

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Základní diagnostické ukazatele izolačních systémů

vedoucí práce: Ing. Jiří Boček

2011

autor: Ernest Nagy

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ernest NAGY**

Osobní číslo: **E08B0251P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Základní diagnostické ukazatele izolační systémů**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište možné přístupy k diagnostice elektrických strojů.
2. Uveďte postup diagnostiky výkonových transformátorů.
3. Uveďte postup diagnostiky točivých strojů.
4. Podrobněji popište jednotlivé diagnostické veličiny a způsoby jejich měření.

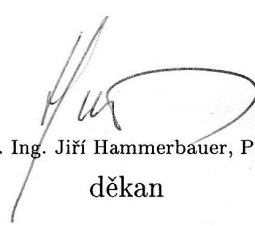
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

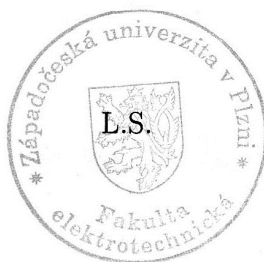
Seznam odborné literatury:


1. Mentlík, V. a kol.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008
2. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN 2006
3. Elektronické informační zdroje

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Boček**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **18. října 2010**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2010

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá technickou diagnostikou elektrických zařízení. Jsou zde popsány základní části diagnostikovaného systému, jednotlivé diagnostické veličiny a způsoby jejich měření. Dále obsahuje poznatky o diagnostice transformátorů, kde jsou blíže vysvětleny způsoby měření základních veličin a popsány napěťové zkoušky vinutí. V další části práce je uvedena diagnostika točivých strojů, která je rozdělena na diagnostiku malých a středních točivých strojů a na diagnostiku velkých točivých strojů. Malé a střední točivé stroje jsou zde zmíněny pouze okrajově. Podrobněji je popsána diagnostika velkých točivých strojů, u nichž jsou popsány kontroly vinutí, popisy měření a zkoušky na vinutích při střídavém napětí 50Hz.

Klíčová slova

Diagnostika, on-line, off-line, ztrátový činitel, permitivita, polarizační index, transformátor, kapacita, izolační odpor, napěťová zkouška, pulzní napětí, točivý stroj, izolační odpor statorového vinutí, izolační odpor rotorového vinutí, statorové vinutí, rotorové vinutí

Abstract

This bachelor thesis deals with the technical diagnostics of electrical devices. The basic parts of diagnosed system, the particular diagnostic values and the ways of their measurement are described here. Further on it contains some pieces of knowledge on the diagnostics of transformers, where the measurement procedures of the basic values are explained and the winding voltage examinations are described. There are the diagnostics of rotating machines presented in the following part of the thesis, which is divided into the diagnostics of small and medium-sized rotating machines, and the big rotating machines. The small and medium-sized rotating machines are only mentioned marginally. The diagnostics of big rotating machines are described in more details. The winding check-ups, the measurement descriptions and the examinations on winding at the alternating voltage of 50 Hz are given there.

Key words

Diagnostics, on-line, off-line, dissipation factor, permittivity, polarization index, transformer, capacity, isolating resistance, voltage examination, pulse voltage, a rotating machine, isolating resistance of stator winding, isolating resistance of rotor winding, stator winding, rotor winding.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 25. 9. 2011

Ernest Nagy

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiří Boček za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
ÚVOD	11
1 DIAGNOSTIKA V ELEKTROTECHNICE	12
1.1 ČÁSTI DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU	13
1.2 SYSTÉM ON-LINE.....	14
1.3 SYSTÉM OFF-LINE	15
1.4 DIAGNOSTICKÉ SIGNÁLY.....	15
2 ZÁKLADNÍ POJMY, METODY A VELIČINY V DIAGNOSTICE	16
2.1 METODY PRO MĚŘENÍ ODPORU	17
2.1.1 Voltampérová metoda	17
2.1.2 Wheatstonův můstek.....	17
2.2 POLARIZAČNÍ INDEXY:.....	18
2.3 REDUKOVANÉ RESORPČNÍ KŘIVKY (RRK)	18
2.4 ZTRÁTOVÝ ČINITEL A PERMITIVITA.....	19
2.5 ELEKTRICKÁ PEVNOST	20
3 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ	21
3.1 PROVOZNÍ DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ	23
3.1.1 Měření izolačního odporu, časové konstanty a polarizačního indexu.....	23
3.1.2 Měření ztrátového činitele a kapacity	24
3.1.3 Měření poměru kapacit C_2/C_{50}	26
3.1.4 Měření částečných výbojů.....	26
3.2 NAPĚŤOVÉ ZKOUŠKY VINUTÍ.....	28
3.2.1 Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	28
3.2.2 Zkoušky indukovaným napětím.....	28
3.2.3 Zkouška elektrické pevnosti vnitřní izolace spínacími impulsy	29
3.3 ON-LINE DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ	30
4 DIAGNOSTIKA MALÝCH A STŘEDNÍCH TOČIVÝCH STROJŮ	32
4.1 ZKOUŠKY MALÝCH A STŘEDNÍCH TOČIVÝCH STROJŮ	33
5 DIAGNOSTIKA VELKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ	35
5.1 VIZUÁLNÍ KONTROLA.....	36
5.2 POPIS MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU STATOROVÉHO VINUTÍ	37
5.3 POSTUP PŘI MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU ROTOROVÉHO VINUTÍ	38
5.4 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE TGA , KAPACITY A ČASOVÉ KONSTANTY.....	39
5.5 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ STATORU GALVANICKOU METODOU	40
5.6 ZKOUŠKY STATOROVÉHO VINUTÍ STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM 50HZ.....	41
5.7 ZKOUŠKA ROTOROVÉHO VINUTÍ STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM 50HZ	41
ZÁVĚR	43
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	44

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1-1: ZÁKLADNÍ SOUVISLOSTI PŘI DIAGNOSTICE ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ [1]	13
OBRÁZEK 2-1: MĚŘENÍ ODPORU POMOCÍ VOLTAMPÉROVÉ METODY [5]	17
OBRÁZEK 2-2: WHEATSTONŮV MŮSTEK [7]	17
OBRÁZEK 2-3 A) PŘÍLIŠ DLOUHÝ ZVOLENÝ INTERVAL, B) OPTIMÁLNÍ VOLBA ČASOVÝCH MEZÍ [1]	18
OBRÁZEK 2-4 SCHERINGŮV MŮSTEK[5].....	19
OBRÁZEK 3-1 SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ ZDÁNLIVÉHO IZOLAČNÍHO ODPORU [9].....	24
OBRÁZEK 3-2: ZAPOJENÍ ELIMINUJÍCÍ KAPACITU MEZI VINUTÍM VYŠŠÍHO A NIŽŠÍHO NAPĚTÍ [9]	25
OBRÁZEK 3-3: VZÁJEMNÉ KAPACITY TROJVINUŤOVÉHO TRANSFORMÁTORU [1].....	25
OBRÁZEK 3-4: ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ C_2/C_{50} [1]	26
OBRÁZEK 3-5: OBVOD PRO MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ [14]	27
OBRÁZEK 3-6: ČASOVÝ PRŮBĚH ZKUŠEBNÍHO NAPĚTÍ [9]	29
OBRÁZEK 3-7: SCHÉMA SDĚLOVACÍ SOUSTAVY MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU[1].....	30
OBRÁZEK 3-8: BLOKOVÉ SCHÉMA MONITOROVACÍHO SYSTÉMU[1].....	30
OBRÁZEK 5-1: ZÁVISLOST IZOLAČNÍHO ODPORU NA ČASE MĚŘENÁ PŘI RŮZNÝCH TEPLOTÁCH VINUTÍ [11]	37
OBRÁZEK 5-2: SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU STATOROVÉHO VINUTÍ [1]	38
OBRÁZEK 5-3: SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU ROTOROVÉHO VINUTÍ [1].....	39
OBRÁZEK 5-4: OBVOD NA MĚŘENÍ ČASOVÉ KONSTANTY A ČINITELE TGA [1]	39
OBRÁZEK 5-5: SCHÉMA PRO MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ STATOROVÉHO VINUTÍ[1]	40

Seznam symbolů

T [s]	doba periody
R_{60}, R_{15} [Ω]	odpory v 60 a 15 sekundě do přiložení napětí
i_{15}, i_{60} [A]	odpovídající absorpční proudy po přiložení napětí
i_{∞} [A]	vodivostní ustálené proudy
$\operatorname{tg} \delta$ [-]	ztrátový činitel
ϵ_r [-]	relativní permitivita
$U_{\text{zkušeb}}$ [V]	zkušební napětí
R_{iz60} [M Ω]	izolační odpor určený v čase 60 sekund po zapojení měřicího napětí
C_{50} [μ F]	kapacita izolace změřená při 50Hz
$C_1, \operatorname{tg} \delta_1$	hodnoty změřené při jedné polaritě zdroje – rovnice 8, 9
$C_2, \operatorname{tg} \delta$	hodnoty změřené při opačné polaritě zdroje – rovnice 8, 9
P_{i1}	jednominutový polarizační index
K	kelvin
U_n	sdužená hodnota jmenovitého napětí
VN	vysokonapěťové vinutí transformátoru – obr. 3-1
NN	vinutí nízkého napětí – obr. 3-1
K	kostra transformátoru – obr. 3-1
G	uzemněná připojovací spojka – obr. 3-1

Úvod

V dnešní době jsou stále více kladeny nároky na přesnost a kvalitu. Poruchy elektrických zařízení, vznikající při poškozené izolaci, vedou k značným finančním ztrátám a v některých případech mohou vést k ohrožení lidského života. Proto se v této práci zaměřuji na technickou diagnostiku, která se zabývá metodami pro zajištění bezporuchového stavu. Tyto metody zkoumají stav izolace elektrických zařízení a předpovídají pravděpodobnou dobu života izolace. Hlavním úkolem diagnostiky je zamezit poruše a neplánovaným odstávkám stroje.

Diagnostika pomáhá odhalit různé defekty, které by mohli vést ke zničení stroje, a následně by mohlo dojít k přerušení provozu. Diagnostika se taky využívá při opravách a odstraňování příčin poruch malých a středních točivých strojů a k zamezení odstávek velkých transformátorů.

1 Diagnostika v elektrotechnice

Diagnostika je disciplína, která v roli elektrotechniky hraje velmi důležitou roli. Slovo diagnostika je odvozené od řeckého slova **diagnosis** znamenající rozpoznání. Odtud vysvětlení významu slova diagnostika – *určení stavu*. V našem elektrotechnickém světě se jedná o diagnostiku elektrotechnologickou. Elektrotechnologická diagnostika se týká všech částí výroby elektrických zařízení. Informace, které takto pojatá diagnostika zajišťuje, jsou nezbytné jak v oblasti prvků, tak podsystémů i systémů elektrických zařízení. Takováto diagnostika se podílí na vzniku a provozu strojů a přístrojů v elektrotechnice. Je nutné respektovat úlohu řídicích procesů.

Velmi důležitou roli zde sehrává materiálové inženýrství. Je velmi důležité zvolit správný materiál pro dané elektrické zařízení, aby mohlo bez problémů plnit svůj účel a požadavky na něj kladené. Vycházíme ze souvislosti struktura – vlastnosti. Je velmi důležité uvědomit si, jaké požadavky na daný materiál máme a dále můžeme podle znalostí struktury vyhledanou látku modifikovat tak, aby vzniknuvší materiál odpovídal zadání. Nutností je znát informace o parametrech látky, o jejich vývoji a o interakcích při těchto procesech probíhající.

Na úrovni vstupu prvků – materiálů – do vlastní výroby jsou nutné informace o tom, zda všechny vlastnosti materiálů jsou v požadovaných mezích s přípustnými tolerancemi. Výše popsané úkoly jsou nezbytnou náplní elektrotechnologické diagnostiky.

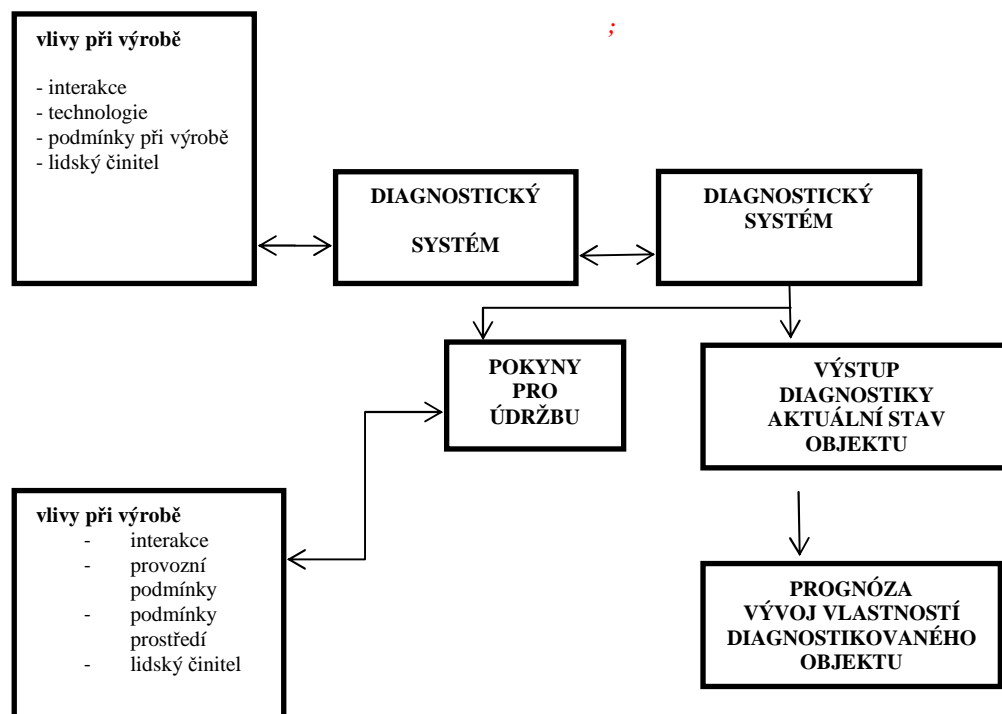
Diagnostika má význam u vstupní kontroly, u mezioperační kontroly a u výstupní kontroly. Vstupní oblast a mezioperační oblast je oblast, ve které se vyloučí z dalšího výrobního procesu vadné díly což má nejen značný ekonomický efekt, ale zabrání se dalšímu postupu výrobku se špatnou částí. Výstupní kontrola se provádí z důvodu odstranění konečných vad na výrobku a tím i omezení záručních řízení a oprav na minimum.

Dopady diagnostiky je nutné dále spatřovat v rozboru příčin poruch, které nastaly při provozu. Poruchy, které nastaly při provozu, jsou zaznamenávány v databázích a při rozboru jejich příčin vyplývají nesmírně cenná fakta a informace. Jedná se zejména o návrhy směřující ke změnám konstrukce dotyčného zařízení. To nastává v případě, že opakující se poruchy ukazují na nedostatky v tomto směru. Díky diagnostice zařízení dochází k eliminaci prvků a částí, které byly příčinou opakovaných poruch. Diagnostika taky může ukázat na chyby ve vlastní výrobě, poukáže-li na opakující poruchy, které lze charakterizovat jako následek chybného výrobního procesu. Rozbor má za následek doporučení změn v technologickém procesu výroby zařízení a změnu pracovního prostředí, v němž pracovník pracuje.[1]

Diagnostika nejen že dokáže určit a lokalizovat místo poruchy, ale taky umí vydat operativní instrukce pro údržbu vedoucí k odstranění poruchy. Provozní diagnostika sleduje život technických zařízení a v této oblasti má význam nejen při sledování vývoje parametrů zařízení, ale také k ukládání dat. Tyto informace pak slouží ke zpracování předpovědi chování systému v dalším období. V dnešní době klademe důraz na dva základní požadavky. Prvním je pořizovací cena a druhým je pohotovost zařízení. [1]

1.1 Části diagnostického systému

Na obrázku 1-1 níže jsou naznačena souvislosti při diagnostice elektrických zařízení. Hlavními prvky tohoto procesu je diagnostikovaný objekt a diagnostický systém.



Obrázek 1-1: Základní souvislosti při diagnostice elektrických zařízení [1]

Z obrázku 1-1 je patrné, že na *diagnostikovaný objekt* působí jak vlivy při výrobě, tak i provozní vlivy. Diagnostický systém pak zachycuje jeho stav. Výstupy diagnostiky mají za úkol zobrazení okamžitého stavu diagnostikovaného objektu a v případě potřeby vydávají pokyny pro údržbu. Diagnostikovaný objekt vznikl spojením funkčních prvků a podsystémů. Ty mají vlastní strukturu. Na tyto sledované diagnostické objekty působí mnoho vnějších podnětů, na které objekt reaguje svými reakcemi – výstupními signály. [1]

Diagnostikovaný objekt může být v bezporuchovém stavu, kdy bez problémů plní všechny své funkce. Opakem této situace je poruchový stav, kdy za daných podmínek neplní požadovanou funkci. Pokud jsou funkce plněny například při zhoršených podmínkách tak se bavíme o provozuschopném stavu. [1]

Diagnostická veličina je nositelem informace o technickém stavu objektu. Jedním z největších problémů v diagnostice je přímé měření vnitřních strukturních a procesních parametrů bez demontáže objektu. Proto nám nezbyvá nic jiného než se na diagnostikovaném objektu spokojit s přístupnými výstupními prvky systému, kde požadované měření můžeme provést. Měřitelné strukturní parametry musí mít charakter numerických proměnných. Pokud mají charakter nenumerických proměnných, pak musíme provést transformaci nenumerických proměnných na numerické. [2]

Důležité momenty diagnostického šetření

Nejprve je důležité diagnostikovaný objekt řádě prostudovat v poruchovém i bezporuchovém stavu. Dále je nutné poznat všechny charakteristiky zařízení, získat možná matematická vyjádření průběhů měřených parametrů.

K zobrazení poruchových i bezporuchových stavů je nutné sestavení diagnostikovaného objektu. Musíme řádně prozkoumat a vyzkoušet všechny stavy, které při provozu mohou nastat. Snížit počty kontrol na minimum a nastavit diagnostické operace na optimální úroveň. Obvykle modelování provádíme v jedné úrovni, ale pokud máme složitější objekt, tak je téměř nutností používat víceúrovňové modelování. Diagnostické modely slouží k simulaci jednotlivých poruch, výběru a volbě vhodných parametrů a diagnostických veličin, k návrhu a ověřování diagnostických algoritmů. [1]

1.2 Systém on-line

V systému online dochází k monitorování objektu po celou dobu jeho provozu. Zařízení nemusíme během měření vypínat. Sledujeme tedy stav objektu s průběžným vyhodnocováním mezních stavů objektu. U dokonalejších systémů je doplněno vyhodnocováním trendu postupných poruch. Provozní systémy on-line vyhodnocují technický stav zařízení při jeho provozu a využívají k tomu funkční diagnostiky. Funkční diagnostika využívá ke stanovení diagnózy provozních signálů. On-line systémy, které jsou trvale připojeny k diagnostikovanému objektu, nazýváme monitorovací systémy. Monitorování je trvalé sledování stavu objektu s průběžným vyhodnocováním stavů objektu. Výhodou je nepřetržité sledování stavu zařízení, umožňující rychlou reakci na možné změny sledovaných parametrů. [2, 8]

1.3 Systém off-line

Nejčastěji se pod pojmem off-line rozumí systémy, u nichž se diagnostika provádí testem a v době, kdy je objekt vypnutý. Diagnostikování se u tohoto systému rozděluje do dvou časových etap. Za provozu se malým přenosným diagnostickým zařízením provede měření na diagnostikovaném objektu a zároveň se vyhodnotí případné překročení přípustných mezí. Později se do paměti přenosného zařízení uloží částečně zpracovaná data a vlastní zpracování naměřených dat (vyhodnocení stavu objektu, porovnání s minulým stavem a prognózy se v časovém odstupu realizuje mimo diagnostikovaný objekt na centrálním počítači). [2]

1.4 Diagnostické signály

V dnešní době hlavně převažuje číslicové zpracování před analogovým hlavně díky dostupnosti levných a výkonných signálových procesorů., jednočipových mikropočítačů atd.

Přednosti číslicové formy - možnost změny algoritmu je jednodušší

- absolutní stálost číslicových parametrů algoritmů

- snadný přenos signálů v číslicové podobě

Signály, jejichž časový vývoj odpovídá určitému funkčnímu předpisu, se nazývají *deterministické* (jejich okamžitá hodnota v následujícím okamžiku je předem známá – je určena přesně definovanou časovou funkcí) a můžeme je rozdělit do následujících skupin: [3]

- kvaziperiodický signál složen z harmonických signálů o frekvencích, *kteřé jsou na rozdíl od periodických signálů, kde jsou celistvými násobky pouze jedné základní frekvence*, násobky nejméně dvou základních frekvencí a tyto signály jsou současně v poměru určeném iracionálním číslem
 - přechodný signál jejich nenulová část je časově omezena, jedná se o přechodné děje odezvy na impulzní vybuzení apod.
 - pseudonáhodný signál periodické signály mají svými statickými vlastnostmi připomínat signály stochaické, perioda musí být tak veliká, aby se z pohledu určité délky signálu jevíly jako náhodné
- ***náhodné (stochaické) signály, které jsou popsány statickými veličinami:*** [3]
- stacionární signály střední hodnoty se s časem nemění a jsou nezávislé na části vzorku užitá k měření
 - nestacionární signály statické vlastnosti se v průběhu mění cyklostacionární signály – jsou to například náhodné signály vibrací motorů

stacionární signály – Fourierova řada je základem pro znázornění všech periodických procesů a periodickou funkci můžeme definovat jako $y(t)=y(t+T)$. Každý periodický děj lze znázornit Fourierovou řadou $y(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega t - \varphi_n)$. U takového děje je kmitočtové spektrum diskrétní, obsahuje základní kmitočet, který je roven převrácené hodnotě periody a dalších kmitočtů, které jsou celistvými násobky základní frekvence. Jejich amplitudy jsou koeficienty c_n Fourierovy řady. Vztah $y=A*\sin\omega t$ vyjadřuje časový průběh harmonického kmitu a tento vztah má diskrétní kmitočtové spektrum, sestávající z jediného kmitočtu, rovného převrácené době periody o amplitudě A. Chceme-li složit dva a více harmonických průběhů najednou a najdeme-li periodu, jež by byla nejmenší společný násobek period jednotlivých kmitání, tak výsledný průběh bude periodický. Pokud se tak nestane, tak můžeme říci, že poměr jejich period musí být dán poměrem celých čísel. [4]

nestacionární signály – neměnnost statických vlastností v čase. Hranice mezi stacionárním a nestacionárním signálem není vůbec pevná a určení hranic mezi těmito signály je nutné určovat s přihlédnutím ke zkoumané délce signálu, přičemž původně nestacionární signál může být z pohledu několikanásobně delší doby stacionární. [3]

2 Základní pojmy, metody a veličiny v diagnostice

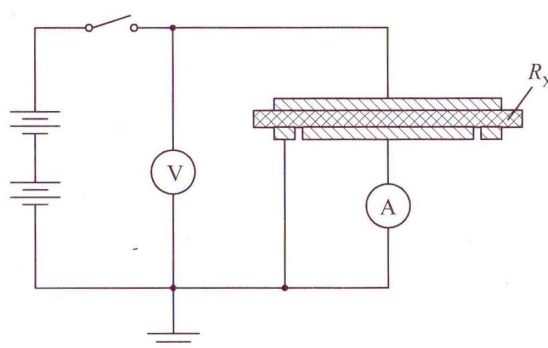
<u>izolační odpor</u>	poměr stejnosměrného napětí přivedeného na elektrody a celkového proudu v definovaném čase po připojení a závisí na vnitřním a povrchovém odporu zkoušeného materiálu
<u>vnitřní odpor</u>	poměr stejnosměrného napětí připojeného mezi dvě elektrody a ustáleného proudu mezi elektrodami
<u>vnitřní rezistivita</u>	„elektrický odpor“ - poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř elektroizolačního materiálu, vnitřní rezistivita většinou nezávisí na přiloženém napětí. Je úměrná tloušťce materiálu a nepřímo úměrná ploše sondy, kterou proud protéká
<u>povrchový odpor</u>	poměr stejnosměrného napětí připojeného mezi elektrodami na povrchu zkušební vzorku a proudu mezi elektrodami v daném čase
<u>povrchová intenzita</u>	je poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty v povrchové vrstvě elektroizolačního materiálu [6, 16]

2.1 Metody pro měření odporu

Metody pro měření odporu lze rozdělit na přímé a porovnávací. U přímé metody měříme napětí a proud na neznámém odporu. Přímá metoda je například voltampérová. Nepřímá metoda určuje poměr mezi neznámým odporem a proudem protékajícím přes tento odpor při konstantním napětí. [1]

2.1.1 Voltampérová metoda

Následující poznatky byly použity ze zdroje [1, 5]. Metoda je určena pro měření vnitřní a povrchové rezistivity. Tato metoda patří mezi nejpoužívanější a nejjednodušší metody pro měření přímého čtení procházejícího proudu vycházejícího z obrázku 2-1.



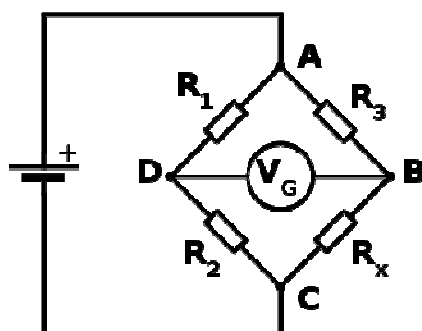
Obrázek 2-1: Měření odporu pomocí voltampérové metody [5]

Pro měření se používá stejnosměrný voltmetr a proud měříme odpovídajícím přístrojem pro měření proudu. Pokud měříme kvalitní materiály, tak je nutné použít elektrometr s proudovými rozsahy 10^{-12} a menší.

$$R_x = \frac{U}{I_x}, \text{ tímto vztahem vypočítáme neznámý odpor } R_x \quad (1)$$

2.1.2 Wheatstonův můstek

- patří mezi porovnávací metodu, princip této metody spočívá ve srovnání neznámého odporu se známým referenčním odporem velké hodnoty. [7]



Obrázek 2-2: Wheatstonův můstek [7]

- můstek (odpory R_1, R_2, R_3, R_x) je připojený na stejnosměrný napájecí zdroj
- větve se chovají jako dělič napětí
- mezi body D a G je nulový indikátor, který má za úkol zjistit, zda je můstek vyvážený
- při vyváženém můstku platí tento vztah pro neznámý odpor: $R_x = R_3 \cdot (R_2 / R_1)$, (2)

2.2 Polarizační indexy:

Polarizační index lze získat z absorpčních charakteristik. Využívají pro popis stavu materiálu časovou proměnnost absorpčního proudu a jsou to bezrozměrná čísla.

Desetiminutový polarizační index p_{i10} – používá se při měřeních na vinutích strojů nebo na jejich částech, p_{i10} počítáme z proudů v 1. a 10. min

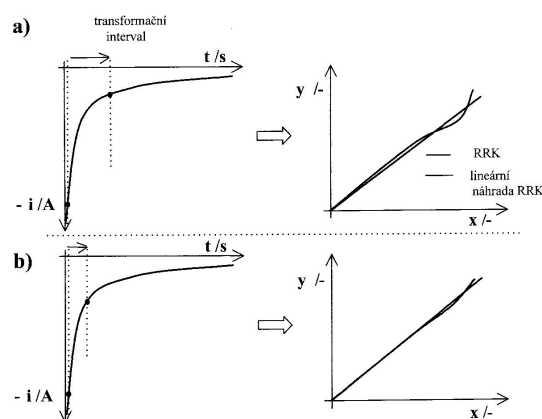
Polarizační index je nezávislý na rozměrech měřených objektů a platí vztah:

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}} \quad (3)$$

Obecně platí, že má-li izolant převažující prosakující vodivostní ustálenou složku i_{∞} , tak potom odlišnost čitatele a jmenovatele je velmi malá a p_{i1} se blíží jedné. U takového případu můžeme mluvit o materiálech s velkým počtem volných nosičů elektrického náboje. To nastává hlavně u znečištěné a navlhle izolace. [5]

2.3 Redukované resorpční křivky (RRK)

Metoda RRK je založena na matematickém zpracování průběhů resorpčních proudů. Ty se zpracovávají do tvaru relativních resorpčních charakteristik. Následně po transformaci souřadnic získáme redukované resorpční křivky. Směrnice lineárních náhrad je velice důležitá při hodnocení vlastností izolačního systému. Čím lepší izolant, tak tím je větší směrnice izolantu. Zmíněná metoda určuje také stupeň zestárnutí. Je důležité zvolit si optimální interval. Tuto situaci demonstruje obrázek 2-3. [5]



Obrázek 2-3 a) příliš dlouhý zvolený interval, b) optimální volba časových mezí [1]

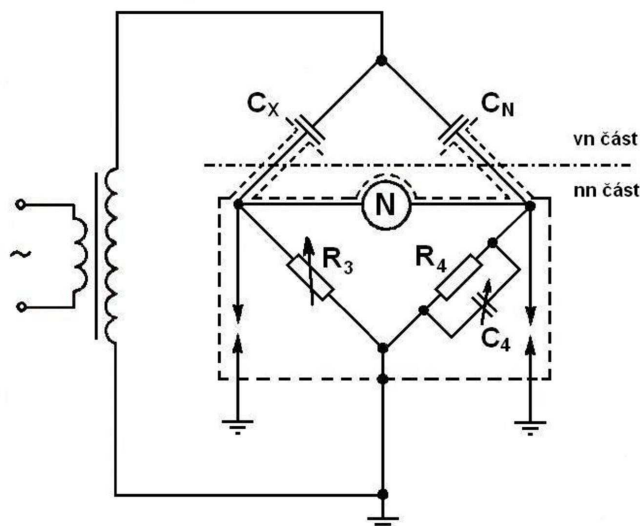
2.4 Ztrátový činitel a permitivita

Základem je určení náhradního schématu dielektrika. Měříme závislost $\text{tg}\delta$ a ϵ_r na napětí, frekvenci a teplotě z důvodu získání objektivního obrazu. Dále je důležitá frekvenční závislost těchto parametrů, což znamená, že musíme podle dané frekvence používat různé metody. Nejznámější metoda používána k měření je Scheringův můstek, který slouží k měření permitivity a dielektrických ztrát. [1]

Metoda Scheringova můstku:

Poznatky o Scheringově můstku uvedené v textu níže jsou použity z literárního zdroje [1]. V první části jsou prvky umístěny ve vysokonapěťovém prostoru zkušebny a v druhé části prvky sloužící k vyvažování mimo tento prostor. Obě tyto části jsou galvanicky oddělené. Napěťový zdroj musí mít takový výkon, aby uvedl můstek do provozu, a musí dávat napětí sinusového průběhu. V uzlových bodech diagonály jsou obsaženy svodiče přepětí, které slouží k ochraně obsluhy.

- | | |
|--|---------|
| - nízkonapěťové prvky, které slouží k vyvážení | R3 a C4 |
| - k vyrovnání kapacitní složky náhradního sériového obvodu | R3 |
| - k vyvážení odporové složky | C4 |
| - nulový indikátor | N |



Obrázek 2-4 Scheringův můstek[5]

Pro vyrovnaný můstek platí:
$$C_s = C_x = C_n \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (4)$$

Ztrátový činitel:
$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s = \omega R_4 C_4 \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,1 * C_4 \text{ pro } R_4 = 1000/\pi \quad (6)$$

Další metody uvedené v [1]: Metoda čtyřkapacitního můstku – ve všech větvích kapacity
 Metoda modifikovaného můstku pro rozsah 30 Hz do 300 Hz
 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát

2.5 Elektrická pevnost

Nejčastěji určovaný parametr. Elektrickou pevnost ovlivňují látky vzniklé stárnutím, voda a plyny obsažené v oleji. Elektrická pevnost je definována jako průrazné napětí U_p vztažené na tloušťku izolantu d . Jedná se vlastně o intenzitu elektrického pole. Elektrickou pevnost ovlivňuje řada faktorů. (vlhkost, teplotu, znečištění, zestárnutí a u plynů tlak).

elektrická pevnost - E_p [$V \cdot m^{-1}$]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (7)$$

Dielektrikum je látka se schopností vytvářet vlastní elektrické pole a po vložení do elektrického pole se polarizuje.

Izolant využíváme k odizolování dvou částí s různým potenciálem elektrického pole. Pokud použijeme izolant, který nevyhovuje z hlediska elektrické pevnosti, dojde k průrazu či přeskoku a zařízení fungovat nebude, dojde k poruše. U pevných izolantů dochází k trvalému poškození, neboť dojde k vytvoření vodivé cesty mezi elektrodami.

3 Diagnostika transformátorů

Elektrický netočivý stroj umožňující přenos elektrické energie mezi jednotlivými obvody pomocí vzájemné elektromagnetické indukce. Skládá se z velkého počtu jednotlivých částí vytvářející poměrně složité a také velmi variabilní řazení. Diagnóza transformátoru slouží ke konstatování konkrétních závěrů a získané výsledky jsou pak podkladem k rozhodování o jeho dalším osudu. Cílem diagnostického šetření při provozu je hlavně odstranění nedostatků vzniklých při uvádění stroje do provozu, zjištění okamžitého stavu zařízení a určení prognózy dalšího vývoje jeho vlastností. Vlivem provozních podmínek dochází ke stárnutí jednotlivých částí transformátoru a ke změně důležitých elektrických a mechanických vlastností. Obor elektrotechnická diagnostika velkou měrou přispívá k odhalení stupně zestárnutí. Monitorovací online diagnostický systém zajišťuje průběžné sledování vybraných parametrů, na jejich základě by bylo možno předcházet poruchám. [10, 1]

- transformátory se rozdělují dle provedení, které je úzce spojeno s jejich výkonem: [9]

SUCHÉ plynné chladicí medium

vzduch, do napětí 38 kV a výkonu 10MVA

při chlazení SF₆ napětí až do 75 kV

ZALÉVANÉ vinutí zalito pryskyřicí,

může být provedeno systémem resin-rich nebo VPI

do napětí 35 kV a výkonu 20 MVA (lze zvýšit až na 35 MVA)

S IZOLAČNÍM SYSTÉMEM OLEJ-PAPÍR

- stroje až do vysokých napětí a výkonů – nejčastěji používaný systém

- jako zdroj informací můžeme využít vzorek chladicího media – samozřejmě při použití speciálních metod

Diagnostické šetření

Výrobní šetření se týká fáze vzniku a života těchto zařízení, zahrnují vstupní kontrolu používaných materiálů, mezioperační zkoušky a zkoušky na ověřování funkčnosti celých transformátorů (zkoušky kusové, typové a zvláštní). [9]

Kusové zkoušky slouží k odhalení materiálových a výrobních vad a provádějí se hlavně na atypických rozvaděčích. Tyto zkoušky se dělají v předepsaném rozsahu na všech vyrobených strojích [12]

Typová zkouška je prováděna na každém novém typu, pokud se podstatně změní konstrukce použitého materiálu nebo výrobního postupu a musí mít tyto změny vliv na jeho vlastnosti.

Zvláštní zkoušky nejsou předepsané normami, ale dělají se a vyžádání provozovatele stroje. [1]

Zkoušky transformátorů

Zprvu si připomene základní body výroby transformátorů:

- a) výroba magnetického obvodu
- b) výroba vinutí
- c) kompletace stroje
- d) výroba transformátorové nádoby
- e) celková montáž transformátoru

Dále je důležité připomenout si metody vysoušení transformátorů:

- 1) podle významu použití
 - vysoušecí metody výrobní
 - vysoušecí metody revizní – vyžadují efektivní vysoušení již provozovaného transformátoru
- 2) podle teplotního média
 - plynné médium – vzduch
 - páry vysušujícího média – solvent
 - kapalně médium – olej
 - přímý ohřev - elektřina
- 3) podle tlaku při sušení
 - snížený tlak – vakuum
 - atmosférický tlak

- výše uvedené rozdělení bylo převzato z literatury [9] a jde pouze o připomenutí základních bodů vzniku a vysoušení transformátorů

Základní metody zkoušek transformátorů

Jedná se o metody, které slouží ke kontrole stavu izolace vodičů jednotlivých cívek. Nepoužívanější izolační systém u transformátorů, hlavně díky dobrým elektrickým vlastnostem, je systém olej-papír. Při správném použití plní funkce izolantu a chladícího média.

Pomocí absorpčních charakteristik určujeme izolační odpor, polarizační indexy a ztrátový činitel. Údaje, které mimo jiné získáme, nám dávají informace o dosaženém stupni vysoušení a stavu izolace. Jedná se také o výchozí údaje pro diagnostiku, kontrolní měření v době provozu a kvantitativní hodnocení stavu nové izolace. [9]

3.1 Provozní diagnostika transformátorů

off-line diagnostiku provádíme u strojů:

vn/vn a vn/nn	1-4 roky
vvv/vn	1-2 roky

Pro transformátory vvn/vvn a blokové transformátory s výkonem větším než 100MVA 1 rok. O měřeních se zhotovují záznamy obsahující šítkové hodnoty měřeného stroje, provozní hodnoty měřeného stroje, podmínky měření, naměřené a vypočtené hodnoty měřených veličin. [9]

3.1.1 Měření izolačního odporu, časové konstanty a polarizačního indexu

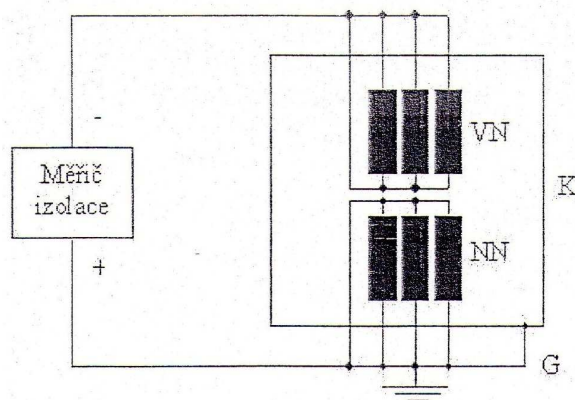
Izolační odpor se měří pomocí schématu 3-1 při napětí 2,5 kV. Musíme přísně dodržovat vybíjecí intervaly, aby během měření nedošlo, vlivem případného zbytkového náboje, ke zkreslení naměřených hodnot. R_{iz15} a R_{iz60} se odečítá v 15 a 60 sekundě.

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}} \quad (8)$$

Časová konstanta stroje τ - umožňuje hodnotit izolační systém bez ohledu na geometrické rozměry stroje. Vypočítáme jí ze vztahu $\tau = R_{iz60} * C_{50}$. Absolutní velikost časové konstanty nezávisí na geometrických rozměrech vinutí stroje. V praxi to umožňuje objektivní hodnocení izolačních systémů strojů bez ohledu na jejich napětí, výkon a typ. Kapacita vinutí se dá buď změřit anebo jí lze uvažovat jako jmenovitou hodnotu. Odporů měříme přímou metodou měření odporu. Měříme za normálních podmínek při relativní vlhkosti.

Měření se provádí na oboustranně odpojeném stroji od rozvodné sítě. Před měřením se spojí všechna vinutí nakrátko a minimálně na 5 minut spojí s kostrou stroje. Transformátorová nádoba musí být uzemněna a musí být všechna vinutí zapojená. Měří se odpor jednotlivých vinutí proti sobě s připojenou či uzemněnou nádobou.

Porovnáváme aktuální hodnoty s hodnotami z předchozího měření a je-li změna vyšší než 40%, tak musíme vyšetřit její příčinu. [9]



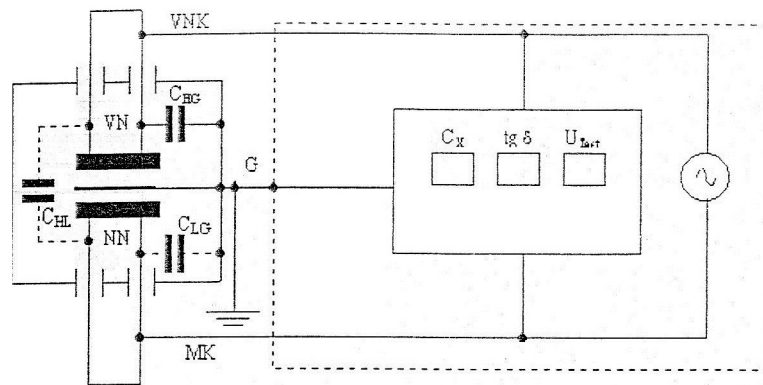
Obrázek 3-1 Schéma zapojení pro měření zdánlivého izolačního odporu [9]

3.1.2 Měření ztrátového činitele a kapacity

Ztrátový činitel je charakterizován jako činné ztráty polarizací v izolaci. Čím vyšší ztrátový činitel, tím se izolace více zahřívá a rychleji stárne. Ztrátový činitel určuje celkový stav izolace. Jeho velikost je ovlivněná pevnou a kapalnou částí dielektrika. Určuje, zda je izolační soustava provozně navlhlá nebo zestárlá. Kapacita vinutí se sama o sobě nepoužívá pro hodnocení. Avšak změny kapacity vinutí mohou udávat poškození izolace a v případě místních poruch i pomoci k jejich odhalení. [11]

Citlivost na parazitní vazby je u měření ztrátového činitele a kapacity značná, zejména u měření transformátorů v provozu. Nevyhovují-li naměřené hodnoty daným požadavkům, musíme zkontrolovat další veličiny charakterizující konstrukční uspořádání stroje jako je například napětí nakrátko, proud naprázdno, stejnosměrný odpor vinutí. [1]

Dvouvinuťový stroj



Obrázek 3-2: Zapojení eliminující kapacitu mezi vinutím vyššího a nižšího napětí [9]

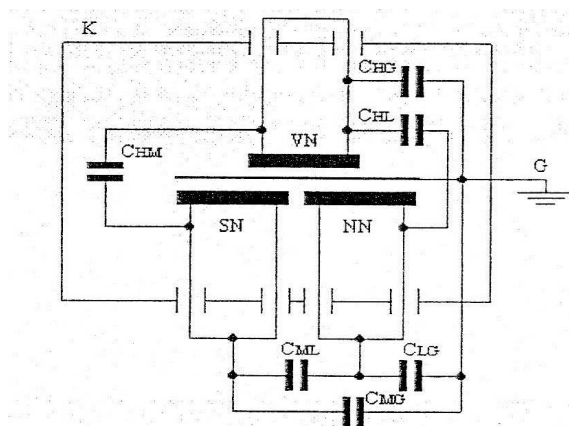
Postup měření: Nejčastěji měříme na uzemněném objektu. Vinutí připojené k měřicímu přívodu je na virtuální zemi a tím dochází k eliminaci kapacity mezi vinutím vyššího a nižšího napětí C_{HL} .

Nejdříve se připojí můstek k transformátoru. Po připojení se kabel MK připojí na vinutí nižšího napětí a kabel VNK na vinutí vyššího napětí. Nádoba transformátoru se spojí s kostrou napájecího zdroje. Měří se kapacita C_{HL} , C_{HG} a později jejich paralelní kombinace. Při změně polarity se měření C_{HL} a C_{HG} zopakuje. Dále se kabel VNK připojí na obě vodiče spojená vinutí a měřicí přívod MK se volně vyvěsí a provede se pouze podle uvedeného zapojení měření při obou polaritách.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1 \cdot C_1 + \operatorname{tg} \delta_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (8)$$

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2} \quad (9)$$

Měření na trojvinuťovém stroji probíhá obdobně jako u dvojinuťového stroje. Měříme dle obrázku 3-3. Bližší informace o měření na trojvinuťovém stroji naleznete v knize [1].

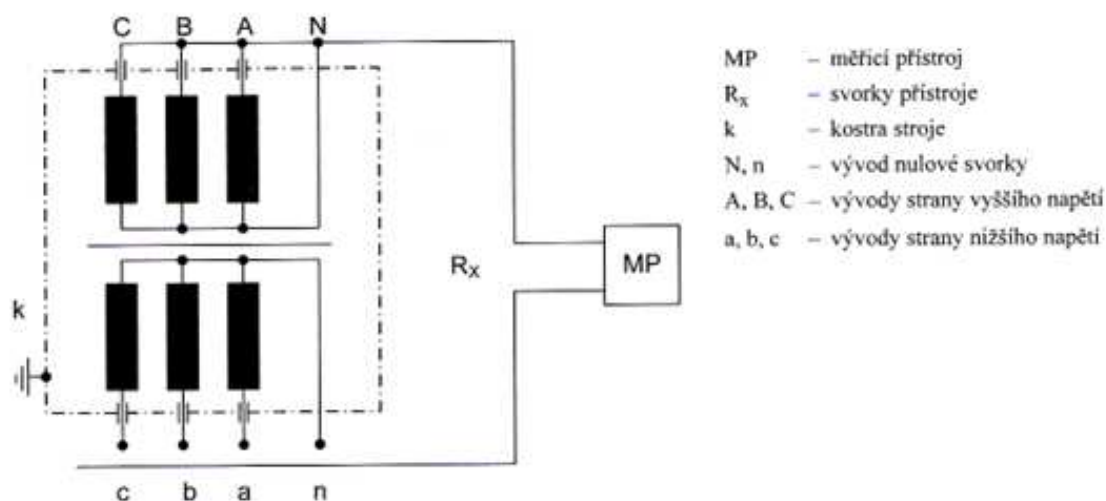


Obrázek 3-3: Vzájemné kapacity trojvinuťového transformátoru [1]

3.1.3 Měření poměru kapacit C_2/C_{50}

Tato metoda vychází z poznatku, že pokud je transformátorové vinutí v pořádku, pak jsou jeho kapacity při různých frekvencích stejné a využívá se závislosti relativní permitivity na frekvenci. Poměr kapacit C_2/C_{50} je veličina, která charakterizuje kapacitu vinutí měřenou při rozdílných frekvencích. Tato metoda slouží k zjišťování míry navlhnutí izolačních systémů transformátorů plněných olejem. Jakmile je vinutí navlhlé, potom se kapacity při frekvenci 50 Hz a 2 Hz značně liší. U vlhké izolace se kapacity zmenšuje s rostoucí frekvencí.

Nejdříve se měří kapacita vinutí proti kostře C_{50} při kmitočtu 50Hz a následně se měří kapacita C_2 při frekvenci 2Hz. Mezi těmito dvěma měřeními musíme vynechat jednodominutový vybíjecí interval. Později se určí rozdíl kapacit C_2-C_{50} . C_2-C_{50} představuje změnu kapacit vinutí. Dále získáme z hodnot C_2-C_{50} a C_{50} při napětí 100V charakteristickou veličinu C_2/C_{50} . [1]



Obrázek 3-4: Zapojení pro měření C_2/C_{50} [1]

3.1.4 Měření částečných výbojů

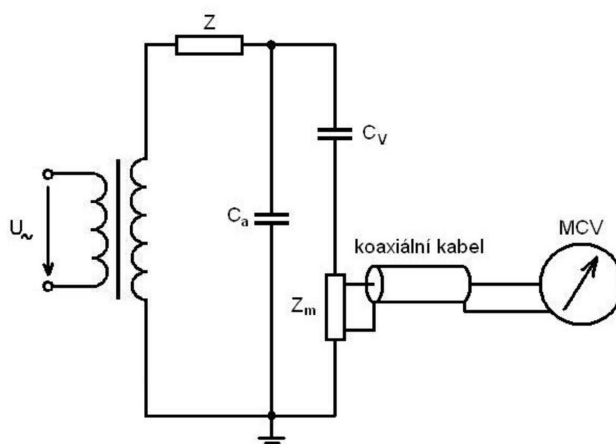
Částečné výboje: elektrické výboje, které přemostí jen částečně izolaci mezi elektrodami, které jsou na různých potenciálech [15]

Částečné výboje: globální měření – měření probíhá v celém zařízení

měření probíhá v jedné jeho fázi najednou

lokalizační měření – cílem je zjištění vzniku částečných výbojů

Na obrázku 3-5 je znázorněna galvanická metoda pro měření částečných výbojů. Prvek C_a ve schématu značí kapacitu zkoušeného objektu a prvek C_v kapacitu průchodky. Z_m značí impedanci měřícího obvodu a písmeno Z značí filtr.



Obrázek 3-5: Obvod pro měření částečných výbojů [14]

Částečné výboje sledujeme hlavně v průchodkách transformátoru, v izolaci závitů jednotlivých cívek a v cívkách samotných. Vznikají například z důvodu dlouhodobého provozu transformátoru. Hlavní metoda pro měření částečných výbojů je galvanická metoda, která přímo snímá proudové impulzy částečných výbojů.

Prvním důležitým krokem je kalibrace měřícího přístroje při nulovém napájecím napětí přiložením kalibračního generátoru na svorky měřeného objektu známým nábojem. Vlivem kapacity měřícího obvodu dochází ke zkreslení pulzů částečných výbojů a ke zmenšení přeneseného náboje vlivem ztrát při impedančním nepřizpůsobení.

Změřené hodnoty zapíšeme do kalibrační matice, která slouží k odhadu místa vzniku částečných výbojů. Výsledkem měření částečných výbojů transformátoru je nejvyšší hodnota součinu údaje měřícího přístroje a převodního součinitele K . Vlastní měření začne přivedením nejnižšího napětí z napájecího zdroje na transformátor. K regulaci napětí musíme mít možnost měření alespoň na jedné hladině pod jmenovitým napětím, při jmenovitém napětí a při 110 % jmenovitého napětí. Na každé hladině se přidrží napětí alespoň 5 minut, při kterých sledujeme výbojovou činnost. Pro další vyhodnocení je nutný záznam všech měření na všech fázích obou vinutí a na všech napěťových hladinách. Pokud během 5 až 10 minut měření při 110 % jmenovitého napětí nedojde ke změnám v počtu a velikosti měřených výbojů, lze naměřené hodnoty akceptovat. Cílem měření je určení místa vzniku částečných výbojů. [14]

3.2 Napěťové zkoušky vinutí

3.2.1 Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje

Ověřujeme elektrickou pevnost izolace zkoušeného vinutí proti ostatním vinutím a uzemněným částem. Izolace vodičů a válec z transformátorové lepenky tvoří v tomto prostoru izolační systém. Tyto zkoušky musíme provádět na kompletně smontovaných transformátorech. Výjimku tvoří olejové transformátory, kde není předepsána montáž chladiče a dalších pomocných částí, pokud jsou tyto části v provozním stavu elektricky odstíněny vzhledem k vývodům. Na zkratované zkoušené vinutí a uzemněné vývody všech ostatních vinutí, které nejsou elektricky spojeny se zkoušeným vinutím, se přivádí napětí. [1]

3.2.2 Zkoušky indukovaným napětím

- **zkouška indukovaným napětím transformátoru s redukovanou izolací nulového bodu vinutí**

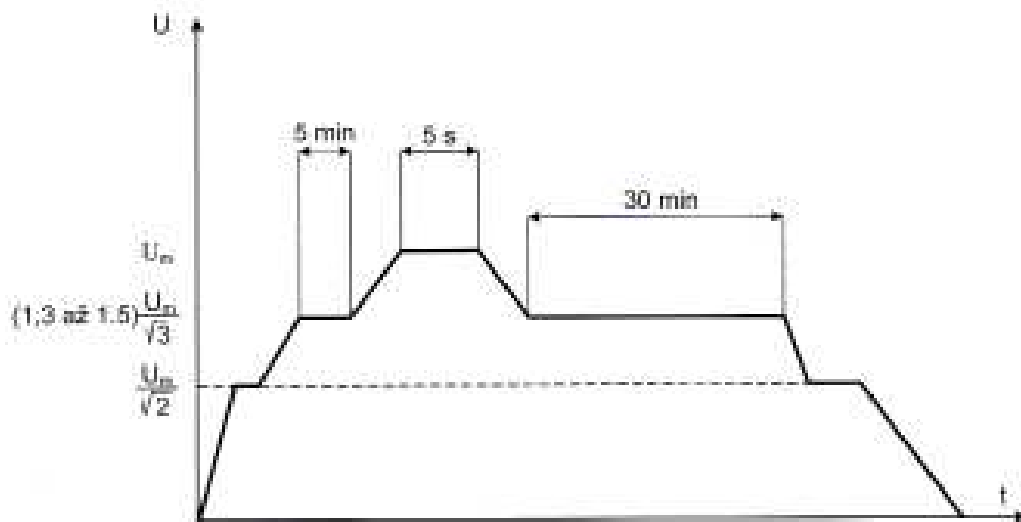
Kontroluje elektrickou pevnost izolace vývodů na vedení proti uzemněným částem dalším vinutím, mezi fázemi a podél zkoušeného vinutí. Transformátor se musí zapojit tak, aby normalizovaná zkušební napětí byla současně přiložena mezi vinutí VN a SN a zemí u vývodů vinutí sousedních fází rozmístěných vně. Nutné je uzemnění magnetického obvodu a pláště transformátoru. [9]

- **zkouška indukovaným napětím transformátoru s plnou izolací nulového bodu vinutí**

Slouží pro kontrolu a prověření elektrické pevnosti izolace podél zkoušeného vinutí, mezi fázemi vůči uzemněným částem a dalšími vinutími. Izolační systém vinutí transformátoru s plnou izolací nulového bodu se zkouší dvojnásobným jmenovitým napětím. Testuje se v provozním zapojení stroje. Trojfázový transformátor se zkouší pomocí symetrického trojfázového napětí. Pokud je vyveden nulový bod, tak tento bod musí být v době zkoušky uzemněn. Je dovolené použití jiných zapojení, při nichž je zaručeno dvojnásobné jmenovité napětí podél zkoušeného vinutí a napětí mezi vývody nepřekročí odpovídající normalizované zkušební napětí. [1]

• Zkouška dlouhodobým indukovaným napětím

Zkoušku provádíme, pokud je nulový bod zkoušeného vinutí uzemněn. V zapojení do trojúhelníka se uzemní jeden z vývodů a vinutí v zapojení do hvězdy se uzemní v nulovém bodu. Obrázek 3-6 uvedený níže odpovídá časovému průběhu zkušebnímu napětí mezi fázovými vývody a nulovým bodem. Při této zkoušce se měří amplituda zdánlivého výboje a určuje se hodnota zapalovacího a zhášecího napětí během zvyšování a snižování zkušebnímu napětí. [9]



Obrázek 3-6: Časový průběh zkušebnímu napětí [9]

3.2.3 Zkouška elektrické pevnosti vnitřní izolace spínacími impulsy

Pomocí této zkoušky kontrolujeme kvalitu vnitřní izolace. Tato metoda se týká indukování zkušebnímu napětí, ve zkoušeném vinutí, přiložením spínacího impulsu k vinutí vyššího nebo nižšího napětí. Pokud vznikne nějaká závada, určujeme jí pomocí rozboru oscilogramů. Neobjeví-li se na oscilogramech ostré skoky, pak můžeme mluvit o kladném výsledku zkoušky. [1]

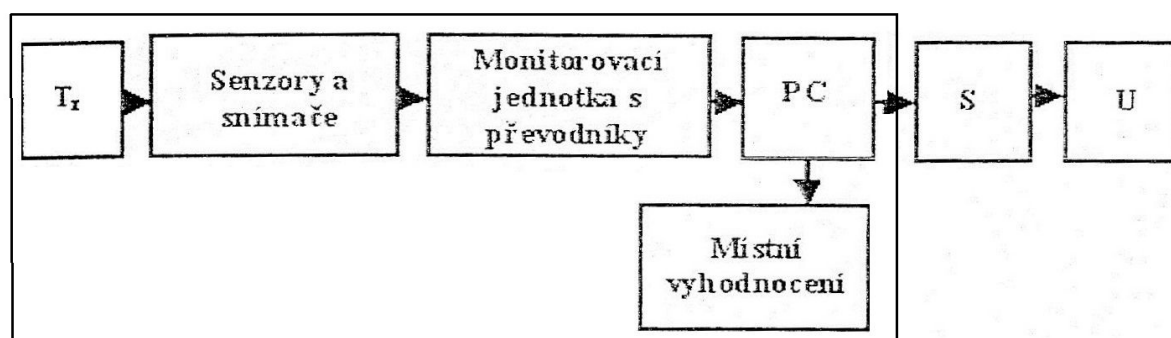
3.3 On-line diagnostika transformátorů



Obrázek 3-7: Schéma sdělovací soustavy měřícího systému[1]

Princip diagnostiky je následný. Diagnostický systém vyšle zprávy o sledovaném objektu do vysílacího zařízení (senzoru). V příslušném senzoru jsou tyto zprávy upraveny na vhodný signál. Dále se upravený signál do vzdáleného místa přenáší přenosovou cestou, která je realizovaná například venkovním vedením a musí být schopna přenést změny dané fyzikální veličiny. Samozřejmě při přenosu na signál působí různé rušivé procesy, které jsou v obrázku naznačena blokem zdroj rušení a pozměňují tvar signálu.

Dalším blokem v obrázku je přijímací řízení (PC prostřednictvím vhodné periférie), které zpracovává přijatý signál tak, aby získaná zpráva na vstupu bylo co nejvěrohodnější. Příjemce zpráv je uživatel, který získává potřebné informace o sledovaném objektu.



Obrázek 3-8: Blokové schéma monitorovacího systému[1]

T_r - sledovaný transformátor

S - server

U - uživatel

V diagnostice je důležité vybrat vhodné metody pro diagnostiku. Nutné je osadit transformátor senzory pro měření vybraných parametrů a přivést výstupní signály do místnosti velínu. K zobrazení a archivaci dodaných informací slouží PC. Koncovým článkem je obsluha, která dále rozhoduje o dalším provozu a zatížení sledovaného stroje.

Monitorovací systém slouží k preventivnímu a nepřerušnému sběru dat a jejich komplexnímu vyhodnocení a měl by plnit požadované funkce:

- stálé provozní sledování diagnostických veličin
- podávání alarmových hlášení při překročení nastavených mezních hodnot, případně také přímé zásahy do řídicího systému zařízení
- okamžité vyhodnocování měřených veličin – stanovení aktuálního stavu zařízení

Měření diagnostických veličin za plného chodu stroje je komplikované. Jednak z důvodu nutnosti zachování bezpečnosti při měření, ale také z důvodu nutnosti eliminace rušivých signálů. V dnešní době se využívají hlavně menší monitorující systémy, který sledují pouze omezený počet několika diagnostických veličin. Klade se zde velký důraz na co nejpřesnější měření a vyhodnocování naměřených hodnot.

V on-line diagnostice je důležité správně volit parametry, které sledují správný chod transformátoru. Izolačního systému olej-papír má podstatný vliv na bezporuchový stav. Izolační systém je tvořený z organických materiálů, které jsou velmi citlivé na působení degradačních činitelů. Abychom zabránili co nejmenšímu výskytu vad, měli být monitorovány hlavně ty části u kterých je nejvyšší riziko poruchy (vinutí, magnetický obvod a izolační systém. Musíme si ale uvědomit, že čím více senzorů budeme mít v daném stroji, tím vyšší bude i výsledná cena transformátoru. Hlavní parametr, který nejvíce zatěžuje transformátor je teplota. Teplota dále slouží určování zestárnutí a určení zbytkové životnosti.

Jedním z nejdůležitějších parametrů pro monitorování patří měření provozních parametrů transformátoru (napětí a proudů jednotlivých fází). Sledování těchto parametrů slouží k zjištění okamžitého zatížení transformátoru a k odhadu velikosti tepelného zatížení izolačního systému transformátoru.

Měření teplot - elektrická energie ztracená v transformátoru při přeměně střídavého proudu se přeměňuje na teplo ve vinutí, v magnetickém obvodu a jiných částech transformátoru. V některých případech může i teplota některých částí převýšit teplotu okolí. Oteplení nám vlastně závisí na intenzitě chlazení a roste se zvětšujícím se zatížením a se ztrátami v něm vznikajícími. Plechy magnetického obvodu, střídající se s vrstvami izolace se vyznačují velkou tepelnou vodivostí a poměrně malou tepelnou kapacitou. Vinutí transformátoru má velkou tepelnou vodivost. V provozu se plechy magnetického obvodu a měď vinutí stávají vlastně zdroji tepla. Bližší informace o metodách měření tepla v transformátoru v [1].

4 Diagnostika malých a středních točivých strojů

Tato skupina strojů tvoří prakticky 90% všech vyráběných točivých strojů. V technickém životě točivého stroje lze rozeznat ve vztahu k tvorbě diagnóz jednotlivé etapy, které jsou uvedeny níže. Takovéto metody se liší podle jednotlivých diagnostických metod, jejich významu, ale i rozsahu.

- rozdělení diagnostiky malých a středních točivých strojů:

- pravidelné periodické kontroly a prohlídky
- mezioperační kontroly: elektrické, mechanické a další
- vstupní kontrola materiálu a subdodávek
- výstupní kontrola výrobce materiálu a subdodávek
- typové zkoušky dle normy
- zkoušky a kontroly pro stanovení diagnózy při provozních potížích
- výstupní kontrola, kusové zkoušky elektrických strojů
- on-line diagnostika
- výchozí revize při uvádění strojů do provozu
- zkoušky po opravě

Výše zmíněná diagnostická šetření musí splňovat základní technické a ekonomické předpoklady. Pro diagnostiku malých a středních točivých strojů je nutné mít odpovídající zkušební prostory a vhodné měřicí přístroje. Dále je nutné zajistit vybavení jak pro zkušebnu, tak i pro měření v provozu. V případě malých a středních točivých strojů se diagnostikované stroje přemisťují na diagnostické pracoviště, na rozdíl od velkých točivých strojů, které se kvůli velkým rozměrům diagnostikují přímo na místě.

Dříve diagnostice točivých strojů nebyla věnována tak velká pozornost, jak by si zasloužili. Často byla opomíjena z důvodů porovnatelné ceny diagnostiky s případnou opravou stroje a jeho kompletní výměnou. V dnešní době je na diagnostiku malých a středních točivých strojů kladen mnohem větší důraz, protože cena diagnostiky systému může být vzhledem k narušení celého výrobního procesu zanedbatelná. Oprava nebo výměna stroje nemusí být sice tak finančně náročná, ale tyto stroje jsou obsaženy v celých výrobních procesech, a důsledky výpadku výrobní linky mohou mít nedozírné následky.

Diagnostikou vhodné části výrobní linky, můžeme zaručit bezporuchový chod celé výrobní linky a zamezit velkým finančním ztrátám. Příjemný komfort v diagnostice je monitorování sledovaných veličin přímo na internetu a tím ovládat celý výrobní proces odkudkoliv. [1]

4.1 Zkoušky malých a středních točivých strojů

Zkoušky lze rozdělit do následujících tří částí [13]. První část je předvýrobní fáze a je prováděná na materiálech vstupujících do výroby a subdodávkách. Druhá fáze je mezioperační zkouška a je prováděná na jednotlivých sestavených komponentech. Třetí a poslední fázi tvoří veškeré zkoušky prováděné na hotovém motoru.

Zkoušky typových materiálů a subdodávek

Materiály vstupující do výroby musí splňovat technické parametry. Požadavky na materiál jsou dány určením motoru v praxi, prostředím, teplotní třídou. V průběhu návrhu motoru jsou konstrukčním oddělením specifikovány požadavky. Důležité jsou také technologické postupy používané během výroby. Kvalita výroby nezáleží jenom na kvalitních vstupních materiálech, ale důležitá je taky volba subdodavatelů-dodávek hotových dílů.

Na všech materiálech, které vstupují do výroby, provádíme kontrolu vstupních materiálů. Pokud je materiál vstupující do výroby ověřen certifikátem ISO, nemusíme u něho provádět vstupní zkoušku. Doporučené je provádět vstupní zkoušky vždy.

Vstupní izolační materiály jsou kontrolovány většinou elektrickými zkouškami. Provádí se například zkoušky průrazným napětím, měřením polarizačního indexu a $\text{tg}\delta$.

Mechanické mezioperační zkoušky

Provádí se vizuální kontrola, kontrola kompletnosti, kontrola správného umístění jednotlivých součástí motoru, kontrola neporušenosti a nepoškozenosti a také kontrola rozměrů. Důležité je zaručit, aby elektrický moto jako celek odpovídal konstrukčním a technologickým požadavkům.

U komutátorových motorů musí být také prováděny kontroly usazení sběrného ústrojí, rozteče kartáčů atd. Všechny tyto testy mají stanovenou tolerance, která musí být výrobou zaručena.

Při konečné montáži musíme provést důkladnou mechanickou kontrolu kontrolou velikosti vzduchové mezery u asynchronních motorů. U stejnosměrných motorů se provádí kontrola vzduchové mezery pólů, kvality komutátoru a kvality kartáčů. U synchronních motorů se provádí kontrola obvodu buzení.

Zkoušky kusové

Jsou prováděny na všech již smontovaných strojích. Prvním a důležitým krokem je vizuálně zkontrolovat motor. Tato zkouška zkontroluje, zda vyhověli mechanické a elektrické požadavky, které byly kladeny na točivý stroj. Další prohlídka se provádí na zkušebně elektrických strojů a má za úkol zjistit, jestli stroj vyhověl požadavkům dohodnutým mezi odběratelem a výrobcem. Prohlídka je zaměřena především na kontroly sběracího ústrojí, vinutí, šroubových spojů komutátoru, kontroly kompletnosti, ložisek, kontroly chodu stroje, měření izolačního odporu a teploty stroje atd. Další kontroly a zkoušky uvedeny v [13].

Profylaktická šetření

- postup profylaktického šetření v jednotlivých základních bodech, bližší informace v [1]

- čištění motoru – například stlačeným vzduchem
- kontrola mechanických prvků stroje
- střídavé zkoušky – zkoušky přiloženým napětím...
- rázové zkoušky – zkouší se mezizávitová izolace
- stejnosměrné zkoušky – izolační odpor, polarizační index
- kontrola chodu stroje
- odhalení slabých míst vzniklých při výrobě
- teplotní stárnutí
- změny chemického původu

5 Diagnostika velkých točivých strojů

U velkých elektrických strojů je důležitý jeho bezporuchový chod. Během provozu všechny prvky stroje mechanicky stárnou, chemicky degradují a dochází k degradaci elektrickým namáháním. V elektrických strojích se může taky vyskytnout například koroze pod napětím a drážkové výboje, které vznikají při vibracích vinutí v drážkách.

Hlavně díky velkým rozměrům stroje musí být diagnostika prováděna na místě. Diagnostiku můžeme provádět v režimu on-line, což nám zajišťuje sledovat okamžitý stav a také predikci dalšího chování zařízení. Nevýhodou jsou velké investiční náklady, protože každá část stroje musí být sledovaná zvlášť.

V diagnostice velkých točivých strojů jsou stroje rozděleny do jednotlivých skupin podle typu izolačního systému a to na turbogenerátory, hydrogenerátory a VN motory. [1]

Diagnostika strojů před uvedením do provozu (vstupní diagnostika)

1. vizuální kontrola statorového vinutí
2. měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového vinutí
3. měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu rotorového vinutí
4. měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrné napětí.
5. měření kapacity a ztrátového činitele a výpočet časové konstanty statorového vinutí
6. měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou
7. zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz
8. v případě, že nejde provést zkouška střídavým napětím 50 Hz, může se provést zkouška stejnosměrným napětím
9. zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz
10. frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole

Diagnostika stroje v provozu

Malá diagnostika se provádí v intervalu 1 až 2 roky a je uvedena v devíti bodech níže. Dále existuje velká diagnostika, která je ještě doplněna o další měření a zkoušky jako například měření částečných výbojů akustickou sondou.

1. vizuální kontrol statorového vinutí
2. měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového vinutí
3. měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu rotorového vinutí
4. měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí
5. měření kapacity, ztrátového činitele a výpočet časové konstanty statorového vinutí
6. měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou
7. indikace ozónu v chladícím vzduchu
8. frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole
9. měření hluku

5.1 Vizuální kontrola

Velmi jednoduchá, ale zároveň nejdůležitější zkouška, která umožňuje sledovat stav izolační soustavy. Na izolaci působí jak teplotní, chemické a mechanické vlivy, tak i nečistoty, které jsou usazeny v chladícím mediu. Předchozí poznatky o vizuální kontrole a její následné rozdělení bylo získáno z literatury [11].

Teplotní namáhání

Montsingerovo pravidlo říká, že zvýšení teploty o 9 K zkrátí životnost izolace na polovinu. Postupnou degradaci materiálu způsobuje provozní teplota, která změní i její vzhled. Změny jsou projeveny zřetelněji, pokud je izolační soustava pojena asfaltem. U termoplastické izolace se degradační účinky teploty projevují změnou barvy a nafoukáním izolace. U termosetické izolace je izolační soustava, která je spojena umělou pryskyřicí odolnější proti vlivům provozní teploty.

Chemické namáhání

U chemického namáhání se erozivní účinky látek, které vznikají při vnitřních výbojích na povrchu izolační soustavy, neprojevují. Pokud dochází k částečným výbojům, vznikají u strojů chlazené vzduchem kyslíkaté látky, které podporují narušování izolační soustavy.

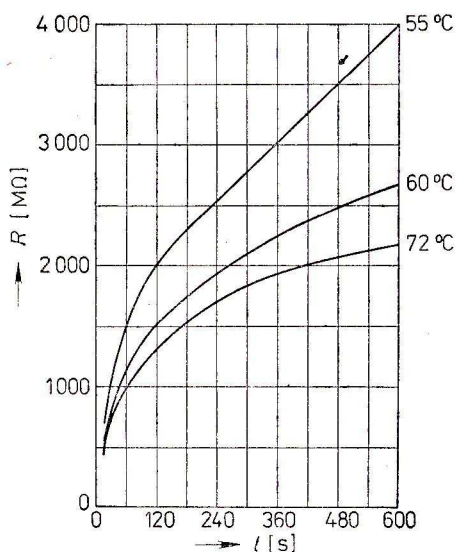
Mechanické namáhání

Vinutí stroje je vždy za provozu namáháno chvěním a dynamickými silami. Dynamické jevy nastávají například u najíždění a odstavení stroje nebo při zkratu. Musíme zkontrolovat, zda například při opravě nebyla ve stroji zanechána nežádoucí kovová část, která by mohla při uvedení stroje do chodu způsobit značné poškození stroje. A proto je důležitá vizuální kontrol na počátku odstávky, ale i po montáži na zařízení.

5.2 Popis měření izolačního odporu statorového vinutí

Izolační soustava je vlastně něco jako dielektrikum kondenzátoru, jehož jedna elektroda je tvořena železem statoru se všemi dalšími uzemněními částmi stroje a druhou elektrodu tvoří vinutí měřené fáze. Po přiložení napětí na dielektrikum začne procházet nabíjecí proud a tento proud se v závislosti na čase zmenšuje.

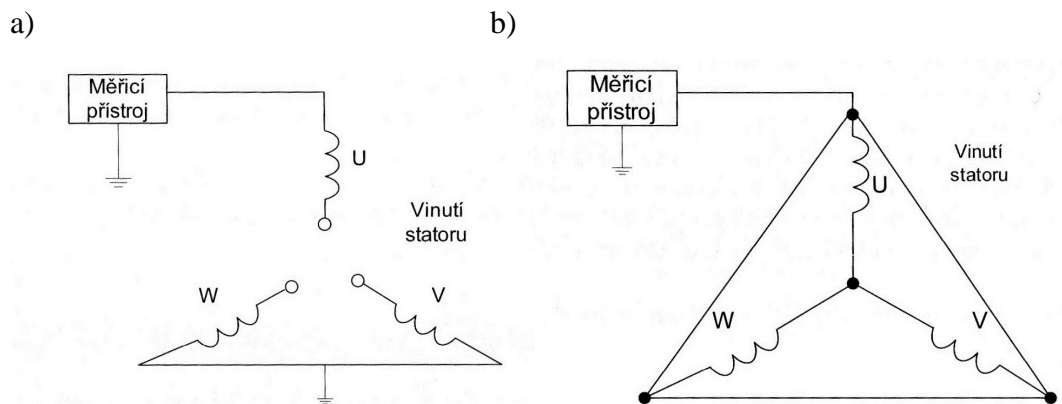
Na následujícím obrázku 5-1 je zmíněna závislost izolačního odporu na čase měřená při různých teplotách vinutí. Průběh závislosti se vypočítá jako velikost přiloženého napětí/velikost nabíjecího proudu. Charakteristiku 5-1 ovlivňuje měrný odpor izolace, permitivita, geometrické rozměry stroje a teplota vinutí. [11]



Obrázek 5-1: Závislost izolačního odporu na čase měřená při různých teplotách vinutí [11]

Při měření se používají speciální přístroje mající vlastní zdroj stejnosměrného vysokého napětí a vestavěný miliampérmetr, který má kalibrovanou stupnici. Na vstup měřené fáze, která byla z důvodu odvedení elektrického náboje zkratována, připojíme měřící napětí o hodnotě 1 až 5kV. Ostatní fáze se na jedné straně uzemní a druhá strana zůstane nezapojena. Toto měření opakujeme pro každou fázi zvlášť.

Na kladný pól zkušebního zdroje se připojí kostra stroje, která je vodivě spojená se zemí a s ostatními vynutími. Na záporný pól zdroje napětí je přivedené měřené vinutí. (obrázek 5-2)



Obrázek 5-2: Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí [1]
a) s rozpojeným uzlem b) s nerozpojeným uzlem

Je-li hodnota $p_i > 2$, potom absorpční proudy ve statorové izolaci trvaly poměrně dlouhou dobu a poukazuje nám to na kvalitní izolaci. Je-li polarizační index blízký jedné, pak se jedná o izolaci navlhlou. [1]

$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} [-] \quad a \quad p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} [-] \quad (12)$$

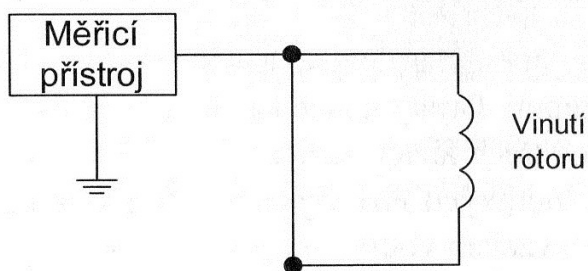
Měřicí přístroj musí splňovat následující podmínky[11]:

- měřicí napětí nesmí kolísat
- pro generátory s $U_{jm} \geq 10,5 \text{ kV}$ musí být měřicí napětí 5kV a pro generátory s $U_{jm} \leq 10,5 \text{ kV}$ musí být měřicí napětí 205kV

5.3 Postup při měření izolačního odporu rotorového vinutí

Měření provádíme buď na rotoru vyjmutém ze stroje, anebo na stroji ve smontovaném stavu. Prvním krokem měření je odpojení zemní ochrany rotoru, budícího obvodu vyjmutím kartáčů sběracích kroužků. Dále provádíme měření izolačního odporu vinutí magnetového kola, sběracích kruhů a přívodních pásů. Teplota měřeného vinutí se doporučuje kolem 25 °C. Na konci měření zkatujeme vinutí na rotoru z účelem vybití vinutí.

Měřicí přístroj na obrázku 5-3 je měřic izolace, který má vlastní zdroj stejnosměrného napětí 0,5 až 1,5kV přiloženého mezi konec vinutí a hmotu rotoru. [1]



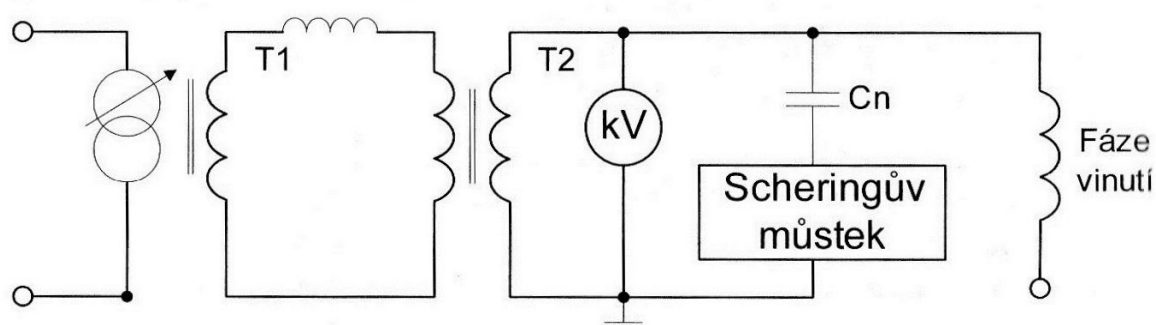
Obrázek 5-3: Schéma zapojení pro měření izolačního odporu rotorového vinutí [1]

5.4 Měření ztrátového činitele $\text{tg}\delta$, kapacity a časové konstanty

První krokem při měření ztrátového činitele a kapacity je přiložení zkušebního napětí na vstup prošetřované fáze. Ostatní fáze se na jednom konci uzemní a druhá část zůstane nezapojena. To opakujeme pro všechny tři fáze. U několikafázového vinutí se většinou zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem spojeny vodičově a uzel vinutí je odtemněn.

Přiložené napětí se zvyšuje postupně po krocích $0,2U_n$ a měření se provádí v intervalu $(0,2-1,0)U_n$. Ionizační filtr odstraňuje rušivé vlivy při měření.

Časová konstanta slouží k odstranění vlivu typu stroje, jeho napětí a výkonu na naměřené veličiny. Velikost časové konstanty není závislá na geometrických rozměrech stroje, a proto může sloužit k porovnávání vlastností izolačních systémů typově rozdílných strojů. [1]

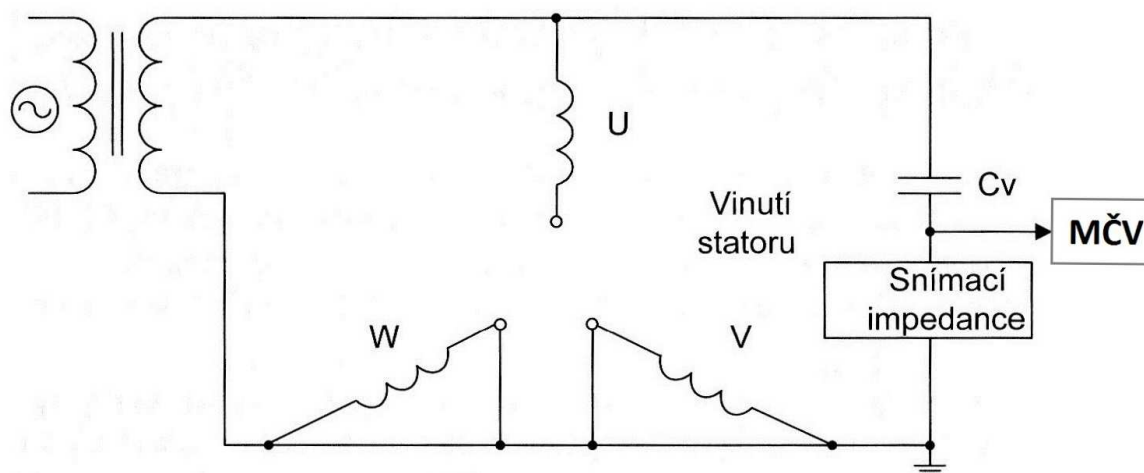


Obrázek 5-4: Obvod na měření časové konstanty a činitele $\text{tg}\delta$ [1]

5.5 Měření částečných výbojů statoru galvanickou metodou

Při měření částečných výbojů můžeme přibližně zjistit celkový stupeň znehodnocení izolace izolačního systému a můžeme také pomocí měření částečných výbojů zaznamenat vznik lokálních vad. Částečné výboje mohou vzniknout v izolaci vodičů, mezi izolací a vodičem, mezi izolací a dnem drážky statoru nebo na povrchu izolace mimo drážku statoru.

Každý impuls částečného výboje vzniká ve specifickém místě. Proudový impuls se šíří od místa vzniku, kde vznikl částečný výboj, až do přípojnice stroje, kde ho zaznamená měřící technika. Na obrázku 5-5, kde CV je vazební kondenzátor a MČV je měřič částečných výbojů vidíme, že uzel vinutí musí být při měření rozpojený. Měřenou fází přivedeme na zdroj a ostatní fáze zkratujeme a uzemníme, jak je vidět na obrázku 5-5 níže. Při měření nemusí být rotor vyjmutý ze zdroje. Nejměřenější parametr je maximální velikost amplitudy částečného výboje. Diagnostika částečných výbojů je srovnávací test, pomocí kterého se může určit fáze s největší úrovní výbojové činnosti. Z výsledků testů je teoreticky možné porovnávat jednotlivé stroje v průběhu času.



Obrázek 5-5: Schéma pro měření částečných výbojů statorového vinutí[1]

Mezi další metody pro měření částečných výbojů statorového vinutí patří také měření akustickou sondou, diferenciální elektromagnetickou sondou a měření induktivně vázanou sondou. [1]

5.6 Zkoušky statorového vinutí střídavým napětím 50Hz

Jedná se o zkoušku, která patří do skupiny zkoušek se zvýšeným napětím [11]. Základní vlastností izolačního systému je průrazné napětí. I když je při konstrukci izolační systém značně předimenzován vůči jmenovitému napětí stroje, tak v průběhu jeho provozu dochází k degradaci izolačního systému. Vlivem degradace dochází ke zmenšení průrazného napětí a dochází ke snížení elektrické pevnosti. Pokud se elektrická pevnost sníží pod kritickou mez, potom dojde k průrazu dielektrik a ke zničení stroje, a proto se provádějí zkoušky zvýšeným napětím, které dokáží odhalit nejslabší místo. Hodnota elektrické pevnosti izolace vinutí je dána velikostí zkušebního napětí v době zkoušky. Pro nový stroj – 100% U_{zk} a pro ostatní stroje – 80% U_{zk} . Při zkoušce je rozloženo napětí na vinutí v poměru kapacit, to odpovídá provoznímu namáhání. Výsledkem zkoušky je výrok, zda během testu došlo, či nedošlo k přeskoku nebo k průrazu.

Další metody pro měření statorového vinutí jsou zkoušky stejnosměrným napětím, napětím velmi nízkého kmitočtu, proudovými impulzy. [1]

5.7 Zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50Hz

Jedná se o výdržnou elektrickou zkoušku, kterou kontrolujeme odolnost izolace. Izolace rotorového vinutí je za provozu elektricky namáhána provozním napětím a taky přepětím při přechodových stavech alternátoru.

Prvním krokem při měření je vyjmutí rotoru, který následně očistíme od nečistot. Pokud máme rotor s vyniklými póly, provádíme měření v klidu. U stroje s hladkým rotorem se měření provádí v chodu naprázdno při jmenovitých otáčkách rotoru. Důležité je vyjmutí kartáčů ze sběracího ústrojí a tím dojde k odpojení budícího obvodu. Dále se musí provést uzemnění vinutí statoru a uzemnění budícího obvodu. [1]

Měření: MEZ MOHELNICE 4AP71-6s

- trojfázový asynchronní motor s kotvou nakrátko v zapojení do hvězdy

- štítkové hodnoty: $P=180W$

$f=50Hz$

$I=0,71/1,23A$

$\cos\varphi=0,79$

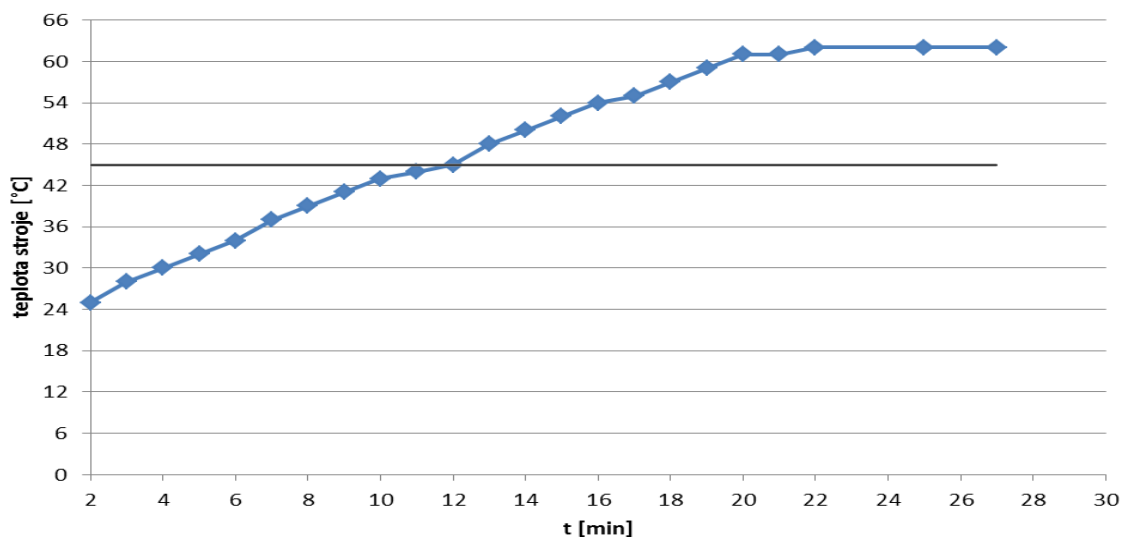
λ/Δ 380/220V

Tabulka naměřených hodnot:

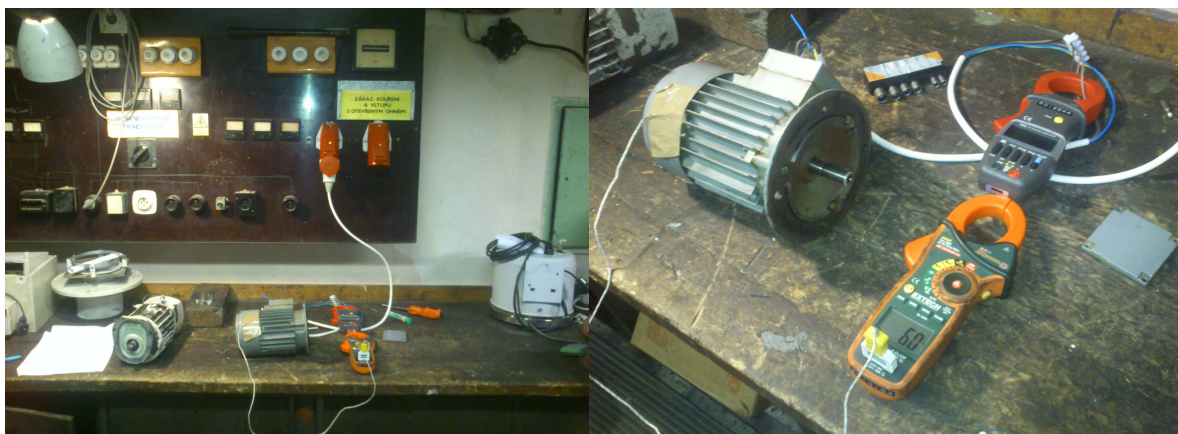
t [min]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
teplota [°C]	25	28	30	32	34	37	39	41	43	44	45	48	50	52

t [min]	16	17	18	19	20	21	22	25	27
teplota [°C]	54	55	57	59	61	61	62	62	62

Průběh měření



Obrázky pořízené při měření:



Závěr

Diagnostické zkoušky a měření v praxi zajišťují správný běh stroje. Slouží ke zjišťování bezporuchového stavu a ke zjištění stavu izolace elektrických zařízení. Zamezují odstávkám strojů, které by mohli vést ke značným finančním ztrátám.

Proto jsem se rozhodl provést diagnostiku asynchronního stroje, který v praxi pohání zásobník sesazovacího automatu SANO. Měření probíhalo ve firmě OKULA a.s. v Nýrsku v suchém bezprašném prostředí s dobrou cirkulací vzduchu a teplota okolí se pohybovala v rozmezí 20-22°C. Diagnostika probíhala v chodu naprázdno. Pro bezporuchový chod automatu SANO je za daných okolních podmínek nutné, aby teplota zkoušeného motoru nepřesahovala 45 °C. V tabulce uvedené na předchozí straně vidíme, že hodnoty teploty změřené po 12 minutě tuto mez překročili. Proto motor nevyhověl podmínkám vhodným pro provoz. Dále jsem změřil jmenovitý proud 0,6 A a v porovnání se štítkovou hodnotou stroje jsem došel k závěru, že změřený proud vyhovuje štítkové hodnotě.

Diagnostika by se dal rozdělit do dvou částí. Na zkoušky prováděné v on-line režimu a na zkoušky prováděné v off-line režimu. U zkoušek on-line dochází ke stálému monitorování sledovaného objektu. Systémy pro on-line diagnostiku jsou namontovány přímo na strojích a monitorují okamžitý stav stroje. V režimu off-line musí dojít k odstavení stroje.

V první části práce jsem se blíže zajímal o diagnostiku transformátorů, kde je velice důležité provádět provozní diagnostiku jako je například měření poměru kapacit, což jak jsem si ověřil v praxi, není možné změřit bez měniče kmitočtu. Velmi důležité je také měření ztrátového činitele, který určuje celkový stav izolace. Čím vyšší, tím izolace rychleji stárne.

Další část práce je zaměřena na diagnostiku velkých točivých strojů, u nichž se provádí diagnostika většinou na místě a můžeme jí provádět v režimu on-line. Provádíme zde měření izolačního odporu jak u statorového vinutí, tak i rotorového vinutí a další zkoušky a měření uvedené v práci.

Dané téma bylo velice zajímavé a myslím si, že obohatilo mé znalosti v oblasti elektrotechniky. Jak jsem se dozvěděl, diagnostika je v dnešním světě elektrotechniky nezbytnou součástí pro správný běh elektrických přístrojů používaných v elektroprůmyslu.

Seznam použité literatury

- [1] MENTLÍK, Václav, et al. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] KREIDL, Marcel, et al. Diagnostické systémy. Praha: ČVUT, 2001. 352 s. ISBN 80-01-02349-4.
- [3] KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Radislav. Technická diagnostika. Praha : BEN, 2006. 406 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [4] Janoušek, J., Kozák, J., Taraba, O. a kol.: Technická diagnostika. Praha: SNTL, 1988. 429s.
- [5] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha : BEN, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [6] Hilti [online]. 200? [cit. 2011-08-20]. Elektrický odpor. Dostupné z WWW: <<http://www.hilti.cz/fstore/holcz/LinkFiles/Elektrina.pdf>>.
- [7] Wheatstoneův můstek. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 24. 9. 2008 [cit. 2011-09-06]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Wheatstoneův_můstek>.
- [8] RUŽIČKOVÁ, V. Aspekty on-line diagnostiky transformátorů. Plzeň, 200?. 4 s. Oborová práce. FEL Plzeň. Dostupné z WWW: <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/17.pdf>>.
- [9] Mentlík,V., Prosr,P.: Diagnostika transformátorů. Výzkumná zpráva. KET/ET, FEL, ZČU v Plzni 2006.
- [10] MENTLÍK, Václav. Možnosti laboratorního výzkumu on-line diagnostiky výkonových transformátorů. Plzeň, 200?. 4 s. Oborová práce. FEL ZČU Plzeň. Dostupné z WWW: <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/100.pdf>>.
- [11] Barták,A. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. SNTL, Praha, 1984
- [12] Elbarton [online]. 2006 [cit. 2011-09-02]. Kusové zkoušky. Dostupné z WWW: <http://www.elbarton.cz/rozvadece.php?k=rozvadece>
- [13] TRNKA, Pavel. Perspektivy diagnostiky malých a středních točivých strojů. Plzeň, 2008. 11 s. Oborová práce. Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření.
- [14] KEMPA, Miloslav. ELEKTRICKÉ ZKOUŠKY V DIAGNOSTICE TRANSFORMÁTORŮ. Brno, 2009. 43 s. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17613>

- [15] PRSKAVEC, Ladislav. MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ. Praha, 1999. 16 s. Semestrální práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z WWW: <http://ladislav.prskavec.net/old/download.php?source=pdf/SP_Mcv.pdf>
- [16] PLOCR, Radek. AUTOMATIZOVANÉ PRACOVÍŠTĚ PRO STEJNOSMĚRNÁ MĚŘENÍ. Brno, 2009. 55 s. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16933>.