

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektrotechniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Diagnostika poruch v točivých elektrických strojích

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vít KUBIŠ**

Osobní číslo: **E16B0027P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Diagnostika poruch v točivých elektrických strojích**

Zadávací 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 možné poruchy točivých elektrických strojů a jejich příčiny.
2. Popište metody používané pro diagnostiku poruch v točivých elektrických strojích.
3. Popište používané techniky zpracování signálu a algoritmy pro detekci poruch.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, Václav et al. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.

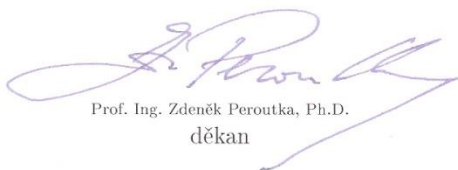
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Šobra

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019



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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce zpracovává problematiku poruch elektrických točivých strojů a diagnostická měření. Podrobně popisuje poruchy, jež se mohou u strojů vyskytnout, a zároveň ukazuje metody, kterými lze tyto poruchy odhalit a odstranit. Dále se práce zabývá moderními systémy pro měření vibrací, principem jejich funkce a způsobem zpracování dat. V závěru práce jsou zhodnoceny používané diagnostické metody.

Klíčová slova

Porucha, diagnostika, elektrický stroj, izolace, vinutí

Abstract

This given thesis deals with failures of rotating electrical machines and diagnostic measurements. It gives a detailed description of potential machine faults and shows the methods which enable detection and elimination of these faults as well. Then the thesis follows currently used systems for vibration measurements, principle of their function and data processing. The used diagnostic gauges are evaluated at the end of the thesis.

Key words

Fault, diagnostics, electric machine, insulation, winding

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

V Plzni dne 4.6.2019

Vít Kubiš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šobrovi, Ph.D. za vstřícný přístup, čas strávený diskuzí nad tématem a odbornou pomoc při zpracování této práce.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 9 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 10 |
| 1 PORUCHY V TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJÍCH..... | 11 |
| 1.1 PORUCHY - OBECNĚ..... | 11 |
| 1.2 ELEKTRICKÉ PORUCHY | 12 |
| 1.2.1 Porucha izolačního stavu | 12 |
| 1.2.2 Porucha mezizávitové izolace..... | 15 |
| 1.2.3 Vznik hřídelových napětí a ložiskových proudů..... | 15 |
| 1.2.4 Porucha pájeného spoje | 16 |
| 1.2.5 Výpadek ze synchronismu..... | 16 |
| 1.2.6 Poruchy na komutátoru | 16 |
| 1.3 MECHANICKÉ PORUCHY | 17 |
| 1.3.1 Špatné vyvážení rotoru | 17 |
| 1.3.2 Špatné nalisování ložiska..... | 17 |
| 1.3.3 Zadření ložiska | 17 |
| 1.3.4 Porucha hřídele..... | 18 |
| 2 DIAGNOSTICKÉ METODY..... | 19 |
| 2.1 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM | 19 |
| 2.2 DIAGNOSTICKÁ MĚŘENÍ V REŽIMU OFF-LINE | 20 |
| 2.2.1 Vizuelní kontrola statorového vinutí..... | 21 |
| 2.2.2 Měření izolačního odporu vinutí | 22 |
| 2.2.3 Napěťová závislost izolačního odporu vinutí na stejnosměrném napětí | 24 |
| 2.2.4 Měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$, kapacity a časové konstanty statorového vinutí | 26 |
| 2.2.5 Měření částečných výbojů statorového vinutí..... | 27 |
| 2.2.6 Zkouška střídavým napětím 50 Hz..... | 31 |
| 2.2.7 Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím | 33 |
| 2.2.8 Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu..... | 33 |
| 2.2.9 Zkouška rázovou vlnou | 34 |
| 2.3 DIAGNOSTICKÁ MĚŘENÍ V REŽIMU ON-LINE | 35 |
| 2.3.1 Detekce ozónu v chladicím vzduchu | 36 |
| 2.3.2 Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole | 37 |
| 2.3.3 Analýza rozběhového proudu | 39 |
| 2.3.4 Měření hluku..... | 40 |
| 2.3.5 On-line monitoring částečných výbojů | 40 |
| 2.3.6 Měření teploty..... | 42 |
| 2.3.7 Diagnostika vibrací | 43 |
| 2.3.8 Vibrace čel vinutí..... | 44 |
| 3 ANALYZÁTORY VIBRACÍ..... | 46 |
| 3.1 TECHNIKY ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÉHO SIGNÁLU | 46 |
| 3.2 FOURIEROVA TRANSFORMACE | 47 |
| 3.2.1 Algoritmus rychlé Fourierovy transformace | 48 |
| 3.3 ANALÝZA SPEKTRA | 48 |
| 3.4 ALTERNATIVNÍ METODY ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU..... | 49 |
| 3.4.1 Řádová analýza | 49 |
| 3.4.2 Obálková metoda..... | 49 |
| 3.4.3 SEE metoda | 50 |
| ZÁVĚR..... | 51 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ..... | 52 |

Úvod

Elektrické točivé stroje jsou přínosné zejména tím, že umožňují přeměnu mechanické energie na elektrickou a naopak. Požadavkem na tyto stroje je, aby bezpečně a spolehlivě plnily svoji funkci. V provozu jsou však vystaveny degradačním procesům, které nejenže zhoršují provozní parametry stroje, ale také zvyšují riziko možnosti havárie. Proto je zapotřebí tyto procesy včas odhalit, aby případné následky byly co nejmenší. K tomu slouží různé diagnostické metody, jimiž se tato práce zabývá.

Text je rozdělen do tří hlavních částí. První část pojednává o poruchách, popisuje možné příčiny jejich vzniku, uvádí základní rozdělení typů poruch a vysvětluje rozdíl mezi poruchou a závadou. Druhá část textu se zabývá diagnostikou, popisuje její cíle a vysvětluje její význam v použití pro elektrické točivé stroje. Dále je v této části vysvětlen rozdíl mezi diagnostikou on-line a off-line. Třetí část práce je věnována moderním systémům měření vibrací, technikám zpracování signálu a používaným algoritmům.

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|---------------------------|--|
| BLDC | bezkartáčový stejnosměrný motor (Brushless DC) |
| DFT..... | diskrétní Fourierova transformace (Discrete Fourier transform) |
| FFT | rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier transform) |
| f_{ot} | otáčková frekvence (Hz) |
| p_i | Polarizační index (-) |
| ppm..... | částic na jeden milion |
| q | náboj (C) |
| R_{iz} | izolační odpor (Ω) |
| $\text{tg } \delta$ | ztrátový činitel (-) |
| U_n | jmenovitá hodnota fázového napětí (V) |
| U_v | napěťová odezva výboje (V) |
| U_z | zapalovací napětí výboje (V) |
| U_{zk} | zkušební napětí (V) |
| U_{zkss} | zkušební stejnosměrné napětí (V) |
| U_{zkst} | zkušební střídavé napětí (V) |
| v_n | vysoké napětí |
| β | zátěžný úhel ($^\circ$) |
| τ_{600} | desetiminutová časová konstanta (-) |

1 Poruchy v točivých elektrických strojích

1.1 Poruchy - obecně

Poruchy tvoří neodlučnou součást provozní životnosti každého zařízení. Jedná se o jevy, které spočívají v ukončení provozuschopného stavu daného objektu (výrobku). V praxi je zapotřebí pojem poruchy vždy přesně vymezit, protože pouhé zhoršení provozu, které ještě nezpůsobí poruchu, se označuje jako závada. Poruchy můžeme rozdělit:

Podle časového průběhu

- náhlé
- postupné
- občasné

Podle vzniku

- přetížením
- provozní
- opravárenské

Podle stupně porušení provozuschopnosti

- úplné
- částečné

Podle následků

- závada
- nehoda
- katastrofa

Podle závislosti

- závislé
- nezávislé

Podle výskytu v čase

- časné
- s konstantní intenzitou poruchy
- dožití

Podle doby trvání

- trvalé
- dočasné

U poruch dále určujeme, zda byly vyvolány z vnějších nebo z vnitřních příčin. Poruchy z vnějších příčin jsou způsobené nedodržením stanovených podmínek a předpisů, za-

tímco poruchy z vnitřních příčin jsou způsobené vlastní nedokonalostí výrobku při zachování stanovených podmínek a předpisů.

U elektrických točivých strojů dochází k poruchám různého typu. Jedná se především o poruchy elektrické a mechanické. Ty mohou vznikat nejen při výrobě, ale i při samotném provozu. Elektrické poruchy způsobené při výrobě bývají obvykle odhaleny při tzv. mezioperačních kontrolách. Provádějí se ještě před impregnací, protože jakákoliv pozdější oprava vinutí by byla časově náročná a nákladná. Mechanické poruchy způsobené při výrobě se obvykle projeví až po celkové kompletaci stroje. K jejich odhalení je zapotřebí stroj nejprve roztočit a provést na něm měření teploty a vibrací. Slouží k tomu tzv. kusové zkoušky [1].

1.2 Elektrické poruchy

1.2.1 Porucha izolačního stavu

Úkolem izolačního systému je oddělit aktivní živé části od neživých a zároveň živé části navzájem mezi sebou. Navíc slouží k odvodu ztrátového tepla ze stroje, mechanickému zpevnění vinutí a vytváří ochranu před nebezpečným dotykem [2]. K porušení izolace může dojít jak při výrobě, tak při samotném provozu stroje. Je-li poškozená izolace mezi vinutím a kostrou statoru, dojde k zemnímu zkratu, při němž protéká vinutím zkratový proud. Při jeho delším působení dojde k úplnému zničení izolace.

Při výrobě je důležité sledovat zejména izolační lak, v němž se mohou místy tvořit vzduchové bublinky, anebo může obsahovat kovový prach. V takových místech je pak izolace zeslabená a může snáze dojít k elektrickému průrazu. Za provozu pak působí na izolaci elektrického stroje další řada faktorů, které negativně ovlivňují její izolační schopnosti. Jsou to zejména tyto:

Tepelné namáhání

K oteplení jednotlivých prvků izolačního systému dochází zejména vlivem provozních podmínek, tj. proudovým zatížením vodičů, četností spínání, časovým využitím a také dobou trvání přechodných dějů (rozběhy, brzdění). Teplo je považováno za jeden z nejvýznamnějších degradačních činitelů. Jeho dlouhodobým působením dochází k postupnému stárnutí izolace, které je způsobeno oxidací, hydrolýzou (působením vodní páry), pyrolýzou (rozklad teplotou) a případně odpařováním nízkomolekulárních složek

[3]. Krátkodobé změny teplot navíc vyvolávají termomechanické namáhání, které vede k mechanickému pnutí a možnosti vzniku trhlinek v izolantu [2]. Podle normy [4] proto rozdělujeme jednotlivé tepelné třídy izolace, které jsou vyjádřeny písmeny Y, A, E, B, F, H, N a R. Přehled tepelných tříd izolace je uveden v *Tab. 1.1*.

Tab. 1.1 Tepelná klasifikace elektroizolačních materiálů - převzato z normy [4]

| ATE nebo RTE °C | | Tepelná třída °C | Písmenné označení ^a |
|--------------------|------|---------------------|--------------------------------|
| ≥90 | <105 | 90 | Y |
| ≥105 | <120 | 105 | A |
| ≥120 | <130 | 120 | E |
| ≥130 | <155 | 130 | B |
| ≥155 | <180 | 155 | F |
| ≥180 | <200 | 180 | H |
| ≥200 | <220 | 200 | N |
| ≥220 | <250 | 220 | R |
| ≥250 ^b | <275 | 250 | - |

^a Je-li to požadováno, může být písmenné označení přidáno v závorce např. třída 180 (H). V případě omezeného prostoru, např. na štítku, mohou výrobní technické komise zvolit použití pouze písmenného označení.

^b Označení tepelných tříd nad 250 se musí zvyšovat o přírůstky 25 a musí být podle toho označeny.

ATE – Stanovený index tepelné odolnosti – hodnota odvozená ze známých provozních zkušeností nebo ze známého porovnávacího funkčního hodnocení.

RTE – Relativní index tepelné odolnosti – hodnota stanovená porovnáním odhadnuté doby do dosažení koncového bodu kandidátského materiálu s odhadnutou dobou do dosažení koncového bodu kontrolního materiálu.

Elektrické namáhání

Mezi nejvýznamnější projevy elektrického namáhání patří dielektrické ztráty. Ty vznikají v izolačním systému působením elektrického pole. Dochází k nim jak ve stejnosměrném, tak ve střídavém poli. Zatímco při stejnosměrném napětí vznikají pouze vodivostní (Jouleovy) ztráty, v případě střídavého napětí dochází navíc ke ztrátám polarizačním a ionizačním. Ztrátová energie se pak mění na teplo a dochází k zahřívání dielektrika.

K vodivostním ztrátám dochází v důsledku pohybu volných i vázaných nosičů elektrického náboje. Díky tomuto pohybu vznikne vodivostní proud, který prochází nejen samotným dielektrikem, ale i po jeho povrchu [5].

Polarizační ztráty jsou tvořeny zejména relaxační a migrační polarizací. Relaxační polarizace je jev s pomalým průběhem (10^{-12} až 10^{-8} s). „Různé polární částice, jež mají se svými sousedními částicemi slabou vazbu, konají kmitavé pohyby a současně se vlivem tepelných pohybů chaoticky přemísťují na vzdálenosti, které přibližně odpovídají rozměrům molekul [6].“ Naopak při migrační polarizaci vzniká prostorový náboj vlivem vrstvení, nebo existencí různých nečistot ve struktuře materiálu.

K ionizačním ztrátám dochází zejména u pevných a kapalných materiálů s určitým obsahem plynu. Ten se může vyskytovat v dutinkách, případně v bublinkách, ve kterých vlivem elektrického pole dochází ke vzniku částečných výbojů [5].

Pulzní namáhání

Vlivem působení pulzního namáhání dochází ke vzniku degradačních procesů, které by působením stejnosměrného nebo harmonického napětí vůbec nevznikaly. Mnohé další jsou vlivem pulzního namáhání urychlovány. Přítomnost pulzů vysoké frekvence v zařízení způsobuje vznik naindukovaných proudů (bludných, vířivých, ložiskových), nárůst teploty a tím urychlení degradačních procesů. Dále tyto pulzy způsobují přepětí vznikající v obvodu mezi měničem, kabelem a motorem. V důsledku vysokých strmostí napět'ových hran dochází k odrazům, kdy se jednotlivé napět'ové vlny, dopředné a zpětné, superponují a vznikají tak kmity s amplitudou, která překračuje původní amplitudu napět'ových pulzů vstupujících do přívodního kabelu [7].

Mechanické namáhání

Mechanickému namáhání jsou elektrické stroje vystaveny nejen ve výrobním procesu, ale také při dopravě, manipulaci a zejména pak v samotném provozu. Při něm obvykle dochází ke vzniku vibrací a mechanických rázů, které mají degradační účinky na mechanické části stroje, vinutí i jeho izolační systém. Vibrace jsou obvykle způsobovány technologickým procesem nebo poháněným zařízením, ale také samotným působením magnetických sil na stator. Projevuje se zejména při excentricitě rotoru a způsobuje větší hřídelové vibrace, jež jsou nepříznivé pro životnost ložisek [2].

1.2.2 Porucha mezizávitové izolace

Porucha mezizávitové izolace se objevuje na statoru stroje a vzniká mezi závitů jedné cívky. Zapříčiňuje tzv. mezizávitový zkrat, při němž dochází k jiskření a oteplování. To způsobuje opalování izolace a obvykle vede ke vzniku dalších poruch. V případě delšího provozu s touto poruchou dochází k namáhání drážkové a mezifázové izolace, a může tak dojít ke vzniku zkratu mezi cívkami stejné fáze, zkratu mezi cívkami různých fází nebo zemnímu zkratu na kostru statoru viz kapitola 1.2.1 [1]. Na (Obr. 1.1) vidíme vypálené oko cívky statorového vinutí v důsledku působení mezizávitového zkratu.



Obr. 1.1 Vypálená izolace na statoru po mezizávitovém zkratu

1.2.3 Vznik hřídelových napětí a ložiskových proudů

Hřídelové napětí může být příčinou vzniku proudů, uzavírajících se kostrou motoru, štíty, ložisky a hřídelí. Ložiskové proudy mohou být cirkulační, ale také kapacitní, zemní, atp. Obecně tyto proudy a napětí vznikají, pokud existuje elektrický potenciál mezi mechanicky oddělenými částmi a zároveň je vytvořena uzavřená cesta, umožňující průchod proudu [3]. Jeho průchodem jsou pak narušovány různé části ložisek, a tím dochází k jejich degradaci [2].

1.2.4 Porucha pájeného spoje

Objevuje se pouze u asynchronního stroje s kotvou nakrátko a jedná se o špatné spojení rotorové tyče a zkratovacího kruhu. Při provozu zde vzniká nežádoucí odpor a následné zahřívání materiálu.

1.2.5 Výpadek ze synchronismu

K této poruše dochází pouze u synchronních strojů. U nich je důležité, aby pracující stroj nepřekročil maximální moment, jenž odpovídá zátěžnému úhlu $\beta = 90^\circ$. K jeho překročení může dojít při přechodných dějích způsobených například změnou mechanické zátěže u motoru, nebo nadměrným zvýšením dodávaného momentu poháněcím strojem u generátoru. V tom případě dojde k vypadnutí stroje ze synchronismu a ten musí být následně odstaven [8].

1.2.6 Poruchy na komutátoru

Komutátor je rotující část stejnosměrného stroje složená z vodivých měděných lamel, které jsou vůči kostře rotoru odizolovány. Jednotlivé lamely jsou od sebe odděleny drážkami. Na komutátor dosedají kartáče (obvykle grafitové), které umožňují průchod proudu mezi pevným přívodem a otáčející se částí vinutí rotoru [9]. Jedná se o nejnáchylnější část stejnosměrného stroje a k poruchám zde může docházet jak při výrobě, tak za provozu. Jedná se především o:

Nestejně vysoké lamely komutátoru

V případě, že některá z lamel vyčnívá, nebo je naopak zapadlá, dochází v provozu k nadměrnému opotřebování uhlíků a jiskření. Stejný problém nastane i v případě, že vyčnívá slídová izolace mezi lamelami, nebo jsou lamely nepravidelně obroušeny [10].

Přetížení stroje

Při přetížení stroje dochází k jiskření, a tím k opalování uhlíků a rychlejšímu opotřebování lamel komutátoru [10].

Zkrat na komutátoru

Při provozu stroje dochází postupem času k odírání uhlíkových kartáčů. Vznikající prach se začne ukládat do drážek mezi lamelami a v případě nahromadění většího množství prachu dojde k vytvoření vodivé cesty a následnému zkratu mezi lamelami.

Poruchám na komutátoru se lze vyhnout v případě použití tzv. bezkomutátorových strojů, například motorů BLDC. Ty mají buzení v rotoru a obvykle bývá sestrojeno z permanentních magnetů [11].

1.3 Mechanické poruchy

1.3.1 Špatné vyvážení rotoru

Nevyváženost stroje znamená nehomogenní rozložení hmoty na rotujícím tělese. Osa těžiště v tomto případě není shodná s osou rotace a dochází ke vzniku vibrací stroje, které nepříznivě ovlivňují jeho chod. Pokud efektivní hodnota rychlosti těchto vibrací překročí meze definované normou (ČSN ISO 2954), může dojít k poškození nebo ke zničení zařízení. Nevyváženost rotoru lze snížit přidáním tzv. korekční hmoty, která se umísťuje do předem připravené drážky na rotoru [12].

1.3.2 Špatné nalisování ložiska

Jestliže je při montáži nepřesně nalisované ložisko, dojde při kompletaci k vychýlení osy rotoru. V provozu se pak tento jev opět projeví vznikem vibrací, viz 1.3.1.

1.3.3 Zadření ložiska

Zadření se projevuje zejména při nedostatečném mazání ložisek. Při výběru mazacího prostředku je důležité brát v potaz provozní teplotu zařízení a vybrat olej nebo mazací tuk s přiměřenou viskozitou. Čím vyšší je viskozita, tím tlustší je vrstva mazacího filmu a větší únosnost ložisek.

Další příčinou zadření ložiska může být nevyrovnaná prostorová geometrie. Ta zapříčiňuje působení extrémních statických a dynamických sil, a zabraňuje tak vzniku mazacího filmu mezi kroužkem a valivými elementy ložisek [13].

Na (*Obr. 1.2*) jsou patrné následky zadření ložiska asynchronního motoru, díky kterému došlo k elektrickému zkratu a následně zahoření celého motoru.



Obr. 1.2 Následky zadření ložiska

1.3.4 Porucha hřídele

V případě zadření rotoru působí ve stroji radiální síly a tepelné účinky, díky kterým může dojít k ohnutí hřídele. Vibrace při provozu také mohou způsobit postupnou degradaci hřídele a následné zlomení [2]. To se stane i v případě, že došlo při výrobě ke špatnému odlití hřídele a na jejím povrchu se objeví mikroskopické trhliny.

2 Diagnostické metody

2.1 Diagnostický systém

Diagnostika obecně slouží jako prostředek zjišťování stavu objektů. V našem případě se pak jedná konkrétně o diagnostiku elektrotechnologickou. Ta úzce souvisí se vším, co se týká procesů výroby elektrických zařízení a jejich následného provozu. Používané diagnostické zkušební metody můžeme rozdělit na destruktivní a nedestruktivní. Nedestruktivní jsou takové metody, které můžeme libovolně často opakovat, aniž by došlo k postřehnutelným trvalým změnám u zkoušeného objektu. Naopak u destruktivních metod lze vyhodnotit výsledek pouze za cenu trvalého poškození zkoumaného objektu. Přitom jako destruktivní je považována nejen metoda, při které dojde k okamžitému zničení objektu, ale i taková, která způsobí urychlení degradačních procesů, aniž by došlo k bezprostřední ztrátě funkčnosti objektu.

Z výše popsaného se jeví jako výhodnější použití nedestruktivních metod, protože při nich nedochází ke zničení zkoumaného objektu. V praxi se však velmi často setkáváme i se zkouškami destruktivními, zejména kvůli jejich jednoduchosti a snadnému vyhodnocení získaných výsledků. Mezi nimi jsou rozšířeny zejména zkoušky vysokým střídavým, případně vysokým stejnosměrným napětím [14].

Při volbě vhodné diagnostické metody se řídíme těmito požadavky:

- zkouška se musí týkat vlastností, které jsou předmětem zájmu
- zkouška musí být dostatečně průkazná
- rozložení namáhání by mělo odpovídat skutečnému
- upřednostňujeme zkoušky nedestruktivní
- zkouška sama nesmí podstatně ovlivnit degradaci
- zkušební zařízení by mělo odpovídat použití co do rozměru, nákladnosti, přesnosti, apod.

Výroba jakéhokoliv elektrického stroje se bez diagnostiky prakticky neobejde. Již před samotným začátkem výroby je nutné zjistit, zda jsou vlastnosti materiálů v požadovaných mezích a s přípustnými tolerancemi. V průběhu výroby a kompletace jsou pak diagnostická šetření důležitá ke včasnému odhalení vzniklé poruchy. Jejich cílem je zjištění stavu vlastností zkoušeného objektu tak, aby na jejich základě bylo možné činit požadované závěry. Požadavkem je pak dosažení optimální spolehlivosti za daných podmínek. V první fázi výroby se kontrolují vstupní prvky (materiály) při tzv. vstupní kontro-

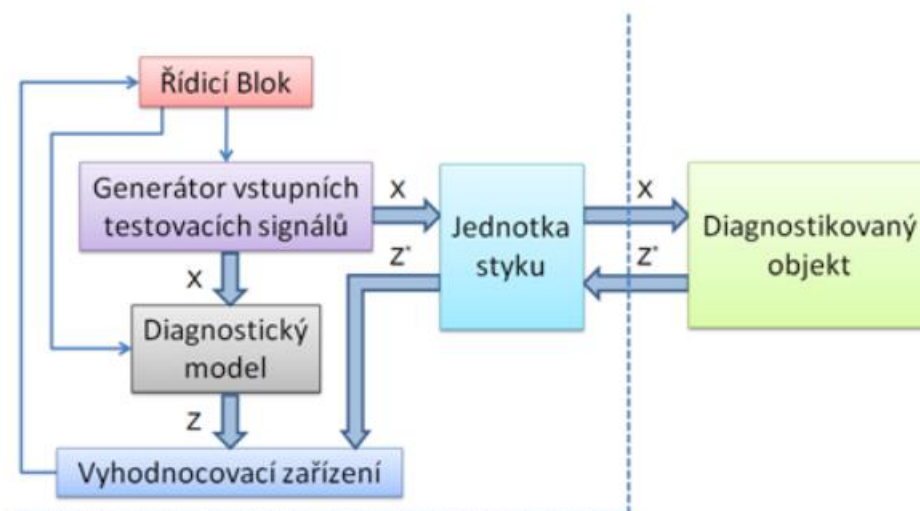
le. Po ní následuje mezioperační kontrola. Ta slouží k odhalení poruch mezi jednotlivými výrobními procesy. Díky těmto dvěma kontrolám lze z výrobního procesu včas odstranit vadné díly a předejít tak ekonomickým i časovým ztrátám. V konečné fázi výroby se nachází výstupní kontrola, kde je již hotový výrobek odzkoušen. Tato diagnostika má velký význam v omezení záručních řízení a oprav na minimum [7] [14].

Další úlohou diagnostických měření je včasné odhalení případných poruch v provozu způsobených stárnutím nebo opotřebením. Opotřebení je jedním z nejdůležitějších činitelů ovlivňujících životnost a spolehlivost součástí i celých zařízení. Situaci navíc ztěžuje fakt, že k opotřebením obvykle nedochází rovnoměrně ani v čase, ani na témže místě. Díky tomu se v určitých oblastech objevují kumulativní projevy opotřebením a vznikají zde tzv. kritická místa. V praxi pak vlivem nerovnoměrné životnosti dochází k řetězovitým projevům – k postupným výpadkům strojů pro provozní nezpůsobilost. Pro případné opravy mají pochopitelně největší význam nedestruktivní metody a zejména pak metody bezdemontážní diagnostiky, při nichž lze bez demontování a většinou i za chodu zařízení rozpoznávat místa ohrožená poruchou. Obecně tato diagnostika hledá důvod zhoršeného stavu zařízení a určuje se čas a rozsah opravárenského výkonu. Potřebné informace získává pomocí snímačů (čidel), konstruovaných pro sběr údajů o vibracích, tlaku, síle, odporech, rychlosti, apod. [15].

Jak již bylo popsáno výše, diagnostický systém jako celek je velice rozsáhlý a jednotlivé metody používané ve výrobě, anebo v provozu se od sebe výrazně liší. Popis všech diagnostických metod by výrazně překračoval rozsah této práce, a proto se budeme v následujících kapitolách zabývat pouze profylaktickými (preventivními) metodami, používanými na již vyrobených strojích, které slouží ke včasnému odhalení případných poruch v provozu.

2.2 Diagnostická měření v režimu off-line

Jde o diagnostikování stavu objektu, který je v danou chvíli mimo provoz. V praxi se využívá zejména při odstávce stroje, např. před generální opravou, k identifikaci částí stroje, jimž musí být během údržby věnována zvláštní péče.



Obr. 2.1 Schéma diagnostického systému v režimu Off-line [16]

2.2.1 Vizuální kontrola statorového vinutí

Jedná se o jednu z nejjednodušších, ale zároveň velice účinných metod. Zkoumá se při ní zejména stav vinutí, které je v provozu vystaveno různým typům namáhání, např. teplotě, chemickým účinkům, mechanickému namáhání apod. Následky jednotlivých typů namáhání bývají často dobře patrné a navzájem odlišitelné. Například vliv teplotního namáhání se projevuje uvolněním klínů v drážkové části vinutí, protože díky teplotě mění izolační systém svůj objem. Mezi teplotní namáhání můžeme zařadit i výbojovou činnost, při které dochází k lokálnímu ohřevu dielektrika a poškození izolace je v tomto případě také dobře patrné. Při chvění a působení dalších mechanických vlivů dochází ve stroji k uvolňování klínů, poškození úvazků čel, apod.

Vizuální kontrola se provádí na odpojeném a demontovaném elektrickém točivém stroji po vyjmutí rotoru. Z hlediska výše uvedených důvodů se kontroluje zejména statorové vinutí, pevnost zaklínování drážkových klínů, průchodky, stav teflonových hadic, systém měření teplot vinutí, železa, plynu a stav paketu. Pokud při kontrole drážkové části dojde ke zjištění klínů, které nevyhovují limitním hodnotám, je nutné tyto klíny překlínovat, a to buď částečně, nebo úplně podle počtu nevyhovujících klínů.

Při kontrole čelních partií se kontroluje tuhost rozpěrných palců na výstupu tyčí z drážky, tuhost rozpěrek čel vinutí, tuhost rozpěrek evolventních částí vinutí, utažení šroubů upevňujících koš vinutí ke statoru, tuhost bandáží přichycujících rozpěrky a vinutí a utažení šroubů spojů vedoucích elektrický proud (např. mezi průchodkami a vinutím statoru). Tato kontrola se provádí mírným poklepem kladívka nebo použitím přístroje

pro měření tuhosti klínů na každý konstrukční element a sleduje se akustická nebo elektrická odezva.

Stav konstrukce teflonových hadic a průchodek vodního systému se kontroluje pro ověření, zda se nedotýkají jiných částí stroje (případně mezi sebou) a nedochází tak k poškození povrchu hadic. Dále se sleduje dotažení těsnicích částí průchodky. Pro zjištění stavu systému měření teplot vinutí, železa a plynu se kontroluje dotažení spojů vyvedených na přípojovací místo, čistota prostoru napojení a měří se odpor teplotních Pt článků. Stav paketu se kontroluje kvůli případnému mechanickému poškození povrchu zubů a kvůli poškození způsobenému lokální teplotou, které lze zjistit díky barevnému odlišení poškozené části paketu [7] [17].

Při celkové vizuální kontrole se také sleduje, zda se ve stroji nenachází prach z izolace. Ten se zde může objevit při odírání tyčí vinutí o hranu zubů u výstupu z drážky, které vzniká vlivem vibrací čel. Takto poškozená izolace je patrná na (Obr. 2.2).



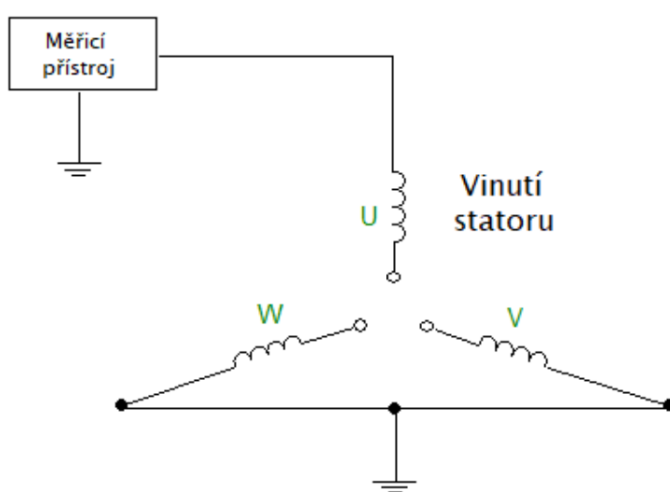
Obr. 2.2 Izolace ve formě bílého prachu sedřená z čel vinutí třením a vibracemi[18]

2.2.2 Měření izolačního odporu vinutí

Jedná se o nejvíce rozšířenou metodu kontroly vinutí používanou již více než 70 let. Měření izolačního odporu a následný výpočet polarizačního indexu nám dává základní představu o stavu izolace vinutí. Díky této metodě lze odhalit kontaminaci izolačního systému nečistotami, tepelné poškození nebo navlhnutí izolace [19]. Provádí se jak na statorovém, tak na rotorovém vinutí.

Měření na statoru

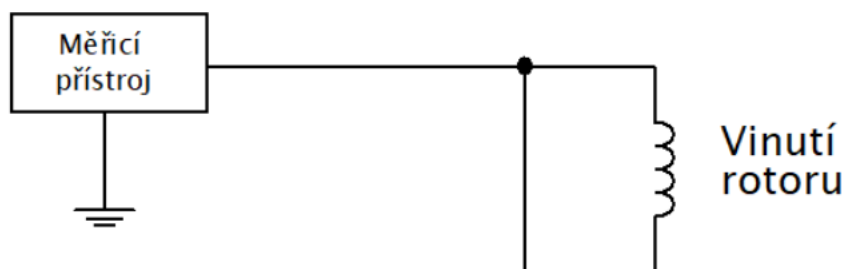
Pro měření izolačního odporu se obvykle používají přístroje, které mají vlastní zdroj stejnosměrného vysokého napětí. Při měření na statoru se měřená fáze z důvodu odvedení elektrického náboje zkratuje po dobu 30 minut a poté se na její vstup přiloží měřicí napětí (1 – 5 kV). Zbývající fáze se na vstupu uzemní a na výstupu zůstanou rozpojeny. Měření se provádí ve všech fázích samostatně. V případě, že nejsou začátky a konce vinutí vyvedeny na zvláštní svorky, se vinutí zkouší jako celek. Měřené vinutí je připojeno na záporný pól zdroje napětí a na kladný pól se připojuje kostra stroje vodivě spojená se zemí a ostatními vinutími (Obr. 2.3) [7].



Obr. 2.3 Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí s rozpojeným uzlem [7]

Měření na rotoru

Měří se izolace mezi vinutím a kostrou. Pokud není vyjmut rotor ze stroje, musí být při měření odpojeny veškeré zemní ochrany a budící obvod [20]. Při zkoušce se měří izolační odpor vinutí magnetového kola, přívodních kartáčů a sběracích kroužků. Teplota měřeného vinutí by se měla pohybovat v rozmezí 20 až 30 °C. U rotorů s vyniklými póly pak měření probíhá při chladnutí stroje z provozní teploty. Samotné měření se provádí měřičem izolace s vlastním zdrojem stejnosměrného napětí (0,5 – 1,5 kV) přiloženého mezi konec vinutí a hmotu rotoru (Obr. 2.4) [7].



Obr. 2.4 Schéma zapojení pro měření izolačního odporu rotorového vinutí [7]

V průběhu měření se odečítá izolační odpor v časech 15, 60 a 120 až 600 s. Z těchto naměřených hodnot se poté počítá polarizační index PI podle následujících vztahů převzatých z [7]:

$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} [-] \tag{2.1}$$

$$p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} [-] \tag{2.2}$$

R_{iz15} – hodnota izolačního odporu v $M\Omega$ odečtená v čase 15 s po zapojení měřicího napětí

R_{iz60} – hodnota izolačního odporu v $M\Omega$ odečtená v čase 60 s po zapojení měřicího napětí

R_{iz600} – hodnota izolačního odporu v $M\Omega$ odečtená v čase 600 s po zapojení měřicího napětí

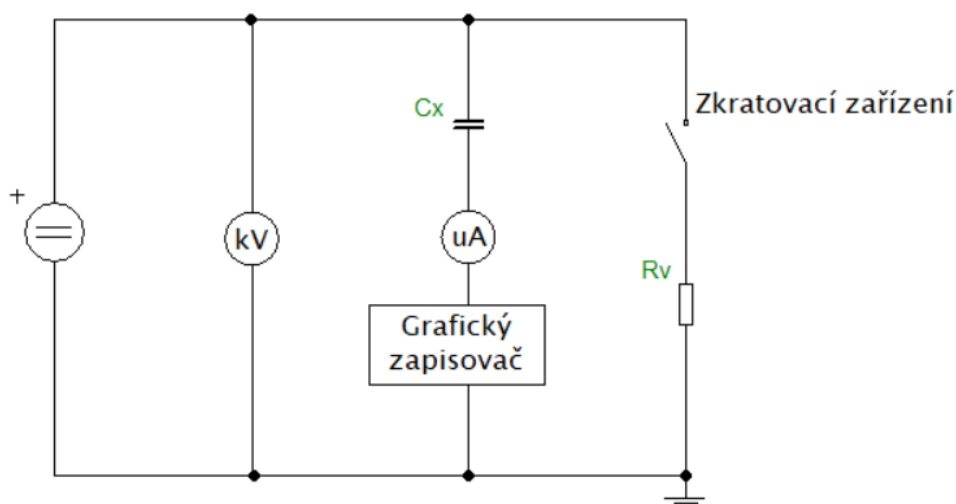
Mentlík ve své knize [7] uvádí oba polarizační indexy, ale naproti tomu Greg C. Stone ve své knize [19] uvádí pouze 10 minutový PI. Ten bývá sice přesnější, ale například pro rychlý odhad stavu vinutí stačí minutový PI. U nových vinutí se PI pohybuje výše než 4 a pro provozovaná čistá vinutí bez kontaminace výše než 2. Pokud se PI blíží 1, jedná se o velmi vlhké nebo znečištěné vinutí.

2.2.3 Napěťová závislost izolačního odporu vinutí na stejnosměrném napětí

Na rozdíl od měření izolačního odporu, které probíhá s konstantním napětím, při zkoušce napěťové závislosti izolačního odporu zvyšujeme napětí a odpor je nejprve konstantní a poté začne klesat až k nulovým hodnotám. V případě dalšího zvyšování napětí dojde k průrazu izolace. Obecně platí, že čím rychleji izolační odpor klesá, tím horší je stav měřené izolace [20].

Při samotném měření není nutné, aby byl rotor vyjmut ze stroje, ale je-li to technicky možné, rozpojí se uzel vinutí. Pokud je motor chlazen vodou, je nutné vodu před měřením

vypustit. Teplota měřeného vinutí musí být v rozsahu 5 až 30 °C. Hydrogenerátory se měří při chladnutí stroje z provozní teploty v teplotním rozmezí 20 až 30 °C. Po ukončení měření je nutné jednotlivé fáze vybit a poté viditelně zkratovat. Pro měření napěťové závislosti je nutné přiložit na vstup měřené fáze stejnosměrné zkušební napětí a zbylé dvě fáze na vstupu uzemnit. Jejich zbývající dva konce zůstanou nezapojeny. Měření se provede samostatně pro všechny fáze. Přiložené stejnosměrné napětí je zvyšováno krokově a současně je měřen čas s protékajícím proudem izolačním systémem do chvíle, kdy dosáhne své ustálené hodnoty – vodivostní proud (v praxi max. 10 minut). Z Ohmova zákona je následně vypočten ustálený izolační odpor. Uvedený postup se opakuje až do napětí, při kterém dojde k prokazatelnému snížení izolačního odporu. Měřicí napětí však nesmí překročit hodnotu zkušebního napětí zkoumané izolace [7]. Zapojení zkoumané fáze je provedeno podle (Obr. 2.5).



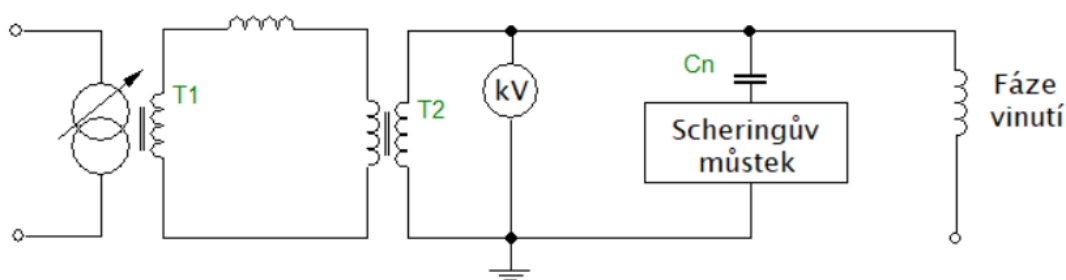
Obr. 2.5 Schéma zapojení pro měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí [7]

- kV – elektrostatický kilovoltmetr
- Cx – měřená izolace
- uA – mikroampérmetr
- Rv – vybíjecí odpor

2.2.4 Měření ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$, kapacity a časové konstanty statorového vinutí

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ je definován jako tangens úhlu mezi fázovým posunem proudu zkoušeného izolantu a fázovým posunem proudu ideálního bezztrátového dielektrika. Dává obraz o celkovém stavu izolace a lze díky němu zjistit, zda je izolace provozně zestárlá nebo navlhla. Materiál s dobrými elektroizolačními vlastnostmi má $\operatorname{tg} \delta$ menší než 10^{-3} , špatný naopak větší než 10^{-2} [21].

Před samotným měřením se jako v předchozích případech rozpojí uzel vinutí, přičemž rotor nemusí být vyjmut ze stroje. Je-li vinutí chlazeno vodou, musí být voda před měřením vypuštěna a chladicí systém musí být vysušen. Teplota měřeného vinutí stroje musí být mezi 5 až 30 °C. Zkoušky na hydrogenerátorech se provádí při chladnutí stroje z provozní teploty a měřené vinutí musí mít teplotu 20 až 30 °C. Při měření je na vstup prošetřované fáze přiloženo zkušební napětí, zatímco ostatní fáze jsou na vstupu uzemněny a jejich druhé konce zůstanou nezapojeny (Obr. 2.6). Je-li to technicky možné, provádí se měření pro každou fázi samostatně. Při této zkoušce se měří napěťová závislost ztrátového činitele a kapacity v intervalu $(0,2 - 1,0) U_n$, přičemž napětí je zvyšováno krokově po $0,2 U_n$ [7].



Obr. 2.6 Schéma zapojení pro měření ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ a kapacity statorového vinutí [7]

Díky časové konstantě vinutí je možné porovnávat vlastnosti izolačních systémů typově odlišných strojů. Výpočet této desetiminutové konstanty se provede podle vztahu:

$$\tau_{600} = R_{iz600} \cdot C_{0,2Ufn} [-] \quad (2.3)$$

R_{iz600} – izolační odpor v $M\Omega$ odečtený v čase 600 s po připojení měřicího napětí

C – kapacita vinutí měřené fáze střídavého stroje v μF při $0,2 \cdot U_n$

U_{fn} – jmenovitá hodnota fázového napětí

2.2.5 Měření částečných výbojů statorového vinutí

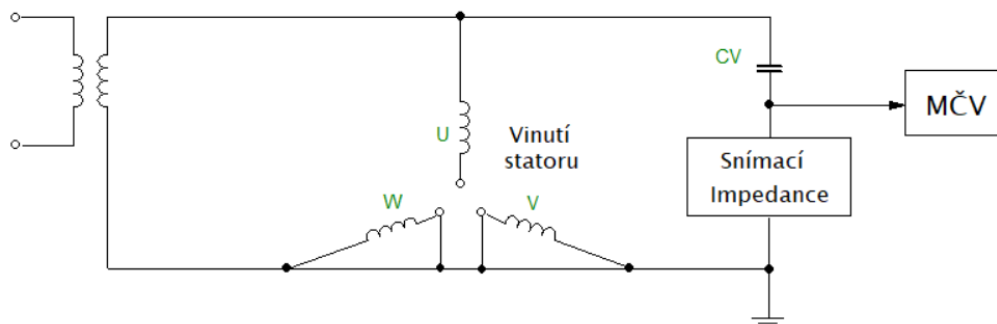
Částečné výboje jsou definovány jako místní elektrické výboje, které pouze částečně zkratují izolační systém mezi elektrodami o určitém potenciálu. Mohou vznikat přímo v izolaci vodičů, mezi izolací a vodičem, mezi izolací a dnem drážky statoru, nebo na povrchu izolace mimo drážku statoru [21]. Pro měření částečných výbojů je možno využít několika metod:

Galvanická metoda

Tato metoda detekuje proudové impulzy, které vznikají díky přítomnosti výbojové činnosti uvnitř vinutí elektrického stroje při zkušebním napětí. Měřením částečných výbojů lze odhadnout celkový stupeň znehodnocení měřené izolace, zaznamenat vznik lokálních vad a příp. určit druh výbojové činnosti.

Před samotným měřením musí být rozpojen uzel vinutí. Rotor nemusí být v případě globální galvanické metody vyjmut ze stroje. Poté se měřená fáze připojí ke zdroji regulovatelného napětí s frekvencí 50 Hz a neměřené fáze se zkratují a uzemní (Obr. 2.7).

Na prošetřované fázi je zvyšováno zkušební napětí až do jmenovité hodnoty U_n . V případě výskytu výbojové činnosti nad limitní mezí (obvykle $q = 1000\text{pC}$) se zaznamenává hodnota zapalovacího napětí těchto výbojů. Po dosažení jmenovité hodnoty U_n se toto napětí nechá 30 minut působit. Po této době se zkušební napětí snižuje vždy o $0,2 U_n$ a na těchto hladinách se pak měří hodnoty zdánlivého náboje. Měření se provede pro všechny fáze samostatně [7].

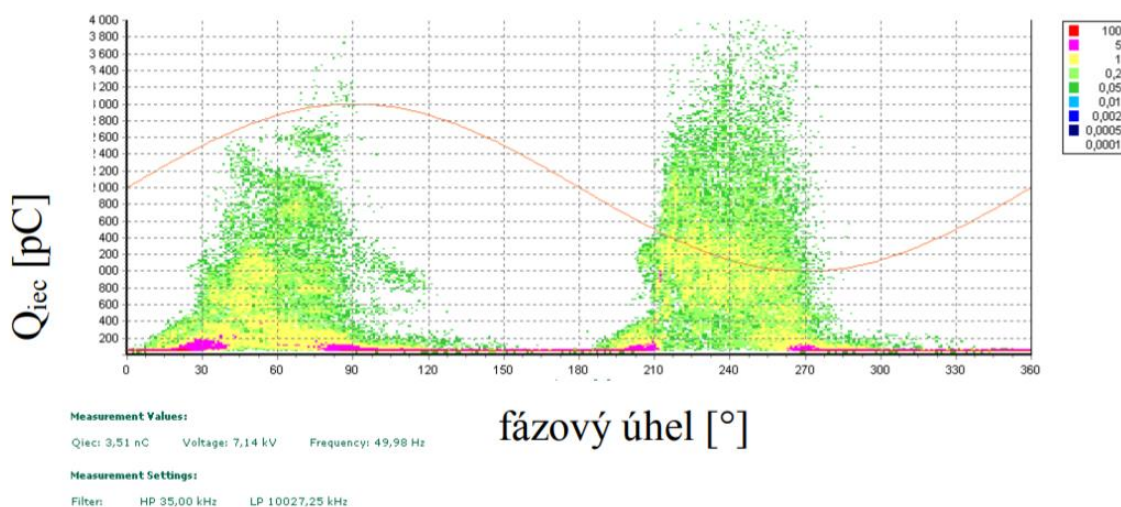


Obr. 2.7 Schéma zapojení pro měření částečných výbojů galvanickou metodou [7]

CV – vazební kondenzátor

MČV – měřič částečných výbojů

Globální off-line diagnostika částečných výbojů slouží především jako srovnávací test, díky kterému lze určit, jaká fáze má největší úroveň výbojové činnosti a případně je možné díky získaným výsledkům porovnávat jednotlivé stroje a hodnotit jejich stav. Nej důležitějším faktorem je však sledování konkrétního stroje v průběhu času a sledování trendů vývoje výbojové činnosti v závislosti na době provozu [7]. Díky rozvoji digitální techniky je dnes možné měřená data ukládat a následně je vyhodnocovat. Navíc tato zařízení umožňují měřit četnost pulzů a vyhodnocovat 3D diagramy částečných výbojů. Na (Obr. 2.8) je znázorněna četnost pulzů v závislosti na zdánlivém náboji a fázi [22].



Obr. 2.8 Izolační tyč generátoru - diagram četnosti pulzů v závislosti na amplitudě zdánlivého náboje a fázi ve frekvenčním rozsahu 35 kHz – 10 MHz, 7 kV, 3,51 nC [22]

Měření akustickou sondou

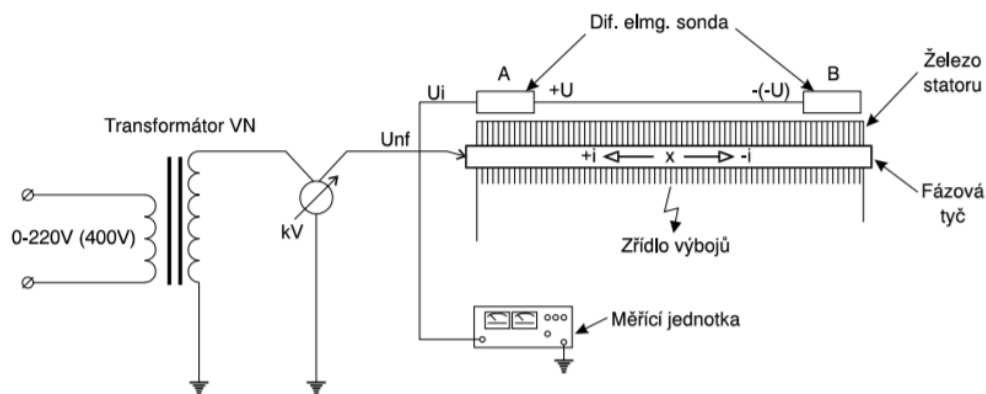
Měření akustickou sondou umožňuje identifikovat místa se silnou výbojovou činností. Je vhodná zejména pro měření statorových systémů hydroalternátorů s demontovaným rotorem, případně pro měření čelních partií vinutí. Lze ji aplikovat na všechny vn stroje od jmenovitého napětí 1 kV. Jedná se spíše o orientační metodu a pro podrobnější výsledky je nutné provést jiné, přesnější měření.

Při měření je připojeno zkušební napětí na celé vinutí statoru a zvyšuje se stupňovitě po 1 kV do jmenovitého napětí stroje. Do směru předpokládané výbojové činnosti se namíří směrový mikrofón, který signalizuje částečné výboje praskotem ve sluchátkách, nebo výchylkou na měřicím přístroji [23].

Měření diferenciální elektromagnetickou sondou

Diferenciální elektromagnetická sonda slouží k lokalizaci zdrojů částečných výbojů v jednotlivých drážkách vinutí točivých strojů. Detekuje maximální zdánlivý náboj q částečných výbojů v dané zkoumané drážce. Vlivem elektromagnetického pole, které je vyvoláno proudy částečných výbojů, se indukuje vř napětí ve vinutí jednotlivých sond úměrné velikosti náboje vybitého ve zřídle částečných výbojů.

Před měřením musí být rozpojen uzel vinutí. Rotor je nutné vyjmout pouze u některých typů strojů, např. u turboalternátorů. Je-li vinutí chlazeno vodou, musí být voda před měřením vypuštěna a teplota vinutí se musí pohybovat v rozmezí 5 až 30 °C. Hydrogenerátory se měří při chladnutí z provozní teploty a měřené vinutí musí mít teplotu 20 až 30 °C. Před měřením se provádí kalibrace měřicího obvodu (postačuje v jedné fázi) impulsem o známé velikosti náboje pomocí kalibrátoru. Samotné měření částečných výbojů se provádí jen v těch drážkách, ve kterých je uloženo vinutí prošetřované fáze. Objeví-li se výboj, změří se amplituda jeho napěťové odezvy U_v a dále pak zapalovací napětí U_z tohoto výboje [7][23].

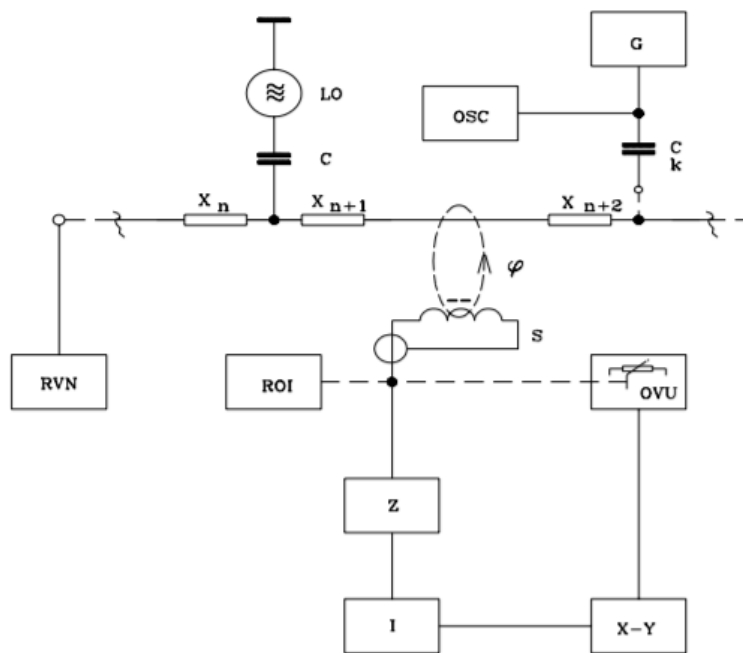


Obr. 2.9 Schéma zapojení pro měření částečných výbojů diferenciální elektromagnetickou sondou [23]

Měření induktivně vázanou sondou

Pokud u materiálu dochází k částečným výbojům v izolačním systému, je náboj neutralizovaný částečným výbojem hrazen z celkového náboje soustavy. Elektrický proud impulsního charakteru přitéká do zdrojové lokality ze všech směrů, zejména však vodiči a vodivými částmi stroje. Metoda využívá tohoto jevu a pomocí sondy zjišťuje stav dobíjecích proudů a zprostředkovaně pak usuzuje na intenzitu místa a výbojové činnosti.

Měření se provádí na stroji s demontovaným rotorem. Zařízení pro přesné vedení sondy se umístí do středu vrtání turboalternátoru. Zkušební napětí je přikládáno nejprve na celé statorové vinutí a poté i na jednotlivé fáze, zatímco zbylé dvě jsou uzemněny. Na měřenou část vinutí je před měřením přiloženo napětí, které na něm působí po dobu 30 minut, z důvodu samozhášecího efektu. Poté se zkušební napětí snižuje vždy o $0,1 U_n$ až do zhasnutí částečných výbojů a na jednotlivých stupních se již nečeká. Výbojová činnost je zaznamenávána XY zapisovačem [23].



Obr. 2.10 Blokové schéma pro měření s induktivně vázanou sondou [23]

- LO – zdrojová lokalita částečných výbojů
- C – kapacitní vazba
- X_n – n-tá část impedance vinutí
- Φ – induktivní vazba
- S – sonda (snímač)
- RVN – regulovatelný zdroj vysokého napětí
- ROT – rotátor
- OVU – odporový zesilovač úhlu
- I – indikátor
- OSC – osciloskop
- G – generátor kalibračních pulzů
- C_k – kalibrační kapacita

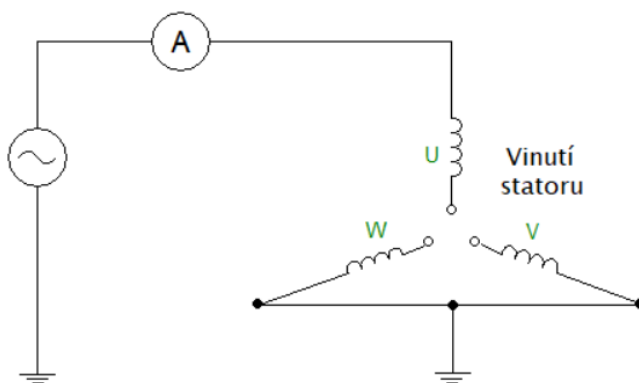
2.2.6 Zkouška střídavým napětím 50 Hz

Jedná se o zkoušku zvýšeným napětím a provádí se jak na statoru, tak na rotoru. Díky ní lze určit hodnotu průrazného napětí, resp. elektrickou pevnost izolačního systému. V průběhu provozu stroje dochází k degradaci izolačního systému a postupnému snížení elektrické pevnosti dielektrika. Pokud elektrická pevnost klesne pod kritickou mez, dojde k průrazu dielektrika. Z tohoto důvodu jsou zkoušky zvýšeným napětím prováděny při pravidelných zkouškách stroje, kdy je zařízení mimo provoz.

Jelikož se jedná o destruktivní zkoušku, je u celých strojů nepřípustné zvyšovat přiložené napětí až do průrazu izolace. Proto je zkoušený izolační systém prošetřované fáze namáhán zvýšeným elektrickým napětím, o frekvenci 50 Hz pouze po dobu 60 s. Při této zkoušce je napětí na vinutí rozloženo v poměru kapacit a velmi věrohodně tak odpovídá provoznímu namáhání. Zkouška se provádí na pokud možno vyčištěném stroji a uzel vinutí musí být před měřením rozpojen. Je-li vinutí chlazeno vodou, musí nejprve vyhovět hodnoty izolačního odporu [21].

Měření na statoru

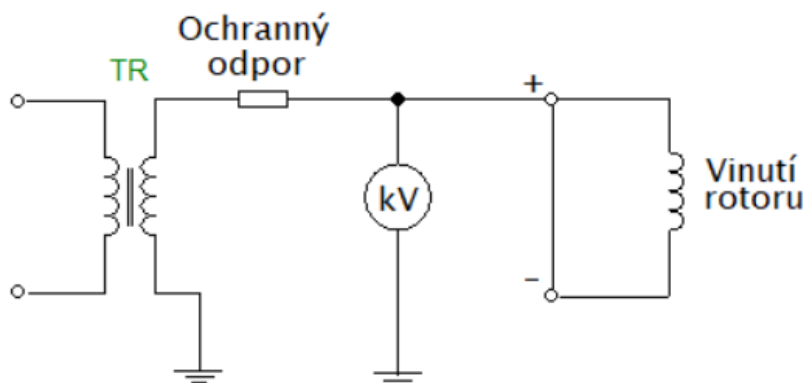
U měření na statoru musí být teplota měřeného vinutí v rozsahu 5 až 30 °C. Hydrogenerátory se měří při chladnutí stroje z provozní teploty a měřené vinutí musí mít teplotu 20 až 30 °C. Izolace se považuje za vyhovující, pokud při měření nedojde k průrazu nebo přeskočení. Je tím prokázáno, že průrazné napětí izolace, bylo v době zkoušky vyšší, než přiložené zkušební napětí. Zkušební napětí se připojuje mezi konec zkoušeného vinutí a kostru stroje vodivě spojenou se zemí a s ostatními vinutími (*Obr. 2.11*). Při zkoušce se měří samostatně každé elektricky nezávislé vinutí (v provozu jsou spojena, ale mají vyvedeny oba konce vinutí) [7].



Obr. 2.11 Schéma zapojení při zkoušce statorového vinutí napětím 50 Hz [21]

Měření na rotoru

Pro měření na rotoru je nutné, aby byl vyjmut ze stroje a vyčištěn. Na stroji s vyniklými póly se měření provádí v klidu stroje. U strojů s hladkým rotorem může být zkouška prováděna také v chodu naprázdno při jmenovitých otáčkách rotoru. Před samotným měřením je nutné odpojit budicí odvod vyjmutím kartáčů ze sběracího ústrojí a vyložení vhodnou izolací mezi kruhy proti elektrickému přeskoku. Dále musí být uzemněn budicí obvod a vinutí statoru. Stroj je zkoušen ve studeném stavu. Teplota rotorového vinutí musí být mezi 10 a 30 °C. Stroje s vyniklými póly se zkouší při chladnutí z provozní teploty a měřené vinutí má mít 25 ± 5 °C. Zkušební napětí se přivádí mezi spojené vývody rotorového vinutí a magnetové kolo (Obr. 2.12). Po dosažení 30 % U_{zk} probíhá nárůst napětí rychlostí 1 kV/10 s a po ukončení zkoušky je napětí plynule snižováno na nulu maximální rychlostí 1 kV/10 s. Po ukončení zkoušky se provede vodivé spojení vinutí rotoru s tělesem rotoru [7].



Obr. 2.12 Schéma zapojení při zkoušce rotorového vinutí napětím 50 Hz [7]

2.2.7 Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím

V důsledku velké degradace izolačních materiálů při použití metody se střídavým napětím, popsáným v kapitole 2.2.6, bylo přistoupeno k metodě s využitím stejnosměrného zdroje. Výhodou je nižší potřebný výkon zdroje, a tím i menší degradace dielektrika. Při této zkoušce je však napětí na vinutí rozloženo v poměru odporů vinutí a neodpovídá tak zcela provoznímu namáhání izolačního systému [7].

Při zvyšování stejnosměrného napětí je izolační odpor nejprve konstantní a poté začne klesat k nule. Hodnota, při které začne odpor klesat a také strmost poklesu je závislá na stavu izolace. Čím horší je stav izolace, tím dříve a s větší strmostí začne odpor klesat [17].

Zkouška se provádí pokud možno na vyčištěném stroji s rozpojeným uzlem vinutí. Rotor nemusí být ze stroje vyjmutý. U vinutí chlazeného vodou se nejprve provádí zkouška izolačního odporu a je nutné, aby jeho hodnoty vyhověly předepsaným kritériím. Teplota měřeného vinutí alternátoru musí být v rozsahu 5 až 30 °C. Hydrogenerátory jsou měřeny při chladnutí stroje z provozní teploty v teplotním rozsahu 20 až 30 °C. Po ukončení měření se jednotlivé fáze vybijí a poté jsou viditelně zkratovány. Při zkoušce se měří samostatně každé elektricky nezávislé vinutí (v provozu jsou spojena, ale mají vyvedeny oba konce vinutí). Poměr elektrické pevnosti při namáhání stejnosměrným a střídavým napětím závisí na materiálu izolantu a na míře jeho zestárnutí [7]. Zapojení je provedeno obdobně jako při měření střídavým napětím (*Obr. 2.12*), pouze s rozdílem, že je k vinutí připojen stejnosměrný zdroj. Velikost stejnosměrného zkušebního napětí vychází ze vzorce:

$$U_{zkss} = 1,7 \cdot U_{zkst} [kV] \quad (2.4)$$

U_{zkss} – zkušební stejnosměrné napětí

U_{zkst} – zkušební střídavé napětí

2.2.8 Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu

Tato zkouška se svým charakterem blíží zkoušce napětím průmyslového kmitočtu, avšak má jisté odlišnosti. Při napěťové zkoušce s frekvencí 0,1 Hz nedochází ke zjizvitelné degradaci dielektrika ani při častém opakování zkoušky. Rozložení napětí na jednotlivých vrstvách izolace je obvykle shodné jako při provozním namáhání, ale rozložení napětí na polovodičových nátěrech u výstupu tyčí z drážek bývá zcela odlišné.

Podmínky pro měření a schéma zapojení jsou stejné jako v kapitole 2.2.6. Zkušební napětí je plynule zvyšováno konstantní rychlostí až do požadované hodnoty. Na této hladi-

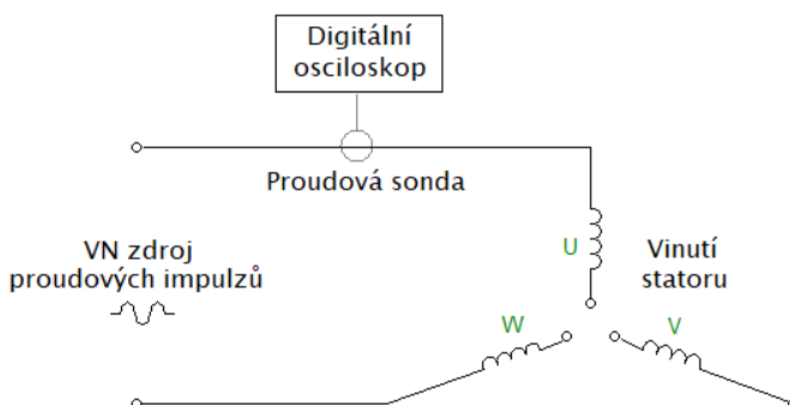
ně zůstane napětí po dobu 10 minut a poté se zvolna snižuje na nulu. Vrcholová hodnota zkušební napětí o kmitočtu 0,1 Hz je přibližně 1,63 násobkem efektivní hodnoty zkušební napětí o kmitočtu 50 Hz [21].

2.2.9 Zkouška rázovou vlnou

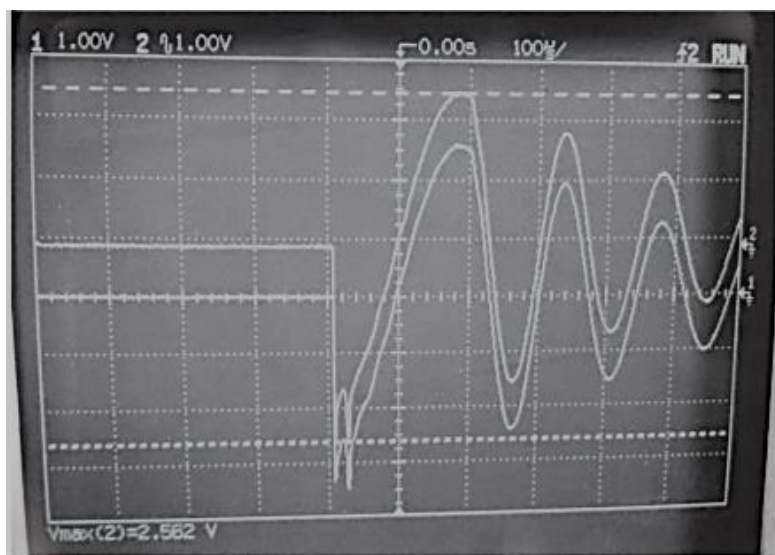
Rázová zkouška se nejčastěji používá pro zkoušení izolace mezi závitů cívek nebo jednotlivých vinutí. Její hlavní výhoda spočívá v tom, že dokáže detekovat počínající stadia poruchy izolace a předejít tak větším škodám.

Během zkoušky jsou k cívkám přivedeny velmi krátké napěťové pulzy, které slouží k vytvoření napěťového gradientu přes délku vodiče ve vinutí. Tento gradient vytváří okamžité napěťové namáhání mezi závitů. Cívka reaguje v časových úsecích mezi jednotlivými pulzy tlumenými kmity sinusového tvaru. Každá cívka má svůj jednoznačný charakter odezvy nebo vzorek vlny, který je možno zobrazit na stínítku připojeného osciloskopu. Tvar vlny je přímo závislý na indukčnosti cívky. Jestliže je napěťový potenciál větší než dielektrická pevnost izolace závitů, může být jeden nebo více závitů vyřazeno z provozu. Nižší počet činných závitů snižuje indukčnost cívky a zvyšuje kmitočet signálu odezvy na rázovou vlnu. Navíc je tvar odezvy na rázovou vlnu nestabilní – může se rychle posouvat doprava, doleva, nahoru a dolů.

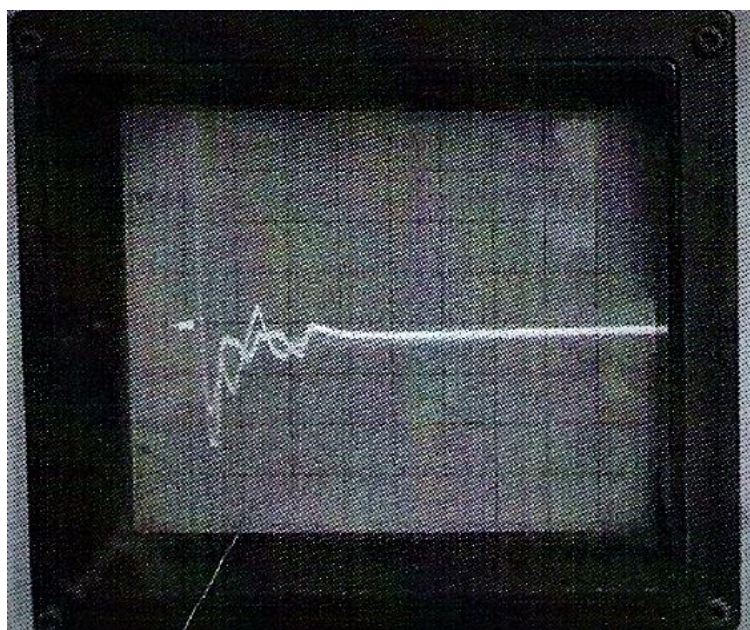
Z průběhů na (Obr. 2.14) je patrné, že odezva na rázovou vlnu z obou konců vinutí je stejná a lze tedy konstatovat, že vinutí je v pořádku. Naopak na (Obr. 2.15) můžeme vidět zdeformované průběhy, které ukazují na zkratovou poruchu.



Obr. 2.13 Schéma zapojení zkoušky rázovou vlnou [7]



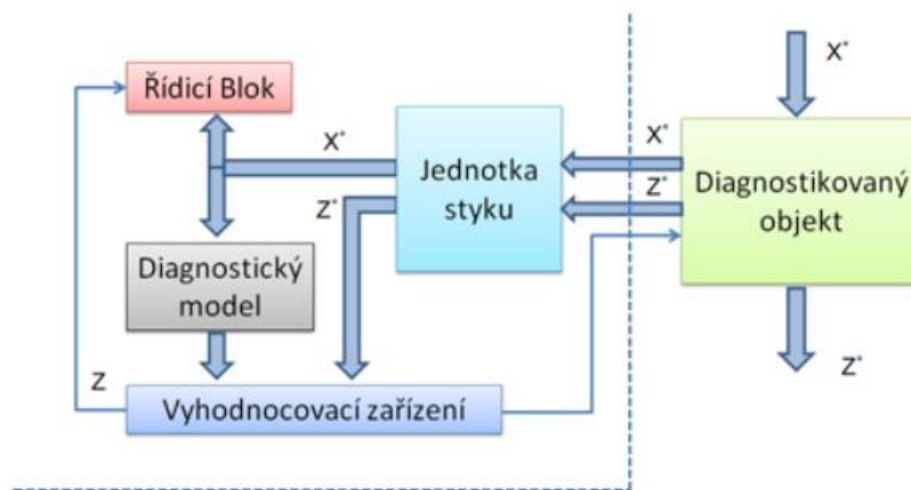
Obr. 2.14 Odraz rázové vlny - neporušené vinutí [24]



Obr. 2.15 Odraz rázové vlny - zkrat dvou fází

2.3 Diagnostická měření v režimu on-line

V tomto režimu se nachází skupina diagnostických metod, která sbírá sledovaná data přímo za provozu. Podle způsobu sběru dat je pak můžeme rozdělit na „provozní“ a „monitorovací“. Při monitoringu jsou všechna čidla a senzory trvale připojeny ve stroji a vyhodnocování dat probíhá v reálném čase, na rozdíl od provozních metod, u kterých k vyhodnocování dat dochází s určitým časovým odstupem [7].



Obr. 2.16 Schéma diagnostického systému v režimu On-line [16]

2.3.1 Detekce ozónu v chladícím vzduchu

Ozón vzniká při reakci vzdušného kyslíku s kyslíkovým radikálem ve vysokoenergetických dějích (ionizačních procesech). Jeho přítomnost v chladícím vzduchu poukazuje na existenci částečných výbojů nebo jiné místní namáhání izolace. Výhodou této metody je její jednoduchost a možnost měření za provozu stroje. Při pravidelném sledování koncentrace ozónu lze detekovat výbojovou činnost již v počátečních stádiích, kdy ještě nedochází k výraznějšímu poškození izolace [21].

Pro určení koncentrace ozónu je možné použít fotometrické metody, která využívá schopnosti ozónu absorbovat UV záření, nebo kolorimetrické metody, která spočívá v absorpci a reakci ozónu v chloroformovém indikačním roztoku.

Fotometrická metoda

Pro fotometrickou metodu je potřebný zdroj UV záření. Nejčastěji se používá vysokotlaká rtuťová výbojka s vysokou stabilitou světelného záření. Koncentrace ozónu je při analýze určena rozdílem mezi absorpcí UV světla v měřeném vzorku vzduchu a absorpcí v referenčním vzorku plynu bez ozónu [7]. Koncentrace se udává v ppm a je určena vztahem:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-K \cdot L \cdot C} [-] \tag{2.5}$$

I – hodnota koncentrace měřeného vzorku

I₀ – koncentrace v referenčním plynu

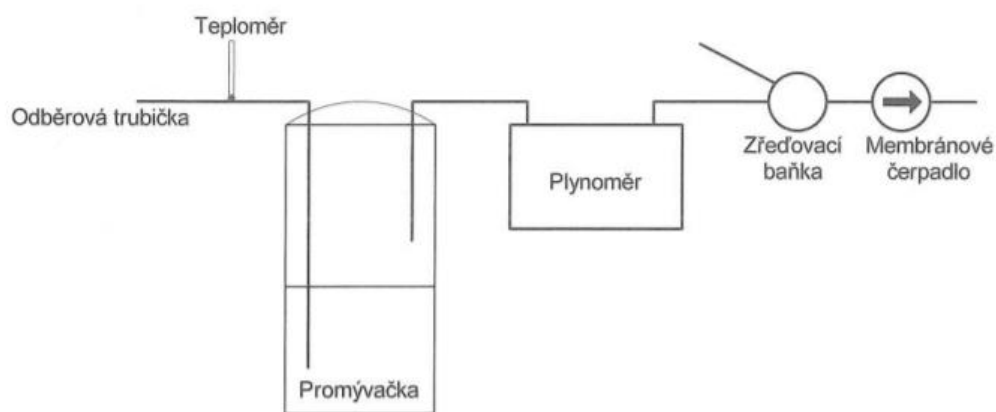
K – 308 cm⁻¹ (při 0 °C, tlaku 1 atm, na vlnové délce 254 nm)

- L – délka měřicí květy v cm
C – koncentrace v ppm.

Kolorimetrická metoda

Na rozdíl od předchozí je tato metoda založena na absorpci a reakci ozónu v chloroformovém indikačním roztoku. Jde o kvantitativní reakci, při které dochází k odbarvování modrého roztoku indiga. Tuto změnu barvy lze vyhodnotit kolorimetrickou metodou a pomocí dané kalibrační křivky stanovit množství ozónu přítomného v odebraném vzorku chladicího vzduchu.

Měřicí kolona je zobrazena na (Obr. 2.17). Z promývačky je analyzovaný vzduch s parami chloroformu odsáván membránovým čerpadlem a jeho objem je měřen plynoměrem, teplota pak vhodným teploměrem [7].



Obr. 2.17 Měřicí kolona [21]

2.3.2 Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole

Tato metoda je určena pro diagnostiku asynchronních a synchronních strojů s asynchronním rozběhem. Jakákoliv porucha nebo nesymetrie v elektrickém nebo magnetickém obvodu způsobí vznik přídavných magnetických polí ve vzduchové mezeře s rozdílnou rychlostí otáčení vzhledem k rychlosti synchronní. Tím vzniká nerovnovážený systém, který lze rozložit na symetrický systém sousledný, zpětný a nulový. Rozborem lze zjistit, zda se ve statorovém proudu a rozptylovém magnetickém poli objeví přídavné frekvenční složky v okolí první harmonické a otáčkových frekvencí – postranní frekvenční pásma. Velikost amplitudy těchto frekvencí je přímo úměrná míře nesymetrie a jejich charakter závisí na příčině poruchy (mechanické závady, špatné ustavení, elektrická závada rotoru, apod.) [21].

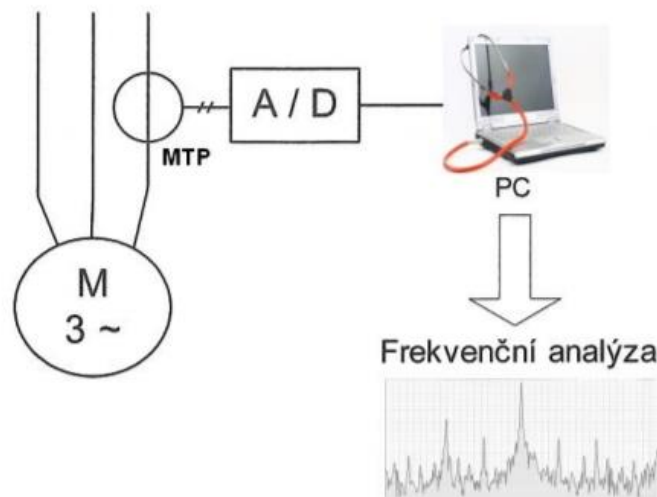
Měření se provádí za normálního provozu stroje bez změny provozních hodnot. Z naměřených hodnot a štítkových údajů se dopočítají frekvence postranních pásem:

$$f_{x1} = f_1 - 2 \cdot f_1 \cdot s \text{ [Hz]} \tag{2.6}$$

$$f_{x2} = f_1 + 2 \cdot f_1 \cdot s \text{ [Hz]} \tag{2.7}$$

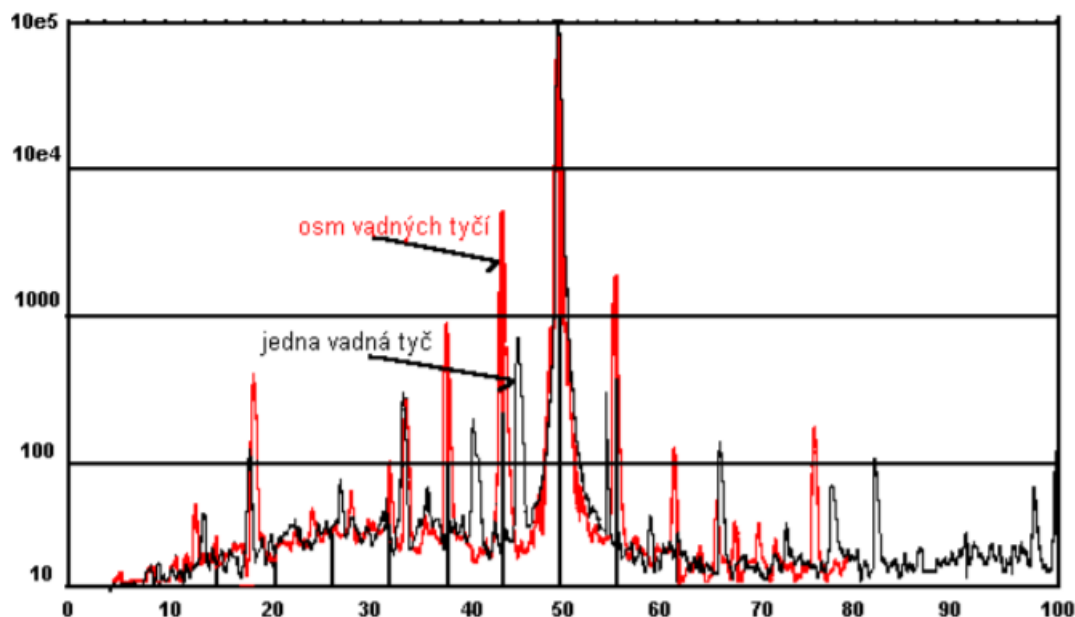
- f_1 – frekvence sítě
- s – skluz

Z hodnoty skutečných otáček se dopočte otáčková frekvence f_{or} . Odečtem rozdílu amplitud síťové frekvence, postranních pásem a současně síťové frekvence a otáčkové frekvence z frekvenčního spektra se vyhodnotí měření [17].



Obr. 2.18 Schéma zapojení pro frekvenční analýzu proudu [21]

Na (Obr. 2.19) je zachycen záznam vývoje poruchy asynchronního motoru (přerušování rotorových tyčí). Při zvyšování počtu přerušovaných tyčí je patrný nárůst amplitudy postranních pásem v okolí základní harmonické. U motoru bez poruchy jsou tato pásma ne-zřetelná [25].



Obr. 2.19 Záznam vývoje poruchy asynchronního motoru – spektrum proudu [25]

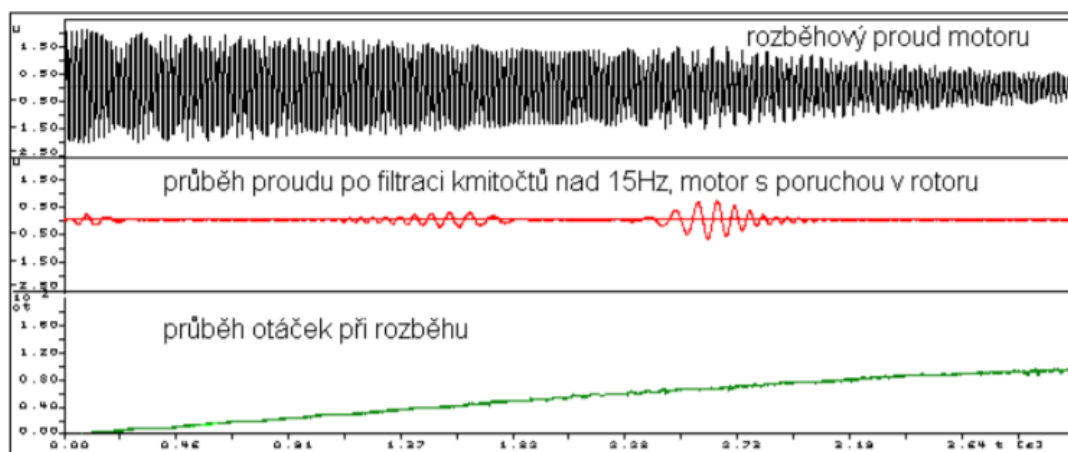
2.3.3 Analýza rozběhového proudu

Tato metoda se využívá u asynchronních strojů a synchronních strojů s asynchronním rozběhem. K měření rozběhového proudu se obvykle používá měřicí transformátor proudu zabudovaný v rozvaděči stroje. U velkých strojů jsou už dokonce tyto transformátory součástí obvodů pro ochrany a měření. Nesymetrie rotorového obvodu vzniklé poruchou, konstrukční vadou, apod., způsobují vznik přídavných magnetických polí ve vzduchové mezeře, stejně jako v kapitole 2.3.2. Jejich přítomnost se projevuje formou zákmitů. Pro detekci těchto zákmitů je nutné provést odfiltrování první harmonické ze záznamu rozběhového proudu. Poměr amplitudy zákmitů vzhledem k amplitudě první harmonické je přímo úměrný míře nesymetrie rotorového obvodu.

Měření je prováděno při běžném rozběhu stroje bez zásahu do obvodu. U vysokonapěťových strojů se diagnostika provádí v sekundárních obvodech měřicích transformátorů proudu. Pokud je doba trvání rozběhu stroje kratší než 2 s, je nutné ji prodloužit, např. spuštěním stroje při sníženém napájecím napětí. Na záznamu rozběhového proudu se především kontroluje, zda nedošlo k přebuzení snímacího senzoru zvýšeným proudem během rozběhu stroje.

Tato metoda není vhodná pro stroje s proměnným zátěžným momentem a stroje s konstrukční nesymetrií, protože se při rozběhu objevují výše zmíněné zákmity i u strojů bez vady [7].

Na (Obr. 2.20) je vidět ukázka výsledku rozběhové metody. Na odfiltrovaném záznamu průběhu rozběhového proudu jsou patrné zákmity před a po dosažení poloviny otáček. U motoru bez poruchy se tyto zákmity neobjeví vůbec. Tato metoda dokáže odhalit již poruchu spoje jedné tyče klece a kruhu [25].



Obr. 2.20 Záznam rozběhového proudu motoru s rotorovou nesymetrií [25]

2.3.4 Měření hluku

Provoz elektrických zařízení bývá doprovázen hlukem, způsobeným různými částmi a systémy tohoto zařízení. U elektrických točivých strojů jsou dominantní tři skupiny hluku. Jde o hluk elektromagnetického původu, způsobený nejčastěji chvěním kostry, dále o hluk mechanického původu, vycházející z ložisek a ventilační hluk, který je způsoben chodem ventilátoru. Úkolem diagnostiky hluku je detekce změn mechanického stavu magnetického jádra stroje, popřípadě jeho částí.

Měření se provádí na stroji za chodu, při jmenovitém zatížení a jmenovitých otáčkách. V blízkosti stroje je umístěn mikrofón, jenž zaznamenává celkovou hladinu a časový průběh akustického tlaku. Z naměřených hodnot je poté sestaven spektrogram, který se analyzuje a porovnává s předchozími měřeními [21].

2.3.5 On-line monitoring částečných výbojů

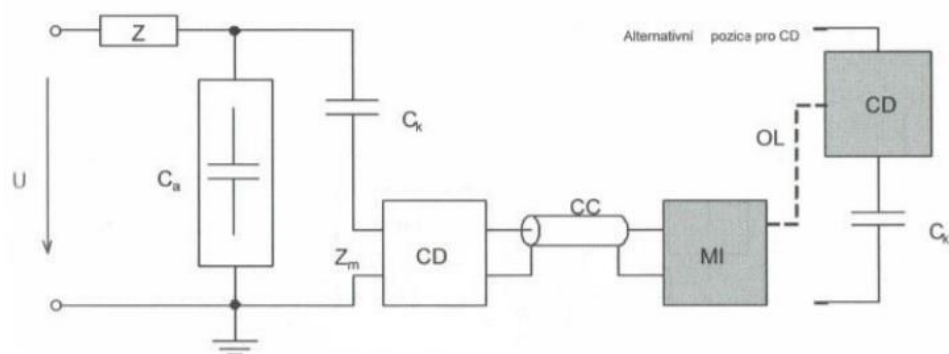
Protože bývají částečné výboje příznakem, nebo dokonce příčinou poruch elektrického stroje, je jejich sledování v on-line režimu velmi dobrým nástrojem k odhalování, případně i včasné predikci poruch.

Jednou z nejrozšířenějších metod je tzv. Galvanická metoda on-line měření částečných výbojů. Je založená na sledování proudových impulzů částečných výbojů pomocí

měřicí impedance, realizovanou obvykle jako RLC člen s ochrannými prvky. Indukčnost napájecího obvodu zabrání napájecímu zdroji kompenzovat úbytek elektrické energie vyvolaný výbojem v dutince dielektrika a na svorkách zkoušeného objektu poklesne napětí. Tento pokles je úměrný náboji proudového impulsu výboje.

Galvanická metoda má celkem tři možnosti zapojení zkušebních obvodů. Ve všech těchto zapojeních hraje důležitou roli vysokonapěťový vazební kondenzátor, který musí mít malou indukčnost, nízkou úroveň vlastních částečných výbojů a mnohem vyšší kapacitu v porovnání s rozptylovou kapacitou. Dále se zde nachází měřicí impedance (nejlépe čistě ohmického charakteru) s takovým frekvenčním rozsahem, aby neovlivňovala měřicí přístroj. S tímto měřicím přístrojem je propojena koaxiálním kabelem z důvodu eliminace rušení.

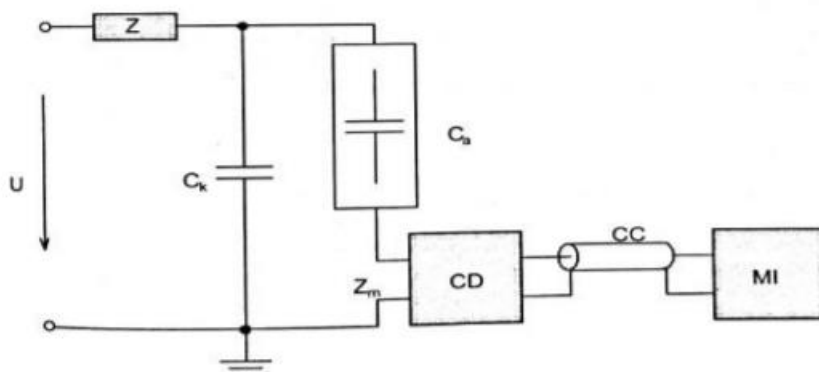
Zapojení s paralelní snímací impedancí na (Obr. 2.21) je vhodné zejména pro měření přístrojů o velkých kapacitách, protože umožňuje snímání impulsů částečných výbojů bez obav o přetížení a následné zničení zkoušeného přístroje [26].



Obr. 2.21 Galvanická metoda s paralelní snímací impedancí [26]

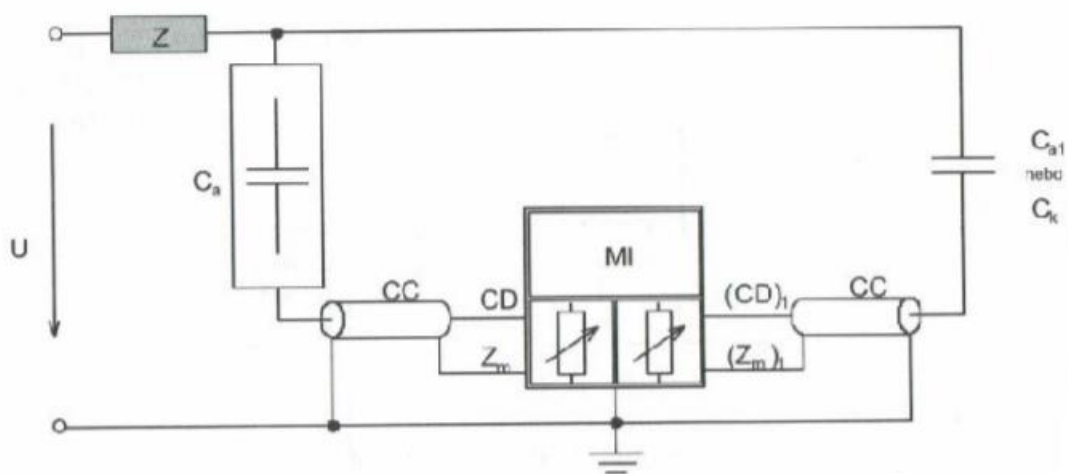
- U – Napájecí napětí
- Z – Filtr rušení
- C_a – Testovaný objekt
- C_k – Vazební kondenzátor
- Z_m – Snímací impedance
- CD – Vazební zařízení
- CC – Spojovací stíněný kabel
- MI – Detektor
- OL – Optický kabel

Pro dosažení vyšší citlivosti měření je vhodné zapojení se sériovou snímací impedancí podle (Obr. 2.22). V tomto případě je však vhodné obvod doplnit ochrannými prvky proti přepětí.



Obr. 2.22 Galvanická metoda se sériovou snímací impedancí [26]

Měření podle výše zmíněných zapojení jsou poměrně citlivá a musí proto být prováděna v laboratořích, nebo speciálních komorách. Pokud však chceme měřit částečné výboje přímo v místě instalace zařízení, je výhodné použít metodu můstkového zapojení podle (Obr. 2.23) [26].

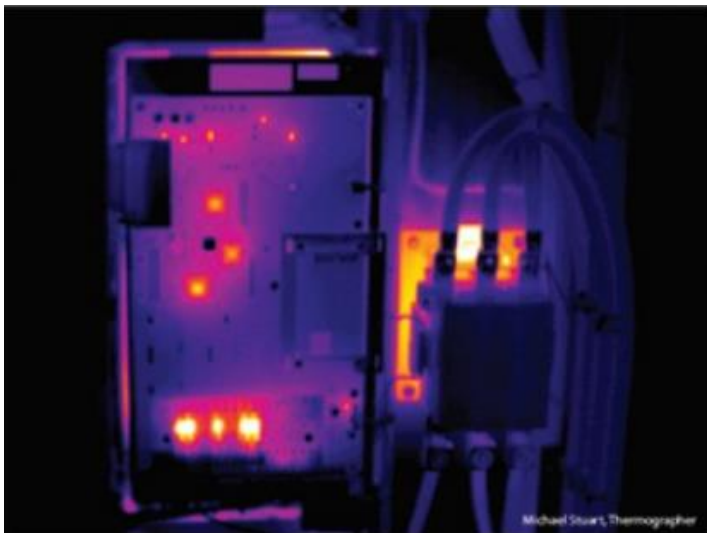


Obr. 2.23 Galvanická metoda s můstkovým zapojením [26]

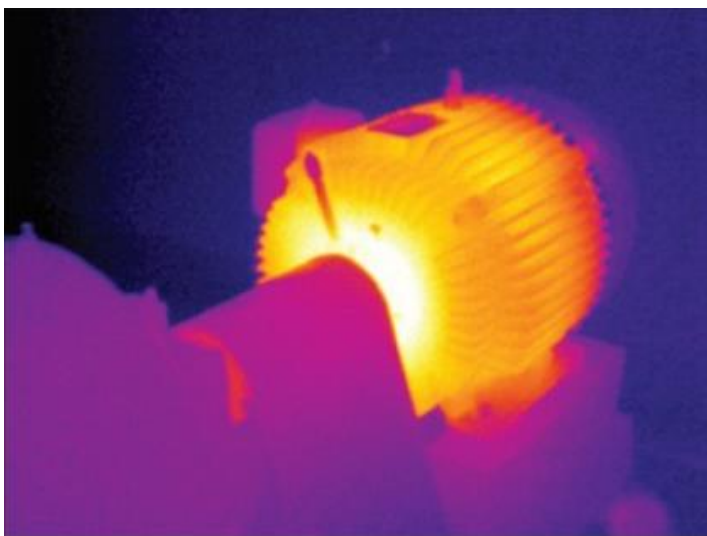
2.3.6 Měření teploty

K tomuto měření se využívají termokamery, díky kterým lze zjistit, zda stroj nepracuje při příliš vysokých teplotách. Snímek s teplotní mapou motoru poskytuje podrobné informace o jeho kvalitě a stavu. V případě přehřátí motoru, z něj můžeme určit konkrétní vadné komponenty, které jsou příčinou problému. Termokamera navíc dokáže odhalit nevyváženost fází, vadné spoje a abnormální přehřívání napájecích elektrických vedení. Na (Obr. 2.24) je vidět skříň pohonu, u které se přehřívají spoje 2. fáze. Přesnou příčinu

nelze ze snímku určit, ale může se jednat o problém se zatížením nebo s nevyvážeností rotoru. (Obr. 2.25) ukazuje přehřáté ložisko. Ze snímku je patrný rozdíl teplot mezi ložiskem a skříní ložisek [27].



Obr. 2.24 Zvýšená teplota usměrňovacích prvků měniče [28]



Obr. 2.25 Kontrola ložisek motoru [28]

2.3.7 Diagnostika vibrací

Pro diagnostiku mechanického uložení nebo elektrické nesymetrie se využívá měření spektra vibrací. Nejvýhodnější je měření s časovým záznamem, protože délka záznamu ovlivňuje jednak přesnost analýzy a jednak minimální možnou frekvenci ve spektru. Z takto zaznamenaných dat lze provést Fourierovu analýzu, určit vzájemný fázový posun vibrací, nebo vykreslit amplitudu vibrací v polárních souřadnicích. V praxi se nejčastěji pro vibrační diagnostiku používá analyzátor vibrací, o jehož funkci podrobněji pojednává kapitola 3.

Naprosto zásadní pro měření vibrací stroje je výchozí určení měřicích bodů a směru osy, pro kterou jsou vibrace měřeny. Výrobce daného stroje by měl vždy určit měřicí místa pro měření vibrací a stanovit maximální dovolené hodnoty. Vibrace jsou vždy měřeny minimálně ve třech osách, a to ve vertikálním radiálním směru, v horizontálním radiálním směru a v axiálním směru [24].

Mechanické příčiny vibrací mohou být:

- Nevyváženost rotorů
- Nesouosost
- Ohnutá hřídel
- Mechanická uvolnění
- Poruchy ozubených a řemenových převodů
- Poškození valivých ložisek
- Zadírání
- Hydraulické a aerodynamické problémy
- Rezonance

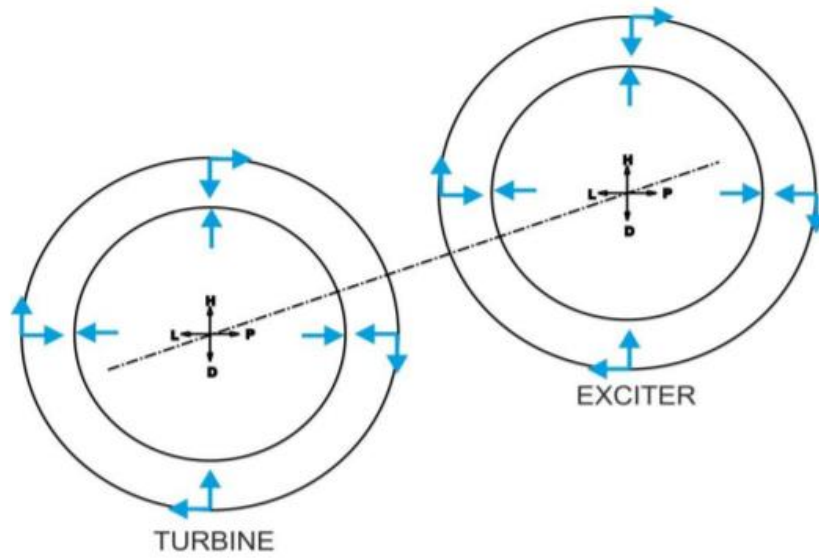
Elektrické příčiny vibrací mohou být:

- Vadná konstrukce stroje (např. vliv drážkování, přesycení, atd.)
- Ložiskové proudy
- Nesymetrie (poškození statoru, poškozená tyč nebo vinutí rotoru)
- Zkratky v magnetickém obvodu

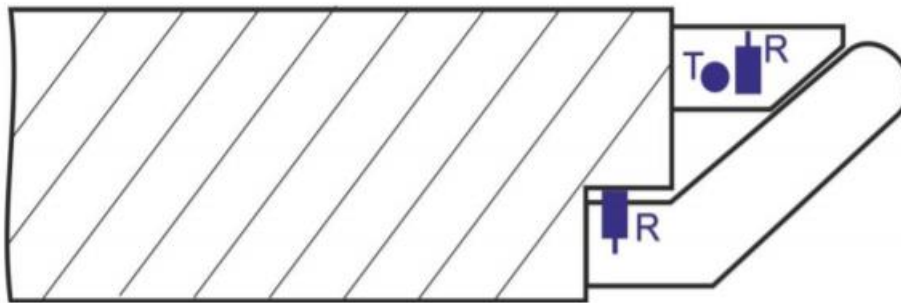
2.3.8 Vibrace čel vinutí

Vibrace čel statorového vinutí mohou při provozu způsobovat, nebo být příčinnou poruchy v hydro a turboalternátorech. Proto bývají tyto vibrace monitorovány a vyhodnocovány. Vibrace jsou obvykle snímány senzory – akcelerometry, jejichž výstupem je elektrický signál přímo úměrný velikosti výchylky vibrace snímané a detekované senzorem akcelerometru. Akcelerometry používané v těchto aplikacích jsou speciální typy s optickými vlákny, které neobsahují žádné kovové části a neovlivňují tak rozložení elektrického potenciálu v čelech vinutí při jejich připojení do stroje. Protože akcelerometry dokáží měřit vibrace pouze v jednom směru, zapojují se do každé snímané lokality akcelerometry dva. To umožňuje poměrně přesnou představu o chvění zkoumaného místa, o směru a velikosti vibrací [7].

Pro měření vibrací čel se využívají snímače, rozmístěné nejčastěji do čtyř bodů v čelní oblasti. Takové osazení je patrné z (Obr. 2.26). Zde jsou navíc čela, pro přesnější měření, osazena snímači pro radiální a tangenciální směr na straně turbíny a budiče (exciter), a snímači chvění kostry v radiálním směru [18].



Obr. 2.26 Rozmístění snímačů na čelech vinutí [18]

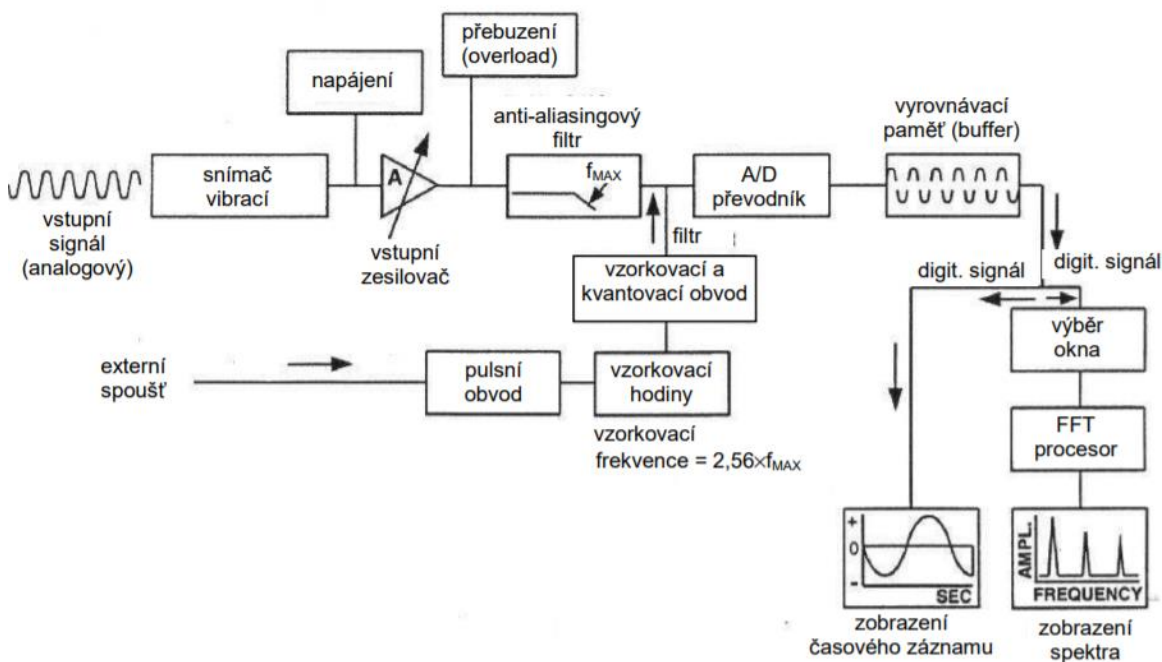


Obr. 2.27 Rozmístění snímačů čel a vnitřní kostry pro tangenciální a radiální směr [18]

3 Analyzátoři vibrací

Analyzátoři vibrací se v současné době stávají čím dál více rozšířeným nástrojem pro diagnostiku poruch točivých strojů. Jedná se o sofistikovaný systém, který dokáže zpracovat měřený signál a zobrazit na displeji jeho průběh, případně jeho spektrum. V tomto zobrazení je pak možné odhalit vady, které způsobují vibrace stroje.

Na (Obr. 3.1) je znázorněno základní schéma analyzátoru používaného k měření vibrací. Analogový signál ze snímače vibrací prochází vstupním zesilovačem, antialiasingovým filtrem a A/D převodníkem, kde je digitalizován a vstupuje do zásobníku dat (bufferu). Odtud lze výstup zobrazit jako časový záznam, nebo jej dále zpracovat Fourierovou transformací a získat tak frekvenční spektrum [29]. Jednotlivé techniky zpracování signálu budou podrobněji popsány v následujících kapitolách.



Obr. 3.1 Schéma analyzátoru vibrací [29]

3.1 Techniky zpracování měřeného signálu

V časovém signálu je ukryto mnoho informací: vlastní i budící frekvence, vady součástí, např. ložisek, ozubených kol a jiných. Z hlediska větší přehlednosti je proto výhodnější převést časový signál do frekvenční oblasti. Vyhledávání frekvenčních složek se provádí několika způsoby:

Pasivní metody

Buzení harmonickým signálem – měřený objekt je vybuzen elektricky, či mechanicky harmonickým signálem s různou frekvencí. Odezvou na tento signál je po ustálení opět harmonický signál (u lineárních členů) s pozměněnou amplitudou a fází vůči vstupnímu signálu.

Rázem – měřený objekt je vybuzen rázem, který obsahuje široké spektrum frekvencí a odezva se pak analyzuje.

Aktivní metoda

Měřený objekt provádí svoji činnost a při ní se projevují jeho různé vlastnosti. Ke zpracování signálu se využívá moderní výpočetní technika (úzkopásmové filtry, aj.) [30].

3.2 Fourierova transformace

Jak již bylo zmíněno Fourierovou transformací lze získat frekvenční spektrum, které slouží pro podrobnější analýzu vibrací. Současné analyzátory obvykle nepracují se spojitou časovou vlnou, ale naměřený signál projde na vstupu do analyzátoru A/D převodníkem, který zaznamená časovou vlnu, jako posloupnost N diskretních hodnot s pravidelnými časovými rozestupy v intervalu T . Tento postup se nazývá diskretizace. Diskretizovanou funkci $x(t)$, která je definovaná na množině N jednotlivých časových okamžiků t_k ($k=1, N$) můžeme zapsat jako konečnou Fourierovu řadu:

$$x_k = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left(a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) \right); k = 1, N \quad (3.1)$$

Fourierovy koeficienty je možné zapsat ve tvaru fáze c_n a Φ_n a konečnou Fourierovu řadu lze pak zapsat jako:

$$x_k = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left(c_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T} + \varphi_n\right) \right) \quad (3.2)$$

Tento tvar Fourierovy transformace se nazývá diskretní Fourierova transformace (DFT) a vzniklá Fourierova řada se označuje jako frekvenční spektrum [29].

3.2.1 Algoritmus rychlé Fourierovy transformace

Pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) získáme stejné výsledky jako při použití diskrétní Fourierovy transformace (DFT), ale v mnohem kratším časovém intervalu. Podstatou metody FFT je volba zvláštní délky záznamu a to $N = 2^m$, kde m je přirozené číslo. Tato volba, která je v angličtině označována radix 2, vede k délkám záznamů např. $N = 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192$, které jsou dosti blízké dekadické řadě. Dále popisovaný algoritmus byl vytvořen Cooleyem a Tukeyem a je nazýván „algoritmem de-cimování v čase“ nebo též „algoritmem DIT“. Vzorec pro přímou transformaci lze rozdělit na dvě části, a to se sudým a lichým pořadím podle rovnice (3.3) [31].

$$F_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cdot e^{-\frac{j2\pi ki}{N}} = \sum_{v=0}^{N/2-1} x_{2v} \cdot e^{-\frac{j2\pi kv}{N}} + e^{-\frac{j2\pi k}{N}} \sum_{v=0}^{N/2-1} x_{2v+1} \cdot e^{-\frac{j2\pi kv}{N}} \quad (3.3)$$

Jestliže se obrazy sudých a lichých vzorků označí zvlášť:

$$F_{N/2}\{x_{2v+1}\} = H_k \quad (3.4)$$

$$F_{N/2}\{x_{2v}\} = G_k \quad , k = 0, 1, \dots, N/2-1$$

Pak lze původní obraz vypočítat podle vzorce:

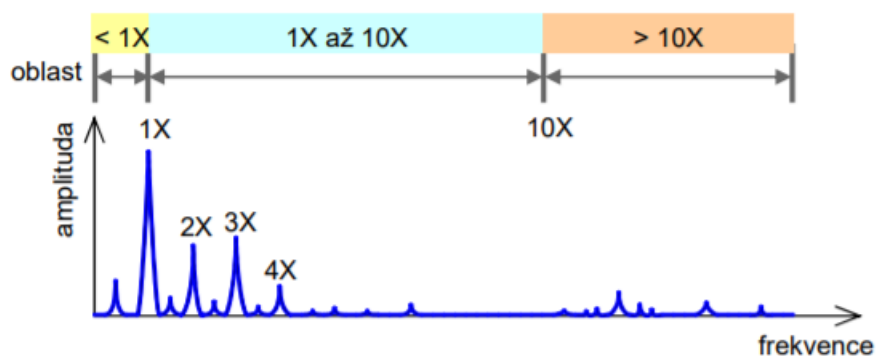
$$F_k = G_k + e^{-\frac{j2\pi k}{N}} \cdot H_k \quad , k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.5)$$

Dílčí posloupnosti lze považovat za samostatné záznamy o délce $N/2$. Se zavedením pomocné veličiny $W = e^{-\frac{j2\pi k}{N}}$ lze předchozí vzorec rozepsat do dvou vztahů [31]:

$$\begin{aligned} F_k &= G_k + W^k \cdot H_k \\ F_{k+N/2} &= G_k - W^k \cdot H_k \quad , k = 0, 1, \dots, N/2-1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.3 Analýza spektra

K tomu abychom dokázali z frekvenčního spektra vyčíst informace o stroji, je nutné znát frekvence, které se v naměřeném spektru pravděpodobně objeví (otáčkové, zubové, ložiskové, apod.). Kromě nich obsahuje spektrum navíc řadu diskrétních čar a někdy i oblasti zvýšeného šumu. Otáčková frekvence hřídele bývá označována 1X a její celé násobky pak 2X, 3X, atd. Pro snazší analýzu je vhodné si spektrum rozdělit do tří oblastí, ve kterých se vyskytují různé příznaky. Rozdělení je patrné z (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Rozdělení spektra na významné oblasti [29]

- Oblast do frekvence 1X – špičky v této oblasti bývají obvykle velmi nebezpečné (např. víření oleje v ložisku).
- Oblast do 10X – zde se obvykle vyskytují příznaky všech základních mechanických závad (např. nevyváženost, nesouosost, atd.)
- Oblast nad 10X – v této oblasti se vyskytují příznaky závad valivých ložisek, ozubení, apod.

V praxi se obvykle vytvoří tzv. referenční spektrum v době, kdy se předpokládá, že stroj pracuje bez závad (při výrobě, nebo po opravě). A za provozu jsou pak prováděna měření, která jsou s tímto spektrem srovnávána a vyhodnocují se případné změny [29].

3.4 Alternativní metody zpracování signálu

Kromě časových průběhů a FFT spekter mohou být vibrační signály zpracovávány i jinými metodami, které umožňují lepší analýzu speciálních typů zařízení a podmínek. Zpracování signálu několika metodami navíc umožňuje více způsobů analýzy signálů a lze tak lépe určit odchylky od „normálu“ [32].

3.4.1 Řádová analýza

Řádová analýza je vhodná na měření cyklicky pracujícího stroje. Na rozdíl od FFT vyžaduje vícekanálové měřidlo, a to minimálně dvoukanálové (měřený signál a signál otáček). Časový záznam zobrazuje závislost měřené veličiny na otočení a výsledné spektrum ukazuje závislost amplitudy na násobcích otáčkové frekvence. Nejčastěji se používá pro diagnostiku převodovek nebo na vyvažování [33].

3.4.2 Obálková metoda

Je vhodná zejména pro analýzu ložisek, které vytvářejí signály s mnohem nižší amplitudou a vyššími frekvencemi, než vibrační signály buzené otáčkami nebo konstrukcí. Cílem obálkování je odfiltrovat vibrační signály s nízkou frekvencí a zvýraznit signály, vznikající díky poruše ložisek. Vznikne-li trhlina, po které se převalují valivé části ložiska,

je obálkování efektivní metoda, která dokáže poškozenou oblast odhalit již v raném stádiu [32].

3.4.3 SEE metoda

Technologie SEE (Spectral Emitted Energy) dokáže detekovat závady ložisek a převodů ozubených kol měřením akustické emise generované kovem. Tato akustická emise se pohybuje ve frekvenční oblasti 150 – 500 kHz. Nevýhodou tohoto měření je, že snímač může zaznamenat akustickou emisi z blízkého okolí a přičíst ji k hodnotám naměřeným na ložisku (např. akustická emise převodovky) [32]. Pokud nejsou k dispozici data ke srovnání, použijí se pro posouzení stavu ložisek orientační hodnoty z následující tabulky:

Tab. 3.1 Orientační hodnoty hodnocení signálu SEE [32]

| | |
|----------|-------------------------------------|
| 0 – 3 | Žádná identifikovatelná závada |
| 3 – 20 | Problém s mazáním, znečištění apod. |
| 20 – 100 | Defekt ložiska |
| 100 + | Vážná závada ložiska |

Uvedená čísla jsou ve stupnici SEE

Závěr

Diagnostická měření tvoří nedílnou součást provozu elektrických točivých strojů. Jejich praktický význam spočívá v prodloužení životnosti a spolehlivosti strojů a v důsledku toho vede k minimalizaci výdajů. Hlavní důraz je kladen na diagnostiku izolace, protože se jedná o nejslabší článek stroje s největší pravděpodobností poruch. Zároveň jde o část stroje, která nejrychleji podléhá degradaci, a je proto nutné daná měření provádět periodicky.

Z hlediska včasného odhalení poruch hraje významnou roli on-line diagnostika. Její nespornou výhodou je schopnost detekovat poruchu ihned v zárodku a předejít tak větším škodám. Navíc měření probíhá přímo za provozu, a je tedy minimalizována doba odstávek. Z těchto důvodů by bylo vhodné do budoucna rozvíjet zejména tuto oblast. Přesto nelze opomenout ani off-line diagnostiku. Ta je sice prováděna na odstaveném a často i rozebraném stroji, ale díky tomu není omezena provozními parametry napájecí soustavy. To je důležité zejména pro zkoušky zvýšeným napětím.

Tato bakalářská práce obsahuje souhrn běžně používaných diagnostických metod. Měla by sloužit zejména jako materiál k seznámení s daným tématem a případně jako návod k provádění diagnostických měření v praxi.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SAMEK, Josef. *Identifikace poruch u vinutí střídavých strojů během výroby* [online]. 2014 [cit. 2019-03-06]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87501
- [2] CHMELÍK, Karel. *Problémy provozu a údržby elektromotorů*. [online]. 2013 [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/index.php?>
- [3] BERNAT, Petr. *Negativní vlivy měničů frekvence na asynchronní motor* [online]. Ostrava, 2006 [vid. 2019-03-06]. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/diagnostika/Disertacni_prace_autoreferat.pdf
- [4] ČSN EN 60085. *Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení*. 2008
- [5] MARTINOVSKÝ, Miloš. *Dielektrická absorpce a její aplikace v diagnostice elektrických zařízení* [online]. 2015 [cit. 2019-03-06]. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18771/1/Martinovsky_DP_150506.pdf
- [6] BAČKOVSKÝ, Pavel. *Simulace absorpčních charakteristik dielektrických materiálů* [online]. 2010 [cit. 2019-03-06]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30297426.pdf>
- [7] MENTLÍK, Václav et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [8] JUCHELKA, Roman. *Synchronní generátor pracující do samostatné zátěže*. 2014. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] VALA, Zdeněk. *Stejnoseměrné elektromotory* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: http://www.sossoukyjov.cz/data/File/VY_32_INOVACE_6a13.pdf
- [10] ŠTAFTA, Jiří. *Analýza a inovace stejnosměrných motorků* [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-03-06]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30282302.pdf>
- [11] ŠIMON, Josef. *BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu - Časopis Elektro - Odborné časopisy* [online]. 2011 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>
- [12] NOVÁK, Lubomír. *Vyvažování tuhých rotorů* [online]. 2004 [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04049/index.html>
- [13] VALENT, Ondrej. *Jak zjistit a odstranit nejčastější příčiny poškození elektromotorů* [online]. 2016 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/jak-zjistit-a-odstranit-nejcastejsi-priciny-poskozeni-elektromotoru/>
- [14] BARTÁK, Alexandr, MRAVINÁČ, Luděk, NEUMANN, Jacek a VAŘÁK, Jan. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984.
- [15] SKŘIVÁNEK, Miroslav a POLÍVKA, Emil. *Provozní spolehlivost a údržba strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1974.
- [16] *Diagnostika za provozu a mimo provoz* [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: [52](http://www.umel.feec.vutbr.cz/bdts/index.php/multimedialni-ucebnice-menu/diagnosticky-system/9-multimedialni-ucebnice/zakladni-pojmy/5-diagnostika-</div><div data-bbox=)

- za-provozu-a-mimo-provoz
- [17] ROZSÍVAL, Oldřich. *Online monitoring izolačních systémů točivých strojů velkých výkonů* [online]. 2015 [cit. 2019-05-17]. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18725/1/vBP_Oldrich_Rozsival.pdf
- [18] LACHMAN, Kryštof. *Měření chvění čel vinutí velkých generátorů* [online]. 2016 [cit. 2019-05-20]. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/23094/1/BP_Lachman.pdf
- [19] STONE, C. Greg et al. *Electrical Insulation for Rotating Machines*. 2. vyd. Wiley-IEEE Press, 2014. ISBN 978-1-118-89229-9.
- [20] PAVLÍK, Josef. *Vybrané problémy z diagnostiky izolačních systémů točivých strojů* [online]. 2011 [cit. 2019-05-19]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=44160
- [21] DOLEŽAL, Pavel. *Profylaktika izolačního systému točivých strojů, především turbogenerátorů a vn motorů* [online]. 2013 [cit. 2019-03-31]. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12472833-Zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-elektrotechnicka-katedra-elektromechaniky-a-vykonove-elektroniky-bakalarska-prace.html>
- [22] TRNKA, P. a SVOBODA, M. *Diagnostika výbojové činnosti v širším frekvenčním spektru* [online]. 2011 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/594/1/r5c1c3.pdf>
- [23] PRSKAVEC, Ladislav. *Částečné výboje ve strojích točivých* [online]. 2002 [cit. 2019-04-10]. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: http://poli.feld.cvut.cz/~xprskave/pdf/2002_06_PVCZ_Castecne_vyboje_ve_strojich_tocivych.pdf
- [24] SIKORA, Martin. *Diagnostika vybraného elektrického stroje* [online]. 2015 [cit. 2019-05-22]. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/108650/SIK0054_FEI_N2649_3907T001_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [25] BERNAT, Petr a VÁCLAV, Čech. *Provozní diagnostika elektrických zařízení* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/diagnostika/DIAG96.pdf>
- [26] ŠTOLFA, Radim. *Experimentální ověření jednotlivých typů částečných výbojů* [online]. 2015 [cit. 2019-04-22]. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66502/F3-BP-2016-Stolfa-Radim-MULLEMIR05271506.pdf?sequence=-1>
- [27] *Měření elektrických a teplotních parametrů motorů a pohonů* [online]. 2013 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: http://www.udrzbapodniku.cz/hlavni_menu/artykuly/artikul/article/mereni-elektrickych-a-teplotnich-parametru-motoru-a-pohonu/
- [28] SMETANA, Jaroslav. *Měření při údržbě pohonů a motorů (10. část) Jak a kde pomůže termovize při údržbě pohonů a motorů* [online]. 2016 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/mereni-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru-10-cast-jak-a-kde-pomuze-termovize-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru--2112>
- [29] BILOŠ, Jan a BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika* [online]. 2012 [cit. 2019-05-14]. VŠB - Technická univerzita Ostrava.

- Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/BilosovaVIBDI_skrpta.pdf
- [30] *Zpracování měřeného signálu* [online]. [cit. 2019-05-14].
Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/VYUKA/Data1/MT/obecne-prednasky/Zpracovanisignalu.pdf>
- [31] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů z mechanických systému užitím FFT* [online]. 1997 [cit. 2019-05-15]. ISBN 80-901936-1-7. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~tum52/publications/Tuma-kniha1.pdf>
- [32] ŽIVOTSKÝ, Petr. *Chybové frekvence ložisek* [online]. 2008 [cit. 2019-05-29]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6694
- [33] *Řádová analýza vs. FFT* [online]. [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/radova-analyza-vs-fft>