

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

On-line monitoring výkonových transformátorů

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

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

Jméno a příjmení: Petr NOVÁK
Osobní číslo: E11B0064P
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektrotechnika a energetika
Název tématu: Online monitoring výkonových transformátorů
Zadávající katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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

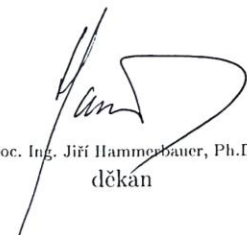
1. Popište izolační systém výkonových transformátorů.
2. Charakterizujte významné diagnostické parametry měřené online monitorovacími systémy.
3. Popište systém pro online monitoring izolačního systému transformátorů, charakterizujte jeho účel, provedení a specifika aplikace.
4. Proveďte stručnou rešerši současných monitorovacích systémů.

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


1. Mentlík, V.; Pihera, J.; Polanský, R.; Prosr, P.; Trnka, P. - Diagnostika elektrických zařízení, BEN - technická literatura, 2008
2. Mentlík, V.; Trnka, P.; Trnková, M.; Šašek, L. - Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN - technická literatura, 2011
3. elektronické informační zdroje, databáze IEEE Xplore

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

Datum zadání bakalářské práce: 2. července 2014
Termín odevzdání bakalářské práce: 25. srpna 2014


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 2. července 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení problematiky okolo On-line diagnostiky výkonových transformátorů. Je zde uvedena základní teorie transformátoru a diagnostiky.

V další části je uveden rozbor jednotlivých používaných diagnostických metod a stručná rešerše současných dodávaných monitorovacích systémů.

Klíčová slova

Transformátor, izolace, diagnostika, spolehlivost, olej, metody, systémy...

Abstract

The master theses presents the principles of On-line diagnostics of power transformers. The basic theory of the transformer and diagnostic is presented here.

The next section provides an analysis of the individual diagnostics methods used and short review of current supplied monitoring systems.

Key words

Transformer, isolation, diagnostics, reliability, oil, methods, systems ...

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 25.8.2014

Petr Novák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Svobodovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 VÝKONOVÝ TRANSFORMÁTOR.....	10
1.1 OLEJOVÝ TRANSFORMÁTOR.....	10
1.2 IZOLAČNÍ SYSTÉM OLEJOVÉHO TRANSFORMÁTORU	12
1.2.1 Olej.....	12
1.2.2 Elektrotechnický papír	16
2 DIAGNOSTIKA.....	22
2.1 ÚČEL DIAGNOSTIKY	22
2.2 SYSTÉM ON-LINE (FUNKČNÍ) DIAGNOSTIKY.....	23
2.3 ON-LINE DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ.....	23
3 DIAGNOSTICKÉ PARAMETRY VYUŽÍVANÉ ON-LINE MONITOROVACÍMI SYSTÉMY.....	27
3.1 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ- NAPĚTÍ A PROUDY	28
3.2 SLEDOVÁNÍ TEPLoty	28
3.3 MONITORING PLYNŮ A VLHKOSTI V OLEJI	29
4 VYUŽÍVANÉ ON-LINE MONITOROVACÍ SYSTÉMY	30
4.1 MĚŘENÍ TEPLoty	30
4.1.1 Teplota oleje v horní části transformátoru a teplota okolí.....	30
4.1.2 Teplota vinutí	31
4.1.2.1 Přímé měření teploty vinutí pomocí optovláknových snímačů	30
4.1.2.2 Nepřímé měření teploty vinutí.....	32
4.1.3 Rozložení teplot- magneticky montovaný senzor teploty.....	34
4.1.4 Hot- spot teplota	34
4.1.5 Stárnutí izolace	34
4.1.6 Kontrola intenzity chlazení	36
4.1.7 Zabudování dotykových teploměrů	38
4.2 MONITORING VÝŠKY HLADINY V DILATAČNÍ NÁDOBĚ.....	38
4.3 MĚŘENÍ VLHKOSTI OLEJE.....	40
4.4 MĚŘENÍ MNOŽSTVÍ PLYNŮ V OLEJI	41
4.5 ON-LINE DIAGNOSTIKA ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	43
5 REŠERŠE SOUČASNÝCH MONITOROVACÍCH SYSTÉMŮ	45
ZÁVĚR	52
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	53

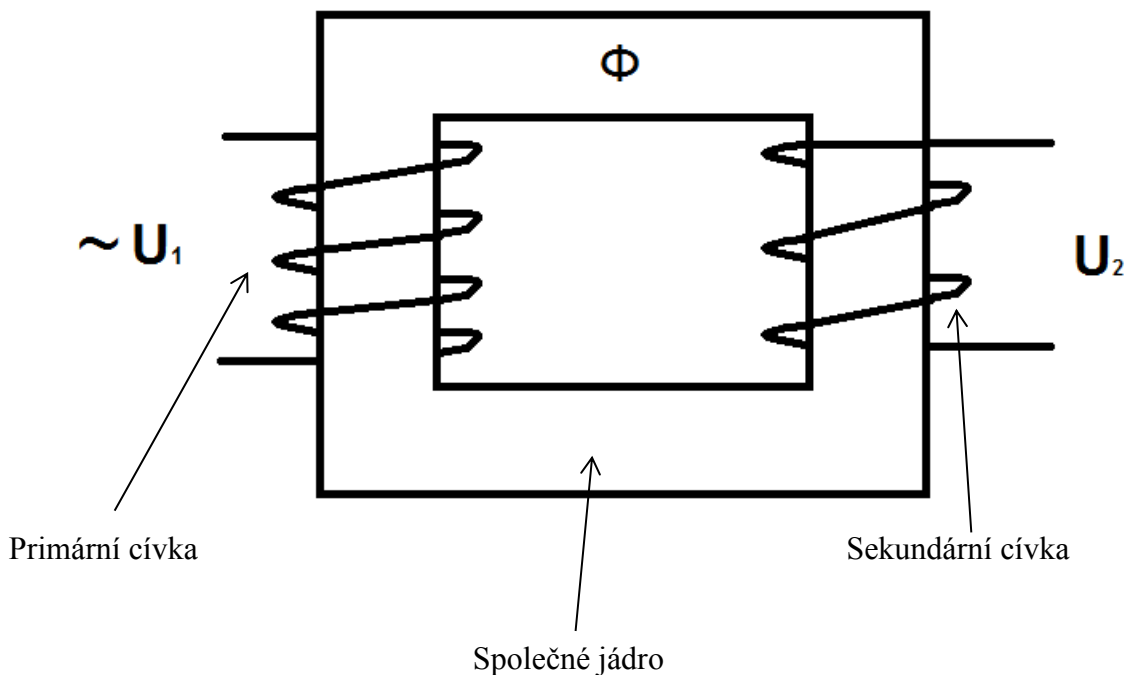
Úvod

Pro život dnešní společnosti je energetická soustava jedním z nejdůležitějších faktorů. Jen velmi málo lidí si dovede představit život bez elektrické energie. Spolehlivost dodávky je závislá na spolehlivosti jednotlivých prvků. Mezi velmi důležité prvky se řadí i výkonový transformátor, bez něhož by byl přenos na velké vzdálenosti jen těžko realizovatelný. Proto je důležité provozovat diagnostické měření bez přerušení jeho provozu.

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku On- line diagnostiky výkonových transformátorů. Samotná práce je rozdělena do čtyř částí; první se zabývá konstrukcí transformátorů, druhá uvádí obecný princip diagnostiky. Třetí část popisuje využívané diagnostické signály a čtvrtá část je zaměřena na samotné metody používané pro On- line diagnostiku výkonových transformátorů.

1 Výkonový transformátor

Transformátor je netočivý elektrický stroj, jehož princip je založený na vytvoření elektromagnetického pole průchodem střídavého proudu ve vodičích a principu elektromagnetické indukce mezi cívkami navinutými na společném magnetickém obvodu. Pomocí transformátorů lze energii transformovat na vyšší, nebo nižší napěťovou hladinu bez změny frekvence. Výkonové transformátory se vyznačují vysokou účinností transformace elektrické energie, a to až 99,5%.

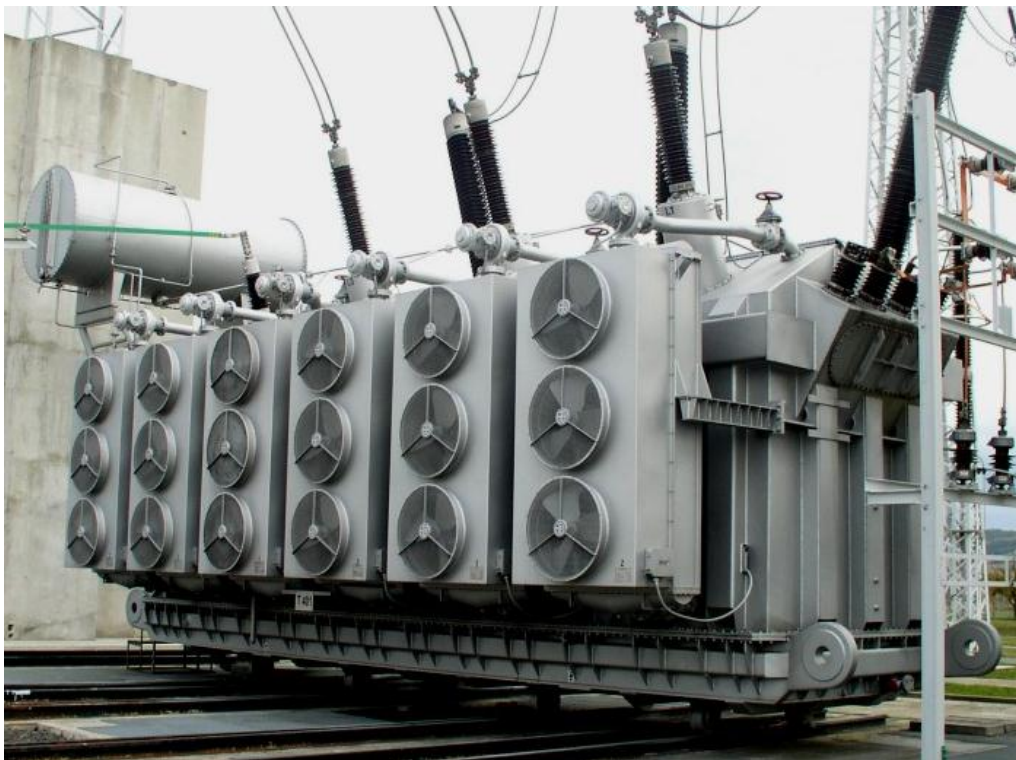


Obr. 1.1 Základní princip transformátoru

1.1 Olejový transformátor

Olejové transformátory jsou nejrozšířenější transformátory (první vyroben již v roce 1890), kde železné jádro s vinutím je ponořeno do nádoby s transformátorovým olejem. Olej plní funkci izolační a zároveň chladící. V důsledku vysoké izolační pevnosti oleje vychází menší izolační vzdálenosti a díky jeho větším chladícím účinkům je možné větší elektrické využití a tak vychází menší rozměry celého transformátoru a je umožněno využití transformátoru na vyšších napěťových hladinách. S vývojem transformátorů rostla spolehlivost a účinnost transformátorů a zároveň se zlepšovaly vlastnosti oleje a olejový transformátor byl stále více využíván v přenosových a distribučních sítích.

Olej se ohřívá od ztrát v železe a vinutí a tak narůstá jeho teplota. Proto se musí ochlazovat. U výkonových transformátorů velkých výkonů se využívá nucené chlazení, kdy je nádoba ochlazována ventilátory. Další zlepšení chlazení lze docílit po instalaci chladiče do okruhu cirkulace oleje. Protože se objem oleje po zahřátí zvětšuje, musí být do jeho okruhu zařazena expanzní nádoba (konzervátor). V poslední době se u transformátorů s vlnovou nádobou používá tzv. hermetické provedení, kdy odpadá konzervátor a expanzi oleje umožňuje pružná dilatace nádoby, především jejich chladících žebër.



Obr. 1.2 Výkonový transformátor 400/121 kV- převzato z [5]

Nevýhodou olejového transformátoru je vysoká hořlavost olejové náplně, nutnost instalovat havarijní olejovou jímku a omezená životnost oleje (výrobci garantují životnost oleje minimálně 20let), po její uplynutí musí být transformátor vypuštěn a olej podrobený čištění a chemické úpravě k opětovné neutralizaci.

Olej jako médium lze nahradit v hermeticky uzavřených transformátorech syntetickou kapalinou na bázi organických esterů. Tato kapalina se využívá v oblastech, kde jsou zvýšené nároky na ochranu životního prostředí, osob nebo majetku.

1.2 Izolační systém olejového transformátoru

Jak bylo zmíněno v bodě 1.1, izolační systém výkonového transformátoru je tvořen systémem olej- papír.

1.2.1 Olej

Olej je jedním z nejstarších kapalných izolantů. Dělíme ho na:

- rostlinný
- minerální (vhodné pro použití ve výkonových transformátorech)
- syntetické kapaliny

Rostlinné oleje

Rostlinné oleje jsou směsi esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Lze je rozdělit na:

Nevysychavé (ricinový, řepkový)- např. MEŘO- jsou chemicky rozdílné od ropných produktů, ale blíží se jim svou hustotou a viskozitou. Mají vyšší ztrátový činitel, vnitřní rezistivitu i stupeň kyselosti. Navíc na sebe váží velké množství vody, proto jsou vhodné spíše pro nízkonapěťová zařízení.

Vysychavé (lněný, dřevný)- používají se jako přísady do elektroizolačních laků.

Minerální oleje

Minerální olej se získává z ropy vakuovou destilací [7]. Vakuová destilace je frakce ropy s vhodným destilačním rozmezím: benzin, petrolej, lehké a těžké oleje. Získané destiláty jsou směsí cenných uhlovodíků, zbytky kyslíku, síry, dusíku, organických solí, vody a mechanických nečistot.

Oleje pro transformátory jsou obsaženy ve frakci „lehkého oleje“. Rafinací se z destilátu odstraní kyselá látka, sirné sloučeniny, pryskyřice a nenasycené uhlovodíky. Pro rafinaci se používá kyselina sírová, která převádí látky na nerozpustný goudron, s nímž se z oleje její velká část odstraní [9]. Zbytek kyseliny sírové a naftenové kyseliny se z oleje vypírají louhem sodným [9]. Vzniklé soli, mýdla a emulze se od oleje oddělí. Jejich zbytky se nakonec vypírají vodou. Nedostatečné vyprání oleje se projeví větším obsahem nečistot, špatnou jakostí, rychlou oxidací a stárnutím v provozu [9]. Zbytek vody se po vyprání z rafinovaného oleje odstraní buď sušením v proudu vzduchu, nebo ve vakuu. Rafinace se dokončuje bělicí hlinkou při zvýšené teplotě- tím se odstraní všechny zbytky nečistot, olej se

odbarví a zneutralizuje.

Pro výkonové transformátory se hodí oleje s větším obsahem parafinových složek, protože jsou stabilnější (nízká viskozita při nízkých teplotách, vysoká oxidační stabilita) [8]. K tomu, aby olej dobře plnil funkci chlazení, je potřeba co nejnižší viskozity.

Charakteristické vlastnosti minerálního transformátorového oleje a jejich hodnoty jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Charakteristické vlastnosti a hodnoty minerálního transformátorového oleje [14].

Charakteristika	Jednotka	Metoda testu	Garantované hodnoty		Typická hodnota
			Min	Max	
1. Fyzikální vlastnosti					
Vzhled		IEC 60296	Čirý, bez úsad		Vyhovuje
Hustota při 20°C	kg/dm ³	ISO 12185		0,895	0,868
Kinem. viskozita při 40°C	mm ² /s	ISO 3104		12	9,9
Kinem. viskozita při -30°C	mm ² /s	ISO 3104		1800	1000
Bod tuhnutí	°C	ISO 3016		-40	< -48
2. Chemické vlastnosti					
Kyselost	Mg KOH/g	IEC 62021		0,01	< 0,01
Korozivní síra		DIN 51353 ASTM D1275B IEC 62535	není korozivní		
Obsah aromátů	%	IEC 60590			9
Obsah fenol. Antioxidantu	% hm.	IEC 60666	Neměřitelné		
Obsah vody	mg/ kg	IEC 60814		30	< 20
Obsah furfuralu	mg/ kg	IEC 61198		0,1	< 0,1
3. Elektrické vlastnosti					
Ztrátový činitel při 90°C		IEC 60247		0,005	< 0,001
Mezipovrchové napětí	mN/m	ISO 6295	40		48
Průrazné napětí					
před sušením	kV	IEC 60156	30		40-60
po sušení	kV	IEC 61156	70		< 70
4. Oxidační stabilita					
Při 120°C, 164 hod.		IEC 61125 C			
Celková kyselost	Mg KOH/g			1,2	0,23
Kaly	% hm.			0,8	0,07
Ztrátový činitel při 90°C				0,5	0,04
5. Zdraví, bezpečnost a životní prostředí					
Bod vzplanutí, PM	°C	ISO 2719	135		149
Extrakt DMSO	% hm.	IP 346		3	< 3
Obsah PCB		IEC 61619	neměřitelné		neměřitelné

Syntetické kapaliny

Oleje uvedené výše, mají jeden závažný nedostatek, a to nesnášenlivost se životním prostředím a ochranou lidského zdraví svou nesnadnou biologickou odbouratelností [7]. Z tohoto důvodu se vyvíjejí kapaliny ze surovin, které svou podstatou neohrožují životní prostředí a snadnou biologickou odbouratelností nezpůsobují současné potíže a ztráty. Například transformátorový syntetický olej MIDEL 7131 má deklarovanou 99% odbouratelnost za 21 dní [15].

Charakteristické vlastnosti syntetického transformátorového oleje a jejich hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Charakteristické vlastnosti a hodnoty syntetického transformátorového oleje (MIDEL 7131) [7].

Fyzikální vlastnosti	Jednotky	Požadavek dle normy	Typické hodnoty při dodání
		DIN VDE 0375	MIDEL 7131
Barva	HU	200	125
Vzhled		Jasný, bez usazenin	Jasný, bez usazenin
Hustota při 20°C			
	g/ml	< 1	0,97
Kin. Viskozita při 40°C			
	mm ² /s	< 35	28
Kin. Viskozita při -20°C			
	mm ² /s	< 3000	1500
Bod vzplanutí			
	°C	> 250	275
Bod hoření			
	°C	> 300	322
Bod tuhnutí			
	°C	< -45	-60
Krystalizace			
		negativní	negativní
Chemické vlastnosti			
Obsah vody	mg/ kg	< 200	50
Neutralizační číslo	mg KOH/ g	< 0,03	< 0,03
Oxidační stabilita			
úplná kyselost	mg KOH/ g	< 0,3	0,01
celk. obsah kalů	% hm.	< 0,01	0
neobsahuje PCB látky			
Elektrické vlastnosti			
Průrazné napětí	kV/ 2,5mm	> 45	> 70
Dielektrický ztrátový činitel při 90°C, 50 Hz		< 0,03	< 0,03
Měrný odpor (stejn. proud) při 90°C	Gohm-m	> 2	> 50

1.2.2 Elektrotechnický papír

Elektrotechnický papír je nezbytnou součástí elektroizolačního systému transformátoru. Elektrotechnický papír lze rozdělit na:

- Elektrotechnický papír
- Elektrotechnická lepenka

Papír

Papír je materiál, který se vyrábí zhutněním vláken. Tvoří ho jemná rostlinná vlákna na bázi celulózy. Nejčastěji používaný materiál je dřevo, většinou jehličnanů. Lze také využít bavlnu, konopí, nebo len. Neupravený papír je velmi savý, proto se do něj přidávají různé přísady pro dosažení požadovaných vlastností (nízká navlhavost, vysoká pevnost v tahu, vysoká elektrická pevnost, nízký ztrátový činitel) [10]. Jakost a vhodnost použití papíru pro konkrétní aplikace určuje použitá přísada (polymery, pojiva, plnidla) a zpracování.

Lepenka

Nejčastěji se lepenka využívá pro zpracování na izolační vložky do transformátorů a k těsnění jako izolační materiál. Je vyrobena výhradně z přírodních vláken, z buničiny nebo bavlny. Lepenka může být lesklá, nebo hlazená, ve světle hnědé barvě, v různých tloušťkách a rozměrech. Musí mít velmi dobré elektrotechnické vlastnosti. Vlastnosti musí splňovat hodnoty, dané normou [11, 12, 13]. Hodnoty jednotlivých vlastností jsou uvedeny v tabulce 3 [10].

Tab. 3 Vybrané požadované vlastnosti transformátorové lepenky

Vlastnost	Hodnota
Minimální pevnost v tahu [MPa] v podélném směru v příčném směru	50 25
Minimální tažnost při přetržení [%] v podélném směru v příčném směru	5 5,5
Maximální Stlačitelnost při tlaku 40 MPa [%]	7
Maximální trvalé stlačení [%]	2
Maximální smrštění [%] délka šířka tloušťka	2 1,7 7
Maximální obsah popela [%]	6
Maximální vlhkost [%]	9
pH vodného výluhu (za horka i studena)	6 až 8
Maximální rozdíl ztrátového činitele tgδ transformátorového oleje	0,01

V transformátoru se využívá mnoho druhů lepenky. Druhy a jejich složení jsou uvedeny na v tab. 4.

Tab. 4 Druhy lepenky využívané v transformátoru [10].

Lesklá lepenka			
Třída	Druh	Podtřída	Složení
B2	Lesklá lepenka, vysoké chemické čistoty	B 2.1	100 % sulfátová dřevní buničina
		B 2.2	100% bavlna
		B 2.3	směs sulfátové dřevní buničiny a bavlny
		B 2.4	směs bavlny a juty
B3	Tvrzená lesklá lepenka, velmi tvrdá a neohebná, charakterizována vysokou chemickou čistotou a mechanickou pevností, její povrch nese otisk tkaniny	B 3.1	100% sulfátová dřevní buničina
		B 3.2	100% bavlna
		B 3.3	směs sulfátové dřevní buničiny a bavlny
		B 3.4	směs bavlny a juty
B4	Lesklá lepenka, vysoké chemické čistoty s vysokou nasákavostí oleje a schopností tvarování	B 4.1	100% sulfátová dřevní buničina
		B 4.2	100% bavlna
		B 4.3	směs sulfátové dřevní buničiny a bavlny
		B 4.4	směs bavlny a juty
B5	Tvrzená lesklá lepenka, s vysokou chemickou čistotou a nasákavostí oleje a schopností tvarování	B 5.1	100% sulfátová dřevní buničina
		B 5.2	100% bavlna
		B 5.3	směs sulfátové dřevní buničiny a bavlny
		B 5.4	směs bavlny a juty
Obyčejná lepenka			
P2	Obyčejná lepenka, vysoké hustoty a vysoké chemické čistoty	P 2.1	100% sulfátová dřevní buničina
		P 2.2	100% bavlna
		P 2.3	směs sulfátové dřevní buničiny a bavlny
		P 2.4	směs bavlny a juty
P4	Obyčejná lepenka, vysoké chemické čistoty a vysokou nasákavostí oleje	P 4.1	100% sulfátová dřevní buničina
		P 4.2	100% bavlna
		P 4.3	směs sulfátové dřevní buničiny a bavlny
		P 4.4	směs bavlny a juty
P5	Obyčejná lepenka, vysoké chemické čistoty a vysokou nasákavostí oleje	P 5.1	100% sulfátová dřevní buničina
		P 5.2	100% bavlna
		P 5.3	směs sulfátové dřevní buničiny a bavlny
		P 5.4	směs bavlny a juty

V transformátoru se využívá mnoho druhů lepenky. Například: lisovaná lepenka pro mezifázové bariéry, nebo pro podložky cívek (Obr. 1.3), vlnitá lepenka pro chladicí kanály vinutí (Obr. 1.4), popřípadě vlnitá lepenka doplněna diamantovým vzorem, která je dotována epoxidy, kvůli zpevnění profilu (Obr. 1.5), tažená lepenka pro distanční pásy (Obr. 1.6), vrstvená a vytvrzená lepenka s leštěným povrchem pro izolaci vinutí (Obr. 1.7).



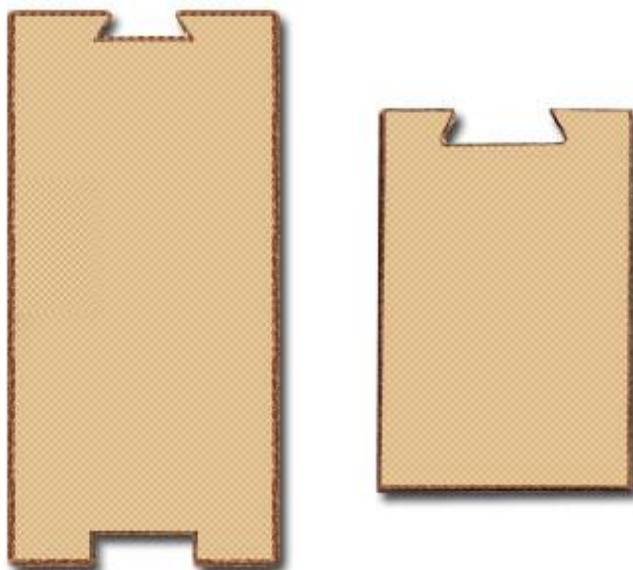
Obr. 1.3 Lisovaná lepenka pro podložky cívek a mezifázové bariéry- převzato z [20].



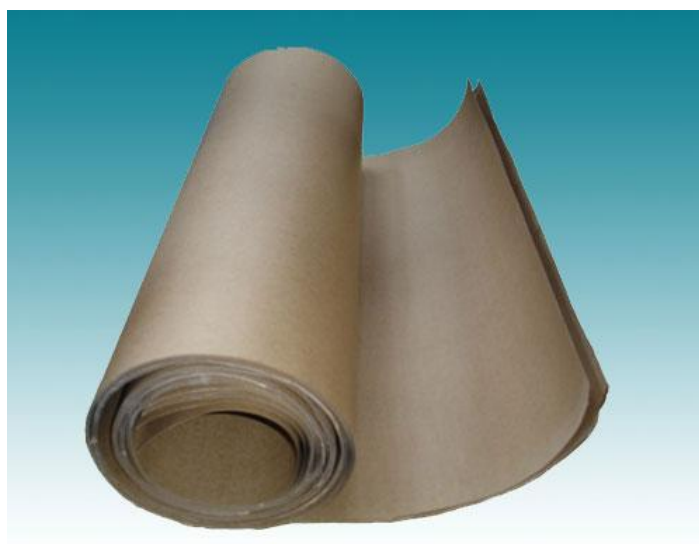
Obr. 1.4 Lepenka pro chladicí kanály- převzato z [19].



Obr. 1.5 Vlnitá lepenka pro chladicí kanály doplněná diamantovým vzorem- převzato z [17].



Obr. 1.6 Tažená lepenka pro distanční pásky- převzato z [18].



Obr. 1.7 Leštěná lepenka pro izolaci vinutí- převzato z [21]

2 Diagnostika

V dnešní době se neustále zvyšují nároky na přesnost, kvalitu a spolehlivost všech objektů při odpovídající ceně a maximální šetrnosti k životnímu prostředí. Abychom mohli docílit těchto aspektů, musí zároveň růst nároky na informace a způsoby jejich získávání. Tyto trendy se nevyhýbají ani elektrotechnice.

Současnou elektrotechniku si nelze představit bez dostatečných informací na všech jejích úrovních, a proto nezastupitelnou roli má právě diagnostika. Diagnostika je prostředek zjišťování- určení- stavu objektu. V technice jde logicky o diagnostiku technickou a v elektrotechnice pak o diagnostiku elektrotechnologickou, neboť velmi úzce souvisí se vším, co se procesů výroby elektrických zařízení, včetně její přípravy i jejich následného provozu, týká [30]. Informace, které takto pojatá diagnostika zjišťuje, jsou velmi nezbytné.

2.1 Účel diagnostiky

On- line diagnostika, je v dnešní době nezbytná ke spolehlivému provozu energetické soustavy. Základním parametrem je možnost aplikovat měřící metody a monitoring na zařízení během jeho nepřerušného chodu. Je velmi důležité, během diagnostiky transformátoru pravidelně zaznamenávat naměřené veličiny a poruchy vzniklé za provozu. Z nich lze později předpovídat vznikající poruchu, ještě předtím než vznikne. Například, pokud nám záznamy ukáží na opakující se nedostatky v jednom určitém směru, je potřeba zjistit, co lze s tímto faktorem udělat- úprava provozního prostředí (teplota, vlhkost), nebo úprava technologického procesu výroby. Pomocí pravidelného zaznamenávání dat lze také přejít z periodicky prováděné údržby na údržbu prováděnou na základě vyhodnocování stavu zařízení.

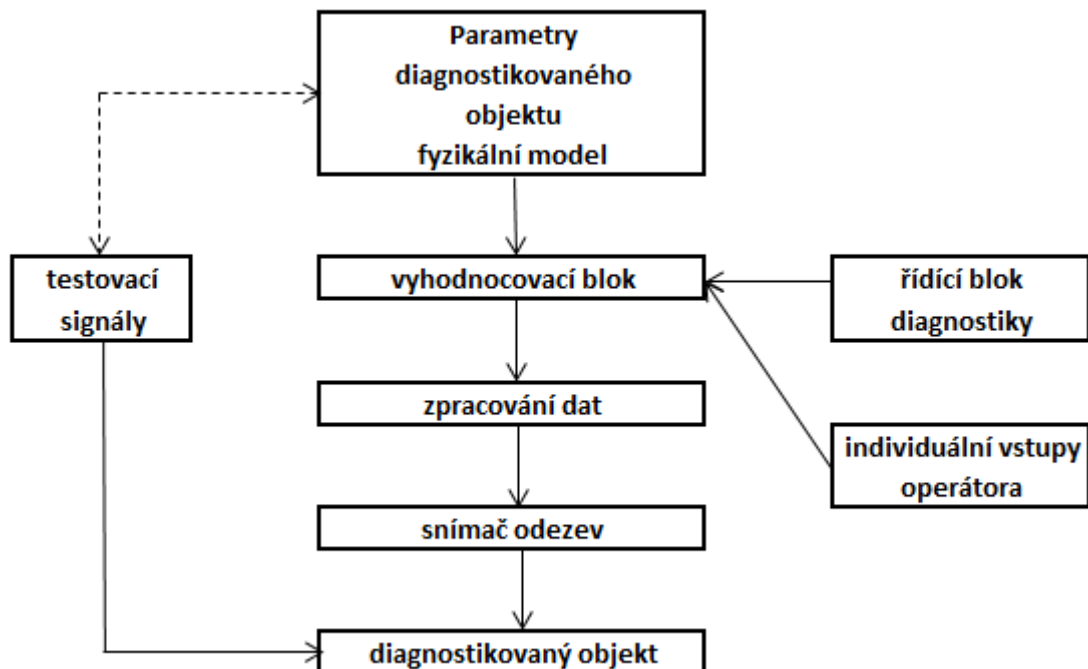
Další výhodou on-line diagnostiky je fakt, že je řízena počítačem, s minimálním zásahem obsluhy. Tímto lze minimalizovat chybu lidského faktoru, například dlouhodobou monotematickou prací. Pokud On- line diagnostika odhalí poruchu, signalizuje obsluze místo poruchy a zároveň navrhne nejvhodnější postup pro odstranění poruchy. Tím se zrychlí odstranění následků poruchy pomocí přímé opravy, bez zbytečných prodlev a úkonů navíc.

Požizovací cena On- line diagnostiky na nový transformátor, je nákladná záležitost, ale velkou výhodou do budoucího provozu zařízení s rychlou návratností. Pomocí včasného odhalení poruchy lze zamezit odstavení transformátoru a tím finanční postihy za přerušený

provoz, či poruše transformátoru a tím jeho nákladné opravě, či výměně.

2.2 Systém On-line (funkční) diagnostiky

Jak bylo zmíněno již v bodě 2., On-line diagnostika probíhá za plného provozu diagnostikovaného zařízení. Při návrhu diagnostického systému je důležité věnovat pozornost probíhajícímu toku informací. Jeho základem je vyhodnocovací blok, který zpracovává informace diagnostického systému. Je řízen řídicím blokem, nebo pomocí vstupů operátora, řídícího celý diagnostický proces. Kromě dat odezev diagnostikovaného objektu vstupují do hodnotícího bloku i informace o parametrech objektu, včetně jejich tolerancí dodávaných jeho fyzikálním modelem. Řídicí blok také ovládá generátor testovacích signálů vysílaných do diagnostikovaného transformátoru [23].



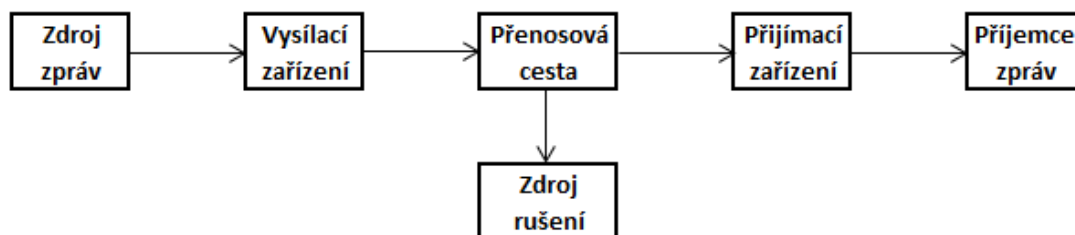
Obr. 2.1 Informační toky v diagnostickém systému [23]

2.3 On-line diagnostika transformátorů

Transformátor patří v energetické soustavě ke klíčovým prvkům. Proto je nutné na těchto zařízeních provozovat technologickou diagnostiku.

Využití moderních metod založených na nepřetržitém sběru a zaznamenávání dat, je nezbytné v provozech, kde by při poruše mohlo dojít k újmám na životě, k vysokým národohospodářským ztrátám, nebo kde by odstavení takového stroje způsobilo jiné vážné problémy (dodávka elektrické energie do nemocnic, metra a jiné). Diagnostický systém je

založen na vhodném složení jednotlivých zařízení do tzv. měřicího systému. Měřicí systém je znázorněn na obr. 2.2.



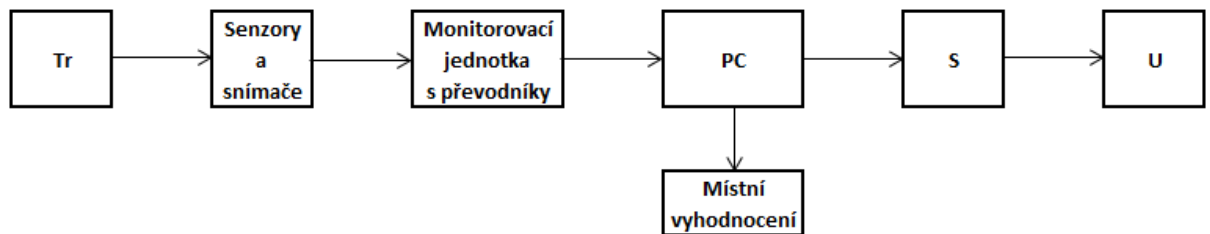
Obr. 2.2 Schéma sdělovací soustavy měřicího systému [2]

Zprávy získané z diagnostického systému (zdroj zpráv) postupující do vysílacího zařízení (příslušný senzor), v němž jsou upraveny na signál, který je vhodný pro přenos přenosovou cestou. Přenosová cesta může být realizována pomocí různého přenosového prostředí (např. venkovní vedení, symetrická kabel, koaxiální kabel apod.) a musí být schopna přenést změny dané fyzikální veličiny.

Během přenosu signálu z vysílacího zařízení přenosovou cestou, je signál ovlivňován řadou rušení, které pozměňují jeho tvar v přijímacím zařízení a tím snižují jeho věrohodnost. Na signál působí také fyzikální vlastnosti vlastní přenosové cesty. Pokud by došlo k velkému rušení, ať vlivem přenosové cesty, nebo vnějším zdrojem rušení, nebo jejich součtem, přenášený signál ztratí svůj smysl, protože jeho vypovídající hodnota by byla nulová. Přijímací zařízení (většinou PC doplněný o vhodnou periférii), musí signál i s rušením zpracovat tak, aby zpráva na jeho výstupu byla co nejpodobnější zprávě vyslané. Přijímací zařízení zprávu zpracovává, ukládá, případně zobrazuje (grafické zobrazení, tisk), dle požadavků koncového uživatele (příjemce zpráv).

Pokud máme on-line systém trvale připojený k diagnostikovanému objektu, nazýváme je monitorovacími systémy [23]. Monitorování je trvalé sledování stavu objektu s průběžným vyhodnocováním stavu. Velikou výhodou toho přístupu je možnost neustále pozorovat stav zařízení, což umožňuje velice rychlou reakci na změnu sledovaných parametrů. Další výhodou je také to, že si lze přizpůsobit sestavu snímačů a digitálních indikátorů dle požadavků uživatele.

Rozvržení diagnostického systému volíme podle funkce objektu sledované v určitých místech, ve kterých je signalizována porucha funkce objektu změnou fyzikální veličiny. V případě přesnější diagnostiky některého ze složitějších objektů, je možnost měřit i několik fyzikálních veličin na několika místech najednou. Pomocí počítačové techniky jsou tyto hodnoty zaznamenávány, popřípadě graficky vyhodnocovány a jsou prováděny on-line výpočty, pomocí kterých se vyhodnocuje nebezpečnost poruchy provázené výstražnými signály, v nejhorším případě vedoucí až k automatickému přerušení provozu zařízení [2]. Pro průběžné vyhodnocování stavu objektu, lze změřené parametry zaznamenat pomocí expertních systémů. Tyto údaje lze poté využít pro předpovídání opotřebení zařízení, či k řešení poruchových situací, které by bez těchto údajů vyžadovali mnohaleté zkušenosti a tím pádem i přítomnost experta na tuto problematiku. Schéma sdělovací soustavy je poté možno upravit do následující podoby viz obr. 2.3.



T_r- sledovaný transformátor

S- server

U- uživatel

Obr. 2.3 Blokové schéma monitorovacího systému [2]

Pro správnou funkci on-line diagnostického systému je nutné osadit transformátor vhodnými senzory k měření potřebných fyzikálních veličin a přivedení signálu jimi změřenými do místa vyhodnocení. Z toho vyplývá, že je v místě vyhodnocení potřeba dostatečně výkonný počítač pro grafické zpracování a uložení naměřených dat. Je vhodné vybrat takový systém, který umožní později zpracovat data v libovolném tabulkovém programu (MS Excel, Lotus 1-2-3 a jiné). Veškerá získaná data lze zpracovávat přímo na místě, nebo ukládat na server pro pozdější vyhodnocení. Při monitorování je vždy posledním článkem sám uživatel (obsluha), který rozhodne o dalším provozu a zatížení diagnostikovaného objektu.

Cílem nepřetržitého monitorování je odhalit slabá místa v izolaci stroje a dále určit

stupeň znehodnocování této soustavy, k čemuž je potřeba nepřerušovaný sběr dat a jejich komplexní vyhodnocování. Monitorovací zařízení nám za provozu navíc pomáhá optimalizovat údržbové práce na zařízení, aby nebyla nutná periodická údržba, ale pouze údržba na pokyn monitorovacího zařízení. Monitorovací systém by měl plnit tyto funkce:

- stálé provozní sledování vybraných fyzikálních veličin,
- podávání alarmových hlášení, pokud některá z měřených veličin překročí nastavenou mezní hodnotu,
- v případě rapidního překročení mezní hodnoty veličiny přímí zásah do řídicího systému zařízení,
- stanovování aktuálního stavu zařízení- okamžitě vyhodnocovat měřené veličiny

Protože musíme zajistit zachování bezpečnosti při měření a eliminovat nežádoucí rušivé signály, které vznikají při běžném chodu transformátoru, je měření potřebných fyzikálních veličin za plného chodu stroje velice komplikované. Z tohoto vyplývá, že cena některých měřících zařízení je velice vysoká v poměru k jejich využitelnosti a vypovídající hodnotě naměřených dat.

Z tohoto důvodu se využívá spíše menších diagnostických zařízení, která monitorují pouze ty diagnostické veličiny, u kterých byla prokázána přímá souvislost s degradací izolace transformátoru, končící po delší době provozu průrazem izolace. U těchto menších zařízení se proto více klade důraz na přesné a rychlé měření a vyhodnocení naměřených veličin a odstranění rušivých vlivů působících při samotném měření.

3 Diagnostické parametry využívané on-line monitorovacími systémy

Volba sledovaných parametrů je zásadní rozhodnutí, na kterém závisí realizace samotného monitorovacího systému. Základním diagnostickým indikátorem, který má podstatný vliv na bezporuchový chod transformátoru, je stav izolačního systému. Organické materiály, ze kterých je izolační systém výkonových transformátorů tvořen, jsou velmi citlivé na působení provozních degradačních činitelů. Na izolaci transformátoru v provozu působí celá řada vlivů. Jedná se o komplexní působení, přičemž účinky jednotlivých vlivů se mohou navzájem ovlivňovat. Mezi hlavní provozní vlivy patří zejména mechanické namáhání (otřesy, vibrace), vlivy klimatu, chemické vlivy (oxidace, koroze), záření, působení teploty (rychlé změny) a elektrické pole (náhlé změny intenzity pole, výbojová činnost) [22]. Je důležité uvažovat také vypovídající schopnost a měřitelnost daného parametru a celkové náklady na systém.

Jednoznačně největší procento závad a vznik poruchy se vyskytuje v aktivní části (vinutí a magnetický obvod) a v izolačním systému transformátoru [22]. Nejdůležitější parametry, které indikují stav vinutí a hlavní izolace jsou:

- plyny rozpuštěné v oleji,
- přítomnost kyslíku,
- obsah vlhkosti,
- teplota.

Přestože k rozkladu (štěpení chemických vazeb) minerálního oleje a celulózového papíru přispívají všichni uvedení činitelé, hlavní omezující parametr pro zatěžování transformátoru je teplota. Pro sledování zestárnutí a určení zbytkové životnosti byly navrženy následující parametry [22]:

- snímání výstupního napětí a proudu pro každou fázi,
- snímání teploty oleje v horní části transformátoru,
- snímání teploty vinutí,
- snímání teploty na vstupu a výstupu z chladiče (teplotní spád na chladičích),
- sledování obsahu plynů v oleji,
- sledování obsahu vlhkosti v oleji.

Volbu sledovaných parametrů je vždy nutné posoudit individuálně, přímo k určitému transformátoru a brát v potaz jeho stáří a momentální stav. Je jednoznačné, že čím větší je počet sledovaných parametrů, tím bude vyšší i výsledná cena monitoringu.

3.1 Měření základních parametrů- napětí a proudy

Měření provozních veličin transformátoru je jedním ze základních parametrů vhodných pro zařazení do skupiny veličin pro monitorování. Pomocí měření napětí a proudů můžeme určit okamžité zatížení transformátoru a navíc také z hodnoty zatěžovacího proudu určit Jouleovo ztráty ve vinutí, a tím pádem i odhadnout velikost tepelného namáhání izolačního systému transformátoru. Je velmi důležité v průběhu diagnostiky ukládat naměřená data, neboť pomocí těchto dat lze získat informace o způsobu zatěžování transformátoru a o jeho životnosti.

Samotné měření napětí a proudů je provedeno měřicími transformátory, které se většinou umísťují na kondenzátorové průchodky. Měřicí transformátory bývají součástí běžné výzbroje transformátoru a proto je vhodné při navrhování, pokud odpovídají našim požadavkům, zvážit možnost jejich využití. Především možnost využití výstupního signálu příslušného měřicího transformátoru pro připojení do řídicího počítače (je důležité zvážit předem kompatibilitu senzorů s typem přenosové cesty).

3.2 Sledování teploty

Při přeměně střídavého proudu v transformátoru se část energie ztratí. Tato část energie ztracená v transformátoru se přemění na teplo ve vinutí, v magnetickém obvodu a jiných částech transformátoru. Teploty některých částí mohou občas výrazně překročit teplotu okolí. Oteplení jednotlivých částí roste se zvyšujícím se zatížením a se ztrátami, které v nich vznikají. Oteplení lze omezit zvýšením intenzity chlazení.

Transformátor je z tepelného hlediska nehomogenní těleso. Plechy magnetického obvodu, střídající se s vrstvami izolace, se vyznačují velkou tepelnou vodivostí a poměrně malou tepelnou kapacitou. Vinutí transformátoru také představuje složitou konfiguraci, která má velkou tepelnou vodivost. Plechy magnetického obvodu transformátoru a měď vinutí jsou za provozu stálými zdroji tepla. Proto dochází v magnetickém obvodu a ve vinutích ke sdílení tepla tepelnou vodivostí z vnitřních teplejších částí k povrchu vnějšímu, z něhož se teplo odvádí. Teploty oleje a jednotlivých částí transformátoru jsou proto v různých výškách nádoby různé.

3.3 Monitoring plynů a vlhkosti v oleji

Monitoring plynů a vlhkosti v oleji nenahrazuje diagnostiku, ale slouží k zvětšení efektivnosti a spolehlivosti. Tyto metody slouží k prvotní informaci o začínající závadě v transformátoru a možnosti jejího odhalení v počátečním stádiu vzniku a neumožňují přecházet náhlým poruchám způsobených přepětím, zkratem, vlivem mechanického poškození izolace a náhlého průrazu, ale umožňují nám odhalovat závady vinutí, v nádobě, v magnetickém obvodu, ve spojích, v průchodce, popřípadě ve voliči přepínacího zařízení (je-li transformátor opatřen zařízením k přepínání odboček vinutí při zatížení).

4 Využívané on-line monitorovací systémy

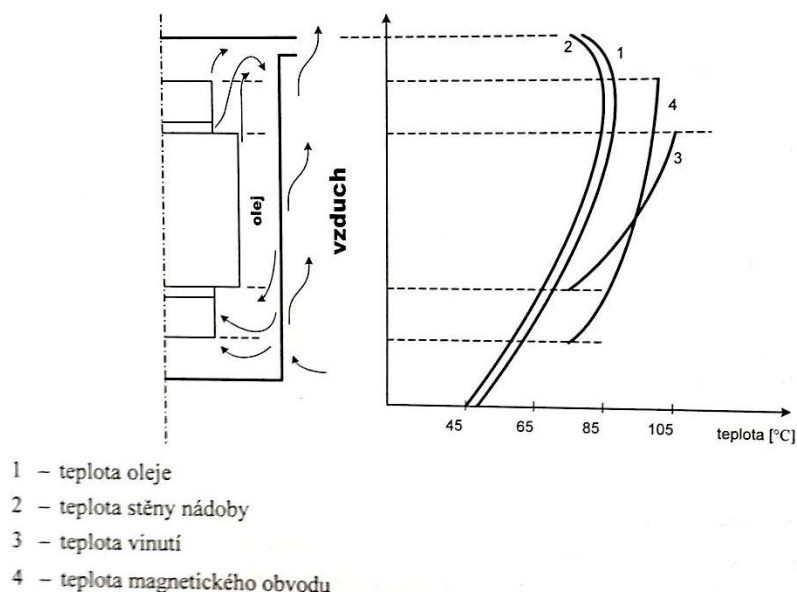
V této kapitole je uveden přehled metod, které se využívají pro on-line diagnostiku transformátorů.

4.1 Měření teplot

Měření teplot je jedním z velmi důležitých a základních parametrů pro monitoring výkonových transformátorů.

4.1.1 Teplota oleje v horní části transformátoru a teplota okolí

Pokud je transformátor vystaven nadměrnému teplotnímu namáhání, je nepříznivě ovlivňován i jeho izolační systém olej- papír. Teplota je výchozím parametrem pro odhad stupně zestárnutí transformátoru a je považována za hlavní omezující parametr pro zatěžování transformátoru. Je důležité si uvědomit, že stárnutí izolace neprobíhá jen při zvýšených teplotách, ale v určité míře probíhá při každé teplotě. Životnost izolace je teoreticky nekonečná pouze při absolutní nule (tj. $-273, 15^{\circ}\text{C}$). Maximální teplota, které můžeme izolaci transformátoru vystavit je tím vyšší, čím kratší je celkový čas, po který je izolace vystavena této teplotě.



Obr. 4.1 Typický průběh teploty v závislosti na výšce transformátoru- převzato z [2]

Pro měření teploty oleje se využívají tzv. jímkové odporové teploměry, které se umísťují do horní části transformátorové nádoby. Umístění teploměrů vyplývá z obr. 4.1, ze kterého je zřejmé, že se teplota vzhledem k horní části nádoby zvyšuje. Odporové snímače teploty řadíme mezi kontaktní snímače, kdy je snímač v přímém kontaktu s měřeným prostředím. Funkcí čidla (měřícího odporu) je převod teplotní změny prostředí na změnu

elektrického odporu. Využívají se materiály, které jsou schopny měnit svůj elektrický odpor v závislosti na změně teploty.

Stonek s čidlem bývá nejčastěji vyroben z nerezové oceli. V kovové hlavici s dostatečným stupněm krytí (Např. IP56) je osazena přípojovací svorkovnice. Rozměry celkové délky stonku a ponoru jsou volitelné podle potřeby. Na výběr je několik různých produktů, podle teplotních rozsahů a průměru jímky.

Součástí teploměru, které mají přípojovací hlavici, může být i vestavěný převodník, který převádí výstupní veličinu teploměru (odpor) na proudový unifikovaný signál 4 až 20 mA [2]. Stále více se však využívá přenosu po digitální sériové lince RS 485, která umožňuje pomocí páru kroucených vodičů přenos až na vzdálenost 1200m i v rušeném průmyslovém prostředí. Proto mnoho firem nabízí převodníky pro zajištění této komunikace, tzn. pro převod a úpravu ostatních signálů na sériový datový přenos včetně signálů proudové smyčky. Někdy je již tento převodník implementován jako součást čidla společně se samotným senzorem.

Je vhodné sledovat hodnoty teploty oleje a zatížení transformátoru také vzhledem k okolní teplotě. Teplotu okolí je možno měřit pomocí běžných prostorových průmyslových teploměru k měření teploty vzduchu.

4.1.2 Teplota vinutí

Pro měření teploty vinutí lze použít dvě základní metody:

- Přímé měření teploty vinutí
- Nepřímé měření teploty vinutí

4.1.2.1 Přímé měření teploty vinutí pomocí optovláknových snímačů

V současné době se v energetice využívají dva optovláknové systémy, a to bodového a rozprostřeného měření teploty. Pokud bychom použili optovláknový bodový systém při klasickém způsobu měření (tj. elektricky), realizace bude velmi komplikovaná. Typickou aplikací je v energetice přímé sledování teploty vinutí transformátorů vvn pomocí optovláknových čidel instalovaných do každého vinutí. Pomocí přímého sledování teploty v transformátoru, lze minimalizovat požadavky na údržbu, optimalizovat zatížení, prodloužit životnost a také vyloučit možné poruchy v transformátoru ještě před jejich vznikem. Ve všech těchto aplikacích se využívá výborných dielektrických vlastností optického vlákna.

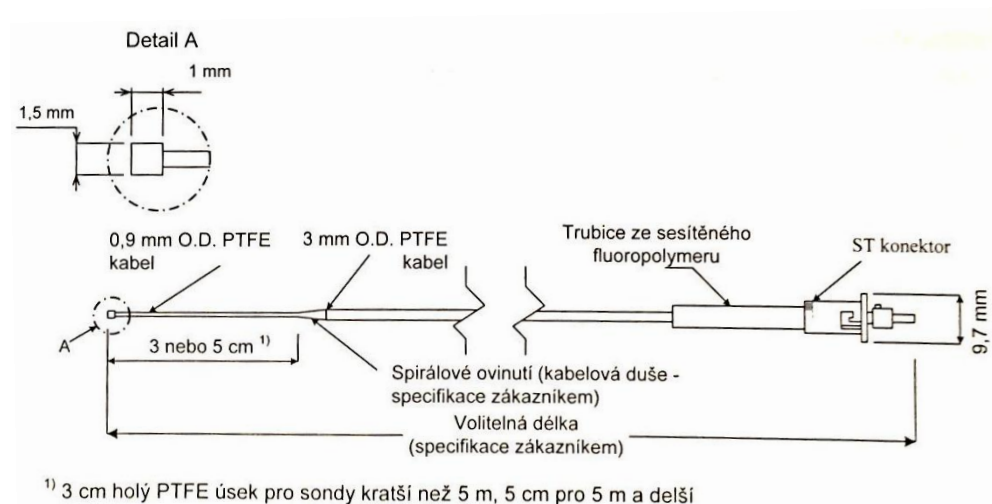
Bodové optovláknové teploměry pracují na různých principech. Nejčastěji se využívají

změny v absorpčním spektru polovodiče GaAs v závislosti na teplotě nebo měření úbytku intenzity fluorescence teplotně citlivého fosforu [2].

- **Využití změn v absorpčním spektru-** při využití tohoto principu je na konci optického vlákna připojen polovodičový krystal, který je v kontaktu s měřeným objektem. Pomocí vlákna je ke krystalu přivedeno bílé světlo, krystal část světla absorbuje a zbytek vrátí vláknem zpět do přístroje. Ze spektrálního složení (barvy) zbytkového světla vráceného do přístroje se určí teplota krystalu. Je důležité si uvědomit, že informace o teplotě se vyhodnocuje ze spektra světla a nikoliv z jeho intenzity.
- **Měření poklesu intenzity fluorescence-** při využití tohoto principu je k fosforu umístěného na konci optického vlákna přivedeno modré světlo. Konec vlákna s fosforem je stejně jako u předchozí metody v kontaktu s měřeným objektem. Modré světlo vybudí fluorescenci (luminiscenci) v červené oblasti světla. Vybudené světlo se přivede vláknem zpět do přístroje a změří se doba poklesu intenzity fluorescence, která je přímo závislá na teplotě měřeného objektu.

Vybavení potřebné pro přímé měření teploty vinutí

Pro přímé měření teploty vinutím jádra, případně průchodek ve výkonových transformátorech je možno použít optické snímače- viz obr. 4.2

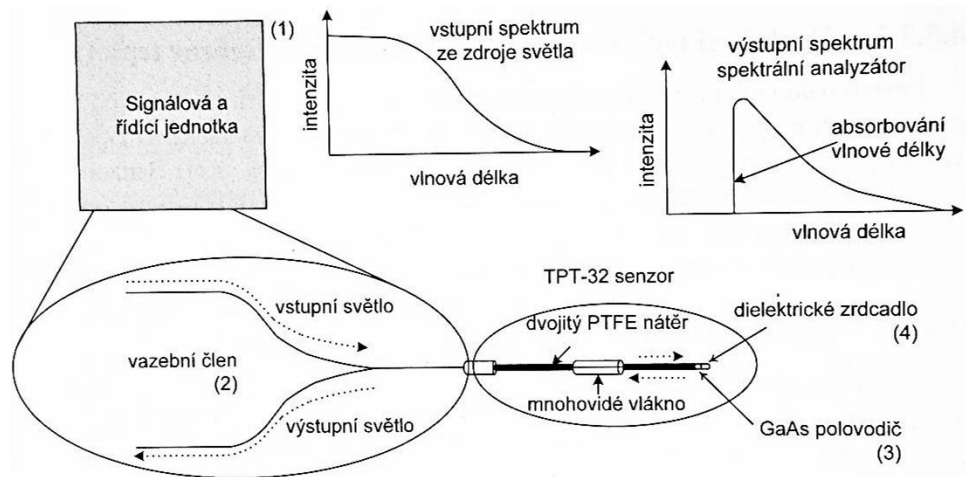


Obr. 4.2 Senzor pro přímé měření teploty vinutí- převzato z [2]

Povrch těchto vláken je opatřen teflonovým pláštěm a zakončení (polovodič a konec

vlákna) je vložen do vysokoteplotního lepidla, obojí se provádí kvůli ochraně. Při měření se využívá principu změny v absorpčním spektru polovodiče GaAs v závislosti na teplotě.

Optovláknový senzor se využívá společně se signálovou a řídicí optickou jednotkou, kvůli úpravě a zpracování signálu. Celý proces měření a zpracování je znázorněn na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Schéma měřicího řetězce pro přímé stanovení teploty vinutí- převzato z [2]

Bílý světelný zdroj (1) umístěný uvnitř signálové jednotky přivádí světlo do jedné z větví vláknového optického vazebního členu (*optic coupler*) (2). Toto světlo postupuje optickým vláknem až k polovodiči (3), kde jsou některé vlnové délky absorbovány. Neabsorbované světlo se odráží dielektrickým zrcadlem (*dielectric mirror*) (4) a vrací se do vazebního členu, kde je nasměrované ke spektrometru (5) [2].

4.1.2.2 Nepřímé měření teploty vinutí

Z důvodu velké obtížnosti přímého měření teploty, se v praxi využívá spíše nepřímé měření teploty vinutí, a to pomocí tzv. tepelné kopie vinutí (ukazatel teploty vinutí AKM). Tento princip je založen na snímání teploty v horní části nádoby transformátoru a měření zatěžovacího proudu, který ohřívá topný odpor umístěný uvnitř přístroje. Oteplení vinutí nad nejvyšší teplotou oleje odpovídá oteplení topného odporu. Jak teplota v olejové jímce, tak i teplota topného odporu působí na měřicí vlnovec, jehož pohyb je přenášěn pákovým ústrojím na ručičku a na hřídel s mikrosplínací v bubíncích se stupnicí, na níž se zobrazuje teplota vinutí.

Jednou ze součástí ukazatele teploty vinutí je přizpůsobovací člen. V závislosti na hodnotě zatěžovacího proudu je výstupem z tohoto členu signál oteplovacího proudu- I_h (tab. 5), jehož velikost koresponduje s teplotou odpovídající přírůstku nad teplotou oleje. [2]

Tab. 5 Hodnoty teploty nad teplotu oleje a odpovídajících proudů [2].

Teplotní rozdíl [°C]	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
I_h/mA	620	680	730	780	830	880	920	970	1010	1050	1090	1130	1160	1200

4.1.3 Rozložení teplot- magneticky montovaný senzor teploty

Povrchovou teplotu transformátorové nádoby je možno měřit pomocí kontaktních povrchových magnetických snímačů teploty. Povrchový snímač s magnetickým držákem se používá k připojení na feromagnetické materiály (železo, ocel). Senzor by měl být celiství a ve vodě odolném provedení. Odporové teploměry (RTD- *resistance temperature detectors*) mají zabudovaný převodník 4 až 20 mA, který je napájený z monitorovací jednotky- výstupní signál je proudový [2].

4.1.4 Hot- spot teplota

Hot-spot teplota je teplota nejteplejšího místa transformátoru (vinutí). Tato teplota je důležitý parametr pro stanovení zatížení a pro odhad zestárnutí izolačního systému transformátoru. Stanovení přesné polohy hot-spot teploty je problematické, proto přímé měření této teploty je velice komplikované. Provádí se instalováním senzoru přímo do vinutí [29]. Další způsob je odhad na základě experimentů. Při odhadu se vychází ze zjednodušeného rozložení teplot a předpokladu, že teplota uvnitř vinutí roste lineárně od spodu vinutí.

4.1.5 Stárnutí izolace

Určení zbytkové životnosti izolace je složitý proces, doprovázený řadou chyb, protože je třeba uvažovat mnoho změn a podmínek. Neexistuje pravidlo, či způsob, pomocí kterého by se dal přesně určit konec života stroje a tím pádem i stanovení zbytkové životnosti izolace, ale je možné provést významné hodnocení založené na rychlostí stárnutí stroje.

Informace o zbytkové životnosti je možné získat na základě výpočtu normou definovaného parametru relativní rychlosti tepelného stárnutí V (tzv. spotřeba životnosti), která se vytváří na základě vzorců definovaných v [3]. Tento parametr nelze zaměňovat s provozními hodinami, které pouze načítají čas, po který byl transformátor pod napětím. Ve spotřebě životnosti se kromě doby, po kterou je transformátor v provozu, zohledňuje také

tepelné stárnutí. Relativní spotřebu životnosti při teplotě T_{H-S} vztaženou k normální spotřebě životnosti při teplotě T_{hN} lze určit podle následujících rovnic: [2]

$$V = \frac{\text{Spotřeba životnosti při } T_{H-S}}{\text{Spotřeba životnosti při } T_{hN}}, \quad (4.3)$$

$$V = 2^{(T_{H-S}-T_{hN})/6} = e^{0,693(T_{H-S}-T_{hN})/6}, \quad (4.4)$$

kde V je relativní rychlost tepelného stárnutí [jednotka času]

T_{H-S} je teplota nejteplejšího místa [°C]

T_{hN} je normou stanovená hodnota referenční teploty [°C]

Referenční hodnota veličiny T_{hN} je pro transformátory navrhované podle IEC 76 normou [3] stanovena na 98 °C. Tato teplota odpovídá provozu transformátoru při jmenovitém výkonu a při teplotě chladícího prostředí 20°C, když oteplení nejteplejšího místa činí 78 K, tzn. je o 13 K vyšší, než střední oteplení 65 K. Tyto teplotní podmínky odpovídají normálnímu stárnutí izolace a rychlosti stárnutí se při této teplotě rovná jedné. Dosazením do rovnice [4.4] s $T_{hN}=98$ °C lze odvodit následující rovnici: [2]

$$V = 10^{(T_{H-S}-98)/19,93} = 2^{(T_{H-S}-98)/6}, \quad (4.5)$$

kde V je relativní rychlost tepelného stárnutí [jednotka času]

T_{H-S} je teplota nejteplejšího místa [°C]

V obecném případě, pokud nejsou provozní podmínky konstantní, se relativní zestárnutí transformátoru vypočítá podle této rovnice [2]:

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V dt \text{ nebo } L = \frac{1}{t} \sum_{n=1}^N V, \quad (4.6)$$

kde L je relativní zestárnutí [jednotka času]

n je číslo časového intervalu [-]

N je celkový počet stejných časových intervalů [-]

Přibližné určení zbytkové životnosti izolačního systému s respektováním působení teploty můžeme stanovit pomocí následujícího postupu. Pro každý vyrobený stroj je výrobcem garantovaná doba životnosti. Pro teploty nižší než 98 °C (referenční teplota stanovená normou) je parametr V menší než jedna. Od počáteční garantované životnosti se postupně odečítá běžná doba provozu vybraného stroje (spotřeba zahrnující tepelné stárnutí

při těchto teplotách je shodná s běžnou dobou provozu sledovaného transformátoru). V případě zvýšení teploty nad hodnotu 98°C se začne ve větší míře projevovat degradace vlivem tepelných procesů a tzv. spotřebu životnosti je nutno vypočítat pomocí (4.3) [2]. Od garantované zbytkové životnosti se pak odečítá násobek vypočtené spotřeby a času, kterému tento násobek odpovídá.

Je zřejmé, že hodnota, kterou vypočítáme touto metodou, nemůže být stoprocentně totožná s reálnou spotřebou, ale tento způsob je jednou z možností, jak do odhadu životnosti zahrnout také skutečné provozní stavy stroje a nespoléhat se jen na pouhou dobu provozu garantovanou výrobcem stroje.

4.1.6 Kontrola intenzity chlazení

Jak bylo zmíněno již výše, izolační systém transformátoru je tvořen kombinací minerálního oleje a celulózového papíru. Minerální olej plní izolační a zároveň chladicí funkci. U transformátorů malých výkonů se nevyužívá zvláštní chladicí zařízení. Cirkulace oleje je způsobena tím, že olej ohřátý od vinutí stoupá samovolně nahoru a poté je sveden zpět dolů postranními trubkami.

U transformátorů velkých výkonů se využívá nucené chlazení ofukováním a nucená cirkulace oleje, kde proud vzduchu postupující od ventilátoru zvláštním vzduchovodem ofukuje nádobu i radiátory transformátoru, čímž se dosahuje značného zintenzivnění přestupu tepla nucenou konvekcí z jejich povrchu. Také je rozšířené i ofukování každého radiátoru zvláštním radiátorem. Obecně se uvádí, že nucené ofukování zvětšuje výkon transformátoru alespoň o 30%. U transformátoru velmi velkých výkonů se využívá chladič umístěný vně stroje, přes který je pomocí čerpadel hnán ohřátý olej a dále je ještě ofukován vzduchem.

Teplotní spád na chladičích

Pokud u transformátoru využijeme nucenou cirkulaci, je vhodné měřit i teplotu ve spodní části transformátoru. Čidla se umisťují do zpětného potrubí chladičů. Na základě měření teploty horní, popř. dolní části transformátoru je společně se sledováním provozního režimu jednotlivých ventilátorů možno kontrolovat efektivitu chlazení (teplotní spád na chladičích). Regulace se v praxi provádí automatickými ovládacími systémy vzhledem k teplotě v horní části. Intenzita chlazení je pro různé provozní teploty dána výrobcem.

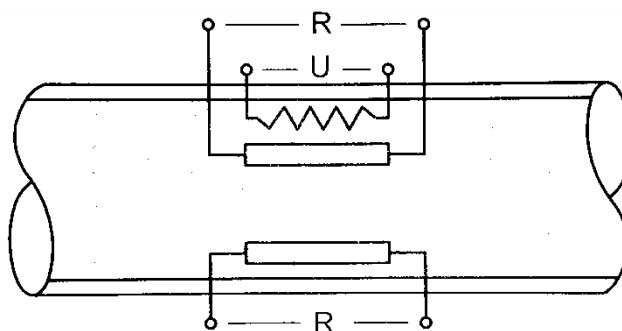
Lze také určit intenzitu chlazení z rozdílu teplot na vstupu a výstupu chladiče. Je samozřejmě nutné doplnit transformátor vhodnými snímači, které budou měřit teplotu oleje na

vstupu do chladiče a na jeho výstupu. I pro tuto metodu lze využít odporové teploměry. Dle průměru potrubí, do kterého budou teploměry instalovány, vybíráme parametry teploměrů (vhodná délka měřicího stonku a ponoru). Počet potřebných snímačů je závislý na počtu chladičů transformátoru. Nezbytnou součástí teploměrů musí být i vhodný převodník, který zajistí úpravu naměřených hodnot na signál vhodný pro přenos a počítačové zpracování.

Měření cirkulace oleje

Měření teplotního spádu na chladičích ve skutečnosti charakterizuje intenzitu chlazení. Jelikož je u olejových transformátorů chlazení zajištěno cirkulací oleje, je možno tento pohyb izolačního a chladicího média sledovat pomocí průtokoměrů. Na základě stanovení rychlosti proudění olejové náplně je možno zjistit funkčnost čerpadel zajišťující nucený oběh oleje. Oběhová čerpadla se používají k zajištění zintenzivnění chlazení u speciálních transformátorů velkých výkonů (desítky až stovky MVA) [2].

Funkce přístroje se vztahuje na rychlost proudění a pracuje na základě kalorimetrického měřicího principu (metoda přenosu tepla/ ochlazení). V senzoru se nachází dva na teplotě závislé měřicí odpory, které jsou připojeny k měřicímu můstku (obr. 4.5). Jeden z měřicích odporů je závislý na teplotě média, druhý přichází do termického (tepelného) kontaktu s topným článkem (spirála na následujícím obrázku). Jestliže je topný článek pod napětím, vzniká mezi oběma měřicími odpory rozdíl teplot, který má konstantní hodnotu, pokud je médium v klidu. Protéká-li médium, dochází k odvádění tepla z topného článku a teplota na zahřátém měřicím odporu klesá. Tím se mění teplotní rozdíl mezi odpory a také napětí na měřicím můstku. Na základě rozdílů napětí je zajištěn aktuální stav proudění [2].



Obr. 4.5 Princip činnosti hlídače průtoku- převzato z [2]

Měřicí citlivost senzorů je mimo jiné závislá na odebrání tepla na topném článku. Odebrané teplo je úměrné rychlosti proudění a tepelné vodivosti média. Platí pravidlo, že čím

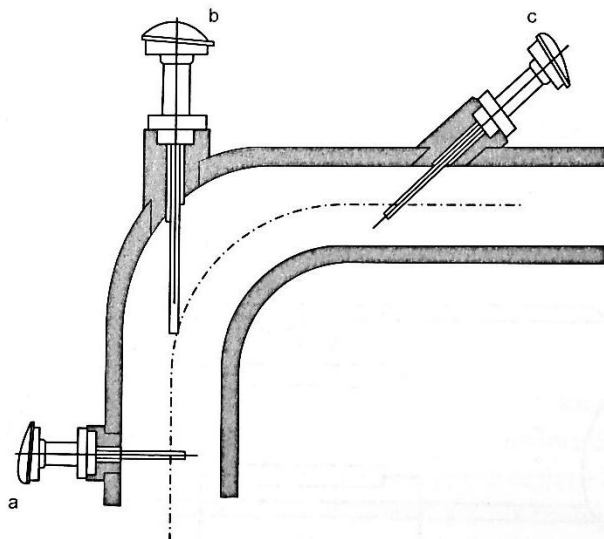
menší je tepelná vodivost média, tím rychleji musí médium téci, aby mohlo být zachyceno. Pro různá média se proto uvádějí rozdílné pracovní oblasti [2].

4.1.7 Zabudování dotykových teploměrů

Aby výsledky měření teplot byli přesné, je důležité vhodně umístit snímač teploty tak, aby byl zajištěn správný přestup tepla a dokonalý styk s měřeným prostředím (obr. 4.6). Místo pro měření by mělo být zvoleno tak, aby byla zajištěna snadná montáž, demontáž a údržba snímače teploty.

Ve většině případů je nutné teploměry umístit do teploměrných jímek, které chrání teploměr proti mechanickým a chemickým vlivům. Pokud teploměr umístíme do teploměrných jímek, ovlivníme tím značně jeho dynamické vlastnosti, proto je potřeba uvažovat pro správné vyhodnocení vzniklou dynamickou chybu. Chyba je způsobená tím, že hmota jímký bývá většinou mnohonásobně větší, než hmota vlastního čidla. Abychom dosáhli zvýšení přestupu tepla, tak se teploměr umísťuje do místa s vyšší rychlostí a nikoliv do koutů bez proudění. Čidlo teploměru by mělo zasahovat přibližně do osy potrubí.

Do potrubí větších průměrů se umísťuje teploměr kolmo na směr proudění (obr. 4.6a). U potrubí menších průměrů (do 200 mm) se umísťuje teploměr šikmo (pod úhlem 45°) proti směru proudění (obr. 4.6c), popřípadě do kolena potrubí proti směru proudění (obr. 4.6b) [2].



Obr. 4.6 Zabudování odporových teploměrů do potrubí- převzato z [2]

4.2 Monitoring výšky hladiny v dilatační nádobě

Měření výšky hladiny v dilatační nádobě je další veličinou, kterou je možno průběžně monitorovat během provozu transformátoru. Pro elektrické měření se využívají obtokové stavoznaky, které bývají přivařeny, nebo přišroubovány k boční straně nádoby s kapalinou.

Kapalina v plovákové komoře je ve stejné výšce jako v nádobě a určuje polohu plováku v tělese stavoznaku. Výška hladiny je zobrazována na magnetické zobrazovací liště (obr. 4.7a), která je tvořena sloupec magnetických válečků, které jsou z jedné strany bílé a z druhé strany červené, nebo modré.



Obr. 4.7 Magnetický obtokový stavoznak- převzato z [29].

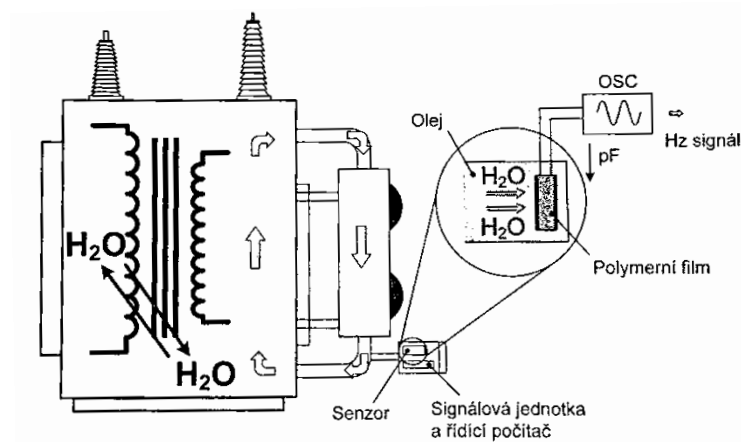
Indikace změny výšky hladiny je způsobena magnetickým polem permanentního magnetu umístěného v plováku. Pokud dojde k pohybu plováku, tím se zároveň pohne i permanentní magnet v plováku kolem válečků v magnetické zobrazovací liště. Zobrazovací lišta se otočí o 180° a změní barvu z bílé na červenou, respektive modrou. Tento způsob je výhodný, neboť dochází k indikaci změny výšky hladiny v nádobě bez nutnosti dodávky vnější energie.

K dálkovému měření výšky hladiny slouží tzv. KRS- převodník, který pracuje na principu plováku s magnetickým přenosem (permanentní magnet, jazýčkové relé a odporový řetěz). Obr. 4.7b v třívodičovém zapojení jako potenciometr. Magnetický systém umístěný v plováku ovlivňuje svým magnetickým polem miniaturní jazýčková relé, umístěná v odporovém řetězci. Postupným spínáním jednotlivých jazýčkových relé se mění poměr odporu horní a dolní části odporového řetězce a tento poměr odpovídá výšce hladiny [2].

Odporový řetězec je velmi jemně odstupňovaný, můžeme tedy považovat výstupní signál za kvazikontinuální [2]. Podle požadavků a provedení je k dispozici různé odstupňování. Mezi volitelné doplňky patří možnost zabudování dvou vodičového převodníku na 4 až 20 mA do propojovací hlavice pro zajištění přenosu signálu (analogový proudový výstup).

4.3 Měření vlhkosti oleje

Voda, která se vyskytuje v transformátoru, je snadno měřitelná, ale těžce interpretovatelná, a to z toho důvodu, že většina vody (96 až 99 %) se nalézá v papírové izolaci, nikoliv v oleji [2]. On-line monitoring vlhkosti umožňuje naměřené hodnoty spolehlivě a přesně interpretovat na základě jejich korelace s provozními charakteristikami stroje. Informuje o teplotě, při níž bude docházet k formaci bublin, tj. stavu, kdy dojde k 100 % nasycení oleje vlhkostí a současně umožňuje v reálném čase informovat o relativní vlhkosti v místě nejteplejšího bodu vinutí.



Obr. 4.8 Princip monitorování vlhkosti v oleji- převzato z [2]

Analyzátoři vlhkosti pracují na principu tenkého filmu a kapacitního senzoru. Dielektrické vlastnosti polymerního filmu závisí na množství vody v něm obsažené- při změně relativní vlhkosti se změní dielektrické vlastnosti filmu a tím také kapacita senzoru. Elektronické zařízení měří kapacitu senzoru a převádí ji zpět na hodnotu vlhkosti. Sledovanou veličinou je tedy změna kapacity kondenzátoru, v němž je dielektrický polymer [2].

Přestože je množství absorbované vody poměrně malé, díky její velké dielektrické konstantě jsou změny kapacity měřitelné: řádově činí 0,1 % z celkové kapacity na každé % relativní vlhkosti (RH). Tyto senzory se vyrábějí také s integrovaným zpracováním signálu, kde výstupem je místo kapacity mnohem přijatelnější elektrické napětí, nebo dokonce digitální rozhraní [2].

4.4 Měření množství plynů v oleji

Při rozkladu oleje a pevné izolace v důsledku elektrických a tepelných poruch vznikají plyny, které mají nezanedbatelný účinek na vlastnosti oleje. Minerální oleje jsou většinou směsí uhlovodíkových molekul obsahující skupiny CH₃, CH₂ a CH, spojené dohromady molekulovými vazbami C-C (viz tab. 6).

Tab. 6 Klíčové plyny pro plynovou analýzu [2]

Minerální olej C _n H _{2n+2}	Vodík H ₂	Acetylen C ₂ H ₂	Etylen C ₂ H ₄
$\begin{array}{cccccccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & & & & & \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{H} \\ & & & & & & & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$	$\text{H}-\text{H}$	$\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$	$\begin{array}{cc} \text{H} & \text{C} \\ & \\ \text{C} & = & \text{H} \\ & & \\ \text{C} & & \text{H} \end{array}$
Ethan C ₂ H ₆	Methan CH ₄	Oxid uhelnatý CO	Oxid uhličitý CO ₂
$\begin{array}{ccc} & \text{H} & \text{H} \\ & & \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{H} \\ & & \\ & \text{H} & \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	$\text{H}=\text{O}$	$\text{O}=\text{C}=\text{O}$
Kyslík O ₂	Dusík N ₂	Propan C ₃ H ₈	Propen C ₃ H ₆
$\text{O}=\text{O}$	$\text{H}\equiv\text{N}$	$\begin{array}{ccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{H} \\ & & & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} & \text{H} & \text{H} \\ & & \\ \text{H} & -\text{C} & = & \text{C} & -\text{H} \\ & & & \\ & \text{H} & & \text{H} \end{array}$

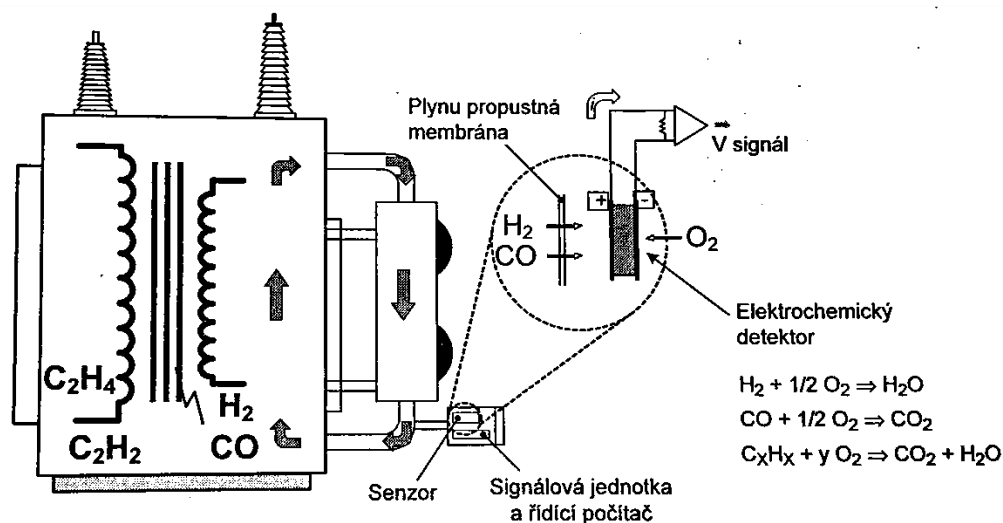
Jedním z hlavních zdrojů plynů jsou částečné výboje, kde vodivý kanál dosahuje teplot až několik tisíc stupňů, v oleji je sice opět ochlazen, ale při tom dochází k uvolňování plynů. Pokud dojde k elektrické či tepelné poruše, například kvůli částečnému výboji, rozštěpí se některé vazby C-H a C-C. Výsledkem jsou nestabilní fragmenty, které vstupují do rozsáhlých reakcí a rekombinují v molekuly plynu, jako jsou acetylen, ethylen, ethan, methan a jiné. Všechny tyto plyny se poté rozpouštějí v oleji. Ethylen se začíná projevovat při teplotách nad 500°C, acetylen za teplot mezi 800°C a 1200°C a následném prudkém poklesu teploty.

Na základě klasifikace jednotlivých produktů je možno stanovit druh poruchy, ke které v transformátoru došlo. Příklad citlivostí jednotlivých plynů na druh poruchy jsou zobrazeny v tab. 7.

Tab. 7 Rozpoznání druhu poruchy podle klíčových plynů [2]

Druh plynu	Elektrické výboje			Lokální přehřátí			
	El. oblouk	Jiskření	Částečné výboje	< 300°C	300 až 1000°C	> 1000°C	
Vodík H ₂	A	A	A	x	x	B	A- klíčový plyn
Methan CH ₄	C	B	B	B	B	C	B- charakteristický plyn
Ethan C ₂ H ₆	x	x	x	A	x	x	původní plyn (malý podíl)
Ethylén C ₂ H ₄	C	B	x	B	A	A	C- charakteristický plyn
Acetylen C ₂ H ₂	A	A	B ¹⁾		x	B	původní plyn (velký podíl)
Propan C ₃ H ₈	x			C	x	x	¹⁾ - platné jen pro velkou energetickou hustotu
Propylen C ₃ H ₆	B	x		x	C	B	

V praxi se využívá mnoho různých principů pro měření plynných koncentrací, ale nejčastěji se využívá analyzátor na elektrochemickém principu. Principem činnosti těchto analyzátorů není přímo sledování chemické reakce, ale sledování fyzikálních jevů, které chemickou reakci provázejí.



Obr. 4.9 Princip monitorování plynných produktů v oleji- převzato z [2]

Galvanometrické elektrochemické senzory využívají princip galvanického článku. Elektrodotový systém je oddělen od analyzovaného média permeabilní membránou, vyrobenou např. z teflonu, polypropylenu či silikonového kaučuku. Membrána je propustná pouze pro plyny, nikoliv pro vodu a ionty. Plyny rozpuštěné v oleji procházejí skrze selektivní permeabilní membránu do elektrochemického plynového detektoru, kde se mísí s kyslíkem za vzniku elektrického signálu, úměrného poměru koncentrace plynu [2].

Elektrochemické senzory různých výrobců se mohou lišit elektrolytem, který bývá

většinou vodný, ale i organický, dále tvarem, přístupem plynu k měřicí elektrodě a počtem elektrod [2]. Pro základní funkci senzorů postačují dvě již popsané elektrody, u přesnějších senzorů se obvykle přidává třetí, referenční hodnota, která se neúčastní elektrochemických dějů. Je určena ke stabilizaci potenciálu pracovní elektrody a umožňuje rozšířit lineární oblast měření.

4.5 On-line diagnostika částečných výbojů

K on-line diagnostice částečných výbojů lze využít běžné metody, například metodu induktivně vázané sondy, nebo kapacitní sondy. Problém při použití těchto metod je ten, že k uzlu transformátoru se paralelně připojí kondenzátor, případně indukčnost. Při poruše těchto prvků, by došlo k odstávce celého transformátoru, což nekoresponduje s účelem on-line diagnostiky, a to s nepřetržitou dodávkou elektrické energie. Proto se tyto metody zpravidla pro on-line diagnostiku nevyužívají.

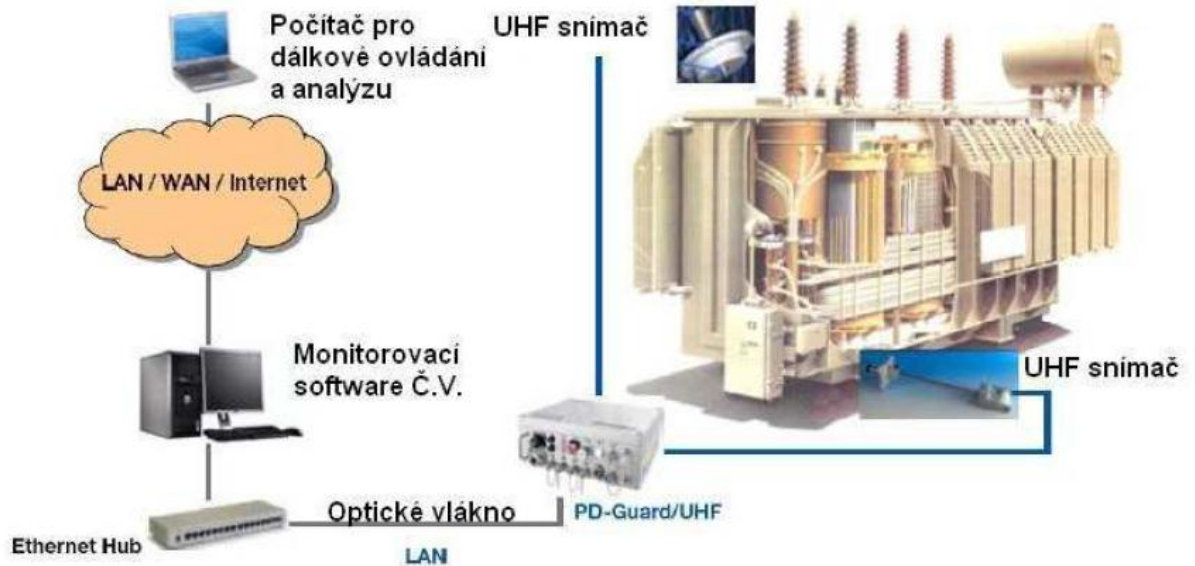
V současné době lze využít metodu měření akustických signálů piezo- elektrickými snímači. Principem této metody je snímání zvukových vln, které se šíří olejem transformátoru, vhodnými snímači. Pokud nainstalujeme více čidel a vhodně je umístíme, lze pomocí nich určit místo vzniku poruchy. Problémem této metody je vysoká citlivost na okolní rušení.

Aktuálně nejlepší metodou, pro detekci částečných výbojů je metoda UHF detekce částečných výbojů. UHF (Ultra High Frequency) metoda detekce částečných výbojů je poměrně nová technologie pro záznam a vyhodnocování částečných výbojů. Na rozdíl od konvenčních způsobů měření, které analyzují signály částečných výbojů pod 1 MHz, UHF metoda začíná měřit od 500 MHz výše. Tato technika je díky vysokým frekvencím odolná vůči rušení a má vysokou citlivost [24]. Doba impulzů, které se šíří v oleji je velice krátká – řádově nanosekundy, proto elektromagnetické vlny, které se šíří olejem a jsou způsobené výboji v oleji, mají frekvenci do, anebo přes 1 GHz.

Frekvenční rozsah této metody je obvykle od 500 MHz do 1500 MHz a více [24]. Na obr. 4.10 je zobrazeno principiální schéma UHF metody detekce ČV. UHF anténa je zavedena do nádoby transformátoru skrze olejový ventil. Spektrální analyzátor je použit jako frekvenční filtr pro UHF signál, který je pak veden do počítače, kde je za pomoci speciálního softwaru

uložen a zpracován.

Její nevýhoda je, že dokáže určit pouze celkovou úroveň výbojové činnosti v transformátoru. Proto je nutné při překročení předem stanovené meze částečných výbojů stroj odstavit a provést další například lokalizační měření.



Obr. 4.10 Principiální schéma UHF metody detekce částečných výbojů- převzato z [24]

5 Rešerše současných monitorovacích systémů

TMV SS- je obchodní a servisní firmou založenou v roce 1991. Je zaměřena na prodej a servis měřicích, diagnostických, testovacích a monitorovacích přístrojů zejména pro oblast energetiky a těžkého průmyslu.

Tab. 8 On-line monitoring dodávaný firmou TMV SS [25]

Výrobce	Hydran 201R	Hydran S2	Hydran M2	Intellix M0150	Transfix	Minitrans	Taptrans	Multitrans
TMV SS								
Senzor								
H2	X	X	X	-	X	X	X	X
CO	X	X	X	-	X	X	X	X
H2O	-	-	X	-	X	X	X	X
Komplexní mon. Plynů	-	-	-	-	X	X	X	X
Výpočetní model	-	-	X	X	-	-	-	-
Nejteplejší bod	-	-	-	X	-	-	-	-
Účinnost chlazení	-	-	-	X	-	-	-	-
Výp. zdánlivého výkonu	-	-	-	X	-	-	-	-
Výp. Stárnutí	-	-	-	X	X	-	X	X
Obsah vlhkosti	-	X	-	X	-	-	-	-
Automatický alarm	-	-	-	-	X	X	X	X
Monitoring přepínače odboček	-	-	-	-	-	-	X	X
Monitoring více transformátorů	-	-	-	-	-	-	-	X
Zobrazení na displeji	X	-	X	X	-	-	-	-
Připojení na ventil 1,5"	X	X	X	X	X	X	X	X
Komunikace s ext. Systémy	X	-	X	X	X	X	X	X
Membránová klávesnice	-	-	-	X	-	-	-	-
Analogový výstup	X (1x)	-	X (4x)	X (8x)	X	X	X	X
Ukládání do paměti	X	-	X	X	X	X	X	X
Rozhraní RS232	X	X	X	X	X	X	X	X
Rozhraní RS485	X	-	X	X	X	X	X	X
TCP/IP	-	-	X	X	X	X	X	X



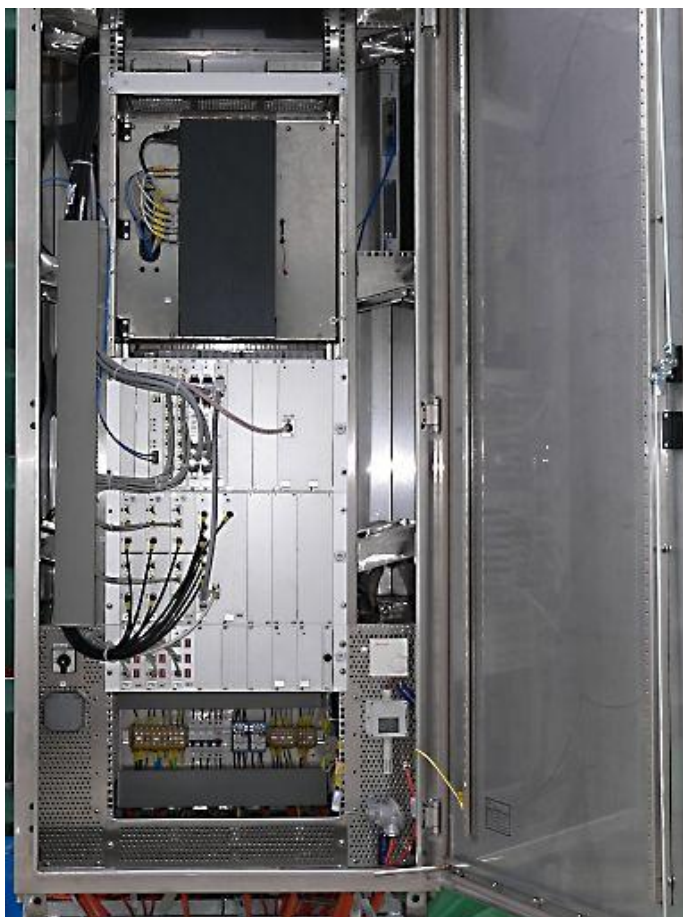
Obr. 5.1 *Intellix MO150- převzato z [25]*

MOSAD- Systém je koncipován tak, aby byl schopen poskytnout jednoznačnou informaci o vznikající závadě transformátoru v počátečním stádiu rozvoje tak i dostatek údajů pro expertní posouzení závažnosti závady.

Tab. 9 *On-line monitoring dodávaný firmou MOSAD [26]*

Výrobce	
MOSAD	MST
Senzor	
H2	X
CO	X
H2O	X
Komplexní mon. Plynů	X
Výpočetní model	X
Nejteplejší bod	X
Účinnost chlazení	X
Výp. zdánlivého výkonu	-
Výp. Stárnutí	-
Obsah vlhkosti	X
Proud	X

Napětí	X
Výkon	X
Změna kapacity a ztrátového činitele průchodky	X
Spínací a atmosférická přepětí	X
Zkratové proudy	X
Částečné výboje	X
Teplota transformátoru	X
Automatický alarm	X
Poloha a průběh přepínání odboček	X
Monitoring přepínače odboček	-
Monitoring více transformátorů	-
Zobrazení na displeji	-
Připojení na ventil 1,5"	X
Komunikace s ext. Systémy	X
Membránová klávesnice	-
Analogový výstup	X
Ukládání do paměti	X
Rozhraní RS232	X
Rozhraní RS485	X
TCP/IP	-



Obr. 5.2 MOSAD MST- převzato z [26]

OT ENERGY SERVICES- Monitorovací systém výkonových transformátorů určený ke zvýšení jejich bezpečnosti, spolehlivosti a řízení životnosti. Nasazení systému vede ke snížení rizika havárie transformátoru a omezení souvisejících přímých a nepřímých škod.

Tab. 10 On-line monitoring dodávaný firmou OT ENERGY SERVICES [27]

Výrobce	
OT ENERGY SERVICES	TRAMON
Senzor	
H ₂	X
CO	X
H ₂ O	X
Komplexní mon. Plynů	X
Výpočetní model	X
Nejteplejší bod	X
Účinnost chlazení	-
Výp. zdánlivého výkonu	-

Výp. Stárnutí	X
Obsah vlhkosti	X
Proud	X
Napětí	X
Výkon	X
Změna kapacity a ztrátového činitele průchodky	-
Spínací a atmosférická přepětí	-
Zkratové proudy	X
Částečné výboje	X
Teplota transformátoru	X
Automatický alarm	X
Poloha a průběh přepínání odboček	X
Monitoring přepínače odboček	X
Monitoring více transformátorů	Libovolný počet
Zobrazení na displeji	-
Připojení na ventil 1,5"	X
Komunikace s ext. Systémy	X
Membránová klávesnice	-
Analogový výstup	X
Ukládání do paměti	X
Rozhraní RS232	X
Rozhraní RS485	X
TCP/IP	X
Možnost odeslat e-mail	X
Zobrazení historie v grafech	X

TECTRA- MORGAN SCHAFFER- Přístroje pro monitoring umožňují on-line sledovat H₂, H₂O a CO. Velmi pokročilé diagnostické přístroje sledují až 7 poruchových plynů a také kyslík O₂ a dusík N₂.

Tab. 11 *On-line monitoring dodávaný firmou TECTRA a.s. [28]*

Výrobce	
MORGAN SCHAFFER	
Senzor	
H2	X

CO	X
H2O	X
Komplexní mon. Plynů	X
Výpočetní model	-
Nejteplejší bod	-
Účinnost chlazení	-
Výp. zdánlivého výkonu	-
Výp. Stárnutí	-
Obsah vlhkosti	X
Proud	X
Napětí	X
Výkon	X
Změna kapacity a ztrátového činitele průchodky	-
Spínací a atmosférická přepětí	-
Zkratové proudy	-
Částečné výboje	X
Teplota transformátoru	X
Automatický alarm	-
Poloha a průběh přepínání odboček	-
Monitoring přepínače odboček	-
Monitoring více transformátorů	-
Zobrazení na displeji	X
Připojení na ventil 1,5"	X
Komunikace s ext. Systémy	X
Membránová klávesnice	-
Analogový výstup	X
Ukládání do paměti	X
Rozhraní RS232	X
Rozhraní RS485	X
TCP/IP	X
Možnost odeslat e-mail	-
Zobrazení historie v grafech	-



Obr. 5.3 MORGAN SCHAFFER- CALISTO- převzato z [28]

Závěr

Předkládaná bakalářská práce se snaží přiblížit problematiku On- line diagnostiky výkonových transformátorů. On- line diagnostika, se v posledních letech stala nepostradatelnou součástí v provozovaných energetických soustavách, neboť nám napomáhá ke zvýšení spolehlivosti provozu výkonových transformátorů a tím vede ke zvýšené spolehlivosti dodávky energie koncovým zákazníkům. Pomocí On- line diagnostiky lze odhalit problém vznikající v transformátoru dříve, než vznikne a tím zabrání výpadku zařízení, či jeho poruše a následné nutné opravě, čímž je prospěšná i z ekonomického hlediska.

Hlavním cílem mé práce bylo popsat systém pro online monitoring izolačního systému a provést stručnou rešerši současných monitorovacích systémů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů*, 2012
- [2] MENTLÍK, Václav a kolektiv. *Diagnostika elektrických zařízení*. Nakladatelství BEN-Technická literatura, Praha, 2008.
- [3] MENTLÍK, Václav a kolektiv. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. Nakladatelství BEN- Technická literatura, Praha, 2011.
- [4] ČSN IEC 354 *Pokyny pro zatěžování výkonových transformátorů*, 1997.
- [5] Doc. Ing. Jiřina Mertlová, CSc. [fotografie]. home.zcu.cz [online]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~mertlova/els-foto/prestice/0084.transformator_400-121kv.jpg
- [6] PROSR, P., BRANDT, M. *Diagnostika olejem plněných transformátorů*. Electroscope. 2008, číslo IV
- [7] MENTLÍK, Václav. TRNKA, Pavel. SVOBODA, Michal. *Elektroizolační kapaliny akcentující životní prostředí*. Reotrib. 2014.
- [8] ČSN EN 60422. *Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních*.
- [9] SCHEJBAL, Václav. *Diagnostika transformátoru prostřednictvím analýzy elektroizolační kapaliny*. Plzeň, 2007. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [10] ŠIMKOVÁ, Martina. *Příspěvek k diagnostice výkonových olejových transformátorů*. Brno, 2010. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] ČSN 503175. *Lepenka pro elektrotechniku- Všeobecná ustanovení*. Praha: Úřad pro vynálezy a normalizaci. 1958.
- [12] ČSN 503179. *Lepenka pro elektrotechniku- Transformátorová lepenka*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. 1987.
- [13] ČSN EN 60641-2 ed. 2. *Lesklá lepenka a obyčejná lepenka pro elektrotechnické účely*. Praha: Český normalizační institut. 2005.
- [14] ELPRO-ENERGO [pdf]. Elpro-energo.cz [online]. Dostupné z: http://www.elpro-energo.cz/download/olejove-transformatory/PDS_Nytro_Taurus_CZ.pdf
- [15] OLEJE SERVIS. Olejeservis.cz. [online]. Dostupné z: <http://www.olejeservis.cz/e-shop-oleje-a-maziva/prumyslove-oleje/teplonosne-a-transformatorove/midel-7131-transformatorovy-olej-nehorlavy-ekologicky>
- [16] EXEL [pdf]. Exel.cz [online]. Dostupné z: http://www.exel.cz/image/_soubor_nabidka.php?id=6

- [17] INSULATING MATERIAL [fotografie]. Insulatingmaterial.cn [online]. Dostupné z: <http://www.insulatingmaterial.cn/admin/product/upload/new/n20109134114.jpg>
- [18] SAAN BOARDS [fotografie]. saanboards.com [online]. Dostupné z: http://www.saanboards.com/pressboards_machined_components.htm
- [19] PUCARO [fotografie]. pucaro.de [online]. Dostupné z: <http://pucaro.de/en/duct-spacing.html>
- [20] LIGHTNING PACKAGING SUPPLIES [fotografie]. lightningpackaging.co.uk [online]. Dostupné z: <http://www.lightningpackaging.co.uk/cardboard-edge-protector#!prettyPhoto>
- [21] TJSKL [fotografie]. tjskl.com [online]. Dostupné z: http://www.tjskl.org.cn/images/czbdbee1-pz1bf0d95-insulating_paper_paperboard_products_insulatingpaper_paperboard_insulatingpaper_winding_insulating_paper.html
- [22] RŮŽIČKOVÁ, Vladislava. *Aspekty on-line diagnostiky transformátorů*. Plzeň. Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni.
- [23] HINDRA, Matěj. *Nedestruktivní diagnostické zkoušky prováděné u transformátorů*. Brno. 2010. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] HUBÁČEK, Jaroslav. *Nekonvenční metody sledování částečných výbojů*. Plzeň. 2013. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Západočeská univerzita v Plzni.
- [25] TMV SS. Tmvss.cz. [online]. Dostupné z: <http://www.tmvss.cz/Aplikace/Monitoring-TRF.html>
- [26] TES. Tesnet.cz. [online]. Dostupné z: <http://www.tesnet.cz/cs/produkty-diagnostika-mst.php>
- [27] OT ENERGY SERVICES. Otenergy.eu. [online]. Dostupné z: <http://www.otenergy.eu/download/2/285/Katalogovy-list-TRAMON-ot.pdf>
- [28] TECTRA a.s. tectra.cz. [online]. Dostupné z: <http://www.tectra.cz/monitoring-transformatoru>
- [29] KALABZA, Martin. *Degradace izolačního systému transformátoru*. Plzeň. 2012. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření. Západočeská univerzita v Plzni.
- [30] ULLMAN, Ivo. VELEK, Jiří. PAUKNER, Zdeněk. [přednáška] *Monitoring transformátorů*. Poděbrady. 2012.