většině případů se tyto senzory používají při vstupním testu stroje, během provozu jsou připojena k poplachu. V případě nadměrně vysokých teplot upozorní provozní personál na tuto skutečnost. Monitorováním teploty vinutí průběžně lze určité procesy poruchy diagnostikovat. [3]

### 1.12.1 Bodové senzory na vinutí statoru

Větší motory a generátory v současnosti používají několik teplotních senzorů s průběžným monitorováním, jejichž účelem je měřit teplotu v určitých místech. Tyto senzory jsou připevněná ve vinutí statoru, kde jsou citlivé na teplotu mědi vinutí. Teplota senzoru v tomto místě je ovlivněna způsobem chlazení. Dále se umisťují v chladicí vodě nebo parovodech. Senzory se umisťují i na jádro a kostru statoru. [3]

Nejběžněji se používají odporové teplotní detektory, které jsou založeny na úměrnosti odporu teplotě. Obsahují kovový proužek, kterým prochází proud a měří se napětí. Z dopočteného odporu se díky závislosti odporu na teplotě určí teplota. [3]

### 1.12.2 Senzory na vinutí rotoru

Senzorem teploty vinutí rotoru je obvykle vinutí samo. U vinutí rotorů synchronních strojů lze přesně měřit napětí a proud na kluzných kontaktech. Lze tak dopočítat odpor vinutí, který se liší dle teploty. Po úvodní kalibraci lze z měřených hodnot zjistit teplotu vinutí. Tímto způsobem se zjišťuje možné přetížení rotoru, nikoliv však jednotlivá místa s vyšší teplotou. U motorů, kde není rotor buzen, je zjišťování teploty složitější, jelikož není možný odečet hodnot pro zjištění teploty. [3]

## 1.13 Vibrace čel vinutí

Příčinou možné poruchy strojů může být výskyt vibrace čel vinutí statoru. Proto se sledování těchto vibrací uvažuje k posouzení stavu stroje. Vibrace čel vinutí je obvykle sledována akcelerometry z optických vláken. Tyto akcelerometry neobsahují kovové části a nepředstavují tak žádnou potenciální změnu na čelech vinutí. Senzory akcelerometrů sledují velikost výchylky vibrace a na jejich výstupu je elektrický signál, který je této velikosti přímo úměrný. Z důvodu možnosti sledování vibrací pouze v jednom směru, jsou na každém místě umístěny dva snímače pro snímání v radiálním a tangenciálním směru. Obvykle jsou na

každém konci umístěny tři páry senzorů, přičemž místo umístění je vybráno ze zkušenosti provozovatelů. Tento způsob měření se používá pouze v případech možných poruch způsobených vibracemi na čelech vinutí, jelikož se jedná o velmi nákladné monitorovací zařízení. [1]

## 1.14 Vibrace ložisek

K zajištění otáčení rotoru jsou využívána ložiska. U těch během provozu může dojít k opotřebením. Převalováním ložiska přes tato místa má za následek přítomnost rázových impulsů, jejichž intenzita je závislá na míře poškození. Stroje velkých výkonů používají kluzná ložiska, u kterých dochází k vibracím důsledkem opotřebením vůle v uložení. [1]

U nejdůležitějších točivých strojů je důležité periodické monitorování vibrací ložisek. Průběžné monitorování se používá pro nejdůležitější stroje a běžně pro velké generátory. Ačkoliv je hlavním cílem monitorování ložisek, získaná data mohou poukázat také na potíže s vinutím rotoru nebo jádra statoru. U indukčních motorů v případě porušených rotorových tyčí budou na rotor působit magnetické síly nevyvážené, jelikož v některých drážkách nepoteče celý proud. U synchronních strojů při výskytu závitového zkratu se sníží odpor a proud teče kratší cestou. V postiženém místě dojde ke sníženým tepelným ztrátám, zatímco v ostatních místech teplota naroste. Díky teplotní roztažnosti dojde k malému ohnutí rotoru, což má za následek vibrace v ložiskách při otáčení. [3]

### 1.14.1 Způsob měření

Měření vibrací je možné dotykově nebo bezdotykově. Kmity určujeme absolutní, které vztahujeme ke gravitačnímu poli Země, a relativní, které se vztahují ke zvolenému bodu. Pro měření rychlosti se používají akcelerometry. Tyto akcelerometry mohou být založené na hmotě a vysoko naladěné pružině. Tato soustava má rezonanční kmitočet vyšší než je kmitočet měřených vibrací. Pro senzory je prioritní velký rozsah od jednotek mHz do desítek kHz. Data se analyzují časové a frekvenční oblasti, přičemž z frekvenční oblasti lze získat data s větší informační hodnotou. Použitím laditelného filtru lze vzorkovat jednotlivé frekvence nebo pomocí Rychlé Fourierovy transformace vzorkovat všechny kmity současně. [1]

## 1.15 Hluk

Při provozu stroje je jeho doprovodnou vlastností hluk, který se podle původu primárně skládá z hluku elektromagnetického, mechanického a ventilačního. [1]

Elektromagnetický hluk je způsoben kmitáním kostry nebo jiných částí stroje, tyto jevy jsou přítomny v důsledku elektromagnetických sil. K určení podílu této složky se sleduje změna akustického tlaku po odstavení stroje z provozu. O elektromagnetickou složku se jedná v případě rychlého poklesu tlaku. Měření se provádí také sledováním frekvenčního spektra při různých provozních veličinách. [5]

Mechanický hluk může být způsoben ložisky nebo nevyvážením otáčejících se částí stroje, u stejnosměrných strojů mohou být zdrojem kartáče. [5]

Ventilační hluk je posuzuje hlavně u strojů s vysokými otáčkami. Jeho hlavním zdrojem je ventilátor stroje, který převyšuje ostatní zdroje ventilačního hluku jako rotorová křídélka, chladicí kanály nebo vstupní a výstupní kryty. [5]

### 1.15.1 Způsob měření

Měření se provádí za normálního provozu stroje. Poblíž stroje se určí měřící body, kde se umístí mikrofony. Ty zaznamenají hladinu a průběh akustického tlaku. Naměřené hodnoty se porovnávají s předchozími měřeními. [1]

## 2 Systém online monitoringu izolačního systému

Většina zkoušek, která se používá k posouzení stavu stroje, vyžaduje odstavení stroje z provozu a některé z nich i rozebrání stroje k provedení měření. V tomto případě se jedná o off-line zkoušky. On-line monitorováním jsou myšleny zkoušky, které lze provádět během provozu stroje, v některých případech pouze s upravenými provozními parametry. Oproti tomu off-line diagnostika potřebuje motor odstavit z provozu, v některých případech i zásahy do stroje. [3]

Mezi výhody on-line monitorování patří:

- Možnost ponechat stroj v nepřetržitém provozu
- Nižší náklady na získání diagnostických dat, jelikož není potřeba odstavení stroje, přístavení zkušebních strojů a obsluhy, která s nimi manipuluje
- Lze předpovědět potřebu odstavení stroje
- Oproti off-line simulacím výjimečných stavů zde docházím k těmto stavům reálně

Jako nevýhody zde uvažujeme:

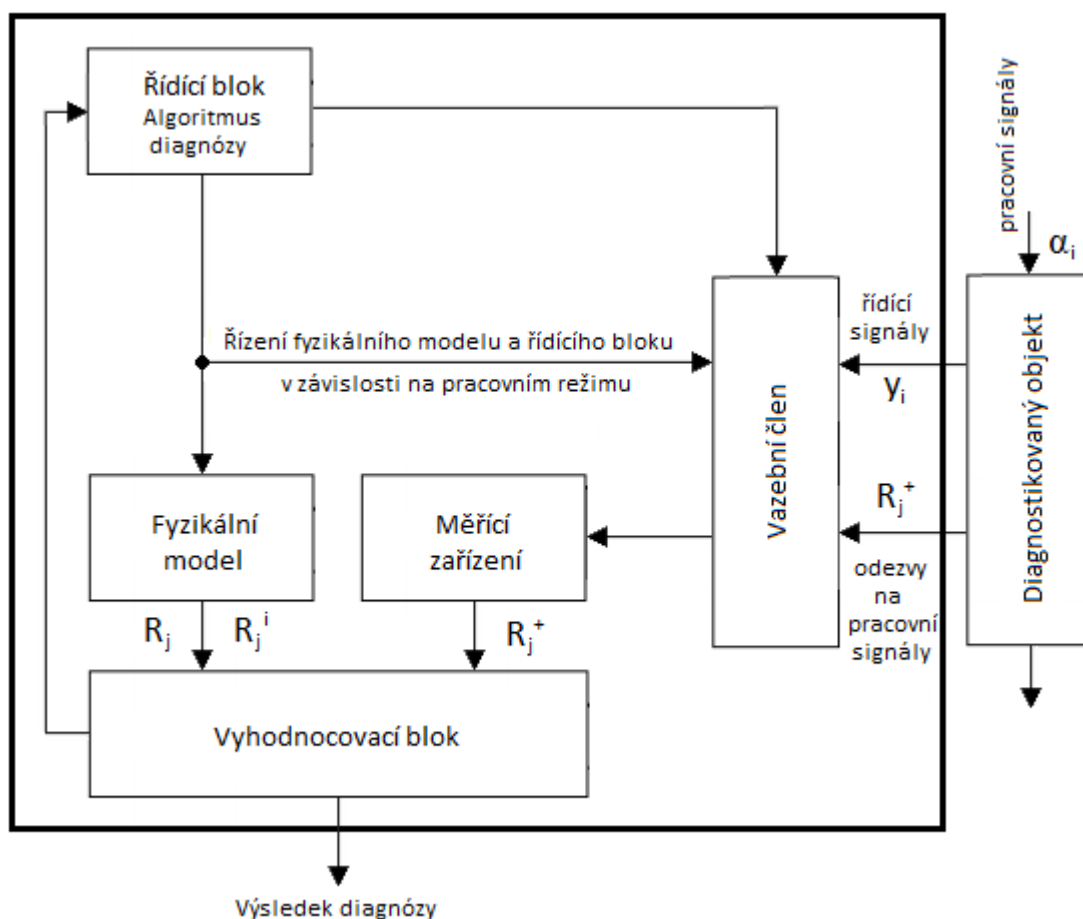
- Vyšší investiční náklady, pro každý stroj je potřeba samostatný monitorovací systém a čidla pro snímání hodnot. V případě off-line diagnostiky se zařízení dají použít na nespočet strojů. [3]

### 2.1 Účel monitorovacích systémů

Monitorovací systémy jsou zaváděny pro jejich schopnost získat informace o stavu stroje, aniž by bylo potřeba stav odstavit z provozu. Nelze jimi však plně nahradit off-line diagnostiku, jelikož monitorovat lze pouze vybrané veličiny. Všechny senzory a měřicí přístroje vytvářejí „data“ jako jsou teplota, hladina vibrací, velikosti částečných výbojů, aj. Obyčejným pozorovatelům tyto údaje neposkytují dostatečnou vypovídající informaci o stavu izolace stroje, na rozdíl od školených pracovníků. Pro mnoho z testů je potřeba znalost experta. Proto byly vytvořeny „expertní systémy“. Účelem expertních systémů je možnost nahrazení lidského experta a možnosti tak konzultovat výsledky diagnostiky nebo monitorování se systémem, který má časově neomezenou dostupnost. Díky tomu může pracovník určit stav stroje a vyhodnotit další postup. [3]

## 2.2 Provedení monitorovacích systémů

Při navrhování monitorovacího systému je důležité stanovit, které veličiny lze měřit během plného nepřerušovaného provozu. Tyto veličiny musí být dobře sledovatelné s možností dalšího zpracování. Centrem toku informací je hodnotící blok, který je řízen řídicím blokem nebo pomocí vstupů operátora. Do hodnotícího bloku vstupují parametry z fyzikálního modelu a zpracovaná data ze snímačů diagnostikovaného objektu. Testovací signály jsou ovládány řídicím blokem, během online monitorování jsou těmito signály samotné pracovní podmínky stroje. Největší pozornost je věnována podsystemům, kde je hrozba vzniku poruchy největší. Nejcitlivějšími podsystemy točivých strojů jsou izolační systémy spolu s ložisky a spojovacími místy. [1]

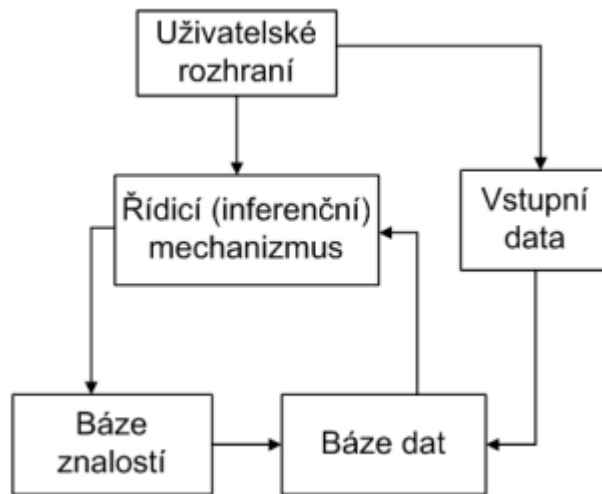


α

Obr. 2.1 Schéma systému on-line diagnostiky [1]

Pracovní signály  $\alpha_i$ , vstupují do diagnostikovaného objektu. Ten diagnostickému systému posílá řídicí signály  $y_j$  a odezvy na pracovní signál  $R_j^+$ . Ve vyhodnocovacím bloku dochází k porovnání výsledků  $R_j^+$  s možnými výsledky  $R_j$  a  $R_{ji}$  generovanými fyzikálním modelem. Porovnáním těchto výsledků je výsledná diagnóza. [1]

Pro online monitorovací systémy jsou nejčastěji využívány expertní systémy, které skládají z těchto základních částí uvedených na následujícím obrázku.



Obr. 2.2 Struktura expertního systému [4]

### 2.2.1 Báze znalostí

Báze znalostí obsahuje znalosti týkající se dané problematiky, které poskytl expert. Napomáhají dosažení správného řešení. Strukturou se podobá databázi. Jsou v ní obsaženy všeobecně platné poznatky, ale i soukromé znalosti experta, které vyplívají ze zkušenosti a praxe. Od báze znalostí se požaduje čitelnosti, aby bylo možné ji dále upravovat a rozšiřovat, případně podle ní zaučovat pracovníky v problematice. [4]

Získání dat do báze znalostí může být provedeno těmito způsoby:

- Informacemi z literatury týkající se dané problematiky
- Znalostmi experta
- Automaticky z příkladů a souborů dat

Pro přehlednost se báze znalostí dělí do menších funkčních částí v závislosti na stroji nebo druh izolačního materiálu. [4]

#### 2.2.1.1 Rozdělení báze znalostí

Podle obsahu báze znalosti se systémy dělí na prázdné a problémově orientované. Prázdné systémy plně zavádí řídicí mechanismus, uživatelské rozhraní, ale neobsahují bázi znalostí. Po jejím dodání se jedná o plnohodnotný expertní systém. Problémově orientované systémy již obsahují bázi znalostí dané problematiky. [4]

### 2.2.2 Řídicí mechanismus

Je to výkonná část expertního systému, která získává potřebná data, využívá dostupné znalosti a v jejich rámci dojde k vhodnému závěru. Většinou se jedná o techniku prohledávání prostoru, který je vyjádřen výčtem pravidel nebo stromem. Mechanismy pracují v jednotlivých navazujících krocích, jejichž posloupnost se nazývá řetězec. [4]

Při postupu vedoucím k cíli používá strategii dopředného řetězení nebo zpětného řetězení.

Dopředné řetězení je proces řízený od skutečností k závěrům, určené hlavně k řešení plánování, monitorování a řízení. Z přítomných skutečností jsou odvozovány skutečnosti budoucí. Zpětné řetězení hledá cestu od hypotéz ke skutečnostem. [4]

### 2.2.3 Báze dat

Jedná se o množinu údajů vztahující se k dané problematice. Tyto informace se dosazují do báze znalostí. Konkrétní data se získávají pomocí uživatelského rozhraní v dialogovém režimu přímo od uživatele, nebo se informace získají přímým měření na stroji pomocí příslušné měřicí techniky. [4]

### 2.2.4 Uživatelské rozhraní

Slouží ke komunikaci uživatele se systémem v podobě dialogu k zadání hodnot a vyhodnocení stavu případně postupu. Rozhraní může být ve formě webové stránky nebo počítačového programu. [4]

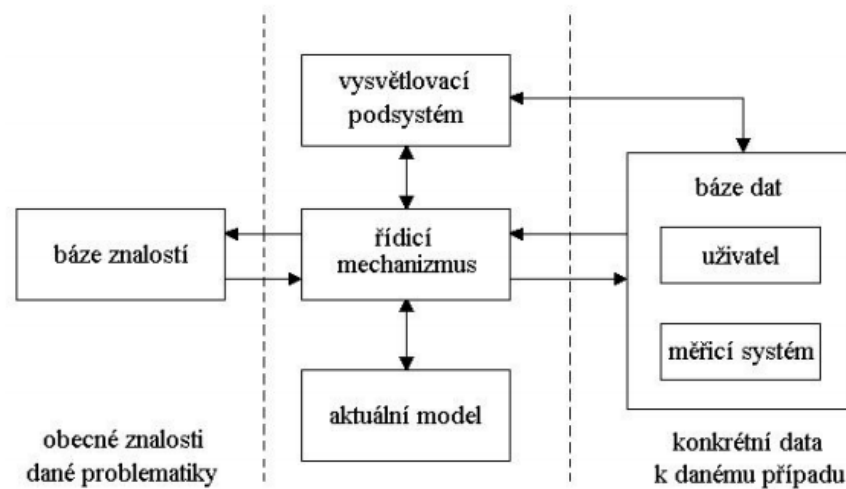
## 2.3 Rozdělení expertních systémů

### 2.3.1 Charakter řešené úlohy

Podle typu řešené úlohy se systémy dělí na diagnostické, plánovací a hybridní.

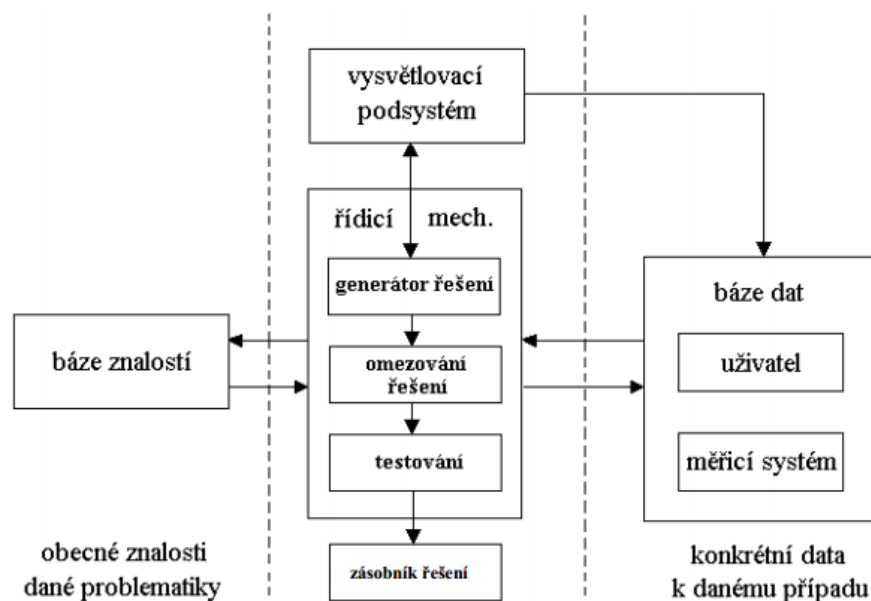
Diagnostické expertní systémy mají činnost soustředěnou na zjištění, která z cílových hypotéz odpovídá skutečnosti. Získáváním dat od uživatele se ověřují dílčí závěry a podle daného postupu se přehodnocují. Strukturu předpokladů, hypotéz a cílů do systému zavádí expert. Aktuální model je paměť, kde se po každém kroku ukládají mezivýsledky. Vysvětlovací mechanismus je oddělené uživatelské rozhraní, pomocí kterého se předávají průběžné a konečné informace uživateli. Nejvhodnější dotazy jsou vybírány řídicím

mechanismem a na jejich základě se upravuje aktuální model, což se děje novými údaji z báze dat nebo odvozením z aktuálního modelu. [4]



Obr. 2.3 Diagnostický expertní systém [4]

Plánovací expertní systémy se využívají pro úlohy, ve kterých známe počáteční stav a cílové řešení a od systému se požaduje, aby za pomoci dat a zadání došel optimálními kroky k požadovanému cíli. Generátor možných řešení je základní částí vytvářející všechny možné další kroky pro danou situaci. Vzniklé kroky se dále omezí a v posledním kroku se testují, jestli zbylé kroky vedou k požadovanému cíli. Výsledkem jsou všechna dosažená možná řešení s ohodnocením vhodnosti. [4]



Obr. 2.4 Plánovací expertní systém [4]



Hybridní systémy kombinují metody diagnostických a plánovacích systémů. V případě monitorovacích systémů se při poruše diagnostický systém nahradí systémem pro plánování zásahu k odstranění poruchy. [4]

### 2.3.2 Prioritně využívané reprezentace znalostí

Podle tohoto ohledu se systémy dělí na pravidlové a nepravidlové. Nejrozšířenějšími jsou systémy založené na pravidlové reprezentaci. Zejména díky své modularitě, jednoduchému vytváření vysvětlovacích schopností a podobnosti lidskému kognitivnímu procesu. [4]

Pravidlové expertní systémy vyjadřují znalosti pomocí produkčních pravidel. Pravidla jsou zapsána ve tvaru: IF <levá strana> THEN <pravá strana>, levá strana je antecedent pravidla a pravá konsekvent pravidla. Nepravidlové expertní systémy vyjadřují znalosti v podobě rámců. To jsou struktury, které představují situace a činnosti. [4]

### 2.3.3 Využívání heuristických znalostí

Rozeznávají se systémy s neurčitostí nebo bez neurčitosti. Expertní systémy bez neurčitosti používají znalosti bez neurčitosti a případné neurčitosti lze zanedbat. U mnoha systémů je však neurčitost dominantní a jsou to tedy expertní systémy s neurčitostí. [4]

Diagnostické expertní systémy bez neurčitosti řeší problém ohodnocováním hypotéz pevně daného modelu problému sestaveným expertem. Diagnostické expertní systémy s neurčitostí pracuje s mnoha typy neurčitostmi, které mohou být způsobené zkreslením naměřených údajů, neúplností, špatná formulace veličin, aj. Nejistoty se v expertních systémech vyjadřují numerickými parametry a jsou nazývány například stupně, míry, váhy, faktory pravděpodobnosti, důvěry, apod. Většinou jsou v intervalech  $\langle 0,1 \rangle$  nebo  $\langle -1,1 \rangle$  přiřazeny tvrzeným pravidlům nebo rámcům. [4]

Systém založené na pravidlech mívají znalosti vyjádřené znalosti pravidly jako

$E \Rightarrow H$  s váhou  $V$ , IF <předpoklad  $E$ > THEN <závěr  $H$ > WITH <váha  $V$ >

$E$  a  $H$  jsou tvrzení a  $V$  je důvěra experta v platnost. Pro způsob řešení existují různé modely, které se liší způsobem řešení. Většinou počítají váhu závěru při uvažování všech dostupných pravidel a dat. [4]

## **3 Přehled monitorovacích systémů na trhu**

### **3.1 ABB – Monitorovací systém MCM800**

Systém MCM800 společnosti ABB je samostatný modul, využívaný pro sledování vibrací stroje a pozici rotoru. Je schopen monitorování, ochrany a komunikace. Pro získání dat o měřených veličinách jsou vstupy k připojení senzorů. Ke komunikaci s modulem slouží Ethernetový nebo Profibus porty, přes které je možné konfigurace nebo monitorování. [6]

### **3.2 Alstom – Monitorovací systém AMODIS**

Společnost Alstom nabízí modulární systém AMODIS, který v závislosti na typu modulu dokáže měřit částečné výboje nebo stav rotoru a hřídele generátorů. Systém se skládá z jednotlivých senzorů, které jsou připojeny k satelitům. Jednotlivé stroje mají svůj vlastní satelit. Ze kterých jde zpracovaný signál do počítačové platformy AMODIS. [7]

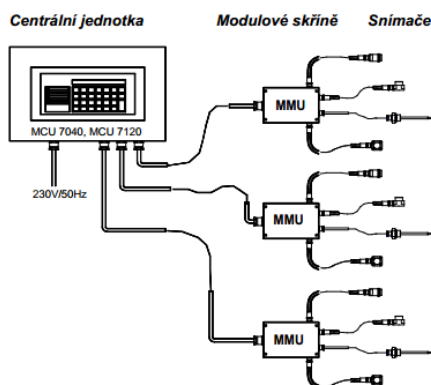
Monitorování je možné v časových intervalech, kdy se propojením AMODIS notebooku s jednotlivými satelity získávají měřená data. Při trvalém monitorování je v kontrolní místnosti umístěn AMODIS server, který ukládá a zobrazuje informace z jednotlivých satelitů či propojených AMODIS modulů. Dálkové je možné připojením k řídicímu systému Alstom. [7]

#### **3.2.1 AMODIS PAMOS**

Modulární systém PAMOS je určen k měření částečných výbojů generátorů. Pomocí čtyř vysokokapacitních senzorů na každém stroji, dokáže analyzovat frekvenční rozsah pod hodnotou 2 [MHz], díky čemuž je možná pečlivá detekce částečných výbojů vinutí vysokého napětí. Tyto senzory jsou připojeny k PAMOS Satelitu, které informace digitalizuje a přenáší k AMODIS platformě. [7]



systemu a měřených veličinách. System je ve variantách MPS 40 a MPS 120 odlišených počtem analogových vstupů. System MPS je vhodný pro měření elektrických veličin, vibrací, stavu ložisek, teplot, zatížení, atd. [9]



Obr. 3.3 Schéma monitorovacího systému Aura MPS [9]

### 3.3.2 MMPS

MMPS je modulový monitorovací systém, který se skládá z jedné nebo více sestav modulů MMPS. Tyto moduly jsou v provedení na lištu DIN. Každý modul má procesor, který zpracovává informace do digitální podoby a pomocí komunikační sběrnice CAN přenáší k dalším modulům. Umístěním potřebných modulů s volitelnými typy kanálů vedle sebe vznikne místní sestava až o 16 modulech. Tato místní sestava může tvořit samostatný monitor provozu s vyhodnocením stavu a vstupy pro měřené veličiny. [10]

Každý modul může být vybaven dvěma kanály a to vstupním, výstupním, komunikačním nebo speciálním. Vstupní kanál měří a zpracovává signály z čidel. Výstupní kanál poskytuje analogové signály nebo stavové informace. Komunikační kanál slouží k připojení operátorského panelu nebo připojení k internetu. Speciální kanál může například obsahovat kartu FLASH RAM k archivaci měřených veličin. [10]

### 3.4 GE – Monitorovací systém 3500 Series

Hlavními částmi systému společnosti GE jsou senzory, modul 3500 a software System 1. Modul 3500 má řadu analogových vstupů pro měřicí senzory, které jsou jednotlivě naprogramovány k měření určitých veličin strojů, jako jsou teplota, vibrace, detekce plynů, apod. V závislosti na typu modulu jsou zpracované informace pomocí sítě vyobrazeny na PC se softwarem System 1. Nebo může mít modul zabudovaný VGA displej s možností zobrazení měření na místě, případně odnímatelný LCD displej. [11]

### **3.5 ifm – Monitorovací systém Octavis**

Systém octavis společnosti ifm electronic slouží k monitorování vibrací, stavu ložisek, otáček a technologických veličin. Vyhodnocení veličin ze senzorů se provádí blízko měřeného místa v modulu systému z trvale připojených akcelerometrů. Výsledky jsou ve formě stavu diagnostických parametrů a frekvenčních spekter. Systém octavis je dostupný ve variantě Basic, u kterého jsou výstupní data pomocí ethernetového výstupu zobrazena v softwaru octavis. [12]

Varianta Advanced je kromě ethernetových výstupů u modulu vybavena dotykovým panelem, který vyobrazí měřené veličiny a posoudí stav stroje, případně i Wi-Fi modemem pro bezdrátový přenos informací do softwaru octavis. [13]

### **3.6 SKF – Monitorovací systémy Multilog IMx a F-LINK**

#### **3.6.1 Multilog IMx**

Společnost SKF nabízí pro monitorování řadu systémů Multilog IMx. Tyto systémy jsou vybaveny programovatelnými vstupy k připojení senzorů pro měření požadovaných veličin. Výstupy jsou propojeny s PC, které jsou vybaveny monitorovacím softwarem SKF @ptitude. [14]

#### **3.6.2 F-LINK**

Systém F-LINK je určený pro případy, kdy není výhodné použít systémy Multilog. Má trvale nainstalované snímače pro měření vibrací, stavu ložisek, teploty a provozního času. Pro možnost externí frekvenční analýzy je vybaven výstupem. Při překročení mezních hodnot je možnost stroj odstavit pomocí reléových výstupů. K zobrazení měřených veličin slouží VGA panel, nebo je možné systém spojit s PC se softwarem F-LINK Control. [15]

### **3.7 Omicron – Monitorovací systém OMS600**

Monitorovací systém OMS600 společnosti Omicron je určený k měření částečných výbojů a teplot. Pro měření částečných výbojů na strojích jsou jako senzory používány kondenzátory navržené pro různé vysokonapěťové stroje. Sběrná jednotka získává data ze senzorů, signál zpracovává, odděluje od rušení a sleduje změny hodnot. Upravená data o částečných výbojích jsou odeslána na monitorovací server, který získaná data analyzuje a poskytuje uživatelské rozhraní. [16]

### **3.8 VUES – Monitorovací systém M225**

System společnosti VUES slouží ke sledování parametrů vibrace a teplot vinutí a ložisek. Vibrace jsou sledovány snímačem K144I, teplota ložisek odporovými snímači PT100 a teplota vinutí pomocí pozistoru. Informace ze snímačů jsou zpracovány motorovou sekcí M225MSI a převedeny na výstupní signál pro přenos do interface M225I. To je čtyř nebo pěti kanálová jednotka, kterou lze sledovat až tři kanály odporových snímačů teploty, jeden kanál pozistoru a jeden kanál snímače vibrací. Interface přichází elektrický signál zpracovává a zprostředkovává propojení s řídicím systémem v podobě PC, zároveň napájí motorové sekce.

[17]

## **Závěr**

Diagnostika má velký význam v průběhu života stroje. Slouží k posouzení stavu izolace z hlediska různých veličin, které jsou každé měřeny specifickým přístrojem a metodou. Díky možnosti posouzení některých veličin on-line měření se z aktuálních hodnot nebo předpovědi budoucích stavů dá zamezit zničení stroje nebo alespoň včas odhalit nepříznivé provozní podmínky. Měření off-line má přesto důležitou úlohu, protože na rozdíl od měření on-line dokáže posoudit většinu diagnostických veličin a není omezeno připojeným provozním napětím pro vykonání zkoušek. Při on-line monitorování je využití expertních systémů zejména vhodné díky vždy dostupným znalostem experta uložených v bázi systému. Na jejich základě může i provozní pracovník, který není na úrovni experta správně postupovat v eventuálních případech nenormálních provozních podmínek nebo blížící se možné poruchy. I přes omezení možností měřených veličin jsou monitorovací systémy na trhu rozšířené a mezi hlavní měřené veličiny patří vibrace, teplota a částečné výboje.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav aj. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2008, 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [2] BARTÁK, A. a kol.: Diagnostika poruch izolací elektrických strojů. Praha 1984.
- [3] STONE, G.C.: Electrical insulation for rotating machines. IEEE press 2004
- [4] HAMMER, M.: Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů. BEN 2009
- [5] MADEJEWSKI, Bohumír. *Hluk elektrických strojů*. Dostupné z: <http://www.hlukovekryty.cz/documents/hluk-elektrickych-stroju-tocivych.pdf>
- [6] ABB INC. *MCM800: Machinery Condition Monitoring*. ©2007 [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/d3ba4f9036a58ae9c12573830052b45e/\\$file/mcm800%20data%20sheet.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/d3ba4f9036a58ae9c12573830052b45e/$file/mcm800%20data%20sheet.pdf)
- [7] ALSTOM. *AMODIS PAMOS: Generator Partial Discharge Monitoring Hosted by ALSPA Care*. ©2012 [online]. [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/Global/Power/Resources/Documents/Brochures/amodis-pamos-generator-partial-discharge-monitoring.pdf>
- [8] ALSTOM. *AMODIS ROMON: Generator Rotor Condition Monitoring Hosted by ALSPA Care*. ©2012 [online]. [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.alstom.com/Global/Power/Resources/Documents/Brochures/amodis-romon-generator-rotor-condition-monitoring.pdf>
- [9] AURA A.S. *Monitor provozu strojů MPS 40, MPS 120* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: [http://www.auranet.cz/fotky/MPS\\_CZ.pdf](http://www.auranet.cz/fotky/MPS_CZ.pdf)
- [10] AURA A.S. *Modulový systém monitorování provozu strojů MMPS* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: [http://www.auranet.cz/fotky/MMPS\\_CZ.pdf](http://www.auranet.cz/fotky/MMPS_CZ.pdf)
- [11] GE ENERGY. *3500 Series: Machinery Protection System*. ©2006 [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.ge-mcs.com/download/monitoring/3500.pdf>
- [12] IFM ELECTRONIC. *Diagnostický monitorovací systém octavis: Monitoring basic*. [online]. [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.ifm.com/obj/ifm-CZ-Monitoring-Basic.pdf>
- [13] IFM ELECTRONIC. *Diagnostický monitorovací systém octavis: Monitoring Advanced + Wi-Fi*. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.ifm.com/obj/ifm-CZ-Monitoring-Advanced-Wi-Fi.pdf>
- [14] SKF. *SKF Multilog: On-line System IMx-T*. ©2013 [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.skf.com/binary/21-21456/CM-P8-12799-3-EN-SKF-Multilog-IMx-T-Data-Sheet.pdf>
- [15] SKF. *Monitorovací systém F-LINK*. [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.tpb.cz/editor/filestore/File/SKF%20-%20Flink.pdf>
- [16] OMICRON. *OMICRON Monitoring Solutions: Partial Discharge Monitoring - moved to a new level of precision and reliability*. ©2013 [online]. [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: [https://www.omicron.at/fileadmin/user\\_upload/pdf/literature/Monitoring-Overview-Brochure-ENU.pdf](https://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/pdf/literature/Monitoring-Overview-Brochure-ENU.pdf)
- [17] VUES. *MONITOROVACÍ A ZABEZPEČOVACÍ SYSTÉM M225*. [online]. [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: [http://www.vues.cz/file/2605/CZ\\_M225\\_100507.PDF](http://www.vues.cz/file/2605/CZ_M225_100507.PDF)