

**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**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

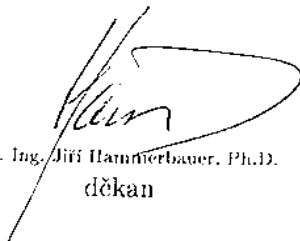
1. Popište izolační systém výkonových transformátorů.
2. Charakterizujte významné diagnostické parametry měřené online monitorovacími systémy.
3. Popište systém pro online monitoring izolačního systému transformátorů, charakterizujte jeho účel, provedení a specifika aplikace.
4. Proveďte stručnou rešerši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

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

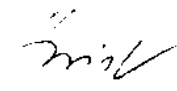
1. Mentlík, V.; Pihera, J.; Polanský, R.; Prosr, P.; Trnka, P. - Diagnostika elektrických zařízení, BEN - technická literatura, 2008
2. Mentlík, V.; Trnka, P.; Trnková, M.; Šášek, L. - Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN - technická literatura, 2011
3. elektronické informační zdroje, databáze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

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

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


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

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.

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.

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 9.6.2014

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
2 DIAGNOSTIKA.....	12
2.1 ÚČEL DIAGNOSTIKY	12
2.2 SYSTÉM ON-LINE (FUNKČNÍ) DIAGNOSTIKY.....	14
2.3 ON-LINE DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ.....	14
3 DIAGNOSTICKÉ PARAMETRY VYUŽÍVANÉ ON-LINE MONITOROVACÍMI SYSTÉMY.....	18
3.1 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ- NAPĚTÍ A PROUDY	19
3.2 SLEDOVÁNÍ TEPLoty	19
3.3 MONITORING PLYNŮ A VLHKOSTI V OLEJI	20
4 VYUŽÍVANÉ ON-LINE MONITOROVACÍ SYSTÉMY	20
4.1 MĚŘENÍ TEPLoty	20
4.1.1 <i>Teplota oleje v horní části transformátoru a teplota okolí.....</i>	<i>20</i>
4.1.2 <i>Teplota vinutí</i>	<i>22</i>
4.1.2.1 <i>Přímé měření teploty vinutí pomocí optovláknových snímačů</i>	<i>21</i>
4.1.2.2 <i>Nepřímé měření teploty vinutí.....</i>	<i>23</i>
4.1.3 <i>Rozložení teplot- magneticky montovaný senzor teploty.....</i>	<i>24</i>
4.1.4 <i>Hot- spot teplota</i>	<i>24</i>
4.1.5 <i>Stárnutí izolace</i>	<i>26</i>
4.1.6 <i>Kontrola intenzity chlazení</i>	<i>28</i>
4.1.7 <i>Zabudování dotykových teploměrů</i>	<i>30</i>
4.2 MONITORING VÝŠKY HLADINY V DILATAČNÍ NÁDOBĚ.....	30
4.3 MĚŘENÍ VLHKOSTI OLEJE.....	32
4.4 MĚŘENÍ MNOŽSTVÍ PLYNŮ V OLEJI	33
ZÁVĚR	36
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37

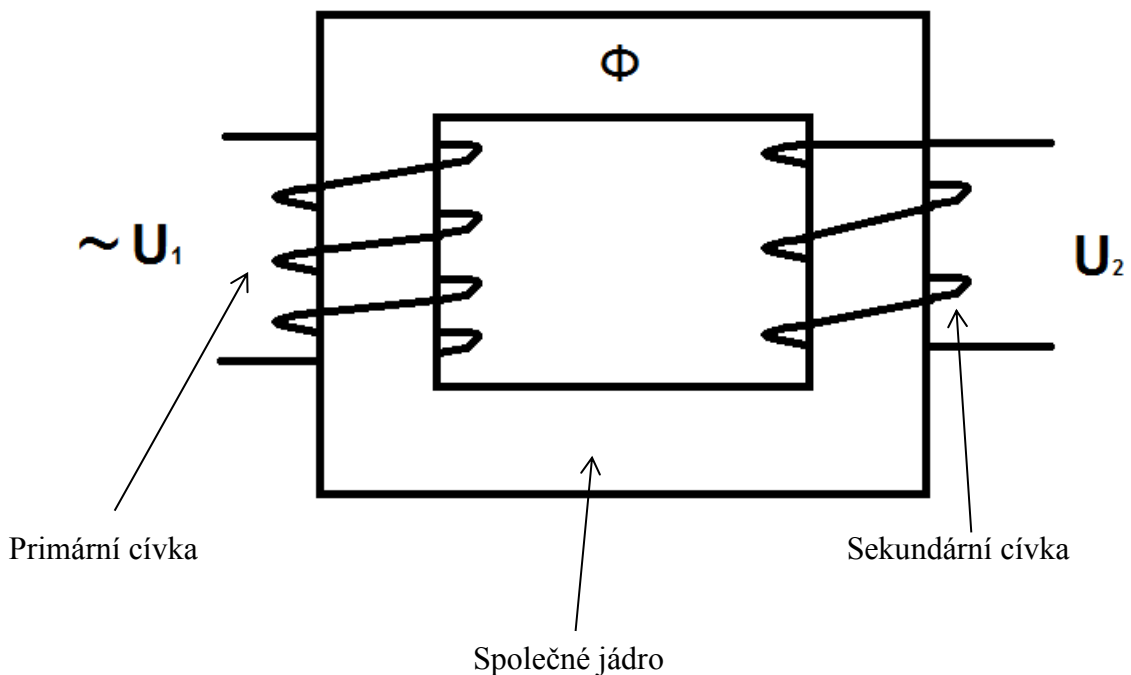
Úvod

Pro život dnešní společnost je energetická soustava jedním z nejdůležitějších faktorů. Jen velmi málo lidí si dovede představit život bez elektrické energie. Spolehlivost dodávky je závislá na spolehlivost 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%.



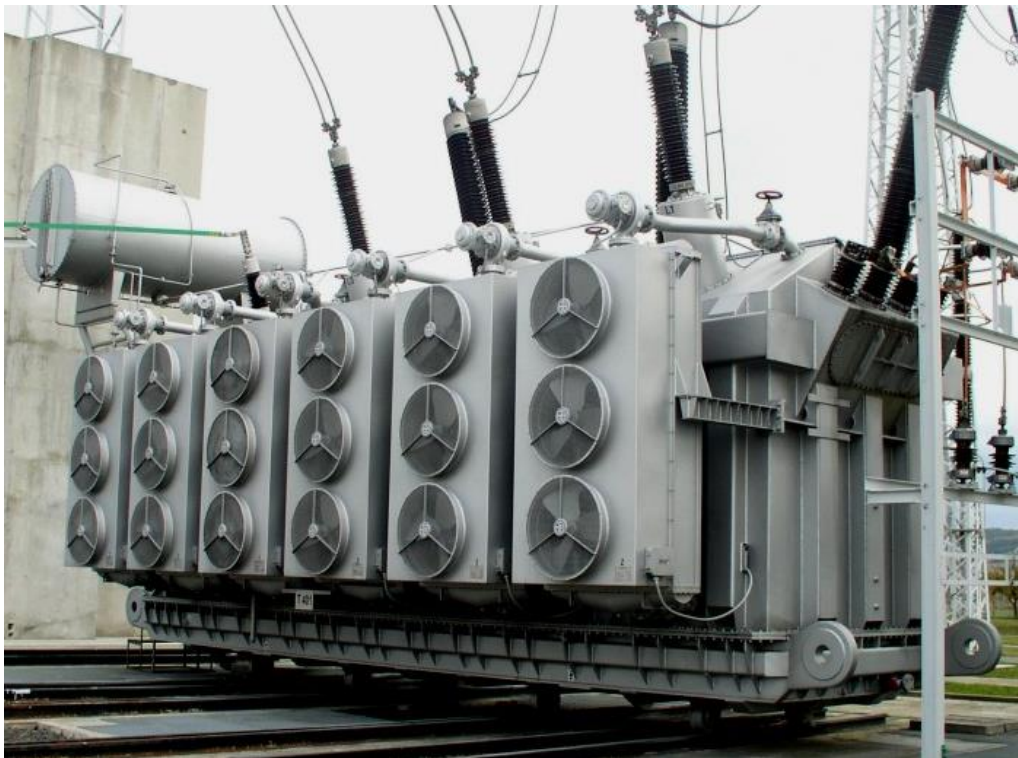
Obr. 1.1 Základní princip transformátoru

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. V ČR se užívají

hladiny od 400/220 kV až po 22/0,4kV.

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 jejích chladicích žeber.



Obr. 1.2 Výkonový transformátor 400/121 kV [4]

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.

Izolační systém olejového transformátoru

Izolaci transformátoru lze rozdělit na vnitřní a vnější.[1] Vnitřní izolací se rozumí izolace uvnitř cívky téže fáze, tedy mezi závity a mezi polohami. Vnější izolace je izolace mezi vstupním a výstupním vinutím, mezi cívkami a železem a mezi fázemi.

Vnitřní izolace

U olejových transformátorů se používá izolace třídy „A“ (veškerá izolace je ponořena v oleji, který nepřipustí vyšší teplotu). Jedná se o látky organického původu, např. papír, bavlna, hedvábí. Tyto látky jsou impregnované tím, že jsou ponořeny v oleji. Jedná se o izolanty s velmi dobrými vlastnostmi, zejména z hlediska elektrické pevnosti a ztrátového činitele. U několika vstupních závitů bývá izolace z důvodu napěťových rázů zesílena.

Vnější izolace

V případě olejových transformátorů je to samotný olej. Dle velikosti napětí jsou doporučeny izolační vzdálenosti mezi vinutím a železem (mezi magnetickým obvodem i mezi nádobou), mezi vstupními a výstupními cívkami a mezi fázemi.

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.[2]

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. Informace, které takto pojatá diagnostika zjišťuje, jsou velmi nezbytné. [2]

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

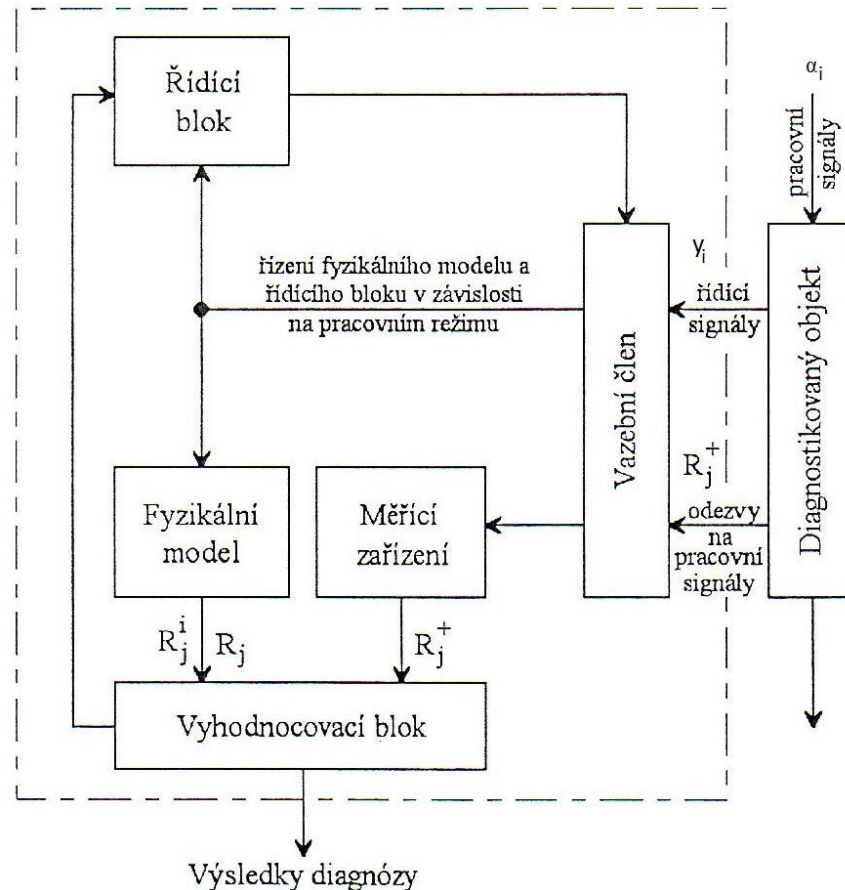
zařízení během jeho nepřerušného chodu. Je velmi důležité, během diagnostiky transformátoru pravidelně zaznamenávat naměřené veličiny a poruchy vzniklé za provozu. Z nich lze později předpovídat vznikající poruchu, ještě předtím než vznikne. Například, pokud nám záznamy ukáží na opakující se nedostatky 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 velikou výhodou do budoucího provozu zařízení s rychlou návratností. Pomocí včasného odhalení poruchy lze zamezit odstavení transformátoru a tím finanční postihy za přerušný 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. Nejvhodnější způsob jak popsat systém On-line diagnostiky, je pomocí jejího schématu. Schéma On-line diagnostiky je znázorněno na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Schéma On-line (funkční) diagnostiky [2]

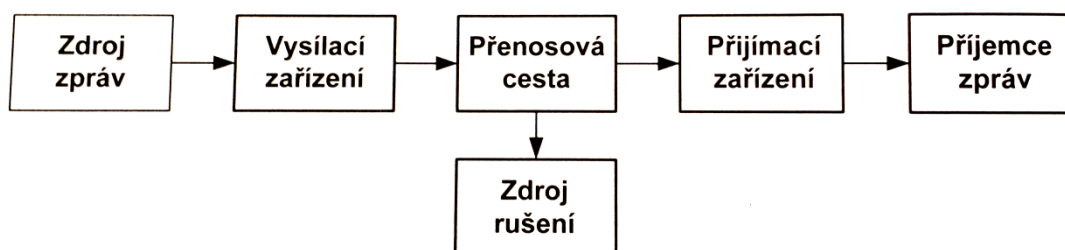
Ze schématu vyplývá, že do diagnostikovaného objektu vstupují provozní signály α_i . Do diagnostického systému jsou poté předávány jako signály řídicí- y_i a dále odezvy na pracovní signály diagnostikovaného objektu- R_j^+ . Vyhodnocovací blok (probíhá v něm zpracování výsledků) porovnává výsledky R_j^+ jednotlivých kontrol s možnými výsledky R_j a R_j^i , které jsou generovány fyzikálním modelem. Výsledek diagnózy je pak formulován na základě jejich vzájemného porovnání. [2]

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. [2]

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 periferii), 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. 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. [2]

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. 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

Otázka volby sledovaných parametrů je jedním ze zásadních rozhodnutí, podle kterého se dále odvíjí vlastní realizace 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, mechanické rázy), vlivy klimatu, chemické vlivy (kyselý déšť, oxidace, koroze) a záření. Dále se na degradaci podílí působení teploty (rychlé změny, nepravidelné teplotní cykly a elektrické pole (náhlé, velké a rychlé změny intenzity pole, výbojová činnost).[2]

Pro podchycení největšího procenta závad by měli být monitorovány ty části transformátoru, u kterých je největší riziko vzniku poruchy- tedy aktivní část (vinutí a magnetický obvod) a izolační systém. Nejdůležitějšími parametry indikujícími stav vinutí a hlavní izolace a ovlivňující rychlost stárnutí izolačního systému jsou: [2]

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

Přestože k rozkladu (štěpení chemických vazeb) minerálního oleje a celulózového papíru přispívají všichni uvedení činitelé, za hlavní omezující parametr pro zatěžování transformátoru je považována teplota. Z určení teploty se navíc vychází i při odhadu zestárnutí transformátoru a určení zbytkové životnosti. S ohledem na tyto skutečnosti a zkušenosti v oblasti diagnostiky transformátorů jsou pro základní sledování doporučeny následující parametry: [2]

- 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.

Otázkou volby sledovaných parametrů je vždy nutné citlivě zvážit s ohledem na stáří transformátoru a posoudit individuálně. Je zřejmé, že čím větší je počet sledovaných parametrů, tím bude i vyšší výsledná cena vlastního systému monitoringu. [2]

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 měřícími transformátory, které se většinou umísťují na kondenzátorové průchodky. Měřící 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 měřícího 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 efektivity 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).

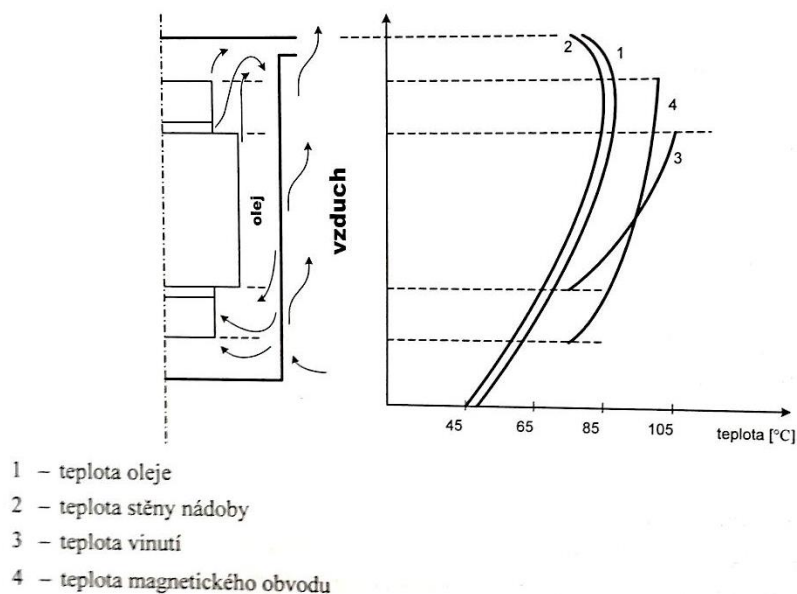
4 Využívané on-line monitorovací systémy

4.1 Měření teplot

Měření teplot je jedním z velmi důležitých 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 [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, z kterého je zřetelné, 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 jímký. [2]

Součástí teploměrů, které mají přípojovací hlavici, může být i vestavěný převodník, který převádí výstupní veličinu teploměru (odpor) na proudový unifikovaný signál 4 až 20 mA. 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. [2]

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

teploměrů 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

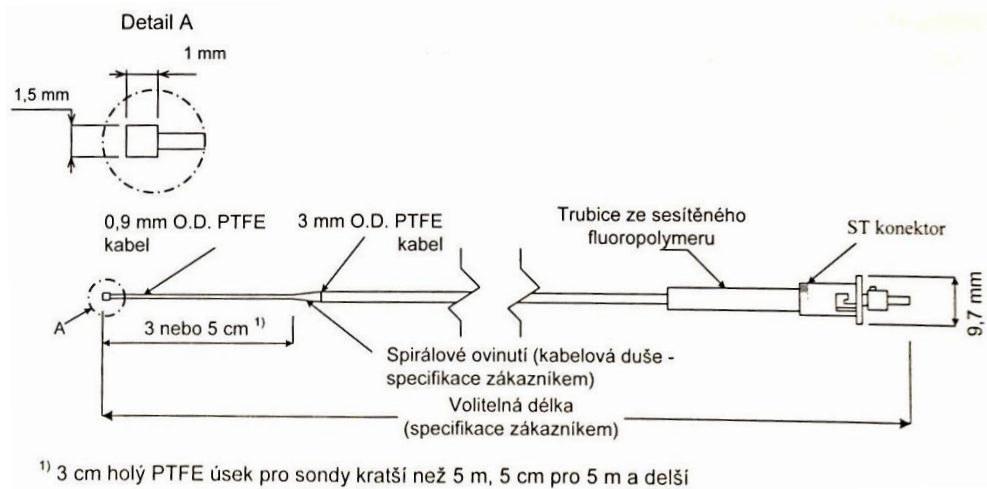
V současné době se v energetice využívají dva optovláknové systémy, a to bodového a rozprostřeného měření teploty. Pokud bychom použili optovláknový bodový systém při klasickém způsobu měření (tj. elektricky), realizace bude velmi komplikovaná. Typickou aplikací je v energetice přímé sledování teploty 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. Vybuzené 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

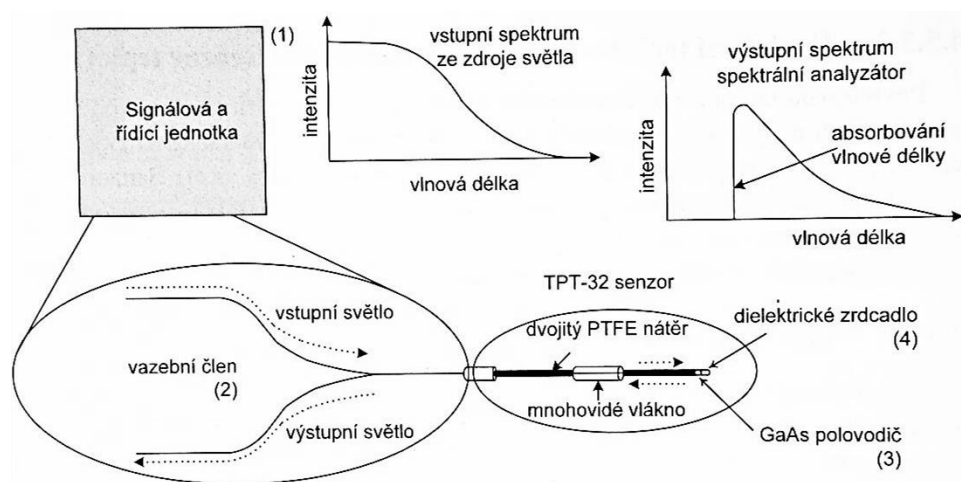
Pro přímé měření teploty vinutím jádra, případně průchodek ve výkonových transformátorech je možno použít optické snímače- viz obr. 4.2



Obr. 4.2 Senzor pro přímé měření teploty vinutí [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 [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 přenášen pákovým ústrojím na ručičku a na hřídel s mikrosplínači 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. 4.1), jehož velikost koresponduje s teplotou odpovídající přírůstku nad teplotou oleje. [2]

Tab. 4.1 Hodnoty teploty nad teplotou oleje a odpovídajících proudů [2]

Teplotní rozdíl [°C]	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
I_h /mA	620	680	730	780	830	880	920	970	1010	1050	1090	1130	1160	1200	1230

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 celistvý 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]

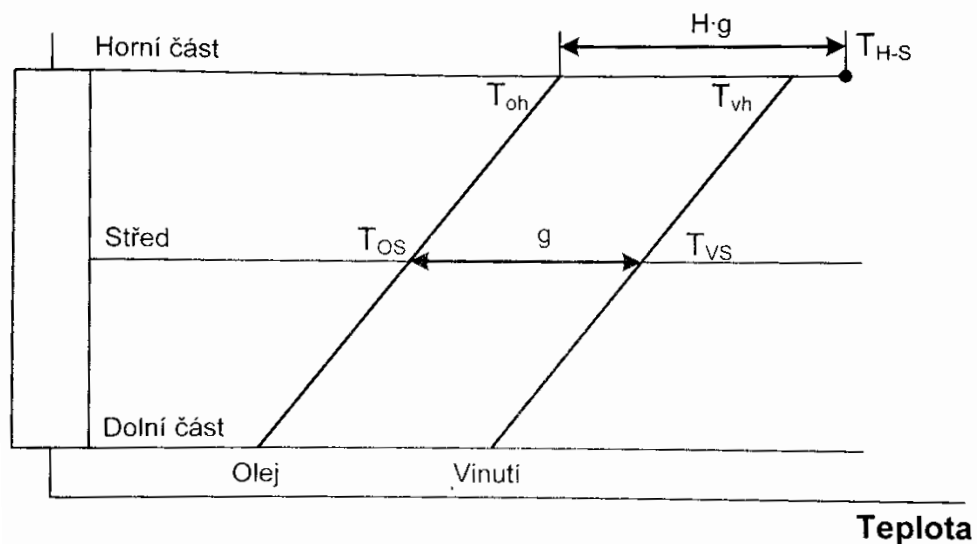
4.1.4 Hot- spot teplota

Teplota nejteplejšího místa, tzv. hot- spot teplota má zásadní význam při posuzování tepelného namáhání a životnosti transformátoru. Obecně se nejvíce zahřívá vinutí a jeho

pevná izolace, která je ochlzena cirkulujícím olejem. Cirkulace může být nucená (F- forced), nebo přirozená (N- natural). Přirozený, tzv. konvenční oběh, spočívá v tom, že slabá vrstva oleje, která přebrala teplo od vinutí, se stává lehčím a proudí nahoru. U nuceného oběhu je cirkulace urychlována čerpadli. Tento způsob nucené cirkulace je využíván u transformátorů větších výkonů, kde je potřeba intenzivnějšího chlazení.

Pomocí hot- spot teploty lze stanovit omezení pro zatěžování transformátoru a také lze odhadnout relativní zestárnutí izolačního systému. V případě velkého zatížení stroje by došlo nejdříve k degradaci oleje v neteplejším místě. Aby k tomu nedošlo, neměla by zátěž stroje překročit mez, při níž teplota nejteplejšího místa vzroste nad kritickou hodnotu. Přímé měření této teploty je velice komplikované, neboť přesná poloha hot- spot místa není předem známa a navíc by bylo potřeba instalovat do vinutí senzor, který by měl přibližně stejnou životnost jako transformátor. Druhou metodou pro měření hot- spot místa je dohad s využitím výpočtů založených na základě experimentů aplikovaných na zjednodušeném modelu rozložení teplot v transformátoru.

Při odhadu lze vycházet ze zjednodušeného modelu rozložení teplot v transformátoru (obr. 4.4). Tento model platí, pokud uvažujeme že teplota oleje uvnitř vinutí roste lineárně od spodního konce vinutí k hornímu bez ohledu na druh chlazení.



Obr. 4. 4 Zjednodušený model rozložení teplot v transformátoru [2]

Oteplení vinutí vzrůstá paralelně k oteplení oleje s konstantním rozdílem g , který udává rozdíl mezi střední teplotou vinutí T_{VS} a střední teplotou oleje T_{OS} při jmenovitých podmínkách. Teplota nejteplejšího místa T_{H-S} (někdy také značena Θ_{H-S}) je ve skutečnosti vyšší než teplota vinutí v horní části. Rozdíl je způsoben vzrůstem rozptylových ztrát směrem

k hornímu konci vinutí a v případě použití zvláštní elektrické izolace také zvýšením tepelné izolace. Početně můžeme hodnotu nejteplejšího místa určit podle vztahů (4.1) a (4.2). [2]

$$T_{H-S} = T_{oh} + H \cdot g \cdot K^y \quad (4.1)$$

Pokud není znám rozdíl teploty vinutí a teploty oleje při jmenovitých podmínkách (nejsou známy výsledky oteplovacích zkoušek), používá se k výpočtu nejteplejšího místa vzorec: [2]

$$T_{H-S} = T_{oh} + (T_{vh} - T_{oh}) \cdot (H - 1), \quad (4.2)$$

kde	T_{H-S}	je teplota nejteplejšího místa [°C]
	T_{oh}	je teplota oleje v horní části transformátoru [°C]
	T_{vh}	je teplota horní části vinutí [°C]
	g	je rozdíl teploty vinutí a teploty oleje při jmenovitých podmínkách [°C]
	H	je činitel nejteplejšího místa [-]
	y	je exponent proudu v závislosti na přírůstku teploty [-]
	K	je poměr zatěžovacího a jmenovitého proudu [-]

Jak je zřejmé z předchozího textu a uvedených vztahů, teplota nejteplejšího místa se určuje na základě výpočtu. Jednotlivé parametry potřebné pro tento výpočet jsou buď přímo měřitelné a bylo o nich již zmíněno (jedná se o provozní proud, teplotu oleje a vinutí), nebo jsou pro různé typy stanoveny normou. [2]

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 rychlosti 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 [$^{\circ}\text{C}$]

T_{hN} je normou stanovená hodnota referenční teploty [$^{\circ}\text{C}$]

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 $T_{hN}=98^{\circ}\text{C}$ 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 [$^{\circ}\text{C}$]

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 [X3]. Od garantované zbytkové životnosti se pak odečítá násobek vypočtené spotřeby a času, kterému tento násobek odpovídá. [2]

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 nespolehat 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.

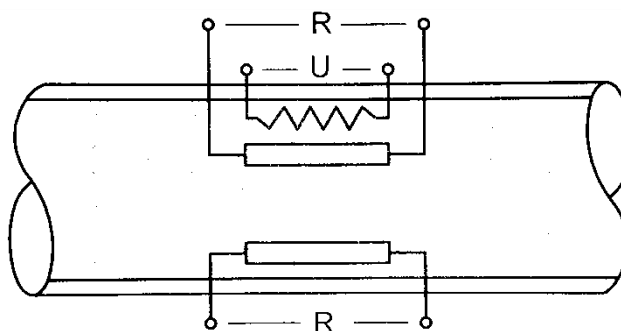
Lze také určit intenzitu chlazení z rozdílu teplot na vstupu a výstupu chladiče. Je samozřejmě nutné doplnit transformátor vhodnými snímači, které budou měřit teplotu oleje na

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 měřících 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

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

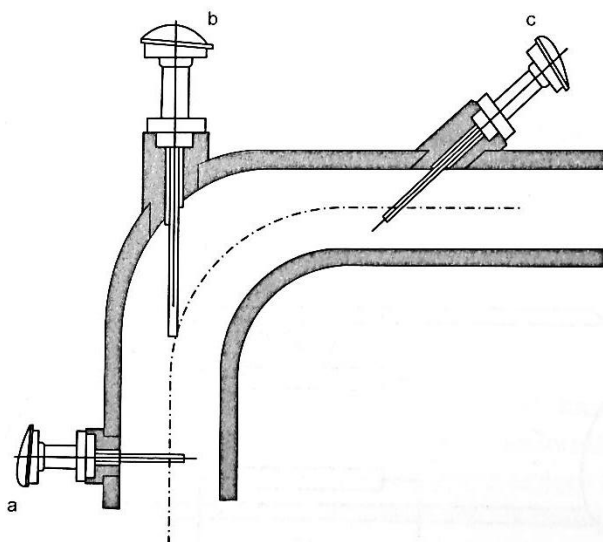
menší je tepelná vodivost média, tím rychleji musí médium téci, aby mohlo být zachyceno. Pro různá média se proto uvádějí rozdílné pracovní oblasti. [2]

4.1.7 Zabudování dotkových 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]

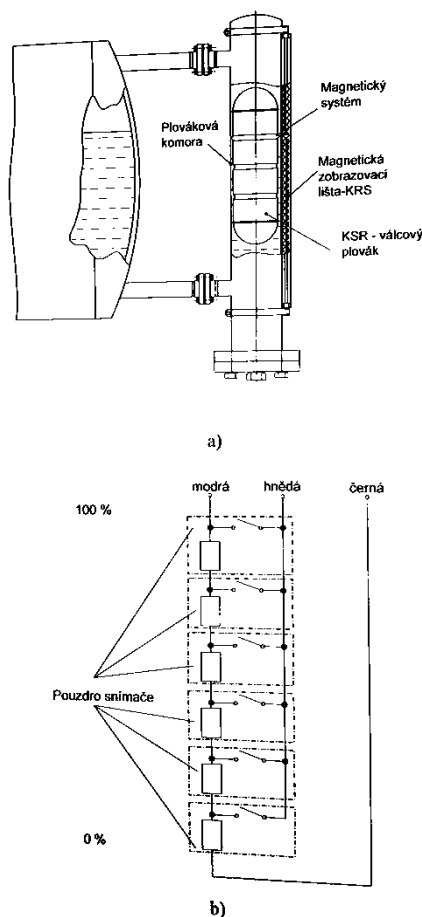


Obr. 4.6 Zabudování odporových teploměrů do potrubí [2]

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 a) Snímač výšky hladiny, b) vnitřní schéma zapojení převodníku výšky hladiny

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.

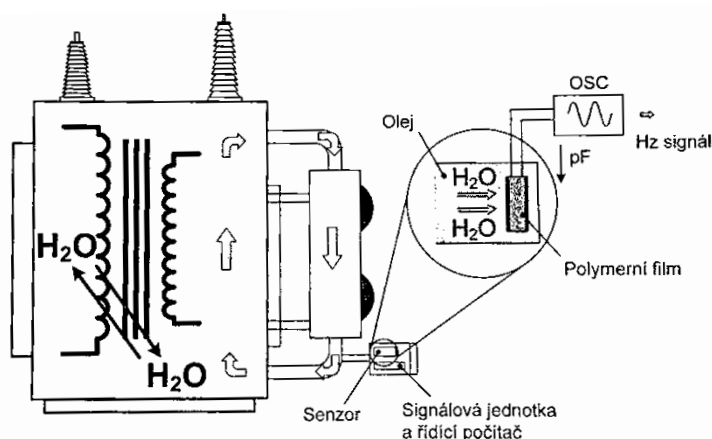
K dálkovému měření výšky hladiny slouží tzv. KRS- převodník, který pracuje na principu plováku s magnetickým přenosem (permanentní magnet, jazýčkové relé a odporový řetěz). Obr. 4.7b v třívodičovém zapojení jako potenciometr. Magnetický systém umístěný v plováku ovlivňuje svým magnetickým polem miniaturní 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. 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). [2]

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. 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 [2]

Analyzátory 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 CH_3 , CH_2 a CH , spojené dohromady molekulovými vazbami C-C (viz tab. 4.2)

Tab. 4.2 Klíčové plyny pro plynovou analýzu

Minerální olej $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	Vodík H_2	Acetylen C_2H_2	Etylen C_2H_4
$\begin{array}{cccccccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & & & & & \\ \text{---C---C---C---C---C---C---C---C---H} \\ & & & & & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$	H-H	$\text{H-C}\equiv\text{C-H}$	$\begin{array}{cc} \text{H} & \text{C} \\ & \\ \text{C} & = & \text{H} \\ & & \\ \text{C} & & \text{H} \end{array}$
Ethan C_2H_6	Methan CH_4	Oxid uhelnatý CO	Oxid uhličitý CO_2
$\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{H-C} & - & \text{C-H} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H-C-H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	$\text{H} = \text{O}$	$\text{O} = \text{C} = \text{O}$
Kyslík O_2	Dusík N_2	Propan C_3H_8	Propen C_3H_6
$\text{O}=\text{O}$	$\text{H}\equiv\text{N}$	$\begin{array}{ccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & \\ \text{H-C} & - & \text{C} & - & \text{C-H} \\ & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C} = & \text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{H} \\ & & \\ & & \text{C} \\ & & \\ & & \text{H} \end{array}$

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.

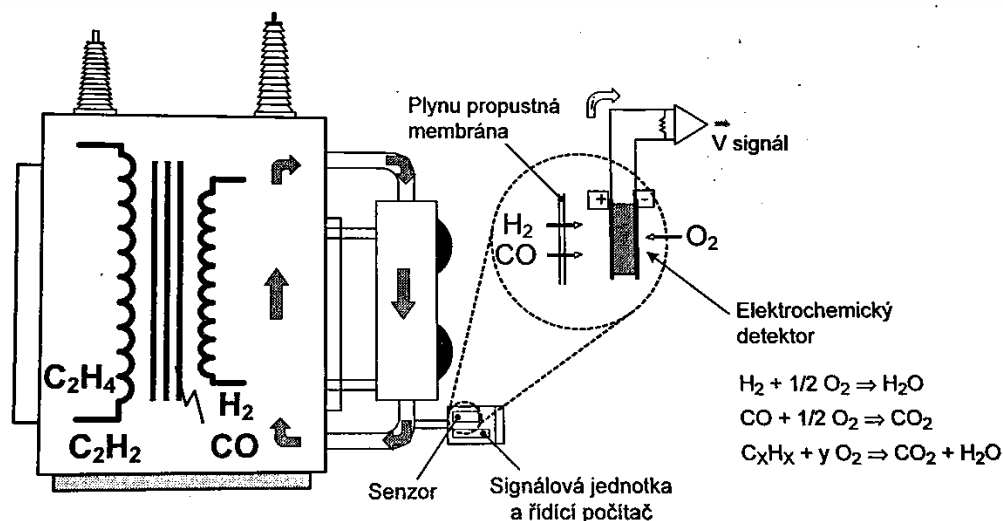
Na základě klasifikace jednotlivých produktů je možno stanovit druh poruchy, ke které v transformátoru došlo. Příklad citlivostí jednotlivých plynů na druh poruchy jsou zobrazeny v tab. 4.3

Tab. 4.3 Rozpoznání druhu poruchy podle klíčových plynů

Druh plynu	Elektrické výboje			Lokální přehřátí		
	El. oblouk	Jiskření	Částečné výboje	< 300 °C	300 až 1000 °C	> 1000 °C
Vodík H ₂	•	•	•	○	○	Δ
Methan CH ₄	□	Δ	Δ	Δ	Δ	□
Ethan C ₂ H ₆	○	○	○	•	○	○
Ethylen C ₂ H ₄	□	Δ	○	Δ	•	•
Acetylen C ₂ H ₂	•	•	Δ ¹⁾		○	Δ
Propan C ₃ H ₈	○			□	○	○
Propylen C ₃ H ₆	Δ	○		○	□	Δ

• – klíčový plyn
 □ – charakteristický plyn – průvodní plyn (velký podíl)
 Δ – charakteristický plyn – průvodní plyn (malý podíl)
 1) – platné jen pro velkou energetickou hustotu

V praxi se využívá mnoho různých principů pro měření plyných 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 plyných produktů v oleji

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. 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. [2]

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] ČSN IEC 354 Pokyny pro zatěžování výkonových transformátorů, 1997
- [4] Doc. Ing. Jiřina Mertlová, CSc..0084.transformator 400-121 kv. [fotografie]. home.zcu.cz [online]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~mertlova/els-foto/prestice/0084.transformator_400-121kv.jpg