ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh online diagnostického systému

Bc. Martin Mužík **2018**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2017/2018**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Martin MUŽÍK**
Osobní číslo:	**E15N0030P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Návrh online diagnostického systému**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Describe the problematics of diagnostics of electrical devices and its current capabilities
2. For selected EIS determine degradation factors
3. Propose suitable models for use in the online diagnostic system
4. Propose simple online diagnostic system with output for ethernet and evaluation in PC
5. Perform fastened aging test of selected EIS

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Mentlík, a kol. Diagnostika elektrických zařízení, BEN, 2008**
2. **Mentlík, Trnka a kol. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN, 2011**
3. **Mentlík, Dielektrické prvky a systémy, BEN, 2006**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

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

L.S.

Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je ukázkou způsobu monitorování transformátorů. Vzhledem k tomu, že je monitorován hlavně stav izolačních materiálů, jsou v této práci představeny základní izolační materiály použité v transformátorech. Hlavním bodem této práce je rešerše možností komerčních čidel a systémů pro online monitorovací systém a součástí je i vypracovaný návrh jednoduchého diagnostického systému vzhledem k vybraným degradačním faktorům. Proveden byl také experiment prokazující vliv stárnutí na vybrané parametry.

Klíčová slova

Online diagnostický systém, monitoring, transformátory, elektroizolační systém, degradační faktory, stárnutí, DGA

Abstract

The master thesis is an example of how to create monitoring of transformers. The basic insulating materials used in transformers are presented in this paper due to the fact that they are mainly monitored by the diagnostic systems. The main point of this work is research of possibilities of the commercial sensors and systems for the online monitoring system and the proposal of a simple diagnostic system is created with respect to selected degradation factors. At the end, there are presented the results of experiments showing the effect of ageing of selected parameters.

Key words

Online diagnostic system, monitoring, transformers, electrical insulation system, degradation factors, ageing, DGA

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 21. 5. 2018 Bc. Martin Mužík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval rodině a blízkým za neústupnou podporu při psaní této práce a panu doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za nekončící trpělivost, cenné rady a vedení.

Obsah

OBSAH ... **8**

ÚVOD ... **9**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK ... **10**

1 TRANSFORMÁTORY ... **12**

1.1 PRINCIP ... 12
1.2 VINUTÍ TRANSFORMÁTORŮ ... 13
1.3 MAGNETICKÝ OBVOD ... 13
1.4 NÁDOBA A DALŠÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY ... 14
1.5 IZOLAČNÍ SYSTÉMY TRANSFORMÁTORŮ ... 15
1.5.1 Oleje a další izolační systémy ... 16
1.5.2 Pryskyřice ... 17
1.5.3 Kompozitní materiály ... 17
1.5.4 Dřevo ... 18

2 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ ... **19**

2.1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA ... 19
2.2 OFFLINE DIAGNOSTIKA ... 20
2.2.1 Měření izolačního odporu a polarizačního indexu ... 22
2.2.2 Měření činného odporu vinutí ... 23
2.2.3 Měření ztrátového činitele ... 24
2.2.4 Oteplovací zkoušky ... 25
2.2.5 Zjišťování stavu kapalných izolantů ... 26
2.3 ONLINE DIAGNOSTIKA ... 28
2.3.1 Modely pro použití v online diagnostickém systému ... 30
2.3.2 Degradační faktory ... 33
2.3.3 Měření napětí a proudů ... 35
2.3.4 Měření teplot ... 35
2.3.5 Analýza plynů v oleji ... 40
2.3.6 Analýza vlhkosti oleje ... 43
2.4 POROVNÁNÍ ONLINE A OFFLINE MĚŘENÍ ... 45

3 NÁVRH ONLINE DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU ... **47**

3.1 ČIDLA PRO MĚŘENÍ TEPLOT V TRANSFORMÁTORECH ... 47
3.2 SYSTÉMY PRO ANALÝZU PLYNŮ A VLHKOSTI V OLEJI ... 49
3.3 JEDNODUCHÝ MONITOROVACÍ SYSTÉM ... 54

4 EXPERIMENTY ... **60**

4.1 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE A PERMITIVITY ... 60
4.2 EXPERIMENT STÁRNUTÍ ŘEPKOVÉHO OLEJE ... 66

ZÁVĚR ... **68**

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ ... **70**

PŘÍLOHY ... **74**

Úvod

Transformátory jsou již po dlouhou dobu hlavním spojením mezi jednotlivými místy rozvodné sítě a pro jejich neustálý provoz, vzhledem k důležitosti, je potřeba získávat nepřetržité informace o jejich stavu. K prvotnímu určení mezních hodnot a zatížitelnosti transformátorů slouží offline diagnostika, neboli měření bez připojení do provozu. Za využití těchto získaných těchto údajů je možné připojit transformátor do provozu a zjišťovat vybrané hodnoty pomocí tzv. online diagnostického systému. Tento systém nám předává důležité ukazatele již během provozu transformátoru a je schopný nás předem upozornit na závažnosti změn vybraných degradačních faktorů.

V této práci bude nejdříve představen obecný základ principu transformátoru a jeho částí, převážně se zaměřením na izolační systém, který je nejdůležitějším prvkem určujícím provozní změny v transformátoru. Poté bude uveden teoretický úvod do problematiky online diagnostického měření a budou zmíněny některé z offline metod. Vybrané degradační faktory a modely pro určitý elektroizolační systém si představíme před ukázkou nejčastějších analýz používaných u online monitorovacího systému. Další a nejdůležitější bod této práce bude seznámení se s vybranými systémy, které jsou vědeckou společností upřednostňované a dohledatelné v elektrických informačních zdrojích jako je IEEE. Představeny budou i další dodavatelé, jejichž systémy lze vyhledat v aktuálních nabídkách předních firem zabývajících se právě touto problematikou. Vypracován byl návrh jednoduchého monitorovacího systému pro vybrané degradační faktory s výstupem na ethernet a možností grafického zobrazení výsledků na počítači. Ukázány budou teoretické předpoklady pro tento navrhovaný monitorovací systém. Vylíčeno zde bude i využití dalších měření méně důležitých faktorů, které lze zároveň brát jako ukazatele měnícího se stavu transformátoru.

Poslední část této práce bude vyhrazen pro krátké zhodnocení provedených experimentů, které by měly ukázat tepelnou závislost některých faktorů měřených materiálů a následně vliv stárnutí na ztrátový činitel řepkového oleje.

Seznam symbolů a zkratek

EIS.....elektroizolační systém/y

Φ .....magnetický tok [Wb]

nn a NN .....nízké napětí

vn a VN.....vysoké napětí

1f .....jednofázový

3f .....trojfázový

SF_6 .....fluorid sýrový

R_j .....množina signálů bezporuchového stavu

R_j^i.....množina signálů poruchového stavu

α_i .....signály dílčích kontrol

R_j^+.....skutečné výsledky

i_{15}.....proud odečtený 15 s po přiložení napětí [A]

i_{60}.....proud odečtený 60 s po přiložení napětí [A]

p_{i1} .....minutový polarizační index

I_0.....efektivní proud naprázdno [A]

Ruw, Ruv, Rvw.....hodnoty odporů mezi svorkami U, V a W [Ω]

R_f.....odpor fáze [Ω]

R_S.....dílčí odpor [Ω]

tan δ.....ztrátový činitel

τ.....časová konstanta

E.....intenzita elektrického pole [V/m]

T.....termodynamická teplota [K]

θ_h.....hot-spot teplota [$°C$]

RS 232 .....standard sériové linky

RS 485 .....standard sériové linky

IP56.....stupeň krytí zařízení (proti vniku prachu a kapalin)

C.....uhlík

H.....vodík

O.....kyslík

H_2 .....vodík

CO.....oxid uhelnatý

CO_2.....oxid uhličitý

CH_4.....metan

C_2H_2 .....acetylen

C_2H_4 .....etylen

C_2H_6 .....etan

DGA .....analýza obsahu plynů (plynová chromatografie)

GaAs.....arsenid gallitý

USB .....sériová sběrnice pro připojení periferií k počítači

SMS .....krátká textová zpráva

PT100 .....typ odporového teploměru jeho R=100 Ω při 0 °C

V92/56K.....standard modemu, přenos 56 kb/s

GSM/GPRS.....mobilní přenosové sítě

C_3H_6 .....propylen

NDIR .....bezrozptylová infračervená technologie

EMC .....elektromagnetické kompatibilita

ε_r.....relativní permitivita

PA6.....alkalický polyamid typu 6 (silon)

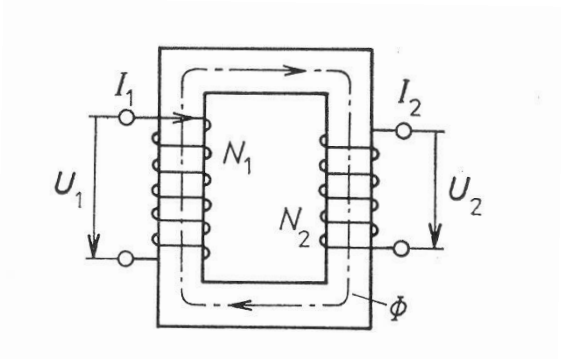
PTFE .....polytetrafluoretylen (teflon)

1 Transformátory

Před puštěním se do tématu online diagnostiky budou představeny obecné možnosti a rozdělení transformátorů, u kterých právě těchto diagnostických prostředků využíváme. Elektrický netočivý stroj, jako je transformátor, je zařízení svým principem velice jednoduché. Se vzrůstajícím výkonem či s nároky na vysokou účinnost a nepřetržitý chod se zvyšuje i potřeba sledovat nezměrné množství výstupních hodnot, které je potřeba hlídat a v dostatečném předstihu řešit jejich možné výkyvy. Například při špatném sledování převážně elektroizolačního podsystému transformátorů může dojít k náhlému odstavení až přerušení provozuschopného stavu. Stárnutím EIS, který v systému vytváří potenciálové bariéry, je nejčastěji způsobena porucha vedoucí k průrazu izolace a nenávratného poškození [1]. Diagnostický systém si proto najde uplatnění převážně u transformátorů pro vysoké výkony, používané v distribuční síti, kde jakákoliv závada způsobí odstávku v dnešní době tak důležité věci jako je elektrická energie.

1.1 Princip

Pro zjednodušení: každý transformátor tvoří magnetický obvod, na kterém jsou dvě vinutí. Napájením jednoho z vinutí střídavým proudem je vytvořen magnetický tok Φ, který díky principu elektromagnetické indukce vytvoří indukované napětí v druhé cívce a v závislosti na počtu závitů zde dostáváme nové zmenšené či zvětšené napětí beze změny frekvence. Tyto stroje se při použití ve výkonové energetice pohybují se svou účinností kolem 99,5 %. [2]



Obr. 1 Zjednodušené schéma transformátoru- převzato z [3]

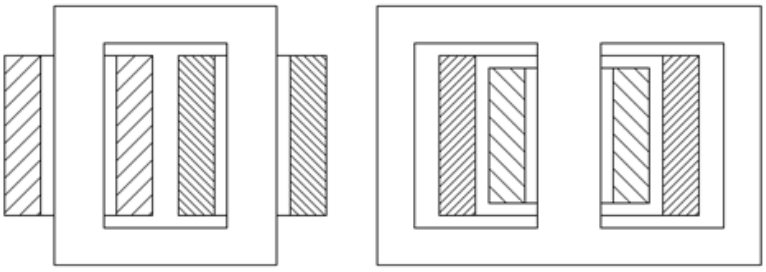
1.2 Vinutí transformátorů

Vinutí transformátorů je potřeba vybírat a přizpůsobit požadavkům stroje. Průřez vodiče je potřeba obměňovat vzhledem k tomu, zda je vodič na straně nízkonapěťové- *nn*, či vysokonapěťové- *vn*. Další určující parametry jsou vodivost vodiče, mechanická pevnost konstrukce vinutí, elektrická pevnost izolace a odolnost proti tepelnému namáhání. Tyto parametry ovlivňuje také ekonomická stránka věci, kdy záleží např., na plánovaných výdajích na stroj. Vinutí u transformátorů je převážně měděné, vzhledem pro její vysokou vodivost, možnost svařovatelnosti a tvárnost. Pro vinutí na *nn* straně lze také použít pásy z hliníkové fólie. [4], [5]

Izolace vinutí je tvořena ve velké míře impregnací skelnou tkaninou, popř. též celulosou a lakováním vodičů pryskyřicí či smaltem. Tuto izolaci lze rozdělit na izolaci polohovou a závitovou. Izolace polohová slouží k odizolování jednotlivých cívek, jelikož u vysokovýkonných transformátorů používáme vícevrstvé cívky. Pro vytvoření axiálního chladícího kanálu mezi tyto vrstvy cívek vkládáme mezi dva sousední závity podložku s nalepenými lištami. Závitová izolace slouží k odizolování jednotlivých vodičů tvořících výsledný vodič. [4], [5]

1.3 Magnetický obvod

Magnetický obvod lze rozdělit u transformátorů na dva typy a to plášťový a jádrový. U obou typů je magnetický obvod tvořen transformátorovými plechy. Liší se od sebe, jak již název napovídá, tím, že plášťový systém využívá magnetického obvodu, který tvoří plášť celému vedení, cívce. Jádrový typ, který se nejčastěji používá ve výkonové technice, využívá magnetického plechu, sloupu, na kterém je vinutí a tyto vytvořené sloupy jsou spojené do uzavřeného magnetického obvodu spojkou, viz *Obr. 2*. [6]



Obr. 2 Způsoby konstrukce magnetického obvodu 1f transformátoru.
První: jádrový, druhý: plášťový - převzato z [4]

Tyto plechy jsou vyráběny z elektrotechnické oceli vyválcované do tenkých tabulí či pásů. Tato ocel bývá pro užití pro magnetický obvod obohacena křemíkem a to zvláště kvůli zvýšení odporu obvodu z čehož vyplývá snížení hysterezní ztrát a ztrát vířivými proudy. Obsah křemíku se pohybuje maximálně do 4 % [5], jelikož s narůstajícím podílem křemíku získává ocel křehkost. Dále lze také používat tzv. kovová skla, kde získáme výhodu vytvoření užších plechů a tím pádem výrazného snížení vířivých ztrát. Tloušťka a způsob válcování plechů je určena podle našich požadavků. Tyto plechy se následně skládají s určitým překrytím a odsunutím, čímž vzniká lehce kruhová konstrukce pro umístění vinutí, viz *Obr. 3*. [6]

Obr. 3 Ukázka skládání plechů transformátoru do magnetického obvodu - převzato z [7]

Transformátory se dále dělí na jednofázové a trojfázové. Na *Obr. 1* je viditelné, že je zde jen jedno *nn* vinutí a jedno *vn*. Na *Obr. 3* je ukázka magnetického obvodu připraveného pro *3f* výkonový transformátor. Na každém ze „sloupů“ bude umístěno *nn* i *vn* vinutí, viz plášťový způsob uspořádání. V celé distribuční síti se lze potkat jen s *3f* transformátory, *1f* se používají pro užitkovou elektroniku a to převážně v jejich zdrojích.

1.4 Nádoba a další konstrukční prvky

Nádoba transformátorů pro vysoké výkony zajišťuje ochranu transformátoru před vnějšími vlivy a zároveň musí ochránit prostředí od zbytečných úniků oleje či nadměrných tepelných ztrát. Současně jsou nádoby nosiči monitorovacích systému a zajišťují přístup čidel a senzorů k měřeným částem transformátoru. Tyto nádoby jsou robustní ocelové

konstrukce, provádějí se jako hladké či s více záhyby a s žebrováním pro dostatečné zvýšení plochy nádoby směřující k jednoduššímu odvodu ztrátového tepla. Dalšími konstrukčními prvky jsou umístěná kolečka pro přesun a samostatné stojny upravené pro předem vybrané místo umístění transformátoru. Dále to mohou být také oka pro přemisťování stroje vzdušnou cestou pomocí jeřábů. Konstrukčně je potřeba správně vypočítat pevnost stěn a jejich tepelnou roztažnost, která by mohla ovlivnit funkčnost celého celku. Proto se nepotkáme s kusem z čistě hladkého plátu na žádné ze stěn. Tyto stěny jsou svařeny z menších plátů a jsou zesilovány tzv. *stiffeners*, zesilovacím plátem, který zaručí vyšší pevnost ve sváru a zároveň zvyšuje plochu pro lepší chlazení stroje. Nádoby jsou na závěr testovány pro možné úniky oleje. Provádí se tzv. vakuový test, který může odhalit slabost materiálu v určitých místech. Ukázku nádoby transformátoru s chladícími žebry na obou stranách na již hotovém stroji, lze pozorovat na *Obr. 4*. Na vrchu je umístěna válcová dilatační nádoba pro olej a z přední strany je možné vidět umístění skříněk pro monitorovací systém a přepínač odboček. [5], [8]

Obr. 4 Příklad nádoby transformátoru – převzato z [9]

1.5 Izolační systémy transformátorů

Na závěr této kapitoly budou popsány elektroizolační systémy v transformátorech, jelikož diagnostický systém pracuje z velké části převážně s měřením a prognózou budoucích vlastností a změn právě EIS. U izolačních systémů nám poté jde převážně

o určení jejich elektrických, mechanických, fyzikálních, chemických a termických vlastností [5]. Transformátory lze podle typu a způsobu použitého EIS dělit na suché, zalévané a olejové. První z možností používá suché/ plynné chladící medium a lze použít u transformátoru do napětí 38 kV při chlazení vzduchem a 75 kV za použití fluoridu sýrového SF_6. Zalévané transformátory, kdy je vinutí zalito pryskyřicí, lze dosáhnout napětí kolem 35 kV s výkonem 20 MVA. Systém olej-papír lze použít do opravdu vysokých napětí a výkonů omezených čistě konstrukcí a možnou velikostí stroje [10]. Ve výkonové technice se lze proto potkat převážně s použitím kapalného izolantu, oleje, s kombinací s tuhými izolačními systémy (izolace vinutí). Celý tento EIS poté stojí na použití systému olej-papír. Chladící možnosti transformátoru lze rozdělit na chlazení transformátorové nádoby/oleje (chladící žebra, radiátory, trubky) či aktivní chlazení ventilátory s nuceným oběhem oleje. Olej a jeho teplota nám taktéž signalizují problémy. Se vznikem nějakého problému se začne např. zvyšovat teplota a tím vypařovat olej. Pomocí tzv. Buchholzovo relé můžeme tento jev brzy zpozorovat. U oleje sledujeme převážně jeho přívětivou viskozitu a také tepelnou závislost, viz následující kapitoly. [11]

1.5.1 Oleje a další izolační systémy

Jak již bylo zmíněno, pro chladící a izolační účely je možné ponořit celý systém transformátoru do různých druhů olejů. Jsou zde dvě rozdílné cesty a to použití přírodního (minerálního) oleje, nebo oleje uměle vyrobeného, syntetického. Vybrané oleje pro použití v transformátorech musí podléhat určitým světovým standardům, jako jsou IS: 335, BS: 148 a IEC 60296 a 60422 [5]. Ukázku lze nalézt v příloze A. Minerální oleje jsou vyráběny z ropy destilací a rafinací. Většinou jsou to směsi obsahující složité chemické uspořádání uhlovodíků, jako např. parafinických či naftenických. Jejich průrazné napětí se pohybuje kolem 65 kV/2,5mm a bod vzplanutí mají přibližně 140 °C a samovznítí se při teplotě 280 °C. Jejich nevýhodou je pomalý biologický rozklad. Ten zvyšuje riziko zamoření země a pitných vod, proto je nutné při jejich použití dbát na bezpečnostní nároky, jako je např. záchytná olejová jímka. Oproti tomu jsou syntetické oleje ve většině případů nehořlavé[1] a biologicky odbouratelné. Jde o uměle vytvořené materiály získávané z jiných látek než je ropa, většinou látek na bázi organických esterů, polymerických nenasycených uhlovodíků nebo fluorovaných sloučenin. Pro nás důležité vlastnosti syntetických olejů

[1] Nehořlavé podle ČSN 65 0201. Avšak stále mají syntetické oleje teplotní bod vzplanutí i samovznícení řádově kolem 300 °C. [12]

jsou odolnost vůči oxidaci, nižší vypařování, větší rozsah viskózních tříd a neohrožující dopady na životní prostředí. Jejich průrazné napětí se může pohybovat až do 105 kV/2,5mm. [5], [12]

U suchých transformátorů se jako pracovní plyn a chladivo využívá vzduchu, mimo jiné se ale setkáme i s použitím plynu fluoridu sýrového SF_6. Při použití SF_6 lze zdvojnásobit pracovní napětí oproti chlazení vzduchem, kde se setkáme s napětím kolem 38 kV. Použití SF_6, který je netoxický elektronegativní plyn bez zápachu, je nevhodné jen v případě úniku, kdy hrozí nebezpečí vytlačení vzduchu v šachtách či výkopech, vzhledem k 5x těžší váze SF_6 oproti vzduchu. Jejich zastoupení ve výkonové technice není značné, a proto v této diplomové práci bude představeno monitorování transformátorů olejových. [5], [12]

1.5.2 Pryskyřice

Nedílnou součástí pro vytváření izolačních, povětšinu kompozitních, materiálů jsou ve velké míře využívány pryskyřice. Slouží zde povětšinou jako pojivo. Rozdělit pryskyřice můžeme na přírodní a syntetické, přičemž syntetické materiály nahrazující přírodní pryskyřice se nazývají stejně. Hlavními představiteli syntetických pryskyřic jsou epoxidové, polyesterové či silikonové. Jejich vysoké teploty vzplanutí a vlastnost samostatného zhášení jsou výhodné převážně při využití pryskyřice v celozalévaných transformátorech. U suchých transformátoru se používají zejména pro izolaci vinutí, viz kapitola 1.2. [5]

1.5.3 Kompozitní materiály

Pro odizolování závitů jednotlivých vrstev, sekcí, přívodů atd. se používají speciální elektroizolační materiály. Jde o kompozitně upravené tkaniny, papíry, ale i syntetické materiály. Ukázkovou tabulku předních vlastností vybraných elektroizolační materiálů je možno nalézt v příloze B. Mezi hlavní představitele syntetických materiálů lze řadit např. transformátorový papír s obchodním názvem Nomex®. Je vyroben z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatického polyamidu-aramidu. Tyto uměle vytvořené částečky jsou dále zpracovány běžnými stroji pro výrobu papíru. Výsledný materiál velmi dobře odolává teplotám do 220 °C, má výborné elektrické vlastnosti i vzhledem k vysoké pevnosti v tahu a je nehořlavý. Nomex® lze dále kompozitně spojovat přimícháváním

slídy (zpracování slídy viz příloha C), či nanášením dalších vrstev pomocí vtírání pryskyřice na jeho povrch. Další kompozitní materiály používané pro EIS jsou převážně tvrzené papíry. Ty se, vzhledem k jejich vysokým dielektrickým ztrátám a relativně nižší elektrické pevnosti, používají spíše pro konstrukční prvky. Jejich pojivem je u většiny případů fenolformaldehydová pryskyřice. Dále jde o tvrzené tkaniny výjimečné svými dobrými mechanickými vlastnostmi. Za použití skelné tkaniny jako nosného materiálu získáváme tzv. tvrzené skelné tkaniny. U nich lze docílit různými pojivy skvělých elektrických i mechanických vlastností. Jako pojiva se používají silikonové i epoxidové pryskyřice a polyestery. [13]

1.5.4 Dřevo

Při výrobě transformátorů se používá např. vrstvené bukové dřevo, které dále označujeme jako tvrzené vrstvené dřevo. Využití zde nalézá především pro konstrukční prvky a to díky např. své výborné nasákavosti. Svými elektrickými vlastnostmi se přibližuje tvrzeným papírům i tkaninám. Jeho hlavní výsledné rozdíly ovlivní zejména způsob vrstvení během procesu výroby (paralelní, křížové, radiální a tangenciální). [13]

2 Diagnostika transformátorů

Po obecném seznámení se s transformátory lze říci, že jsou to stroje svou činností téměř jednoduché. S narůstajícím výkonem a potřebou neustálého a mnohdy mnohaletého provozu narůstá nutnost sledování velkého množství proměnných určujících stav stroje. S tímto se dostáváme k problematice diagnostiky, která má přemíru možností, ale také úskalí. Diagnostiku transformátorů lze rozdělit na zkoušky typové, kusové a zvláštní (viz příloha D), a vzhledem k způsobu provedení na online a offline. Typové zkoušky se provádí při uvedení nového či změněného stroje. U sériové výroby se typová zkouška opakuje po určitém období nebo po předem nastaveném počtu vyrobených kusů. Oproti tomu zkoušky, které se provádějí na každém vyrobeném kusu podle předepsaného rozsahu, se nazývají kusové. Pod zvláštní zkoušky patří např. zkoušky na vyžádání provozovatele stroje. Vybrané diagnostiky prováděné online a offline, které budou popsány v následujících kapitolách, se dají zařadit pod zvláštní provozní zkoušky, kdy se stroje testují zatěžováním provozních vlivů v plné šíři. [10]

2.1 Technická diagnostika

Technická diagnostika slouží k určení technického stavu předmětu, jeho provozuschopnosti či objevení poruchy, která by znamenala ukončení funkčnosti. Používá se soubor metod sledování signálů a měření jejich odezev. Je důležité zmínit, že provozuschopnost je stav objektu, ve kterém je schopen objekt vykonávat své dané funkce za určených technických podmínek. Zato funkčnost objektu je schopnost vykonávat jednotlivé funkce podle technických podmínek. Z toho vyplívá, že objekt může být ve funkčním, ale ne provozuschopném stavu. Tyto stavy objektů zkoumáme tzv. diagnostickými prostředky (senzory, měřící ústrojí, testery atd.), které jsou buď vnější, nebo vnitřní, přičemž společně s diagnostickými algoritmy, programovým vybavením, matematickými modely a potřebnými zásahy obsluhy tvoří diagnostické systémy. [14], [15]

Díky celkové diagnostice, jak offline tak online, se nadále dostáváme k možnosti předpovědi budoucího chování diagnostikovaného objektu. Za určitých požadavků, a to zdali známe současný stav objektu a předchozí genezi vývoje právě toho stavu, lze analytickými úvahami zjistit další možné změny stavu diagnostikovaného objektu. Získáním prognózy, zda se stav objektu zhoršuje a může dojít k tzv. postupné poruše,

můžeme vyvodit náš budoucí zásah do zkoumaného objektu a předejít tak poruše zásahem či opravou. K výsledkům takovýchto stavů prognózy lze přistupovat pomocí statického (pravděpodobnostního) vyhodnocování a následným výpočtem pravděpodobnosti její hustoty. [10]

Přenosovou funkcí vyjadřujeme závislost výstupních funkcí, které jsou realizované diagnostikovaným objektem, jeho vstupními proměnnými a vnitřními vztahy, viz další kapitola [10]. Pro bezporuchový stav:

$$Y = \Psi(U, X_P, t), \tag{1.1}$$

poruchový stav (*i*-tý) je vyjádřen rovnicí:

$$Y_i = \Psi^{\mathrm{i}}\left(U, X_P^i, t\right). \tag{1.2}$$

Obecně platí:

$$R_j^i = \Psi^{\mathrm{i}}(\alpha_j, \{\gamma\}_j). \tag{1.3}$$

Dále pro bezporuchový stav je

$$R_j = \Psi\ (k_j) \tag{1.4}$$

a v *i*-tém poruchovém stavu lze R_j^i vyjádřit vztahem:

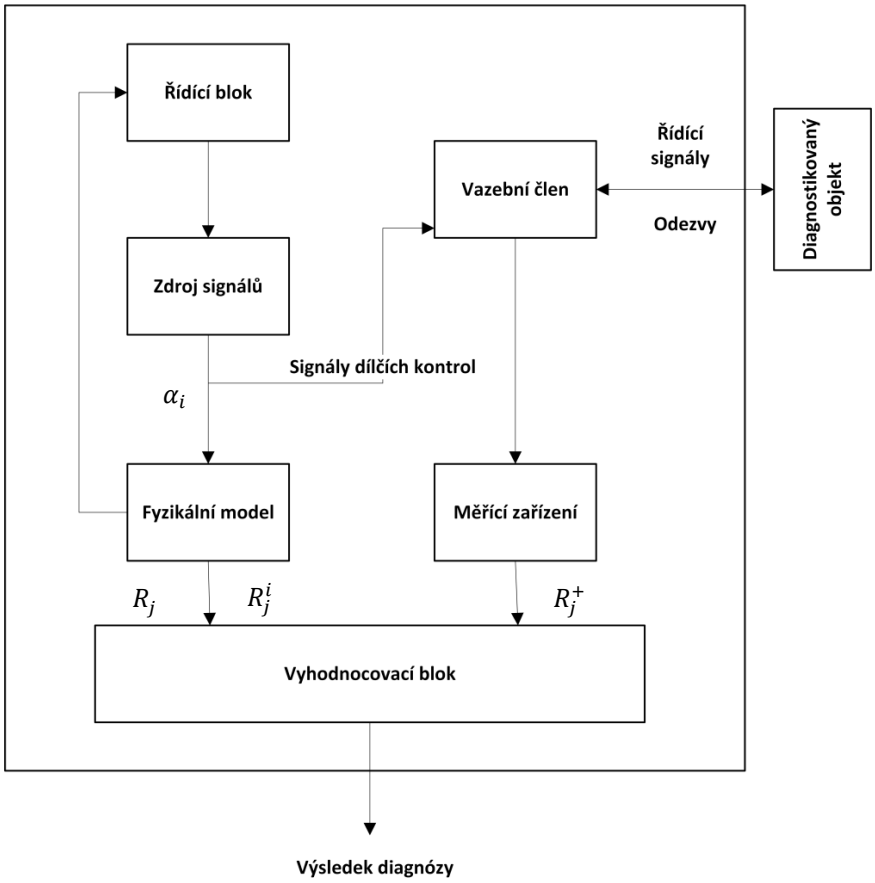
$$R_j^{\mathrm{i}} = \Psi^{\mathrm{i}}\left(k_j\right). \tag{1.5}$$

2.2 Offline diagnostika

Offline diagnostika se vyznačuje sledováním a měřením objektu, který je mimo provoz. Toto vyhodnocování se provádí buď testem, tzv. testovací diagnostikou, nebo ve zvláštním případě diagnostikou ve dvou časových etapách. Testovací diagnostiku provádíme pomocí testovacích signálů, snímáním jejich odezev a následným

vyhodnocením. Měření ve dvou časových etapách je prováděno nejprve na stroji, který je připojen do provozu, a následným vyhodnocením a porovnáváním s minulými stavy objektu spolu s určením prognózy stavu stroje. [14]

Ukázka offline testovacího systému je na *Obr. 5*. Celý systém je řízen algoritmem diagnózy, na jehož příkaz se generují signály, které jsou předávány přes vazební člen do diagnostikovaného objektu. Fyzikální model v tomto systému realizuje funkci podle rovnice 1.4 v kapitole 2.1, což znamená, že z něj vystupuje množina signálů R_j. Avšak fyzikální model zde realizuje i opačný stav objektu, a to poruchový stav, který je zohledněn v rovnici 1.5 v kapitole 2.1. V tomto případě model generuje množinu signálů R_j^i. Objekt reaguje odezvami na signály dílčích kontrol α_i a tyto skutečné výsledky R_j^+ jsou porovnávány a řešeny ve vyhodnocovacím bloku s výstupními signály z fyzikálního modelu. [10]



Obr. 5 Schéma offline diagnostického systému [10]

V následujících kapitolách budou představeny některé z offline zkoušek, které reprezentují měření vybraných faktorů transformátoru. Jedná se hlavně o stav izolace, která musí odolávat teplotám, mechanickému namáhání, vlhkosti, působení agresivních látek apod. Většina těchto zkoušek se provádí pro určení zásadních vlastností transformátoru před jeho přesunem k budoucímu provozovateli. Z těchto zkoušek se vypracovávají detailní záznamy a sestavuje se díky nim štítek transformátoru. V detailních záznamech se uvádí nespočet důležitých faktorů, jako je den odstavení stroje, teplota vinutí, okolní teplota, relativní vlhkost během měření a další. Tyto zkoušky, s ohledem na důležitost stroje či jeho stav, jsou dále opakovány periodicky, nebo jsou prováděny podle toho, zda se jedná o zkoušku typovou či kusovou, viz příloha D. [10], [14]

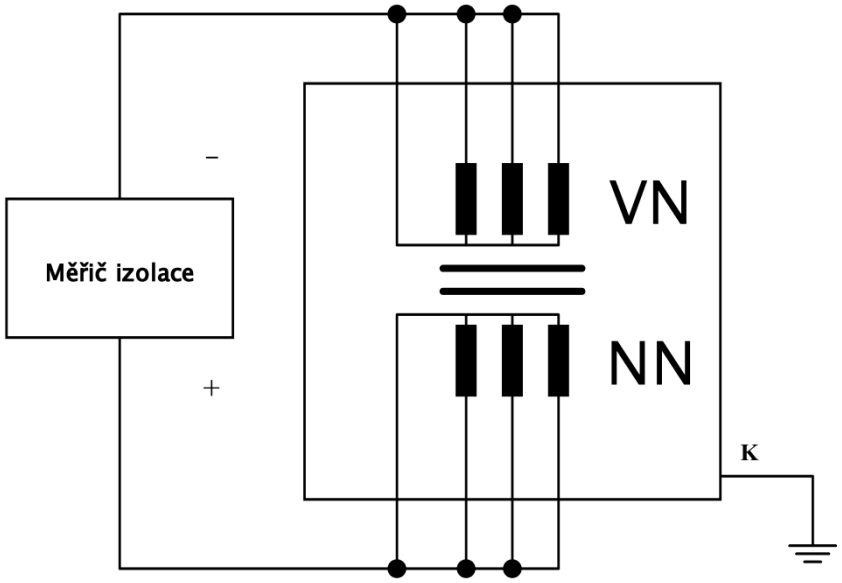
2.2.1 Měření izolačního odporu a polarizačního indexu

Měření izolačního odporu lze zařadit do skupiny nejstarších diagnostických metod transformátoru, které i přesto věrohodně vypovídají o stavu izolace vinutí. Celkový výsledný izolační odpor je vždy omezen nejslabším místem izolačního systému a je často ovlivňován vlivem vlhkosti a vodivých nečistot. Měření je proto nutné provádět při relativní vlhkosti menší než 90 % a při teplotě stroje větší než 10 °C. Velký zřetel je nutné brát i během samotné přípravy stroje, kdy je potřeba přibližně 2 hodiny po odpojení stroje počkat na ustálení teplot. Veškerá vinutí stroje se před měřením zapojí nakrátko a minimálně na pět minut se také spojí s kostrou stroje pro odstranění zbytkového náboje. Během měření se nadále nikdy nesmí objevit nezapojené vinutí, vždy musí být zapojeno buď na kostru či s měřicím napětím. V *Tab. 1* můžeme vidět postup pro různá zapojení podle schématu na *Obr. 6*, kde jsou viditelně rozdělena jednotlivá vinutí pro VN, NN a K značí kostru (nádobu) transformátoru. [10]

Tab. 1 Rozdělení a zapojení vinutí pro měření izolačního odporu [10]

dvojvinuťový transformátor		trojvinuťový transformátor	
měřené vinutí	uzemněno	měřené vinutí	uzemněno
VN	NN, K	VN	SN, NN, K
NN	VN, K	SN	VN, NN, K
VN+NN	K	NN	VN, SN, K
		VN+SN	NN, K
		VN+SN+NN	K

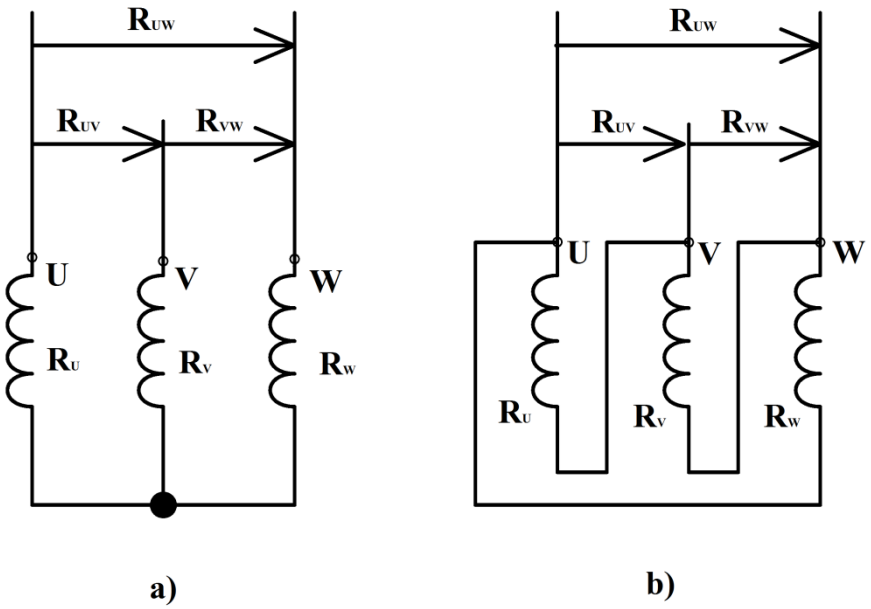
Měření se provádí pomocí přístrojů pro přímé měření odporů při stejnosměrném napětí 2,5 kV, odečet hodnot uskutečníme pro dvě hodnoty a to v čase 15 a 60 s po přiložení napětí. Z těchto dvou hodnot je možné získat hodnotu absorpčních proudů ve dvou zmíněných intervalech, označené i_{15} a i_{60}, a jejich poměrem získáme tzv. minutový polarizační index p_{i1}. [10]



Obr. 6 Schéma zapojení měření izolačního odporu [10]

2.2.2 Měření činného odporu vinutí

Činný odpor vinutí, jelikož jde o zkoušku offline, se měří během bezpečně odpojeného transformátoru od sítě. Měření probíhá na více místech: na výstupní i vstupní straně transformátoru, na všech odbočkách vinutí (pokud jsou přístupné pro měření) a při všech polohách přepínače vinutí. Oproti měření izolačního odporu vinutí se měření provádí při teplotě stroje na stejné úrovni jako je teplota okolí. Velice důležité je, během celé doby měření, kontrolovat aby velikost proudu nepřesáhla 0,2x hodnotu jmenovitého proudu vinutí. Pro efektivnější práci a snížení doby čekání na ustálení proudu se doporučuje volit hodnotu proudu nejméně $2\sqrt{2\mathrm{I}_0}$, kde I_0 je efektivní hodnota proudu naprázdno. Vinutí, která právě nejsou měřena, musí být během měření rozpojena. Měření odporu vinutí se provádí zejména pro určení teploty vinutí (viz kapitola 2.2.4). [10]



Obr. 7 Měření dílčích odporů pro zapojení: a) do hvězdy b) do trojúhelníku [10]

Na *Obr. 7* je ukázáno, kde měříme dílčí hodnoty odporu mezi svorkami. Jde o R_{UV}, R_{UW} a R_{VW}. Pro určení odporu fáze R_f, pokud se hodnoty liší jen minimálně, nebo pokud nám jde o střední hodnotu, lze použít následující vztah [10]:

$$\mathrm{R}_f = \frac{1}{6} \cdot (\mathrm{R_{UV}} + \mathrm{R_{UW}} + \mathrm{R_{VW}}). \tag{1.6}$$

Pokud jsou hodnoty dílčích odporů stejné, lze vypočíst odpor fáze podle vztahů 1.7 či 1.8 [10] podle způsobu zapojení vinutí. Při zapojení vinutí do hvězdy:

$$\mathrm{R}_f = 0{,}5 \cdot \mathrm{R_S} \tag{1.7}$$

a pro zapojení vinutí do trojúhelníku:

$$\mathrm{R}_f = 1{,}5 \cdot \mathrm{R_S}. \tag{1.8}$$

2.2.3 Měření ztrátového činitele

Ztrátový činitel *tan δ* je ukazatel činných ztrát v důsledku polarizace v izolaci a s jeho nárůstem se izolace více zahřívá a rychleji stárne. Velké ovlivnění způsobují polární látky

jako jsou voda, mechanické nečistoty a produkty stárnutí. Ztrátový činitel nám proto dává obraz o kvalitě a celkovému stavu izolace. S $tan\ \delta$ přímo souvisí i kapacita vinutí, kde se sleduje její neměnnost a v případě lokálních poruch nám poslouží k jejich odhalení. Obě tyto veličiny se povětšinou měří společně a to můstkovými metodami při střídavém napětí. Toto napětí se volí podle izolačních hladin pomocí zkušební řady napětí 0,5-1-2-5-10 kV. Měření se provádí při teplotě stroje 20 °C. Pro srovnání hodnot při různých teplotách je možné použít následující vzorec [10]:

$$\tan \delta_{20} = \frac{\tan \delta_{\vartheta}}{\mathrm{K}}, \tag{1.9}$$

kde $tan\,\delta_{20}$ bude přepočítaný ztrátový činitel při 20 °C a $tan\,\delta_{\vartheta}$ ztrátový činitel při aktuální teplotě. *K* je koeficient pro přepočet pro transformátory s minerálním olejem jako izolační kapalinou podle standartu ANSI/IEEE C 57.12.30-1980, přičemž přepočet je možný pro hodnoty teploty stroje od 10 do 70 °C. [10]

U dobré izolace můžeme sledovat mírné zvyšování ztrátového činitele s narůstajícím napětím. Velikost izolačního odporu a ztrátového činitele jsou parametry závislé na teplotě, kdy izolační odpor s teplotou klesá a ztrátový činitel se naopak zvyšuje, viz kapitola 4. Neposledně se pro popsání stavu izolace uvádí polarizační index, viz kapitola 2.2.1, který by se neměl pohybovat kolem hodnot menších než 1,3. [10]

2.2.4 Oteplovací zkoušky

Oteplovací zkoušky se provádí po kompletním dokončení hlavní části konstrukce transformátoru, kdy je nutné zjistit, zda odpovídají jednotlivé části předepsaným předpisům pro oteplení. Pro tyto zkoušky není např. nutné montovat části, které by patrně neovlivnily měření, jako je jiskřiště na průchodkách. Zaměřujeme se na všechny části transformátoru, kde dochází ke ztrátám činné energie. Transformátor se otepluje na ustálený stav zatěžováním. Jde o měření teploty chladiva, určení teploty vinutí, horní a střední vrstvy oleje a dále měření teploty konstrukčních prvků, magnetického obvodu a oleje v jejich blízkosti. [10]

Zatížení můžeme vyvolat několika způsoby. Metodou přímého zatížení, vzájemného zatížení či měřením oteplování během zkoušek nakrátko. Při zkouškách metodou přímého

zatížení je jedno vinutí transformátoru napájeno jmenovitým napětím a druhé, pro vyvolání jmenovitého proudu, se připojí na odpovídající zatížení. Zkoušky za použití vzájemného zatížení, kde se využívá paralelního propojení s jiným transformátorem, je možné regulovat změnami převodu transformátorů. Během zkoušek nakrátko je jedno vinutí spojeno nakrátko a druhé se napájí napětím, jehož kmitočet se nesmí lišit o více než 2 %. Následující zkoušky je nutné specificky definovat a pozměňovat podle použitého izolačního a chladicího systému. [10]

Měření teploty chladiva se provádí teploměry (termočlánky), které jsou umístěny v nádobě naplněné olejem. U obou možných použitých izolačních systémů je nutné umístit teploměry nejméně na třech stranách transformátoru, kde se umisťují přibližně do středu výšky nádoby a to ve vzdálenosti 1- 2 metry od povrchu nádoby. Výstup tohoto měření je důležitý zejména pro predikci, zda je možné pro určité teploty okolí uchladit transformátor, ať už za použití nuceného vzduchového chlazení či chlazení přirozeného.

Teplotu vinutí určujeme pomocí měření odporu vinutí zmíněného v kapitole 2.2.2. Na základě tohoto vztahu [10] (vhodný pro měření měděného vinutí):

$$\vartheta_W = \frac{R_2}{R_1} \cdot (235 + \vartheta_{W1}) - 235\ [°C] \tag{1.10}$$

vypočteme střední hodnotu teploty vinutí ϑ_W. R_1 je odpor vinutí při teplotě ϑ_{W1} a odpor R_2 při teplotě odlišné. Teplotu při odečtu hodnoty odporu R_1 v °C označujeme ϑ_{W1} a je měřena při stroji za studena podle normy ČSN 35 1086. Pro hliníkové vinutí jsou obě konstanty 235 nahrazeny konstantami 225. [10], [16]

2.2.5 Zjišťování stavu kapalných izolantů

Možností offline měření, stejně jako jejich počet, je velice obsáhlý. Těchto několik vybraných předchozích měření lze brát jen jako minimální představení této problematiky. Více vybraných představitelů lze nalézt v příloze B. V této příloze se ale nesetkáme s řešením offline diagnostiky kapalných izolantů používaných v transformátorech. Jde o měření důležitých faktorů elektroizolačních olejů jako je hustota, viskozita, bod vzplanutí, bod tuhnutí, kyselost, obsah vody, elektrická pevnost, ztrátový činitel, permitivita a neposledně i barva. Měření stavu oleje a příměsí objevujících v něm je bráno

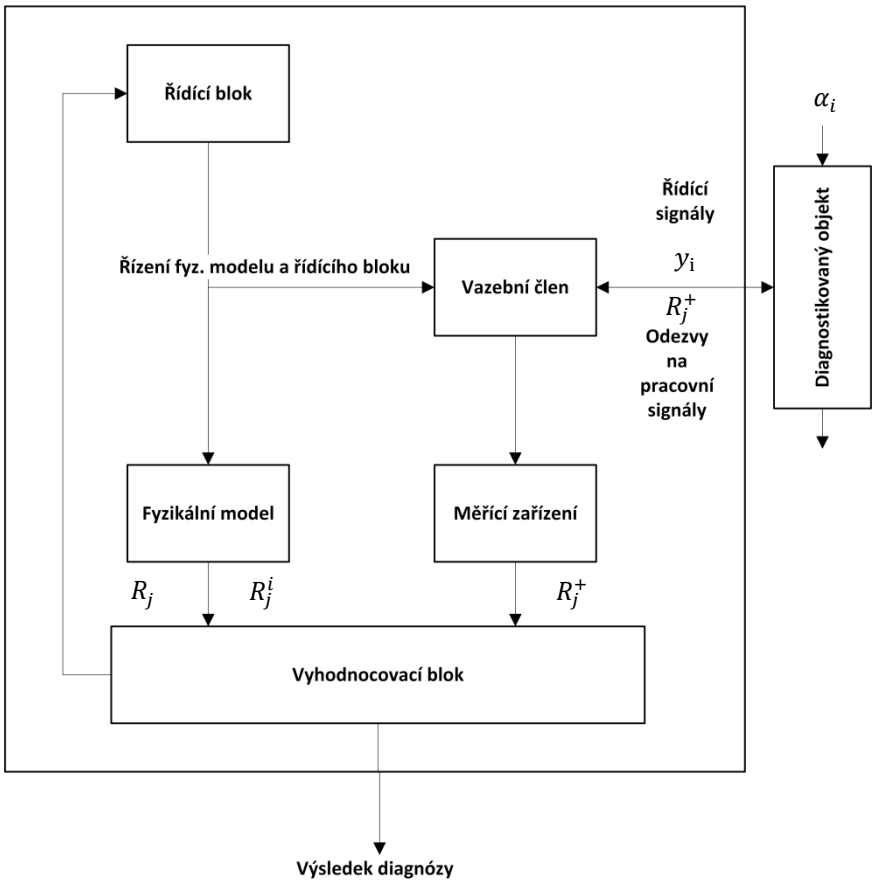
jako hlavní ukazatel o stavu izolace a jako přední monitoring v online diagnostice stavu transformátoru, který bude popsán v následující kapitole. Některé z faktorů měřených offline lze provést i online. Offline měření slouží především k ukázce a predikci budoucího chování oleje. Zkoumání oleje je možné jak fenomenologicky, tak v poslední době vyvíjejícími metodami strukturálního zkoumání, mezi které se řadí infračervená spektroskopie a také plynová a kapalinová chromatografie. Hodnocení kvality olejů se provádí podle příslušných norem, které byly zmíněny již v kapitole 1.5.1. [10]

Barva oleje je jeden z prvotních ukazatelů kvality oleje. Po odebrání vzorků je možné hodnotit barvu buď subjektivně, nebo objektivně pomocí měřících přístrojů. Oleje v průběhu stárnutí tmavnou díky zvyšování se přítomnosti cizích částic. Hustota je základní fyzikální veličinou všech látek a u olejů je sledována převážně k rozřazení těchto ropných produktů za použití hustoměrů či pyknometrů. Viskozita je oproti tomu významnější veličina určující poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění. Zvyšující se viskozita určuje možnost pohybu kapaliny a je závislá na teplotě. K jejímu měření se používají tzv. viskozimetry pracující na rotačním, kapilárním či Stokesovo principu. Bod vzplanutí a tuhnutí jsou parametry, bez kterých by žádný z dodavatelů nenabízel izolační kapaliny. Bod vzplanutí je významně ovlivněn obsahem plynů v oleji, které vznikají vlivem stárnutí či závadami jako jsou výboje. Bod vzplanutí je ovlivněn zvyšující se teplotou. Se snižující se teplotou se zvyšuje již zmíněná viskozita. Oba tyto body jsou zkoumány experimenty, během kterých jsou zaznamenávány parametry okolí jako jsou teplota, barometrický tlak aj. Obsah vody je ovlivňující parametr převážně elektrické pevnosti oleje. Její vznik a druhy viz kapitola 2.3.6. Měření offline se provádí podle normy ČSN EN ISO 12937 tzv. coulometrickou titrační metodou založenou na reakci vody s jódem, oxidem siřičitým aj. Posledním zmíněným parametrem, který je závislý na obsahu vody, nečistot, produktů stárnutí a obsahu plynů je elektrická pevnost. Elektrická pevnost se měří za pomoci elektrod, které mají normou stanovené rozměry, vzdálenosti a jsou vyrobené z mosazi, bronzu nebo korozivzdorné oceli. Měření elektrické pevnosti je v průběhu měření ovlivněno dobou působení měřícího napětí, dobami mezi jednotlivými přeskoky, počtem průrazů atd. a proto je potřeba veškeré tyto informace uvádět ve výsledcích. [10]

2.3 Online diagnostika

Oproti předchozím metodám jsou všechny diagnostiky online prováděny na stroji za provozu. Z toho vyplývá, že ne všechny metody měření, které byly použity v této diagnostice, je možné použít pro online vyhodnocování. Proto bylo nutné přijít se zvláštními či upravenými metodami měření. Na zkoumaném objektu tím pádem používáme monitorovací systém, který zkoumá a vyhodnocuje signály trvale. Např. velikost tepelného zatížení izolace lze určit ze závislosti Joulových ztrát na zatěžovacím proudu. Měření proudů a napětí pomocí měřících transformátorů, které se umisťují na průchodky a další, viz následující kapitoly.

Online monitoring transformátorového oleje je dalším důležitým aspektem, který musíme hlídat. Offline vyhodnocováním při odstaveném stroji můžeme získat spoustu důležitých veličin, ale pro efektivnější diagnostiku a zároveň pro zabránění odstávky stroje je ekonomicky výhodnější vyhodnocovat stav stroje a jeho částí online. U oleje tak poté můžeme sledovat přítomnost plynů rozpuštěných a obsah vlhkosti v oleji. Je potřeba přihlédnout k na rozdělení měření s přístupem fenomenologickým (zaměřujeme se na reakce diagnostikovaného objektu na přiložené vstupní signály) a strukturálním (věnujeme pozornost dějům v systému objektu). Strukturální metody jsou ve většině případů nevhodné pro online diagnostiku vzhledem k jejich potřebě složitého a nákladného měřícího ústrojí, vyškolené obsluhy a z důvodu jejich destruktivity. Avšak i strukturální metody si našly své místo v této oblasti. Především pro prvotní zkoumání možného chování elektroizolační soustavy v závislosti na teplotě či mechanické síle, při uložení vzorku ve vzduchu, vakuu nebo v oleji, které jsou pro tyto metody význačné. Výsledky těchto metod dosazujeme do modelů v online diagnostice a ukazují nám důležité degradační faktory, které je potřeba sledovat. Jde o analýzy, jako jsou diferenční termická analýza, dynamická mechanická analýza, termomechanická analýza či termogravimetrie a další. [10]

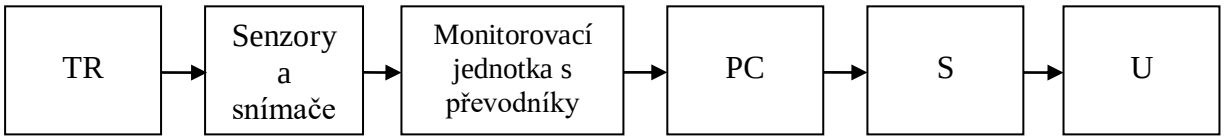


Obr. 8 Blokové schéma online diagnostického systému [10]

Online monitoring probíhá za plného provozu, což je patrné na *Obr. 8* z provozních signálu α_i, které vstupují do diagnostikovaného objektu. Do diagnostického systému vstupují jako řídící signály a také odezvy na pracovní signály. Stejně jako u offline systému jsou poté porovnávány výsledky měření R_j^+ s generovanými možnými výsledky R_j a R_j^i vytvořené fyzikálním modelem ve vyhodnocovacím bloku. [10]

Monitorovací systémy online diagnostiky si lze dále lépe představit pomocí následujícího blokového schéma (*Obr. 9*), kde máme sledovaný transformátor (TR), dále z počítače (PC) jsou přes server (S) přivedeny výsledky k uživateli (U). Senzory jsou umístěny podle druhu měření v nádobě, na vinutí, na nádobě či v potrubí chladicího systému (více v dalších v kapitolách) a jejich výstupní hodnoty jsou přivedeny do monitorovací jednotky s potřebnými převodníky na signál pro přenos do počítače. Pro přenos se používá klasické vedení, symetrický kabel, koaxiální apod. Do počítače jsou přivedeny tyto informace přes sériový port či speciální hardwarové karty. Pro obsluhu, neboli uživatele, jsou informace zpracovány do podoby grafů, grafického rozhraní,

histogramů, u jednodušších systémů se tisknou jen aktuální hodnoty. Ukázky snímačů a programů viz kapitola 3. [10]



Obr. 9 Obecné schéma monitorovacího systému [10]

Všechny naměřené hodnoty se průběžně zaznamenávají a archivují pro možnou predikci chování stroje. Tyto hodnoty mohou být primární pro určení sledovaných degradačních faktorů u jedné řady stejných transformátorů, kdy se jedná v podstatě o laboratorní zkoumání transformátorů monitorovacím systémem [17]. U monitorovacích systémů není potřeba brát takový zřetel např. na zabezpečení přenosu informací. Pokud by však tento systém byl spojen i s řídicími systémy, bylo by nutné se věnovat i zabezpečení. Byl by proto např. systém propojen jen kabely bez přístupu na internet.

2.3.1 Modely pro použití v online diagnostickém systému

Měření všech důležitých parametrů stroje by byly nepoužitelné, bez vytvoření vhodného modelu stroje. Takový model popisuje chování a reakce na změny vlastností EIS a dalších důležitých aspektů. Model poté stojí na znalosti pravděpodobností, fyzikálních, elektrických a chemických vlastností a na jejich vazbách mezi sebou. Tyto modely lze rozdělit na fyzikální a abstraktní, neboli matematické. Matematické modely je možné dále rozdělit podle způsobu jejich vyjádření a provedení. Může jít např. o staticky analytický model, kdy je zkoumaný stroj vyjádřen pomocí algebraických soustav, či o dynamicky analytický, kde je vyjádřen diferenciálními a diferenčními rovnicemi. Analytické modely lze dělit na fyzikálně analytické a empirické, podle toho zda je model postaven na znalosti všech fyzikálních jevů a interakcí, nebo zda je model vytvořen po experimentálním naměření dat. V neposlední řadě je možné i vytvořit tzv. logický model, kdy jsou použité matematické logiky pomocí binárních veličin. Logický model lze zadat ve formě tabulek, grafů a matic přechodů. Možné je také použít topologický model, kde se pro složitost předchozích modelů stává rozlišování algoritmů nevyhovující. Jde o popis kauzalit, vlastností a chování jednotlivých reálných prvků ve formě orientovaného grafu. [14]

Vzhledem ke složitosti a komplexnosti stroje tyto modely nevytváříme pro celý soubor stroje, ale jen pro jednotlivé a nejdůležitější interakce neboli degradační faktory. Jde povětšinou o závislost mezi teplotou a EIS (viz další kapitola). [18]

Matematické modely jsou oproti fyzikálním jednoduší a jsou získané empiricky ze zjišťování jednotlivých závislostí. Jde například o exponenciální vyjádření

$$\tau = k \cdot E^{-n}, \tag{1.11}$$

mocninné vyjádření

$$\tau = a \cdot e^{-bE} \tag{1.12}$$

a další, které získáváme postupným výpočtem a úpravami ze základních schémat strojů a zapojení. U uvedených vzorců je *E* intenzita elektrického pole v kV/mm a ostatní jsou experimentálně zjištěné konstanty. Tyto modely se dále zpracovávají a simulují převážně pomocí programu Matlab/ Simulink a následně využívají při online diagnostice. [18], [19]

Fyzikální modely potřebují ke svému vzniku více úvah a vycházejí z teoretických předpokladů fyzikálního působení degradačních faktorů na EIS. Ve výsledku se poté jedná o více faktorů najednou, např. napětí i teplota vzhledem ke stárnutí materiálu. Pro různé faktory byly vyvinuty různé modely a zde jsou některé z jejich zástupců. [18]

Simoniho model je jedním z nich. Závislost elektrického pole na termodynamické teplotě se poté vyjadřuje jako:

$$\tau = A \cdot e^{-\frac{B}{T}} \cdot e^{\left(a+\frac{B}{T}\right)} \cdot f(E) \tag{1.13}$$

kde *f (E)* je obecná funkce vyjadřující vliv elektrického pole, *T* [*K*] je termodynamická teplota a *A, a, B* jsou materiálové konstanty. [18], [20]

Ramuúv model je ukazatelem elektrického stárnutí s tepelnou závislostí. Vyjádření je následující:

$$\tau(\mathrm{T},\mathrm{E}) = \mathrm{c}(\mathrm{T})\mathrm{E}^{-\mathrm{n}(\mathrm{T})} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{B}\Delta(\frac{1}{\mathrm{T}})}\,, \tag{1.14}$$

a platí zde:

$$\mathrm{c}(\mathrm{T}) = \mathrm{e}^{\mathrm{c}_1 - \mathrm{c}_2\Delta(\frac{1}{\mathrm{T}})}\,, \tag{1.15}$$

$$\mathrm{n}(\mathrm{T}) = \mathrm{n}_1 - \mathrm{n}_2\Delta(\frac{1}{2})\,, \tag{1.16}$$

kde c_1, c_2, n_1, n_2 a B jsou konstanty a platí, že $\Delta\left(\frac{1}{\mathrm{T}}\right) = \frac{1}{\mathrm{T}} - \frac{1}{\mathrm{T0}}$. [18], [21]

Crineúv model je oproti předchozím příkladům plnohodnotným představitelem fyzikálního modelu. Proces stárnutí je zde vyjádřen bariérou oddělující provozuschopný stav od stavu selhání stroje. K překonání této bariéry je potřeba dostatečné energie, kde pravděpodobnost získání této energie je dána Boltzmanovou statistikou. Tomuto procesu napomáhá elektrické pole, které tuto bariéru deformuje a urychluje tak proces stárnutí. Doba životnosti τ je poté vyjádřena jako:

$$\tau = \left(\frac{\mathrm{h}}{\mathrm{k_B\,T}}\right) \mathrm{e}^{\frac{\Delta \mathrm{W}}{\mathrm{k_B\,T}}} \cos \mathrm{h}\left(\frac{\mathrm{e_p\,lE}}{\mathrm{k_B\,T}}\right), \tag{1.17}$$

kde jsou konstanty: h- Planckova, k_B- Boltzmanova. ΔW je volná aktivační energie, l vzdálenost mezi oběma stavy a e_p elektrický náboj částic ovlivňující proces stárnutí. [18], [22]

Další ze zástupců jsou např. Odingův model či model Dechťara a Usipova, které se zabývají mechanickým podsystémem. [18]

Výpočtem rychlosti stárnutí izolace, která je hlavním milníkem u zkoumání životnosti a provozuschopnosti transformátoru, se zabývá norma ČSN IEC 600076-7. Jde o směrnice pro výkonové transformátory a jejich zatěžování. Podle těchto směrnic jde určit optimální postup pro výpočty stojící za měřením. Přestože tento proces ovlivňuje nespočet degradačních procesů, viz další kapitola, jde říci, že pomocí měření jednoho z nich a to teploty, lze určit životnost stroje. Na monitoringu teploty je založen model uváděný v této normě. Jelikož rozložení teploty není homogenní a části pracující ve vyšších teplotách se budou degradovat rychleji, zabývá se hlavně výpočtem stojícím na tzv. hot-spot teplotě, viz kapitola 2.3.4. Tento model by bylo možné použít pro mnou navrhovaný diagnostický systém, jelikož se zabývá měřením teplotního namáhání jednotlivých částí a tím způsobenou degradací oleje a vyvoláním nechtěných produktů, viz následující kapitoly. Např. pro tepelně upravený papír[2], je možné vypočíst dobu životnosti dosazením do vztahu [18]:

$$t = e^{\left(\frac{15000}{\theta_h+273}-28{,}082\right)} \approx 65000 \times e^{\left(\frac{15000}{\theta_h+273}-\frac{15000}{110+273}\right)}. \tag{1.18}$$

Relativní rychlost tepelného stárnutí je např. definována pro chemicky upravené papíry s obsahem dusíku podle vztahu 1.19 a pro tepelně upravený papír podle vztahu 1.20, kde θ_h je teplota hot-spot vinutí v °C. [10], [18]

$$\tau_r = 2^{\left(\frac{\theta_h-98}{6}\right)} \tag{1.19}$$

$$\tau_r = e^{\left(\frac{15000}{\theta_h+273}-\frac{15000}{110-273}\right)} \tag{1.20}$$

2.3.2 Degradační faktory

Zahrnutí co nejvíce možných degradačních faktorů do modelů stárnutí a monitorovacího systému nám pomůže určit životnost izolačního systému. Vzhledem k plynulému provozování, složitosti systému a neposledně k ceně diagnostického systému je důležité zhodnotit výběr těchto faktorů. Je nutné vybrat ty, které jsou pro daný stroj

[2] Tepelně upravený papír je definován v ANSI/IEEE C57:100. Zachová si 50 % pevnosti v tahu po 65000 hodinách v utěsněné trubici při 110 °C nebo jakémkoliv poměru času t (h)/ teplota θ_h.

a jeho použitý EIS nejvíce vhodné a které omezují a ovlivňují jeho funkčnost. Výběr degradačních faktorů se poté řídí umístěním transformátoru, jeho důležitostí či je nutné je postupně pozměňovat a přizpůsobovat vzhledem ke stáří stroje. [10], [17]

Velká většina organických materiálů, které tvoří celý transformátor, je již během kompletního sestavování stroje ovlivněná právě těmito faktory. Jde o komplexní působení jednotlivých činitelů, přičemž tyto účinky mohou způsobit další vzájemné ovlivnění. Jde o mechanické namáhání od otřesů až po mechanické rázy, vlivy klimatu, chemické vlivy jako kyselý déšť, ale převážně oxidaci a korozi. Velkou roli také hraje to, v jakém časovém úseku nastanou tyto degradační faktory. Může jít např. o náhlé působení teploty nebo rychlé změny či nepravidelný cyklus změn. Velké ovlivnění má také elektrické pole, které může způsobit náhlé výbojové činnosti či výkyvy intenzity pole. Pomocí určité prognózy lze dojít k úvaze, že nejdůležitější je sledovat aktivní část transformátoru, a to vinutí a jeho izolační systém. Faktory s největší výpovědní hodnotou, které budou v následujících kapitolách probrány, jsou:

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

Z těchto faktorů je poté nejdůležitější sledování teploty, která je primárním ukazatelem použitým pro zjištění životnosti stroje a je hlavním omezujícím parametrem pro zatěžování. Ke štěpení chemických vazeb a rozkladu oleje a celulózy přispívají všechny uvedené faktory a pro základní diagnostiku je doporučeno ještě následující sledování:

- výstupního napětí a proudu pro každou fázi,
- snímání teploty: oleje, vinutí, na vstupu a výstupu chladiče. [10], [17], [23]

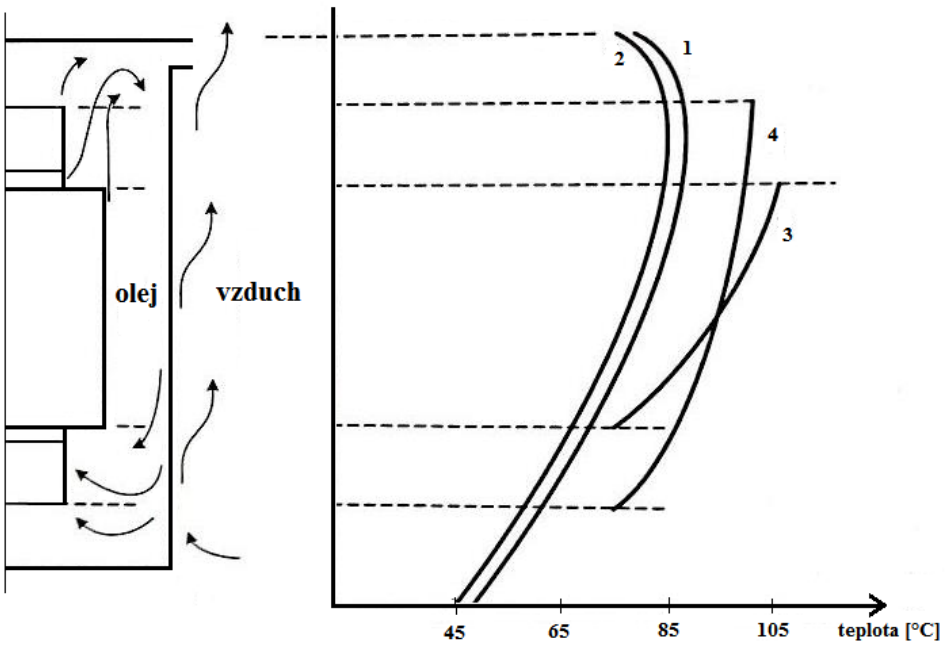
2.3.3 Měření napětí a proudů

Napětí a proudy jednotlivých fází lze brát jako základní parametry pro sledování u transformátorů. Získáme tím pohled na zatížení transformátoru. Převážně pomocí měření zatěžovacího proudu, který je úměrný velikostem Joulových ztrát, jsme schopni určit možné tepelné namáhání izolačního systému přístroje. Měření proudů i napětí se provádí pomocí měřicích transformátorů. Ty se ve většině případů nacházejí na kondenzátorových průchodkách. U velkého počtu strojů bývají tyto měřící transformátory již z výroby, proto je vhodné je použít i pro monitorovací účely. Na zvážení je pak možnost jejich zapojení do monitorovacího systému, zda je to možné vzhledem k zapojení do přenosové cesty spolu s ostatními senzory použitými pro diagnostiku. Pro propojení těchto přístrojů je vhodné použít rozhraní RS 485 či RS 232. Osazení měřících transformátorů vhodnými převodníky pro komunikaci s řídícím počítačem se upravují vzhledem k použitým měřícím transformátorům. [10], [17]

2.3.4 Měření teplot

Teplota, jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, je brána jako základní ovlivňující parametr izolačního systému a z toho důvodu i celého stroje. Její měření se provádí na velkém množství míst, kde je vzhledem k získaným znalostem v tomto oboru největší možné ovlivnění správné funkčnosti systému jako celku. Tyto teploty jsou v různých výškách stroje proměnlivé (*Obr. 10*). Největším působením na tuto nestálost má vinutí a plechy magnetického obvodu. Ty jsou z materiálů s dobrou tepelnou vodivostí, ale špatnou tepelnou kapacitou, čímž se stávají největšími zdroji tepla. Mají také velký vliv na přenášení tepla z vnitřních částí stroje, kde je možné naměřit nejvyšší teploty, k vnějšímu okraji, kde se teplo odvádí. [10]

Měření teploty oleje v horní části transformátoru se provádí pomocí tzv. jímkových odporových teploměrů. Teplota se měří v horní části stroje, jelikož zde dochází k navyšování teploty, viz *Obr. 10*. Odporové měniče pracují na závislosti změny odporu určitých materiálů při změně své teploty. Zároveň jsou to tzv. kontaktní čidla, kdy je snímač přímo v kontaktu s měřeným prostředím. Jejich čidlo nejčastěji bývá vyrobeno z nerezové oceli a je dále spojeno připojovací hlavicí, kde se nachází osazovací svorkovnice. Tato hlavice má vyšší stupeň krytí (IP56). Ukázky takovýchto teploměrů, viz kapitola 3.



1- teplota oleje
2- teplota stěny nádoby
3- teplota vinutí
4- teplota magnetického obvodu

Obr. 10 Ukázka proměnlivých teplot v různých částech transformátoru [10]

Pro převod výstupních veličin teploměrů bývají propojovací hlavice dodávány i s vestavěným převodníkem. Tento výstup je poté převeden na proudový signál 4 až 20 mA. Pro využití k monitorování je nejčastější a nejpoužitelnější přenos po sériové lince RS 485, kterou je možné použít i v rušném průmyslovém prostředí a přenos je možný až na vzdálenost kolem 1 km. [10]

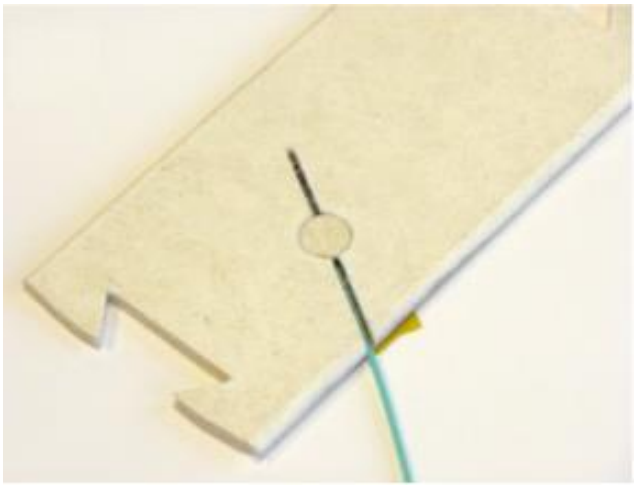
S využitím odporových snímačů teploty je dále také možné se setkat u měření teploty oleje v potrubích chladicího systému transformátoru a zároveň s podpůrným měřením teploty dolní části stroje. Do monitorování teplot/chlazení je také možné zahrnout teplotu okolí transformátoru, kterou již ale zajistí klasické teploměry pro měření okolního vzduchu. [10]

Teplota vinutí lze sledovat dvěma možnými způsoby, a to pomocí přímého nebo nepřímého měření. Přímé měření teploty vinutí je prováděno pomocí optovláknových snímačů. Optovláknové snímače teploty mají nespornou výhodu v jejich množství aplikací, které lze provést oproti realizaci pomocí elektricky měřené teploty. Tyto teploměry lze

rozdělit na dvě podskupiny podle toho, na kterém principu pracují. Zaprvé: snímač pracující na změnách v absorpčním spektru a oproti tomu snímač měřící dobu poklesu intenzity fluorescence. Optická vlákna jsou chráněna teflonovým pláštěm a jsou vedena skrz nádobu transformátoru do signálové a řídící jednotky. Řídící jednotku pro měření potřebujeme jako zdroj signálu (světla) a poté měříme jejich odezvy ve spektrometru podle použité technologie snímačů. Tato metoda lze použít i pro měření teploty jádra a popřípadě i průchodek. Rozsah těchto snímačů je možný od -80 °C do 250 °C s odchylkami kolem +-1 % rozsahu. Výrobci, jako např. LumaSence, poskytují optoláknové snímače teplot pro transformátory a monitorovací systémy. Tyto snímače využívající zdroje světla fluoru nepotřebují žádnou kalibraci ani údržbu a výrobce se nebojí napsat, že jejich sondy vydrží déle, než transformátor samotný. [10], [24], [25], [26]

Pro nepřímé měření se používá metoda tzv. tepelné kopie. Tato metoda se liší od přímé jak v obtížnosti realizace, tak ve finanční stránce věci. Založena je na měření teploty v horní části stroje a měření zatěžovacího proudu, který ohřívá experimentální topný odpor umístěný v transformátoru. Poté lze říci, že teplota tohoto odporu odpovídá oteplení vinutí nad nejvyšší teplotu oleje. [10]

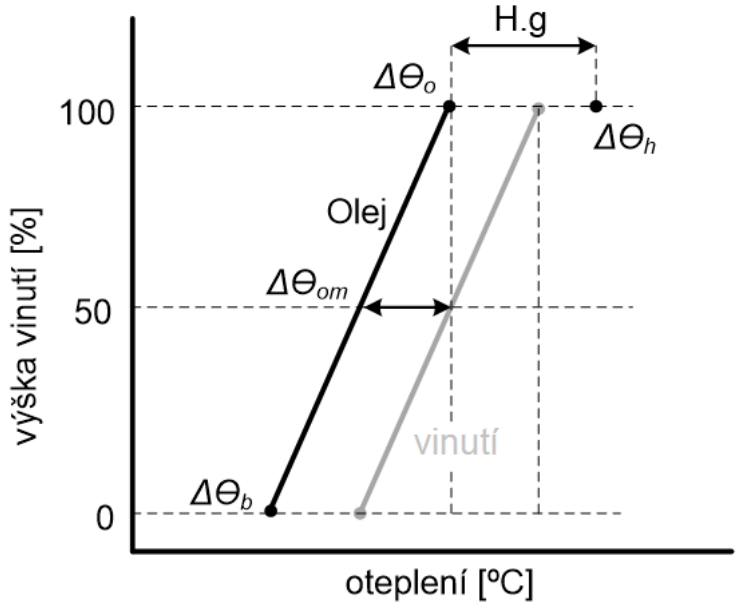
Problematika umístění snímačů na vinutí spočívá ve správném výběru měřené fáze vinutí, popř. možnosti umístění na všechny fáze. Zároveň vzhledem k možnosti šíření přeskoku po optických vláknech a snadnějšího umístění se tato čidla umisťují pomocí tzv. *spacerů,* viz *Obr. 11*. Tyto celulózové nosiče se vkládají co nejblíže do mezer vinutí. [27]



Obr. 11 Umístění senzoru optického vlákna v tzv. spacerů firmy LumaSence - převzato z [27]

Nárůst teploty ve vnitřních vrstvách vinutí je proto nemožné sledovat přímo. Jeho tepelné ovlivnění se promítne až po přechodu z vinutí skrz izolaci a k čidlu. Měření teploty vinutí je důležité vzhledem k závěru, že navýšení teploty od běžné provozní o 6-7 °C může zdvojnásobit rychlost stárnutí. [27]

Snímání rozložení teplot je další způsob predikce změn a zálohování měřících snímačů teploty. Pro toto zjišťování rozložení povrchové teploty nádoby se používají magneticky montované kontaktní senzory, které jsou umístěny na povrchu nádoby. Jde o klasické odporové teploměry, které musí být, vzhledem k dlouhodobému snímaní teploty ve venkovním prostředí, odolné proti vodě. Tyto detektory mají, jak již bylo zmíněno u měření teploty v horní části transformátoru, zabudovaný převodník a jejich výstupní signál je proudový. [10]



$\Delta\theta_b$ [°C]- teplota oleje spodní vrstvy
$\Delta\theta_{om}$ [°C]- teplota oleje střední vrstvy
$\Delta\theta_o$ [°C]- teplota oleje horní vrstvy
$\Delta\theta_h$ [°C]- hot-spot teplota
H.g- hot-spot gradient

Obr. 12 Ukázka velikosti teploty hot-spot oproti ostatním teplotám v transformátoru [28]

Hot- spot teplota je tzv. teplota v nejteplejším místě transformátoru. Ukázku závislosti a důležitosti nalezení této teploty viz *Obr. 12*. Její nalezení a monitorování je využito k posuzování tepelného namáhání a životnosti stroje. Obecně je nejvíce tepelně namáhané okolí kolem vinutí a jeho izolace. Cirkulace oleje u tzv. přirozeně konvenčního proudění

oleje je způsobená přebíráním tepla olejem v blízkosti vinutí a jeho izolace, během čehož se stává olej lehčí a proudí směrem vzhůru. U nucené cirkulace oleje, kde jsou použita olejová čerpadla, se omezuje teplota v prostoru kolem vinutí. Přímé zjištění hot-spot teploty je velice komplikované, jelikož předem nevíme, kde by toto místo mohlo být. Proto by musel být do transformátoru umístěn senzor pro její měření, který by měl dlouhou životnost. Z tohoto důvodu se přechází na výpočetní metodu za využití zjednodušeného modelu rozložení teplot v transformátoru, kde po dosazení vybraných naměřených hodnot teploty, provozních parametrů a několika normou daných konstant lze dojít až k výsledku teploty nejteplejšího místa. Tento výsledek nám dále slouží jako výpovědischopný parametr pro určení omezení zatěžování stroje a pro odhadnutí relativního zestárnutí EIS. Více viz norma ČSN EN 60076-2. [10], [29]

Další monitorování, které přímo ovlivňuje právě předem zmíněné teploty vinutí a oleje, je kontrola stavu chlazení a jeho intenzita. Pro určení stavu chlazení nám slouží především zjišťování teplotního spádu na chladičích a měření cirkulace oleje. Teplotní spád na chladičích se měří kombinací měření teploty oleje v horní i dolní části transformátoru a měření teploty oleje přímo v potrubí chladičů. K tomuto měření se používá, jak již bylo zmíněno výše, odporových čidel teplot. Důležité u tohoto měření je vhodný výběr délky stonku, ponoru čidel a jejich umístění. Čidla se umisťují do míst s vyšší rychlostí proudění oleje, nikoliv do rohů. Dále se umisťují podle průměru potrubí kolmo či šikmo pod úhlem 45° proti směru proudění. Druhé ze sledování, zjišťování cirkulace oleje a jeho průtoku, se měří pomocí tzv. průtokoměrů. Jde o měření stavu správného průtoku oleje u transformátorů s nuceným oběhem pomocí čerpadel. Měřící čidla průtoku pracují na principu dvou na teplotě závislých měřících odporů, kde jeden z nich je opatřen topným tělesem. Tyto odpory jsou umístěny na bocích potrubí naproti sobě. Topné těleso pod napětím ohřívá olej a při sledování teplot pomocí odporů zjišťujeme rozdílné teploty. Tento stav je velice znatelný při nulovém průtoku, avšak při zrychlování průtoku tyto rozdíly narůstají. Tím se zjistí, zda je průtok přítomen či ne. Další z příkladů možné diagnostiky ovlivňující teploty oleje a jeho stav je měření výšky hladiny oleje v dilatační nádobě. Toto měření je prováděno např. pomocí magnetického plováku, jehož výška je sledována čidly (jazýčková relé) na boku nádoby. [10]

2.3.5 Analýza plynů v oleji

Mezi diagnostikování stavu oleje patří zjišťování obsahu rozpuštěných plynů a vlhkosti v oleji. Sledování těchto degradačních faktorů je klíčové a nejčastější pro určení závad a stárnutí izolace.

Plyny v oleji vznikají při rozkladu oleje a pevné izolace z důvodu elektrických a tepelných poruch. Jde převážně o částečné výboje, při jejichž objevení vznikne výboj okolo tisíce stupňů Celsia. V oleji dochází k jejich uhašení, ale právě při tom vznikají tyto nechtěné plyny. Jelikož jsou minerální oleje směsi především uhlovodíkových molekul, dochází při výbojích ke štěpení vazeb C-H a C-C, čímž vznikají plyny jako etylen, acetylen, etan, metan a další. Tyto plyny se poté rozpouští v oleji a ovlivňují vlastnosti oleje. Dále zde během výboje může vznikat tzv. x-vosk. Jde o pevné částečky z uhlovodíkových a uhlíkových polymerů vzniklé zformováním v okolí teplých míst oblouku. U pevných izolací, které se v transformátorech skládají převážně z polymerních řetězců obsahující prstence glukózy, C-O a glykosidické vazby, se setkáváme s tvořením produktů jako je voda, oxid uhličitý a uhelnatý, uhlovodíkové plyny a furanické sloučeniny. Z důvodu vazeb v pevné izolaci sledujeme tyto reakce a rozklady při nižších teplotách, kdy kolem teploty 105 °C nastává štěpení a při teplotě nad 300 °C nastává úplný rozklad a zuhelnatění. [10], [17]

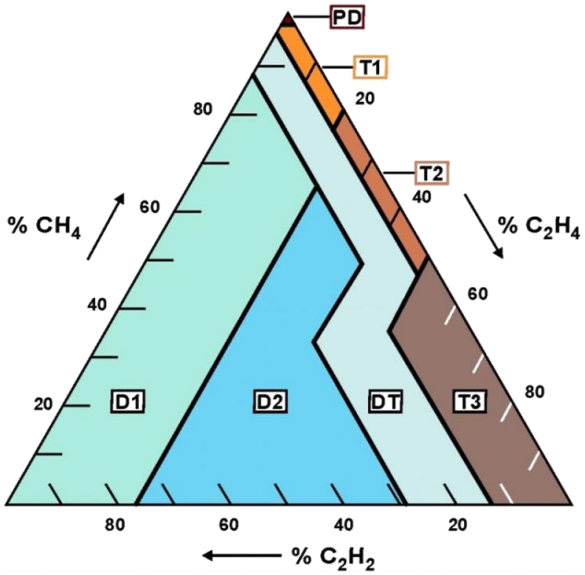
Tab. 2 Rozpoznávání poruch pomocí sledování plynů v oleji [10]

druh plynu	elektrické výboje			lokální přehřátí		
	ele. oblouk	jiskření	část. výboje	< 300 °C	300 °C až 1000 °C	>1000 °C
vodík	•	•	•	×	×	Δ
metan	□	Δ	Δ	Δ	Δ	□
etan	×	×	×	•	×	×
etylen	□	Δ	×	Δ	•	•
acetylen	•	•	Δ	/	×	Δ
propan	×	/	/	□	×	×
propylen	Δ	×	/	×	□	Δ

• - klíčový plyn
□ - charakteristický plyn s velkým podílem
Δ - charakteristický plyn s malým podílem
× - nelze podle něho určit poruchu
/ - nevyskytuje se při dané poruše

Sledováním těchto plynů a nechtěných produktů tepelných a elektrických poruch lze stanovit, o jaký druh poruchy v transformátoru se jedná, viz *Tab. 2*. V zásadě lze říci, že pomocí sledování obsahu plynů lze určit poruchy na vinutí, v magnetickém obvodu, v nádobě, na zařízení pro přepínání odboček, ve spojích i v průchodkách. Omezení je však u náhlých poruch při přepětí, zkratu či mechanického poškození izolace a průrazu. [10] Pokud k jakýmkoli tepelným či elektrickým poruchám dojde, vzniká velké množství plynů, avšak jsou zde hlavní představitelé. Jde o vodík H_2, metan CH_4, acetylen C_2H_2, etylén C_2H_4 a etan C_2H_6. Dále je také vhodné se zaměřit na měření oxidu uhelnatého CO a oxidu uhličitého CO_2, které vznikají při rozkladu celulózové izolace spolu s vodou, jejíž obsah sledujeme měřením vlhkosti, viz další kapitola. [10], [30]

Tab. 2 je interpretací vyvinutých metod, které byly zkonstruovány právě pro zhodnocení výsledků získaných z analyzátorů plynů, které tyto plyny umí měřit. Metod pro vysvětlení jednotlivých plynů a odhalování příčin konkrétních závad a poruch je několik. Jedná se např. o metodu dle normy IEEE C57.104-1991, Dörnenburgovu metodu, Duvalův trojúhelník či Rogersovu poměrovou metodu. Všechny tyto metody pracují s informacemi o typech a koncentracích jednotlivých plynů získaných metodou laboratorní plynové chromatografie DGA. Ukázku Duvalova trojúhelníka, *Obr. 13,* lze poté brát jako možnou interpretaci, nalezení závady při zjištěném zvýšení obsahu některého z rozpuštěných plynů v minerálních olejích. Pro ostatní syntetické oleje je potřeba provést studie a experimenty, aby byla možnost vyjádřit obsah plynů a jejich vývoj v olejích. [31], [32]



Obr. 13 Duvalův trojúhelník [33]

V tomto Duvalovo trojúhelníku (*Obr. 13*) lze vidět určité podobnosti s *Tab. 2*. Nalezneme zde závěry, při detekci plynů C_2H_4, C_2H_2, CH_4, určující chyby jako PD- částečné výboje, T1- teplotní závady pod 300 °C, T2- teplotní závady mezi 300- 700 °C, T3- teplotní závady nad 700 °C, D1- nízkoenergetické výboje (jiskření), D2- vysokoenergetické výboje (oblouk), DT- mix tepelných a elektrických závad. V analýze za použití Duvalova trojúhelníku následně sledujeme procentuální hodnoty všech třech plynů a z jejich hodnot vyvozujeme závěr. Postihnout však výskyt a důvod všech plynů je nemožné, jelikož další z možných zapříčinění vzniku plynů v oleji mohou být reakce rezivění ocele, nenatřených povrchů nebo ochranných nátěrů. Z důvodu malého množství některého z obsažených plynů však nemusí plynout, že stroj je poruchový. Může jít o přirozené provozní oxidační stárnutí oleje. Proto je velice obtížné stanovit určité mezní a počáteční hodnoty kdy se stroj blíží poruše či nikoliv. [10], [25]

Analýza obsahu plynů je možno v praxi provést na základě různých fyzikálních principů. Velké množství těchto analyzátorů je založeno na elektrochemickém principu, kdy je v analyzátoru umístěn tzv. chemický senzor převádějící signál o koncentraci plynů na výstupní elektrickou veličinu. Chemické senzory pracují např. na fyzikálním principu, kdy se měří vybraná fyzikální veličina, jejíž vztah a hodnota je funkcí chemického složení. Výhoda těchto senzorů je, že nezpůsobí kvantitativní ani kvalitativní změny analyzovaného systému. Fyzikální veličiny, které se sledují při těchto analýzách, mohou být hustota, viskozita, tepelná vodivost, index lomu atd. Jde poté o fyzikálně-chemické senzory. Tyto senzory využívají také principu katalytického spalování či jde o tzv. polovodičové senzory oxidového typu. [10]

Elektrochemické senzory lze podle využití pro monitorovací systém rozdělit na ampérometrické a galvanometrické. Ampérometrické jsou založeny na měření proudu procházejícího mezi dvěma elektrodami, které jsou ponořeny do roztoku elektrolytu. Po připojení obvodu na zdroj stejnosměrného napětí je možné měnit hodnotu vstupního napětí, aby odpovídala limitnímu proudu určované plynné složky. Takovéto čidlo se poté může zaměřit na koncentraci určitě složky. Pro jeho správnou činnost a řízení je nutné senzor připojit na jeho vlastní signálovou jednotku a řídící počítač. Používanější jsou senzory galvanometrické, které využívají princip galvanického článku. Na vstupu elektrodového systému je pro oddělení analyzovaného média a propustnost plynů permeabilní membrána, která je vyrobena z teflonu, polypropylenu nebo silikonového

kaučuku. Po prostupu plynů rozpuštěných v oleji skrze membránu jsou odvedeny k senzoru, kde se mísí s kyslíkem za vzniku elektrického signálu, který je úměrný poměru koncentrace plynů. Senzor se skládá ze dvou elektrod: na straně s přístupem rozpuštěných plynů vyrobenou ze zlata a na straně přivedení kyslíku z olova. Právě olověná elektroda určuje životnost senzoru, jelikož se chemickou reakcí spotřebovává. Jejich životnost je proto okolo 1- 3 let. V některých senzorech se přidává třetí elektroda, referenční, která se neúčastní elektrochemický dějů, ale je určena pro stabilizaci potenciálu pracovní elektrody a zpřesňuje měření pomocí linearizace oblasti měření. Elektrochemické senzory různých výrobců se mohou lišit elektrolytem, který bývá většinou vodný, ale i organický, dále tvarem a přístupem plynů k měřicí elektrodě. [32], [34], [35]

2.3.6 Analýza vlhkosti oleje

Vlhkost v oleji následuje a jde pospolu s analýzou obsahu rozpuštěných plyn. Většina z nabízených systémů a čidel pro obě analýzy je výrobci prodávána jako celek (viz kapitola 3). Vliv vlhkosti na izolační systémy se projeví ve zhoršení elektrických vlastností, jako je snížení povrchového odporu a tím pádem zvýšení rizika vzniku průrazu. Z důvodu kontaktu vlhkosti s olejem vznikají produkty jako kyseliny, které napadají pevnou izolaci za vzniku degradačních kyselin a vody. V důsledku vzniku vody vzniká ohrožení vlivem koroze vinutí, nádoby transformátoru a kovových konstrukčních částí. [10]

Voda se do izolačního oleje stroje dostává převážně z ovzduší, nejvíce vzduchem obsaženým v dilatační nádobě. Vznikat může i jako produkt oxidačního stárnutí. Vyskytovat se zde může v několika různých formách a to jako voda volná, rozpuštěná, emulgovaná a reakční. Volná voda se vyskytuje nejvíce na dně transformátoru a dostává se do izolačního oleje díky vlivu hygroskopických vlastností. Množství této vody se mění podle druhu oleje, teploty a stupně zestárnutí a přímo neovlivňuje vlastnosti, ale určitými reakcemi může, v podobě vody rozpuštěné nebo emulgované, přecházet do oleje. Rozpuštěná voda představuje značné riziko a její odstranění se provádí rozstřikem oleje do vakua za nižších teplot. Emulgovaná voda je směs mikroskopických kapek vody a oleje, která může tvořit hydrofilní[3] nebo hydrofobní[4] emulzi. Emulgovaná voda je hlavním

[3] Hydrofilní emulze vznikají s látkami, které se rozpouštějí ve vodě, ale nikoliv v oleji.
[4] Hydrofobní emulze má opačný mechanizmus. Vzniklé látky jsou rozpustné v oleji, ale nikoliv ve vodě.

faktorem zhoršování elektrické pevnosti a její odstranění je obtížné, jelikož je vesměs stálá. Poslední možnou přeměnou vlhkosti je reakční voda. Ta vzniká z chemických reakcí, které probíhají v nejteplejších místech, převážně v okolí vinutí a železného jádra. Její možná přeměna na rozpuštěnou vodu se děje při styku s chladnějšími vrstvami oleje. Největším nepříznivým vlivem emulgované vody je tvorba řetězců v místech s největší intenzitou pole, které lze představit jako vodivé cesty, které zapříčiní přeskok. U oleje se udává, jaké největší množství vody je schopen rozpustit bez možného ohrožení elektroizolačního systému. Pokud se voda v oleji rozpustí, dochází k nepatrnému poklesu elektrické pevnosti, avšak pokud je olej již nasycen a voda se nerozpouští, dojde k prudkému snížení elektrické pevnosti o hodnoty kolem 50 kV/mm. Vlivem teploty lze tak sledovat postupně se měnící poměr emulgované a rozpuštěné vody, který má za následek měnící se hodnotu průrazného napětí. Změny jsou ovlivněny rozdílnými vlastnostmi rozpustnosti vody u kapalných izolantů, kdy s rostoucí teplotou rozpustnost stoupá, ale u pevných izolantů klesá. V rozsahu teplot kolem 60 – 80 °C se průrazné napětí mění v důsledku absorpce vody z oleje do celulózové izolace. To je důvod toho, že 96 až 99 % vody se nachází v papírové izolaci, nikoliv v oleji. [10], [17]

Senzory pro analýzu vlhkosti v oleji jsou velice přesné a obsah vody je snadno měřitelný, ale z důvodu dlouhých časových konstant přesunu vlhkosti mezi papírovou izolací a olejem je interpretace výsledků složitá. Analyzátory vlhkosti pracují na principu tenkého polymerního filmu a kapacitního senzoru. Dielektrické vlastnosti tohoto filmu poté závisí na obsahu vlhkosti. Při změně relativní vlhkosti se změní i dielektrické vlastnosti filmu a tím kapacita senzoru. Tím můžeme určit při měření kapacity senzoru hodnotu vlhkosti. I přestože je množství absorbované vody malé, díky její velké dielektrické konstantě jsou změny vlhkosti měřitelné. Senzory se vyrábějí s integrovaným zpracováním signálu, kdy je možný výstup ve formě elektrického napětí, oproti výstupu původní veličiny kapacitě. Dostupné jsou i senzory s digitálním rozhraním. [10], [17], [36]

Obsah této problematiky však nelze představit v tak omezeném prostředí diplomové práce a nejsou zde obsaženy další možnosti online monitoringu. Vybrané řešení odráží také můj osobní výběr sledovaného EIS (papír-olej). Další z možností monitorování jsou např.:

- měření částečných výbojů (např. akusticky)
- měření teploty oleje v přepínači odboček
- stav řídící jednotky

- hladina oleje v konzervátoru
- akustický hluk
- měření kapacit průchodek. [10], [18]

2.4 Porovnání online a offline měření

V kapitole 2.2 byly popsány metody měření vybraných faktorů pomocí offline diagnostiky. Diagnostika těchto veličin se v některých případech liší oproti použití pro monitorovací systém online a po předchozím představení jednotlivých způsobů provedu porovnání právě těchto dvou možností diagnostik. Tyto metody se navzájem doplňují. Měření stroje mimo provoz předchází monitorování během provozu. Díky těmto výsledkům jsou zpracovány a vybrány metody a degradační faktory monitorovaného transformátoru. Jde o stručný výběr a představení několika veličin, které se v této diplomové práce objevily.

Tab. 3 Porovnání metod měření online a offline

měření	online	offline
proudů a napětí	pomocí měřících proudových a napěťových transformátorů umístěných na průchodkách	-
izolačního odporu	-	měření jednotlivých odporů vinutí podle potřebného zapojení
činného odporu	-	měření jednotlivých odporů mezi svorkami a přepočet vhodným vztahem
teplota vinutí	za použití optovláknových snímačů	na základě měření odporu vinutí je stanovená teplota výpočtem
hot-spot	měřením teplot vinutí, v horní, střední a dolní části transformátoru a vhodným výpočtem	provedením oteplovacích zkoušek a vytvořením vhodného modelu

teplot chlazení	měřením termočlánky a hodnocením dlouhodobých změn během provozu	měřením termočlánky
obsah rozpuštěných plynů	analýza olejových vzorků během provozu za použití DGA	analýza vzorků použitého oleje v laboratoři za použití DGA
obsah vlhkosti	analýza olejových vzorků během provozu za použití vhodného senzoru	analýza olejových a celulózových izolačních materiálů použitých v transformátoru
ztrátového činitele oleje	automatickým odebráním vzorků během provozu a změřením pomocí vhodného analyzátoru	odebráním a zkoumáním vzorků použitého oleje v laboratoři či pojízdném testovacím zařízení

3 Návrh online diagnostického systému

V této kapitole budou nejprve představeny vybrané možnosti měření teplot a poté senzory a systémy pro analýzu oleje, které jsou vzhledem k degradačním faktorům, které byly zvoleny ke sledování, těmi nejběžnějšími ukazateli transformátoru. V tomto případě budou prezentovány systémy a senzory pro měření stavů vzhledem ke stárnutí izolace vinutí a izolační kapaliny. Půjde o analýzu rozpuštěných plynů a vlhkosti v oleji. Představeny budou systémy, které jsou dohledatelné a některými předními odborníky na monitorovací systémy představovány v elektrických informačních zdrojích a na konferencích. Tyto systémy vychází z teoretických principů představených v předchozí kapitole. Na závěr této kapitoly bude představen způsob jednoduchého návrhu systému s výstupem na ethernet a s vyhodnocováním v počítači.

3.1 Čidla pro měření teplot v transformátorech

Po teoretickém úvodu optovláknových senzorů v kapitole 2.3.4 budou představeny možnosti nabízených systémů pro měření teplot vinutí a dalších částí transformátoru. Optovláknové senzory pro měření teploty vinutí nabízí např. firma LumaSence- systém kompletního řešení s názvem LumaSMART a LumaSHIELD viz *Obr. 14*.

Obr. 14 Systémy pro optovláknové měření teploty LumaSMART a LumaSHIELD - převzato z [37], [38]

Jedná se o systémy umožňující připojení čidel až do 16 oddělených kanálů, pracující s teplotním rozsahem od -40 do 230 °C na frekvenci 50Hz. Samotný přístroj musí být chráněn před přírodními vlivy, dokáže ale pracovat až do 70 °C okolní teploty. Verze LumaSMART obsahuje i 2Gb paměti pro zálohy, které jsou automaticky prováděny

každou minutu (výrobce uvádí, že to vystačí na 40 let měření). LumaSMART je nabízen i s dotykovým ovládacím displejem. Oba systémy pracují buď s výstupem analogovým (4-20 mA nebo 0-1 mA), nebo se sériovým (RS-232C, RS-485, Ethernet, USB). Firma LumaSence má patent na své optovláknové senzory Fluoroptic® pracující na principu měření změny krystalu arsenidu gallitého *GaAs* v energetické mezeře v závislosti na teplotě. Pro tyto systémy je možné vybrat optovláknová čidla přímo od firmy s označením OTG-T a OTG-TC2. Ta jsou chráněna teflonem a kevlarem proti poškození [37], [38], [39], [40], [41]. Další ze systému nabízející tato firma je LUXTRON verze m600 OEM také s Fluoroptic® systémem snímače. Systém je to o poznání menší a jednodušší. Nabízí verzi s 1 - 4 pracovními kanály pracujícím na frekvenci 4Hz. Rozsah měřených teplot se může pohybovat od -100 do 330 °C při přesnosti 0,5 °C na každých ±50 °C. Připojit lze k němu stejná optovláknová čidla jako k předchozím. [42]

Další možné využití mají např. samostatná optovláknová čidla jako je TPT- 32 bez zavedeného systému pro zpracování. Tento senzor testovali např. na Západočeské univerzitě v Plzni se spojením s jednotkou zpracování Nortech TT. Další zkoumanou možností na této univerzitě byl experiment měření teplot vinutí pomocí optovláknového snímače umístěného přímo na vinutí s názvem NEOPTIX T2. Signály z tohoto snímače byly vyvedeny pomocí průchodek do řídící jednotky a vyhodnocovacího systému NEOPTIX T/ Guard pro jejich další zpracování a grafické znázornění. [17], [25]

Dále je potřeba zmínit i jednoduší senzory, jako jsou odporové teploměry pro měření teplot oleje v určitých vrstvách a místech, viz kapitola 2.3.4. Jejich ukázku lze vidět na *Obr. 15*. Tyto teploměry se umisťují do míst, kde není potřeba zavádět složité systémy, jako jsou oprovláknové senzory. Umisťují se do míst pro měření teplot oleje v důležitých vrstvách izolační kapaliny, včetně vstupního a výstupního potrubí do oběhu chlazení. [10]

Teploměry na *Obr. 15* jsou od české firmy JUMO a lze je nalézt v různém provedení velikostí a délek. Rozsahy teplot jsou variabilní od -50 °C do 400 °C. Jejich výstupem je proudový signál 4-20 mA. Díky vestavěným analogovým (programovatelným) převodníkům je možné propojit tyto senzory s jakýmkoliv systémem. Velká většina těchto senzorů jsou typu PT100. Dalšími výrobci nabízejícími odporové teploměry jsou např. německá firma Günther nebo Siemens. [43], [44], [45]

Obr. 15 Ukázka tyčových odporových teploměrů- převzato z [43]

3.2 Systémy pro analýzu plynů a vlhkosti v oleji

Systémy a čidla pro měření obsahu plynů a vlhkosti lze najít od několika výrobců. Umístění těchto čidel je nejčastěji na výstupním potrubí z chladících žeber. Pokud je předem známo, jaké z čidel se umístí na transformátoru, je namístě již na potrubí chladícího oběhu umístit příhodný ventil. Avšak trendy a potřeba tato čidla měnit a udržovat dovedla umístění čidel např. i na výpustný ventil nádoby. Někteří z výrobců také uvádí, aby byl počet čidel navýšen např. na dva až čtyři kusy, které by byly umístěny v rozích nádoby, kde mají lepší přístup k měření jak ve spodní tak v horní části stroje [46]. Vše se odvíjí od samotné konstrukce čidla a dalších vlivů.

Jedním z výrobců je kanadská firma GE Energy Services-Syprotec. Jejich čidla s inteligentním systémem jsou nazvána Hydran a mají vícero různých provedení (verze 201R model i, M2, S2 atd.). Tyto senzory patří mezi analyzátory rozpuštěných plynů, ale zároveň dokážou detekovat i obsah vody v oleji. Patří pro své zaměření spíše na měření obsahu vodíku mezi tzv. *single-gas* senzory. Plyny, které dokáže senzor detekovat, s odlišnou citlivostí jsou: vodík H_2 – 100 %, oxid uhelnatý CO – 15 %, acetylén C_2H_2 – 8 %, etylén C_2H_4 – 1,5 %). Senzor měří tzv. kumulativní obsahu plynů v ppm[5] a pracuje na principu palivového článku s membránou. Elektrický výstupní signál o hodnotách 4-20 mA je přímou úměrou obsahu plynů o koncentraci 0 – 2000 ppm, což je i rozsah samotného čidla. Obsah vody v oleji je měřen kapacitním senzorem. Tento systém je opatřen i alarmem, který reaguje a upozorňuje na velké výkyvy vlhkosti a obsahu plynů a zároveň

[5] ppm z anglického parts per milion, jde o jednu miliontinu z celku.

kontroluje funkčnost samotného senzoru. Rozsah operativních teplot je od -40 do 55 °C, čímž je umožněn venkovní provoz bez potřebného krytí. Možné výstupy jsou, jak již bylo zmíněno, analogové (4-20 mA, 10 V), ale také pomocí analogového modemu V92/56K, GSM/GPRS, ethernetu, nebo optickými vlákny. [31], [47], [48]

Obr. 16 Ukázka čidel Hydran 201R model i a M2- převzato z [47]

Obr. 17 Analyzátor plynů a vlhkosti Calisto typ 2- převzato z [49]

Další z možných analyzátorů rozpuštěných plynů a obsahu vody je Calisto od kanadské firmy Morgan Schaffer (*Obr. 17*). Po základním systému Calisto následují i pokročilejší typy 2, 5 a 9. Tato čidla jsou zaměřena převážně na měření vodíku H_2 a obsahu vody v oleji. Ovšem vyšší typy měří i ostatní specifické plyny (až 10 plynů) plus např. kyslík, dusík a propylen C_3H_6. Senzor všech typů pracuje na principu měření dutými teflonovými vlákny, které měří tepelnou vodivost a převádí ji na elektrický signál úměrný koncentraci plynů. Než je olej přiveden k senzoru, uvede se jeho teplota ochlazením nebo ohřevem na definovanou úroveň. K tomu slouží teplotní výměník a zamezí se tím

ovlivnění výsledku právě teplotou oleje. Pro systémy 5 a 9 je potřeba mít připojené nádoby s 99,999% heliem o tlaku alespoň 3600 psi. Systémy Calisto lze propojit přes klasická rozhraní jako u předchozích čidel a pro grafické znázornění výsledků a případných chyb používá software Calisto Manager. [17], [31], [49], [50], [51]

Hydrocal od švýcarské firmy MTE je další zástupce s možností monitorování jak rozpuštěných plynů, tak obsahu vlhkosti v oleji. Základní plyny sleduje pomocí čidla na principu palivového článku, ale oproti předchozím systémům měří novější typy s velkou přesností i plyny CO, C_2H_2 a C_2H_4. Využívá k tomu infračerveného senzoru a pro detekci H_2 mikroelektrického senzoru. Nejnovější typ dokáže měřit 7 rozpuštěných plynů včetně metanu, etanu a oxidu uhličitého. Obsah vlhkosti se měří polyamidovým kapacitním senzorem. Spolu s programem od MTE, Hydrocal Genx nebo Hydrosoft je možné zobrazení a zpracování výsledků sledovat online na tabletu obsluhou stojící např. přímo u transformátoru. Zároveň je tak možné nastavit limity a upozornění pro obsluhu. [17], [52], [53]

Obr. 18 Systémy Hydrocal verze 1001 a 1009- převzato z [52], [53]

Serveron® typu TM1, TM3 a nejvyšší třídy TM8 jsou také analyzátory plynů a vlhkosti v transformátorech od firmy Qualitrol. Nejvyšší typ TM8 dokáže analyzovat 8 rozpuštěných plynů, oproti tomu verze TM1 se zaměřuje pouze na měření obsahu vodíku v oleji. Všechny typy mají zabudovaná čidla, kterými jsou schopny měřit teplotu oleje a okolí transformátoru. Tím dokáží ušetřit některé další instalace čidel od jiných výrobců. Analýza vzorků je prováděna v základu po 4 hodinách, ale toto nastavení jde změnit v jakémkoliv intervalu od 2 do 12 hodin. Princip je založen na plynové chromatografii

(potřeba kalibračního plynu). Pro transport plynů je nutné mít připojenou láhev inertního plynu helia. Kalibrační plyn se pro správnou funkčnost mění jednou za 3 roky a helium po 4 letech, při použití vzorkovacího intervalu 4 hodin. Po sepnutí alarmu při zvýšeném obsahu některého z plynů se analyzátor automaticky přepne do měřicího intervalu 1 hodiny. Na *Obr. 19* je možné vidět ukázku těchto systémů, kromě typu TM1 nedisponují zobrazovacím zařízením. K analyzátorům je proto vytvořen analytický nástroj TM View™, ve kterém je po připojení (USB, ethernet, modem) možné sledovat trendy vývoje plynů, zobrazení obsahu plynů na Duvalovo trojúhelníku a mimo jiné, jsou zálohovány data až 2 let starých analýz. [17], [54], [55]

Obr. 19 Ukázka analyzátorů Serveron TM1 a TM8- převzato z [54], [55]

Transfix, Taptrans, Multitrans, Minitrans a DGA 900 jsou systémy patřící do tzv. *multi-gas* analyzátorů od firmy Kelman, která spadá pod GE Energy Services (*Obr. 20*). Kromě typu Minitrans se všechny tyto systémy pyšní analýzou koncentrace až devíti plynů a vlhkosti (vodík, metan, etan, etylen, acetylen, oxid uhelnatý, oxid uhličitý, dusík a kyslík). Snímání vzorků je v hodinovém intervalu. Tyto systémy patří do typu tzv. skříňových analyzátorů, a proto stojí vedle transformátoru na podstavě. Na podstavě stojí také vzhledem k tomu, že přívodní potrubí je přivedeno do skříně systému zespodu a také pro lepší chlazení. Multitrans může snímat až tři nezávislé olejové systémy, např. tři jednofázové transformátory. Tyto analyzátory odebírají vzorek, po zpracování výsledků vrací zpět do systému a pro zobrazení a práci s daty používají program Perception. [47], [56]

Obr. 20 Ukázka systému Transfix, DGA 900 a Minitrans od firmy Kelman - převzato z [47]

Jako doplnění a záloha může být namontován analyzátor také od firmy GE Energy Services, který slouží pouze pro měření obsahu vody v oleji, a to Aquaoil 400. Tento analyzátor je určen primárně pro offline měření, ale lze jej použít i pro monitoring relativní vlhkosti oleje online. Výstupem z něj je údaj o vlhkosti (±2 % přesnost při 25 °C) a teplotě a to jak v analogové, tak digitální podobě. Senzor se montuje na stávající ventil transformátoru. [17]

LumaSence Technologies kromě systémů měření teploty optovláknovými senzory nabízí i online DGA analyzátor s názvem SmartDGA® . Jedná se o analyzátor pro měření devíti nejběžnějších plynů, které již byly zmíněny výše u analyzátorů od firmy Kelman. Senzor pro zjištění těchto plynů pracuje na principu infračervené technologie NDIR a zvládá měřit i vlhkost v oleji. Jeho nevýhodou oproti některým výše zmíněným analyzátorům může být nemožnost prohlížení výsledku analýz přímo v systémové skříni, vzhledem k nepřítomnosti segmentového displeje, viz *Obr. 21*. Přímo na senzoru se mění jen barvy podle stavu či potřeby kontroly. Zelená značí normální stav, žlutá upozornění, modrá varování a červená alarm. Z tohoto důvodu, že nám senzor předává jen primární informace, je nutné k tomuto systému doplnění příslušenství, jako je např. EZHub™, které propojí senzor s možnými výstupy (analogovými, digitálními) včetně ethernetu a USB. Umožní tak i připojení dalšího příslušenství či počítače pro vyhodnocování výsledků a využívající potřebného softwaru. Zároveň EZHub™ dokáže propojit až 6 nezávislých zařízení přes klasický ethernet switch. Dále má firma LumaSence Technologies v nabídce tzv. iCore™, které umožňuje kompletní konektivitu jako předchozí EZHub™, navíc má dotykový displej s vlastním softwarem pro zobrazení

výsledků a nastavení. Toto navýšení počtu potřebných doplňků může nepříznivě ovlivnit finální cenu celku. [46], [57]

Obr. 21 Online DGA analyzátor SmartDGA® a příslušenství EZHub™ a iCore™ - převzato z [46],[57]

Na závěr jeden nekomerční příklad, kdy na Monashově univerzitě přišli po měření vlhkosti v oleji k založení algoritmu pro měření obsahu vody v izolaci. Vytvořili proto software TMM (Transformer Moisture Monitor), který je v kombinaci se snímačem Vasala HMP228 (obsahující čidla vlhkosti a teploty) v testování a jeho výsledky jsou velice slibné. [36]

3.3 Jednoduchý monitorovací systém

Mnou navržený jednoduchý online monitorovací systém, jak jsem již zmínil v úvodu kapitoly, se bude zaměřovat na zjišťování životnosti a možných závad sledováním degradačních faktorů oleje a izolace vinutí. Půjde o monitorování důležitých teplot a sledování stavu oleje a to především obsahu plynů a vlhkosti. Tento systém bude mít výstup na ethernet a bude možné výsledky sledovat na počítači.

Nejprve představení teoretických požadavků na tento systém. Tyto požadavky, podle kterých se řídí výběr vhodného systému, by mohly být:

- přesnost - měření teplot s chybou ±1 °C, obsah plynů do ± 2 % u hlavních představitelů
- neovlivnitelnost a nerušený provoz - neovlivnitelnost vnějšími i vnitřními vlivy a nerušený provoz bez omezení a případného selhání systému
- snadná či žádná kalibrace

- provozuschopnost bez zásahu či výměny některých částí - omezení potřebných zásahů a výměn, např. senzorů či pomocných plynů (láhve helia)
- vhodné vstupy a výstupy - umožněné připojení klasických vstupů a výstupů (RS 232, RS 485, analogový proudový vstup 4-20 mA, ethernet, modem, USB atd.)
- propojení - propojitelnost zvolených a záložních systémů
- zálohovatelnost výsledků - pevná media, USB, cloud

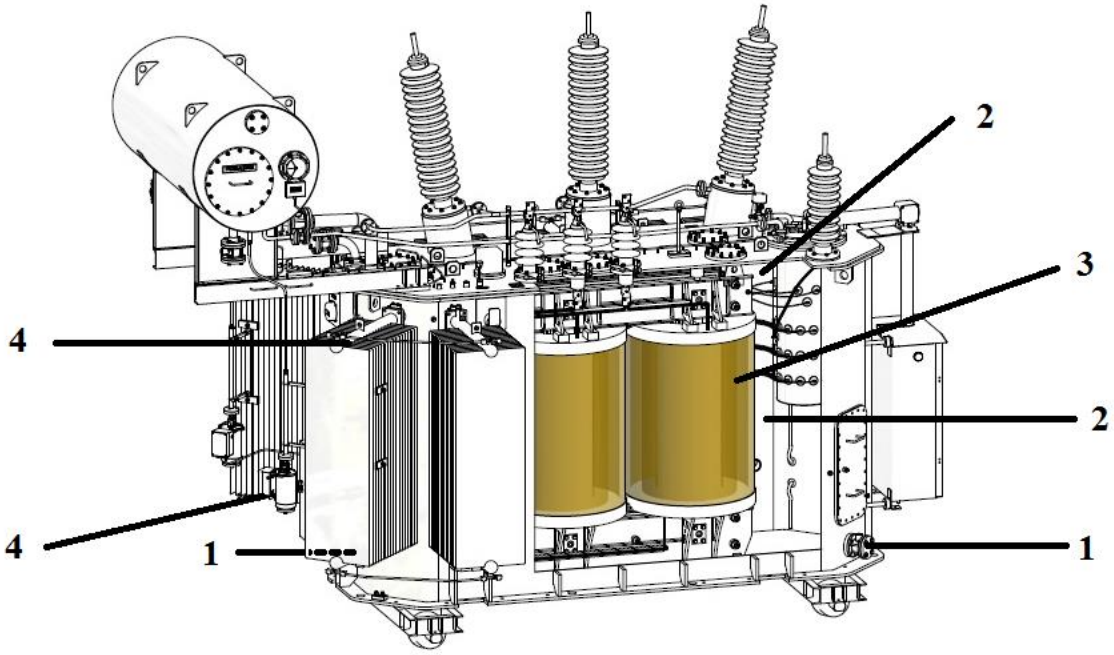
Vzhledem k zvolenému EIS, bude potřeba vybrat vhodné propojitelné měřící systémy pro měření:

- teploty všech vrstev oleje
- teploty vinutí
- teploty v chladícím oběhu
- analýzy plynů a
- analýzy vlhkosti.

Možné vylepšení by mohl být online monitoring ztrátového činitele oleje, u kterého po experimentu, viz další kapitola, bylo dokázáno, že významně závisí na zvyšující se teplotě a je ovlivněn stárnutím. Popřípadě monitoring elektrické pevnosti oleje. Oba tyto systémy by mohly pracovat na podobném principu jako DGA, kdy by byl automaticky odebrán vzorek oleje, který by byl vhodně otestován a vrácen zpět do nádoby. Grafické zhodnocení by bylo možné sledovat ve vhodném programu obsluhou. Příhodné by bylo umístit i měření vibrací, které mechanicky ovlivňují spoje a izolaci vinutí, vedoucí k částečným výbojům, defektům izolace a k nenávratnému poškození transformátoru. Další možnosti se otevírají pro systémy, na jejichž nepřetržitý provoz je kladen velký důraz a kde není potřeba se finančně omezovat. Např. by mohl být nainstalován online monitoring dalších důležitých veličin určujících stav oleje (viskozita, barva, atd.), nebo zkušební monitoring stavu vedení, senzorů a optických vláken pro měření teploty vinutí. Vylepšením by mohlo být i snímání teplot termální kamerou[6] v určitém intervalu, které by snímalo rozklad teplot nádoby a mohli bychom zjistit možný nechtěný nárůst teploty oleje. Všechna tato měření lze provést automatizovaným systémem a jejich výsledky mohou být graficky zobrazeny v pro ně zvlášť naprogramovaném softwaru.

[6] Kompletní řešení snímaní teplot termální kamerou nabízí např. firma LumaSence.

Návrh umístění senzorů lze vidět na *Obr. 22*. Pro ukázku byl zvolen transformátor s nuceným oběhem oleje chladícími radiátory po stranách nádoby. Číslem 1 jsou označeny výpustné olejové ventily. Jeden by sloužil k umístění systémů pro měření vlhkosti a analýzy rozpuštěných plynů. Druhý ventil umístěný úhlopříčně by sloužil pro umístění záložního/duplexního analyzátoru se stejným využitím nebo popřípadě k navrhovanému zkoušení ztrátového činitele a elektrické pevnosti oleje. Číslem 2 jsou označena místa umístění čidel pro měření teploty horní a střední vrstvy oleje a osazení optovláknových snímačů teploty vinutí je označeno číslem 3. Číslem 4 jsou označena přívodní potrubí chladicích radiátorů, do kterých by byly umístěny teploměry pro snímání vstupní a výstupní teploty oleje v chladícím oběhu.

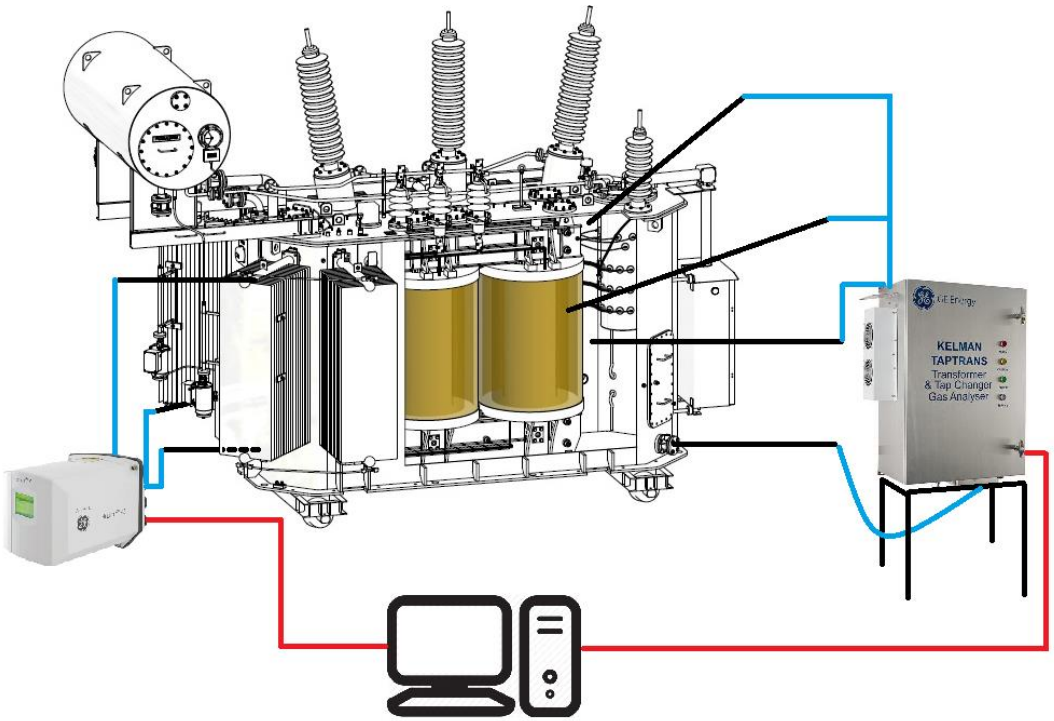


Obr. 22 Návrh umístění čidel online diagnostického systému [58]

Jako návrh bych vzhledem k provázanosti volil výběr[7] analyzátorů od firmy GE Energy Services. Jelikož nabízejí kompletní systémy pro měření provozních teplot a zároveň analýz oleje v transformátoru, jejich propojení nebude způsobovat specifické technické požadavky. Pravděpodobná možnost rozmístění je zobrazena na *Obr. 23*. Budou zde propojeny senzory Hydran M2 spolu s Kelman Taptrans, který zde bude využit i pro připojení teplotních senzorů přes analogové proudové vstupy 4-20 mA a nabízí se zde

[7] Firma Kelman nabízí i online analyzátory průchodek, částečných výbojů a měření zatížení transformátorů.

možnost měření teplot vinutí pomocí optických vláken. Použití vláken není omezeno a jejich umístění bude provedeno na všech fázích stroje za použití držáků umístění, viz kapitola 2.3.4. U Kelman Taptrans budou využity tři analogové vstupy, a to pro měření teplot v dolní, střední a horní části nádoby. Přivedení vzorku oleje je pomocí potrubí připojeného ze spodu zařízení. U Hydran M2 bude využito vstupů pro měření teplot v dolní a horní části chladícího oběhu. Využito zde bude odporových teploměrů od firmy JUMO, opatřených analogovými převodníky, aby je bylo možné propojit. Zároveň měří tento senzor i teplotu okolí, která je mnohdy důležitá pro výpočty dokonalosti chlazení. Hydran M2 bude umístěn na jednom z ventilů a propojení spolu s Taptrans, umístěného mimo transformátor na podstavě, bude provedeno přes sériovou linku RS 232. Sám výrobce doporučuje propojovat své výrobky pro utvoření sítě právě přes tuto linku. Pro měření teploty v dolní části nádoby (úhlopříčně od předchozí) nám zároveň bude sloužit také Hydran M2. Při případných závadách (navýšení teplot nebo obsahu plynů a vlhkosti) bude systém neprodleně informovat obsluhu sepnutím světelného alarmu. Podle kritičnosti od tzv. risk indexu 1 (nejmenší) po risk index 5 (největší ohrožení) a zároveň zasláním SMS přes umístěný GSM modul. Intervaly analýzy plynů a vlhkosti je možné nastavit od hodiny až po 4 týdny. Pro zálohování dat a komunikaci přímo ze senzorů slouží dvě oddělená USB připojení. Propojení mezi Taptrans a počítačem obsluhy bude provedeno přes ethernetové propojení RJ45. [48], [59], [60], [61]



Obr. 23 Umístění a připojení senzorů Hydran M2 a Kelman Taptrans [47], [58], [62]

Program pro hodnocení výsledků všech systému od firmy GE Energy Services je nazvaný Perception. Připojit lze více zařízení a je utvořena i web aplikace pro sledování výsledků mimo stolní počítač. Ukázku pracovního prostředí je možné vidět na *Obr. 24*. Všechna tato data nám poslouží pro vyhodnocení umístění hot-spot teploty a bude možné si zobrazit i výsledky jako jsou: možná vlhkost v papírové izolaci, stárnutí izolace, kvalita chlazení atd. včetně předem určených potřebných teplot ze všech senzorů, teploty vinutí a obsahu plynů a vlhkosti. Všechny uvedené systémy pracují s vlastními přeprogramovanými modely stárnutí. [48], [59], [60], [61]

Obr. 24 Uživatelské prostředí softwaru Perception- převzato z [63]

Závěrem stručné zhodnocení systému vycházející z úvodních požadavků. Systém lze považovat za přesný vzhledem k měření teploty vinutí optickými vlákny s přesností ±0,8 °C. Chyba odporových teploměrů se pohybuje kolem 1 °C [37], [43]. Citlivost měření jednotlivých plynů je v *Tab. 4.* Nerušený provoz je zaručen bezpočtem splněných norem EMC. Kalibrace senzorů podle uvedených informací od výrobce není potřebná a provozuschopnost by měla být vyšší než měřeného transformátoru. Ostatní body zmíněné již v samotném návrhu, vstupy a výstupy jsou vhodné pro umístění dalších senzorů. Propojení lze uskutečnit několika způsoby, které byly již zmíněny. Zálohy naměřených dat

si dělají samotné senzory a také software. Možnost je i připojení USB zařízení. Tím pádem lze brát tyto požadavky za splněné a další vývoj a úpravy tohoto návrhu by se odvíjely v kontaktování výrobce a diskuzi o reálné propojitelnosti. Zvýšení přesnosti a zálohovatelnosti zařízení by šlo také dosáhnout připojením jednoho ze systémů zaměřujícího se převážně na měření teplot, jako např. od firmy LumaSence LumaSMART nebo LumaSHIELD. Tato zařízení, pracující až s 16 měřícími kanály, by mohla sloužit jako zálohy měření všech teplot, které měří již navržený systém. Avšak problém by nastal v propojení těchto dvou systémů a v řešení zobrazení výsledků ve vhodném softwaru. Vyvstává zde možnost zakoupení komplexního softwarového řešení od subdodavatele, či vytvoření vlastního univerzálního softwaru pracujícího s výstupy z těchto všech senzorů. [48], [59], [60], [61]

Tab. 4 Rozsahy a citlivost senzorů na jednotlivé plyny a vlhkost[59], [60]

systém:	Taptrans		Hydran M2	
zjišťovaný prvek	rozsah	citlivost	rozsah	citlivost
vodík	5-5000 ppm	±5%	25-2000 ppm	100%
oxid uhelnatý	2-50000 ppm	±5%	25-2000 ppm	15±4%
oxid uhličitý	20-50000 ppm	±5%	-	-
metan	2-50000 ppm	±5%	-	-
etan	2-50000 ppm	±5%	-	-
acetylen	0,5-50000 ppm	±5%	25-2000 ppm	8±2%
etylen	2-50000 ppm	±5%	25-2000 ppm	1,5±0,5%
kyslík	100-50000 ppm	±10%	-	-
voda (vlhkost)	0-100 %	±3%	0- 100%	±2%

4 Experimenty

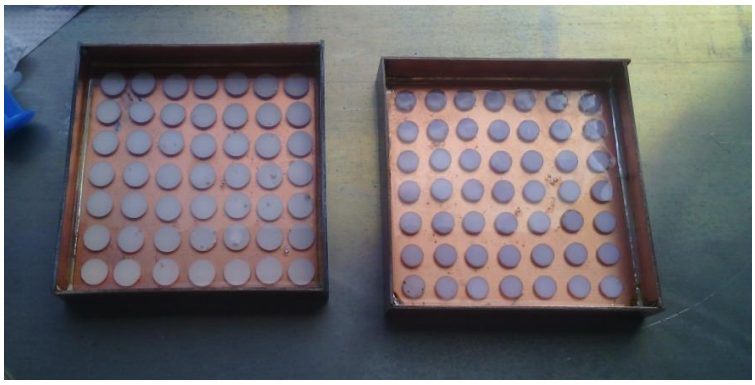
Pro tuto práci byly provedeny dva experimenty. Jeden pro ukázku jak ovlivňuje teplota ztrátový činitel *tan δ* a permitivitu ε_r, druhý byl experiment stárnutí řepkového oleje. U obou měření jsem byl součástí týmu a ukáži zde stručně postupy a závěry vyplývající z těchto experimentů.

4.1 Měření ztrátového činitele a permitivity

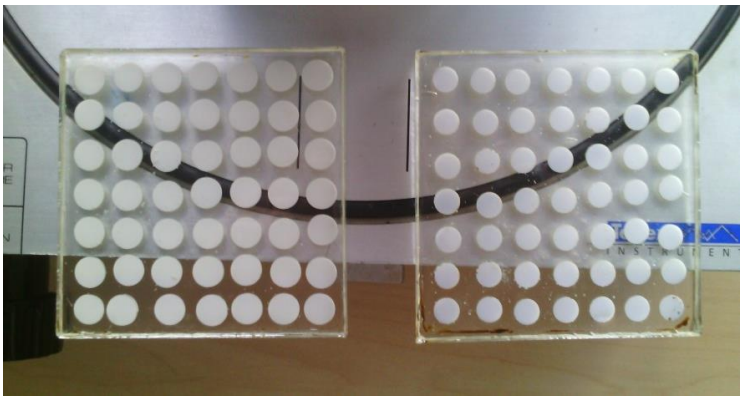
Měření bylo provedeno pro katedru teoretické elektrotechniky, díky kterému by bylo možné provést porovnávací výpočet ε_r a *tan δ*. Jako závěr výsledku tohoto testu by mělo být možnost vypočíst předběžné hodnoty těchto dvou veličin kompozitu před zhotovení prvotních testovacích vzorků. Proto bylo nutné dodržet a zapisovat přesné hodnoty a vzdálenosti všech částí vzorků. Při vycházení z teoretických předpokladů chování ztrátového činitele jako určujícího parametru stárnutí by závěr pro tuto práci mělo být ukázat, zda se ztrátový činitel a permitivita mění v závislosti s teplotou a bylo by možné je použít pro online monitorovací systém.

- **Příprava vzorků**

Vzorky byly vyhotoveny z pryskyřice, která se tolik využívá ve všech oblastech elektrotechniky jako izolační prvek. V uspořádaném pořádku a tvaru byly vkládané části teflonu a silonu. Ukázku zhotovení a výsledných vzorků lze vidět na *Obr. 25* a *Obr. 26.*



Obr. 25 Ukázka přípravy vzorků s vsázkou



Obr. 26 Ukázka hotových a vytvrzených vzorků s vsázkou

Silon, alkalický polyamid PA6, je univerzální materiál a pro jeho nízkou cenu i často používaný v elektrotechnice. Jeho teplota tání je přibližně 218 °C, elektrická pevnost kolem 25 kV/mm a očekávaný ztrátový činitel kolem 0,015. Teflon, obchodní označení pro polytetrafluoretylen PTFE, je proti tomu dražší materiál s výrazně lepšími elektrickými vlastnostmi. Teplotu tání má kolem 345 °C, elektrickou pevnost větší než 20 kV/mm a ztrátový činitel by měl být kolem 0,00015. [64], [65], [66]

Vytvořené vzorky byly následující:

A- pryskyřice

B- teflon

C- silon o tloušťce 1,017

D1- pryskyřice s vsázkou B vytvrzené

D2- pryskyřice s vsázkou B nevytvrzené

E1- pryskyřice s vsázkou C vytvrzené

E2- pryskyřice s vsázkou C vytvrzen.

Bylo vyrobeno 6 experimentálních vzorků samotné pryskyřice. Vzorek byl čtvercového tvaru a připraven byl odlitím pryskyřice do připravené formy, vytvarované z poměděných desek (cuprextitu). Na odstranění vzniklých vzduchových bublin byla použita vakuová komora, které po aplikování vakua a následném ustálení dokázala z 98 % zbavit vzorek vzduchových bublinek. Tyto prvotní vzorky byly vytvrzeny při teplotě prostředí laboratoře. Postup výroby vzorků D1, D2, E1 a E2 byl podobný. Na předešlé vyrobené desky se

vkládaly kruhové vsádky teflonu a silonu a následně se znovu zalily vrstvou pryskyřice. Pro zhodnocení vlivu vytvrzování byl vždy jeden finální vzorek vytvrzen v peci, druhý při normální pokojové teplotě. Vytvrzování v peci probíhalo při teplotě kolem 50 °C po dobu 5 hodin. Rozměry všech vzorků jsou v *Tab. 5* a *Tab. 6.*

Tab. 5 Tloušťky vzorků

materiál	tloušťka [mm]
teflon	1,0256
silon	1,0168
pryskyřice	1,913; 1,8972; 1,797
pryskyřice+ teflon	3,2833
pryskyřice+ silon	3,8345

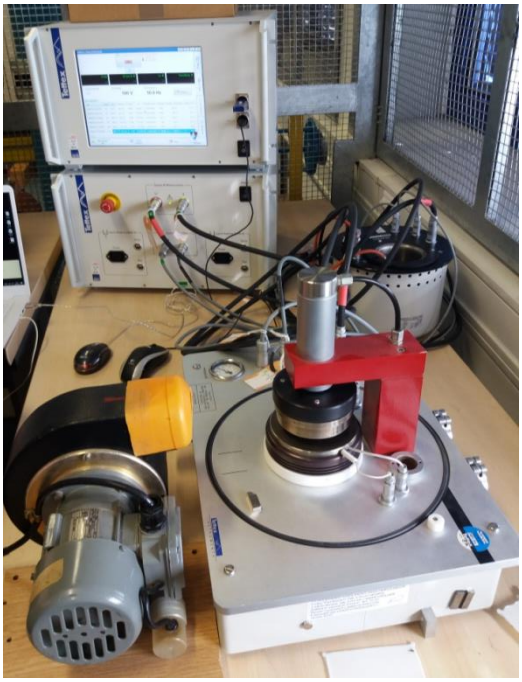
Tab. 6 Rozměry vsádek

materiál	tloušťka [mm]	průměr vsázky [mm]
teflon	1,0256	8,1
silon	1,0168	9,5

- **Měřicí přístroj a postup měření**

Veškeré měření proběhlo na měřící soustavě Tettex. Ukázku zapojení můžeme vidět na *Obr. 27.* Přístroj měří ztrátový činitel, relativní permitivitu, kapacitu a rezistivitu pevných i kapalných izolačních materiálů na principu Sheringova můstku.

Po vložení vzorku mezi dvě kruhové sondy, byl tento vzorek uchycen přesně danou přítlačnou silou a to 2,5 Pa, sledovanou na umístěném tlakoměru. Vzorky byly povětšinou měřeny při napětí 500, 750 a 1000V při vzrůstající teplotě od počáteční do 40 °C, viz výsledky měření. Měření bylo provedeno při neměnné síťové frekvenci. Všechna zaznamenaná data byla přenesena na USB disk pro další zpracování.



Obr. 27 Ukázka zapojení měřícího ústrojí

- **Výsledky měření**

Pro určení počátečních hodnot byl nejdříve změřen samotný vzorek pryskyřice vytvrzené při pokojové teplotě. Výsledky v *Tab. 7* ukazují, jak se permitivita tohoto vzorku zvyšuje s narůstající teplotou a mírně i s vyšším napětím. To samé lze pozorovat i u ztrátového činitele.

Tab. 7 Výsledky měření samotného vzorku pryskyřice

napětí	500 V		750 V		1000 V	
teplota	ε_r	tan δ	ε_r	tan δ	ε_r	tan δ
23,9 °C	3,479	0,0197	3,479	0,0197	3,480	0,0197
30 °C	3,651	0,0265	3,662	0,0269	3,670	0,0272
35 °C	3,965	0,0404	3,968	0,0406	3,978	0,0410
40 °C	4,350	0,0594	4,354	0,0598	4,355	0,0594

U vzorku teflonu lze pozorovat v *Tab. 8*, že při zvyšující teplotě i napětí si vzorek udržuje téměř nemněné hodnoty permitivity, které jsou při porovnání s pryskyřicí nízké. Hodnota *tan δ* mírně klesá při zvyšující se teplotě.

Tab. 8 Výsledky měření samotného vzorku teflonu

napětí	500 V		750 V		1000 V	
teplota	ε_r	tan δ	ε_r	tan δ	ε_r	tan δ
23,7 °C	2,002	0,00025	2,003	0,00028	2,003	0,00029
30 °C	2,002	0,00020	2,002	0,00020	2,003	0,00021
35 °C	2,001	0,00017	2,002	0,00018	2,002	0,00018
40 °C	2,000	0,00017	2,000	0,00018	2,000	0,00018

Tab. 9 Výsledky měření samotného vzorku silonu

napětí	500 V		750 V		1000 V	
teplota	ε_r	tan δ	ε_r	tan δ	ε_r	tan δ
24,9 °C	2,923	0,00160	2,923	0,00162	2,923	0,00164
30 °C	2,296	0,00160	2,895	0,00162	2,893	0,00163
35 °C	2,865	0,00162	2,865	0,00163	2,865	0,00164
40 °C	2,843	0,00165	2,843	0,00165	2,843	0,00166

Výsledky měření silonu ukazují (*Tab. 9*) jak hodnoty permitivity s narůstající teplotou klesají. Ztrátový činitel se s teplotou u tohoto vzorku téměř nemění, ale oproti teflonu je jeho hodnota o řád vyšší.

Hodnoty permitivity pryskyřice s přidaným teflonem lze vidět v *Tab. 10*. Nejprve byla změřená hodnota nevytvrzeného finálního produktu. Hodnota ε_r nevytvrzeného vzorku byla 3,496. Poté byla měřena permitivita a ztrátový činitel vytvrzených vzorků v závislosti na vzrůstající teplotě. Lze si všimnout, že přidáním teflonu se zlepšila permitivita při vyšších teplotách o 0,55 oproti samotné pryskyřici. Také je znát rozdíl mezi hodnotami vytvrzeného a nevytvrzeného vzorku. Tím lze říci, že správný proces vytvrzování výrazně ovlivňuje výsledný produkt.

Tab. 10 Výsledky měření permitivity vzorku pryskyřice + teflon

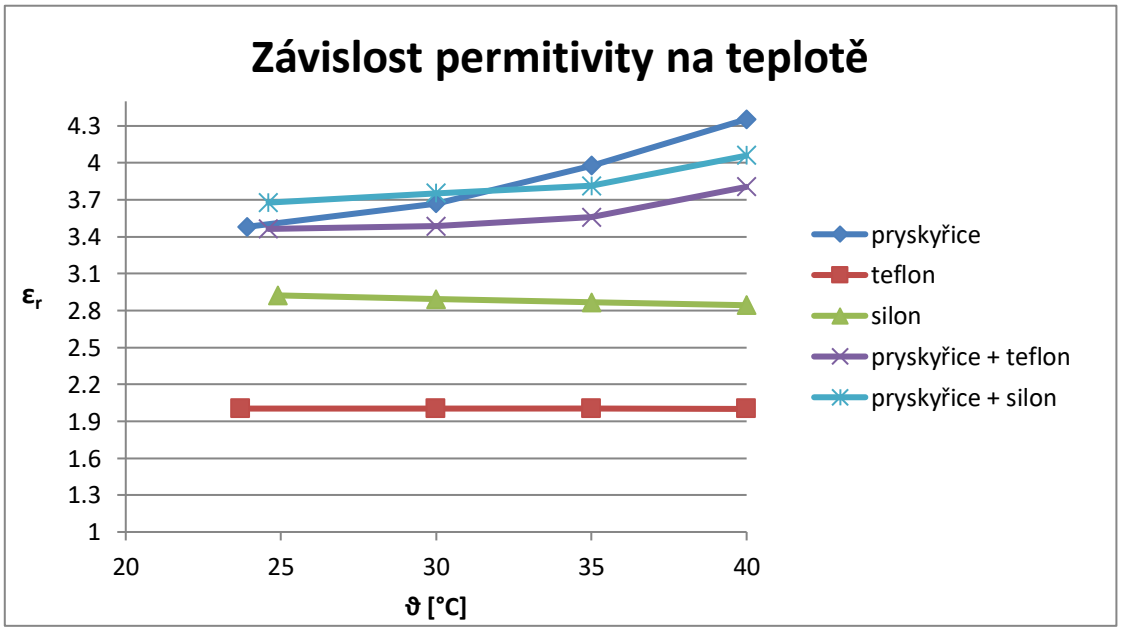
napětí	1000 V	
teplota	ε_r	tan δ
24,6 °C	3,463	0,00906
30 °C	3,484	0,00955
35 °C	3,557	0,01170
40 °C	3,805	0,02240

V *Tab. 11* jsou uvedeny hodnoty permitivity vzorku pryskyřice s použitou vsázkou silonem. Oproti vzorku s teflonem je patrné zhoršení permitivity i ztrátového činitele, ale v porovnání se vzorkem samotné pryskyřice lze pozorovat zvýšenou hodnotu permitivity při počáteční teplotě měření, ale nižší hodnotu při teplotě 40 °C. Hodnota permitivity nevytvrzeného vzorku při teplotě 24,6 °C byla 3,769, a proto lze také říci, že vytvrzování vzorků má velký vliv na výslednou hodnotu.

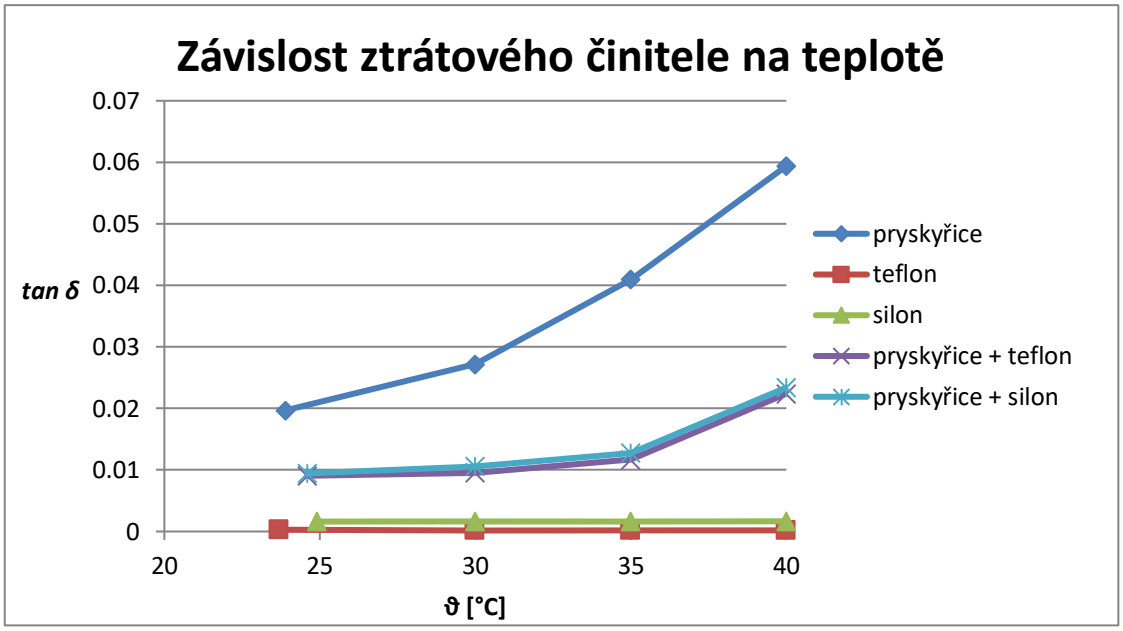
Tab. 11 Závislost permitivity na teplotě vzorku pryskyřice + silon

napětí	1000 V	
teplota	ε_r	tan δ
24,6 °C	3,677	0,00944
30 °C	3,752	0,01060
35 °C	3,812	0,01280
40 °C	4,059	0,02340

V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky permitivity a ztrátového činitele v závislosti na teplotě. Zároveň lze vidět, že se správně reflektují vlastnosti přidaných materiálů do výsledných kompozitů. Teflon zde má vždy nejlepší výsledky a po přidání do pryskyřice se i přesto udrží s výsledky níže než je u kompozitu se silonem. U kompozitu právě se silonem si můžeme u permitivity všimnout u prvních měření vyšších hodnot. Lze z toho vyvodit, že jde o chybu zaviněnou nedokonalým vytvrzením či špatně umístěným vzorkem do měřícího ústrojí.



Obr. 28 Výsledky měření permitivity



Obr. 29 Výsledky měření ztrátového činitele

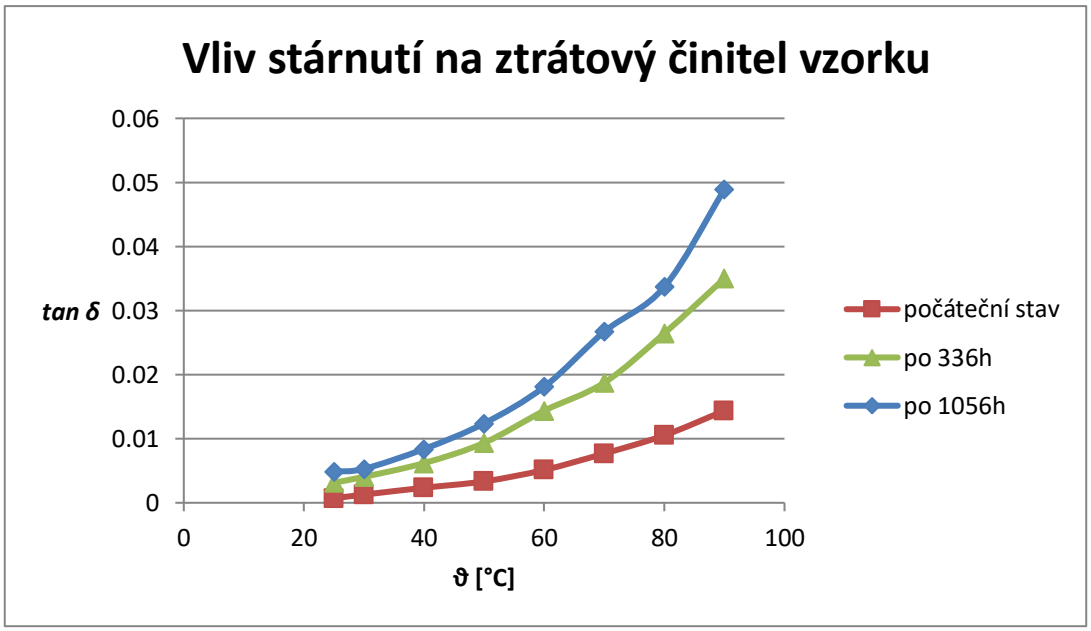
U ztrátového činitele teflonu se zdá, že jeho hodnoty jsou nulové, ale po nahlédnutí do předchozích tabulek s výsledky je patrné, že jen hodnoty teflonu jsou oproti ostatním velice nízké. Můžeme si také všimnout, že permitivita neroste tak strmě jako ztrátový činitel. Závěrem by mohlo být, že *tan δ* lze považovat za další veličinu možnou měřit a sledovat v online diagnostickém systému pro určení stárnutí EIS a zvyšující se teploty. Jeho hodnota se mění v čase, zatímco ε_r je více závislá např. na frekvenci. Z obecných předpokladů lze brát ε_r také závislou na elektrickém poli, jehož některé ukázky výpočtu jsou v kapitole 2.3.1, viz vzorce 1.13 a 1.14.

4.2 Experiment stárnutí řepkového oleje

Provedené stárnutí bylo uskutečněno na vzorcích řepkové oleje a jeho tepelné stárnutí probíhalo v peci při teplotách viditelných v *Tab. 12*. Po vyndání vzorků z pece po určitých časových etapách byl měřen ztrátový činitel vzorků. Vzorky byly umístěny v peci po dobu 44 dní. Měření *tan δ* probíhalo na stejném stroji jako v minulém měření a to Tettex 2831. Jelikož šlo o vzorek inhibovaného řepkového oleje, byl přístroj upraven pro měření kapalných izolantů. Výsledky je možné vidět v následující tabulce a v následujících grafech.

Tab. 12 Výsledky měření stárnutí řepkového oleje

doba tepelné expozice	0 h	168 h	336 h	576 h	672 h	840 h	1056 h
teplota v peci:	110 °C	180 °C	140 °C	140 °C	160 °C	160 °C	140 °C
25 °C	0,00071	0,00218	0,00315	0,0022	0,00432	0,00813	0,00485
30 °C	0,00128	0,00271	0,00405	0,00272	0,00493	0,01118	0,00530
40 °C	0,00235	0,00512	0,00620	0,00448	0,00774	0,01529	0,00840
50 °C	0,00334	0,00719	0,00936	0,00673	0,01248	0,02491	0,01240
60 °C	0,00513	0,01064	0,01437	0,01065	0,01751	0,03458	0,01810
70 °C	0,00769	0,01586	0,01875	0,01455	0,02548	0,04652	0,02670
80 °C	0,01053	0,02217	0,02645	0,02065	0,03353	0,06345	0,03370
90 °C	0,01437	0,03175	0,03501	0,02659	0,04863	0,08234	0,04890



Obr. 30 Výsledky ztrátového činitele po stárnutí v peci

Na *Obr. 30* je ztrátový činitel v závislosti na teplotě na počátku, po 336 hodinách v peci a na konci experimentu po 1056 hodinách v peci. Z výsledků je patrné, že obecné předpoklady využitelnosti *tan δ* pro použití v online diagnostickém systému jsou velice příznivé. Tyto výsledky vychází z faktu, že *tan δ* je ukazatelem stárnutí elektroizolačních materiálů a je závislý na teplotě. Proto je patrně viditelné, jak se po vyndání vzorků z pece ztrátový činitel zhoršuje s narůstající teplotou měření.

Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se s problematikou online diagnostických systémů a jejich možnostmi. Dále proběhlo zhodnocení nabízených systémů a čidel vybranými firmami a pozitivně hodnocenými vědeckou společností. Z uvedených poznatků byl sestaven návrh jednoduchého online diagnostického systému.

Po představení vybraných offline diagnostických měření, jejichž výsledky využíváme pro tvoření predikce stavů transformátoru po uvedení do provozu, jsem si zvolil zaměření na zkoumání degradačních faktorů ovlivňující papírovou izolaci vinutí a oleje. Tyto stavy nejvíce ovlivňuje teplota, díky které se v oleji utvářejí nechtěné prvky, jako jsou rozpuštěné plyny (vodík, etan, metan, etylen, acetylen, propylen, oxid uhličitý, oxid uhelnatý). Vznik těchto plynů není zapříčiněn jenom teplotním namáháním, ale i elektrickými vadami jako je jiskření, částečné výboje a elektrické oblouky. Je proto potřeba měřit rozložení teplot v dolní a horní vrstvě oleje, určit možné umístění hot-spot teploty a popř. měřit změny teplot na vstupu a výstupu potrubí chladicího systému. Poté je měření zaměřeno na analýzu obsahu vlhkosti v oleji, kterou zapříčiní vlhkost v papírové izolaci vinutí a také ve velké míře přijímaní vlhkosti z okolního vzduchu v dilatační nádobě.

Na řešení problematiky online monitorovacích systémů se zaměřuje několik předních výrobců. Ti nabízejí kompletní řešení sledování a analýz pro téměř všechny degradační faktory a lze tak od jednoho dodavatele získat kompletní online diagnostický systém. Mezi tyto dodavatele patří např. GE Enegy Services, LumaSence, Morgan Schaffer a MTE. Zároveň lze říci, že každá z vysokých škol se zaměřením na elektrotechnická měření se snaží některý takový systém vytvořit a testovat.

Mnou navržený monitorovací systém se zaměřuje na měření teplot oleje ve všech částech nádoby (dolní, střední a horní), teplot v chladícím oběhu a obsahu vlhkosti a rozpuštěných plynů v oleji. Vybral jsem pro to dva měřící systémy, Hydran M2 a Kelman Taptrans od firmy GE Energy Services. Tato firma se zaměřuje na kompletní řešení sledování stavu transformátorů a nabízí i propojitelné systémy pro měření kapacit průchodek a částečných výbojů. Senzor Hydran M2 se zaměřuje převážně na měření obsahu vodíku v oleji, ale zvládá měřit i další z běžných plynů a určuje obsah vlhkosti.

Zároveň bude sloužit jako senzor teploty v dolní vrstvě oleje. Dva z jeho analogových proudových výstupů se využijí pro měření teplot na vstupu a výstupu z chladících radiátorů pomocí připojených odporových teploměrů s analogovými převodníky. Systém Taptrans slouží jako tzv. multi-gas senzor a zvládá měřit 9 běžných rozpuštěných plynů v oleji a vlhkost. Zároveň je zde možné aplikování měření teploty vinutí pomocí optovláknových senzorů, které bude využito. Jeho další dva vstupy budou také využity pro měření teplot v horní a střední vrstvě oleje a jeho analyzátor plynů a vlhkosti bude zaznamenávat znovu teplotu oleje v dolní části transformátoru. Umístění těchto senzorů bude na výpustných ventilech umístěných povětšinou úhlopříčně proti sobě na nádobách transformátorů. Celý systém bude propojen do sítě přes sériovou linku RS 232 a přiveden do počítače obsluhy pomocí ethernetu RJ45. Na něm bude software Perception určený přímo pro řešení výsledků analýz a měření. Možnost je zde využití a dalšího zpracování výsledků přes webovou aplikaci. Zpracováním výsledků je po dosazení do vybraných modelů možné sledovat důležité faktory stárnutí a vyhledat hot-spot teplotu.

Jako možné vylepšení by bylo vhodné přidat systém LumaSMART od firmy LumaSence s kompletním řešením snímání teplot v transformátoru. Zároveň po provedení experimentů a po rešerši by se mohl systém obohatit o online měření ztrátového činitele, pracujícího na principu automatického odebrání vzorků, jeho změření a vrácení do nádoby. Hlavní důvod je, že ztrátový činitel je závislý a mění se v čase s teplotou, jak ukázaly měření v závěrečné části této práce. Během měření ztrátového činitele by se jako další ukazatel mohlo využít měření elektrické pevnosti, barvy či viskozity oleje. V neposlední řadě je možné měřit online diagnostickým systémem i vibrace mechanických částí způsobující mechanické vady a ničení spojů vedoucí k elektrickým poruchám.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] BARTÁK, A. a kol.: *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. Praha 1984.

[2] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-704-3444-9.

[3] *Pasivní součástky: Transformátory* [online]. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: http://zozei.sssebrno.cz/889/

[4] MAJLING, Eduard *Transformátor- základní vlastnosti a dělení* [online]. 2015 [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/elektrina/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni/

[5] *Transformers*. New York: McGraw-Hill, c2005. ISBN 0-07-144785-7.

[6] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-49-X.

[7] RUSNOK, SOBOTA Cvičení z elektrických strojů[pdf], Ostrava 2013

[8] ČERVENÝ, J.: *Stavba elektrických strojů*, 2012

[9] ETRA výkonové transformátory. *El-insta* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: http://www.el-insta.cz/etra-vykonove-transformatory/

[10] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.

[11] *Návod pro výkonový transformátor* [pdf]. ABB [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: http://www.vfservis.cz/files/000279_Navod_pro_vykonovy_transformator.pdf

[12] *Olejové transformátory: Olej* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/olej/

[13] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.

[14] TŮMOVÁ, Olga a Dušan PIRICH. *Nástroje řízení jakosti a základy technické diagnostiky*. V Plzni: Západočeská univerzita v Plzni, 2003. ISBN 8070432470.

[15] KREIDL, M., ŠMÍD, R.:*Technická diagnostika*, Praha: BEN technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.

[16] ČSN 35 1086

[17] MENTLÍK V., PROSR P. – FEL ZČU Plzeň, *Možnosti laboratorního výzkumu on-line diagnostiky výkonových transformátorů*[pdf]

[18] MENTLÍK, V. TRNKA, P.. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-412-5.

[19] CIPÍN, R. *Matematické modely transformátorů a asynchronních motorů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 77 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.

[20] SIMONI L. *Fundamentals of endurance of elektrice insulatig materials*, CLUEB Publ., Bologna, 1983

[21] GJAERDE A. C.: *Multifactor ageing models- Origin and similarities*, IEEE, Vol. 13. No.1, 1997.

[22] LALAM B.F., The Giam H.: *Pressure effect on the electrical ageing of polyetylen*, J. Phys. D: Appl. Phys. 33, L133-L136, UK, 2000.

[23] *Causes of insulation degradation and failure modes*. [online]. [cit. 2017-10-24]. Dostupné z: http://www.modulesdirect.com/blog/causes-of-insulation-degradation-and-failure-modes/

[24] *T2 Transformer Temperature Probe* [online]. Neoptix [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://www.neoptix.com/t2-transformer.asp

[25] PROSR P., BRANDT M. *Diagnostika olejem plněných transformátorů*[pdf], ELEKROSCOPE

[26] *Monitoring teploty vinutí* [online]. LumaSence Technologies [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://www.pyrometrcz.cz/reseni/globalni-energie/prenos-distribuce/transformatory/monitoring-teploty-vinuti/

[27] *LumaSense Technologies: LumaSHIELD Controller Installation Guide: Winding Temp. Sensors User Manual – Download* [online]. [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: http://www.manualsdir.com/manuals/363926/lumasense-technologies-lumashield-controller-installation-guide-winding-temp-sensors.html?download

[28] ČSN EN 60076-2

[29] ARJUNA RAO,, S. a G. GIRIJA. *Electrical India: Thermal Performance Of Distribution Transformers* [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: http://www.electricalindia.in/blog/post/id/11616/thermal-performance-of-distribution-transformers

[30] SAHA T. K., *Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, pp. 903-917, 2003.

[31] J. DONČUK, V. MENTLÍK, J. VELEK, I., *Úroveň vývoje plynů jako diagnostické hledisko stavu výkonových transformátorů*[pdf]

[32] DESOUKY S. S., KALAS A. E., *Modification of Duval triangle for diagnostic transformer fault through a procedure of dissolved gases analysis*, *2016 IEEE* 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering *(EEEIC)*, Florence, 2016, pp. 1-5.

[33] *Stackoverflow: How to create Duval Triangle in canvas* [online]. [cit. 2018-02-1]. Dostupné z: https://stackoverflow.com/questions/36456577/how-to-create-duval-triangle-in-canvas

[34] KADLEC, K. *Automa: Provozní analyzátory plynů* [online]. [cit. 2017-10-1]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/provozni-analyzatory-plynu-2001_10_33683_472/

[35] AIZPURUA J. I. et al., *Improving the accuracy of transformer DGA diagnosis in the presence of conflicting evidence*, *2017 IEEE* Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, 2017, pp. 286-289.

[36] DAVYDOV V. G., ROIZMAN O., *Moisture assessment in power transformers,* Dostupnéz:https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VN160_Moisture_assessment_in_power_transformers_-_Lessons_Learned.pdf

[37] *LumaSence Technologies: LumaSMART Controller* [pdf]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://152510.w10.wedos.ws/wp-content/uploads/2017/03/EN-LumaSMART_Datasheet.pdf

[38] *LumaSence Technologies: LumaSHIELD Controller* [pdf]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://152510.w10.wedos.ws/wp-content/uploads/2017/03/EN-LumaSHIELD_Datasheet.pdf

[39] *TPT-32 Temperature sensor for oil-fi lled transformers* [pdf]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.fiso.com/admin/useruploads/files/tpt-32.pdf

[40] *LumaSence Technologies: Fiber Optic Temperature Sensor OTG-T* [online]. [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: https://www.lumasenseinc.com/EN/products/temperature-measurement/luxtron-fiber-optic-temperature-sensors/fot-and-gaas-probes/fiber-optic-temperature-sensor-otg-t.html

[41] *LumaSence Technologies: Winding Hot Spot Monitoring* [online]. [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: https://www.lumasenseinc.com/EN/solutions/global-energy/transmission-distribution/transformers/winding-hot-spot-temperature/winding-hot-spot-monitoring.html

[42] *LumaSence Technologies: Luxtron m600 Temperature Monitor* [pdf]. [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: http://152510.w10.wedos.ws/wp-content/uploads/2017/03/EN-m600-OEM_datasheet.pdf

[43] *JUMO: Odporové teploměry* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: http://www.jumo.cz/produkty/teplota/odporov%C3%A9-teplom%C4%9Bry/3397/celkov%C3%BD-p%C5%99ehled.html

[44] *Günther: 52-WOS, Odporové teploměry bez chránících trubek* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: https://www.guenther.eu/ea7a033b-f800-ecce-fb26-3c97be81cdb1?Edition=cz

[45] *Siemens: Sensor SITRANS TS500* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: https://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/en/process-instrumentation/temperature-measurement/temperature-sensors/Pages/sensor-sitrans-ts500.aspx

[46] *LumaSence Technologies: SmartDGA ® Monitoring Solutions* [pdf]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: http://152510.w10.wedos.ws/wp-content/uploads/2017/03/EN-SmartDGA-Monitoring-Solutions_Brochure-1.pdf

[47] *Tmvss: Monitoring transformátorů* [online]. [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: https://www.tmvss.cz/aplikace/energetika/monitoring-transformatoru

[48] *GE Grid Solutions: Hydran M2* [pdf]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/MD/Hydran_M2_GEA-12934A-E_160512_R005_HR.pdf

[49] *Monitoring transformátorů: CALISTO 2 = EFEKTIVNÍ ÚDRŽBA STROJE* [online]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: https://www.trafop.cz/monitoring-transformatoru/

[50] *Tectra a.s.: Monitoring a diagnostika transformátorů* [online]. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: http://www.tectra.cz/monitoring-transformatoru

[51] *Morgan Schaffer: Calisto Online DGA Monitors for Power Transformers and Other Oil-Filled Electrical Assets* [pdf]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: https://www.morganschaffer.com/public/CALISTO_brochure_EN_122017_20180314130301.pdf

[52] *MTE: HYDROCAL 1001 + Composite Gas - in - Oil Sensor with Moisture in Oil Measurement* [pdf]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://www.mte.ch/data/files/HYDROCAL%201001%20plus%20English%2011.2017.pdf

[53] *MTE: HYDROCAL 1009 Multi-Gas- in-Oil Analysis System with Transformer Monitoring Functions* [pdf]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://www.mte.ch/data/files/HYDROCAL%201009%20English%2003-2018.pdf

[54] *SERVERON TM8 On-line DGA Monitor* [pdf]. [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: http://cdn2.hubspot.net/hubfs/227797/2016/Serveron_Nurture_Campaign/AP-G34-02A-03E_Serveron_TM8.pdf

[55] *Qualitrol: Multi Gas Serveron® TM8 On-line Gas Chromatography Dissolved Gas Monitor* [online]. [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: https://www.qualitrolcorp.com/products/dissolved-gas-analyzers/multi-gas-analyzers/serveron-tm8-multi-gas-on-line-dissolved-gas-monitor/

[56] *Spatialworld: Kelman DGA 900, Hydran M2, Taptrans* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: http://www.spatialworld.fi/en/md/

[57] *LumaSence technologies: SmartDGA Guard*™ [online]. [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: http://www.pyrometrcz.cz/produkty/snimani-plynu/smartdga-pro-transformatory/smartdga-guard/#

[58] *ZREW Transformatory: Výroba transformátorů: Stavba: Vinutí* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://zrew-transformatory.pl/cz/produkcja-transformatorow/

[59] *GE Grid Solutions: Kelman Taptrans On-line DGA & moisture for transformer with on-load tap changer* [pdf], Dostupné z: http://www.spatialworld.fi/wp-content/uploads/2016/01/Kelman-Taptrans-GEA-17282D-E_160128_R001_A4_HR.pdf

[60] *GE Grid Solutions: Hydran M2* [pdf], Dostupné z: https://www.scribd.com/document/378397604/Hydran-M2-GEA-12934A-E-160512-R005-HR

[61] *Tmvss: GE Energy* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: https://www.tmvss.cz/vyrobci/ge-energy

[62] *Case, computer, home pc, pc* [jpg]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: https://cdn0.iconfinder.com/data/icons/hardware-outline-icons/60/Hardware_Hardware-01-128.png

[63] *GE grid solution: Perception Fleet Transformer Fleet Risk Management Software System* [jpg]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: https://www.gegridsolutions.com/press/PerceptionFleet/PerceptionFleet-tab2-img.jpg

[64] *VM Plast: Prodej a opracování technických plastů: PA6 - Fyzikální vlastnosti* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://www.vmplast.cz/sortiment/polyamid/ertalon/pa6-fyzikalni-vlastnosti/

[65] *VSS: Alkalický polyamid PA 6 (silon)* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://www.vss-plasty.cz/?page_id=32

[66] *Sittech: PTFE - technické informace* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://www.sittech.cz/ptfe-technicke-informace

[67] *NOMEX®: a family of insulation materials* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/ReliatranV3/en_RU/products/Nomex/More/Nomex_family.html#418

Přílohy

Příloha A – *Standardy pro oleje použité v olejích [5]*

charakteristika	požadavky
hustota při max. 29,5 °C	0,89 g/cm3
kinematická viskozita při max. 27 °C	27 eSt
povrchové napětí při 27°C min.	0,04 N/m
bod vzplanutí, Pensky-Marten min.	140 °C
bod tuhnutí, max.	-6°C
hodnota kyselosti, max.	0,03 mg KOH/g
elektrická pevnost, min.:	
-prvotně	30 kV
-po filtraci	60 kV
rozptylový faktor	0,002
měrný odpor, min.:	
-při 90°C	$30x10^{12}$ Ω·cm
-při 27°C	$1500x10^{12}$ Ω·cm
oxidační stabilita:	
hodnota kyselosti po oxidaci, max.	0,40 mg KOH/g
kal po oxidaci, max.	0,10 % váhy
obsah vody (prvotně), max.	50 ppm váhy

Příloha B – ***Tabulka vybraných elektroizolačních materiálů a jejich vlastností a teplotní třídy izolantů [10], [67]***

materiál	Ep[kV/mm]	tan δ	εr	teplotní třída
Nomex®	30-40	-	2,5	Y
papír	30	-	3,5	-
dřevo	-	-	2,04 - 7,3	-
min. oleje	45-55	0,001	2,1-2,4	F
syn. oleje	60-105	0,001-0,0002	2,5-2,8	250
voda	-	-	80	-
vzduch	3	10-5	1,00059	-

relativní index teplotní odolnosti	teplotní třída	písmenné označení
<90	70	-
>90-105	90	Y
>105-120	105	A
>120-130	120	E
>130-155	130	B
>155-180	155	F
>180-200	180	H
>200-220	200	-
>220-250	220	-
>250	250	-

Příloha C – *Slída*

Jde o přírodní minerál, který lze najít v mnohé z modifikací. Pro elektroizolační účely jsou vhodné modifikace muskovit (draselná slída) či flogopit (hořečnatá slída). Největší využitelnost slídy je způsobena, jejími prakticky neměnnými vlastnostmi během celé škály teplot až po její maximální tzv. kalcinační teplotu. Během kalcinační teploty slída ztrácí vázanou vodu ve své struktuře a stává se prakticky nepoužitelnou, vzhledem ke skokovým změnám vlastností. Slída se používá převážně ve dvou formách, které lze rozdělit do dvou skupin. Jedná se o mikanity a materiály z rekonstruované slídy. V prvním provedení, mikanitech, se slída používá v základní formě lístků – krystalů, které jsou pro slídu tolik patrné. Druhá skupina, materiály z rekonstruované slídy, jsou odlišné v použití, jak již název říká, rekonstruované formě slídy. V obou případech vzniká tzv. slídový papír, za použití různé technologie výroby dále rozdělovaný na kalcinovaný či nekalcinovaný. Podkladem je papír či již častěji skleněná tkanina a jako pojivo slouží syntetické pryskyřice. V transformátorové izolační technice se se slídou téměř nesetkáme, ale po prozkoumání nabízených izolací vinutí či izolace mezi jednotlivými vodiči vinutí nabízí několik výrobců právě i izolaci, ve které jsou příměsi slídy. [13]

Příloha D – ***Doporučený postup měření a zkoušek na transformátorech [10]***

Název zkoušky nebo měření	Zkouška	
	typová	kusová
Měření izolačního odporu	+	+
Měření odporu vinutí za studena stejnosměrným proudem	+	+
Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách	+	+
Kontrola natočení fází	+	+
Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	+	+
Zkouška indukovaným napětím	+	+
Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno	+	+
Měření charakteristiky naprázdno	+	-
Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko	+	+
Oteplovací zkouška	+	-
Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým impulzem: a) na vinutí se jmenovitým napětím do 132 kV b) a vinutí se jmenovitým napětím nad 132 kV	 + +	 - +
Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí na transformátoru: a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	 - +	 - +
Zkratová zkouška	+	-
Měření nulové složky reaktance na transformátoru a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	 - -	 - -
Měření hluku na transformátorech a) s výkonem do 1600 kVA včetně b) s výkonem nad 1600 kVA	 + -	 - -
Zkouška přepínače odboček	+	+
Zkouška el. Pevnosti izolace spínacími impulzy	-	-
Měření částečných výbojů	-	-
Měření ochrany rádiového příjmu před rušením	-	-
Zkouška oleje pro transformátory s olejovou náplní a) zkouška průrazného napětí oleje b) měření obsahu vody v oleji transformátorů se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším c) měření tan δ R0 a εr oleje transformátorů se jmenovitým výkonem 110 kV a vyšším	 + + +	 + + +
+ vykonává se; – nevykonává se		
*) Pro transformátory určené pro energetiku – typová zkouška		